

پهنه‌بندی سرعت موج برشی آبرفت‌های گستره تهران

محمد کاظم جعفری

دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

آرش رزمخواه

دانشجوی دکتری مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات

محمد کشاورز بخشایش

کارشناس پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(تاریخ دریافت ۸۱/۷/۱۰، تاریخ تصویب ۸۲/۷/۱۲)

چکیده

تهیه نقشه‌های هم‌سرعت موج برشی و نقشه‌های هم‌عمق برای سرعت‌های موج برشی مختلف آبرفت‌های گستره تهران موضوع مقاله حاضر می‌باشد. در این راستا از تلفیق داده‌های لرزه‌نگاری و اطلاعات حاصل از بررسی‌های ژئوتکنیکی استفاده شده است. بدین منظور اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده حدود ۱۰۰۰ حلقه گمانه بانضمام نتایج حاصل از حفاری ۲۶ حلقه گمانه مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج بدست آمده از ۹۵ آزمایش لرزه‌نگاری انکساری و ۹ آزمایش درون‌چاهی انجام شده در گستره شهری تهران، تلفیق گردیده است. حاصل این مطالعات تهیه و ارائه نقشه‌های هم‌سرعت موج برشی و نقشه‌های هم‌عمق برای سرعت‌های مختلف امواج برشی بوده است. همچنین با تلفیق نتایج حاصل از داده‌های لرزه‌نگاری و یافته‌های منتج از اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده و انجام آزمایش‌های درجا در گمانه‌های حفاری شده در جنوب تهران، جدول پیشنهادی جدیدی برای طبقه‌بندی خاک‌های تهران بر اساس سرعت موج برشی و اعداد حاصل از آزمون نفوذ استاندارد (SPT) پیشنهاد و ارائه گردیده است. از دیگر نتایج بدست آمده این بررسی‌ها می‌توان به مقایسه نتایج حاصل از انجام آزمون نفوذ استاندارد در گمانه‌های حفاری شده و سرعت موج برشی بدست آمده از کاوش‌های لرزه‌نگاری و ایجاد همبستگی بین عدد آزمون نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی اشاره نمود. در این ارتباط، رابطه قبلی ارائه شده در مورد همبستگی سرعت موج برشی و عدد آزمون نفوذ استاندارد مورد بازبینی مجدد قرار گرفته و برای انواع مختلف خاک‌های ریزدانه جنوب تهران روابط جدیدی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، سرعت موج برشی، کاوش‌های ژئوفیزیکی، نقشه هم‌سرعت، تهران

مقدمه

جمع‌آوری اطلاعات مربوط به حفاری‌های ژئوتکنیکی، مطالعات گسترده صحرایی شامل حفاری چندین حلقه گمانه، آزمایشات لرزه‌نگاری و برداشتهای خرد لرزه‌ای (میکروترمور) صورت پذیرفته است. پس از اتمام مطالعات صحرایی، مطالعات دفتری شامل تفسیر داده‌های حاصل از آزمایشات لرزه‌نگاری و برداشتهای خرد لرزه‌ای، تهیه پروفیل‌های نماینده ژئوتکنیکی، تعیین حرکت ورودی، تحلیل دینامیکی آبرفت و تهیه نقشه‌های ریزپهنه‌بندی و تفسیر نتایج حاصله نیز انجام گردیده است. نتایج این مطالعات در قالب چهار گزارش جداگانه برای جنوب غرب تهران [۱]، جنوب شرق تهران [۲]، مطالعات تکمیلی برای جنوب تهران [۳] و مطالعات مقدماتی شمال تهران [۴] به همراه نقشه‌های مختلف ریزپهنه‌بندی، توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انتشار یافته است.

در مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای و تحلیل دینامیکی آبرفت، کاوش‌های لرزه‌نگاری به منظور برآورد سرعت انتقال امواج لرزه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. سرعت عبور امواج در لایه‌های زمین رابطه مستقیمی با تراکم یا سفتی، تنش مؤثر و درصد اشباع آن دارد. سرعت موج برشی در محاسبات مربوط به تعیین پاسخ لرزه‌ای آبرفت دارای نقش قابل ملاحظه‌ای بوده و همچنین مدول الاستیک و مدول برشی خاک با استفاده از سرعت عبور امواج قابل محاسبه و ارزیابی است. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای تهران از دیدگاه اثرات ساختگاه را در قالب طرح‌های تحقیقاتی از سال ۱۳۷۴ آغاز و در سال ۱۳۸۰ به پایان رسانده است. در طول این مدت، ضمن

سبب بر جای گذاشته شدن رسوبات متنوع در آن شده است. رسوبات آبرفتی تهران طی پنج دهه اخیر توسط محققین مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. اغلب این محققین رسوبات آبرفتی تهران را از دیدگاه زمین شناسی مورد مطالعه قرار داده و بر اساس زمان تشکیل و اختصاصات عمومی آنها تقسیم‌بندیهای متعددی از این آبرفتها ارائه داده‌اند. در بین این تقسیم‌بندیها که امروزه بیشتر مورد استفاده و توجه قرار می‌گیرد می‌توان به طبقه‌بندی ریبن (نقل از بربریان و همکاران [۶]) اشاره نمود که رسوبات آبرفتی تهران بر اساس آن به چهار دسته D, C, B, A رده‌بندی شده است.

همچنین تقسیم‌بندی ریبن، پایه‌ای برای مطالعات بعدی گردیده و از آن زمان تاکنون تغییر عمده‌ای در این تقسیم‌بندی بعمل نیامده است. بعد از ریبن زمین‌شناسان خارجی و داخلی این نهشته‌ها را طبق همان تقسیم‌بندی مطالعه کرده‌اند و فقط آنکالن (نقل از بربریان و همکاران [۶]) با استفاده از ویژگیهای زمین ریخت‌شناسی، تقسیمات دیگری برای رسوبات آبرفتی گستره تهران پیشنهاد نمود که چندان از تقسیم‌بندی ریبن متمایز نیست.

ویژگیهای رسوب شناختی نهشته‌های آبرفتی تهران بیانگر آن است که این رسوبات، حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلابهای فصلی هستند که از زمان پلیوسن پسین تاکنون از دامنه‌های جنوبی ارتفاعات البرز منشا گرفته‌اند. اختصاصات چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی، ریخت‌شناسی و سن نهشته‌های آبرفتی تهران سبب می‌گردد که بتوان این رسوبات را به بخشهای جداگانه‌ای تقسیم نمود. بررسی نهشته‌های آبرفتی گستره تهران و پیرامون، تاثیر دو فاز کوهزایی بر روی آنها را نشان می‌دهد که به سبب ندانستن سن دقیق نهشته‌های آبرفتی، زمان دقیق رویداد این فازها روشن نشده است. در فاز اول کوهزایی، نهشته‌های آبرفتی سازند A بشدت چین‌خورده است. در فاز دوم کوهزایی که ضعیفتر بوده است، لایه‌های آبرفتی سری B در بیشتر جاها شیب‌دار (۵ تا ۱۰ درجه) شده‌اند. زمان رویداد این فاز کوهزایی حدود ۵۰،۰۰۰ سال پیش تعیین شده است. نهشته‌های سازند C که بر روی آنها قرار گرفته است دارای لایه‌بندی افقی می‌باشند. محدوده گسترش هر یک از سازندهای آبرفتی، در نقشه زمین شناسی گستره تهران

در بخشی از مطالعات اخیر، نقشه‌های هم سرعت و هم عمق امواج برشی به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهیه گردیده است. همچنین نظر به اهمیت شناسایی و تعیین عمق سنگ بستر لرزه‌ای در تحلیل دینامیکی آبرفت، نقشه توزیع عمق سنگ بستر لرزه‌ای برای آبرفت‌های گستره تهران تهیه شده است. مبنای اصلی تهیه نقشه‌های مذکور، نتایج بدست آمده از کاوشهای ژئوفیزیکی بوده و در این ارتباط داده‌های حاصل از ۹۵ آزمایش لرزه‌نگاری انکساری و ۹ آزمایش درون‌چاهی مورد استفاده قرار گرفته است. برای تکمیل و تدقیق نقشه‌های هم سرعت و هم عمق امواج برشی، علاوه بر بررسیهای صحرائی از داده‌های ژئوتکنیکی حدود ۱۰۰۰ حلقه گمانه در گستره شهر تهران استفاده شده است. بخش اعظم این گمانه‌ها از سازمانها و شرکتهای مختلف جمع‌آوری شده و تعداد محدودی از آنها (۲۶ حلقه گمانه) نیز توسط پژوهشگاه و در راستای انجام این مطالعات حفاری شده است.

همچنین با عنایت به داده‌های ژئوتکنیکی قابل توجه و در دسترس و نیز نتایج آزمایشات لرزه‌نگاری، طبقه‌بندی جدیدی از محدوده سرعت امواج برشی خاکهای ریزدانه و درشت دانه تهران ارائه شده است. از سوی دیگر رابطه بین عدد آزمون نفوذ استاندارد (SPT) و سرعت موج برشی در خاکهای تهران مورد بازبینی مجدد قرار گرفته و رابطه قبلی ارائه شده توسط جعفری و همکاران [۵] در مورد انواع خاکهای ریزدانه تهران اصلاح گردیده است.

محدود جغرافیایی و زمین‌شناسی عمومی

محدوده مورد مطالعه بخش عمده‌ای از نواحی بیست‌گانه شهر تهران و بخشهایی از نواحی شرقی مناطق ۲۱ و ۲۲ از تقسیمات شهرداری تهران را شامل می‌شود. این ناحیه در محدوده جغرافیایی 34° و 35° الی 50° و 35° شمالی و 16° و 51° الی 32° و 51° شرقی قرار گرفته است. از نظر زمین ریخت‌شناسی، گستره مورد مطالعه از سمت شمال به بلندیهای البرز، از سمت شرق به کوههای سه پایه و بی بی شهربانو، از غرب به رودخانه کن و از سمت جنوب به فرونشست جنوب ری محدود شده است. قرارگیری دشت تهران در جنوب ارتفاعات البرز مرکزی

پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله گردآوری شده است. تعداد لوگ گمانه‌های جمع‌آوری شده برای گستره تهران بیش از ۱۰۰۰ گمانه برای ۵۰۰ محل جداگانه می‌باشد. تعداد گمانه‌های موجود در هر محل از ۱ تا ۱۱ متغیر می‌باشند. همچنین در راستای انجام هرچه دقیقتر پروژه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای منطقه جنوب تهران و تکمیل اطلاعات ژئوتکنیکی در مناطق مختلف، علاوه بر اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده تعداد ۲۶ حلقه گمانه نسبتاً عمیق (حداکثر ۶۴ متر) توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله حفاری شده است. شکل (۲) توزیع مکانی اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده و گمانه‌های حفاری شده را نشان می‌دهد.

از بارزترین ویژگی‌های آبرفتهای محدوده مورد مطالعه می‌توان به کاهش تدریجی و کم و بیش منظم اندازه ذرات تشکیل دهنده رسوبات از نواحی شمال و شمالغرب به سمت جنوب و جنوب غربی اشاره نمود. در مطالعات اخیر مشخص گردید که بخش عمده نواحی شمالی و مرکزی ناحیه مورد مطالعه (بالتر از خیابان جمهوری) تا عمق قابل ملاحظه‌ای توسط رسوبات درشت دانه شامل شن و ماسه پوشیده شده است. در واقع تمامی واحدهای آبرفتی چهارگانه تهران در این بخش از گستره مورد مطالعه از رسوبات درشت دانه شنی و ماسه‌ای تشکیل شده‌اند. نهشته‌های ریزدانه تنها محدود به میان لایه‌های رسی و سیلتی مابین سازند A و بصورت محدودتر مربوط به بخشهایی از رسوبات جوانتر در منطقه دروس در حوالی خیابان پاسداران می‌شود. بررسی و مقایسه رسوبات درشت‌دانه واحدهای مختلف، بیانگر تغییرات نسبتاً قابل توجه در نتایج آزمایشات تراکم این واحدها می‌باشد. از بین سازندهای A، B، C و D به ترتیب سازند A متراکمترین و D کم تراکمترین آنها محسوب می‌شوند. همچنین در حالت عمومی و تا حدودی برخلاف سن زمین‌شناسی، تراکم سازند B در مقایسه با سازندهای A و C اندک می‌باشد. بررسی نتایج آزمایشات دانه‌بندی نمونه‌های درشت‌دانه اخذ شده از سازندهای آبرفتی تهران نشان می‌دهد که رسوبات سازند B، C و D "بد دانه‌بندی" طبقه‌بندی شده و اغلب در تقسیم‌بندی یونیفاید در گروه

که از تلفیق نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰،۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه ۱:۵۰،۰۰۰ تهیه شده توسط عباسی و همکاران [۷] و مطالعه عکسهای هوایی بدست آمده نشان داده شده است (شکل ۱).

در حال حاضر مشکل عمده جهت روشن شدن مسایل زمین‌شناسی و شناسایی خطوط تماس سازندهای مختلف کواترنری در سطح شهر تهران، پوشیده بودن سطح زمین توسط مناطق و تاسیسات شهری می‌باشد که در مجموع شناسایی این سازندها را با مشکل مواجه می‌سازد.

پهنه‌بندی سرعت موج برشی

ویژگی‌های ژئوتکنیکی

ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی آبرفتهای گستره تهران به دلیل پوشیده بودن سطح این آبرفتها توسط نواحی و تاسیسات شهری و صنعتی کار چندان ساده‌ای نیست. در چنین شرایطی داده‌های حاصل از گمانه‌های حفاری شده به منظور انجام بررسیهای ژئوتکنیکی پروژه‌های در دست اقدام، می‌تواند کمک مؤثری در تعیین ویژگیهای عمومی و اختصاصی آبرفتها ارائه نماید.

حفر گمانه‌های متعدد به منظور اجرای پروژه‌های عمرانی و تاسیسات شهری سبب شده است تا اطلاعات ژئوتکنیکی قابل توجهی از آبرفتهای گستره شهر تهران در دسترس باشد. با اینحال جمع‌آوری و استفاده از اطلاعات این گمانه‌ها بدلیل پراکندگی آنها در مؤسسات و شرکتهای خصوصی و دولتی مختلف و نیز تا حدودی بدلیل عدم استفاده پیمانکاران و مشاوران از استانداردهای یکسان در انجام حفاری و آزمایشات ژئوتکنیکی، خالی از اشکال نیست. کار جمع‌آوری اطلاعات گمانه‌های حفاری شده در گستره شهر تهران در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، از سال ۱۳۷۴ همزمان با شروع کار ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای منطقه جنوب غربی شهر تهران آغاز گردیده است. برای جمع‌آوری این اطلاعات به تمامی شرکتهای و مهندسین مشاور دست‌اندرکار و صاحبان ساختمانهای خصوصی و همچنین مراکز دولتی که گمان می‌رفت دارای مطالعات و اطلاعات ژئوتکنیکی باشند مراجعه شده است. در حال حاضر بانک اطلاعاتی نسبتاً کاملی از اطلاعات ژئوتکنیکی آبرفتهای تهران در

تکتونیک دوران چهارم و در نتیجه فرسایش نهشته‌های سطحی؛

۲- تغییرات سطح آب زیرزمینی؛

۳- از دست دادن آب به هنگام رسوبگذاری

کاوشهای ژئوفیزیکی

در ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای و تحلیل دینامیکی آبرفت، مطالعات لرزه‌نگاری و کاوشهای ژئوفیزیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند زیرا با این بررسیها سرعت انتقال امواج لرزه‌ای توسط لایه‌های زمین مستقیماً اندازه‌گیری شده و مدول الاستیک و مدل برشی آنها برآورد می‌گردند. برای اندازه‌گیری سرعت امواج P و S خاک، روشهای مختلفی وجود دارد. امروزه علاوه بر روشهای مستقیم اندازه‌گیری سرعت امواج در خاک، سعی می‌شود از روشهای غیر مستقیم نیز برای ارزیابی آن استفاده شود.

روشهای مستقیم اندازه‌گیری سرعت امواج در خاک بطور کلی به دو دسته آزمایشگاهی و صحرایی تقسیم‌بندی می‌شود که هر کدام نیز به روشهای مختلفی انجام می‌شوند. در آزمایشگاه سرعت انتشار امواج با استفاده از آزمایش ستون تشدید و آزمایش بارگذاری تناوبی بدست می‌آید.

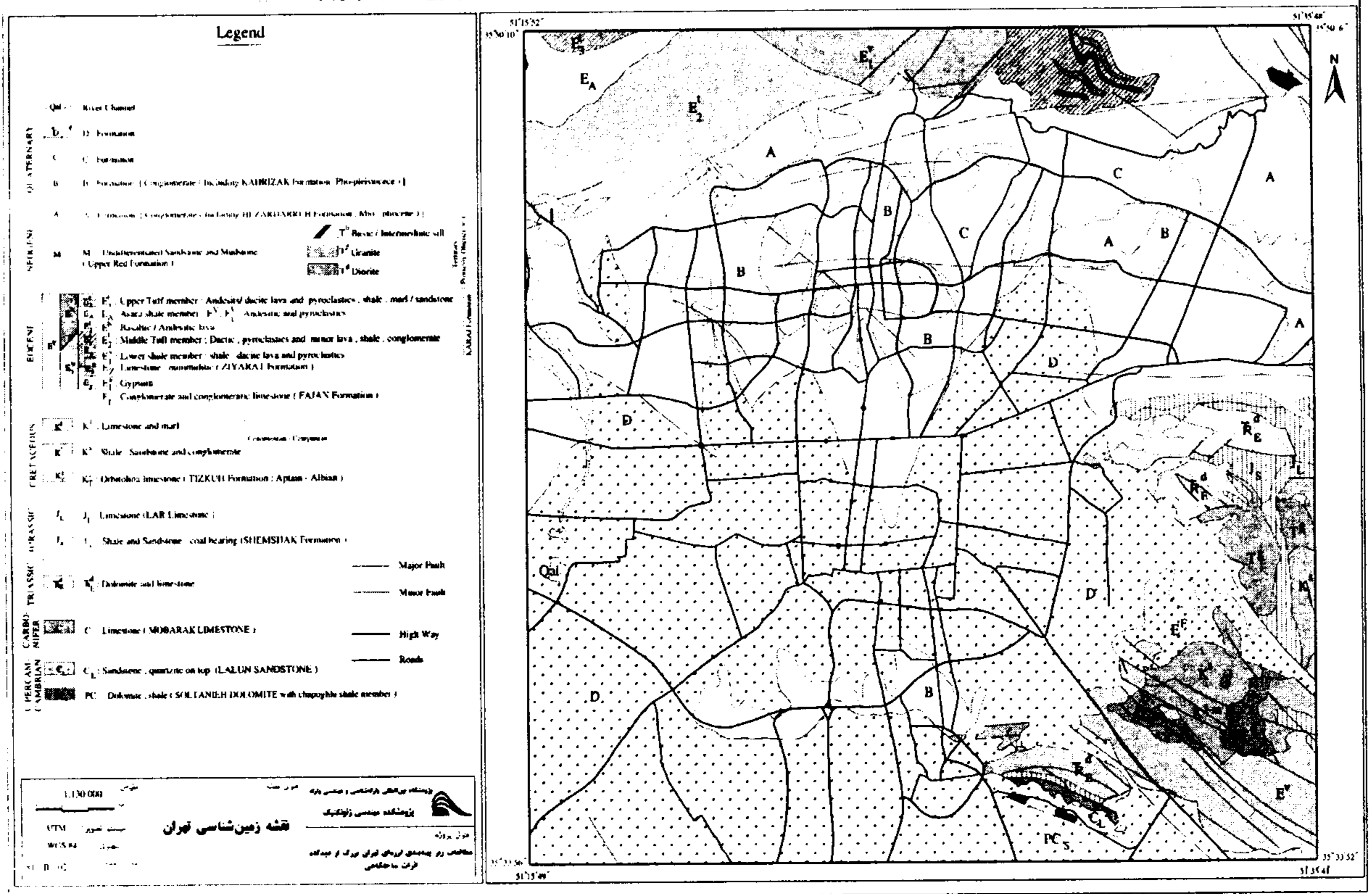
در مطالعات صحرایی نیز سرعت انتشار امواج به طرق مختلفی از جمله روشهای سطحی و درون‌چاهی اندازه‌گیری می‌شود. روشهای سطحی عبارتند از روش انعکاسی و روش انکساری و روشهای درون‌چاهی شامل روش سطح به گمانه، روش گمانه به سطح و روش گمانه به گمانه می‌باشند. از دیگر روشهای غیرمستقیم برآورد سرعت موج برشی می‌توان به برآورد سرعت موج برشی با استفاده از نتایج آزمون نفوذ استاندارد اشاره نمود.

GP، GC و SP قرار می‌گیرند. دانه‌بندی رسوبات درشت‌دانه سازند A با توجه به لایه‌بندی متنوع و ضخامت قابل توجه آن، بسیار متفاوت بوده و تقریباً تمامی رده‌های خاک درشت‌دانه در طبقه‌بندی یونیفاید را شامل می‌شود. در جدول (۱) خلاصه ویژگیهای ژئوتکنیکی خاکهای درشت‌دانه تهران ارائه شده است. بخش عمده‌ای از نواحی مرکزی و جنوب غربی ناحیه مورد مطالعه توسط نهشته‌های ریزدانه (سیلت و رس) پوشیده شده است. تبدیل نهشته‌های درشت‌دانه به رسوبات ریزدانه با ایجاد یک ناحیه انتقالی همراه بوده است که بصورت نوار باریکی به پهنای حداکثر ۲ کیلومتر و طول ۸ کیلومتر مابین خیابانهای جمهوری تا امام خمینی و در امتداد شرقی- غربی گسترش پیدا کرده است. از خصوصیات عمده آن می‌توان به تغییر دائمی جنس و تراکم نهشته‌ها در جهات افقی و عمودی اشاره نمود. نهشته‌های ریزدانه بخش قابل توجهی از نواحی جنوبی تهران را به خود اختصاص داده‌اند. به جز در چند نمونه از گمانه‌های حفر شده (در حوالی بزرگراه و پارک بعثت) در بقیه نقاط این رسوبات از نشانه خمیری و حد روانی پایینی برخوردار بوده‌اند. در این مطالعات تمامی رسوبات به دو گروه درشت‌دانه و یارسوبات غیرچسبنده^۱ با وجه غالب ماسه و شن با علامت اختصاری (N) و ریزدانه یاچسبنده^۲ که بیشتر بصورت سیلت و رس بوده، با علامت اختصاری (C) تقسیم‌بندی گردیده‌اند. نتایج بررسیها نشان می‌دهد که نهشته‌های ریزدانه تهران اغلب خاصیت پیش تحکیمی داشته و نتایج آزمایشات صورت گرفته بر روی نمونه‌های مختلف، نسبت پیش تحکیمی (OCR) حدود ۲ الی ۳ را نشان می‌دهد [۸]. علل پیش تحکیمی نهشته‌های مذکور را می‌توان به این عوامل نسبت داد:

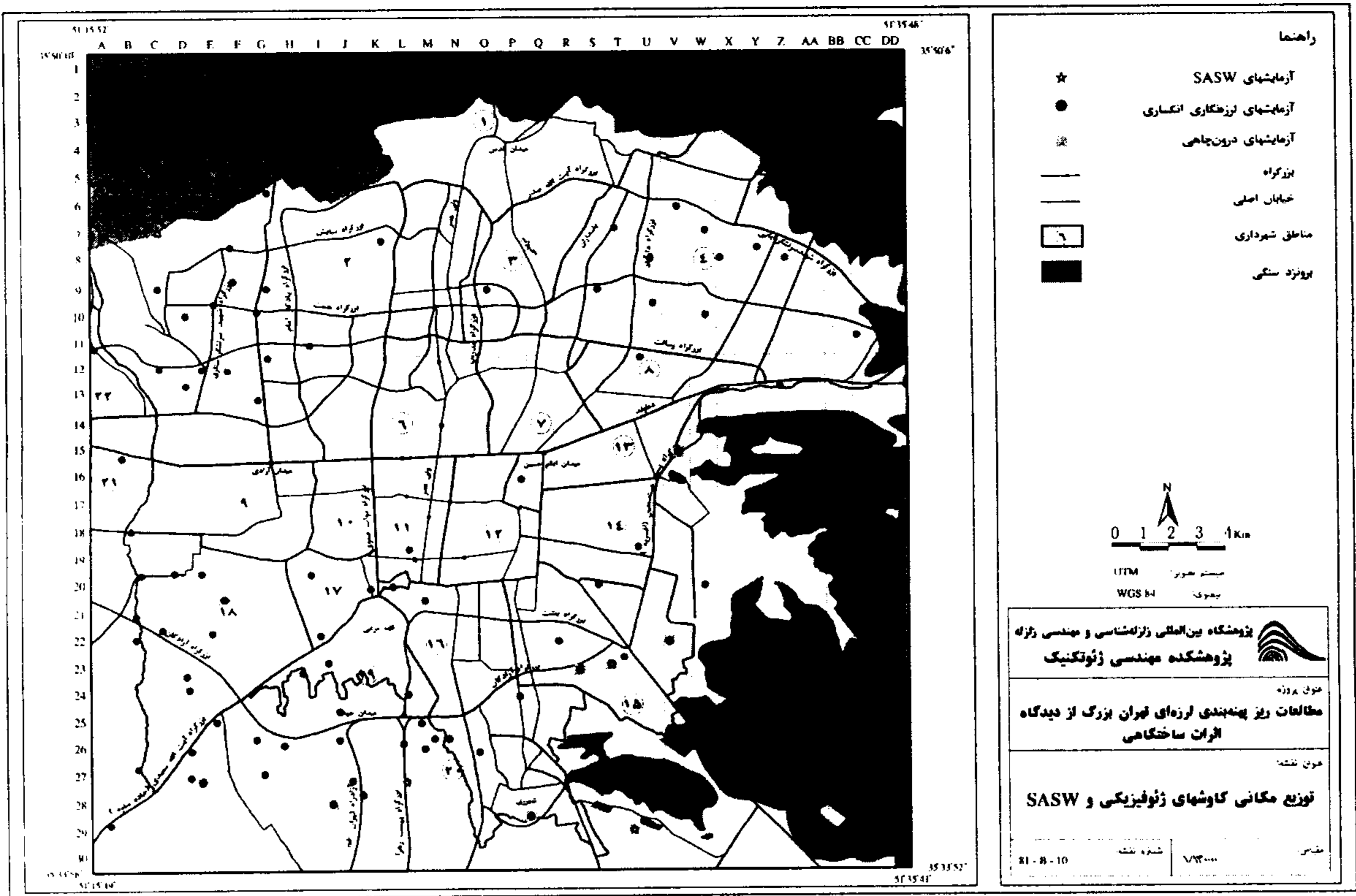
۱- بالا آمدن نهشته‌های عمیق در اثر پدیده‌های

جدول ۱: خلاصه‌ای از پارامترهای ژئوتکنیکی خاکهای درشت‌دانه تهران.

وزن مخصوص (T/m^3)	توصیف تراکم	طبقه‌بندی USCS در غالب	پارامتر
			نوع آبرفت
۲-۲/۲	فوق‌العاده متراکم	GW, GC, SW	آبرفتهای سری A
۱/۸۵-۲/۱۰	متراکم	GC, GP	آبرفتهای سری B
۲/۱۰-۲/۱	بسیار متراکم	GW, GP	آبرفتهای سری C
۱/۷-۱/۹	کم تراکم تا متراکم	GP	آبرفتهای سری D



شکل ۱: نقشه زمین شناسی گستره تهران.



شکل ۲: توزیع مکانی اطلاعات ژئوتکنیکی جمع آوری شده و گمانه های حفاری شده.

محققان مختلف روابط تجربی متعددی را بین اعداد SPT و V_s پیشنهاد کرده‌اند ولیکن از آنجا که شرایط محلی خاک تاثیر فراوانی بر روابط میان V_s و SPT بر جای می‌گذارد، بکار بردن روابط موجود برای خاکهای تهران خالی از اشکال نخواهد بود. مطالعات جعفری و همکاران ([۱] و [۲]) نزدیکی داده‌های تهران با جداول پیشنهادی ایشیهارا و همکاران [۹] برای منطقه بالکان را نشان می‌داد که این موضوع در مطالعات اخیر نیز تایید گردید. لذا جداول یاد شده با توجه به مجموعه اطلاعات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی در دسترس، اصلاح و مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۲).

نقشه‌های هم عمق و نقشه‌های هم سرعت

موج برشی

یکی از پارامترهای اساسی جهت تعیین طیف پاسخ طراحی، طبقه‌بندی نوع زمین می‌باشد. در اغلب آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای موجود از جمله استاندارد ۲۸۰۰ و UBC(۱۹۹۷)، سرعت موج برشی متوسط لایه‌های خاک مبنای طبقه‌بندی نوع زمین قرار می‌گیرد. آئین‌نامه ۲۸۰۰ در جدول (۲) بند ۲-۴-۴، طبقه‌بندی نوع زمین را بر اساس \bar{V}_s ارائه داده است. طبق تعریف، \bar{V}_s سرعت موج برشی متوسط با لحاظ نمودن اثر ضخامت لایه‌ها در فاصله ۳۰ متری از سطح زمین می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum d_i}{\sum (d_i/V_{si})}$$

(۱)

در اختیار داشتن پروفیل توزیع سرعت موج برشی در اعماق مختلف و نیز تعیین عمق سنگ کف لرزه‌ای گام مهم و اساسی جهت تحلیل پاسخ لرزه‌ای آبرفت در گستره مطالعات محسوب می‌شود. بر اساس اطلاعات حاصل از آزمایشات لرزه‌نگاری انکساری و درون چاهی سطح به عمق در گمانه‌های حفاری شده، اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده و نیز برشهای زمین‌شناسی و پروفیل‌های تیپ تعیین شده و تلفیق نتایج حاصل از آنها، نقشه‌های هم سرعت برای اعماق (۵-۰) متر، (۱۰-۵) متر، (۲۰-۱۰) متر، ۲۰ متر به پایین و نقشه توزیع سرعت موج برشی

در این مطالعات به منظور برآورد سرعت امواج لایه‌های خاک از روشهای سطحی انکساری (مجموعاً ۹۵ آزمایش) و درون‌چاهی سطح به گمانه (مجموعاً ۹ گمانه) استفاده شده است. موقعیت مکانی این آزمایشات در شکل (۳) ارائه شده است.

همچنین خاطر نشان می‌سازد بعنوان یک تحقیق محلی و به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد و همبستگی بین روشهای مختلف تعیین سرعت موج برشی در عملیات صحرایی، در سه نقطه آزمایشات لرزه نگاری از طریق تحلیل طیفی امواج سطحی (SASW) نیز انجام و داده‌های حاصله پردازش شده و نتایج بدست آمده با آزمایشات لرزه‌نگاری انکساری و درون چاهی سطح به گمانه در همان نقطه مقایسه گردیده است. موقعیت مکانی این سه محل نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.

رده بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای آبرفتها

طبقه‌بندی خاکهای مختلف گستره مورد مطالعه بر اساس بافت غالب و سرعت موج برشی، از مهمترین پیش نیازهای تهیه پروفیل‌های نماینده ژئوتکنیک لرزه‌ای محسوب می‌شود. مدول برشی یا سرعت موج برشی لایه‌های خاک یکی از مهمترین پارامترهای مورد نیاز جهت تحلیل دینامیکی آبرفت است. مدول برشی خاک معمولاً با استفاده از سرعت موج برشی و دانسیته جرمی خاک محاسبه می‌شود.

تا به امروز تحقیقات گسترده‌ای توسط محققان جهت پیدا کردن رابطه‌ای بین سرعت موج برشی و مدول برشی و سایر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است این دو پارامتر شدیداً به یکدیگر وابسته هستند. روابطی که بر اساس تحقیقات صحرایی برای سرعت موج برشی ارائه شده است، بعلاوه پراکندگی نتایج و محدودیت دسترسی به پارامترهای دقیق خاک تقریبی هستند. از آنجایی که روشهای آزمایشگاهی و صحرایی مبتنی بر اندازه‌گیری مدول یا سرعت موج برشی، پرهزینه است، محققین همواره به دنبال روشهایی بوده‌اند تا بتوانند سرعت موج برشی را به صورت غیر مستقیم بدست آورند. یکی از این روشها برآورد سرعت موج برشی بر اساس نتایج آزمون نفوذ استاندارد (SPT) است.

جدول ۲: طبقه بندی خاکهای تهران بر اساس سرعت موج برشی.

خاکهای چسبنده					
C_5	C_4	C_3	C_2	C_1	رده خاک
>600	۴۰۰-۶۰۰	۲۵۰-۴۰۰	۱۲۰-۱۵۰	<120	محدوده سرعت موج برشی (V_s)
>50	۳۰-۵۰	۱۶-۳۰	۸-۱۶	<8	محدوده SPT
خاکهای غیر چسبنده					
N_4	N_3	N_2	N_1	رده خاک	
>700	۴۰۰-۷۰۰	۲۰۰-۴۰۰	>200	محدوده سرعت موج برشی (V_s)	
>50	۳۰-۵۰	۱۰-۳۰	<10	محدوده SPT	

در تعیین این همبستگی از تعداد محدودی آزمایش و عبارتی اطلاعات اندکی استفاده گردیده و از سوی دیگر از تجهیزات کامل، روش دقیق آزمایش SPT و استاندارد یکسانی نیز استفاده نشده بود لذا غالباً از اعتبار و دقت پایینی برخوردار بودند. امروزه آزمایش SPT در کشورهای مختلف، استانداردهای گوناگونی دارد و بنابراین رابطه تجربی پیشنهاد شده برای یک کشور یا منطقه ممکن است برای کشور و منطقه‌ای دیگر، اعتبار کمتری داشته باشد و به همین دلیل توصیه می‌شود که از عدد SPT اصلاح شده (بر اساس انرژی چکش) به منظور یکسان نمودن منبع تولید موج استفاده شود. همچنین در بدست آوردن روابط جدیدتر، از نتایج دقیق‌تر و تعداد آزمایشات بیشتر جهت اندازه‌گیری V_s و SPT استفاده می‌گردد. از جمله آزمایشات دقیق‌تر اندازه‌گیری سرعت موج برشی می‌توان به روشهای درون‌چاهی و یا تحلیل طیفی امواج سطحی (SASW) اشاره کرد. جدول (۳) تعدادی از روابط موجود را برای خاکهای مختلف نشان می‌دهد

روابط پیشنهادی تجربی بین V_s و عدد SPT برای منطقه جنوب تهران

در این مرحله از مطالعات و در جنوب منطقه مطالعاتی داده‌های ۵۷ پروفیل لرزه‌نگاری به روش انکساری در اختیار می‌باشد که ۲۰ مورد آن در قالب پروژه ریزپهنه‌بندی تکمیلی و ۳۷ مورد آن در قالب پروژه‌های قبلی ریزپهنه‌بندی جنوب غربی و جنوب شرقی تهران انجام شده است. همانگونه که در مطالعات قبلی هم توسط جعفری و همکاران ([۱] و [۲]) نتیجه‌گیری شده بود با بررسی و مقایسه سرعتهای موج برشی حاصله از آزمایشات لرزه‌نگاری و اعداد SPT بدست آمده از لوگ گمانه‌های حفاری شده در مطالعات تکمیلی و یا اطلاعات جمع‌آوری

متوسط ۳۰ متر اول بر اساس رابطه مندرج در آیین نامه ۲۸۰۰ تهیه شده‌اند.

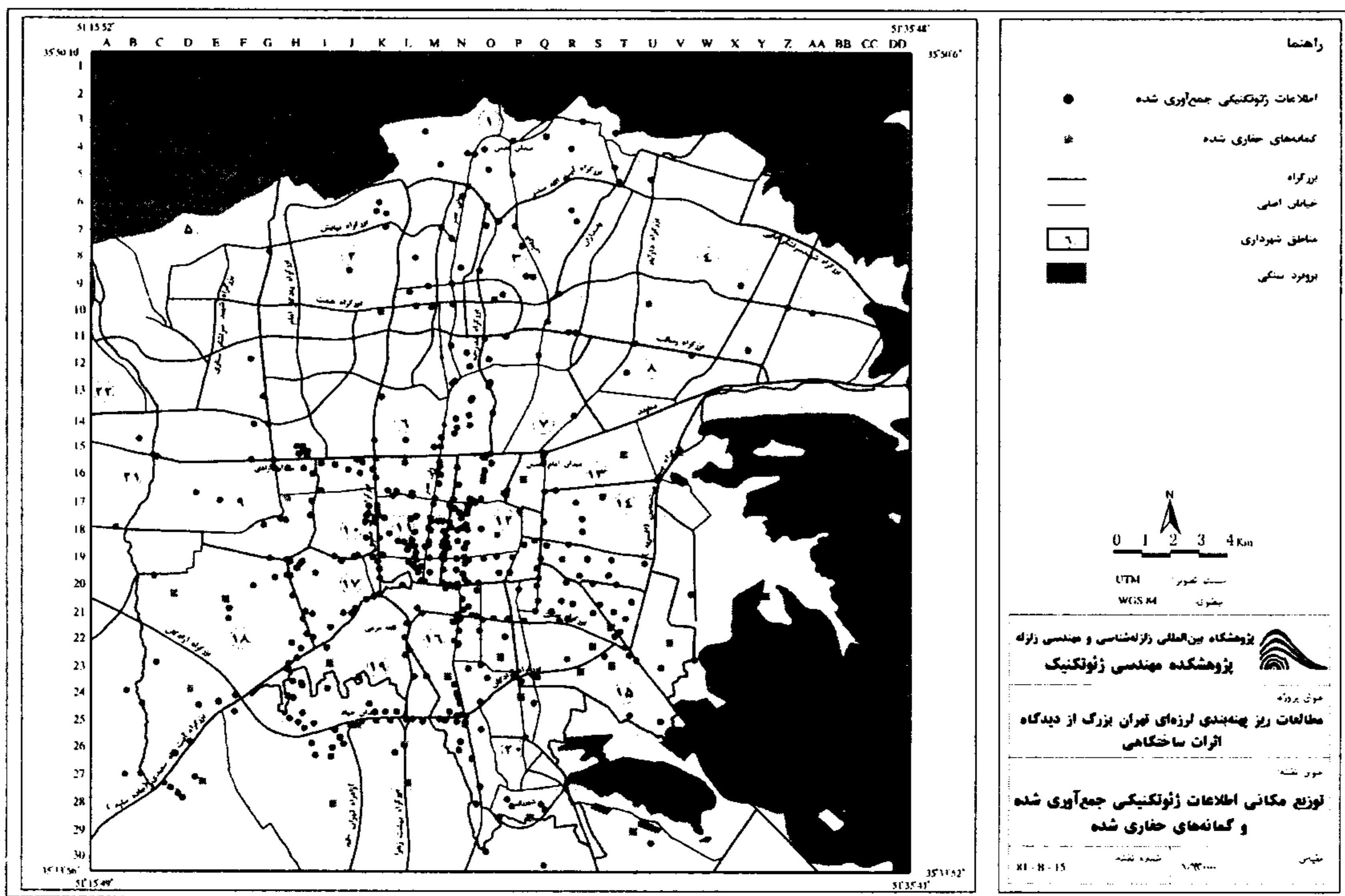
همچنین با استفاده از این داده‌ها نقشه‌های هم‌عمق برای سرعتهای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ متر بر ثانیه و نیز نقشه توزیع عمق سنگ کف لرزه‌ای برای گستره تهران بدست آمده است. اشکال (۴) و (۵) نمونه‌ای از این نقشه‌ها را نشان می‌دهد.

همبستگی بین سرعت موج برشی V_s و عدد SPT

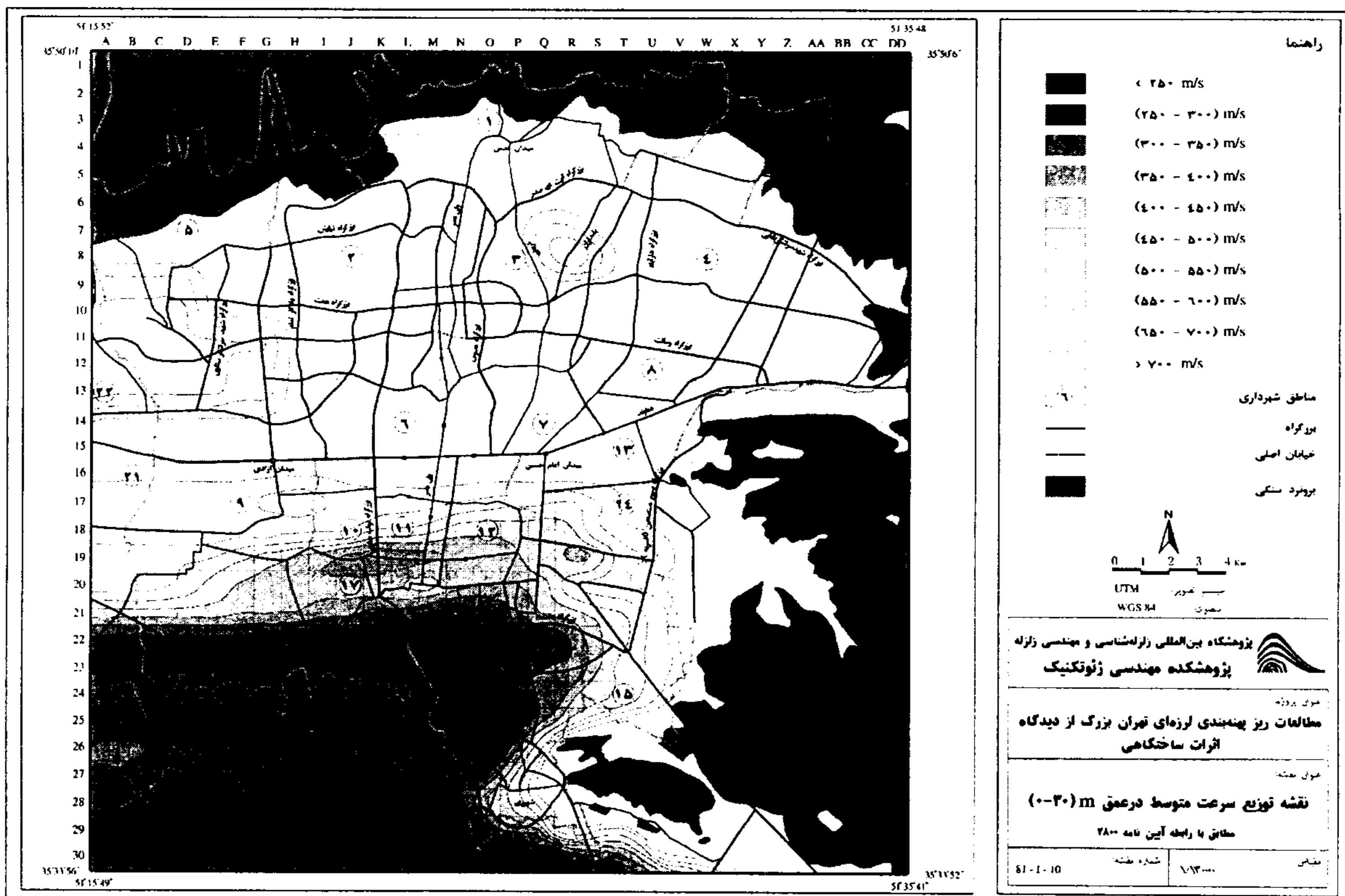
همانگونه که قبلاً اشاره گردید یکی از پارامترهای مهم برای تعیین پاسخ لرزه‌ای خاک، مدول برشی یا سرعت موج برشی لایه‌های خاک است. تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش معمولاً طی آزمایشهای دینامیکی ستون تشدید و سه محوری بر روی نمونه‌های دست‌نخورده در آزمایشگاه بدست می‌آید ولی در عین حال و بصورت غیرمستقیم می‌توان مقدار آن را با داشتن سرعت موج برشی نیز محاسبه نمود. اگر مدول برشی از روی سرعت موج برشی محاسبه شده باشد باید در نظر داشته باشیم مدول برشی در کرنشهای کمتر از 10^{-3} درصد، در واقع مدول برشی حداکثر (G_{max}) خاک قلمداد می‌شود و چون در آزمایشات لرزه‌ای صحرایی، مقادیر کرنشهای برشی ایجاد شده کمتر از مقدار مذکور هستند بنابراین مدول حاصله از طریق نتایج آن نیز معادل (G_{max}) خواهد بود.

روابط تجربی موجود بین V_s و عدد SPT

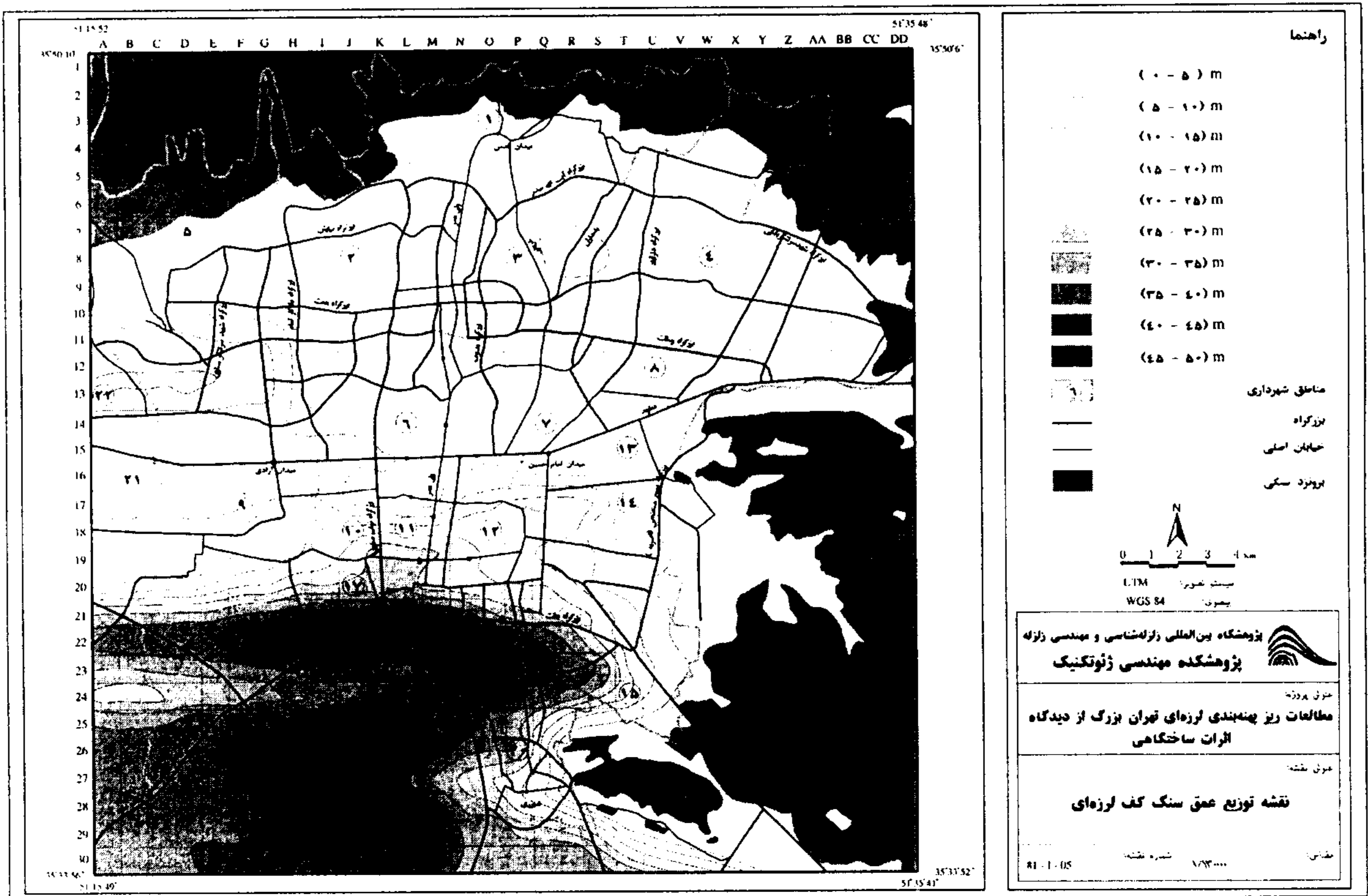
محققان مختلف و علی‌الخصوص ژاپنی‌ها تا دهه هفتاد میلادی روابط تجربی مختلفی را بین عدد SPT (N) و سرعت موج برشی (V_s) پیشنهاد نمودند ولی از آنجاییکه



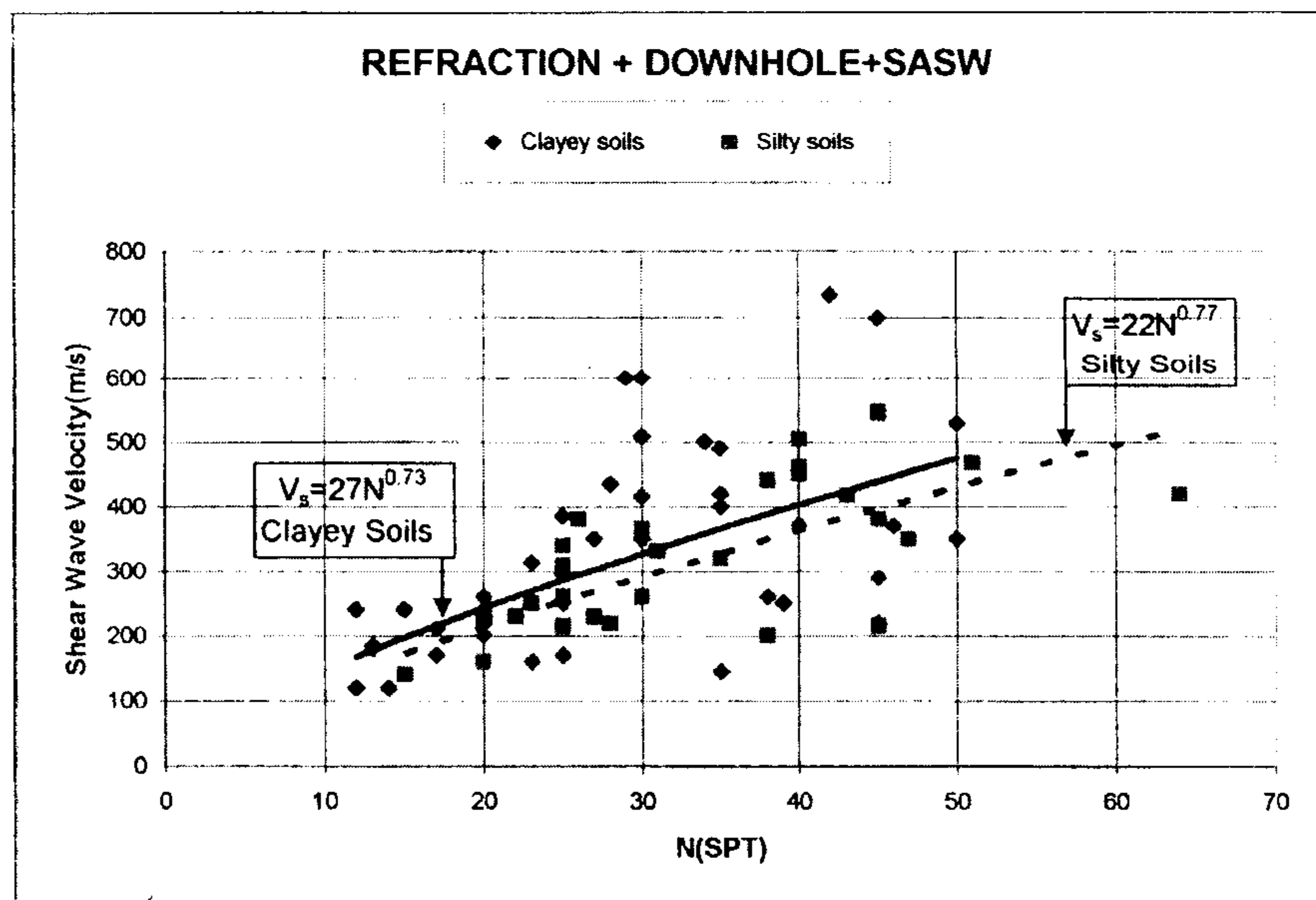
شکل ۳: توزیع مکانی محل انجام کاوشهای ژئوفیزیکی.



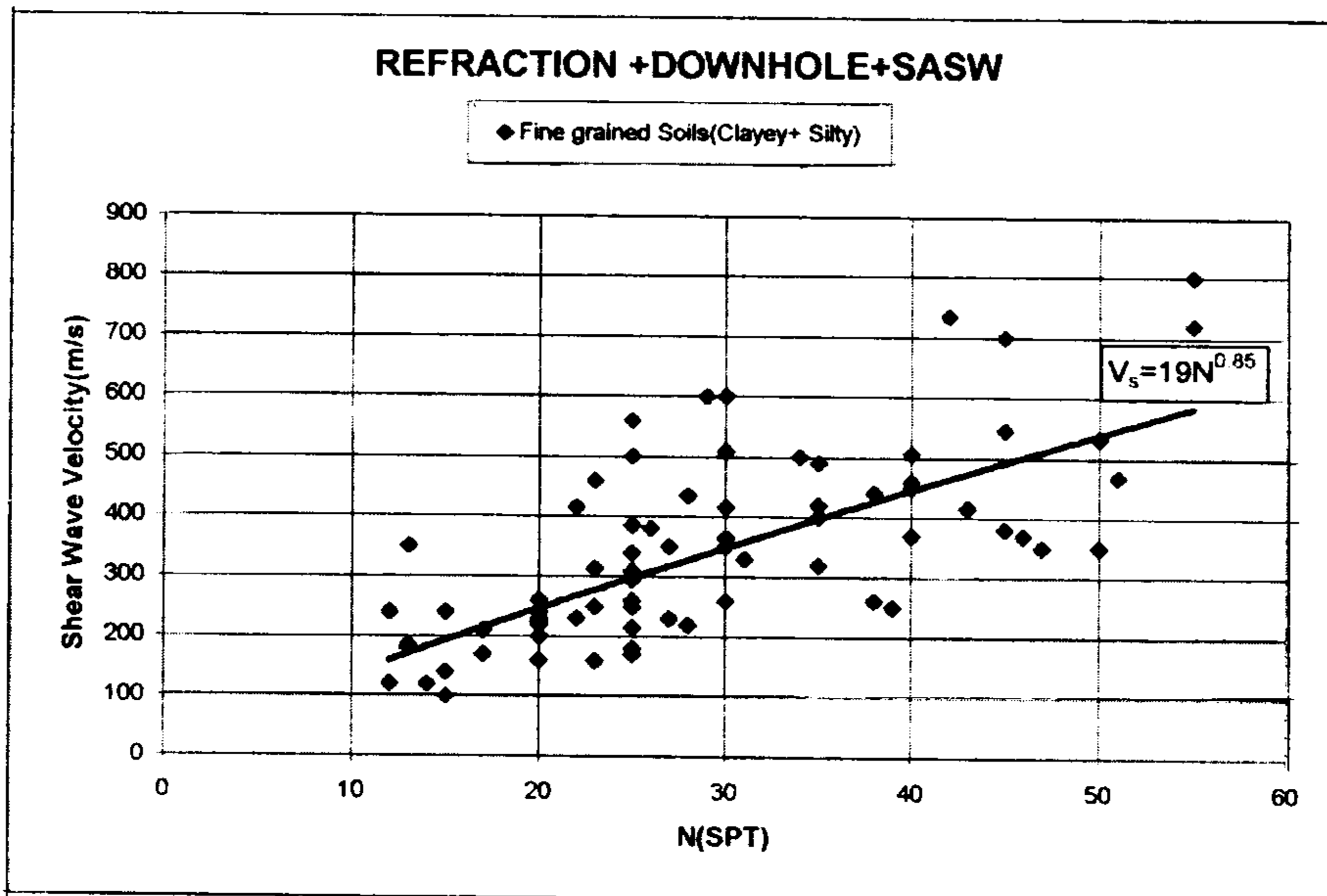
شکل ۴: نقشه توزیع سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر اول براساس رابطه مندرج در آیین نامه ۲۸۰۰.



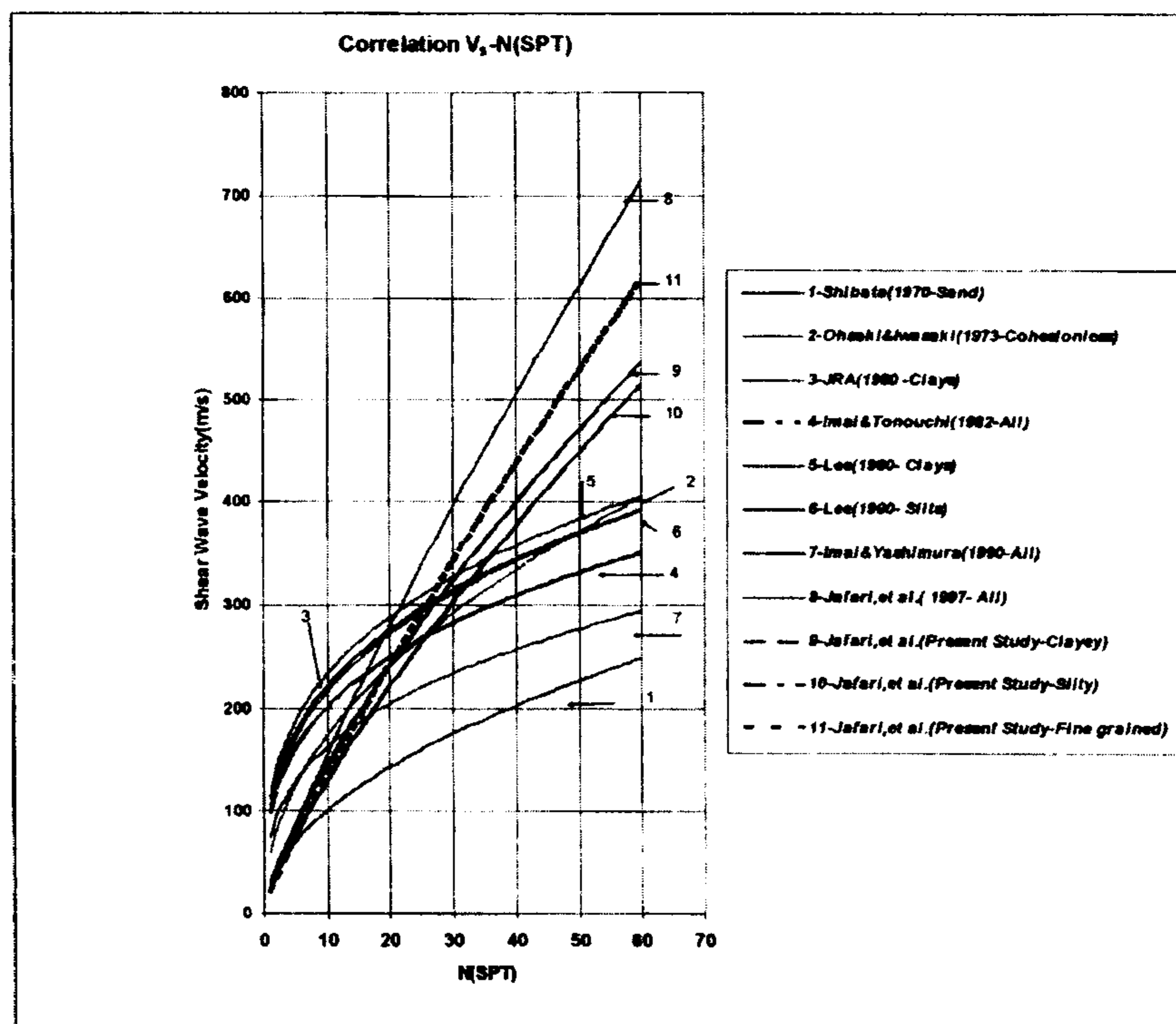
شکل ۵: نقشه توزیع عمق سنگ کف لرزه ای برای گستره تهران.



شکل ۶: همبستگی بین V_s و $N(SPT)$ برای خاکهای رسی و سیلتی.



شکل ۷: همبستگی بین Vs و N(SPT) برای خاکهای ریزدانه .



شکل ۸: مقایسه بین روابط پیشنهادی برای همبستگی بین Vs و N(SPT).

جدول ۳: برخی روابط تجربی موجود بین عدد SPT (N) و سرعت موج برشی (V_s) [۳].

پیشنهاد دهنده	نوع خاک	V_s (m/s)
Kanai, et al (1966)	All	$V_s = 19 N^{0.6}$
Shibata (1970)	Sand	$V_s = 32 N^{0.5}$
Ohba & Toriuma (1970)	Alluvial	$V_s = 85 N^{0.31}$
Ohta, et al (1972)	Sand	$V_s = 87 N^{0.36}$
Ohsaki & Iwasaki (1973)	All	$V_s = 82 N^{0.39}$
Ohsaki & Iwasaki (1973)	Cohesionless	$V_s = 59 N^{0.47}$
Imai & Yoshimura (1975)	All	$V_s = 92 N^{0.329}$
Imai, et al (1975)	All	$V_s = 90 N^{0.341}$
Imai (1977)	All	$V_s = 91 N^{0.337}$
Ohta & Goto (1978)	All	$V_s = 85 N^{0.348}$
Ohta & Goto (1978)	Sands	$V_s = 88 N^{0.34}$
Ohta & Goto (1978)	Gravels	$V_s = 94 N^{0.34}$
JRA (1980)	Clays	$V_s = 100 N^{1/3}$
JRA (1980)	Sands	$V_s = 80 N^{1/3}$
Seed & Idriss (1981)	All	$V_s = 61 N^{0.5}$
Imai & Tonouchi (1990)	All	$V_s = 97 N^{0.314}$
Seed, et al (1983)	Sands	$V_s = 56 N^{0.5}$
Sykora & Stokoe (1983)	Granular	$V_s = 100 N^{0.29}$
Okamoto, et al (1989)	Dilluvial Sands	$V_s = 125 N^{0.3}$
Lee (1990)	Sands	$V_s = 57 N^{0.49}$
Lee (1990)	Clays	$V_s = 114 N^{0.31}$
Lee (1990)	Silts	$V_s = 106 N^{0.32}$
Imai & Yoshimura (1975)	All	$V_s = 76 N^{0.33}$
Yokota, et al (1991)	All	$V_s = 121 N^{0.27}$
Jafari, et al (1997)	All	$V_s = 22 N^{0.85}$

جمع‌آوری اطلاعات، تدقیق رابطه قبلی پیشنهادی توسط جعفری و همکاران [۵] برای انواع خاکهای ریزدانه در دستور کار قرار گرفت.

در این راستا و در صورتیکه از یک تحلیل رگرسیون خطی ساده بر روی بانک اطلاعاتی موجود استفاده شود روابط زیر در سه دسته بین سرعت موج برشی و عدد SPT پیشنهاد می‌شوند:

$$V_s = 27N^{0.73}$$

خاکهای رسی

(۲)

شده در نزدیکی محل آزمایش لرزه‌نگاری، ملاحظه می‌گردد که روابط تجربی موجود از اعتبار و دقت مناسبی جهت برآورد رابطه بین سرعت موج برشی و عدد آزمون نفوذ استاندارد در ناحیه جنوب تهران برخوردار نیستند. این روابط بطور کلی و به ازای عدد SPT معینی، مقدار سرعت موج برشی را کمتر از آنچه که از آزمایشات لرزه‌نگاری تعیین می‌شود، نتیجه می‌دهند. لذا با توجه به حجم اطلاعات موجود از نظر تعداد آزمایشات لرزه‌نگاری و نیز اطلاعات ژئوتکنیکی بدست آمده از طریق حفاری و

داده‌های نشان داده شده در شکل‌های (۶) و (۷) بایستی اظهار داشت عامل اصلی، روش‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت موج برشی بوده است. پروفیل‌های درون‌چاهی در واقع نمایانگر اندازه‌گیری نقطه‌ای از مشخصات خاک زیر سطحی هستند در حالیکه این مشخصات در روش‌های انکساری سطحی و SASW در امتداد یک مسافت افقی، میانگین‌گیری می‌شوند.

نتیجه‌گیری

نقشه‌های هم سرعت موج برشی و نقشه‌های هم عمق برای سرعت‌های موج برشی مختلف آبرفت‌های گستره تهران تهیه و ارائه شده است از این نقشه‌ها می‌توان برای طبقه‌بندی ساختگاه و نیز تحلیل پاسخ لرزه‌ای آبرفت در گستره تهران با توجه به دقت مورد انتظار در مطالعات ریز پهنه بندی و نیز برد نتایج حاصل و حدود کاربرد آن استفاده نمود. همچنین براساس تلفیق نتایج حاصل از کاوش‌های ژئوفیزیکی و اطلاعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده و طبقه‌بندی جدیدی برای خاک‌های تهران براساس سرعت موج برشی و عدد آزمون نفوذ استاندارد پیشنهاد شده است. از دیگر یافته‌های این مطالعات می‌توان به رابطه همبستگی جدید ارائه شده بین سرعت موج برشی و عدد آزمون نفوذ استاندارد برای خاک‌های ریزدانه جنوب تهران اشاره داشت که نسبت به رابطه قبلی ارائه شده برای کل خاک‌های تهران، از دقت بیشتری برخوردار بوده و می‌تواند براساس داده‌های SPT در هر نقطه برای خاک‌های مورد نظر V_s متناسب را برآورد نماید.

$$V_s = 22 N^{0.77} \quad \text{خاک‌های سیلتی} \quad (۳)$$

$$V_s = 19 N^{0.85} \quad \text{خاک‌های ریزدانه (رسی + سیلتی)} \quad (۴)$$

در این روابط N عدد SPT اصلاح نشده و V_s سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد [۱۰]. اشکال (۶) و (۷) همبستگی بین V_s و مقدار N را برای تمام اطلاعات موجود نشان می‌دهند. همچنین در شکل (۸) تمامی روابط پیشنهادی در این مطالعات به‌همراه سایر روابط قابل مقایسه ارائه شده است.

مقایسه روابط موجود و رابطه بدست آمده

مقایسه روابط موجود با همدیگر علی‌الخصوص برای مقادیر SPT بزرگتر از ۳۰ نشان می‌دهد که اختلاف آنها در ارزیابی V_s حتی به ۱۰۰ درصد نیز می‌رسد ولی همانگونه که در شکل (۸) نیز نشان داده شده است روابط جدید پیشنهادی نسبت به رابطه قدیمی پیشنهادی توسط جعفری و همکاران [۵] به سایر روابط موجود نزدیکتر هستند. در این ارتباط لازم به ذکر است که حتی در صورت تفکیک داده‌های موجود به محدوده‌های بالاتر و پایین‌تر از عدد SPT مشخص (بطور مثال $N=30$) نیز تفاوت قابل ملاحظه و معنی داری در توان N نسبت به مقادیر فعلی حاصل نمی‌شود. تعداد داده‌های پردازش شده (در قیاس با سایر روابط)، روند انجام آزمایش SPT، شرایط ویژه ژئوتکنیکی منطقه مطالعاتی، تاریخچه زمین‌شناسی، شرایط پیش‌تحکیمی و نوسانات سطح آب زیرزمینی از عوامل موثر تعیین رابطه همبستگی بین V_s و SPT محسوب می‌شوند. همچنین در ارتباط با پراکندگی

مراجع

- ۱ - جعفری، م. ک. و اصغری، ا. "ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای جنوب غربی تهران از دیدگاه تاثیرات ساختگاهی". پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، (۱۳۷۶).
- ۲ - جعفری، م. ک. و همکاران. "ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای جنوب شرقی تهران از دیدگاه تاثیرات ساختگاهی". پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، (۱۳۷۷).
- ۳ - جعفری، م. ک. و همکاران. "مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای جنوب تهران. طرح ملی تحقیقات". پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، (۱۳۸۰).
- ۴ - جعفری، م. ک. و همکاران. "مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شمال تهران از دیدگاه اثرات ساختگاهی". طرح ملی تحقیقات، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، (۱۳۸۰).

- ۵ - جعفری، م. ک. و همکاران. "رابطه تجربی بین سرعت موج برشی و تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد برای خاکهای جنوب تهران." مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (۱۳۷۶).
- ۶ - بربریان، م. و همکاران. "پژوهش و بررسی ژرف نو زمین ساخت، خطر زمین لرزه، گسلش در گستره تهران و پیرامون. سازمان زمین شناسی کشور." گزارش شماره ۵۶، (۱۳۷۱).
- 7 - Abbassi, M. R. and Shabanian-b, E. (1999). "Evolution of the stress field in Tehran region during the Quaternary." *Proc., SEE4*, Tehran, IRAN, PP. 67-84.
- ۸ - جعفری، م. ک. و کشاورز بخشایش، م. "بررسی ویژگیهای زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی آبرفتهای تهران." مجموعه مقالات دومین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران، ایران، (۱۳۸۰).
- 9 - Ishihara, K. and Ansal, A. M. (1982). "Dynamic behavior of Soil, Soil amplification and soil - structure interaction." *Final Report for Working Group D, UNDP /UNESCO Project on Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region.*
- 10 - 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*, Vol. 4, No.1, PP. 25-37.

واژه های فارسی انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Non-Cohesive
2 - Cohesive

