

# بررسی و تحلیل سختی بستر ماسه‌ای زیر بناهای حمل و نقل با استفاده از آزمایش‌های امواج سطحی پیوسته و بارگذاری صفحه

عبدالحسین حداد، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

غلامعلی شفابخش، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

E-mail:ahadad@semnan.ac.ir

## چکیده

نیاز روز افزون جوامع به توسعه شبکه‌های مختلف حمل و نقل مانند بزرگراه‌ها، راه آهن، فرودگاه و ابنیه فنی مرتبط مانند پل‌ها و تونل‌ها باعث شده که استفاده از روش‌های نوین اندازه‌گیری سختی قشرهای زمین و لایه‌های زیرسازی و روسازی به سرعت جایگزین روش‌های متداول فعلی شوند. در حال حاضر اغلب روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای معرف سختی، مبتنی بر انجام آزمایش‌های بارگذاری برجا و یا آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های به دست آمده از مصالح در آزمایشگاه است. معمولاً نتایج این آزمون‌ها تحت تأثیر اغتشاش ایجاد شده در محیط آزمایش و دستخوردگی نمونه‌ها قرار دارند. در این مقاله در ابتدا روش اندازه‌گیری سختی بر جای زمین با استفاده از فنآوری نوین امواج سطحی پیوسته معرفی شده و سپس با انجام یک سری تحقیقات میدانی در ناحیه ای از جنوب ایران، همبستگی میان سختی بستر ماسه‌ای با پارامترهایی چون نسبت منافذ و فشار محصور کننده، تعیین و ضرایب ثابت مورد نیاز برای رابطه پیش بینی سختی در محل مورد مطالعه، ارائه شده است. در مرحله بعد با تلفیق نتایج آزمایش‌های امواج سطحی پیوسته و بارگذاری صفحه، روند تغییرات سختی بستر ماسه ای مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن به صورت نمودار سختی ارائه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: سختی زمین و بستر، آزمایش امواج سطحی پیوسته، مدول برشی حداکثر، بستر ماسه‌ای

## ۱. مقدمه

در محل احداث سازه‌های حساس و ابنیه فنی، خاکبرداری‌های عمیق، خاکریزی‌های حجیم و نقاطی که زمین تحت عملیات بهسازی قرار می‌گیرد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [1]. بررسی‌های عملی انجام شده در هنگام و یا پس از ساخت بسیاری از پروژه‌ها مشخص کرده است که پارامترهای مرتبط با سختی زمین، به شدت تحت اثر روش‌های اندازه‌گیری و آزمایش‌های مرتبط با آن قرار داشته و در نتیجه برآوردهای انجام شده در این زمینه از حساسیت بسیار زیادی برخوردار

شناسایی، ارزیابی و کنترل خواص مکانیکی قشرهای زمین و لایه‌های زیرسازی و روسازی در شبکه‌های حمل و نقل از جمله نیازهای اساسی در روند طرح، اجرا و همچنین نگهداری و بهسازی این نوع سیستم‌هاست. امروزه این نکته به خوبی روشن شده که ارزیابی صحیح و منطبق با واقعیت از شرایط زیر سطحی زمین و قشرهای زیرسازی و روسازی می‌تواند تضمین‌کننده پایداری و دوام سازه‌های احداث شده بر روی آن لایه‌ها باشد. اندازه‌گیری دقیق پارامترهای مرتبط با سختی زمین

تغییر شکل نسبی دلخواه به حداکثر مقدار سختی در دامنه تغییر شکل نسبی بسیار کوچک.

## ۲-۲ روش‌های مبتنی بر آزمایش‌های صحرایی

در آزمونهای محلی به کمک تجهیزات ویژه و با اعمال شرایط بارگذاری خاص بر روی سطح و یا داخل بستر، سختی لایه‌ها به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. مهم‌ترین آزمونهای برجای اندازه‌گیری سختی زمین عبارتند از، ضربه و نفوذ استاندارد (SPT)، نفوذ مخروط (CPT)، فشارسنجی<sup>۲</sup>، دایالاتومتر<sup>۳</sup> و آزمونهای ژئوفیزیکی رایج و پیشرفته که در بند جداگانه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرند. انجام اغلب این آزمایش‌ها همراه با اغتشاش و دستخوردگی در محیط مورد مطالعه بوده و دقت ناکافی در سختی اندازه‌گیری شده را در پی خواهد داشت.

جدول ۱. تأثیر عوامل مختلف بر مقدار نسبت سختی نرمالیزه [3]

| پارامتر   | میزان تأثیر بر سختی   |
|---|-----------------------|
| دامنه تغییر شکل در حین آزمایش                             | تأثیر بسیار زیاد دارد |
| فشار محصور کننده بر روی مصالح در حین آزمایش               | تأثیر بسیار زیاد دارد |
| نوع مصالح و خواص خمیری آنها                               | تأثیر بسیار زیاد دارد |
| نسبت منافذ  | اثر زیاد              |
| تعداد سیکلهای بارگذاری                                    | کم اثر                |
| فرکانس بارگذاری   | کم اثر                |
| نسبت بیش تحکیمی   | کم اثر                |
| درجه اشباع شدگی مصالح                                     | کم اثر                |
| شکل ظاهری دانه‌ها، دانه بندی، نوع کانی‌های موجود در مصالح | کم اثر                |

## ۳. آزمایش‌های ژئوفیزیکی اندازه‌گیری سختی زمین

تحقیقات اخیر انجام شده در زمینه اندازه‌گیری مقادیر سختی در خاکها و مصالح دانه‌ای بیانگر آن است که مقادیر سختی نمونه‌هایی که در آزمایشگاه تعیین می‌شوند در حد بسیار کمتری از سختی محاسبه شده از طریق تحلیل معکوس تغییر شکل‌های مشاهده شده در اطراف سازه‌ها و سختی به دست آمده از آزمایش‌های برجای ژئوفیزیکی است [2]. وجود چنین نتایجی استفاده از روشهای اندازه‌گیری برجای و به ویژه روشهای ژئوفیزیکی را که در طی آن محیط مورد آزمایش در مصالح دچار کمترین اغتشاش می‌شود بیشتر توجیه می‌کند.

است. رفتار سنجی و تحلیل معکوس<sup>۱</sup>، در زمینه برآورد سختی زمین، در اطراف ابنیه احداث شده این واقعیت را روشن کرده است که در اغلب ارزیابی‌ها، سختی زمین در شرایط واقعی از سختی اندازه‌گیری شده بر روی نمونه‌های مورد آزمایش در آزمایشگاه بیشتر است [2]. بنابراین ابداع و استفاده از روش‌های اندازه‌گیری سختی که طی آن، محیط خاک و یا قشرهای دانه‌ای دچار کمترین دستخوردگی و کاهش استحکام طبیعی شوند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## ۲. روشهای رایج اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی

مشخصات ژئومکانیکی لایه‌های زمین و مصالح دانه‌ای در دو بخش قابل بررسی هستند. بخش اول شامل مشخصات مکانیکی مرتبط با گسیختگی و شکست برشی و بخش دوم دربرگیرنده پارامترهای سختی و خواص تغییر شکل پذیری مصالح است که رفتار و واکنش بستر را تحت اثر بارهای مختلف تبیین می‌کنند. روشهای اندازه‌گیری خواص ژئومکانیکی لایه‌های زمین و مصالح دانه‌ای از جمله سختی آنها به دو گروه آزمایشگاهی و صحرایی تقسیم می‌شوند.

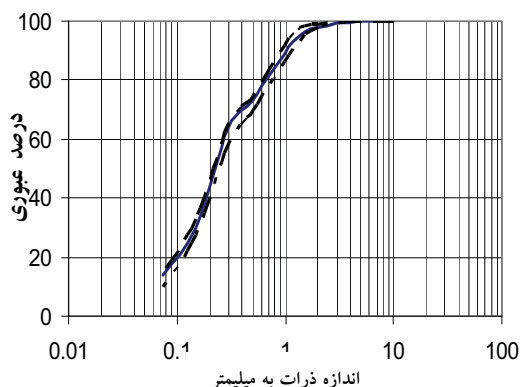
## ۲-۱ روش‌های مبتنی بر آزمون‌های آزمایشگاهی

آزمونهای بسیاری برای سنجش خواص مکانیکی مصالح دانه‌ای در آزمایشگاه وجود دارد. مهم‌ترین روشهای آزمایشگاهی اندازه‌گیری سختی، عبارتند از: آزمایشهای سه محوری رایج و دینامیکی پیشرفته، آزمایشهای برش ساده و برش حلقوی، آزمایش ستون تشدید، آزمایش پالس اولتراسونیک (با استفاده از عناصر خمش پذیر پیزوالکتریک)، آزمایش برش پیچشی بر روی نمونه‌های استوانه‌های توخالی خاک و آزمایش تعیین مدول برجهندگی مصالح دانه‌ای.

صرف نظر از نوع آزمون انتخابی، عوامل تکنیکی بسیاری بر نتایج آزمونهای سنجش سختی خاک و مصالح دانه‌ای در آزمایشگاه تأثیر گذاشته و موجب می‌شوند تا سختی اندازه‌گیری شده با مقدار واقعی آن اختلاف داشته باشد. مهم‌ترین منشاء ایجاد اختلاف در تعیین سختی مصالح دانه‌ای و خاکها، به ماهیت غیر خطی در رفتار این نوع مصالح باز می‌گردد.

در جدول ۱ مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نسبت سختی نرمالیزه و میزان تأثیر آنها برشمرده شده است. نسبت سختی نرمالیزه ( $G/G_{max}$ )، مطابق تعریف عبارتست از نسبت سختی در دامنه

نسبی زیاد است. در شکل ۱ نمودار پوش دانه بندی بستر ماسه‌ای و در جدول ۲ مشخصات فیزیکی آن ارائه شده است.



شکل ۱. پوش دانه‌بندی مصالح بستر در محل آزمایش

## ۵. آزمایش‌های امواج سطحی پیوسته و بارگذاری صفحه و تحلیل نتایج حاصل

برای دستیابی به اهداف مورد نظر این تحقیق، علاوه بر آزمایش‌های متداول ژئوتکنیکی بر روی مصالح برگزیده از بستر که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شد، انجام آزمایش‌های امواج سطحی پیوسته و آزمایش‌های بارگذاری صفحه به شرح زیر نیز برنامه‌ریزی شد:

- آزمایش‌های متعدد امواج سطحی با محدوده فرکانس ۱۰ تا ۱۰۰ هرتز در نقاط مورد نظر.
- آزمایش‌های بارگذاری صفحه در همان نقاط و در اعماق ۰/۵ تا ۱ متر.

جزئیات و تحلیل نتایج هر یک از آزمایش‌ها در بخش‌های بعدی ارائه می‌شوند.

### ۵-۱ آزمایش امواج سطحی پیوسته

سنجش سختی خاک به روش امواج سطحی پیوسته (CSW)، یکی از روش‌های نسبتاً نوین ژئوفیزیک صحرایی است که به وسیله آن می‌توان سرعت عبور امواج از لایه‌ها و سختی قشرهای بستر، پی‌های خاکی و لایه‌های سنگی زیر سازی و یا روسازی را در محل و بدون اعمال هرگونه دستخوردگی به محیط تعیین کرد. تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش برای اولین بار در ایران و توسط مؤلفین مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ نمای شماتیک تجهیزات و مسیر عبور موج سطحی ترسیم شده است. در این روش یک ویراتور

مهم‌ترین مزایای آزمون‌های ژئوفیزیکی نسبت به دیگر روش‌های متداول اندازه‌گیری سختی عبارتند از:

- انجام آزمایش در محل و نیاز نداشتن به نمونه برداری از خاک
- حفظ شرایط دست نخوردگی در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و مصالح
- قابلیت تعیین سختی کلی توده‌های خاک و یا سنگ
- سرعت عمل در انجام آزمایش و دستیابی سریع به نتایج
- هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی تعیین سختی

در بین روش‌های ژئوفیزیکی اندازه‌گیری سختی لایه‌های خاکی و سنگی که به حفر گمانه نیاز ندارند و در نتیجه موجب دستخوردگی محیط نمی‌شود، آزمایش امواج سطحی پیوسته، روش نسبتاً نوینی است که از مزایای بسیاری برخوردار است. جزئیات بیشتر درباره این روش اندازه‌گیری در بخش بعدی ارائه می‌شوند.

## ۴. تعیین پارامترهای سختی بستر ماسه‌ای در

### منطقه مورد مطالعه

اندازه‌گیری و تعیین نمودار سختی در بسترهای دانه‌ای همانند شن و ماسه و در حالت برجا، به آن که نمونه‌برداری دست نخورده امکان پذیر نیست، با دشواری‌هایی همراه است. در تحقیق حاضر برای حل این مشکلات استفاده از آزمون‌های صحرایی جدید امواج سطحی پیوسته و آزمایش بارگذاری صفحه مورد توجه قرار گرفت. علت انتخاب این دو آزمایش، حفظ شرایط دست نخوردگی در مصالح و تفاوت دامنه تغییر شکل نسبی ایجاد شده در بستر بوده است. در آزمایش امواج سطحی پیوسته دامنه تغییر شکل نسبی اعمال شده به بستر در حدود  $10^{-4}$  درصد و در آزمایش بارگذاری صفحه این مقدار بیش از ۱ درصد است. به این ترتیب می‌توان سختی بستر ماسه‌ای را در محدوده وسیعی از تغییر شکل نسبی مورد ارزیابی قرارداد.

### ۴-۱ مشخصات ژئوتکنیکی بستر مورد مطالعه

محل انجام آزمایش‌ها در این تحقیق، در منطقه مارون در استان خوزستان بوده است. بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده در محل نشان داد که لایه‌های زمین تا عمق ۱۵ متری متشکل از مصالح دانه‌ای همگن و غیر چسبنده حاوی ماسه با کمی لای و با تراکم

ژئوفون‌ها نسبت به منبع ارتعاش تعیین می‌شود. پس از تعیین مقدار اختلاف فاز، طول موج امواج ریلی گسترش یافته از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \frac{2\pi d}{\phi} = \frac{2\pi d}{\phi_2 - \phi_1} \quad (1)$$

در این رابطه  $\lambda$  طول موج ریلی منتشر شده در محیط،  $d$  فاصله میان ژئوفون‌ها و  $\phi$  اختلاف فاز میان امواج دریافت شده توسط ژئوفون‌ها برحسب رادیان است.

اگر مقدار  $\lambda$  محاسبه شده از رابطه ۱ از فاصله میان ژئوفون‌ها ( $d$ ) کمتر باشد، مقدار طول موج از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{2\pi d}{(2\pi n + \phi)} \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $n$  یک عدد صحیح بزرگ‌تر از صفر است. پس از تعیین مقدار طول موج، سرعت انتشار امواج ریلی در محیط را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه کرد.

$$V_R = f \times \lambda \quad (3)$$

در رابطه (۳)  $V_R$  سرعت انتشار فازی امواج ریلی در محیط،  $f$  فرکانس ارتعاش ویبراتور و  $\lambda$  طول موج ریلی منتشر شده است. لازم به یادآوری است که در روش امواج سطحی پیوسته، فرکانس ارتعاش ویبراتور در حین آزمایش قابل کنترل بوده و بنابراین به عنوان پارامتری معلوم در رابطه ۳ قرار می‌گیرد.

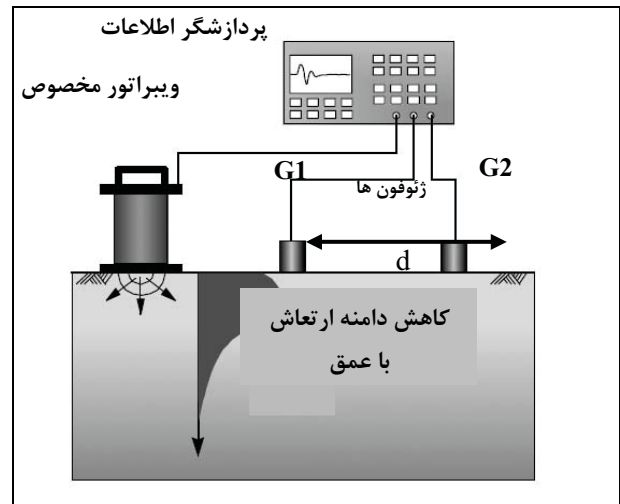
پس از طی مراحل گفته شده، می‌توان نمودار پراکندگی سرعت فازی- طول موج ( $\lambda - V_R$ )، را برای محل مورد آزمایش ترسیم کرد. جزئیات بیشتر این مراحل در شکل ۳ ارایه شده است. در گام بعدی با استفاده از تکنیک‌های معکوس، نمودار پراکندگی سرعت فازی- طول موج به نمودار سرعت موج ریلی- عمق تبدیل می‌شود.

به این منظور می‌توان از روش‌های تبدیل زیر استفاده کرد [4]:

- روش مستقیم طول موج - عمق
- روش ماتریس هاسکل و تامسون
- روش تقریب اجزای محدود

از میان روش‌های بالا روش مستقیم طول موج - عمق با توجه به سادگی آن از سرعت عمل بیشتری برخوردار است. اساس این روش بر این اصل استوار است که نفوذ دامنه امواج ریلی در محیط بستر محدود بوده و مقدار آن کسری از طول موج انتشار یافته است. بر اساس توصیه‌های به عمل آمده، برای ترسیم نمودار سرعت موج ریلی - عمق، نسبت  $(\lambda/z)$  برابر با ۳ انتخاب می‌شود [4].

الکترومغاطیسی ویژه به عنوان منبع ارتعاش، ارتعاشات کنترل شده‌ای را از نظر دامنه و فرکانس ایجاد می‌کند. این ویبراتور می‌تواند در هر بار ضربه زدن حداکثر نیرویی معادل ۴۹۸ نیوتن را بر زمین اعمال کند. تابع ارتعاشی ایجاد شده سینوسی بوده و امواج ناشی از آن به صورت امواج سطحی از نوع ریلی بر روی سطح زمین منتشر می‌شوند.

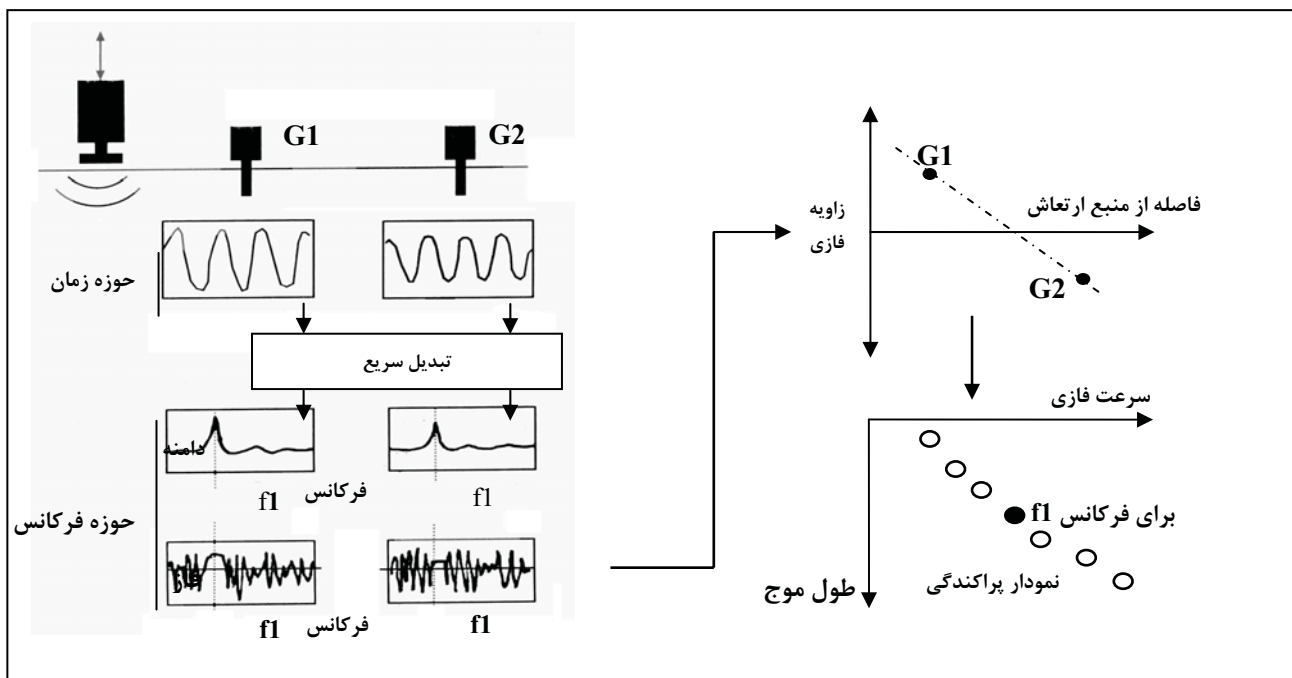


شکل ۲. نمای شماتیک تجهیزات بکاررفته در آزمایش CSW

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه بستر

| مقادیر      | مشخصات ماسه                        |
|-------------|------------------------------------|
| A-3 و A-2-4 | نوع ماسه (طبقه بندی AASHTO)        |
| ۱/۳         | ضریب انحناء                        |
| ۵           | ضریب یکنواختی                      |
| ۱۲          | درصد ذرات ریز تر از الک شماره ۲۰۰  |
| NP          | نشانه خمیری                        |
| ۲۰-۱۷/۳     | وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> ) |
| ۰/۳۴        | نسبت منافذ حداقل ( $e_{min}$ )     |
| ۰/۵۵        | نسبت منافذ حداکثر ( $e_{max}$ )    |
| ۲/۷۶        | چگالی ذرات جامد                    |
| ۳۵-۳۹       | زاویه اصطکاک داخلی (درجه)          |
| ۰/۳۵        | ضریب پواسون                        |

جابجایی قائم ذرات در مسیر حرکت امواج ریلی توسط ژئوفون‌های حساس با دامنه فرکانس طبیعی ۲ هرتز در حوزه زمان دریافت شده و سپس به سیستم ثبت و پردازش داده‌ها منتقل می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از تبدیل سریع فوری (FFT)، سیگنال‌های امواج دریافتی به حوزه فرکانس تبدیل شده و از این طریق اختلاف فاز ارتعاش در هر یک از



شکل ۳. روش دستیابی به نمودار پراکندگی سرعت فازی - طول موج [۴]



شکل ۴. تجهیزات آزمایش امواج سطحی در محل آزمایش

مطابق نتایج به دست آمده در این محل، سختی اولیه بستر با ازدیاد عمق و تأثیر عواملی همچون فشار محصورکنندگی و وزن لایه‌های فوقانی، روند افزایشی دارد. خلاصه نتایج آزمونهای امواج سطحی برای اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری در ۵ نقطه مورد نظر، در جدول ۳ ارائه شده است.

پس از تعیین عمق نفوذ موج بر حسب طول موج رابلی و همچنین سرعت موج رابلی متناظر با آن عمق، نمودار سرعت موج برشی - عمق ترسیم می‌شود. سرعت موج برشی بر حسب سرعت موج سطحی رابلی از رابطه ۴ محاسبه می‌شود، [5]:

$$V_S = V_R \times \frac{1+v}{0.87+1.12 \times v} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) ( $v$ ) ضریب پواسون ماسه معادل ۰/۳۵ است. پس از تعیین سرعت موج برشی ( $V_S$ ) در هر لایه، مدول برشی اولیه و یا سختی حداکثر لایه ( $G_{max}$ )، نیز از رابطه ۵ بر حسب جرم مخصوص مصالح ( $\rho$ )، تعیین می‌شود.

$$G_{max} = \sqrt{\frac{V_S}{\rho}} \quad (۵)$$

مراحل بالا به طور خودکار و با استفاده از یک کاربرگ محاسباتی در محیط نرم افزار Excel به انجام رسید. در این آزمایش از فرکانس‌های کوچک‌تر ارتعاشی برای تعیین سختی لایه‌های واقع در اعماق زیاد و از فرکانس‌های بالا برای تعیین سختی لایه‌های سطحی استفاده می‌شود.

تجهیزات بکار رفته در یکی از محل‌های مورد آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه ای از نتایج این آزمایش نیز که نمودار مدول برشی حداکثر بر حسب عمق است در شکل ۵ ارائه شده است.

استاکی و همکاران [1]، برای ماسه‌های دست نخورده، روابط زیر میان پارامترهای اندازه‌گیری شده برقرار شد.

$$G_{\max} = C_1 \cdot \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma'_0)^m \quad (5)$$

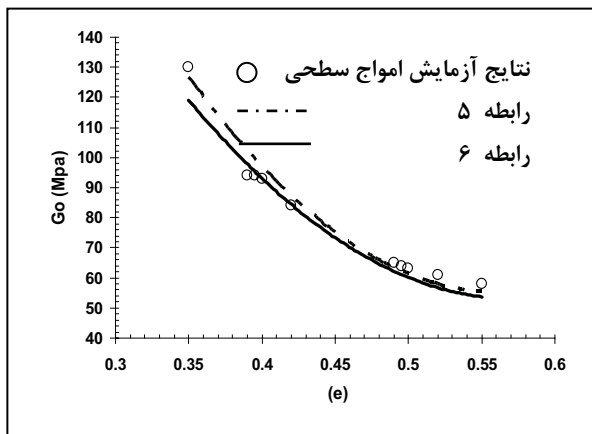
$$G_{\max} = C_2 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma'_0)^n \quad (6)$$

در روابط فوق  $e$  نسبت منافذ ماسه،  $\sigma'_0$  تنش مؤثر میانه بر روی ماسه برحسب کیلونیوتن بر متر مربع و  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $m$  و  $n$ ، ضرایب ثابت و وابسته به نوع ماسه هستند. با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی معلوم در منطقه مارون نظیر وزن مخصوص، نسبت منافذ در محل و مدول برشی بیشینه حاصل از آزمون‌های متعدد امواج سطحی پیوسته، ضرایب مجهول  $C_1$ ،  $C_2$  و  $m$ ،  $n$  به کمک روش کمینه سازی مربعات خطا تعیین شدند که مقادیر آنها برای ماسه مارون در جدول ۴ ارائه شده است.

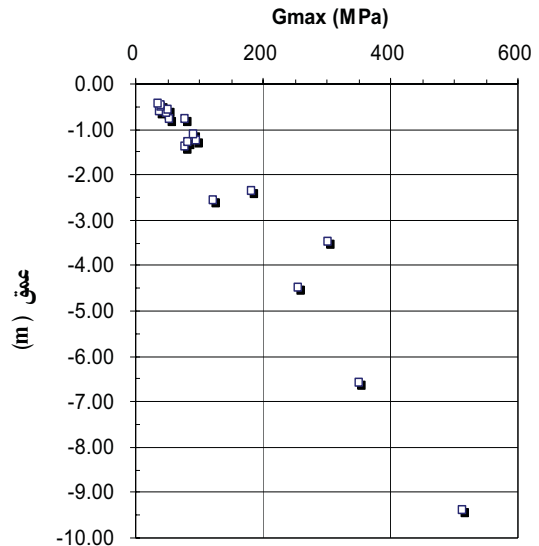
جدول ۴. ضرایب ثابت روابط مدول برشی برای ماسه مارون

| ضرایب ثابت |               | رابطه |
|------------|---------------|-------|
| $m = 0.5$  | $C_1 = 610.4$ | ۵     |
| $n = 0.4$  | $C_2 = 1573$  | ۶     |

در شکل ۶ نتایج سختی اندازه‌گیری شده در محل و منحنی‌های پیش‌بینی سختی بر حسب نسبت منافذ ماسه حاصل از روابط ۵ و ۶ (پس از جاگذاری مقادیر ثابت از جدول ۴) ارائه شده است. مطابق شکل، همبستگی مناسبی میان تغییرات سختی و نسبت منافذ اندازه‌گیری شده در محل و مقادیر به دست آمده از روابط ۵ و ۶ دیده می‌شود.



شکل ۶. مقایسه سختی اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده از روابط ۵ و ۶ برای ماسه مارون



شکل ۵. نمودار تغییرات سختی بستر با عمق در نقطه ۱

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های امواج سطحی پیوسته

| شماره نقطه مورد آزمایش | عمق لایه (متر) | مدول برشی حداکثر (MPa) |
|------------------------|----------------|------------------------|
| ۱                      | ۰/۵            | ۶۵                     |
| ۱                      | ۱/۰            | ۹۴                     |
| ۲                      | ۰/۵            | ۶۱                     |
| ۲                      | ۱/۰            | ۹۴                     |
| ۳                      | ۰/۵            | ۵۸                     |
| ۳                      | ۱/۰            | ۶۴                     |
| ۴                      | ۰/۵            | ۶۳                     |
| ۴                      | ۱/۰            | ۱۰۳                    |
| ۵                      | ۰/۵            | ۸۴                     |
| ۵                      | ۱/۰            | ۹۳                     |

### ۲-۵ تعیین رابطه همبستگی بین مدول برشی حداکثر، تنش مؤثر و نسبت منافذ ماسه

همان گونه که در جدول ۱ اشاره شد، سه عامل دامنه تغییر شکل نسبی، فشار مؤثر محصور کننده و نسبت منافذ، تاثیر زیادی بر مقدار مدول برشی بیشینه در مصالح دانه ای و ماسه‌ها دارند. در ادامه این تحقیق سعی شد تا ارتباط مناسبی میان پارامترهای بیان شده با مقادیر مدول برشی بیشینه در محل برقرار شود. به این منظور با استفاده از روابط پیشنهادی بر مبنای تجربیات



### ۳-۵ آزمایش بارگذاری صفحه

در بخش دوم این تحقیقات سعی شد تا روند تغییرات سختی بستر ماسه‌ای با افزایش دامنه بارگذاری تعیین شود. به این منظور با استفاده از آزمایش‌های متعدد بارگذاری صفحه به روش ASTM D1194 که در اعماق ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری از سطح زمین انجام شدند، باربری نهایی بستر ( $q_{ult}$ ) تعیین شد. در شکل ۷ نحوه انجام آزمون بارگذاری صفحه بر روی بستر ماسه‌ای در نقطه ۱ نشان داده شده است.



شکل ۷. آزمایش بارگذاری صفحه در محل نقطه ۱

بارگذاری در هر محل به صورت پله‌ای و تا زمان گسیخته شدن بستر ادامه داشته است. در جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج این آزمایش‌ها ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه

| شماره نقطه | عمق لایه (متر) | تغییر شکل نسبی در لحظه گسیختگی (%) | باربری نهایی بستر (Mpa) |
|------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|
| ۱          | ۰/۵            | ۹/۸                                | ۱۱/۷                    |
| ۱          | ۱/۰            | ۱۰/۹                               | ۱۲/۳                    |
| ۲          | ۰/۵            | ۹/۵                                | ۱۰/۳                    |
| ۲          | ۱/۰            | ۱۱/۲                               | ۱۲/۹                    |
| ۳          | ۰/۵            | ۸/۹                                | ۹/۹                     |
| ۳          | ۱/۰            | ۸/۷                                | ۱۰/۸                    |
| ۴          | ۰/۵            | ۸/۴                                | ۹/۸                     |
| ۴          | ۱/۰            | ۹/۳                                | ۱۳/۱                    |
| ۵          | ۰/۵            | ۹/۱                                | ۱۲/۰                    |
| ۵          | ۱/۰            | ۱۱/۲                               | ۱۲/۷                    |

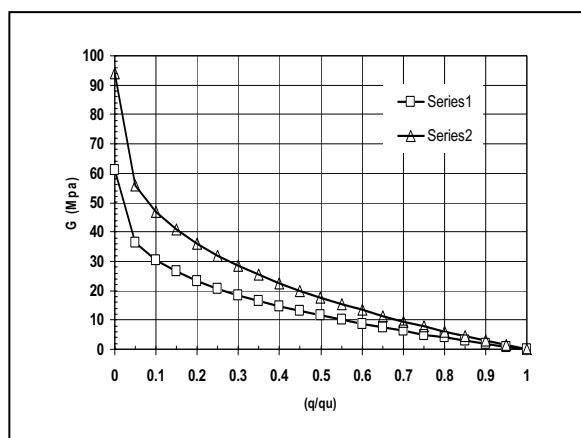
آزمون بارگذاری صفحه، تغییرات سختی بستر برای هر محدوده از بارگذاری با استفاده از رابطه ۷ تعیین می‌شود [۶]:

$$G = G_{max} \left[ 1 - \left( \frac{q}{q_{ult}} \right)^n \right] \quad (7)$$

در رابطه ۷،  $q$  فشار وارد بر بستر،  $q_{ult}$  مقاومت نهایی بستر و  $n$  ضریبی است که برای مصالح غیرچسبنده همانند ماسه مارون در حدود ۰/۳ است.

به این ترتیب در این تحقیق، با تلفیق نتایج آزمایش‌های صحرائی امواج سطحی و بارگذاری صفحه، نمودار تغییرات سختی بستر ماسه‌ای برحسب فشار وارده تعیین شد.

در شکل ۸ نمونه‌ای از نمودار سختی مرتبط با نقطه آزمایش شماره ۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۸، با افزایش بارگذاری و در نتیجه آن تغییر شکل بستر، مقدار سختی اولیه کاهش یافته و به تدریج رفتار مصالح به طور غیر خطی وارد مرحله خمیری می‌شود.



شکل ۸. نمودار تغییرات سختی بستر ماسه‌ای برحسب نسبت فشار وارده در نقطه شماره ۲

### ۶. نتیجه گیری

ارزیابی دقیق پارامترهای مکانیکی مانند سختی در بسترهای ماسه‌ای که نمونه برداری دست نخورده از آنها امکان پذیر نیست، نقش کلیدی در تبیین رفتار این نوع مصالح و پایداری ابنیه مستقر بر روی آنها در شرایط مختلف دارد. در این تحقیق مؤلفین برای اولین بار موفق به اندازه‌گیری سختی بستر ماسه‌ای به روش امواج سطحی پیوسته در منطقه مارون شدند. طی مطالعات انجام شده، دو رابطه همبستگی برای پیش بینی سختی اولیه، برحسب نسبت

### ۴-۵ تلفیق نتایج آزمایش‌های امواج سطحی و بارگذاری صفحه

با در اختیار داشتن مقادیر مدول برشی حداکثر بستر ( $G_{max}$ ) حاصل از آزمایش امواج سطحی و مقاومت نهایی بستر ( $q_u$ )، از

۷. مراجع

1. Stokoe, K.H., Darendeli, M., Andrus, R.D. and Brown, L.T. (1999) "Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies", Theme Lecture, Second International Conference Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 3, Lisbon, Portugal, June, pp. 811-845
2. Simons, N, Menzies, B. and Matthews, M.C. (2002) "Geotechnical site investigation" Thomas Telford Publishing, London, 353pp.
3. Darendeli, M. B., (2001) "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, TX.
4. Matthews, M.C, Hope, V.S., Clayton, C.R.I, (1996) "The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles", Proc. Instn. Civ. Engrs, Geotech Engng, Vol: 119, pp.84-95.
5. Viktorov, I.A. (1967) "Rayleigh and Lamb Waves: Physical theory and applications", Plenum Press, New York.
6. Sabatini P.J. [et al] (2002) "Evaluation of soil and rock properties", U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-IF-02-034.

پانویس ها

1. Back analysis
2. Pressure meter
3. Dilatometer
4. Continuous Surface Wave (CSW)
5. Rayleigh

منافذ و فشار محصور کننده برای ماسه مارون، برآزش و آرایه شدند. ضرایب بکار رفته در این روابط بر اساس روش کمینه سازی مربعات خطا تعیین و آرایه شده‌اند.

بر اساس نتایج به دست آمده از مشاهدات صحرایی، با افزایش عمق آزمایش و همچنین کاهش نسبت منافذ، مقدار سختی، افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. یادآوری می‌شود که در میان روشهای مورد استفاده در تعیین سختی بستر، روش معرفی شده در این تحقیق از مزایای زیر برخوردار است:

- اندازه‌گیری خواص مکانیکی لایه‌های زمین نظیر سختی، بدون نیاز به حفر گمانه و ایجاد هرگونه دست خوردگی و اغتشاش در محیط خاک،
- امکان استفاده از این آزمایش در تعیین سختی لایه‌های زیرسازی و روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها به منظور ارزیابی وضعیت عملکرد این لایه‌ها بدون نیاز به برداشت لایه‌های فوقانی و توقف بهره برداری،
- سرعت عمل زیاد این روش نسبت به سایر روشهای آزمایشگاهی و صحرایی،
- امکان تلفیق نتایج این آزمایش با سایر روشهای صحرایی نظیر آزمایش بارگذاری صفحه به منظور آرایه منحنی سختی خاک.

در بخش دوم تحقیق با تلفیق نتایج حاصل از آزمایش‌های امواج سطحی پیوسته و آزمایش‌های بارگذاری صفحه، روش دستیابی به نمودار تغییرات سختی بستر به ازای افزایش دامنه بارگذاری که یک منحنی غیر خطی است، آرایه شد. به کمک این منحنی می‌توان سختی بستر را به ازای محدوده بارگذاری مورد نظر تعیین کرده و در نتیجه به درک واقعی تری از رفتار بستر ماسه‌ای در حین بارگذاری دست یافت.



# Evaluation and Analysis of Sandy Subgrade Stiffness of Transportation Systems by Continuous Surface Waves and Plate Loading Tests

*A. Haddad, Associate Professor , Department of Civil Engineering,  
Semnan University, Semnan, Iran*

*Gh. Shafabakh, Associate Professor, Department of Civil Engineering,  
Semnan University ,Semnan, Iran  
E-mail: ahadad@semnan.ac.ir*

## ABSTRACT

New demands in societies for development of transportation networks such as highways, railroads, airports, bridges and tunnels, has caused the classic methods of subsurface and sub-base stiffness evaluating to be substituted with the advanced characterization methods rapidly. At present most methods for of stiffness parameters evaluation are based on field tests or laboratory tests on undisturbed samples in laboratories. The results of these tests are often affected by disturbance of samples and insertion effects. Values of stiffness estimated in this way can be expected to be far superior to many techniques used routinely today. For example, oedometer testing (a one-dimensional compression test), external strain triaxial testing, and penetration testing, where poor performance in predicting stiffness has been known for decades. Continuous Surface waves (CSW) method may be used to determine shear stiffness in soil or rock layers in subgrade of transportation systems. In this paper the continuous surface waves system, being used to determine stiffness parameters, is firstly introduced and then the results of field stiffness measurements carried out on a sandy subgrade at the south of Iran (Maroon) are presented. The Continuous Surface Wave used in this testing is completely personal computer based and controlled. The surface wave source used is an electromagnetic vibrator capable of exerting a peak sine force of 498N, Fig 1.



**Figure 1: Continuous Surface Wave System being used on a sandy subgrade at the south of Iran (Maroon).**

The surface waves generated are detected by low natural frequency (2Hz) geophones, the outputs of which are passed through signal conditioning amplifiers and then to a high speed 16-bit data acquisition unit. To acquire data the vibrator is placed on a level ground surface and a row of between three and six 2Hz geophones is inserted co-linearly with it. The vibrator is energized at discrete frequencies between 5 and 600 Hz at operator specified intervals. The signals received at the geophones are recorded digitally in the time domain and

subjected to a Fast Fourier Transform to convert the signals into the frequency domain (i.e. spectral amplitude v. frequency). The frequency domain data is used to determine the phase of the generated signal at each geophone location. The geophones are positioned at known distances apart,  $d$ , and so the phase difference between the geophones,  $\phi$ , can be used to calculate the wavelength,  $\lambda$ , for each discrete Rayleigh wave frequency as Eq.1:

$$\lambda = \frac{2\pi d}{\phi} = \frac{2\pi d}{\phi_2 - \phi_1}$$

(1)

The phase velocity of the Rayleigh wave,  $V_R$ , is determined from the wavelength and the frequency,  $f$  as Eq.2:

$$V_R = f \times \lambda$$

(2)

The noninvasive nature of this method is especially advantageous when testing environmentally sensitive materials, such as cohesion less soils or sandy subgrades. In this study the stiffness parameter ( $G_0$ ) is correlated with some physical sub grade properties like void ratio and confinement pressure based on Stokoe's Eqs. 3 and 4. Fig.2. shows the correlation between CSW test results and Eqs 3 and 4 at the relevant site.

$$G_0 = 6.104 \cdot \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma'_0)^{0.5}$$

(3)

$$G_0 = 15.73 \cdot \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\sigma'_0)^{0.4}$$

(4)

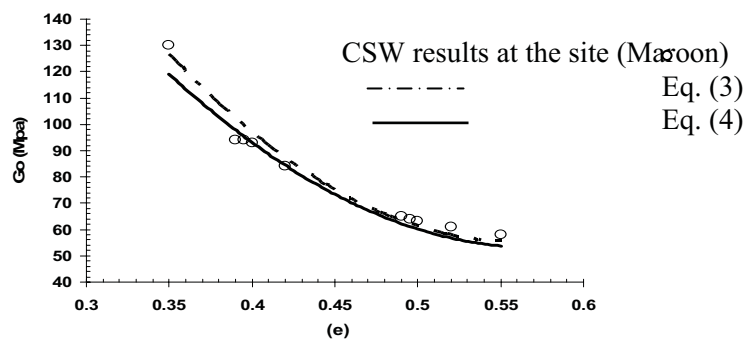


Figure 2: Comparison of stiffness from CSW test results and Stokoe's Eqs 3 and 4 at the relevant site

Moreover the sub-grade stiffness degradation curve with loading is evaluated by combination of continuous surface waves test results and a series of plate loading tests at the same points.

**Keywords:** Subgrade stiffness, continuous surface wave, maximum shear modulus