

P- ve S-dalga hızları ile jeolojik birimlerin sökülebilirliği üzerine bir değerlendirme

An evaluation on rippability of geological units by seismic P- and S-wave velocities

Hakan KARSLI^{1*}, Ali Erden BABACAN², Mustafa ŞENKAYA³, Kenan GELİŞLİ⁴

^{1,2,3,4}Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
hkarqli@ktu.edu.tr, a.babacan@ktu.edu.tr, msenkaya@ktu.edu.tr, gelisli@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.04.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 18.08.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 04.08.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.35920
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Sismik P- ve S- dalga hızları içinde yayıldıkları jeolojik birimlerin (zemin, kaya) fiziksel özelliklerine, ayrışma ve kırık-çatlak derecelerine, derinlik ve gözenek yapısına doğrudan bağlı olup, kazı çalışmalarında sökülebilirliğin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Jeolojik birimlerin P- ve S-dalga hızları arazide sırasıyla sismik kırılma ve çok kanallı yüzey dalgası analizi (ÇKYDA) yöntemleri ile belirlenebilir. Sismik hızların 1 ve 2 boyutlu (1B ve 2B) dağılımları ile jeolojik birimlerin jeoteknik nitelikleri ile ilişkili olarak sökülebilirlik sınıfları hızlı ve güvenilir olarak tahmin edilebilir. Bu çalışmada, Trabzon il merkezinde dört farklı alanda yapılan sismik ölçümlerden elde edilen veriler, ölçüm alanlarındaki jeolojik birimlerin sökülebilirlikleri için uluslararası standartlara (Caterpillar ve NEHRP) göre hazırlanmış P- ve S-dalga hızı sınıflama tabloları kullanılarak yeniden değerlendirilmiş ve S-dalga hızının dahil edildiği ilksel bir sismik hız-sökülebilirlik-jeoteknik sınıflama tablosu oluşturulmuştur. Böylece, jeolojik birimlerin türü (zemin, kaya) ve mekanik özelliği (sıkı, katı, sert) S-dalga hızına, sökülebilirlik dereceleri ise, P-dalga hızına göre tanımlanmıştır. Buna göre, genel olarak, çalışma alanlarındaki jeolojik birimler çok kolay-kolay sökülebilir az sıkı zemin ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 300$ m/s), orta derecede sökülebilir katı- sıkı zemin ($V_p \approx 900-1500$ m/s, $V_s \approx 400-600$ m/s), zor sökülebilir çok sıkı-katı veya ayrışmış kaya ($V_p \approx 1500-2100$ m/s, $V_s \approx 600-800$ m/s), çok zor-son derece zor sökülebilir sağlam kaya ($V_p \approx 2100-2400$ m/s, $V_s \approx 800-1100$ m/s) ve sökülemez sert kaya ($V_p > 2400$ m/s, $V_s > 1100$ m/s) şeklinde sınıflandırılmıştır. Ayrıca, 2B P-dalga hızı-derinlik kesitleri sayesinde jeolojik birimlerin yaklaşık sınırlarının belirlenebileceği gösterilmiştir. Sonuç olarak, P- ve S-dalga hızlarının birlikte değerlendirilmesinin jeolojik birimin sökülebilirliğinin yanında, türü (zemin veya kaya), mekanik ve fiziksel özellikleri hakkında da bilgi vermektedir ve böylece sökülebilirlik tahmin hatalarının azaltılmasına ve kazı çalışmalarının yönlendirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Sismik P- ve S-dalga hızları, Sökülebilirlik, Trabzon İli.

Abstract

Seismic P- and S- wave velocities are directly dependent on the physical properties of the geological units (soil and rock) in which they propagate, the degree of decomposition and fracture-crack, depth and porosity, and are widely used in estimating the rippability in excavation works. P- and S-wave velocities of geological units can be determined by seismic refraction and multichannel surface wave analysis (MASW) methods, respectively, in the field. The rippability classes can be estimated quickly and reliably in relation to the distribution of the seismic velocities in 1 and 2 dimensions (1D and 2D) and geotechnical characteristics of geological units. In this study, data from many in situ seismic measurements performed in four different areas in vicinity of center of Trabzon province were re-evaluated using P- and S-wave velocity classification tables prepared according to international standards (Caterpillar and NEHRP) for the rippability of geological units in the measurement areas and a primary seismic velocity-rippability-geotechnical classification table was prepared by including S-wave velocity. Therefore, the type (soil, rock) and mechanical property (firm, solid, hard, etc.) of the geological units are defined according to the S-wave velocity and the degree of rippability according to the P-wave velocity. Accordingly, in general, the geological units in the study areas are classified as very easy-to-easy, less firm soil ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 300$ m/s), moderately rippable solid- firm soil ($V_p \approx 900-1500$ m/s, $V_s \approx 400-600$ m/s), hard to rippable very firm-solid or weathered rock ($V_p \approx 1500-2100$ m/s, $V_s \approx 600-800$ m/s), very hard-to-extremely hard to rippable solid rock ($V_p \approx 2100-2400$ m/s, $V_s \approx 800-1100$ m/s) and non-rippable hard rock ($V_p > 2400$ m/s, $V_s > 1100$ m/s). In addition, it has been shown that the approximate limits of geological units on 2D P-wave velocity-depth sections. Consequently, the evaluation of P- and S-wave velocities together has provided the information about the type (soil or rock), mechanical and physical properties of the geological units besides the rippability, thus will ensure minimizing the rippability estimation errors and to the guiding of excavation works.

Keywords: Seismic P- and S-wave velocities, Rippability, Trabzon Province.

1 Giriş

Sökülebilirlik; genel olarak herhangi bir patlayıcı kullanmaksızın farklı tip ve güçteki kazı makineleri ile jeolojik birimlerin (zemin ve kayaların) sökülebilmek özelliğidir. Barajlar, metrolar, tüneller, boru hatları, yapı temelleri, taşocağı işletmeleri, kara-demir yolları, hava alanları, limanlar, kuleler gibi mühendislik yapılarının temel kazısı çalışmalarında sökülen ya da geçilen jeolojik birimlerin niteliğinin belirlenebilmesi, yapılacak kazı planlamaları ve maliyetleri açısından son derece önemlidir. Bunun için, jeolojik birimlerin

sökülebilirlik tespit çalışmalarında jeolojik, jeomekanik özelliklerinin yanı sıra, hızlı ve güvenilir sonuçlar üretmesi sebebiyle jeolojik birimlerin katılığı, sertliği, gözenekliği, ayrışma düzeyleri gibi fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde doğrudan bilgi sağlayan P (boyuna, sıkışma-genleşme) ve S (enine, kayma-burkulma) sismik dalga hızları güvenilir bir şekilde kullanılabilir [1]. Dolayısıyla, sökülebilirlik özelliklerine göre üretim miktarı ve zamanı hesaplanarak, kazıcı/sökücü ekipmanın seçimi daha etkin şekilde yapılabilir ve projenin maliyeti gerçekçi bir biçimde belirlenebilir [2]. Bu kapsamda, kazı çalışmalarının sistematik olarak gelişimi 1930 yılında başlamış, yıllardır farklı amaçlar için planlanan inşaat

*Yazışılan yazar/Corresponding author

projelerindeki kazı maliyetlerini tahmin etmeye yönelik teknikleri içerecek şekilde iyileştirilerek geliştirilmiştir [3]. Bu süreçteki deneyimler, her bir kaya tipi için sökülebilirlik ve sökücü araç üretim kombinasyonunun belirlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Bu kapsamda oluşturulan sökülebilirlik sınıflama sistemleri doğrudan ve doğrudan olmayan yöntemler olarak iki grupta toplanmıştır ve tamamen kayaç kütesinin P-dalga hızına göre yapılan sınıflamalar doğrudan olmayan yöntemler olarak ifade edilmiştir [4],[5]. Anon [6],[7] tarafından not edildiğine göre, dozer üretici firmalarının Komatsu ve Caterpillar farklı dozer tipleri için kaya kütlelerinin sökülebilirlik kartlarını veya tablolarını kayacın P-dalga hızına göre oluşturmuştur. Bu tablolar araştırmacılar tarafından sökülebilirliğin tahmin edilmesi için temel rehber olarak günümüze değin etkin bir şekilde kullanılmıştır [5],[8]-[11].

Bir kazı çalışmasında sökülebilirlik tahmini ve sökü aracının seçimine katkıları kanıtlanmış olan sismik dalga hızlarının belirlenmesinin en yaygın ve kullanışlı yöntemi sismik kırılma uygulamasıdır [9],[12],[13]. Bir profil boyunca bir kaynak vasıtasıyla oluşturulan sismik dalgaların belirli aralıklarda yere çakılmış jeofonlar sayesinde kaydedilen doğrudan ve kritik kırılma dalgalarının varış zamanlarının gecikme zamanı yaklaşımına göre analiz edilmesini içeren bu yöntemde, her bir tabakadan bilgi alınabilmesi için sismik hızın derinlikle artması temel koşuldur. Bununla birlikte, farklı türdeki kayaçlarının sökülebilirlik tahmininde yaygın olarak P-dalga hızından yararlanmak etkin bir yol olmasına rağmen [11],[14] sismik kırılma yönteminin bazı zayıflıklarından dolayı (saklı ara tabakalar: düşük hızlı ve ince yüksek hızlı ara tabakalar, yeraltı suyu varlığı), sökülebilirliğin sadece P-dalga hızına bağlı olarak tahmin edilmesi kazılacak jeolojik birimlerin gerçek özelliklerini tam olarak gösteremeyebilir.

P-dalga hızının belirlenmesinde sismik kırılma yönteminin bu zayıflığından sakınmak ve sökülebilirlik tahminlerinin güvenilirliğini artırmak için, bu saklı ara tabakaları belirlemede etkin olan çok kanallı yüzey dalgası analiz (ÇKYDA) yöntemiyle elde edilen S-dalga hızlarının derinlik profillerinden [15] yararlanılmaktadır. Bilindiği üzere, P-dalgası hızı herhangi bir malzemenin hacimsel modülü, kesme modülü ve yoğunluğuna doğrudan bağlı iken, S-dalga hızı sadece kesme modülü ve yoğunluğuna bağlıdır. Dolayısıyla, her iki dalga hızı, katı-sert ve yoğun jeolojik birimlerde, ayrılmış-sıkı olmayan az yoğun jeolojik birimlere göre daha hızlı seyahat etmektedir. Öyle ki, S-dalga hızının tamamen malzemenin sertliğine-katılığına bağlı olması ve özellikle bir kayacın ayrışma seviyesi azdan orta dereceli seviyeye ilerlediğinde S-dalga hızında %52 oranında bir azalmanın olduğu göz önüne alındığında, S-dalga hızı kaya sökülebilirliğinin değerlendirilmesinde önemli ilave bilgi sağlayabilir [16]. Bununla birlikte, sismik kırılma ilk varış verilerinin tomografik ters çözümleri sayesinde ölçüm yapılan sahanın yanal ve düşey yöndeki hız değişim bilgisini ve görüntülerini gösteren 1B, 2B ve 3B'lu kesitler elde edilebilir. Moustafa ve diğ. [17] ve İsmail ve diğ. [11] çalışmalarında elde ettikleri hız tomografi kesitleri üzerinde yaklaşık olarak hız değişim sınırlarını belirleyerek, jeolojik birimlerin sökülebilirlik derecelerini belirlemişlerdir. Böylece, ölçüm alanında nerelerde ve hangi derinliklerde hangi güç ve tipte sökü aracı kullanılacağına önceden tahmin edilmesi ve planlanmasına önemli katkılar sağlanabilir.

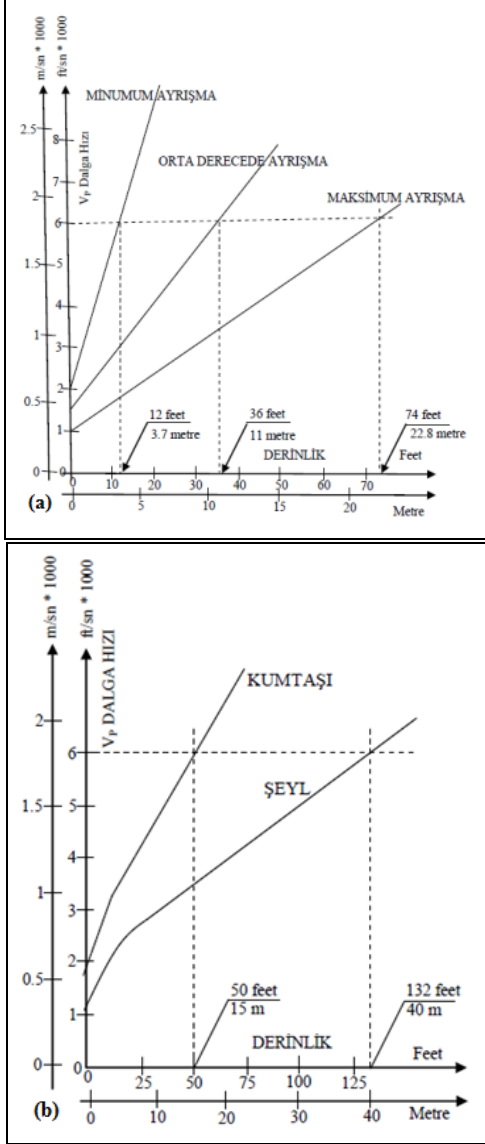
Kazı çalışmalarının planlanmasında zemin ve kaya jeolojik birimlerin sökülebilirlik tahminlerini geliştirmek için zemin ve kaya jeolojik birimlerin sismik hızlarının hem arazide hem de

laboratuvarda olmak üzere birden fazla yöntemle elde edilmesi, günümüzde en çok tercih edilen yoldur. S-dalga hızı zemin mekaniği ve mühendislik jeolojisinde çok değerli bir parametre olan maksimum kayma gerilmesi ile doğrudan ilişkili olduğundan, zemin ve kayaçların dinamik özelliklerini gösteren önemli bir bilgidir. Dolayısıyla, bu çalışmada, kazı çalışmalarında sökülebilirlik tahmininde sismik hızın önemi vurgulanmış ve P-dalgası hızına göre yapılan tahminlerin daha da güçlendirilmesi için S-dalga hızının da kullanılabileceği açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, kazılacak alanların sökülebilirlik sınıflamasına göre sınırlarının belirlenmesinde tomografik sismik hız-derinlik kesitlerinin önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmada, Trabzon İli'nde yoğun yapılaşmanın olduğu dört farklı sahada yerinde yapılan ölçümlerden elde edilen P-ve S-dalga hızları, literatürde yayınlanmış P-dalga hızı-sökülebilirlik [18], zemin-kaya [19] ve P-dalga hızı-sökülebilirlik-jeoteknik-sökü aracı tipi [14],[20],[21] sınıflama tabloları dikkate alınarak, S-dalga hızının dahil edildiği ilksel bir sismik dalga hızı-sökülebilirlik-jeoteknik tablosu oluşturulmuş ve inceleme alanlarının sökülebilirlik özellikleri gerçekçi bir biçimde ortaya konulmuştur.

2 Sismik hız-Sökülebilirlik-Jeoteknik tanımlama ilişkileri

Genel olarak sökülebilirlik değerlendirmesini etkileyebilecek ana jeolojik faktörler jeolojik birimlerinin türü, yapısı, sertliği, ayrışma durumu, kökeni-içeriği (tane boyutu, mineraller) ve sismik dalga hızı ile ilişkilidir [22]-[24]. Bunlardan sismik dalga hızları (P-dalga hızı-Vp, S-dalga hızı-Vs) jeolojik birimlerinin elastik özelliklerinin yanında, sıklık, sertlik, kaya kalitesi, ayrışma derecesi, çatlak ve kırıklığın derecesi [25],[26], gözeneklik [27]-[30] gibi birçok fiziksel özelliğini açıklar. Dolayısıyla sismik hızlarla jeolojik birimlerinin sökülebilirlik dereceleri arasında ilişkiler kurulabilir. Bununla birlikte, sismik hızlar aynı jeolojik birim içinde birimin fiziksel özelliklerindeki değişime göre değişkenlik gösterebilirler. Genel kural olarak, jeolojik birimin sıklığı-katılığı arttıkça sismik dalga hızı artarken, bu özellikler zayıfladıkça sismik hız azalır. Örneğin, bir granit kayacı tamamen ayrışma durumundan (topraklaşma) sağlam durumuna ~1600-6500 m/s'lik bir P-dalgası hız aralığında değişim gösterebilir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, genel olarak literatür kaynaklarından da görüleceği üzere [31], kayaçların aşırı ayrışma ürünü olan ve orta derecede kohezyonlu zeminlerde, genellikle $V_p < 1000$ m/s, $V_s < 300$ m/s iken, kohezyonlu ve gevşek çimentolu jeolojik birimler (kil, kumlu kil, çakıllı kil ve bloklu kil gibi pekişmiş birimler) ile, kayaçların aşırı ayrışma ürünü olan yeterince kohezyonlu zeminler $V_p \approx 1000-1500$ m/s, $V_s = 70-600$ m/s değerlerine sahiptirler. Magmatik ve başkalaşım kayaçlarının ayrışmaya uğramış zonları, zayıf ve gevşek yapı, çatlaklı, ayrışmaya başlamış tortul kayaçlar ve bazı hallerde kil, kum, çakıl ve blokların ileri derecede sıkışması ile meydana gelen, zemin/kayaç arası oluşumlar için $V_p \approx 1500-2000$ m/s, $V_s \approx 360-760$ m/s arasında değişmektedirler. Buna karşılık, $V_p > 2000$ m/s, $V_s > 760$ m/s olan jeolojik birimler ise sağlam, sert ve katı özellikler gösterirler [19]. Şekil 1a ve 1b magmatik, başkalaşım ve tortul kayaçlar üzerinde yapılan sismik hız belirleme çalışmalarından elde edilen P-dalga hızlarına karşılık kayaçların ayrışma derecelerini gösteren diyagramları göstermektedir [21],[32]. Diyagramlardan görüleceği üzere, genel olarak derinlikle hız değerleri ayrışma derecelerine bağımlı olmaksızın doğrusal olarak artmakla birlikte,

kayaçların ayrışma seviyeleri artmasına karşılık, farklı derinliklerde aynı hız değeri elde edilebilmektedir (Şekil 1a ve b'de kesikli yatay çizgi ile gösterilmiştir). Yani, derine doğru ayrışmanın artması ile birlikte sismik hızların azalması beklenirken, daha derin ortamlardaki sıkışmanın artmasına bağlı olarak sismik hızlar da artış gösterebilir. Dolayısıyla, daha derinde daha fazla ayrışmış kayacın hızı ile üstteki az veya orta derecede ayrışmış kayaçların sismik hızları farklı derinliklerde eşdeğer olarak ölçülebilir.



Şekil 1(a): Magmatik-başkalaşım. (b): tortul kayaçlar için P-dalga hızı-ayrışma derecesi ilişkisi [21],[32]'den düzenlenerek.

Figure 1. The relationship between P-wave velocity and degree of weathering for: (a): Igneous-metamorphic and (b): Sedimentary rocks, adapted from [21],[32].

Şekil 1'deki her iki diyagramda da sismik dalgaların daha yoğun ve sıkışmış zeminler ve kayaçlar içinde daha hızlı yayıldığı açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, dalga hızı zemin ve kayacın sertliği, sıklığı, ayrışma miktarı, kırık-çatlaklık derecesi gibi jeolojik özelliklerden etkilendiği için, bu özelliklerin hepsi sökülebilirliği de doğrudan etkiler [9],[26],[33]. Böylece, daha düşük sismik hız daha kolay sökülebilirlik anlamına gelir.

Caterpillar firması, uzun yıllar deneyimleri sonunda sismik dalga hızlarının jeolojik birimlerin sökülebilirliği için iyi bir gösterge olduğunu ifade etmiş ve çeşitli tipteki sökücü araçları için P-dalga hızı-sökülebilirlik derecelerini gösteren tablolar yayınlamışlardır (Tablo1) [18].

Tablo 1. Caterpillar D8R/D8T sökücü performansı için P-dalgası hızı, litoloji ve sökülebilirlik arasındaki ilişkiyi gösteren sökülebilirlik sınıflama tablosu [18]'den düzenlenmiştir.

Table 1. Rippability classification table showing the relationship between P-wave velocity, lithology and rippability for Caterpillar D8R/D8T ripper performance(adapted from [18]).

Sismik Hız ms ⁻¹ x 1000 feet x 1000	Sökülebilirlik														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nebati Toprak	Sökülebilir														
Kil	Sökülebilir														
Buzul Toprağı	Sökülebilir														
Magmatik Kayaçlar	Sökülebilir														
Granit	Sökülebilir														
Bazalt	Sökülebilir														
Kaplan Kaya	Sökülebilir														
Tortul Kayaçlar	Sökülebilir														
Şeyl	Sökülebilir														
Kumtaşı	Sökülebilir														
Silttaşı	Sökülebilir														
Kiltaş	Sökülebilir														
Konglomera	Sökülebilir														
Breş	Sökülebilir														
Kalkerit	Sökülebilir														
Kireçtaş	Sökülebilir														
Metamorfik Kayaçlar	Sökülebilir														
Sist	Sökülebilir														
Slyet	Sökülebilir														
Mineraller & Cevherler	Sökülebilir														
Kömür	Sökülebilir														
Demir Cevheri	Sökülebilir														

Orta ve ağır güçteki sökücü araçlar için zemin ve kayaçların Gökten ve İphar [14], Öncel [21] tarafından verilen sökülebilirlik nitelikleri ile Bailey [20] tarafından verilen jeoteknik sınıflaması, birleştirilerek oluşturulan bileşik sınıflama ise Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'deki sınıflama nitelikleri olup, sökülebilir (çok kolay, kolay), zor sökülebilir (orta, zor) ve/veya sökülemez (çok zor, son derece zor) olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere Tablo 1 ve Tablo 2 tamamen P-dalga hızına göre hazırlanmış tablolarıdır. Özellikle, Tablo 1'de jeolojik birimlerin sökülebilirlik sınıflamaları geniş P-dalga hız aralıklarında sökülebilir (rippabile), zor sökülebilir (marginal-yarı sökülebilir) ve sökülemez (non-rippabile) olacak şekilde 3 ayrı tanımlama ile yapılmıştır. Ayrıca jeolojik birimler toprak malzeme, magmatik, tortul, başkalaşım ve mineral-cevher olarak gruplandırılmıştır. Tablo 1 bu kapsamda incelendiğinde bitkisel (nebatî) toprak haricindeki tüm jeolojik birimlerin P-dalga hızlarının $V_p > 900$ m/s olduğu görülmektedir. Buna karşılık sökülebilir birimler $900 < V_p \leq 1800$ m/s, yarı veya zor sökülebilir birimler $1800 < V_p \leq 2400$ m/s ve sökülemez (patlayıcı kullanılması gerekir) birimler ise $2400 < V_p \leq 3500$ m/s hız aralıkları ile eşleştirilmiştir. Ancak jeolojik birimin ayrışma, çatlaklık, gözeneklik gibi fiziksel durumuna göre hız değerleri değişkenlik göstereceği için her bir hız aralığı Tablo 2'de gösterildiği gibi alt derecelere ayrılabilir. Bununla birlikte, jeolojik birimin kendi içindeki sıklık-katılık değişimi de bu alt derecelendirmeye önemli katkı sağlayabilir. Dolayısıyla, aynı jeolojik birimin S-dalga hızının değişiminin de değerlendirilmesi gerekir. Depreme dayanıklı yapı tasarımında zemin-yapı ilişkisinin belirlenmesinde gerekli olan S-dalgası hızına göre hazırlanan ve en yaygın kullanılan sınıflama Tablo 3'te [19] verilmiştir. Tablo 3'te verilen S-dalgası ile zemin ve kaya niteliklerini gösteren jeoteknik özelliklerin ilişkisi, kazı çalışmalarında jeolojik birimin sökülebilirlik araştırmasında P-dalga hızı ile yapılan tahmini destekleyici olabilir.

Tablo 2. Sismik hız-sökülebilirlik-Jeoteknik ilişkileri [14],[20],[21]'den düzenlenerek).

Table 2. Seismic velocity-rippability-Geotechnical relationships (adapted from [14],[20],[21]).

P-dalga Hızı (km/sn.)	Sökülebilirlik	Makine Sınıfı	Jeoteknik Tanımlama	Kazı/Sökü Tanımlama
0.3-0.6	Çok Kolay	D7	Kohezyonsuz zemin, aşırı ayrışma ürünleri	Kazı makinaları ile kolayca kazılabilir
0.6-0.9	Kolay	D7-D8	Kohezyonlu zemin ve aşırı ayrışma ürünleri	Kazı makinaları ile güç de olsa kazılabilir
0.9-1.5	Orta	D8	Ayrışma ürünleri, altere ve yumuşak kayalar	Sökücü araçlarla parçalanarak sökülebilir
1.5-2.1	Zor	D9	Sert, sıkı zeminler ve sağlam kayalar	Kompresör ile veya dinamitle parçalanarak sökülebilir
2.1-2.4	Çok Zor	D9-D10		
2.4-2.7	Son Derece Zor	D10		

Tablo 3. NEHRP [19]'in S-dalga hızına göre zemin ve kaya sınıflaması.

Table 3. Soil and rock classification according to S-wave velocity (adapted from NEHRP[19]).

Zemin/Kaya Sınıfı	Zemin/Kaya Tanımlaması	V _s (m/s)
A	Sert kaya	V _s >1524
B	Kaya	762<V _s ≤1524
C	Çok sıkı zemin veya ayrışmış kaya	366<V _s ≤762
D	Katı-sıkı zemin	183<V _s ≤366
E	Gevşek zemin	V _s ≤183
F	Çok gevşek/doygun zeminler	Özel değerlendirme gerekli

3 Arazi uygulamaları ve değerlendirme

Bu çalışma kapsamında Trabzon ili sınırları içerisinde bulunan dört ayrı bölgede sökülebilirlik araştırması amacıyla sismik ölçüler alınmıştır. İnceleme alanlarında P-ve S-dalga hızlarını elde etmek için sırasıyla sismik kırılma yöntemi ve Çok Kanallı Yüze Dalgası Analizi (ÇKYDA) yöntemleri kullanılmış ve temel esasları kısaca özetlenmiştir. Bununla birlikte her iki yöntemden elde edilen veriler SeisImager [34] yazılımı ile değerlendirilmiştir.

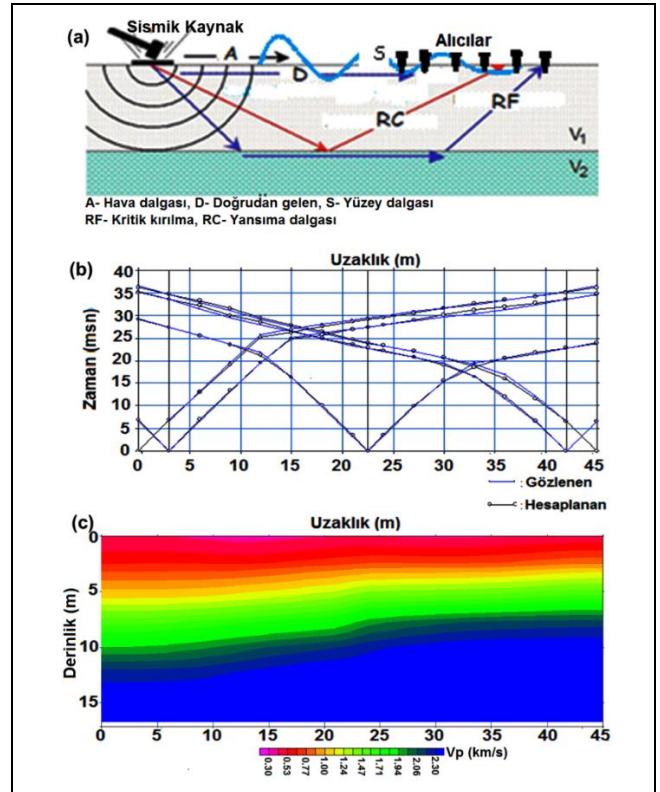
3.1 Sismik kırılma yöntemi

Sismik kırılma yöntemi, yeraltı jeolojik birimlerin elastik özelliklerinin ve geometrisinin belirlenmesinde en etkin yöntem olduğu gibi, zemin ve/veya kayaların sökülebilirlik tahmininin yapılmasında kayaların sismik hızlarının hızlı ve güvenilir şekilde ölçülmesini sağlar.

Yöntem, amaca ve proje alanının topografik ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak belirlenen profil doğrultularında, bir kaynak vasıtasıyla oluşturulan P- ve S-dalgalarının yer içinde yayılıp, sismik empedans farklılığı olan ara yüzeylerde kritik kırılarak yüzeyde kaynaktan belirli uzaklıklarda bir düzen içinde yerleştirilmiş sismik alıcılarda (jeofon) (Şekil 2a) kaydedilen ilk varış zamanlarının analizine dayanır. İlk varış zamanlarının alıcı uzaklığına göre çizilmesi ile elde edilen uzaklık-zaman (X-T) grafiklerindeki (Şekil 2b) her bir doğru parçasının eğimi yeraltındaki karşılık gelen tabaka içinde sismik dalganın ortalama yayılma hızını verir.

Bu işlemler hem P-dalgası hem de S-dalgası için aynı profil için gerçekleştirilir. Kaydedilen bu dalgaların ilk varışları zamanları kayıtlardan okunarak farklı sayısal tekniklerle (gecikme zamanı, genelleştirilmiş karşılık zaman ve tomografik ters çözüm) jeolojik birimlerin sismik hızları hesaplanır. İlk varış

zamanlarının tomografik ters çözümü yanal ve derinlik boyutunda (2B) sismik hızın değişimini ürettiği için, kör tabaka (derinlik yönündeki düşük hızlı ara tabaka durumu) problemlinden dolayı diğer tekniklere göre oldukça avantajlıdır (Şekil 2c). Şekil 2c'deki tomografik kesitten görüldüğü üzere jeolojik birimlerin tabakalı yapısı yanında sismik hızlarının değişimi de hem yanal hem de düşey yönde görülebilmektedir. Böylece, hızlardaki değişimlere göre de tabaka/kayaç sınırları, kayaların katılığı, sertliği, gözenekliliği, ayrışma derecesi gibi birçok parametre uzaklığın ve derinliğin fonksiyonu olarak belirlenir.

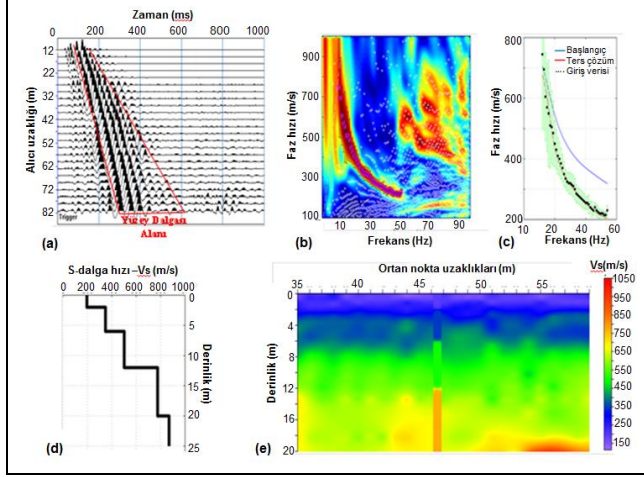


Şekil 2. Sismik kırılma verisinin (a): Araziden toplanma düzeni. (b): İlk varış zamanlarının X-T grafiğinde gösterimi. (c): Tomografik ters çözüm ile yeraltı yapısının hız ve geometrisinin belirlenmesi.

Figure 2(a): Acquisition of the seismic refraction data from the field. (b): Displaying the first arrival times on the X-T graph (c): Determining the velocity and geometry of the subsurface structure with a tomographic inverse solution.

3.2 Çok kanallı yüzey dalgası analizi (ÇKYDA)

Bu teknik P-dalgalarının kaydedilmesi için düşey bileşen alıcıların (tercihen 4.5Hz'li) kullanılarak kaydedilen sismik kırılma verilerinin yüzey dalga alanlarının analizinden S-dalga hızının elde edilmesi esasına dayanır (Şekil 3).



Şekil 3. ÇKYDA yönteminde; (a): Araziden kaydedilen sismik veri. (b): Faz hızı-frekans görüntüsü, (c): Dispersiyon eğrisi (noktalı), başlangıç modeli (mavi) ve ters çözüm sonucu (kırmızı). (d): Ters çözüm sonucu elde edilen 1B Vs-derinlik profili ve (e): Profil boyunca ardışık atışlardan elde edilen 1B Vs profillerinin orta noktasına yerleştirilmesiyle oluşturulan 2B Vs-derinlik kesiti.

Figure 3. Seismic data(a): Recorded from the field in the MASW method. (b): Phase velocity-frequency image. (c): Extracted dispersion curve (dotted), initial model (blue) and inversion result (red). (d): 1D Vs-depth profile obtained by inversion and (e): 2D-Vs-depth cross-section which is prepared by placed at mid-point of profile of 1D Vs profiles obtained from consecutive shots along the profile.

Bununla birlikte gerçek arazi koşullarında S-dalgasını üretmede kaynak yetersizliği ve istenilen kalitede veri toplanamaması nedenlerinden dolayı klasik karşılıklı atış yerine P-dalgası kayıtlarındaki Rayleigh yüzey dalgasının dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile 1B Vs-derinlik profilinin

elde edilmesi tercih edilmektedir ve yakın yüzey tabakaların sıklık-katılık-yumuşaklık profillerinin derinlik boyunca tam bir karakterizasyonu yapmada son derece yararlıdır. Atış kaydının (Şekil 3a) yüzey dalga alanından uygun dönüşüm teknikleri (Fourier, Radon ve Faz Kayması) (Şekil 3b) ile dispersiyon eğrisi (frekans-faz hızı eğrisi, Şekil 3c) belirlenir ve bu eğrinin ters çözümü ile 1B Vs-derinlik profili (Şekil 3d) hesaplanır ve ardı sıra tüm atışların 1B'lu çözümleri birleştirilerek 2B Vs-dalga hız-derinlik kesitleri elde edilir (Şekil 3e). Elde edilen hız-derinlik profili genel olarak alıcı serimin (ilk ve son alıcı arası mesafe) orta noktasına atanır. Yöntem düşük hız zonlarını görüntülemeye başarılı olduğundan, klasik S-dalga hızı belirleme (gecikme zamanı, karşılıklı zaman) tekniğine göre çok avantajlıdır. Genel olarak ilk 30 m derinlik için ortalama S-dalga hızı (V_{s30}) kullanılarak çalışılan yerlerin sıklık-katılık-yumuşaklık yorumu yapılabileceği gibi, belirli derinlik aralıklarındaki belirlenen S-dalga hız-değişimleri de zemin ve kaya niteliği açısından Tablo 3 dikkate alınarak değerlendirilebilir.

Trabzon İli merkez yerleşim alanlarında dört farklı sahada (Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) bünyesinde yapılmış planlanan Diş Hekimliği Fakültesinin (DHF) ve Tıp Fakültesi Katlı Otopark (TFKO) inşası yerlerinin ve Trabzon ilinde en yoğun yapılaşmanın olduğu Pelitli ve Çukurçayır mahallelerinde toplanan veriler analiz edilerek ölçüm alanlarında kazılacak jeolojik birimlerin sismik hızları hesaplanmıştır. Hız değerlerinin değişimine göre jeolojik birimlerin sökülebilirlik ve jeoteknik özellikleri açısından değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Veriler, Jeofizik Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeofizik Anabilim Dalı Laboratuvarında bulunan 12 ve 24 kanallı araştırma sismografları ve ekipmanı ile toplanmıştır. Verilerin toplanması için kullanılan kaynak-alıcı geometrisi ve kayıt parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Bununla birlikte, ölçüm alımında kaynak ve alıcılar arasında herhangi topoğrafik değişim yoktur. Ayrıca, çalışma sahalarının konumları Şekil 4'te gösterilmiştir.

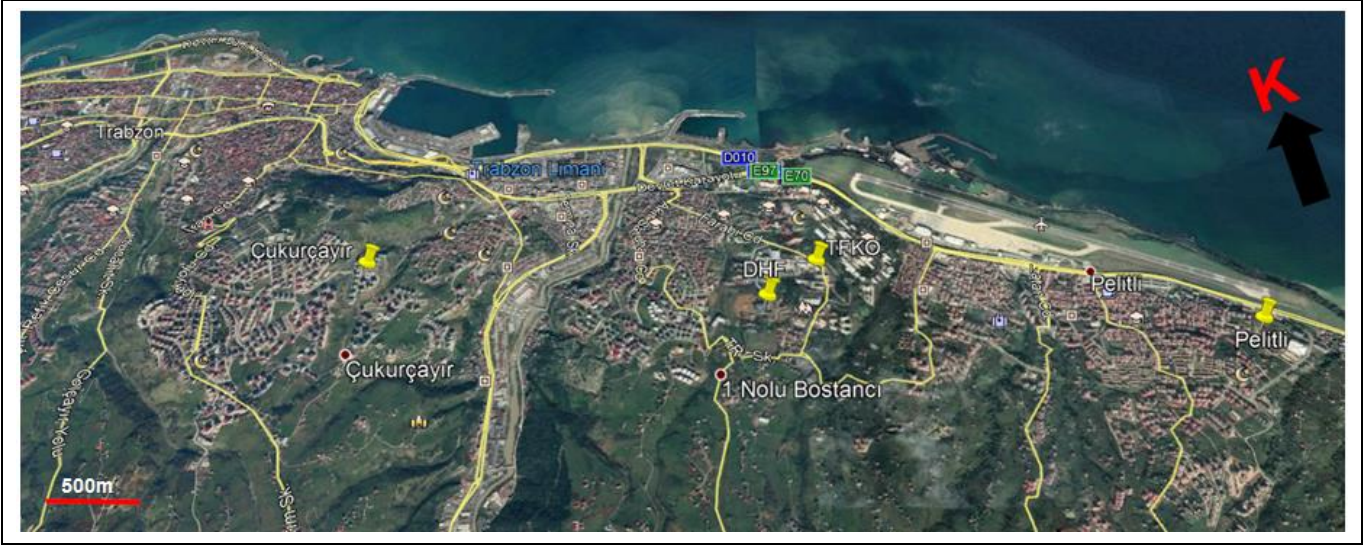
İnceleme alanlarında sismik kırılma tomografisi ve ÇKYDA yöntemlerinden elde edilen tüm hız değerleri Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'e göre değerlendirilerek jeolojik birimlerin sökülebilirlik sınıflaması yapılmıştır. Ayrıca jeolojik birimlerin sökülebilirlik değişimleri P-dalgası tomografik kesitleri üzerinde yaklaşık sınırlarıyla gösterilmiştir.

Tablo 4. Sismik verilerin toplanması için kaynak-alıcı geometrisi ve kayıt parametreleri.

Table 4. Source-receiver geometry and recording parameters for acquisition of the seismic data.

	Saha Adı	DHF		TFKO		PELİTLİ		ÇUKURÇAYIR	
		P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Sismik kırılma	X_0 (m)	4	4	2	2	3	3	8	6
	Δx (m)	2	3	2	2	3	3	3	3
	Δt (ms)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25
	T(s)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	0.25	0.25
	N	12	12	12	12	12	12	12	12
MASW	X_0 (m)	4	4	4	4	6	6	4	4
	Δx (m)	3	2	1	1	1.5	1.5	1	1
	Δt (ms)	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
	T(s)	1	1	1	1	1	1	1	1
	N	24	24	24	24	24	24	24	24
	Kot (m)	140	138	130	130	60	59	150	148

X0: İlk alıcı ofseti, Δx : alıcı aralığı, Δt : örnekleme zamanı, T: kayıt süresi, N: kanal sayısı.



Şekil 4. Sismik ölçüm yerlerinin Google earth görüntüsü (sarı noktalar).

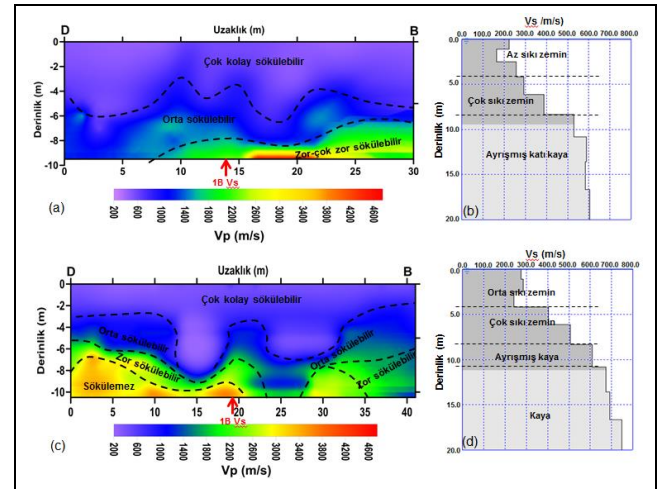
Figure 4. Google earth image of the seismic surveying locations (yellow dots).

Bununla birlikte, jeolojik birimlerin sökülebilirlik derecelendirmeleri yapılırken hem P-dalga hızı tomografik kesitlerinden okunan P-dalga hızları, hem de aynı derinlik seviyelerine karşılık gelen S-dalga hızları birlikte kullanılmıştır. Metin içerisinde P-dalgası hız-derinlik kesitleri "2B Vp-derinlik" ve S-dalgası hız-derinlik profilleri "1B Vs-derinlik" olarak ifade edilmiştir. Bununla birlikte, 1B Vs-derinlik kesitlerindeki koyu gri alanlar ÇKYD verilerinin ters çözümünden elde edilen etkin derinlik seviyesini göstermektedir.

3.2.1 Saha 1 (DHF)

Çalışma alanının jeolojisi genel olarak yüzeyden itibaren kalın kil örtüsü ve temelde volkanik kayalardan (bazalt ve andezit) oluşmaktadır. Sahada doğu (D)- batı (B) yönlü birbirine paralel uzanan aralarında 10 m mesafe olan 30 m (P1) ve 41 m (P2) uzunluklu iki profilde hat başı ve sonundan, çeyrek atışlar ve orta atış olmak üzere 5'er atış yapılarak sismik kırılma verisi toplanmıştır. Bu iki profilden toplanan verilerin tomografik ters çözüm ile hesaplanan 2B Vp-derinlik dağılımını gösteren kesitler Şekil 5a ve 5c'de ve ÇKYDA ile 1B Vs-derinlik profilleri Şekil 5b ve 5d'de sunulmuştur. Elde edilen kesitlerden profiller birbirine 10 m gibi yakın uzaklıkta olmasına rağmen, yeraltı yapısının değişiklik gösterdiği açık olarak görülmektedir. Şekil 5a ve 5c'deki 2B Vp-derinlik kesitleri üzerinde yanal ve düşey yönde Vp değişimine göre jeolojik birimlerin sökülebilirlik derecelendirilmesi ve Şekil 5b ve 5d'ki 1B Vs-derinlik profiline göre de aynı derinlik aralığına gelen jeolojik birimlerin jeoteknik değerlendirilmesi yapılmıştır. P1 profilinde elde edilen P- ve S- dalga hızlarının değişimine göre yüzeyden itibaren 3 farklı jeolojik birim değerlendirilmiştir (Şekil 5a). Buna göre, bu profilde yüzeyden itibaren yer alan jeolojik birimler, çok kolay sökülebilir az sıkı zemin ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 200$ m/s), orta sökülebilir sıkı zemin ($V_p \sim 900-1700$ m/s, $V_s \sim 200-550$ m/s) ve zor sökülebilir çok sıkı katı veya çok ayrılmış kaya ($V_p > 1700$ m/s, $V_s > 550$ m/s) olarak sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde Şekil 5c'deki P2 profilinde, ~8 m derinlikte oldukça yüksek P-dalga hızlı jeolojik birim (sert ana kaya) üzerinde yanal yönde farklı derecelerde ayrılmış kaya (~2.5-6 m derinlik aralığı) ve yüzey örtü (~0-2.5m derinlik aralığı) birimleri görülmektedir. P2 profili için

jeolojik birimlerin bu niteliklerine göre sökülebilirlikleri yüzeyden itibaren, kolay sökülebilir orta sıkı zemin ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 250$ m/s), orta sökülebilir çok sıkı zemin ($V_p \sim 900-1500$ m/s, $V_s \sim 400-500$ m/s), zor sökülebilir ayrılmış kaya ($V_p \sim 1500-2600$ m/s, $V_s \sim 500-600$ m/s) ve son derece zor (veya sökülemez) kaya ($V_p > 2600$ m/s, $V_s > 600$ m/s) olarak derecelendirilmiştir.



Şekil 5. Saha 1'de (a, b) P1 ve (c, d) P2 profilleri için P-dalga hızı tomografik kesitleri ve S-dalga hız-derinlik profilleri.

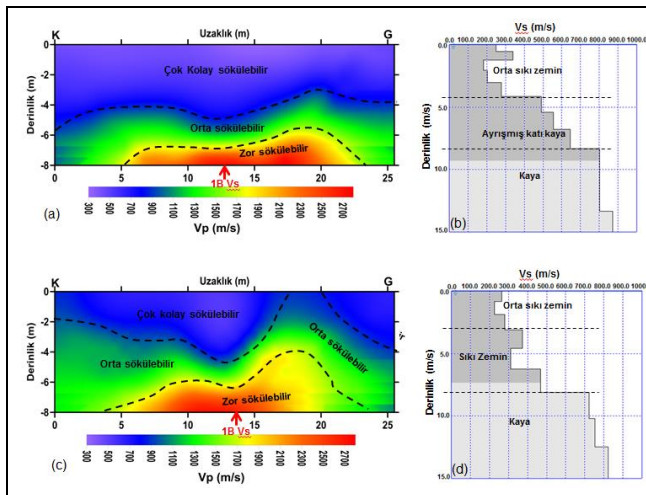
Figure 5. In field 1, P-wave velocity tomographic cross-sections and S-wave velocity-depth profiles (b, d) for P1 and P2 profiles.

Burada sökülemez kaya için S-dalga hızı düşük bir değerde görülmektedir. Bu durum kayanın kısmen çatlaklı ve çatlaklar arası su içermiş olması ile ilişkili olabilir. Şekil 5d'den açıkça görüldüğü üzere, kayanın derin kısımlarına doğru Vs değeri artış eğilimindedir. Bununla birlikte, özellikle Şekil 5c'de yeraltı yapısının yanal yöndeki değişkenliği dikkat çekmektedir. Bu kesite göre, jeolojik birimin sökülebilirliği profil boyunca ~0-10 m uzaklık aralığında ve ~2 m derinliğe kadar çok kolay iken, ~2-6 m derinlik aralığında orta derecede zorlaşacağı ve ~6 m derinlikten sonra ise zor ve daha derinde son derece zorlaşacağı anlaşılmaktadır. Ancak, kesitte açık olarak,

~12-18 m uzaklık aralığında 8 m derinliğe kadar kolay sökülebilir jeolojik birimden hemen sonra zor ve sonra sökülemez bir birimle karşılaşılacağı görülmektedir. Profilin devam eden kısmında ~18-30 m uzaklık aralığında yüzeyden itibaren ~6 m'ye kadar kolay sökülebilir bir birimi, zor sökülebilir bir birimin izlediği açıkça anlaşılmaktadır.

3.2.2 Saha 2 (TFKO)

Çalışma alanı DHF alanının 200 m kuzey batısında yer almakta olup, alan DHF inşaat alanı ile benzerdir. Ancak, sahanın yüzeyinin kuzey tarafı asfalt ve güney tarafı ise sıkıştırılmış döküntü birimden (toprak, kırıntılı kayalar, mıcır, vb.) ibarettir. Bu alanda araçların sürekli hareketi nedeniyle yüzeydeki döküntü birim aşırı sıkışmış ve sertleşmiştir. Sahada birbirinden 25 m uzak ve birbirine paralel olan 26 m'lik iki profilde (P1 ve P2) sismik kırılma verisi için hat başı ve sonundan ve orta atışlar olmak üzere 3'er atış yapılmıştır. Toplanan verilerin tomografik ters çözümü ile elde edilen P-dalgası hız-derinlik kesitleri Şekil 6a ve 6c'de, yeraltının sıklık-katılık değişimini gösteren 1B'lu Vs-derinlik profilleri ise Şekil 6b ve 6d'de sunulmuştur. 2B Vp-derinlik kesitleri ve 1B Vs-derinlik profilleri, her iki ölçüm profilinde de yeraltı geometrisi, hız değişimleri ve sökülebilirlik derecelendirmesi açısından yüksek derecede uyumludur. Buna göre, P- ve S-dalga hızlarının değişimine göre bu P1 profili için genel bir değerlendirme yapılırsa, ~0-4 m derinlik kolay-çok kolay sökülebilir olan orta sıkı zemin (Vp<900 m/s, Vs<250 m/s), ~4-7 m derinlik arası orta sökülebilir kısmen çatlaklı/ayrışmış kaya birim (Vp~900-1800 m/s, Vs~250-800 m/s) ve ~7 m'den sonra zor sökülebilir katı-sert kaya birim (Vp>1800 m/s, Vs>800 m/s) olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 6c'deki tomografi kesitinde yanal yönde hız değişimine göre 4 m derinliğe kadar üstteki ~0-8 m ve 16-26 m yüzey mesafelerinde jeolojik birimin P-dalga hızı ~600-1100 m/s arasında değişirken (mavi renkler), ~8-16 m uzaklıklarında hız değeri ~300-600 m/s arasına düşmektedir. Buna göre aynı jeolojik birim de olsa, birimin düşük hızlı olan kısımlarının yüksek hızlı kısımlarına göre nispeten çok daha kolay kazılacağı işaret etmektedir.

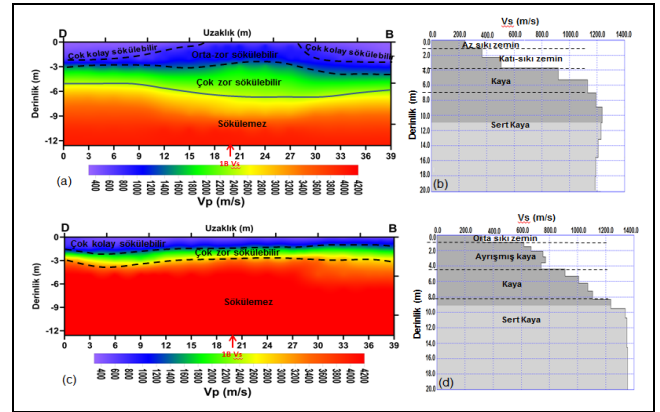


Şekil 6. Saha 2'de (a),(b) P1 ve (c),(d) P2 profilleri için P-dalga hız tomografik kesitleri ve S-dalga hız-derinlik profilleri.

Figure 6. In field 2, P-wave velocity tomographic cross-sections and S-wave velocity-depth profiles (b),(d) for P1 and P2 profiles.

Saha 3 (Pelitli): Bu alan Trabzon ilinin doğu tarafında hemen Trabzon havaalanının güneyinde kalan merkez mahalledir ve bu alanda inşaat faaliyetleri özellikle son 5 yıldır yüksek oranda

artış göstermiştir. Çalışma alanının jeolojisi genel olarak yüzeyden itibaren kalın kırmızı kil, az miktarda çakıl örtüsü ve temelde volkanik kayalardan (bazalt ve andezit) oluşmaktadır. Sahada 39 m'lik birbirine paralel iki profilde (P1, P2) sismik kırılma ve ÇKYDA ölçümleri yapılmıştır. Her iki profilde veri toplamak için iki hat başı ve sonundan, çeyrek atışlar ve orta atış olmak üzere 7 atış yapılmış ve ilk hat başı atışları ÇKYDA için kullanılmıştır. Verilerin tomografik ters çözümü ile elde edilen yeraltının geometrisini ve 2B Vp derinlik dağılımını gösteren kesitler (Şekil 7a ve 7c) ile yerin sıklık-katılık değişimini gösteren 1B Vs-derinlik profilleri (Şekil 7b ve 7d) de sunulmuştur. Hem tomografik kesitlerde hem de 1D Vs-derinlik profilinde düşey yönde düzgün bir tabakalanma hem de yanal yönde hız değişiminin olmadığı görülmektedir. Ancak profiller birbirine yakın olmalarına rağmen (~50 m) jeolojik birimlerin kalınlıkları farklılık göstermektedir. Şekil 7a'da üstteki örtü kalınlığı ~3 m iken, Şekil 7c'de bu derinlik ~1.8 m'dir. Bununla birlikte, P1 profilinde ~3 m'den sonra başlayan kaya birim (Şekil 7a ve 7b) kendi içinde kırık, çatlak, ayrışma gibi faktörlerden dolayı ortalama ~8 m derinlik seviyesine kadar zor-çok zor sökülebilir olarak görülmekle birlikte, P2 profilinde bu seviye ~1.5-3 m arasındadır. Dolayısıyla, aynı kaya birimi olmasına karşılık kayanın son derece zor veya sökülemez (Vp>3000 m/s, Vs>1100 m/s) (patlayıcı gerekli olan durum) kısmı Şekil 7a'da ~8 m'den başlamışken, Şekil 7c'de ~3 m'ten başlamıştır. Diğer yandan Şekil 7c'deki 2B Vp-derinlik kesitinde ~3 m'den sonra hız değişiminin olmadığı görülürken, Şekil 7d'de 1B Vs-derinlik kesitinde ~3.8-8 m arası kaya, ~8 m'den sonra ise sert kaya olarak değerlendirilmiştir. Bu değişim S-dalga hızının tamamen kayacın sertliğine ve katılığına bağlı olması ile ilişkili bir durumdur.



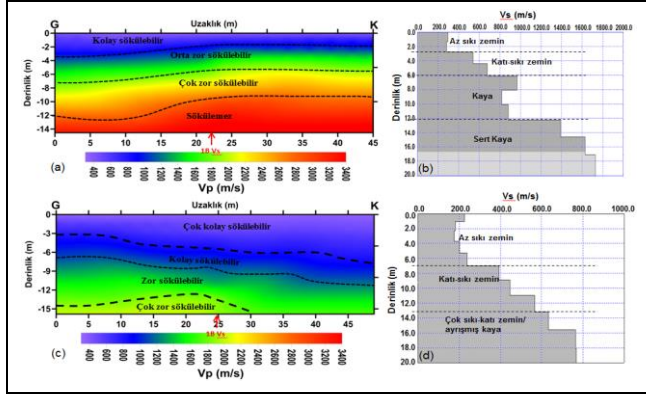
Şekil 7. Saha 3'de (a, b) P1 ve (c, d) P2 profilleri için P-dalga hız tomografik kesitleri ve S-dalga hız-derinlik profilleri.

Figure 7. In field 3, P-wave velocity tomographic cross-sections and S-wave velocity-depth profiles (b, d) for P1 and P2 profiles.

3.2.3 Saha 4 (Çukurçayır)

Trabzon ilinin güneye doğru genişlediği ilk mahallelerden olup, yapılaşmanın en yoğun olduğu bir alandır. Çalışma alanının jeolojisi genel olarak yüzeyden itibaren kalın kil, killi kum, az miktarda çakıl ve temelde volkanik kayalardan (bazalt) oluşmaktadır. Sahada birbirine 5m mesafeli 39 m'lik iki paralel profilde sismik kırılma verisi için iki hat başı ve sonundan ve orta atış olmak üzere 5'atış yapılmıştır. Alınan çok atışlı sismik kırılma verilerinin tomografik ters çözümü ile yeraltının geometrisini ve 2B Vp-derinlik dağılımını gösteren kesitler Şekil 8a ve 8c'de, yerin sıklık-katılık değişimini gösteren 1B Vs-derinlik profilleri Şekil 8b ve 8d'de sunulmuştur. Profiller

birbirine çok yakın mesafelerde olmasına karşılık tabakalanma geometrileri farklılık göstermektedir. Öyle ki, hız değişimlerine göre Şekil 8a'daki tabaka eğim doğrultuları sol tarafa doğru iken, Şekil 8c'de sağ tarafa olduğu görülmektedir. Şekil 8c'de kolay sökülebilir az sıkı zeminin ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 250$ m/s) kalınlığı profilin sol tarafından ~5 m'den başlayıp profil sonunda ~9 m olduğu görülmektedir. Kesitlerin sökülebilirlik ve jeoteknik açıdan değerlendirmeleri 2B V_p -derinlik (Şekli 8a ve 8c) ve 1B V_s -derinlik profilleri üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 8. Saha 4'te (a),(b) P1 ve (c),(d) P2 profilleri için P-dalga hız tomografik kesitleri ve S-dalga hız-derinlik profilleri.

Figure 8. In field 4, P-wave velocity tomographic cross-sections and S-wave velocity-depth profiles (b),(d) for P1 and P2 profiles.

Bununla birlikte, Şekil 8a'da sökülemez değerlendirme yapılan sert kaya ($V_p > 2800$ m/s, $V_s > 1400$ m/s) ve ~10 m derinlikten başlayan jeolojik birim profil boyunca görüntülenebilmiştir. Buna karşılık aynı sert kaya birim Şekil 8c ve 8d'de görüntülenememiştir. Böylece, sert kaya birimin bu profile daha derinde olduğu anlaşılmaktadır.

4 Sonuçlar

Sismik dalga hızlarının kullanımı farklı jeolojik birimlerinin sökülebilirlik derecelerinin nitelikli değerlendirilmesinde ve kazı planlanmasında son derece yararlı ve ekonomik bir yoldur. Dolayısıyla kazı alanları için sismik hızların (P- ve S-dalga hızları) güvenli bir şekilde elde edilmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, Trabzon İli'nde dört farklı alanda aynı ölçüm profilleri için elde edilen P- ve S-dalgası hızları, jeolojik birimlerin sökülebilirliği ve jeoteknik özellikleri açısından birlikte değerlendirilmiştir. Jeolojik birimlerin P- ve S-dalgası hızları sismik kırılma tomografisi ve ÇKYDA yöntemleri ile elde edilmiştir. 2B'lu P-dalga hızı tomografik kesitleri üzerinde jeolojik birimlerin sökülebilirlik değişim sınırları yaklaşık olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen S-dalga hızı-derinlik profilleri sayesinde jeolojik birimin jeoteknik değerlendirmesi yapılmış ve P-dalga hızına göre

yapılan sökülebilirlik derecelendirmesi ile birleştirilmiştir. Çalışılan alanlarda yeraltı yapılarının yanal ve düşey oldukça değişken olduğu görülmüştür. Böylece, aynı profillere ait hız bilgileri sökülebilirlik [18], zemin sınıflama [19] ve Tablo 2'ye göre değerlendirilerek S-dalga hızının da eklendiği yeni ilksel bir sismik hız-sökülebilirlik-jeoteknik sınıflaması oluşturularak Tablo 5'te sunulmuştur. Buna göre, genel olarak, çalışma alanlarındaki jeolojik birimler çok kolay-kolay sökülebilir az sıkı zemin ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 300$ m/s), orta derecede sökülebilir kati-sıkı zemin ($V_p \approx 900-1500$ m/s, $V_s \approx 400-600$ m/s), zor sökülebilir çok sıkı-kati veya ayrılmış kaya ($V_p \approx 1500-2100$ m/s, $V_s \approx 600-800$ m/s), çok zor-son derece zor sökülebilir sağlam kaya ($V_p \approx 2100-2400$ m/s, $V_s \approx 800-1100$ m/s) ve sökülemez sert kaya ($V_p > 2400$ m/s, $V_s > 1100$ m/s) şeklinde bir sınıflandırma yapılmıştır. Bununla birlikte, 2B'lu P-dalgası hız tomografik kesitleri jeolojik birimlerinin hem geometrilerini hem de hız değişimlerini çok açık olarak gösterdiğinden, kazı çalışmalarının alanın nerelerinde ve hangi derinliklere kadar hangi tip ve güçte kazı/sökü araçlarıyla yapılacağını planlanmasına katkı sağlayacağı açıklanmıştır. Böylece, literatürde ve bu çalışma ile sunulan sınıflama tablolarından anlaşıldığı üzere, herhangi bir jeolojik birimin kazısı sırasındaki sökülme zorluğunun ve bu işlemin maliyetinin ne olacağını tahmin edilmesinde, sismik hızların ve yeraltı 2B'lu görüntülerinin kullanılmasının son derece yararlı olacağı önerilmektedir.

5 Conclusions

The use of seismic wave velocities is an extremely useful and economical way to evaluate the rippability of different geological units and to plan excavations. Therefore, seismic velocities (P- and S-wave velocities) must be obtained and evaluated safely for the excavation sites. In this scope, P- and S-wave velocities obtained for the same measurement profiles in four different areas in Trabzon Province were evaluated together in terms of rippability and geotechnical properties of geological units. P- and S-wave velocities of the geological units were obtained by seismic refraction tomography and MASW methods. The rippability variation borders of the geological units were approximately indicated on the 2D P-wave velocity tomographic sections. However, the geotechnical evaluation of the geological unit has been made through the obtained S-wave velocity-depth profiles and combined with the rippability degree according to the P-wave velocity in a table. It has been observed that the subsurface structures in the studied areas are quite variable laterally and vertically. Thus, a new primary seismic velocity-rippability-geotechnical classification was created by evaluating the velocity information of the same profiles according to rippability [18], soil classification [19] and Table 2 as presented in Table 5.

Tablo 5. Jeolojik birimler için (zemin, kaya) oluşturulan ilksel sismik hız-sökülebilirlik-jeoteknik sınıflaması.

Table 5. A primary seismic velocity-rippability-geotechnical classification for geological units (soil, rock).

V_p (km/s)	V_s (km/s)	Sökülebilirlik	Jeoteknik Tanımlama	Kazı/Sökü Tanımlama
0.3-0.6	<0.2	Çok kolay	Az sıkı-Yumuşak/çok yumuşak zemin	Kazı makinaları ile kolayca kazılabilir
0.6-0.9	0.2-0.4	Kolay		
0.9-1.5	0.4-0.6	Orta	Kati-sıkı zemin	Kazı makinaları ile kazılabilir
1.5-2.1	0.6-0.8	Zor	Çok sıkı-kati zemin ya da ayrılmış/yumuşak kaya	Sökücü araçlarla parçalanarak sökülebilir
2.1-2.4	0.8-1.1	Çok zor	Sağlam kaya/çok sağlam-sert kaya	Kompresör ile veya dinamitle parçalanarak sökülebilir

Accordingly, in general, the geological units in the study areas are classified as very easy-to-easy, less firm soil ($V_p < 900$ m/s, $V_s < 300$ m/s), moderately rippabile solid firm soil ($V_p \approx 900-1500$ m/s, $V_s \approx 400-600$ m/s), hard to rippabile very firm-solid or weathered rock ($V_p \approx 1500-2100$ m/s, $V_s \approx 600-800$ m/s), very hard-to-extremely hard to rippabile solid rock ($V_p \approx 2100-2400$ m/s, $V_s \approx 800-1100$ m/s) and non-rippabile hard rock ($V_p > 2400$ m/s, $V_s > 1100$ m/s). However, since the 2D P-wave velocity tomographic sections demonstrate clearly both geometries and velocity changes of the geological units, it has been explained that the excavation works will be carried out in the area and to what depths with which type and power excavator/ripper tools. Thus, as it is understood from the classification tables presented in the literature and with this study, it is suggested that the seismic velocities and 2D subsurface imaging will be extremely useful in estimating the difficulty of rippability during the excavation of any geological unit and the cost of this operation.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Hasan Karşlı, Ali Erden Babacan ve Mustafa Şenkaya fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, verilerin toplaması, verilerin işlenmesi, edilen sonuçların değerlendirilmesi, yorumlanması ve makalenin yazımı başlıklarında; Kenan Gelişli yazım denetimi, eleştirel inceleme ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Braybrooke JC. "The state of the art of rock cuttability and rippability prediction". *Proceeding 5th Australian-New Zealand Conference Geomechanics*, Sydney, 22-26 August 1998.
- [2] Pettifer G, Fookes P. "A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 27(2), 145-164, 1994.
- [3] McCann DM, Fenning PJ. "Estimation of rippability and excavation conditions from seismic velocity measurements". *Engineering Geology of Construction, Geological Society Engineering Geology Special Publication* 10, 335-343, 1995.
- [4] Karpuz C. "A classification system for excavation of surface coal measures". *Mining Science Technology*, 11(2), 157-163, 1990.
- [5] Başarır H, Karpuz C. "A rippability classification system for marls in lignite mines". *Engineering Geology*, 74(3-4), 303-318, 2004.
- [6] Komatsu. *Specifications and Application Handbook*. 10nd ed. Komatsu, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, Japan, 1987.
- [7] Caterpillar Tractor Company. *Caterpillar Performance Handbook*. 19nd ed. Caterpillar, Peoria, IL, USA, 1988.
- [8] Bailey AD. "Rock types and seismic velocities versus rippability". *Proceedings of the 26th Annual Highway Geology Symposium*, Coeur d'Alene, Idaho, 13-15 August 1975.
- [9] Tonnizam ME, Rosli S, Muhazian M, Fauzi M. "Assessment on excavatability in weathered sedimentary rock mass using seismic velocity method". *Journal of Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 1(2), 258-263, 2011.
- [10] Dindarloo SR, Siami-Irdemoosa E. "Ground Rippability Classification By Decision Trees". *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, 338(1), 112-121, 2015.
- [11] Ismail MA, Kumar NS, Abidin MHZ, Madun A. "Rippability assessment of weathered sedimentary rock mass using seismic refraction methods". *Journal of Physics Conference Series*, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012105>.
- [12] Atkinson T. "Selection of open pit excavating and loading equipment". *Transactions of the Institution of Mining Metallurgy*, 80, A101-A129, 1971.
- [13] Church HK. *Excavation Handbook*, 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1981.
- [14] Göktan RM, İphar M. "Açık işletmelerde kayaç sökülebilirlik tayin yöntemleri". *MT Bilimsel Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 2(3), 1-16, 2013.
- [15] Choudhury PB, Chakraborty AK, Sitharam TG. "Near Surface Vs Profiling Using MASW for Rippability Assessment of Milliolithic Limestone". *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, University of Hong Kong, China, 19-22 May 2009.
- [16] Campbell N, Fenton C, Williams ST. *An Investigation into the Effects of Material Properties on Shear Wave Velocity in Rocks/Soils*, Editors: Lehan BM, Acosta-Martinez HE, Kelly R. Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, 849-855, Sydney, Australia, Australian Geomechanics Society, 2016.
- [17] Moustafa SS, Ibrahim EH, Elawadi E, Metwaly M, Al Agami N. "Seismic refraction and resistivity imaging for assessment of groundwater seepage under a Dam site, Southwest of Saudi Arabia". *International Journal of Physical Sciences*, 7(48), 6230-6239, 2013.
- [18] Caterpillar Tractor Company. *Caterpillar performance handbook*. 40th ed. Peoria, Illinois, USA, Caterpillar, 2010.
- [19] National Earthquake Reduction Program (NEHRP). "Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other steel structures, Part 1: Provisions". Washington, USA, 2003.
- [20] Bailey AD. "Refraction seismic on advancing tool". *The Mines Magazine*, 64(1), 1-11, 1974.
- [21] Öncel K. *Kayaç ve Zeminlerin Yapı ve Doku Özellikleriyle Sökülebilirlikleri ve P Tipi Dalga Hızları Arasındaki İlişki*. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, İller Bankası Genel Müdürlüğü, Su ve Kanalizasyon Dairesi Başkanlığı, 1979.
- [22] Weaver J. Geological factors significant in the assessment of rippability. *The Civil Engineering in South Africa*, 17(12), 313-316, 1975.
- [23] Bieniawski ZT. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. 1st ed. Newyork, USA, John Wiley and Sons, 1989.
- [24] McCormick Jr WN. "Engineering and Design: Rock Mass Classification Data Requirements for Rippability". Department of Army USA Army Corps of Engineers, Washington, USA, Technical Letter 110-2-282, 1983.

- [25] El-Naqa A. "Assessment of geomechanical characterization of a rock mass using a seismic geophysical technique". *Geotechnical and Geological Engineering*, 14, 291-305, 1996.
- [26] Uyanık O, Sabbağ N, Uyanık N.A, Öncü Z. "Prediction of mechanical and physical properties of some sedimentary rocks from ultrasonic velocities". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8), 6003-6016, 2019.
- [27] Watkins JS, Walters LA, Godson RH. "Dependence of in-situ P-wave velocity on porosity". *Geophysics*, 37(1), 29-35, 1972.
- [28] Toksoz MN, Cheng CH, Timur A. "Velocities of seismic waves in porous rocks". *Geophysics*, 41(4), 621-645, 1976.
- [29] Salem HS. "Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments determined from seismic P- and s-wave velocities". *Geotechnique*, 50(4), 461-463, 2000.
- [30] Uyanık O. "The porosity of saturated shallow sediments from seismic compressional and shear wave velocities". *Journal of Applied Geophysics*, 73(1), 16-24, 2011.
- [31] Keçeli A. "Sismik Hızlar ile Saptanabilen Zemin Parametreleri". *Jeofizik*, 26(1), 17-29, 2012.
- [32] Church HK. "Geophysical Examination Can Make Earth-Moving a Profitable Science in the Southwest". *Southwest Builder and Contractor*, USA, 13, 1964.
- [33] Mohamad ET, Kassim KA, Komoo I. "An overview of existing rock excavatability assessment techniques". *Jurnal Kejuruteraan Awam*, 17(2), 46-59, 2005.
- [34] Geometrics. "SeisImager/2D Software Manual". <https://www.geometrics.com/software/> (10.03.2020).