

## ارزیابی روابط ریاضی سرعت موج برشی و نتایج آزمون نفوذ استاندارد با رویکرد آمار بیزین

### سولماز چاروسائی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد

اسلامی، اهواز، ایران

### نوید خیاط (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی،

اهواز، ایران، [khayat@iauhvaz.ac.ir](mailto:khayat@iauhvaz.ac.ir)

### مهدی مهدوی عادل

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر،

ایران

### چکیده

سرعت موج برشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای ژئوفیزیکی می‌باشد که پاسخ لرزه‌ای سایت‌ها در قالب آن بیان می‌شود. این پارامتر لرزه‌ای اطلاعات ارزشمندی راجع به ساختگاه پروژه را می‌دهد اما از آنجایی که آزمایش‌های ژئوفیزیکی معمولاً گران و زمان‌بر هستند استفاده از روش‌های غیر مستقیم به منظور کاهش هزینه‌ها رو به افزایش است. تحقیقات زیادی در این باره در مناطق مختلف جهان انجام شده است که در اکثریت آنها از دو معادله توانی ساده و توانی چندگانه جهت استخراج معادلات استفاده کرده‌اند. اما این تحقیق با استفاده از توابع جدید تعریف شده توسط آمار بیزین نشان داده است که معادلاتی با اعتباری به مراتب بیشتر از روابط موجود در سوابق تحقیق می‌توانند جهت تخمین سرعت موج برشی به کار گرفته شوند.

**واژگان کلیدی:** سرعت موج برشی، آزمون نفوذ استاندارد، همبستگی آماری، آمار بیزین.

### ۱- مقدمه

اطلاعات قابل اطمینانی را تولید می‌کنند [۴، ۸-۱۰]. مشاهده شده است در یک سایت با مشخصات کاملاً مشابه اختلاف نتایج اندازه‌گیری شده در آزمون‌های مذکور در بازه‌ی ۱۰ الی ۱۵ درصد قرار دارد [۱، ۱۱].

امروزه نیاز به برآورد سرعت موج برشی از طریق خواص مکانیکی و پارامترهای مرتبط با خاک، با در نظر گرفتن عواملی چون قیمت بالای آزمایش‌های ژئوفیزیکی، زمان‌بر بودن آنها، محدودیت‌های دسترسی به سایت مورد مطالعه، عدم وجود پرسنل تخصصی و نگرانی‌های مرتبط با ارتعاشات مصنوعی در مناطق مسکونی و شهری مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۴، ۶، ۱۰]. از سوی دیگر آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) شایع‌ترین آزمایش ژئوتکنیکی درجا است که در بیشتر بررسی‌های مکانیک خاک انجام می‌شود و بدین طریق خواص متعدد خاک را برآورد می‌سازد.

مطالعات مربوط به همبستگی بین دو پارامتر عدد نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی در طول سال‌های گذشته و در کشورهای مختلف توسط محققان مختلفی در سراسر جهان انجام

تحلیل دینامیکی ساختگاه با در نظر گرفتن رفتار خاک در سایت مورد نظر، کاهش تلفات و آسیب‌های زیر ساختاری را به دنبال دارد [۱]. در این تحلیل مدول برشی ماکزیمم یک پارامتر کلیدی در معادلات پیش‌بینی‌کننده حرکت زمین برای ساختگاه می‌باشد که اغلب با اندازه‌گیری سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و با معلوم بودن چگالی توده خاک ( $\rho$ ) از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲-۴].

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

آزمایش‌های محلی اندازه‌گیری سرعت موج برشی به روش ژئوفیزیکی مناسب‌ترین راه هستند که بر پایه سرعت انتشار امواج در یک جسم الاستیک عمل می‌کنند [۱، ۵]. برای توصیف لایه‌های نزدیک به سطح زمین، چندین روش ژئوفیزیکی پیشنهاد شده است که شامل آزمایش تحلیل طیفی امواج سطحی (SASW)، آزمایش Down-hole، آزمایش Up-hole و آزمایش Cross-hole می‌باشند [۶]. آزمایش SASW به‌عنوان یک آزمون درجا و غیر مخرب بوده [۷] و آزمایش‌های Down-hole، Up-hole و Cross-hole بر پایه اندازه‌گیری امواج حجمی،

شده است [۳، ۱۲-۱۴]. از جمله سوابق تحقیق قدیمی می توان به مقاله سید و ادريس [۱۵] اشاره کرد.

این محققین رابطه‌ای را ارائه کردند که نشان دهنده‌ی ارتباط سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده به عمق بود. لی [۱۶] به منظور یافتن بهترین مدل سرعت موج برشی، همبستگی‌ها را با چندین مدل رگرسیون که شامل مدل خطی ساده، مدل چندجمله‌ای درجه دوم، مدل توانی ساده و مدل توانی چندگانه بودند، استخراج کرد. جعفری و همکاران [۱۷] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده در جنوب غربی تهران به توسعه روابطی برای پیش‌بینی سرعت موج برشی انواع خاک‌ها پرداختند. از جمله کارهای جدیدتر می توان به مقاله حسن‌زبی و اوولسی [۹] که هدف خود را بر روی یافتن همبستگی تجربی بین سرعت موج برشی و ضربات نفوذ استاندارد به جهت ارزیابی حرکات زمین متمرکز کرده بودند اشاره کرد که با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در منطقه‌ای در شمال غربی ترکیه معادلاتی برای ماسه‌ها، رس‌ها و همه خاک‌ها پیشنهاد دادند. این محققین همچنین با مقایسه نتایج همبستگی بین عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده به انرژی ناشی از سقوط چکش ( $N_{60}$ ) نشان دادند که اعداد نفوذ استاندارد اصلاح نشده با ضریب همبستگی بالاتری می‌توانند سرعت موج برشی را تخمین بزنند. محققان بسیاری نیز با در نظر گرفتن پارامترهای مرتبط دیگری روابط متعددی را ارائه نمودند. در این میان می توان به مقاله اوها و گوتو [۱۸] اشاره کرد که ۱۵ معادله همبستگی را با در نظر گرفتن ۲۰۰ داده جمع‌آوری شده در رسوبات آبرفتی ژاپن، با ترکیب چهار شاخص (عدد نفوذ استاندارد، اثر زمین‌شناسی، عمق از سطح زمین، نوع خاک) پیشنهاد دادند. همچنین براندنبرگ و همکاران [۱۹] با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از ۷۹ گمانه حفاری شده به پیش‌بینی سرعت موج برشی برای ماسه‌ها، سیلت‌ها و رس‌ها با استفاده از تابعی بر پایه مقاومت نفوذ استاندارد اصلاح شده ( $N_{60}$ ) و تنش سربار مؤثر ( $\sigma'_v$ ) پرداختند و معتقد بودند که نادیده گرفتن مقدار در روابط منتشر شده در سوابق تحقیق بر مبنای  $N_{60}$  و  $V_s$

به تنهایی سبب خطای بالایی می‌گردد. قربانی و همکاران [۲۰] نیز با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده مربوط به ۱۰ سایت مختلف که شامل ۸۰ گمانه و ۳۹۴ داده که دربرگیرنده مقادیر عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده ( $N_{1,60}$ )، تنش سربار عمودی ( $\sigma_v$ ) و تنش سربار مؤثر ( $\sigma'_v$ ) و سرعت موج برشی ( $V_s$ ) بودند، توانستند رابطه‌ای برای تخمین سرعت موج برشی را بر مبنای  $N_{1,60}$  و  $\sigma'_v$  تخمین بزنند که اولاً دارای قابلیت اطمینان بیشتری باشد، ثانیاً محدود به یک سایت با شرایط ژئوتکنیکی خاص نباشد. در این زمینه تحلیلی از معادلات همبستگی موجود در ادبیات فنی انجام شده است که معادلات استخراجی به تفکیک خاک‌ها در جدول (۱) خلاصه شده‌اند. اما در این تحقیق با استفاده از داده‌های ژئوتکنیکی حاصل از بررسی‌های ساختگاهی در گستره استان هرمزگان، روابط تجربی بین پارامترهای آزمایش SPT و سرعت موج برشی با رویکرد تازه‌ای ارائه شده است.

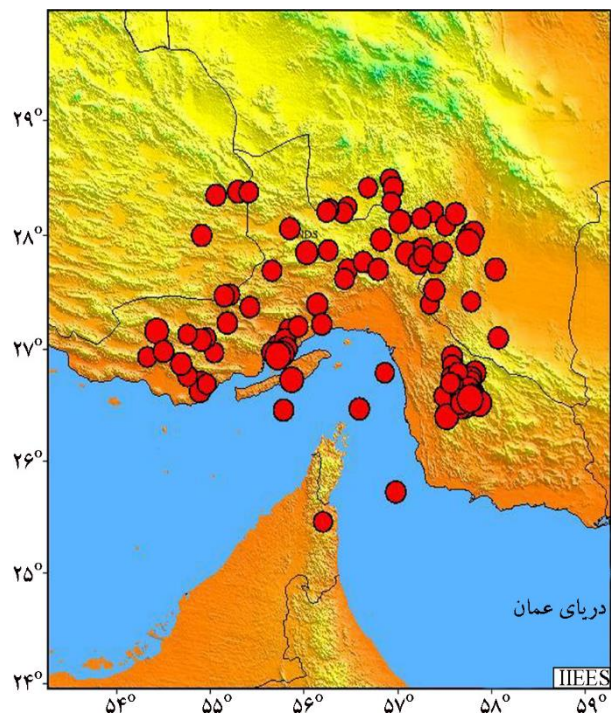
## ۲- محدوده‌ی مورد مطالعه

در این مطالعه مجموعه‌ای از داده‌های جمع‌آوری شده از سه شهر استان هرمزگان مورد استفاده قرار گرفته است. استان هرمزگان در مرز زون‌های مختلف زمین‌ساختی و مناطق مختلف لرزه‌زمین‌ساختی ایران از جمله مکران، زاگرس و ایران مرکزی قرار گرفته که تقاطع این زون‌ها باعث تغییر و تنوع زیادی در لرزه‌خیزی این استان شده است. زمین‌لرزه‌های چند سال اخیر در منطقه قشم، بندرعباس، حاجی‌آباد و ... نشان از فعالیت لرزه‌خیزی این استان در سال‌های اخیر دارد. به‌عنوان نمونه شکل (۱) زلزله‌های ده سال اخیر استان هرمزگان در شهرستان قشم را نشان می‌دهد که از طریق پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای منطقه قشم با شعاع ۲۰۰ کیلومتر و حداقل بزرگای  $4/5 (M_{min})$  و حداکثر بزرگای  $7 (M_{max})$  حاصل شده است. این جستجو نشان می‌دهد که برای منطقه قشم در ده سال اخیر ۱۰۲ زلزله رخ داده است که ۷۹ زلزله در محدوده‌ی ۴ تا ۵ ریشتر و ۲۳ زلزله در محدوده‌ی ۵ تا ۶ ریشتر با اعماقی در بازه ۲ تا ۴۴ کیلومتر رخ داده است.

جدول (۱): بخشی از معادلات همبستگی موجود در سوابق تحقیق

| ردیف | محقق                        | همه خاک‌ها                    | خاک‌های ماسه‌ای               | خاک‌های سیلتی        | خاک‌های رسی                 |
|------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| ۱    | شیباتا (۱۹۷۰)               | -                             | $V_s-31.7N^{0.54}$            | -                    | -                           |
| ۲    | اوهیا و توربوما (۱۹۷۰)      | $V_s-84N^{0.31}$              | -                             | -                    | -                           |
| ۳    | اوهتا و همکاران (۱۹۷۲)      | -                             | $V_s-87.2N^{0.36}$            | -                    | -                           |
| ۴    | فوجیوارا (۱۹۷۲)             | $V_s-92.1N^{0.337}$           | -                             | -                    | -                           |
| ۵    | اوهزاکا و ایوازاکی (۱۹۷۳)   | $V_s-81.4N^{0.39}$            | -                             | -                    | -                           |
| ۶    | ایمای و یوشیمورا (۱۹۷۵)     | $V_s-76N^{0.33}$              | -                             | -                    | -                           |
| ۷    | ایمای و یوشیمورا (۱۹۷۵)     | $V_s-89.9N^{0.341}$           | -                             | -                    | -                           |
| ۸    | ایمای (۱۹۷۷)                | $V_s-91N^{0.337}$             | $V_s-80.6N^{0.331}$           | -                    | $V_s-80.2N^{0.292}$         |
| ۹    | اوهتا و گوتو (۱۹۷۸) [۱۸]    | $V_s-85.35N^{0.348}$          | -                             | -                    | -                           |
| ۱۰   | سید و ادريس (۱۹۸۱) [۱۵]     | $V_s-61.4N^{0.5}$             | -                             | -                    | -                           |
| ۱۱   | ایمای و تونوچی (۱۹۸۲)       | $V_s-96.9N^{0.314}$           | -                             | -                    | -                           |
| ۱۲   | لی (۱۹۹۰) [۱۶]              | -                             | $V_s-57.4N^{0.49}$            | $V_s-105.64N^{0.32}$ | $V_s-114.43N^{0.31}$        |
| ۱۳   | جعفری و همکاران (۱۹۹۷) [۱۷] | $V_s-22N^{0.85}$              | -                             | $V_s-22N^{0.77}$     | $V_s-27N^{0.73}$            |
| ۱۴   | حسنی و اولوسای (۲۰۰۶)       | $V_s-90N^{0.309}$             | $V_s-90.82N^{0.319}$          | -                    | $V_s-97.89N^{0.269}$        |
| ۱۵   | دایکمن (۲۰۰۹)               | $V_s-58N^{0.309}$             | $V_s-73N^{0.33}$              | $V_s-60N^{0.36}$     | $V_s-44N^{0.48}$            |
| ۱۶   | آکین و همکاران (۲۰۱۱)       | $V_s-59.44N^{0.109}D^{0.426}$ | $V_s-38.55N^{0.176}D^{0.481}$ | -                    | $V_s-78.1N^{0.116}D^{0.35}$ |
| ۱۷   | اصفهان‌زاده (۲۰۱۴)          | -                             | $V_s-107.2N^{0.34}$           | -                    | -                           |
| ۱۸   | فابروسینو (۲۰۱۵)            | -                             | -                             | $V_s-149.3N^{0.192}$ | $V_s-110.5N^{0.252}$        |

زمین‌لرزه‌های متعدد در مناطق نزدیک به هم در این استان ارتباط زمین‌لرزه‌های مختلف در این منطقه را نشان می‌دهد، به طوری که برخی مواقع نمی‌توان تفکیک مشخصی بین پس‌لرزه‌های یک زمین‌لرزه و پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه بعدی واقع در آن منطقه پیدا کرد. زلزله در همه ایران قابل وقوع است اما همان‌طور که در زلزله‌های بررسی شده مشاهده شد، آنچه وقوع آن را در هرمزگان برجسته می‌سازد عمق کم آن است و زلزله‌های با عمق کم، انرژی بیشتری آزاد می‌کنند و تخریبشان بیشتر است. راهکار خسارت کمتر مالی و جانی، ساخت ساختمان‌های با اصول مهندسی است بنابراین شناخت فاکتور مهمی مانند سرعت موج برشی برای ارزیابی رفتار دینامیکی خاک‌ها در محاسبات خطر لرزه‌ای استان هرمزگان بسیار مهم می‌باشد. محدوده جغرافیایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است، شامل ۲۸ گمانه از سه شهر حاجی‌آباد، بندر خمیر و



شکل (۱): زلزله‌های ده سال اخیر استان هرمزگان در شهرستان قشم.

## ۲-۱- بررسی های ژئوتکنیکی (آزمایش نفوذ استاندارد)

آزمایش نفوذ استاندارد، به عنوان یک آزمون درجا برای تعیین مشخصات ژئوتکنیکی خاک های زیر سطح زمین به کار می رود. این آزمایش کم هزینه، آسان و در کشورهای مختلف رایج است. اساس آزمایش بر حفاری گمانه ای به قطر ۲/۵ تا ۸ اینچ تا عمق مورد نظر و نفوذ یک نمونه گیر استاندارد توسط سقوط آزاد یک چکش ۶۳/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۷۶ سانتی متری بر روی خاک می باشد. این عمل به قدری تکرار می شود که نمونه گیر به اندازه ۴۵ سانتی متر (معادل سه مرحله ۱۵ سانتی متری) در درون خاک نفوذ کند و عدد نفوذ استاندارد (N-SPT) از جمع تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۱۵ سانتی مترهای دوم و سوم به دست می آید. به عبارت دیگر نتیجه هر آزمایش به صورت عددی بدون بعد ارائه می شود که عبارت از تعداد ضربه لازم برای نفوذ مشخصی است [۲۱]. N-SPT می تواند برای تخمین تراکم نسبی ماسه و شن، تخمین پارامترهای مقاومتی خاک، تخمین ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی و عمیق در ماسه، تخمین مقدار نشست پی در ماسه، کنترل درجه تراکم خاک و ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک های غیر چسبنده اشباع در شرایط زهکشی نشده به کار گرفته شود. لازم به ذکر است عوامل متعددی مانند تنش نرمال، توزیع اندازه دانه ها، کارایی چکش، ساختار خاک و روش حفاری می توانند بر نتایج این آزمون اثر بگذارند [۴].

در تحقیق پیش رو، آزمون نفوذ استاندارد در مناطق مختلف استان هرمزگان به منظور تعیین همبستگی بین سرعت موج برشی و عدد نفوذ استاندارد و عمق بر روی خاک با ساختارهای مختلف انجام شد. تعداد گمانه های حفاری شده شامل ۲۸ گمانه بود که حداکثر عمق آنها ۳۰ متر گزارش شده است. در این آزمایش ضربات در بازه های ۱/۵ متری قرائت شده که مقادیر عددی استخراج شده در بازه ۶ تا ۸۸ متغیر بودند، اگرچه اکثریت قریب به اتفاق داده ها در محدوده ۶ تا ۴۰ متمرکز شده بودند. در رابطه با بررسی سطح آب زیرزمینی در گمانه ها باید گفت که به سطح آب زیرزمینی در اعماق مختلف گمانه ها به جز گمانه های شماره ۱ و ۲ و ۱۰ در شهرستان حاجی آباد و گمانه

قسم می باشد که آزمایش SPT و Down-hole در تک تک گمانه ها انجام گردیده است. مختصات گمانه های حفاری شده به ترتیب در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): مختصات گمانه های حفاری شده و سطح آب زیر زمینی در مناطق مورد مطالعه استان هرمزگان.

| نام گمانه | ناحیه | شماره گمانه | جهت E  | جهت N   | سطح آب زیرزمینی (G.W.L) |
|-----------|-------|-------------|--------|---------|-------------------------|
| حاجی آباد | ۴۰ R  | ۱           | ۳۹۲۷۲۹ | ۳۱۳۰۷۰۰ | گمانه خشک               |
|           |       | ۲           | ۳۹۳۶۱۵ | ۳۱۳۱۱۳۵ | گمانه خشک               |
|           |       | ۳           | ۳۹۳۱۲۹ | ۳۱۳۱۵۸۲ | ۱۸ متر                  |
|           |       | ۴           | ۳۹۲۴۴۳ | ۳۱۳۱۵۸۹ | ۱۴ متر                  |
|           |       | ۵           | ۳۹۲۱۵۱ | ۳۱۳۱۸۱۳ | ۶ متر                   |
|           |       | ۶           | ۳۹۲۶۴۴ | ۳۱۳۲۱۴۱ | ۱۰ متر                  |
|           |       | ۷           | ۳۹۱۶۶۳ | ۳۱۳۲۱۵۰ | ۱۵ متر                  |
|           |       | ۸           | ۳۹۱۸۶۵ | ۳۱۳۲۷۰۲ | ۲۳ متر                  |
|           |       | ۹           | ۳۹۲۴۵۶ | ۳۱۳۳۰۲۹ | ۱۵ متر                  |
|           |       | ۱۰          | ۳۹۱۲۷۸ | ۳۱۳۲۹۲۹ | گمانه خشک               |
| قسم       | ۴۰ R  | ۱           | ۴۲۶۶۵۷ | ۲۹۸۲۹۹۵ | ۸/۲ متر                 |
|           |       | ۲           | ۴۲۶۶۵۰ | ۲۹۸۱۶۶۵ | ۸/۲ متر                 |
|           |       | ۳           | ۴۲۶۴۴۱ | ۲۹۸۰۰۰۵ | ۱۸ متر                  |
|           |       | ۴           | ۴۲۷۰۵۱ | ۲۹۸۲۴۳۹ | گمانه خشک               |
|           |       | ۵           | ۴۲۷۴۴۱ | ۲۹۸۱۱۰۷ | ۲۴ متر                  |
|           |       | ۶           | ۴۲۷۳۳۵ | ۲۹۸۰۱۱۱ | ۱۷ متر                  |
|           |       | ۷           | ۴۲۶۸۲۳ | ۲۹۷۹۰۰۶ | ۱۴ متر                  |
|           |       | ۸           | ۴۲۷۹۲۸ | ۲۹۷۹۵۵۲ | ۷ متر                   |
|           |       | ۹           | ۴۲۷۹۳۵ | ۲۹۸۰۷۷۲ | ۹/۷ متر                 |
|           |       | ۱۰          | ۴۲۷۹۴۴ | ۲۹۸۲۴۳۳ | ۶/۵ متر                 |
| خمیر      | ۴۰ R  | ۱           | ۳۵۹۸۳۵ | ۲۹۸۱۲۴۶ | ۶/۵ متر                 |
|           |       | ۲           | ۳۶۰۰۳۸ | ۲۹۸۱۵۷۵ | ۵ متر                   |
|           |       | ۳           | ۳۵۸۹۴۶ | ۲۹۸۱۶۹۴ | ۱۸ متر                  |
|           |       | ۴           | ۳۵۹۷۴۲ | ۲۹۸۱۹۰۶ | ۸ متر                   |
|           |       | ۵           | ۳۶۰۵۴۰ | ۲۹۸۲۱۲۰ | ۶/۵ متر                 |
|           |       | ۶           | ۳۵۹۹۴۵ | ۲۹۸۲۳۴۶ | ۱۱ متر                  |
|           |       | ۷           | ۳۵۹۱۵۱ | ۲۹۸۲۳۵۵ | ۱۴/۵ متر                |
|           |       | ۸           | ۳۶۰۹۴۲ | ۲۹۸۲۶۶۷ | ۸ متر                   |

روش های لرزه ای بر مبنای انتشار امواج مکانیکی در یک محیط الاستیک استوار هستند و موج تولید شده توسط چشمه لرزه ای (نظیر ضربه چکش) به گیرنده امواج (ژئوفون) می رسد و سپس توسط دستگاه لرزه نگار تقویت و ثبت می شود. انرژی لازم برای تولید امواج برشی از ضربه پتک به دو سر یک الوار که عمود بر خط واصل بین وسط الوار و مرکز دهانه گمانه قرار داده می شود، حاصل می شود که در ادامه با در دست داشتن سرعت امواج تراکمی و سرعت امواج برشی و همچنین چگالی محیط انتشار می توان مدول های دینامیکی لایه های خاک را محاسبه نمود. به طور معمول جهت انجام این آزمایش در تحقیق پیش رو از وسایل و تجهیزات زیر استفاده شده است:

الف- دستگاه لرزه نگار ABEM RAS24

ب- ژئوفون های سه مؤلفه ای درون گمانه ای

ج- پتک و الوار برای تولید امواج برشی

د- کامپیوتر

شماره ۴ در اکتشافات ژئوتکنیکی قشم برخورد شد که در این خصوص جدول (۲) در بخش قبل عمق های مختلف سطوح آب زیرزمینی در تمامی گمانه ها را به نمایش گذاشته است. علاوه بر موارد ذکر شده برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی و شیمیایی خاک محل پروژه، بر روی نمونه های دست خورده و دست نخورده، با توجه به عمق و نوع نمونه ها و نیز محدوده تأثیر تنش های ناشی از بار سازی، آزمایش هایی در آزمایشگاه انجام شد که این آزمایش ها بر اساس استاندارد ASTM مکانیک خاک به انجام رسیده است. در این آزمایش های آزمایشگاهی طبقه بندی خاک ها طبق رده بندی متحد و برای تعیین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی نمونه آزمایش هایی شامل تعیین درصد رطوبت، تعیین توده ویژه خاک، تعیین حدود اتربرگ و... انجام شده است.

## ۲-۲- بررسی های ژئولرزه ای (آزمایش دان هول)

سرعت امواج برشی در فواصل ۱/۰ متری در اعماق مختلف (حداکثر عمق ۳۰ متر) قرائت گردیدند. به عنوان نمونه لاگ آزمایش ژئولرزه ای همراه با پارامترهای ژئوتکنیکی حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد مربوط به گمانه ای در شهر حاجی آباد تا عمق ده متری در شکل (۲) نشان داده شده است.

در این بخش مشخصات و مراحل انجام کار آزمایش دان هول بررسی شده است که به منظور دستیابی به هدف مطرح شده و لزوم ارزیابی پارامترهای دینامیکی لایه های زمین و تعیین نوع زمین از نظر مهندسی زلزله، در ۲۸ گمانه ای که اطلاعات ژئوتکنیکی آنها حاصل شد، انجام گردیده است.

| عمق (m) | شماره نمونه | نوع نمونه | طبعندی بوینشاید علامت حروفی آترسیمی | شرح لایه  | پارامترهای دینامیکی خاک |     |       |       |       | وزن مخصوص |                    |                    | رطوبت              |    |       |      |    | Nspt |     |      |
|---------|-------------|-----------|-------------------------------------|---|-------------------------|-----|-------|-------|-------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|----|-------|------|----|------|-----|------|
|         |             |           |                                     |   | Vp                      | Vs  | $\mu$ | G     | E     | K         | Yd                 | Yw                 | Ysat               | Gs | MC    | LL   | PI |      | #4  | #200 |
|         |             |           |                                     |   | m/s                     | m/s | -     | Gpa   | Gpa   | Gpa       | Kg/cm <sup>3</sup> | Kg/cm <sup>3</sup> | Kg/cm <sup>3</sup> | %  | %     | %    | %  | %    | %   | %    |
| 0       | ۳۶۶۱۶۴      | •         | CH                                  | رس با خاصیت خمیری زیاد به رنگ قهوه ای روشن          | ۵۹۰                     | ۲۸۵ | ۰/۳۹۸ | ۰/۱۳۳ | ۰/۳۵۹ | ۰/۳۹۳     | ۱/۶۴               | ۱/۴۴               | ۱/۶۴               | ۱۴ | ۲/۷۱۳ | ۱/۴۹ | ۵۲ | ۲۹   | ۱۰۰ | ۹۵   |
| ۱       |             |           |                                     |   | ۷۳۰                     | ۳۳۰ | ۰/۳۸۱ | ۰/۱۶۸ | ۰/۴۶۴ | ۰/۶۵۰     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۲       | ۳۶۶۱۶۵      | •         | CL                                  | رس با خاصیت خمیری کم به رنگ قهوه ای روشن            | ۷۳۰                     | ۳۴۰ | ۰/۳۸۳ | ۰/۱۹۷ | ۰/۵۴۳ | ۰/۷۷۲     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۳       |             |           |                                     |   | ۸۲۰                     | ۳۶۰ | ۰/۳۸۱ | ۰/۲۲۰ | ۰/۶۰۸ | ۰/۸۴۹     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۴       | ۳۶۶۱۶۶      | •         | CH                                  | رس با خاصیت خمیری زیاد به رنگ قهوه ای روشن          | ۸۴۵                     | ۳۸۵ | ۰/۳۶۵ | ۰/۲۶۲ | ۰/۷۱۸ | ۰/۹۱۴     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۵       |             |           |                                     |   | ۹۱۰                     | ۴۱۰ | ۰/۳۷۳ | ۰/۲۹۸ | ۰/۸۱۷ | ۱/۰۶۹     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۶       | ۳۶۶۱۶۷      | •         | CH                                  | رس با خاصیت خمیری زیاد ماسه دار به رنگ قهوه ای روشن | ۹۱۵                     | ۴۲۰ | ۰/۳۶۷ | ۰/۳۱۴ | ۰/۸۵۸ | ۱/۰۷۲     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۷       |             |           |                                     |   | ۹۱۰                     | ۴۲۰ | ۰/۳۶۵ | ۰/۳۱۴ | ۰/۸۵۷ | ۱/۰۵۵     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۸       | ۳۶۶۱۶۸      | •         | CH                                  | رس با خاصیت خمیری زیاد به رنگ قهوه ای روشن          | ۹۳۵                     | ۴۳۵ | ۰/۳۶۶ | ۰/۳۳۳ | ۰/۹۰۹ | ۱/۱۳۰     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۹       |             |           |                                     |   | ۹۵۰                     | ۴۴۵ | ۰/۳۵۹ | ۰/۳۵۶ | ۰/۹۶۹ | ۱/۱۶۹     |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |
| ۱۰      |             |           |                                     |   |                         |     |       |       |       |           |                    |                    |                    |    |       |      |    |      |     |      |

شکل (۲): نمونه ای از مطالعات مکانیک خاک و پهنه بندی لرزه ای گمانه ای در منطقه حاجی آباد استان هرمزگان.

در این لاگ هر گروه از خاک‌ها با نمادی مشخص شده‌اند. به جهت انجام رگرسیون در بخش بعدی همه گروه‌ها به چهار دسته اصلی شامل همه خاک‌ها (۳۱۸ داده)، خاک‌های رسی (۱۷۴ داده)، خاک‌های سیلتی (۷ داده)، خاک‌های ماسه‌ای (۸۳ داده) و خاک‌های شنی (۵۴ داده) تقسیم گردیده‌اند که خاک‌های سیلتی به دلیل تعداد کم داده‌های آنها جهت انجام تحلیل حذف شده‌اند. طبق نتایج آزمایش‌ها امواج دارای سرعتی در بازه ۲۰۰ متر بر ثانیه تا ۸۰۰ متر بر ثانیه می‌باشند که کمترین میزان سرعت موج برشی با مقدار ۲۲۰ متر بر ثانیه مربوط به گمانه شماره ۲ و در عمق ۱ متری، و بیشترین میزان سرعت موج برشی با مقدار ۷۹۵ متر بر ثانیه مربوط به گمانه شماره ۷ در عمق ۳۰ متری در بندر خمیر می‌باشد. این آزمایش‌ها توسط شرکت آزمایشگاه فنی مکانیک خاک وابسته به وزارت راه و شهرسازی انجام شده است.

در این لاگ هر گروه از خاک‌ها با نمادی مشخص شده‌اند. به جهت انجام رگرسیون در بخش بعدی همه گروه‌ها به چهار دسته اصلی شامل همه خاک‌ها (۳۱۸ داده)، خاک‌های رسی (۱۷۴ داده)، خاک‌های سیلتی (۷ داده)، خاک‌های ماسه‌ای (۸۳ داده) و خاک‌های شنی (۵۴ داده) تقسیم گردیده‌اند که خاک‌های سیلتی به دلیل تعداد کم داده‌های آنها جهت انجام تحلیل حذف شده‌اند. طبق نتایج آزمایش‌ها امواج دارای سرعتی در بازه ۲۰۰ متر بر ثانیه تا ۸۰۰ متر بر ثانیه می‌باشند که کمترین میزان سرعت موج برشی با مقدار ۲۲۰ متر بر ثانیه مربوط به گمانه شماره ۲ و در عمق ۱ متری، و بیشترین میزان سرعت موج برشی با مقدار ۷۹۵ متر بر ثانیه مربوط به گمانه شماره ۷ در عمق ۳۰ متری در بندر خمیر می‌باشد. این آزمایش‌ها توسط شرکت آزمایشگاه فنی مکانیک خاک وابسته به وزارت راه و شهرسازی انجام شده است.

### ۳- روش تحقیق

روش تحقیق مورد استفاده در این مطالعه سازگار با هدف تعیین شده در خصوص تعریف توابع جدید به جهت تخمین سرعت موج برشی با استفاده از عدد نفوذ استاندارد و عمق می‌باشد. بدین صورت که محققین بر خلاف سوابق تحقیق که مستقیماً به تحلیل داده‌ها و استخراج روابط پرداخته‌اند، در ابتدا با نمایش گراف‌هایی درصدد تعیین نوع ارتباطی که بین پارامترهای مستقل تعریف شده (عدد نفوذ استاندارد و عمق) و پارامتر وابسته (سرعت موج برشی) وجود دارد، برآمده‌اند. سپس با تحلیل گراف‌های حاصل شده و تعریف توابع، روابط جدیدی را استخراج کرده‌اند.

در سال‌های اخیر چندین فرم از روابط همبستگی توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. اوها و گوتو [۱۸] با مقایسه نتایج حاصل از ضرایب همبستگی چندین شکل از روابط، رابطه‌ای به شکل  $V_s = aN^b D^c$  را به‌عنوان بهینه‌ترین رابطه مطرح کرد [۱۸]. همچنین لی [۲۲] نشان داد که دو مدل توانی ساده  $V_s = aN^b$  و خطی ساده  $V_s = aN + b$  بهترین ضرایب

$$F(\chi, \theta, \sigma) = f(\chi, \theta) + \sigma \cdot \varepsilon \quad (2)$$

یک مدل ریاضی جهت پیش‌بینی متغیر  $f$  بر حسب مجموعه‌ای از متغیرهای مشاهده شده یعنی  $\chi$  باشد که در آن  $f(\chi, \theta)$  بخش قطعی مدل،  $\theta$  بردار پارامترهای مجهول و  $\varepsilon$  یک متغیر تصادفی نرمال با میانگینی برابر صفر و انحراف معیاری برابر واحد است که نشانگر عدم قطعیت‌های موجود در مدل پیش‌بینی می‌باشد. همچنین  $\sigma$  انحراف معیار مدل است که پارامتری مجهول محسوب می‌گردد. بنابراین بردار پارامترهای مجهول که باید با استفاده از

step=50 به صورت پیش فرض بدین معناست که فقط هر 50 تا از پارامترهای نمونه ذخیره گشته و برای محاسبات توزیع پسین و انحراف معیارها مورد استفاده قرار می گیرند. تعریف این پارامتر سبب کاهش قابل توجهی در ذخیره سازی و ارتباط خودکار با پارامترهای نمونه می شود. جزئیات بیشتر در رابطه با این روش آماری را می توان در این مقالات یافت [24-25]. در مطالعه پیش رو جهت انجام تحلیل به روش بیزین و با تکنیک شبیه سازی ذکر شده از نرم افزار Bayes-x استفاده شده است. مقادیر burn-in، iterations و step به ترتیب 50000، 350000 و 300 در نرم افزار تعریف شده اند و جهت انجام تحلیل ها از توزیع خانواده گوسی برای توزیع احتمالات که یکی از مهم ترین توزیع های احتمالی پیوسته در نظریه احتمالات است و توزیع یکنواخت به عنوان توزیع پیشین استفاده شده است.

#### ۴- همبستگی بین سرعت موج برشی و نتایج آزمایش نفوذ استاندارد

همبستگی بین سرعت موج برشی و نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در دو مرحله صورت گرفته است. در ابتدا به بررسی هدف اول پرداخته شده است. بدین صورت که شش پارامتر مستقل به شرح زیر با در نظر گرفتن عدد نفوذ استاندارد و عمق و ترکیبی از هر دو تعریف شده اند.

$$I_D = \ln(D) \quad (4)$$

$$I_N = \ln(N) \quad (5)$$

$$I_1 = \ln(N * D) \quad (6)$$

$$I_2 = \ln(N + D) \quad (7)$$

$$I_3 = \ln(N^D) \quad (8)$$

$$I_4 = \ln(N) + \ln(D) \quad (9)$$

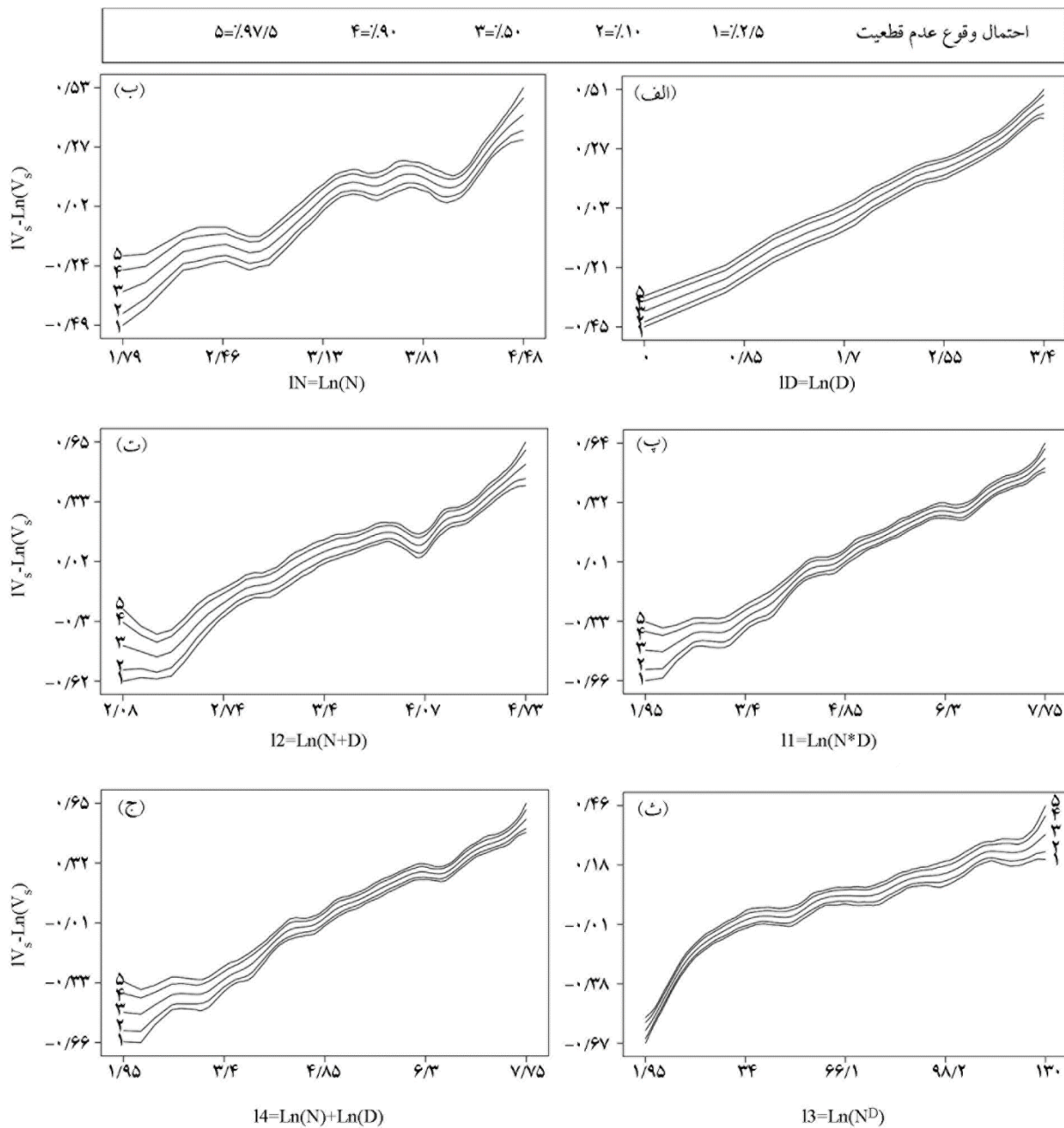
سپس با تعریف محدوده های N-SPT ها و Vs ها بدون در نظر گرفتن جنس خاک، گراف هایی که نشان دهنده ی ارتباط منطقی بین پارامترهای ذکر شده می باشد با آمار بیزین در شکل (3) حاصل شده اند.

اطلاعات موجود و انجام محاسبات آماری تعیین شوند عبارتند از:

$$f(\Phi) = c.L(\Phi).P(\Phi) \quad (3)$$

که در آن  $P(\Phi)$  به عنوان توزیع پیشین مجهولات که نشانگر اطلاعات فعلی در مورد آنها پیش از جمع آوری داده ها می باشد، تعریف می گردد. با استفاده از اطلاعات جدید که در واقع همان متغیرهای مشاهده شده یعنی  $\chi$  هستند سطح جدید اطلاعات در خصوص پارامترهای مجهول در قالب تابع راست نمایی آن یعنی  $L(\Phi)$  تعریف می گردد. با ترکیب توزیع پیشین و اطلاعات موجود، توزیع پسین پارامترهای مجهول یعنی  $f(\Phi)$  که بازتاب دهنده سطح اطلاعات جدید در خصوص مجهولات است محاسبه خواهد شد که همان نتایج مطلوب می باشد. در این میان پارامتر  $c$  هم صرفاً نقش یک پارامتر مقیاس کننده را بازی می کند تا برابر واحد شدن انتگرال تابع توزیع پسین را ضمانت نماید. با چنین رهیافتی می توان پارامترهای مجهول مدل را محاسبه نمود. ابزار رگرسیون بیزین مورد استفاده در این مطالعه بر مبنای تکنیک شبیه سازی مونت کارلو با زنجیره مارکوف می باشد که منجر به یک تخمین میانگین پیشین و پسین کاملاً بیزین گشته و جهت تخمین فرم توابع و پارامترهای مجهول آن استفاده می شود. روش مونت کارلو یا به عبارتی MCMC راه حل تقریبی مسائل آماری و مفهومی همه جانبه و عمومی برای استخراج بیزین است که برای شبیه سازی کمیت های تصادفی برای برآورد کمیتی مجهول به کار می رود.

این شبیه سازی موجب توسعه بهترین ترکیب های رگرسیون با سرعت بالا و بدون انجام ذره ای محاسبات دستی نیز می شود. پارامترهایی که برای انجام محاسبات در تکنیک شبیه سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار می گیرند به ترتیب الفبا شامل: burn-in، step iterations، burn-in اصطلاحی محاوره ای برای توصیف تعدادی از تکرارها در ابتدای اجرای شبیه سازی مونت کارلو می باشد و iterations تعداد تکرارها در اجرای برنامه است که مقدار آن همواره باید از burn-in بزرگ تر در نظر گرفته شود که به صورت پیش فرض 52000 می باشد و در آخر پارامتر step تعریف می شود که به عنوان مثال



شکل (۳): نتایج گرافیکی حاصل شده از تحلیل همه داده‌ها با آمار بیزین در خصوص مشاهده‌ی رفتار توابع مورد نظر در مقابل سرعت موج برشی.

تحلیل گراف‌ها در ادامه آمده است:

۱- در گراف شماره (۳-الف) که خروجی نرم‌افزار Bayes-x می‌باشد، محور  $x$ ها نشان‌دهنده‌ی  $ID=Ln(D)$  و محور  $y$ ها مربوط به  $IV_s=Ln(V_s)$  می‌باشد. رابطه بین این دو پارامتر به‌ازای احتمالات وقوع عدم قطعیت مختلف، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این ارتباط تا حدود زیادی خطی بوده و نتیجه مهمی که می‌توان از این نوع

ارتباط برداشت کرد، این است که لگاریتم طبیعی محدوده عمق‌های تعریف شده رابطه خوبی با لگاریتم طبیعی محدوده سرعت امواج برشی دارند. به عبارت دیگر اگر مابین این دو پارامتر تابعی به فرم  $Ln(V_s)=aLn(D)+b$  تعریف گردد، بدون شک انتظار می‌رود به‌ازای تمامی  $D$ ها این تابع بتواند با درصد اطمینان بالایی سرعت موج برشی را تخمین بزند.

۲- دومین پارامتر تعریف شده، همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد



دقیق‌ترین معادله تخمین سرعت موج برشی، انتخاب یک فرم مناسب برای بخش قطعی مدل در معادله (۱۰) می‌باشد که هدف اصلی این بخش است. در اینجا انتخاب فرم به معنی یافتن یک عبارت ریاضی است که می‌تواند رابطه بین پارامترهای انتخاب شده و مقدار  $\ln(V_s)$  را نشان دهد. به عبارت دیگر هدف یافتن تابع  $f(\cdot)$  در رابطه زیر است که با استفاده از تحلیل بیزین بر روی داده‌های مربوط به خاک‌های با دسته‌های مختلف، بهترین عبارت ریاضی برای توصیف  $f(\cdot)$  بر پایه پارامترهای انتخاب شده به دست می‌آید.

$$\ln(V_s) = f(\text{parameters}) \quad (11)$$

که پارامترهای اساسی برای تشکیل سرعت موج برشی  $(V_s)$  به شرح زیر می‌باشند:

$$I_D = \log(D) \quad (12)$$

$$I_N = \log(N) \quad (13)$$

$$I_1 = \log(N * D) \quad (14)$$

$$I_2 = \log(N + D) \quad (15)$$

$$I_3 = \log(N^p) \quad (16)$$

$$I_4 = \log(N) + \log(D) \quad (17)$$

$$I_5 = D * \log(N) \quad (18)$$

$$I_6 = N * \log(D) \quad (19)$$

حال برای ساختن بهترین مدل سرعت موج برشی، تنها کار باقیمانده تعریف توابع مدل می‌باشد. در ادامه برای هشت متغیر تعریف شده، ۱۳ مدل تابع تعریف شده است که در این روابط  $a$  و  $b$  و  $c$  ضرایب مدل هستند که با انحراف معیار ترکیب شده‌اند و به عبارتی  $\sigma$  پارامترهای ناشناخته مدل را تشکیل می‌دهد و باید با توجه به اطلاعات موجود و آمار بیزی برآورد شود.

$$\ln(V_s) = a \ln(D) + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (20)$$

$$\ln(V_s) = a \ln(N) + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (21)$$

$$\ln(V_s) = a [\ln(N * D)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (22)$$

$\ln(N) = \ln(N)$  بود که در گراف شماره (۳-ب) ارتباط آن با  $\ln(V_s) = \ln(V_s)$  نشان داده شده است. برخلاف آنچه انتظار می‌رفت رابطه نمایش داده شده دارای اعوجاجات زیادی در محدوده‌ی داده‌های تعریف شده می‌باشد. این نتیجه را می‌توان به مثابه هشدار برای محقق تلقی کرد بدین صورت که شاید تابعی به فرم  $\ln(V_s) = a \ln(N) + b$  بتواند سرعت موج برشی را تخمین بزند ولی اعتبار آن به مراتب از تابعی به فرم  $\ln(V_s) = a \ln(D) + b$  کمتر است.

۳- گراف‌های شماره (۳-پ)، (۳-ت) و (۳-ث) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ارتباط  $I_1 = \ln(N * D)$ ،  $I_2 = \ln(N + D)$ ،  $I_4 = \ln(N) + \ln(D)$  با  $\ln(V_s) = \ln(V_s)$  می‌باشند. این سه گراف تا حدود بسیار زیادی مشابه هم هستند. طبق توضیحات مطرح شده در دو گراف قبل، روابط نمایش داده شده در این شکل‌ها تا حدود زیادی یکنواخت و خطی است، پس نتیجه می‌شود که توابع تعریف شده با در نظر گرفتن این دسته از پارامترها نقش بسزایی در تخمین امواج به صورت غیر مستقیم می‌توانند داشته باشند.

۴- تنها گراف باقیمانده در این بخش، گراف شماره (۳-ج) می‌باشد که به بررسی اثر  $I_3 = \ln(N^p)$  در مقابل  $\ln(V_s) = \ln(V_s)$  پرداخته است. در مقایسه با مطالب تشریح شده راجع به دیگر گراف‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تابعی در فرم  $\ln(V_s) = a [\ln(N^p)] + b$  به مراتب تأثیر پررنگ‌تری در پیش‌بینی سرعت موج برشی نسبت به تابعی در فرم  $\ln(V_s) = a \ln(N) + b$  دارد ولی در مقایسه با دیگر گراف‌های ذکر شده در این بخش باید در گفتن این نظریه کمی درنگ کرد. حال در ادامه به بررسی هدف دوم پرداخته می‌شود. بدین صورت که با نتایج برداشت شده در گام قبل، سرعت موج برشی را می‌توان در فرم ریاضی به صورت زیر تعریف کرد:

$$D(\text{parameters}, \theta, \sigma) = d(\text{parameters}, \theta) + \sigma \cdot \varepsilon \quad (10)$$

که در آن  $d$  بخش قطعی مدل است و تعریف پارامترهای  $\theta$ ،  $\sigma$  و  $\varepsilon$  مشابه معادله (۲) است. بدیهی است که اولین گام در ساخت

شکل (۴- راست)، می توان دید که هر یک از معادلات دارای انحراف معیارهای مشخصی هستند که در بعضی حالات اختلاف ناچیزی در بین آنها وجود دارد و در حالات دیگر خیر. در لابه لای این معادلات مشاهده می شود بین رابطه (۷) که از لحاظ کمترین انحراف معیار در جایگاه اول قرار دارد و رابطه (۲) که از لحاظ بیشترین انحراف معیار در جایگاه سیزدهم قرار دارد، حدود ۸/۳۱ درصد اختلاف وجود دارد.

نتیجه قابل توجه در رابطه با معادلات استخراجی همه خاک ها، این می باشد که بهترین معادله استخراجی معادل فرم توانی آن یعنی  $V_s = 184.417N^{0.109}D^{0.196}$  در جایگاه اول و بدترین معادله استخراجی معادل فرم توانی آن یعنی  $V_s = 206.636N^{0.209}$  در جایگاه سیزدهم می باشد و ۱۱ معادله دیگر در بین این دو فرمول ریاضی با انحراف معیارهای به مراتب کمتری قرار دارند.

در بخش نمایش گراف ها وقتی به بررسی اثر  $\ln(D)$  بر روی  $\ln(V_s)$  پرداخته شد، این نتیجه برداشت شد که پارامتر  $D$  می تواند اثر غیر قابل چشم پوشی بر روی تخمین سرعت موج برشی داشته باشد، که قرار گرفتن رابطه (۱) در جایگاه پنجم و قرار گرفتن رابطه (۲) در جایگاه سیزدهم گواه این حقیقت است. حال از آنجایی که اختلاف محاسبه شده بین این دو معادله حدود ۶/۳ درصد است، می توان نتیجه گرفت که نقش عمده پارامتر عمق از نقش عدد نفوذ استاندارد در تحلیل های انجام شده مربوط به همه خاک ها پررنگ تر است.

$$\ln(V_s) = a[\ln(N+D)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (23)$$

$$\ln(V_s) = a[\ln(N^D)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (24)$$

$$\ln(V_s) = a[\ln(N) + \ln(D)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (25)$$

$$\ln(V_s) = a \ln(D) + b \ln(N) + c + \sigma \cdot \varepsilon \quad (26)$$

$$\ln(V_s) = a[D * \ln(N)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (27)$$

$$\ln(V_s) = aD + b[D * \ln(N)] + c + \sigma \cdot \varepsilon \quad (28)$$

$$\ln(V_s) = a \ln(D) + b[D * \ln(N)] + c + \sigma \cdot \varepsilon \quad (29)$$

$$\ln(V_s) = a[N * \ln(D)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (30)$$

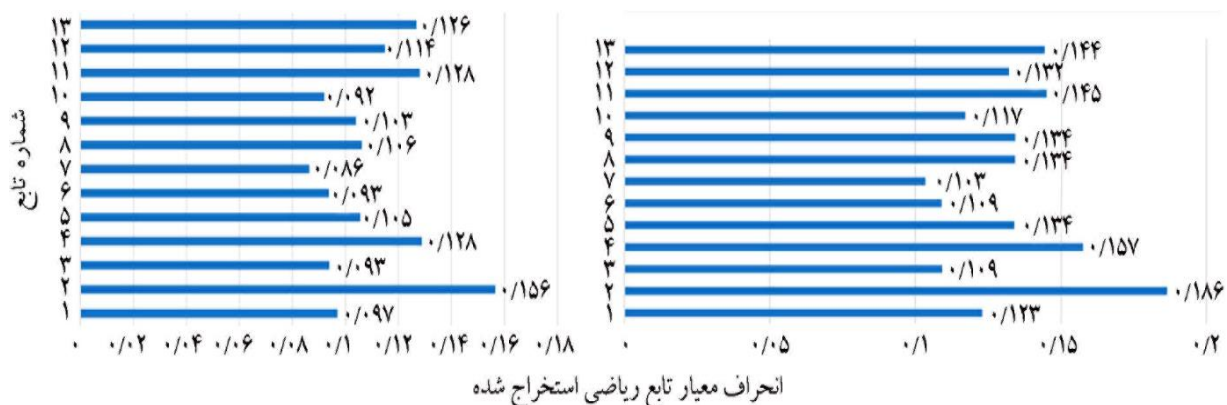
$$\ln(V_s) = aN + b[N * \ln(D)] + c + \sigma \cdot \varepsilon \quad (31)$$

$$\ln(V_s) = a \ln(N) + b[N * \ln(D)] + b + \sigma \cdot \varepsilon \quad (32)$$

توابع ذکر شده برای دسته بندی های مختلف خاک (همه خاک ها، خاک های رسی، خاک های ماسه ای، خاک های شنی) مورد تحلیل قرار گرفتند که نتایج به تفکیک تک تک دسته بندی ها در جدول (۳) ارائه شده است. در گام بعد، انتخاب تابع بهینه و کارا باید صورت بگیرد. مفهوم کارا بودن مدل به این معناست که مقدار انحراف معیار ( $\sigma \cdot \varepsilon$ ) در حداقل مقدار ممکن باشد که با نمایش انحراف معیارهای هر یک از توابع ریاضی در شکل (۴) می توان به نتایجی به شرح زیر دست یافت:

#### ۴-۱- همه خاک ها

- با نمایش ۱۳ معادله و انحراف معیارهای حاصل از آنها در



شکل (۴): نمایش انحراف معیارهای حاصل از تحلیل داده ها به تفکیک خاک ها و توابع تعریف شده با آمار بیزین.

جدول (۳): توابع ریاضی استخراج شده به تفکیک خاک‌ها با آمار بیزین.

| شماره تابع | نوع معادله                    | دسته بندی       | ضریب a | ضریب b | ضریب c | انحراف معیار |
|------------|-------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------------|
| ۱          | $\ln(V_s)=a\ln(D)+b$          | همه خاک‌ها      | ۰/۲۳۰  | ۵/۵۱۸  | -      | ۰/۱۲۳        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۲۰۵  | ۵/۵۶۴  | -      | ۰/۰۹۷        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۲۴۸  | ۵/۴۶۶  | -      | ۰/۱۴۰        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۲۸۹  | ۵/۴۶۸  | -      | ۰/۱۲۷        |
| ۲          | $\ln(V_s)=a\ln(N)+b$          | همه خاک‌ها      | ۰/۲۰۹  | ۵/۳۳۰  | -      | ۰/۱۸۶        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۱۷۴  | ۵/۴۸۰  | -      | ۰/۱۵۶        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۲۲۶  | ۵/۱۷۷  | -      | ۰/۲۲۲        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۳۱۸  | ۵/۰۱۸  | -      | ۰/۱۵۸        |
| ۳          | $\ln(V_s)=a[\ln(N*D)]+b$      | همه خاک‌ها      | ۰/۱۶۱  | ۵/۱۲   | -      | ۰/۱۰۹        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۱۳۹  | ۵/۲۲   | -      | ۰/۰۹۳        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۱۸۸  | ۴/۹۱۴  | -      | ۰/۱۱۰        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۱۷۷  | ۵/۱۱   | -      | ۰/۰۹۳        |
| ۴          | $\ln(V_s)=a[\ln(N+D)]+b$      | همه خاک‌ها      | ۰/۲۸۹  | ۴/۹۵۹  | -      | ۰/۱۵۷        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۲۵۵  | ۵/۱۰۳  | -      | ۰/۱۲۸        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۳۰۷  | ۴/۸۰۳  | -      | ۰/۱۹۶        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۳۵۹  | ۴/۷۷۲  | -      | ۰/۱۲۴        |
| ۵          | $\ln(V_s)=a[\ln(N^D)]+b$      | همه خاک‌ها      | ۰/۰۰۵  | ۵/۷۸۷  | -      | ۰/۱۳۴        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۰۰۴  | ۵/۸۳۳  | -      | ۰/۱۰۵        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۰۰۶  | ۵/۶۹۲  | -      | ۰/۱۴۳        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۰۰۶  | ۵/۸۰۷  | -      | ۰/۱۶۲        |
| ۶          | $\ln(V_s)=a[\ln(N)+\ln(D)]+b$ | همه خاک‌ها      | ۰/۱۶۱  | ۵/۱۲۱  | -      | ۰/۱۰۹        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۱۳۹  | ۵/۲۵۰  | -      | ۰/۰۹۳        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۱۸۸  | ۴/۹۱۵  | -      | ۰/۱۱۰        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۱۷۷  | ۵/۱۰۹  | -      | ۰/۰۹۲        |
| ۷          | $\ln(V_s)=a\ln(D)+b\ln(N)+c$  | همه خاک‌ها      | ۰/۱۹۶  | ۰/۱۰۹  | ۵/۲۱۷  | ۰/۱۰۳        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۱۸۱  | ۰/۰۸۰  | ۵/۳۵۰  | ۰/۰۸۶        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۲۱۸  | ۰/۱۴۰  | ۵/۰۲۴  | ۰/۱۰۵        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۱۹۵  | ۰/۱۵۶  | ۵/۱۴۳  | ۰/۰۹۳        |
| ۸          | $\ln(V_s)=a[D*\ln(N)]+b$      | همه خاک‌ها      | ۰/۰۰۵  | ۵/۷۸   | -      | ۰/۱۳۴        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۰۰۴  | ۵/۸۳۲  | -      | ۰/۱۰۶        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۰۰۶  | ۵/۶۹۲  | -      | ۰/۱۴۳        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | ۰/۰۰۶  | ۵/۸۰۷  | -      | ۰/۱۶۱        |
| ۹          | $\ln(V_s)=aD+b[D*\ln(N)]+c$   | همه خاک‌ها      | ۰/۰۰۱  | ۰/۰۵   | ۵/۷۸۵  | ۰/۱۳۴        |
|            |                               | خاک‌های رسی     | ۰/۰۱۲  | ۰/۰۱   | ۵/۸۰۲  | ۰/۱۸۳        |
|            |                               | خاک‌های ماسه‌ای | -۰/۰۰۵ | ۰/۰۸   | ۵/۷۰۱  | ۰/۱۴۴        |
|            |                               | خاک‌های شنی     | -۰/۰۰۳ | ۰/۰۷   | ۵/۸۱۳  | ۰/۱۶۴        |

ادامه جدول (۳)

| شماره تابع | نوع معادله                                    | دسته بندی       | ضریب a | ضریب b | ضریب c | انحراف معیار |
|------------|---|-----------------|--------|--------|--------|--------------|
| ۱۰         | $\ln(V_s) = a \ln(D) + b[D \cdot \ln(N)] + c$ | همه خاک‌ها      | ۰/۱۵۳  | ۰/۰۲   | ۵/۵۹۰  | ۰/۱۱۷        |
|            |   | خاک‌های رسی     | ۰/۱۳۵  | ۰/۰۱   | ۵/۶۴۰  | ۰/۰۹۲        |
|            |   | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۱۴۲  | ۰/۰۳   | ۵/۵۴۳  | ۰/۱۲۸        |
|            |   | خاک‌های شنی     | ۰/۲۲۶  | ۰/۰۱   | ۵/۵۲۷  | ۰/۱۲۳        |
| ۱۱         | $\ln(V_s) = a[N \cdot \ln(D)] + b$            | همه خاک‌ها      | ۰/۰۰۲  | ۵/۸۱۸  | -      | ۰/۱۴۵        |
|            |   | خاک‌های رسی     | ۰/۰۰۲  | ۵/۸۶۹  | -      | ۰/۱۲۸        |
|            |   | خاک‌های ماسه‌ای | ۰/۰۰۲  | ۵/۷۱۶  | -      | ۰/۱۴۹        |
|            |   | خاک‌های شنی     | ۰/۰۰۲  | ۵/۸۲۹  | -      | ۰/۱۵۹        |
| ۱۲         | $\ln(V_s) = aN + b[N \cdot \ln(D)] + c$       | همه خاک‌ها      | -۰/۰۰۵ | ۰/۰۴   | ۵/۸۹۴  | ۰/۱۳۲        |
|            |   | خاک‌های رسی     | -۰/۰۰۶ | ۰/۰۳   | ۵/۹۴۱  | ۰/۱۱۴        |
|            |   | خاک‌های ماسه‌ای | -۰/۰۰۴ | ۰/۰۳   | ۵/۸۰۳  | ۰/۱۳۸        |
|            |   | خاک‌های شنی     | -۰/۰۰۲ | ۰/۰۳   | ۵/۸۵۹  | ۰/۱۶۰        |
| ۱۳         | $\ln(V_s) = a \ln(N) + b[N \cdot \ln(D)] + c$ | همه خاک‌ها      | -۰/۰۴۶ | ۰/۰۲   | ۵/۹۴۴  | ۰/۱۴۴        |
|            |   | خاک‌های رسی     | -۰/۰۴۸ | ۰/۰۲   | ۵/۹۹۸  | ۰/۱۲۶        |
|            |   | خاک‌های ماسه‌ای | -۰/۰۰۴ | ۰/۰۳   | ۵/۸۳۶  | ۰/۱۴۹        |
|            |   | خاک‌های شنی     | ۰/۱۶۸  | ۰/۰۱   | ۵/۳۸۸  | ۰/۱۵۲        |

- از دیگر نتایجی که با نمایش گراف‌ها بیان گردید عملکرد تقریباً یکسان پارامترهای  $\ln(N) + \ln(D)$ ,  $\ln(N \cdot D)$  بود که در دسته بندی معادلات از کوچک ترین انحراف معیار به بزرگ ترین انحراف معیار، دیده می شود که این معادلات با اختلاف ناچیزی در رده بهترین معادلات قرار دارند.
- نتیجه مهمی که می توان در رابطه با خاک‌های ماسه‌ای ذکر کرد این است که مقدار انحراف معیار خاک‌های تفکیک شده ماسه‌ای برخلاف خاک‌های رسی، در مقایسه معادلات همه خاک‌ها، مقدار  $\sigma_e$  بیشتری را نتیجه می دهد. این بدان معناست که الزاماً تفکیک خاک‌ها نتیجه بهتری نمی دهد.

#### ۴-۲- خاک‌های رسی

#### ۴-۳- خاک ماسه‌ای

- مشابه نتایج ذکر شده قبلی، در رابطه با خاک‌های ماسه‌ای نیز بین بهترین تابع (رابطه ۷) و بدترین تابع (رابطه ۲) حدود ۱۱ درصد اختلاف وجود دارد.
- با مرتب سازی معادلات از کوچک ترین تا بزرگ ترین انحراف معیار، قرار گرفتن رابطه (۱) در رده ششم در مقایسه با رابطه (۲) در جایگاه سیزدهم، گواه این حقیقت است که پارامتر  $D$  نقش مهم تری در تخمین سرعت موج برشی دارد. که اختلاف محاسبه شده حدود ۸/۲ درصد برآورد شده است.
- در رابطه با خاک‌های شنی، بهترین معادله با انحراف معیار ۰/۰۹۲ و بدترین معادله با انحراف معیار ۰/۱۶۴ به ترتیب روابط (۶) و (۹) می باشند که اختلاف محاسبه شده در معادلات ذکر شده در بالا ۷ درصد می باشد.
- به جهت بررسی اثر تفکیک خاک‌ها، معادلات مشابه با هم در دسته بندی همه خاک‌ها با خاک‌های شنی مورد مقایسه قرار گرفتند و نتیجه نشان داد که مقدار انحراف معیار در تمام معادلات کمتر نشده و به جز معادلات ۲، ۳، ۴، ۶، و ۷ این مقدار افزایش نیز داشته است.

می‌باشند، می‌تواند سرعت موج برشی را تخمین بزند. خاک‌های شنی در این مورد نتیجه دور از انتظاری را در مقایسه با همه خاک‌ها، خاک‌های ماسه‌ای و خاک‌های رسی نشان دادند، زیرا با رتبه‌بندی انحراف معیارها مشاهده شد که در رابطه با این نوع خاک پارامتر عدد نفوذ استاندارد مانند عمق به‌تنهایی نسبت به دیگر توابع ترکیبی در تخمین سرعت موج برشی برتری دارد. پس همان‌طور که اوها و گوتو [۱۸] بیان کردند، حاصل شدن این نتیجه نیز می‌تواند دلیل قاطعی برای محققینی باشد که فقط از عدد نفوذ استاندارد در تخمین معادلات خود استفاده کرده‌اند.

۲- اوها و گوتو [۱۸] و لی [۱۶] معتقد بودند که وقتی نوع خاک و اثر زمین‌شناسی در استخراج معادلات در نظر گرفته می‌شود پارامتر عدد نفوذ استاندارد، پارامتر غالبی در استخراج معادلات نمی‌باشد ولی برای حالتی که خاک‌ها از هم تفکیک نمی‌شوند این پارامتر می‌تواند به‌عنوان پارامتر مؤثری در استخراج معادلات در نظر گرفته شود. نظریه این محققین با نتایج حاصل از این مقاله در تناقض است، بدین دلیل که در دسته‌بندی همه خاک‌ها که مرزی برای خاک‌ها تعریف نشده و دارای تمامی گروه‌های شنی، ماسه‌ای، سیلتی و رسی می‌باشد معادله بر پایه عدد نفوذ استاندارد دارای بیشترین انحراف معیار بوده و در رده بدترین معادله پیش‌بینی‌کننده سرعت موج برشی قرار گرفته است. ۳- از آنجایی که نتایج حاصل شده در رابطه با خاک‌های شنی و بقیه دسته‌بندی‌ها تا حدودی متفاوت بود می‌توان به نتیجه مهمی که از مقاله اوها و گوتو [۱۸] برداشت گردید اشاره نمود. آنها معتقد بودند که معنای فیزیکی بین پارامترهای عمق و عدد نفوذ استاندارد اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های محلی و به دنبال آن روابط تجربی استخراج شده ممکن است به‌وضوح آشکار نباشد پس باید خاطر نشان ساخت که عدد نفوذ استاندارد، عمق، نوع خاک و اثر زمین‌شناسی توأم پارامترهای مهمی در تخمین سرعت موج برشی می‌باشند.

۴- از آنجایی که در آمار بیزین انتخاب تابع بهینه و کارا باید توسط انحراف معیار صورت گیرد، پس از رتبه‌بندی انحراف معیارهای حاصل از ۱۳ تابع مرتبط با دسته‌بندی‌های مختلف

- از دیگر نتایج قابل توجه این می‌باشد که تأثیر پارامتر  $D$  با ۳ درصد اختلاف در پیش‌بینی سرعت موج برشی از پارامتر  $N$  بیشتر می‌باشد که البته در مقایسه با دیگر دسته‌های خاک تفکیک شده این تأثیر کم‌رنگ‌تر است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مطالعه‌ای جامع به جهت ارزیابی اثرات پارامترهای عدد نفوذ استاندارد و عمق در تخمین سرعت موج برشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای دینامیکی خاک با رویکرد آمار بیزین صورت گرفت. به‌طور خلاصه داده‌های مورد استفاده از ۲۸ گمانه حفاری شده در سه شهر استان هرمزگان جمع‌آوری شدند و مورد تحلیل قرار گرفتند. بدین صورت که محققین با تعریف ۸ متغیر و ۱۳ تابع خواه با در نظر گرفتن پارامتر عدد نفوذ استاندارد، عمق و یا ترکیبی از هر دو و به کمک آمار بیزین درصدد تعیین توابع ریاضی با قابلیت اطمینان بیشتر برآمدند. حال هدف از این بخش در مطالعه پیش رو مقایسه نتایج ارائه شده برای دسته‌بندی‌های مختلف خاک با نظریه‌های دیگر محققین در این زمینه و ارائه نتایج کلی و پیشنهادات به شرح زیر می‌باشد:

۱- دو نمونه از مقالات قدیمی و تأثیرگذاری که باعث شده بودند تا دیگر محققین از نتایج آنها به‌صورت مستقیم در جهت توسعه کارهای تحقیقاتی خود استفاده کنند، مقالات اوها و گوتو [۱۸] و لی [۱۶] بودند. اوها و گوتو [۱۸] با مقایسه نتایج معادله‌ای که دارای چهار شاخص عدد نفوذ استاندارد، عمق، اثر زمین‌شناسی و نوع خاک بود و دیگر معادلات نشان دادند که توزیع عمق در مقابل سرعت موج برشی بسیار تأثیرگذار است و قید کرد که با استفاده از پارامتر عمق در معادلاتی که تنها دارای سه و دو شاخص می‌باشند می‌توان به بالاترین میزان ضریب همبستگی دست یافت. در مقایسه این نتیجه مهم از مقاله اوها و گوتو [۱۸] با سیزده مدل تابع تعریف شده در این مطالعه می‌توان به صحت و اعتبار این نتیجه رسید، زیرا دسته‌بندی این توابع نشان دادند معادله‌ای که تنها بر اساس پارامتر عمق استخراج شده است، با انحراف معیار کمتر نسبت به دیگر معادلاتی که ترکیبی از عدد نفوذ استاندارد و عمق

2. Choi, Y. and Stewart, J.P. (2005) Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity. *Earthquake Spectra*, **21**(1), 1-30.
3. Andrus, R.D., Fairbanks, C.D., Zhang, J., Camp, W.M., Casey, T.J., Cleary, T.J., and Wright, W.B. (2006) Shear-wave velocity and seismic response of near-surface sediments in Charleston, South Carolina. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(5), 1897-1914.
4. Esfahanizadeh, M., Nabizadeh, F., and Yazarloo, R. (2015) Correlation between standard penetration (NSPT) and shear wave velocity (VS) for young coastal sands of the Caspian Sea. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**(9), 7333-7341.
5. Rollins, K.M., Diehl, N.B., and Weaver, T.J. (1998) Implications of V s-BPT (N 1) 6 0 Correlations for Liquefaction Assessment in Gravels. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, ASCE.
6. Thaker, T. and Rao, K. (2011) Development of statistical correlations between shear wave velocity and penetration resistance using MASW technique. *Geo-Innovation Addressing Global Challenges*, Toronto, Ontario, Canada.
7. Nazarian, S. (1984) In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface wave. *Proceedings of 8<sup>th</sup> Conference on Earthquake Engineering, San Francisco*.
8. Jafari, M.K., Shafiee, A., and Razmkhah, A. (2002) Dynamic properties of fine grained soils in south of Tehran. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **4**(1), 25-35.
9. Hasancebi, N. and Ulusay, R. (2007) Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **66**(2), 203-213.
10. Fauzi, A., Irsyam, M. and Fauzi, U.J. (2014) Empirical correlation of shear wave velocity and N-SPT value for Jakarta. *Int. J. GEOMATE*, **7**(1), 980-984.
11. Brown, L.T., Boore, D.M., and Stokoe, K.H. (2002) Comparison of shear-wave slowness profiles at 10 strong-motion sites from noninvasive

خاک (همه خاک‌ها، خاک‌های رسی، خاک‌های ماسه‌ای، خاک‌های شنی) این نتیجه حاصل گردید که معادلات در شکل توانی چند گانه و توانی ساده الزاماً بهترین معادلات در زمین پیش‌بینی سرعت امواج برشی نیستند و می‌توان معادلات با فرمت‌های ریاضی دیگر را با دقت بهتر ارائه داد.

۵- با رویکرد دسته‌بندی خاک‌ها به خاک‌های رسی، ماسه‌ای و شنی و انجام تحلیل بیزین بر روی آنها این انتظار می‌رفت که مقدار انحراف معیارهای خاک‌های با دسته‌بندی مشخص به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از زمانی باشد که همه خاک‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرند ولی مقایسه آنها نشان داد که در خاک‌های ماسه‌ای و تعدادی از معادلات شنی این نظریه صحیح نیست.

الزاماً دسته‌بندی خاک‌ها انحراف معیار کمتری نتیجه نمی‌دهد.

۶- علی‌رغم نتایج حاصل شده باید دقت کرد که این معادلات برای یک سایت مشخص توسعه یافته‌اند و این نتایج باید با در نظر گرفتن تمهیدات خاصی برای سایت با شرایط ژئوتکنیکی دیگر مورد استفاده قرار بگیرند.

۷- به‌عنوان آخرین نکته، با در نظر گرفتن گرافیکی که نشان‌دهنده‌ی رابطه  $N = \ln(N)$  با  $V_s = \ln(V_s)$  بود پیشنهاد می‌شود در صورت تعریف معادله همبستگی بر مبنای عدد نفوذ استاندارد با درصد اطمینان بالاتر، معادله به تفکیک بازه‌هایی از اعداد نفوذ استاندارد استخراج گردد.

## سپاسگزاری

مقاله پیش رو مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد سولماز چاروسائی می‌باشد و نویسندگان نهایت تشکر و قدردانی خود را از مدیر کل آزمایشگاه فنی مکانیک خاک استان خوزستان آقای مهندس خدایار روان‌بد به سبب همکاری در تهیه لاگ گمانه‌های اکتشافی ابراز می‌دارند.

## مراجع

1. Hanumantharao, C. and Ramana, G. (2008) Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India. *Journal of Earth System Science*, **117**(2), 719-730.

- Application to liquefaction. *Computers and Geosciences*, **44**, 86-94.
21. Standard, A. (2008) *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*.
  22. Lee, S. (1988) Regression model for shear wave velocity of sandy and silty soils of Taipei basin. *Proc. of the CCNAA-AIT Joint Seminar/Workshop on Research and Application for Multiple Hazards Mitigation, Taipei*.
  23. Der Kiureghian, A. (1999) A Bayesian framework for fragility assessment. *Proc., ICASP8 Conference*.
  24. Brezger, A. and Lang, S. (2006) Generalized structured additive regression based on Bayesian P-splines. *Computational Statistics & Data Analysis*, **50**(4), 967-991.
  25. Brezger, A. and Lang, S. (2008) Simultaneous probability statements for Bayesian P-splines. *Statistical Modelling*, **8**(2), 141-168.
- SASW measurements and measurements made in boreholes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**(8), 3116-3133.
  12. Andrus, R., Zhang, J., Ellis, B.S., and Juang, C.H. (2003) *Guide for Estimating the Dynamic Properties of South Carolina Soils for Ground Response Analysis*.
  13. Silva, W., Wong, I., Siegel, T., Gregor, N., Darragh, R., and Lee, R. (2003) Ground motion and liquefaction simulation of the 1886 Charleston, South Carolina, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(6), 2717-2736.
  14. Mohanan, N.P., Fairbanks, C.D., Andrus, R.D., Camp, W.M., Cleary, T.J., Casey, T.J., and Wright, W.B. (2006) *Electronic Files of Shear Wave Velocity and Cone Penetration Test Measurements from the Greater Charleston Area, South Carolina*. Data Rep. to the US Geological Survey, Award No. 05HQGR0037.
  15. Seed, H. and Idriss, I. (1981) Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes. *ASCE National Convention (MO)*.
  16. Lee, S.H.H. (1990) Regression models of shear wave velocities in Taipei basin. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **13**(5), 519-532.
  17. Jafari, M., Asghari, A., and Rahmani, I. (1997) Empirical correlation between shear wave velocity ( $V_s$ ) and SPT-N value for south of Tehran soils. *Proc. 4<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering*.
  18. Ohta, Y. and Goto, N. (1978) Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **6**(2), 167-187.
  19. Brandenburg, S.J., Bellana, N. and Shantz, T. (2010) Shear wave velocity as function of standard penetration test resistance and vertical effective stress at California bridge sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), 1026-1035.
  20. Ghorbani, A., Jafarian, Y., and Maghsoudi, M.S. (2012) Estimating shear wave velocity of soil deposits using polynomial neural networks:

## Evaluation of Mathematical Relationships of Shear Wave Velocity and Standard Penetration Test Results with Bayesian Statistics Approach

Solmaz Charoosaei<sup>1</sup>, Navid Khayat<sup>2\*</sup>, and Mehdi Mahdavi Adeli<sup>3</sup>

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran,  
\*Corresponding Author, email: [Khayat@iauahvaz.ac.ir](mailto:Khayat@iauahvaz.ac.ir)
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Shear wave velocity is one of the most important geophysical parameters in which the seismic response of the sites is expressed. This seismic parameter gives valuable information about the project site, but since geophysical tests are usually expensive and time consuming, the use of indirect methods to reduce costs is increasing. Much research has been done in different regions of the world, in most of them have used both simple power equations and multiple power equations to derive equations. However, in this paper, a comprehensive study is conducted to evaluate the effects of standard penetration number and depth on shear wave velocity estimation as one of the most important soil dynamic parameters with Bayesian statistics approach. In summary, data from 28 boreholes drilled in three cities of Hormozgan province were collected. The collected data were subdivided into four main categories of all soils: clay soils, silty soils, sandy and gravel soils. In this way, the researchers identified 8 variables and 13 functions with the help of Bayesian statistics to determine the mathematical functions with greater reliability, taking into account standard penetration number, depths or a combination of both. The results of this analysis showed that the standard penetration number parameter alone for all soils and classifications as well as simple and multiple power equations are not the best parameter and equations in predicting shear wave velocity, respectively. Other results can be pointed out that soil clustering is not always the most effective factor in estimating shear wave velocity. Finally, it is suggested that if the correlation equation is defined on the basis of standard penetration number with higher confidence percentage, the equation will be extracted by intervals from standard penetration number. In addition, despite the results, it should be noted that these equations have been developed for a specific site and these results should be used with regard to site specific arrangements with other geotechnical conditions.

**Keywords:** Shear Wave Velocity; SPT; Statistical Correlation; Bayesian Statistics.