

## تخمین سرعت میانگین موج تراکمی با استفاده از رابطه طول موج – عمق حاصل از تحلیل امواج سطحی

ساسان قوامی<sup>1</sup>، حمید رضا سیاه کوهی<sup>2</sup>

<sup>1</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [sasan.ghavami3122@ut.ac.ir](mailto:sasan.ghavami3122@ut.ac.ir)

<sup>2</sup>استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [hamid@ut.ac.ir](mailto:hamid@ut.ac.ir)

### چکیده

مدل های یک بعدی سرعت موج برشی امروزه با وارون سازی منحنی های پاشش امواج سطحی بدست می آیند. سرعت میانگین موج برشی تا عمق  $Z$  ( $V_{SZ}$ ) حاصل از این مدل های سرعت بطور گسترده ای در پروژه های مهندسی برای تعیین پارامترهای خاک، طبقه بندی خاک ها و برآورد پاسخ ساختگاه مورد استفاده قرار می گیرند. از آنجا که حل مسائل وارون یکتا نبوده و خود فرآیند وارون هم زمان بر است، در اینجا سعی می شود با ارایه روشی بدون نیاز به وارون سازی، نه تنها سرعت میانگین موج برشی ( $V_{SZ}$ ) بلکه سرعت میانگین موج تراکمی ( $V_{pZ}$ ) را نیز که در تصحیح استاتیک داده های بازتابی کاربرد دارد، به طور مستقیم از منحنی های پاشش تخمین بزنیم. در این روش با بررسی رفتار سرعت فاز طول موج های مختلف موج سطحی در مقابل سرعت میانگین موج برشی در عمق های مختلف رابطه طول موج – عمق برای منطقه بدست می آید. سپس پروفیل ( $V_{SZ}$ ) با استفاده از این رابطه و منحنی پاشش امواج سطحی تخمین زده می شود. با توجه به وابستگی مقادیر ( $V_{SZ}$ ) به نسبت پواسون، در ادامه ضمن برآورد نسبت پواسون برای منطقه مورد مطالعه پروفیل سرعت میانگین موج تراکمی تا عمق  $Z$  ( $V_{pZ}$ ) از پروفیل ( $V_{SZ}$ ) تخمین زده می شود. تحقق این اهداف نیازمند مدل سرعت موج برشی (مبنا) در منطقه مورد مطالعه است که در عمل می تواند از داده های چاه، یک پروفیل لرزه ای شکسته مرزی یا با استفاده از وارون یکی از منحنی های پاشش تجربی امواج سطحی برداشت شده در منطقه بدست آید. روش روی مجموعه ای از داده های لرزه ای مصنوعی اعمال گردید تا کارایی آن ارزیابی گردد. نتایج حاکی از موفقیت روش در تخمین کمیت های فوق با خطایی کمتر از 10٪ است.

**واژه های کلیدی:** آنالیز امواج سطحی، منحنی پاشش، سرعت موج برشی، سرعت میانگین موج برشی، سرعت موج تراکمی، سرعت میانگین موج تراکمی.

## Estimation of average compressive wave velocity ( $V_{pZ}$ ) using wavelength-depth relation obtained from surface waves analysis

Sasan Ghavami<sup>1</sup> and Hamid R. Siahkoobi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Master of science, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>2</sup>Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

### Abstract

One-dimensional models of shear wave velocity are nowadays obtained by inverting dispersion curves of surface-wave. The mean shear wave velocity to depth of  $z$  ( $V_{SZ}$ ) related to these velocity models is widely used in engineering projects to determine soil parameters, soil classification and site response estimation. Since the solution of the inversion problems is not unique and also the inversion processes are time-consuming, here we intend to present a method without inversion which not only the mean shear wave velocity ( $V_{SZ}$ ) but also the mean velocity compression wave ( $V_{pZ}$ ) that used in the static correction of reflection data, are directly estimated from dispersion

curves. In this method, by investigating the phase velocity behavior of different surface wavelengths versus the mean shear wave velocities at different depths, the wavelength-depth relationship for the region is obtained. Then the profile ( $V_{sz}$ ) is estimated using this relation and the surface-wave dispersion curve. Considering the dependence of the values ( $V_{sz}$ ) on the Poisson's ratio, Then, by estimating Poisson's ratio for the studied area, the mean velocity profile of the compressive wave to the depth of  $z$  ( $V_{pz}$ ) is estimated from the profile ( $V_{sz}$ ). The realization of these objectives requires a shear-wave velocity model (base) in the studied area that it can be obtained from well data, a fractured boundary seismic profile, or by using one of the experimental dispersion curves of surface waves in the area. The method was applied to a set of synthetic seismic data to evaluate its performance. The results indicate that the method is successful in estimating the above quantities with an error of less than 10%.

**Keywords:** surface waves analysis; dispersion curve; shear wave velocity; average shear wave velocity; average compressive wave velocity

## 1 مقدمه

تحلیل امواج سطحی بعنوان روشی کارآمد برای تخمین مدل های سرعت موج برشی در لایه های نزدیک به سطح زمین است که این مدل ها در حوزه های مختلف کاربرد های گسترده ای دارند (Socco et al., 2010). سرعت موج برشی ( $V_s$ ) یک پارامتر کلیدی در مسائل مختلف مهندسی از جمله برای ارزیابی خواص دینامیکی و روانگرایی خاک و مطالعات طراحی مهندسی زلزله است؛ همچنین سرعت میانگین موج برشی تا عمق 30 متر ( $V_{s30}$ )، اغلب برای طبقه بندی لرزه ای ساختگاه، تعیین پیروید خاک، بدست آوردن ضریب بزرگنمایی ساختگاه و همچنین بدست آوردن قوانین تضعیف برای پیش بینی پارامترهای حرکت زمین در مطالعات خطر لرزه ای و طراحی مقاوم در برابر زلزله استفاده می شود (NEHRP, 2000; Dobry, 2000; Kamer, 2005; Konno and Kataoka, 2000). با این وجود در این مطالعه از سرعت موج برشی برای اهداف دیگری یعنی بدست آوردن مدل سرعت موج تراکمی ( $V_p$ ) استفاده می شود.

منحنی های پاشش تجربی امواج سطحی را می توان از طریق تبدیل های مختلف میدان موج نظیر شیفیت فازی یا f-k تهیه و سپس به منظور تخمین مدل های سرعت موج برشی وارون کرد. مدل های بدست آمده برای سرعت موج برشی کاملاً یک بعدی بوده و معمولاً به وسط پروفیل نسبت داده می شود. این بدان معنی است که در صورت وجود تغییرات جانبی، این روش ها مناسب نیستند و علاوه بر آن وارون امواج سطحی قویاً غیرخطی، بدو ضلع و آمیخته معین بوده و جواب نایکتایی دارد (Socco et al., 2010). همچنین در آنالیز امواج سطحی اغلب به علت حساسیت ضعیف منحنی پاشش به سرعت موج تراکمی، فقط سرعت موج برشی و ضخامت لایه ها در فرایند وارون بعنوان متغیر ناشناخته در نظر گرفته می شود و سرعت موج تراکمی (یا نسبت پواسون) بر اساس اطلاعات اولیه فرض می شود. از این رو آنالیز امواج سطحی از طریق فرایند وارون برای تخمین سرعت موج تراکمی، مناسب نیست.

بدنبال کار ساکو و همکارانش (Socco et al., 2017; Socco and Comina, 2017) ما هم در این مقاله با استفاده از رابطه ای بین طول موج امواج سطحی و عمق نفوذ که برای یک مدل مرجع در طول پروفیل تعیین می شود، بدون نیاز به فرایند وارون، سرعت میانگین موج برشی تا عمق  $Z$  ( $V_{sz}$ ) را به طور مستقیم از منحنی های پاشش در طول پروفیل تخمین می زنیم که در حضور تغییرات جانبی سرعت قابل اعتماد است. معمولاً مدل سرعت مرجع را می توان از طریق داده های چاه یا از طریق لرزه نگاری شکست مرزی بدست آورد. علاوه بر این، بخاطر وابسته بودن رابطه طول موج - عمق تخمین زده شده به نسبت پواسون، در این مطالعه از این وابستگی استفاده کرده و از آن برای تخمین پروفیل سرعت میانگین موج تراکمی ( $V_{pz}$ ) استفاده می کنیم.

## 2 روش تحقیق

در این مقاله ما با یک رویکرد جدید، پروفیل سرعت میانگین موج تراکمی تا عمق مشخص را از منحنی پاشش تخمین می زنیم. ولی ابتدا لازم است رابطه طول موج - عمق را از تحلیل منحنی های پاشش تجربی امواج سطحی در منطقه

مورد مطالعه بدست آوریم. برای اینکار نیازمند یک پروفیل سرعت موج برشی، به عنوان پروفیل مرجع، از منطقه مورد مطالعه هستیم که می تواند از تحلیل یکی از منحنی های پاشش بدست آمده تخمین زده شود یا در صورت موجود بودن از داده های چاه و یا از طریق لرزه نگاری شکست مرزی حاصل شود. بدین منظور با شروع از یک مدل سرعت موج برشی شناخته شده (مرجع) و منحنی پاشش مربوطه اش، ابتدا پروفیل سرعت موج برشی مرجع ( $V_S$ ) را طبق رابطه (1) به سرعت میانگین موج برشی ( $V_{SZ}$ ) تبدیل می کنیم (شماره مرجع به مقاله اول اشاره شود (قوامی و سیاه کوهی، 1398):

$$V_{SZ} = \frac{\sum n h_i}{\sum n V_{Si}} \quad (1)$$

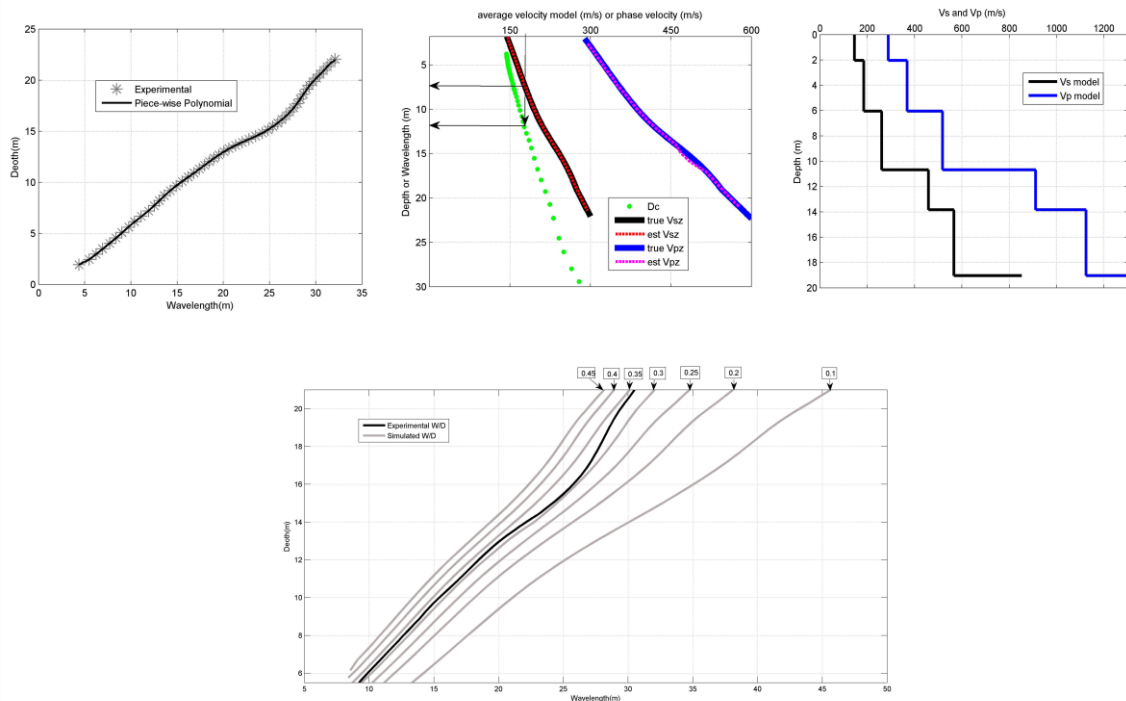
که در آن  $n$  تعداد لایه ها تا عمق  $Z$  است و  $h_i$  و  $V_{Si}$  نیز به ترتیب ضخامت و سرعت موج برشی لایه  $i$  ام است. در شکل 1 الف مدل مصنوعی لایه ای مرجع ( $V_S$  و  $V_p$ ) را نشان می دهیم (این مدل توسط وارون سازی منحنی پاشش نشان داده شده در شکل 1 ب بدست آمده است) که در آن نسبت پواسون را برای همه ی لایه ها ثابت و برابر 0.33 در نظر گرفتیم. در شکل 1 ب پروفیل سرعت میانگین موج برشی مرجع (منحنی سیاه رنگ) را که با استفاده از رابطه ی (1) بدست آمده و منحنی پاشش تجربی مربوطه اش (منحنی نقطه ای سبز رنگ)، که به صورت تابعی از طول موج است را نشان می دهیم. حال از روی این دو منحنی، برای هر مقدار سرعت میانگین موج برشی ( $V_{SZ}$ )، عمق آنرا بدست آورده و از روی منحنی پاشش، طول موجی را که سرعت فاز منحنی پاشش آن برابر سرعت میانگین موج برشی ( $V_{SZ}$ ) است را جستجو می کنیم (به فلش ها در شکل 1 ب دقت کنید). برای مقادیر مختلف  $V_{SZ}$  برابر سرعت فاز، مجموعه ای از جفت طول موج ( $\lambda$ ) - عمق ( $Z$ ) را بدست می آوریم. جفت طول موج-عمق های بدست آمده را در شکل 2 ج به صورت ستاره خاکستری رنگ ترسیم کرده ایم و توسط یک برازش چند جمله ای تکه ای (Piecewise polynomial) درون یابی شده اند (منحنی سیاه رنگ شکل 1 ج). با استفاده از این رابطه چند جمله ای، اکنون می توانیم به طور مستقیم سرعت میانگین موج برشی را از منحنی پاشش تجربی برای داده مصنوعی، بازیابی کنیم (پروفیل خط چین قرمز رنگ در شکل 1 ب). حال در ادامه برای تحقق هدف این مطالعه، ما مدل سرعت میانگین موج تراکمی مربوط به مدل فرضی (منحنی آبی رنگ شکل 1 ب) و رابطه ای طول موج-عمق بدست آمده (شکل 1 ج) را بعنوان مرجع در نظر می گیریم و نشان می دهیم که این رابطه به نسبت پواسون حساس بوده و می توان از آن برای تخمین سرعت میانگین موج تراکمی ( $V_{pz}$ ) استفاده کرد.

برای این هدف ما مقدار  $V_S$  مدل فرضی را حفظ می کنیم ولی مقدار نسبت پواسون ( $\sigma$ ) لایه های مدل را که برای همه لایه ها ثابت است از 0.1 تا 0.45 تغییر می دهیم و منحنی های پاشش تئوری مربوط به مقادیر مختلف نسبت پواسون را محاسبه می کنیم (مدل سازی پیش رو). سپس با استفاده از این منحنی های پاشش تئوری و سرعت میانگین موج برشی مدل، رابطه های طول موج-عمق برای مقادیر مختلف نسبت پواسون را محاسبه می کنیم. در شکل 1 د، تمام روابط طول موج-عمق محاسبه شده (منحنی های خاکستری رنگ) به همراه رابطه ی طول موج-عمق تجربی مدل (منحنی سیاه رنگ) را نشان می دهیم. حال با مقایسه ی رابطه ی طول موج-عمق تجربی و محاسبه شده ها، می توان برای هر عمق، نسبت پواسون را تخمین بزنیم (قبلا این مقدار برای همه لایه ها ثابت فرض شده بود). سپس طبق رابطه ی (2)، می توان سرعت میانگین موج تراکمی ( $V_{pz}$ ) را با استفاده از سرعت میانگین موج برشی ( $V_{SZ}$ ) و نسبت پواسون تخمین زده شده بدست آورد. در شکل 1 ب ما مدل های  $V_{pz}$  واقعی و تخمین شده را با هم مقایسه می کنیم که نشان می دهد این روش به خوبی  $V_{pz}$  را برآورد کرده است. (منحنی خط چین صورتی رنگ شکل 1 ب).

$$V_{pz} = V_{SZ} \sqrt{\frac{2(\sigma_z - 1)}{2\sigma_z - 1}} \quad (2)$$

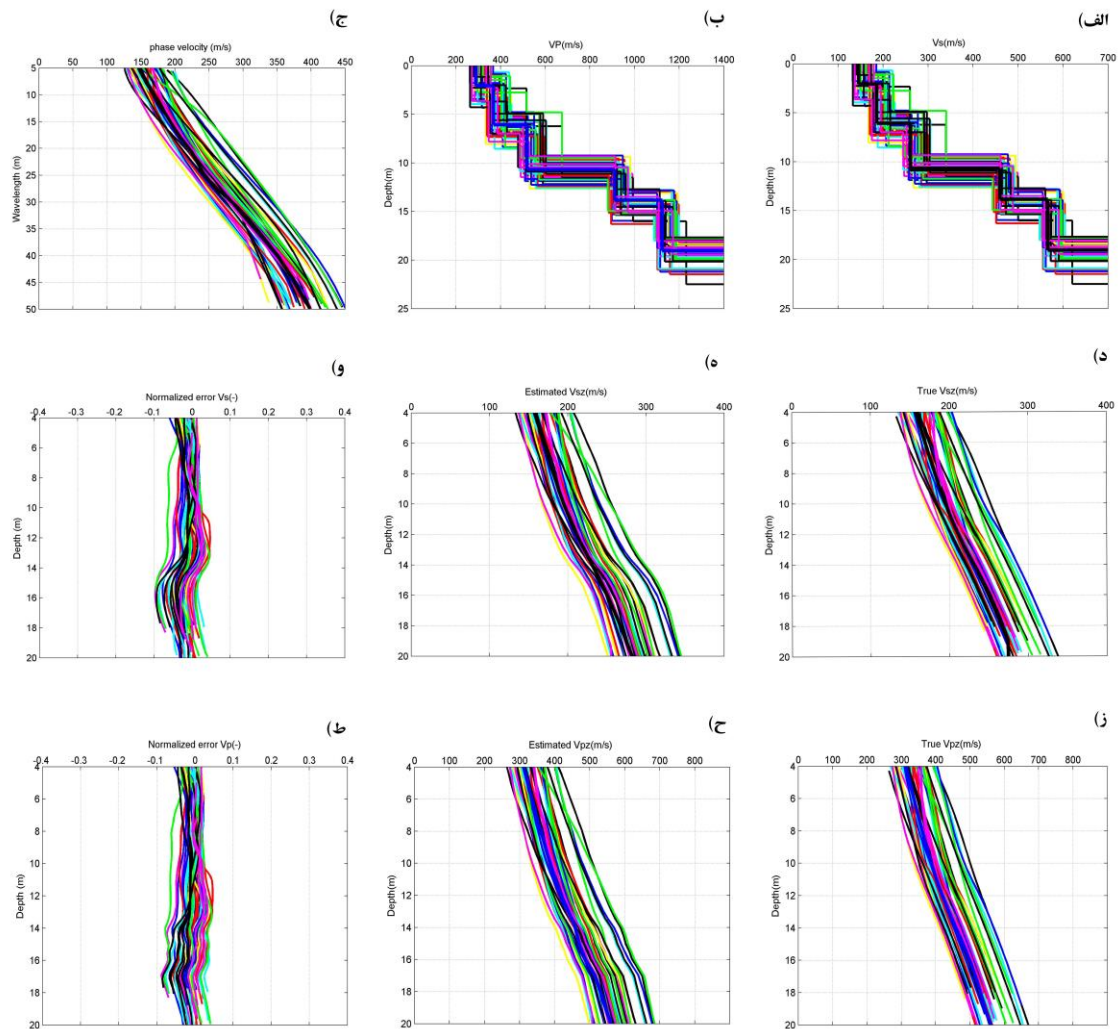
تا کنون ما نشان دادیم که اگر رابطه طول موج-عمق را بتوان بدست آورد، توسط این رابطه می توان سرعت میانگین موج برشی را به طور مستقیم از منحنی پاشش بدست آورد و سپس با توجه به حساس بودن این رابطه به نسبت پواسون، می توان نسبت پواسون را تخمین زد و سپس سرعت میانگین موج تراکمی را نیز برآورد کرد. هرگاه بخواهیم منطقه ای با وسعت زیادی را مطالعه کنیم بدون شک ویژگی کشسانی لایه ها دارای تغییر جانبی خواهند بود. برای مدلسازی این واقعیت فرض می کنیم لایه ها در مدل زمین مصنوعی دارای تغییرات جانبی سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و

ضخامت هستند و ما علاوه بر داده های تک پروفیل لرزه ای که در بالا آن را بررسی کردیم، داده های امواج سطحی برداشت شده در امتداد پروفیل های دیگر را نیز باید بررسی کنیم. برای تعیین سرعت میانگین موج برشی و تراکمی این برداشت ها لازم نیست که منحنی پاشش آنها را وارون کنیم، می توانیم سرعت میانگین موج برشی ( $V_{SZ}$ ) همه این پروفیل ها را با استفاده از رابطه طول موج- عمق برآورد شده مرجع، تخمین بزنیم و سپس در ادامه از روی این رابطه، نسبت پواسون را تخمین بزنیم و از آن برای تخمین سرعت میانگین موج تراکمی ( $V_{PZ}$ ) استفاده کنیم.



**شکل 1 الف.** مدل سرعت موج برشی  $V_S$  و تراکمی  $V_P$  زمین فرضی (منحنی پله ای سیاه رنگ و آبی رنگ). ب. سرعت میانگین موج برشی  $V_{SZ}$  و تراکمی  $V_{PZ}$  برای زمین فرضی (منحنی سیاه رنگ و آبی رنگ)، منحنی پاشش داده مصنوعی DC (منحنی نقطه ای سبز رنگ)، سرعت میانگین موج برشی و تراکمی تخمین زده شده (منحنی خط چین قرمز رنگ و صورتی رنگ). مقادیر محور عمودی برای سرعت موج برشی نشانگر عمق است و برای سرعت فاز نشانگر طول موج است. ج. رابطه ی طول موج-عمق (ستاره های خاکستری رنگ) و برازش چندجمله ای تکه ای (منحنی سیاه رنگ). د. رابطه طول موج-عمق برای مدل مرجع (منحنی سیاه رنگ) و دیگر رابطه های تئوری که توسط مقادیر مختلف نسبت پواسون بدست آمده است (منحنی های خاکستری که مقادیر پواسون در بالای نمودار آورده شده است).

برای شبیه سازی وجود تغییرجانبی در لایه ها، مجموعه 46 مدل سرعت موج برشی ( $V_S$ ) و تراکمی ( $V_P$ ) متفاوت، با ایجاد آشفتگی تصادفی در مدل مرجع (منحنی پرنگ سیاه و آبی رنگ شکل 2 الف و ب) ایجاد کردیم و در شکل 2 ج منحنی های پاشش مربوطه آنها را نشان داده ایم. سرعت میانگین موج برشی  $V_{SZ}$  و تراکمی  $V_{PZ}$  واقعی آنها (شکل 2 د و 2 ز) را با سرعت میانگین موج برشی و تراکمی تخمین زده شده (شکل 2 ه و 2 ح) با استفاده از رابطه طول موج - عمق مقایسه می کنیم. در شکل 2 و 2 ط توزیع خطای تخمین بر حسب عمق را نشان دادیم. از روی این نمودار می توان فهمید که خطا در تخمین سرعت میانگین موج برشی و تراکمی کمتر از 10٪ است. بنابراین روش ارائه شده قادر است در حضور تغییرات جانبی خیلی زیاد، سرعت میانگین موج برشی و تراکمی را با دقت قابل قبول با بکارگیری تک رابطه طول موج-عمق برآورد شده، بازسازی کند.



**شکل 2 الف و ب.** نمایش تمام مدل های سرعت موج برشی و تراکمی مصنوعی؛ ج. منحنی های پاشش مربوط به تمام مدل های سرعت موج برشی مصنوعی؛ د و ز. سرعت میانگین موج برشی و تراکمی واقعی تمام مدل های مصنوعی در قسمت الف و ب؛ د و ح. سرعت میانگین موج برشی و تراکمی تخمین زده شده با رابطه ای طول موج-عمق نشان داده شده در شکل 1 ج. در همه شکل ها مقادیر مدل مرجع با خط توپر سیاه رنگ و آبی رنگ نشان داده شده است. و. خطای نرمال شده ی تخمین سرعت های میانگین موج برشی بر حسب عمق، ط. خطای نرمال شده ی تخمین سرعت های میانگین موج تراکمی بر حسب عمق.

### 3 نتیجه گیری

در این مقاله ما نشان دادیم که سرعت میانگین موج برشی و تراکمی که برای مقاصد مهندسی و تصحیح استاتیک کاربرد دارند را می توان بدون نیاز به وارون سازی منحنی های پاشش امواج ریلی ثبت شده، به طور مستقیم از این منحنی ها تخمین زد. روش پیشنهادی ما مبتنی بر رابطه ای بین طول موج و عمق نفوذ امواج ریلی است. این روش نیازمند دانستن یک مدل سرعت موج برشی مرجع است که در صورت در دسترس نبودن، فقط کافی است که یا از اولین رسیده های رکورد یکی از پروفیل ها تعیین شود یا منحنی پاشش یکی از پروفیل ها وارون گردد تا مدل سرعت برشی مرجع بدست آید. اگر اطلاعات سرعت موج برشی از یک چاه وجود داشته باشد می توان از این مدل استفاده کرد و نیازی به وارون سازی منحنی پاشش نیز نخواهد بود. از آنجا که رابطه طول موج-عمق بدست آمده به نسبت پواسون حساس بوده و از این رابطه برای تخمین نسبت پواسون لایه ها استفاده کردیم و در ادامه مدل های سرعت میانگین موج برشی را به مدل های سرعت میانگین موج تراکمی تبدیل کردیم. نشان دادیم که رابطه بدست آمده می تواند بدون نیاز به وارون کردن منحنی های پاشش پروفیل های دیگر، برای تخمین میانگین سرعت موج برشی و تراکمی بکار رود حتی در مناطقی که دارای

تغییرات جانبی باشند. نتایج نشان می دهد که سرعت میانگین موج برشی و تراکمی را می توان با عدم قطعیت کمتر از 10% برای داده های مصنوعی با تغییرات جانبی بسیار زیاد تخمین زد.

#### منابع

- BSSC, 1994, NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings, part I: Provisions, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Dobry R, 2000, New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, earthquake spectra, vol 16, no 1.
- Konno, K., and Kataoka, S., 2000, New method for estimating the average s-wave velocity of the ground, Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation, Palm Springs, California, November, 2000
- Kramer, S., 2005, "Geotechnical earthquake engineering", Prentice Hall.
- Socco, L. V., S. Foti, and D. Boiero, 2010, Surface wave analysis for building near surface velocity models: Established approaches and new perspectives: Geophysics, 75, no. 5, 75A83–75A102, doi: 10.1190/1.3479491.
- Socco, L. V., C. Comina, and F. Khosro Anjom, 2017, Direct static estimation through surface wave analysis: Part 1 — S-wave velocity: Geophysics, 82, P. U49–U59, 13 FIGS., doi: 10.1190/geo2016-0367.1.
- Socco, L. V., and C. Comina, 2017, Time-average velocity estimation through surface-wave analysis: Part 2: P-wave velocity: Geophysics, 82, this issue, doi: 10.1190/geo2016-0368.1.
- قوامی، س.، سیاه کوهی، ح. ر.، 1398، تخمین سرعت میانگین موج برشی  $V_{sz}$  با استفاده از رابطه طول موج-عمق حاصل از تحلیل امواج سطحی. هفتمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، <https://irmc7.ir/irocs/index.php/irmc7/irmc7/author/submission/106>