

طبقه‌بندی ساختگاه بر مبنای فرکانس طبیعی مبتنی بر داده‌های لرزه‌ای برای طراحی ساختمان‌ها، مطالعه موردی شهر اردکان

احمد ادیب*

دانشیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۶/۲، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

در بیشتر طبقه‌بندی‌های زمین که بر اساس نتایج تحلیل ساختگاه، ارائه شده است، سرعت موج برشی و پریرود طبیعی زمین، پارامتر اصلی طبقه‌بندی است. در تدوین آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، طبقه‌بندی انواع زمین، باید تابع شرایط زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی و بررسی‌های آزمایشگاهی و صحرایی باشد. در این مقاله، ضمن شناسایی ویژگی‌های دینامیکی زمین در گستره شهر اردکان، سطح سازگاری طبقه‌بندی زمین متناسب با مطالعات اثر ساختگاه بر مبنای داده‌های ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی و خردلرزه‌ها با آیین‌نامه‌های طراحی دینامیکی ساختمان‌ها نشان داده می‌شود. در ایران آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران برای نوع زمین ارائه شده که فقط در طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران از پریرود طبیعی زمین استفاده شده است. در گستره شهر اردکان برای بهبود طبقه‌بندی زمین، علاوه بر اطلاعات سرعت موج برشی و پروفیل خاک در ۵ گمانه، داده‌های میکروترموری در ۱۰۰ نقطه ثبت و بر اساس روش H/V ناکامورا (۱۹۸۹، ۲۰۰۰) تحلیل شد و فرکانس‌های طبیعی به دست آمده در نقاط منطبق بر گمانه‌ها با فرکانس طبیعی پروفیل خاک به روش تحلیل یک‌بعدی خطی معادل مقایسه شد. با توجه به ویژگی ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی، نتایج تحلیل ساختگاه و فرکانس طبیعی زمین حاصل از داده‌های میکروترمورها در محل گمانه‌ها، نوع زمین تعیین شد که به تغییراتی در طبقه‌بندی نوع زمین مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران انجامید. این تغییرات، تعیین شرایط زمین در محل و استفاده بهتر از این آیین‌نامه را باعث خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: اردکان، تحلیل ساختگاه، طبقه‌بندی زمین، فرکانس طبیعی، میکروترمور.

۱. مقدمه

لایه‌های آبرفت و سنگ بستر در شهر قم را محاسبه و نتایج را با بزرگ‌نمایی حاصل از داده‌های خردلرزه مقایسه کرده‌اند. در همه مدل‌های سرعت، بزرگ‌نمایی مشخصی در محدوده بسامدهای کمتر از ۱ هرتز به دست آمده است. علاوه بر این بین بسامد بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های عددی یک‌بعدی در وضعیت مدل سرعت موج برشی زیاد و بسامد بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های تجربی پیشین سازگاری بسیار مناسبی مشاهده می‌شود. وجود بزرگ‌نمایی در این محدوده بسامدی و سازگاری نسبی آن با نتایج تحقیقات خردلرزه، حاکی از اثرگذاری آبرفت‌های عمیق در تابع‌های بزرگ‌نمایی ساختگاه است و این مسئله ضرورت توجه به وضعیت شکل حوضه رسوبی با در نظر گرفتن تأثیرات آبرفت‌های عمیق در بررسی آثار ساختگاهی به روش عددی را نشان داد. هدف از تحلیل پاسخ ساختگاه (Site response analysis)، طراحی

در ژئوتکنیک لرزه‌ای، ارزیابی انتشار امواج و تغییرات آن از روی سنگ کف لرزه‌ای به سطح زمین، برای تعیین تأثیر حرکت سنگ بستر روی پروفیل خاک و تهیه نقشه تغییرات فرکانس و ضریب تشدید بر روی سطح استفاده می‌شود (دبری و همکاران، ۱۹۸۷). در انتشار امواج لرزه‌ای از سنگ کف تا سطح زمین، محتوای موج لرزه‌ای شامل دامنه و فرکانس آن تغییر می‌یابد (گمبرگ و همکاران، ۲۰۰۳). نهشته‌های رسوبی نرم، فرکانس‌های خاصی از حرکات زمین را تقویت می‌کنند و باعث می‌شوند تا ضمن تأثیر بر رفتار دینامیکی خاک، آثار مخرب زلزله بیشتر شود (ایشی باشی، ۱۹۹۲؛ سید و همکاران، ۱۹۸۶). پاسخ نهشته‌های رسوبی به فرکانس حرکت سنگ کف به پروفیل لایه خاک بالای سنگ بستر و ویژگی ژئوتکنیکی آن بستگی دارد.

سهرابی بیدار و جاسم‌پور (۱۳۹۲)، منحنی‌های بزرگ‌نمایی به ازای ویژگی‌های دینامیکی متفاوت

اصولی تر سازه‌ها و تأمین ایمنی مورد نیاز برای ساکنان یا بهره‌وری بیشتر است و یکی از ارکان اصلی آن، شناسایی خصوصیات دینامیکی لایه‌های تشکیل دهنده ساختگاه است (هاشمی طباطبایی و محمدی، ۱۳۸۷).

آیین‌نامه‌های مختلف به منظور کاربردی کردن تحقیقات و سهولت محاسبات با تحلیل پاسخ ساختگاه نسبت به انواع زمین، تمهیداتی برای در نظر گرفتن این تأثیرات ارائه کرده‌اند. در آیین‌نامه‌ها، بر اساس پارامترهای مکانیکی و دینامیکی خاک، انواع زمین طبقه‌بندی (Soil classification) شده است. آیین‌نامه‌های معتبری همانند آیین‌نامه اروپا (Euro code) (۲۰۰۴، CEN) (members are bound to comply with the Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration.) و آمریکا (۲۰۰۶، ICC) (International Code Council) با طبقه‌بندی انواع زمین و اعمال تأثیر آن‌ها در طیف‌های طراحی، در راستای نیل به اهداف یاد شده گام برداشته‌اند. در این دو آیین‌نامه، علاوه بر زمین‌های متعارف، رده‌هایی برای زمین‌های سست و دارای شرایط خاص نظیر روانگرایی و رمبندگی در نظر گرفته شده است.

روش‌های مختلف برآورد مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در حالت دینامیکی و مشخصات و نقشه‌شدید، روانگرایی و خطرات زمین‌لغزش در مقیاس مختلف در ایالت متحده آمریکا توسط استریت و همکاران (۱۹۹۷ و ۲۰۰۱)، بایور و همکاران (۲۰۰۱)، بورغتون و همکاران (۲۰۰۱)، ریکس و همکاران (۲۰۰۱)، کرامر (۲۰۰۳) و کرامر و همکاران (۲۰۰۴ و ۲۰۰۶) استفاده شده است.

سرعت موج برشی، دانسیته، فرکانس، پیوند طبیعی و ضخامت لایه‌های خاک، مشخص‌کننده سخت یا سست بودن زمین یک منطقه است. بر اساس این ویژگی‌ها به‌ویژه سرعت موج برشی و پیوند طبیعی، طبقه‌بندی‌های مختلفی صورت گرفته است. در طبقه‌بندی‌های اولیه مانند UBC, 1979 (Uniform Building Code). در طبقه‌بندی‌های اخیر میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی خاک V_s^{30} به عنوان پارامتر اصلی استفاده شده است (۱۹۷۹، یو بی سی). در طبقه‌بندی سید و همکاران (۱۹۹۱) علاوه بر پارامتر V_s^{30} از

عمق سنگ کف لرزه‌ای، جنس مصالح و شدت لرزش نیز به عنوان پارامترهای کمکی استفاده شده است. برای و آبرام سون (۱۹۹۹) از دو پارامتر اصلی پیوند ساختگاه و میانگین سرعت موج برشی و پارامترهای دیگری نظیر عمق نهشته‌ها و خصوصیات مقاومتی خاک نیز استفاده کرده‌اند. در ایران می‌توان به آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰، جدول ۱) و طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲)، (جدول ۲) اشاره کرد.

طبقه‌بندی زمین در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۸۴) بر اساس سه پارامتر زیر است:

۱. خصوصیات نهشته‌ها: جنس زمین و مقاومت آن معیار اصلی طبقه‌بندی در نظر گرفته شده است. در این طبقه‌بندی سنگ‌های سخت و مقاوم، سنگ‌های سست و سنگ‌های هوازده و همچنین خاک سخت، خاک با تراکم متوسط، خاک سست و خاک‌های پلاستیک از هم تفکیک شده‌اند. تقسیم‌بندی مقاومتی به صورت کیفی و توصیفی بوده و معیار فیزیکی برای آن مطرح نشده است.

۲. ضخامت خاک: در طبقه‌بندی مزبور نهشته‌های با ضخامت کمتر از ۳۰ متر و بیش از ۳۰ متر از هم تفکیک شده‌اند.

۳. میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی V_s^{30} به عنوان یک پارامتر کمکی استفاده شده است. بر اساس V_s^{30} ، چهار گروه خاک با سرعت کمتر از ۱۷۵، ۱۷۵-۳۷۵، ۳۷۵-۷۵۰ و بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه از هم تفکیک شده‌اند.

در طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) از فرکانس طبیعی ساختگاه به عنوان پارامتر اصلی و از خصوصیات دیگری مانند V_s^{30} ، جنس مصالح و شرایط زمین‌شناسی به عنوان پارامتر کمکی برای طبقه‌بندی استفاده شده است. (جدول ۲).

در آیین‌نامه اروپا (۲۰۰۴، سین) طبقه‌بندی خاک بر اساس توصیف لایه‌بندی خاک و میانگین یکی از سه پارامتر سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده از سطح تا عمق ۳۰ متری زمین صورت می‌گیرد (جدول ۳).

جدول ۱. طبقه‌بندی زمین در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ۱۳۸۴)

نوع زمین	توصیف نهشته‌ها	حدود تقریبی $V_s^{30} (m/s)$
I	(a) سنگ‌های آذرین (دارای بافت درشت و ریزدانه)، سنگ‌های رسوبی سخت و بسیار مقاوم و سنگ‌های دگرگونی توده‌ای (گنایس - سنگ‌های متبلور) - طبقات کنگلومرایی (b) خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت) با ضخامت کمتر از ۳۰ متر	بیش از ۷۵۰ $V_s \geq 375$
II	(a) سنگ‌های آذرین سست (مانند توف)، سنگ‌های سست رسوبی، سنگ‌های دگرگونی متورق و به‌طور کلی سنگ‌هایی که در اثر هوازدگی و تورق سست شده‌اند. (b) خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت) با ضخامت بیش از ۳۰ متر	$V_s \geq 375$ $V_s > 750$
III	(a) سنگ‌های متلاشی‌شده در اثر هوازدگی (b) خاک با تراکم متوسط، طبقات شن و ماسه با پیوند متوسط بین‌دانه‌ای و رس با سختی متوسط	$V_s \geq 175$ $V_s > 375$
IV	(a) نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد در اثر بالابودن سطح آب زیرزمینی (b) هرگونه نیم‌رخ خاک شامل حداقل ۶ متر خاک رس با اندیس خمیری بیشتر از ۲۰ درصد و رطوبت بیشتر از ۴۰ درصد	کمتر از ۱۷۵

جدول ۲. طبقه‌بندی زمین بر اساس نظر کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲)

رده	توصیف خاک	بسامد مینا (Hz)	$V_s^{30} (m/s)$	شرایط زمین‌شناسی
I	خاک سست	$< 2/5$	< 350	نهشته‌های رسی سست و ضخیم یا تناوب رس و سیلت و ماسه ریزدانه عمده تا دشت آبرفتی
IIa	خاک نسبتاً سفت	$2/5 - 5$	$350 - 550$	تناوب نهشته‌های ریزدانه و درشت‌دانه با سیمان‌شدگی متوسط
IIb	خاک سفت	$5 - 7/5$	$550 - 750$	تراس آبرفتی با نهشته‌های خوب سیمانی‌شده و مقاوم
III	خاک سخت، سنگ سست	$> 7/5$	> 750	نهشته‌های دامنه‌ای با ضخامت کم و مقاوم، کنگلومرای پلیستوسن

جدول ۳. طبقه‌بندی زمین بر اساس آیین‌نامه اروپا (CEN، ۲۰۰۴) با تغییرات

رده ساختمان	شرح لایه‌های خاک	پارامترها			رده ساختمان
		سرعت موج برشی، $\bar{V}_s$ m/s	عدد نفوذ استاندارد، $\bar{N}$ (blows/30cm)	مقاومت برشی زهکشی‌نشده، C_{II} (kPa)	
A	سنگ یا سایر سازندهای زمین‌شناسی شبه سنگ و شامل حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف‌تر در سطح	> 800	----	----	I
B	نهشته‌های ماسه‌ای بسیار متراکم و شن یا رس خیلی سخت با ضخامت حداقل چند ده متر که با افزایش عمق خواص مکانیکی آن افزایش می‌یابد	$360 - 800$	> 50	> 250	II
C	نهشته‌های عمیق ماسه متراکم یا نیمه‌متراکم، شن یا رس سخت با ضخامت چند ده متر تا صدها متر	$180 - 360$	$15 - 50$	$70 - 250$	III
D	نهشته‌های سست تا متوسط غیرچسبنده (یا با بدون برخی لایه‌های چسبنده) یا خاک‌های نرم تا سخت با چسبندگی غالب	< 180	< 15	< 70	IV
E	یروفل خاک با لایه سطحی دارای سرعت موج برشی رده‌های C یا D و ضخامت بین ۵ و ۲۰ متر	قرارگیری پروفیل خاک روی لایه سخت‌تری با $\bar{V}_s > 800$ m/s			
S ₁	نهشته‌های متشکل یا شامل یک لایه خاک با حداقل ۱۰ متر ضخامت از رس / سیلت نرم با $PI > 40$ و رطوبت بالا	< 100	-	$10 - 20$	
S ₂	نهشته‌های روانگرا، رس‌های حساس یا هر نوع خاکی که در گروه‌های قبلی A-E و S ₁ دسته‌بندی نشوند				

۲. روش مطالعه

برای تعیین ویژگی‌های ساختگاه، مانند تحلیل ساختگاه به صورت محاسباتی روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از معمول‌ترین آن‌ها، تحلیل یک‌بعدی با استفاده از روش خطی معادل است (میرحسینی و عارف‌پور، ۱۳۷۸). در این روش از پروفیل خاک محل شامل جنس لایه‌های خاک محل، ضخامت، دانسیته کل، سرعت موج برشی و عمق سنگ بستر لرزه‌ای برای تحلیل استفاده می‌شود. بر اساس این ویژگی‌ها می‌توان برای پروفیل خاک، پرپود و فرکانس طبیعی به دست آورد. ویژگی خاک و سنگ می‌تواند به وسیله روش‌های لرزه‌ای انعکاسی/ انکساری مشخص شود (گمبرگ و همکاران، ۲۰۰۳) از این روش برای تهیه نقشه توان تشدید در ناحیه کنتاکی آمریکا بر اساس داده‌های سرعت موج برشی استفاده شده است (استریت، ۱۹۹۷).

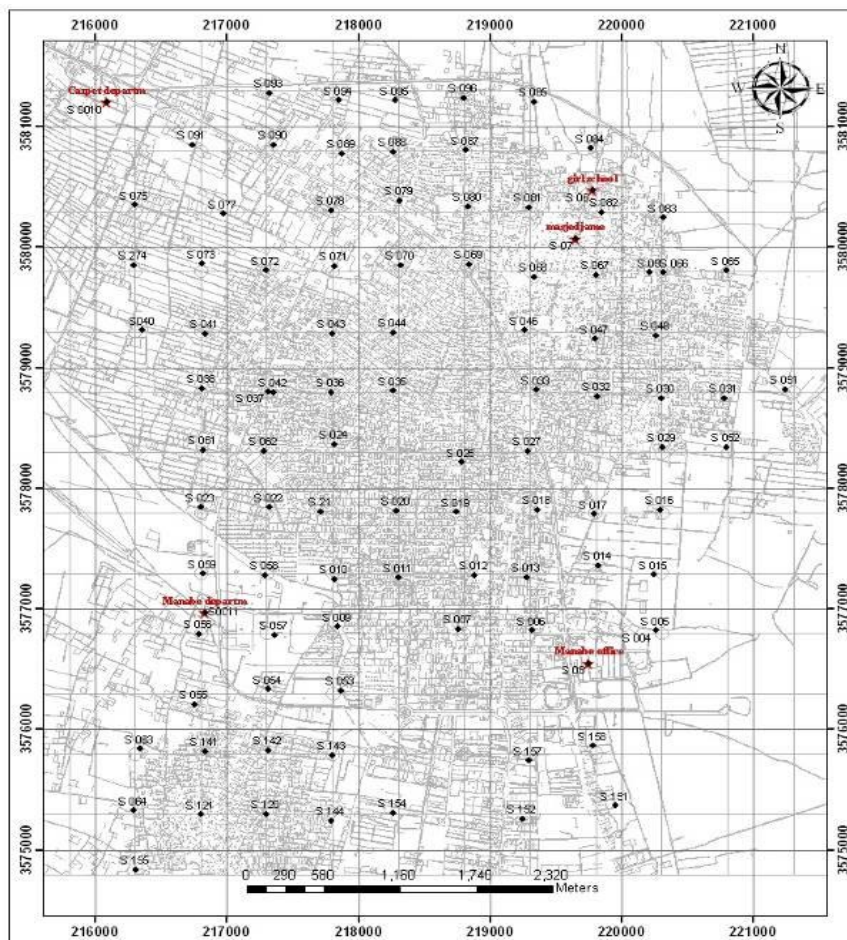
تحلیل خردلرزه‌ها (میکروترمورها) نیز امروزه کاربرد زیادی در تعیین ویژگی‌های ساختگاه و تحلیل‌های مهندسی پیدا کرده است. میکروترمورها ارتعاشات خفیف زمین با دامنه حدود ۱ تا ۱۰ میکرون هستند که همواره در زمین وجود دارند و منابع مولد آن‌ها می‌تواند عوامل طبیعی باشد. از آنجاکه در این ارتعاشات خفیف، تحت تأثیر شرایط خاک محل، تغییراتی صورت می‌گیرد که مبین مشخصه‌های خاک است، با اندازه‌گیری میکروترمورها در سطح زمین می‌توان اطلاعاتی درباره مشخصات ارتعاشی خاک محل به دست آورد. با روش‌های مختلفی می‌توان این ارتعاشات خفیف را تحلیل کرد؛ یکی از متداول‌ترین آن‌ها روش ناکامورا (Nakamura) است. در این روش بر اساس نسبت بین مؤلفه‌های افقی به قائم برداشت شده در هر نقطه، فرکانس طبیعی و بزرگ‌نمایی آن نقطه به دست می‌آید (ناکامورا، ۱۹۸۹).

با این تفاسیر با داشتن پروفیل خاک هر محل می‌توان از طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ یا بر اساس نتایج تحلیل میکروترمورها از طبقه‌بندی کمک‌پناه برای تعیین نوع زمین یک محل استفاده کرد. در شهر اردکان ۵ گمانه تا عمق ۴۲ متر حفر و در ۱۰۰ نقطه نیز داده‌های میکروترمورها برداشت شده است. اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی گمانه‌ها بر

اساس آزمایش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی مشخص شده است (ادیب، ۱۳۹۰). برای بهتر مشخص شدن مشخصات گمانه‌ها، نمودارهای عمقی تغییرات وزن واحد، سرعت موج برشی و مدول برشی هر پروفیل که توسط نرم‌افزار EERA (بارت و همکاران، ۲۰۰۰) ترسیم شده نیز در شکل‌های ۲ تا ۶ به نمایش در آمده است. بر اساس این پروفیل‌ها، نوع زمین با استفاده از طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ مشخص شد. همچنین برای هر پروفیل یک فرکانس و پرپود طبیعی به دست آمد که با استفاده از آن و بر اساس طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران، نوع زمین با این روش هم به دست آمد. به منظور تحلیل میکروترمورها در منطقه نیز ۱۰۰ نقطه انتخاب و داده‌ها برداشت شد. در شکل ۱ موقعیت گمانه‌ها و نقاط برداشت میکروترمورها که داده مناسبی برای تحلیل داشتند، مشخص شده است.

۳. ویژگی‌های ژئوتکنیکی سایت

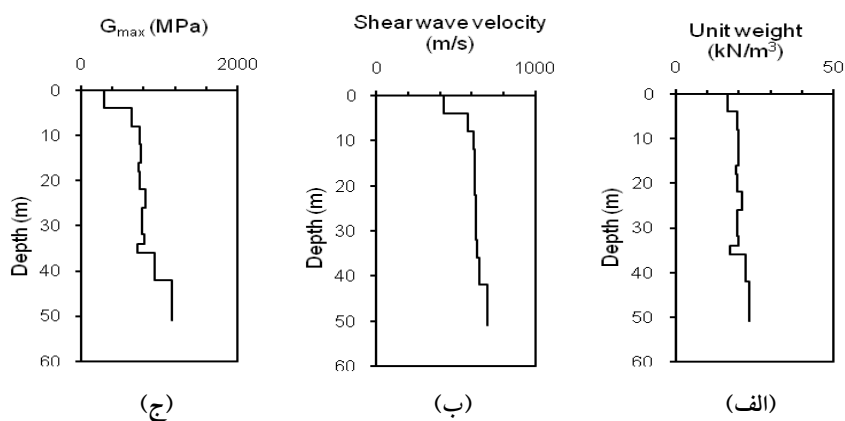
با توجه به داده‌های برداشت شده برای هر گمانه (جنس، دانسیته طبیعی و سرعت موج برشی) لایه‌های مختلفی تعریف شد. برای گمانه ۱، ۱۳ لایه تعریف شد که این لایه‌ها ماسه سیلتی و رس هستند. در مورد رس‌ها به دلیل شاخص‌های خمیری مختلف، رس میانگین و در مورد ماسه‌ها و ماسه‌های سیلتی، با وجود رس، جنس لایه ماسه میانگین در نظر گرفته شد (جدول ۴ و شکل ۲). برای گمانه ۲، ۱۰ لایه تعریف شد که ۹ لایه آن، رس و یک لایه (در عمق ۲۶ متری) به ضخامت ۴ متر، ماسه بوده است (جدول ۵ و شکل ۳). برای گمانه ۳، ۱۱ لایه تعریف شد که جنس همه آن‌ها رس میانگین (با شاخص‌های خمیری میانگین) در نظر گرفته شده است (جدول ۶ و شکل ۴). برای گمانه ۴ نیز، ۱۱ لایه تعریف شد که جنس همه آن‌ها رس بود و به دلیل شاخص خمیری‌های مختلف لایه‌ها، جنس آن‌ها رس میانگین در نظر گرفته شد (جدول ۷ و شکل ۵). در گمانه ۵ نیز ۹ لایه رسی و یک لایه ماسه‌ای (در عمق ۳۴-۳۰ متری) تعریف شده است (جدول ۸ و شکل ۶). در جدول‌های ۴ تا ۸ واحد سرعت موج برشی، cm/s و واحد دانسیته، gr/cm^3 است.



شکل ۱. موقعیت نقاط برداشت میکروترموور با دایره مشکی و گمانه‌ها با ستاره قرمز در گستره شهر اردکان

جدول ۴. لایه‌های تعریف‌شده برای گمانه یک در شهر اردکان

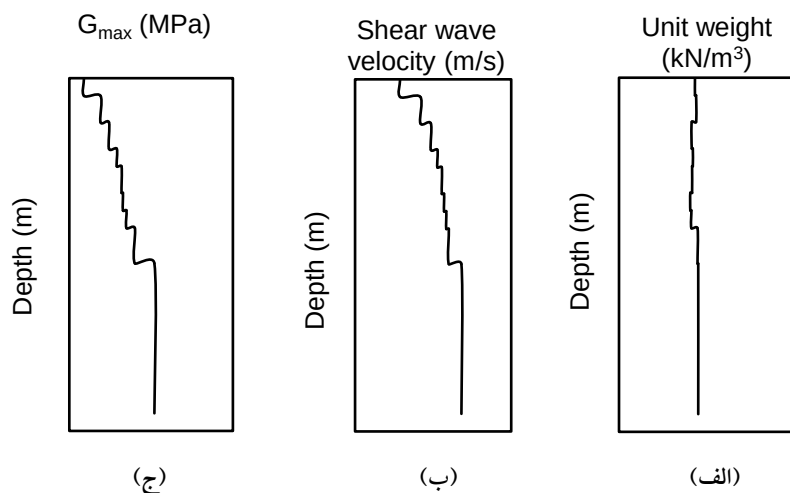
لایه	جنس	ضخامت (m)	سرعت موج برشی (m/s)	دانسیته کل (g/cm ³)
۱	Average Sand	۴	۴۲۱/۹	۱/۸۵
۲	Average Clay	۴	۵۷۳	۱/۹۷
۳	Average Clay	۴	۶۱۱/۹	۱/۹۹
۴	Average Sand	۴	۶۱۶/۳	۲
۵	Average Clay	۲	۶۲۰/۱	۱/۹
۶	Average Clay	۴	۶۱۷/۱	۱/۹۵
۷	Average Sand	۴	۶۲۳/۹	۲/۱
۸	Average Clay	۶	۶۲۸/۳	۱/۹۵
۹	Average Sand	۲	۶۳۴/۱	۱/۹۸
۱۰	Average Clay	۲	۶۳۷/۴	۱/۷۴
۱۱	Average Sand	۶	۶۴۶/۷	۲/۲۲
۱۲	Average Sand	۹	۷۰۰	۲/۳۴
۱۳	Seismic Bedrock	---	۷۵۰	۲/۳۷



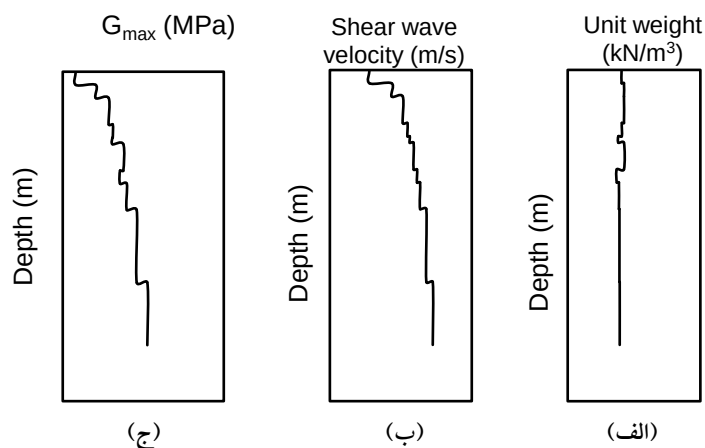
شکل ۲. نمودار عمقی تغییرات (الف) وزن واحد، (ب) سرعت موج برشی و (ج) مدول برشی پروفیل خاک تعریف شده برای گمانه یک

جدول ۵. لایه‌های تعریف شده برای گمانه دو

لایه	جنس	ضخامت (m)	سرعت موج برشی (m/s)	دانسیته کل (g/cm ³)
۱	Average Clay	۴	۲۸۸/۵	۱/۸۹
۲	Average Clay	۶	۴۱۸/۳	۲/۱۴
۳	Average Clay	۶	۴۸۵/۲	۲/۰۲
۴	Average Clay	۴	۵۲۷	۲/۰۵
۵	Average Clay	۶	۵۵۵/۴	۲/۰۳
۶	Average Sand	۴	۵۶۹/۹	۱/۹۸
۷	Average Clay	۴	۵۸۳/۹	۲/۰۱
۸	Average Clay	۸	۶۰۰/۵	۲/۱۸
۹	Average Clay	۳۴	۶۸۱	۲/۲
۱۰	seismic Bedrock	---	۷۵۰	۲/۲۵



شکل ۳. نمودار عمقی تغییرات (الف) وزن واحد، (ب) سرعت موج برشی و (ج) مدول برشی پروفیل خاک تعریف شده برای گمانه دو



شکل ۴. نمودار عمقی تغییرات (الف) وزن واحد، (ب) سرعت موج برشی و (ج) مدول برشی پروفیل خاک تعریف‌شده برای گمانه سه

جدول ۶. لایه‌های تعریف‌شده برای گمانه سه

لایه	جنس	ضخامت (m)	سرعت موج برشی (m/s)	دانسیته کل (g/cm ³)
۱	Average Clay	۴	۲۷۹/۴	۱/۹۵
۲	Average Clay	۴	۴۳۵/۶	۲/۰۹
۳	Average Clay	۸	۵۱۳/۹	۲/۱۲
۴	Average Clay	۴	۵۴۶/۶	۲/۰۴
۵	Average Clay	۲	۵۶۳/۱	۱/۹۱
۶	Average Clay	۸	۵۹۰/۱	۲/۱۲
۷	Average Clay	۴	۶۱۴/۳	۱/۸۵
۸	Average Clay	۸	۶۳۶	۱/۹۳
۹	Average Clay	۲۲	۶۷۹/۹	۱/۹۵
۱۰	Average Clay	۱۹	۷۲۵/۱	۱/۹۶
۱۱	seismic Bedrock	---	۷۵۰	۱/۹۷

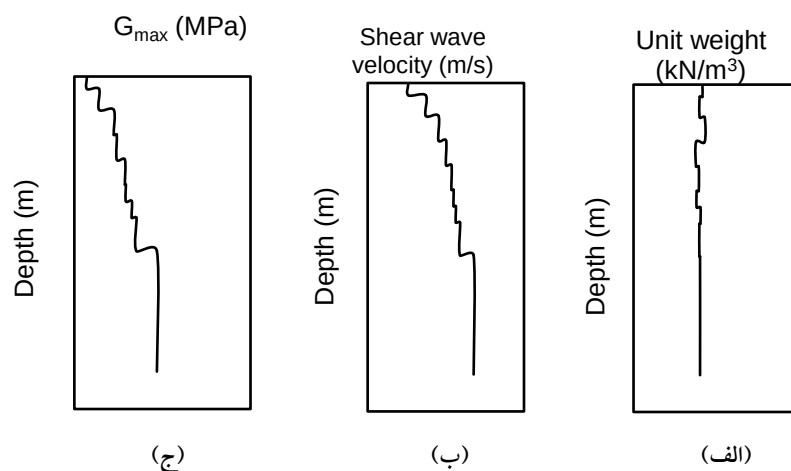
جدول ۷. لایه‌های تعریف‌شده برای گمانه چهار

لایه	جنس	ضخامت (m)	سرعت موج برشی (m/s)	دانسیته کل (g/cm ³)
۱	Average Clay	۲	۱۷۴/۳	۱/۹۰
۲	Average Clay	۴	۲۶۰/۲	۱/۹۶
۳	Average Clay	۶	۳۵۲/۸	۲/۰۸
۴	Average Clay	۴	۴۳۲/۳	۲/۱۳
۵	Average Clay	۴	۴۵۸/۲	۱/۸۸
۶	Average Clay	۲	۴۶۵/۵	۲/۰۴
۷	Average Clay	۶	۴۹۰/۹	۱/۹
۸	Average Clay	۴	۵۱۵	۲/۱۳
۹	Average Clay	۸	۵۴۳/۴	۲/۱۶
۱۰	Average Clay	۱۹	۶۵۵	۲/۱۸
۱۱	seismic Bedrock	---	۷۵۰	۲/۲

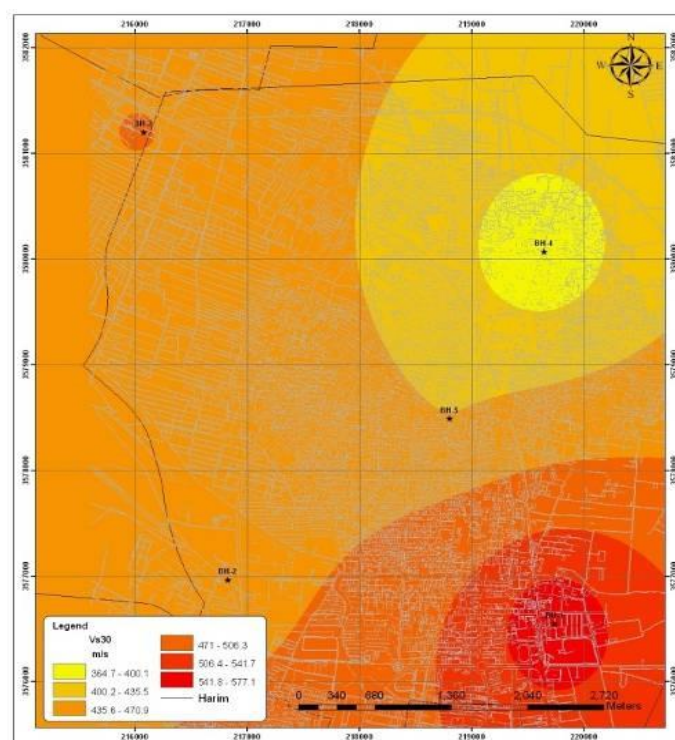
شمال شرق منطقه (اطراف هلال احمر) کمترین سرعت موج برشی را نشان می‌دهد. بر این اساس، محل اداره منابع طبیعی در مقایسه با دیگر نقاط منطقه سخت‌تر است. بر مبنای نقشه هم‌عمق سنگ بستر لرزه‌ای که در شکل ۸ نشان داده شده است، در شرق منطقه به‌ویژه جنوب شرق، ضخامت آبرفت کمتر و در غرب به‌ویژه شمال غرب منطقه، ضخامت آبرفت بیشتر است. در واقع می‌توان گفت که ضخامت آبرفت از جنوب شرق به سمت شمال غرب افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی جنس زمین در ساختگاه شهر اردکان از نوع خاک رسی با شاخص‌های خمیری مختلف است که در بعضی قسمت‌ها کمی ماسه سیلتی نیز دیده می‌شود (جدول ۸).

بر اساس لایه‌بندی تعریف‌شده، سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر (V_s^{30}) و فرکانس طبیعی در گمانه‌ها، محاسبه و نقشه آن ترسیم شد (شکل ۷). مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به نقشه V_s^{30} ، جنوب شرق منطقه (اطراف اداره منابع طبیعی)، بیشترین و



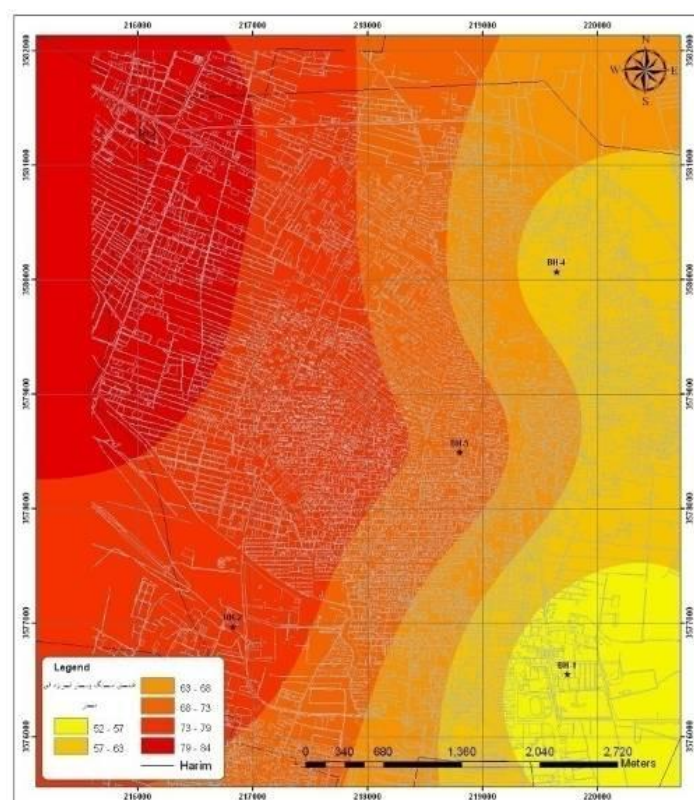
شکل ۴. نمودار عمقی تغییرات (الف) وزن واحد، (ب) سرعت موج برشی و (ج) مدول برشی پروفیل خاک تعریف‌شده برای گمانه پنج



شکل ۵. نقشه هم‌سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر، شهر اردکان

جدول ۸. لایه‌های تعریف‌شده برای گمانه پنج

لایه	جنس	ضخامت (m)	سرعت موج برشی (m/s)	دانسیته کل (g/cm ³)
۱	Average Clay	۳	۲۶۰/۲	۱/۹۲
۲	Average Clay	۵	۳۷۱/۸	۱/۹۹
۳	Average Clay	۶	۴۵۲/۹	۲/۰۴
۴	Average Clay	۶	۵۰۱/۴	۱/۹۸
۵	Average Clay	۶	۵۳۵/۹	۱/۹۶
۶	Average Clay	۴	۵۴۹/۵	۱/۹
۷	Average Clay	۴	۵۶۴/۲	۲/۰۱
۸	Average Clay	۸	۵۹۱	۱/۹۸
۹	Average Clay	۲۹	۶۷۸	۲
۱۱	Seismic Bedrock	---	۷۵۰	۲/۱



شکل ۶. نقشه هم‌عمق سنگ بستر لرزه‌ای، شهر اردکان

۴. داده‌های میکروترمور

تحلیل شد. بر اساس نتایج تحلیل و نمودارهای نسبت طیفی به‌دست آمده، مقدار فرکانس طبیعی هر نقطه، تعیین و نقشه تغییرات آن ترسیم شد. مقادیر فرکانس در هر نقطه در جدول ۹ نشان داده شده است.

برای تحلیل ساختگاه از طریق میکروترمور، ۱۰۰ نقطه انتخاب و برداشت شد. از بین آن‌ها نقاطی که داده‌های مناسب برای تحلیل داشتند، انتخاب شدند و میکروترمورها با استفاده از نرم‌افزار Sesame (نرم‌افزار سائیزی، ۲۰۰۴)

جدول ۹. مقادیر فرکانس طبیعی از تحلیل خردلرزه‌ها در گستره شهر اردکان؛ نقاطی که با زمینه خاکستری رنگ مشخص شده‌اند، منطبق بر گمانه‌ها هستند.

P.	X	Y	F (Hz)	Am	Class		P.	X	Y	F (Hz)	Am	Class
S 004	220255	3576822	3.0	6.9	IIa		S 042	217356	3578797	3.0	19.0	IIa
S 005	220255	3576822	8.5	2.0	III		S 043	217803	3579287	4.0	2.4	IIa
S 006	219317	3576822	4.0	1.5	IIa		S 044	218260	3579292	2.0	9.3	I
S 06	219775	3580472	5.0	2.5	IIb		S 046	219258	3579314	2.5	2.3	IIa
S 007	218754	3576837	4.0	2.8	IIa		S 047	219793	3579240	6.0	3.1	IIb
S 07	219650	3580072	7.0	2.7	IIb		S 048	220257	3579268	4.0	2.3	IIa
S 08	219744	3576553	10.0	1.9	III		S 051	221240	3578823	8.0	1.7	III
S 009	217838	3576855	7.0	3.3	IIb		S 052	220796	3578344	2.0	26.0	I
S 09	220205	3579793	3.5	1.9	IIa		S 053	217864	3576325	4.5	1.7	IIa
S 010	217815	3577247	2.5	38.0	IIa		S 054	217315	3576336	1.5	2.3	I
S 0010	216085	3581203	1.0	4.8	I		S 055	216755	3576211	7.0	3.1	IIb
S0011	216838	3576968	2.5	6.5	IIa		S 056	216789	3576797	1.0	3.6	I
S 011	218304	3577260	6.0	2.5	IIb		S 057	217358	3576788	7.5	3.1	III
S 012	218882	3577282	2.5	15.5	IIa		S 058	217288	3577282	6.5	2.6	IIb
S 013	219272	3577263	2.0	2.9	I		S 059	216815	3577294	10.0	4.0	III
S 014	219821	3577363	3.0	6.3	IIa		S 061	216814	3578317	2.0	1.5	I
S 015	220240	3577286	3.0	3.1	IIa		S 062	217280	3578314	2.0	1.9	I
S 016	220289	3577825	6.5	2.9	IIb		S 063	216343	3575841	2.0	2.2	I
S 017	219790	3577788	3.0	11.0	IIa		S 064	216293	3575330	2.0	21.6	I
S 018	219356	3577823	3.0	1.5	IIa		S 065	220789	3579809	2.0	2.1	I
S 019	218743	3577805	2.5	1.3	IIa		S 066	220312	3579792	4.0	2.2	IIa
S 020	218283	3577815	2.5	7.0	IIa		S 067	219806	3579771	7.0	3.5	IIb
S 21	217710	3577808	2.0	4.5	I		S 068	219332	3579753	5.5	1.8	IIb
S 022	217322	3577846	2.0	1.8	I		S 069	218840	3579861	2.5	5.8	IIa
S 023	216799	3577845	3.0	4.0	IIa		S 070	218320	3579851	5.0	2.3	IIb
S 024	217817	3578370	2.5	1.8	IIa		S 071	217819	3579847	6.0	2.4	IIb
S 026	218783	3578217	2.0	2.2	I		S 072	217300	3579808	6.0	2.5	IIb
S 027	219281	3578312	2.0	4.5	I		S 073	216812	3579864	8.0	3.5	III
S 029	220308	3578344	5.5	2.7	IIb		S 274	216291	3579850	6.0	1.4	IIb
S 030	220297	3578747	5.0	2.1	IIb		S 075	216295	3580352	9.5	3.3	III
S 031	220773	3578750	1.0	1.3	I		S 077	216968	3580279	10.0	2.2	III
S 032	219810	3578763	1.0	2.6	I		S 078	217795	3580306	5.5	2.2	IIb
S 033	219350	3578818	3.0	1.6	IIa		S 079	218314	3580390	6.0	2.2	IIb
S 035	218261	3578810	2.5	22.0	IIa		S 080	218830	3580339	4.0	2.2	IIa
S 036	217791	3578797	1.5	1.4	I		S 081	219294	3580330	4.0	2.1	IIa
S 037	217315	3578806	2.5	2.3	IIa		S 082	219846	3580292	3.0	1.6	IIa
S 038	216811	3578828	9.0	3.0	III		S 083	220310	3580246	4.0	2.6	IIa
S040	216359	3579314	1.0	1.8	I		S 084	219759	3580821	5.0	2.6	IIb
S 041	216837	3579286	1.5	31.0	I		S 085	219331	3581208	6.0	1.7	IIb
S 087	218812	3580807	2.5	2.3	IIa		S 141	216831	3575821	2.5	3.0	IIa
S 088	218258	3580793	2.5	13.9	IIa		S 142	217316	3575830	4.0	2.6	IIa
S 089	217873	3580775	5.5	2.3	IIb		S 143	217799	3575790	3.0	5.5	IIa
S 090	217354	3580850	6.0	2.5	IIb		S 144	217792	3575245	2.5	7.0	IIa
S 091	216737	3580853	3.0	1.1	IIa		S 151	219948	3575371	5.0	0.9	IIb
S 093	217320	3581279	6.5	2.0	IIb		S 152	219246	3575264	3.0	15.0	IIa
S 094	217851	3581220	2.0	1.2	I		S 154	218260	3575312	2.0	4.9	I
S 095	218278	3581219	6.0	3.4	IIb		S 155	216304	3574841	3.0	13.6	IIa
S 096	218794	3581240	5.0	2.0	IIb		S 157	219290	3575743	2.0	1.3	I
S 120	217300	3575300	2.5	1.6	IIa		S 158	219777	3575867	1.0	1.5	I
S 121	216805	3575297	2.5	15.6	IIa							

۵. نتایج

با مقایسه فرکانس‌های طبیعی به‌دست‌آمده در محل گمانه‌ها بر اساس تحلیل خردلرزه‌ها و تحلیل خطی معادل ساختمان‌ها، مشاهده شد که مقادیر به‌دست‌آمده از هر دو روش همخوانی خوبی دارند. بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده از پروفیل‌های تعریف‌شده و تحلیل میکروترمور و با استفاده از طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲)، نوع زمین مشخص شد.

نوع زمین در همه نقاط برداشت میکروترمور در جدول ۹ در ستون Class ارائه شده است. شکل ۹ نقشه دوبعدی طبقه‌بندی نوع زمین را بر اساس طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) و با استفاده از روش تجربی (میکروترمور) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، نوع زمین در بیشتر نقاط منطقه از نوع IIa (خاک نسبتاً سفت) و IIb (خاک سفت) است، اما در مناطقی از جمله شمال‌غرب، جنوب‌غرب و بخش‌هایی از مرکز منطقه، زمین سست است؛ همچنین در محل دانشکده فرش (نقطه 0010) و مدرسه امام‌حسین (ع) (تقریباً نقطه 026) زمین از نوع خاک سست است؛ محل هلال احمر (نقطه 07) دارای زمین از نوع خاک سفت است؛ محل اداره منابع طبیعی (نقطه 08) دارای نوع خاک سخت و دانشکده منابع طبیعی (نقطه 0011) دارای زمین از نوع خاک نسبتاً سفت است (شکل ۹). با استفاده از پروفیل تعریف‌شده برای گمانه‌ها، به‌جز گمانه اداره منابع طبیعی که از نوع خاک نسبتاً سفت به حساب می‌آید، محل بقیه گمانه‌ها از نوع خاک سست است.

برای به‌دست آوردن یک طبقه‌بندی کلی برای منطقه، مقادیر به‌دست‌آمده از روش میکروترمور به دلیل در برگرفتن محدوده بیشتری از منطقه، طبقه‌بندی اصلی به حساب آورده می‌شود. برای تطبیق نوع زمین در محل گمانه‌ها، طبقه‌بندی‌های به‌دست‌آمده با طبقه‌بندی آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) مقایسه شده است. در جدول ۱۰، مقادیر طبقه‌بندی به‌دست‌آمده از هر دو روش در محل گمانه‌ها با یکدیگر مقایسه شده

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گمانه یک بر اساس طبقه‌بندی کمک‌پناه و با روش میکروترمور از نوع خاک سخت اما با توجه به پروفیل خاک، از نوع خاک نسبتاً سفت است. از آنجا که V_s^{30} برای این گمانه کمتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه است و با توجه به نتیجه طبقه‌بندی آیین‌نامه (خاک سخت)، نوع زمین آن بر اساس طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲)، از نوع خاک سفت (IIb) در نظر گرفته می‌شود. گمانه چهار بر اساس طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) در نتیجه تحلیل میکروترمور، از نوع خاک سفت و با توجه به پروفیل خاک آن از نوع خاک سست است. از طرفی بر اساس طبقه‌بندی آیین‌نامه نیز از نوع خاک با تراکم متوسط به حساب می‌آید. با این تفاسیر و با توجه به کم‌تر بودن مقدار V_s^{30} آن از حداقل مقدار نوع خاک سفت (۷۵۰-۵۵۰ متر بر ثانیه)، زمین در این محل بر اساس طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) از نوع خاک سفت در نظر گرفته می‌شود. گمانه دو نیز بر اساس این طبقه‌بندی، از نوع خاک نسبتاً سفت و با توجه به پروفیل خاک آن از نوع خاک سست است؛ با توجه به V_s^{30} که حدوداً ۴۵۰ m/s است، زمین این محل از نوع خاک نسبتاً سفت در نظر گرفته می‌شود (جدول‌های ۱۰ و ۱۱).

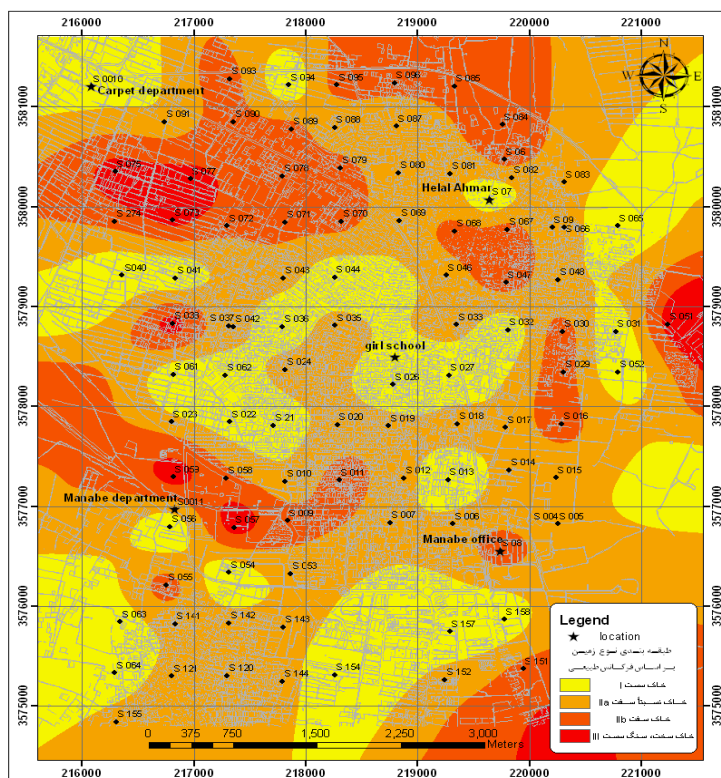
از آنجا که طبقه‌بندی نوع زمین مطابق آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، طبقه‌بندی معتبر و اجرایی در ایران است، برای کاربردی کردن نتایج این تحقیق، نوع زمین در محل گمانه‌ها بر اساس طبقه‌بندی تفکیک شد. بر این اساس و با مقایسه‌های انجام گرفته و نتایج به‌دست‌آمده، در زمین نوع II طبق آیین‌نامه کمی تغییر ایجاد شد؛ بدین صورت که با توجه به فرکانس‌های طبیعی گمانه‌ها یک بند با نام خاک نیمه‌سخت با فرکانس کمتر از ۲/۵ هرتز به این نوع زمین اضافه شد. از طرفی، خاک سخت نیز دارای فرکانس بیش از ۲/۵ هرتز در نظر گرفته شد. جدول ۱۲ و شکل ۱۰ نتایج تغییرات طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ در شهر اردکان را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. مقایسه نتایج پروفیل خاک با تحلیل میکروترمورها

روش	ویژگی	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5
پروفیل خاک	طبقه‌بندی آیین‌نامه	IIb (خاک سخت)	IIb (خاک سخت)	IIb (خاک سخت)	IIIb (خاک با تراکم متوسط)	IIb (خاک سخت)
	Vs30	577.1	454.6	472.5	364.6	436.9
	ضخامت	52	77	84	60	72
	طبقه‌بندی (کمک‌پناه، ۲۰۰۲)	IIa (خاک نسبتاً سفت)	I (خاک سست)	I (خاک سست)	I (خاک سست)	I (خاک سست)
میکروترمو	فرکانس طبیعی	3.04	1.93	1.86	2.14	2
	طبقه‌بندی (کمک‌پناه، ۲۰۰۲)	III (خاک سخت)	IIa (خاک نسبتاً سفت)	I (خاک سست)	IIb (خاک سفت)	I (خاک سست)
	فرکانس طبیعی	10	2.5	1	7	2.7

جدول ۱۱. نتایج نهایی طبقه‌بندی نوع زمین در محل گمانه‌ها با استفاده از طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲)

نام گمانه	نوع زمین	توصیف زمین
BH-1	IIb	خاک سفت
BH-2	IIa	خاک نسبتاً سفت
BH-3	I	خاک سست
BH-4	I	خاک سست
BH-5	I	خاک سست



شکل ۱۰. طبقه‌بندی نهایی نوع زمین بر اساس فرکانس طبیعی در محل گمانه‌ها با استفاده از طبقه‌بندی کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) در شهر اردکان

جدول ۱۲. طبقه‌بندی جدید نوع زمین در شهر اردکان بر اساس طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰، (نوع زمین IIc، خاک‌های نیمه‌سخت با ضخامت بیش از ۳۰ متر به این طبقه‌بندی اضافه شده است)

نوع زمین	توصیف نهشته‌ها	حدود تقریبی سرعت $V_s^{30} (m/s)$	فرکانس طبیعی (هرتز)
I	(a) سنگ‌های آذرین (دارای بافت درشت و ریزدانه)، سنگ‌های رسوبی سخت و بسیار مقاوم و سنگ‌های دگرگونی توده‌ای (گنایس - سنگ‌های متبلور سیلیکانه) - طبقات کنگلومرایی (b) خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت) با ضخامت کمتر از ۳۰ متر	بیش از ۷۵۰ $750 > V_s \geq 375$	
II	(a) سنگ‌های آذرین سست (مانند توف)، سنگ‌های سست رسوبی، سنگ‌های دگرگونی متورق و به‌طور کلی سنگ‌هایی که در اثر هوازدگی و تورق (تجزیه و تخریب) سست شده‌اند. (b) خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت) با ضخامت بیش از ۳۰ متر (c) خاک‌های نیمه‌سخت با ضخامت بیش از ۳۰ متر	$750 > V_s \geq 375$	$2/5 <$ $2/5 >$
III	(a) سنگ‌های متلاشی‌شده در اثر هوازدگی (b) خاک‌های با تراکم متوسط، طبقات شن و ماسه با پیوند متوسط بین‌دانه‌ای و رس با سختی متوسط	$375 > V_s \geq 175$ $375 > V_s \geq 175$	
IV	(a) نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد در اثر بالابودن سطح آب زیرزمینی (b) نیمرخ خاک شامل حداقل ۶ متر خاک رس با اندیس خمیری بیشتر از ۲۰ درصد و رطوبت بیشتر از ۴۰ درصد	کمتر از ۱۷۵	

۶. نتیجه‌گیری

مراجع

با مقایسه مقادیر فرکانس طبیعی حاصل از تحلیل اثر ساختمان بر اساس پروفیل گمانه‌ها و مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل خردلرزه‌ها در گستره شهر اردکان، نشان داده شد که این دو روش از لحاظ روند تغییرات همخوانی خوبی دارند، ولی در تفکیک نوع خاک دارای اختلافاتی هستند. استفاده از نتایج تحلیل خردلرزه‌ها به دلیل گسترده‌گی و فراوانی نقاط مشاهده‌ای، می‌تواند کمک بسزایی در شناسایی نوع خاک و تفکیک نوع ساختمان داشته باشد. بهترین پارامتری که می‌تواند این تفکیک را نشان دهد، استفاده همزمان از فرکانس طبیعی ساختمان و V_s^{30} است. کاربرد روش پیشنهادی برای نقاطی توصیه می‌شود که در روش استفاده از پروفیل خاک، نوع خاک آن سست تعیین شده است؛ بنابراین توصیه می‌شود در استفاده از طبقه‌بندی خاک بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، به مقادیر و تغییرات فرکانس طبیعی خاک در ساختمان‌ها توجه خاص معطوف شود.

ادیب، ا.، ۱۳۹۰، ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای و تحلیل ساختمان شهر اردکان، سازمان مسکن و شهرسازی استان یزد، ۴۲۰ ص.

آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۸۴، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن - ویرایش چهارم.

سهرابی بیدار، ع. و جاسم‌پور، ل.، ۱۳۹۲، بررسی اثر آبرفت‌های عمیق بر پاسخ لرزه‌ای یک‌بعدی در شهر قم، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۳)، ۱۵-۳۱.

میرحسینی، م. و عارف‌پور، م.، ۱۳۷۸، مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای - انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۹۳۲ ص.

هاشمی طباطبایی، س. و محمدی، ا.، ۱۳۸۷، مقایسه طبقه‌بندی نوع زمین در آیین‌نامه‌های ساختمانی ایران و اروپا و اثرات آن بر طیف‌های طراحی - مطالعه موردی

- زمستان ۱۳۸۷، سوم و چهارم، ۳، ۷۱-۸۰.
- Bardet, J. P., Ichii, K. and Lin, C. H., 2000, EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits, University of southern California, Department of Civil Engineering.
- Bauer, R. A., Kiefer, J. and Hester, N., 2001, Soil amplification maps for estimating earthquake ground motions in the central US; Engineering Geology, 62, 7-17.
- Bray, J. d. and Abrahamson, N., 1999, Characterization of site response: general site categories, Earthquake Engineering Research Center, PEER. No. 1999/03.
- Broughton, A. T., Van Arsdale, R. B. and Broughton, J. H., 2001, Liquefaction susceptibility mapping in the city of Memphis and Shelby County, Tennessee; Engineering Geology, 62, 207-222.
- CEN, 2004, BS EN 1998 -1, 2004, Euro code: design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization. ISBN: 0580458725.
- Cramer, C. H., 2003, Site-specific seismic-hazard analysis that is completely probabilistic; Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 1841-1846.
- Cramer, C. H., Gomberg, J. S., Schweig, E. S., Waldron, B. A. and Tucker, K., 2004, The Memphis, Shelby County, Tennessee, seismic hazard maps, U.S. Geological Survey Open-File Report 04-1294, 19p.
- Cramer, C. H., Gomberg, J. S., Schweig, E. S., Waldron, B. A. and Tucker, K., 2006, First USGS urban seismic hazard maps predict the effects of soils; Seism. Res. Lett., 77, 23-29.
- Dobry, R. and Vucetic, M., 1987, Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits, Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, 2, 51-87.
- Gomberg, J., Waldron, B., Schweig, E., Hwang, H., Webbers, A., Van Arsdale, R., Tucker, K., Williams, R., Street, R., Mayne, P., Stephenson, W., Odum, J., Cramer, C., Updike, R., Hudson, S. and Bradley, M., 2003, Lithology and shear velocity in Memphis, Tennessee; Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 986-997.
- Komak panah, A., Hafezi Moghaddas, N., Ghayamghamian, M. R., Motosaka, M., Jafari, M. K. and Uromieh, A., 2002, Site effect classification in east central of Iran, JSEE, 4(1), 37-46.
- ICBO, UBC (Uniform Building Code), 1997, International Conference of Building Officials.
- ICC, 2006, IBC (International Building Code), International Code Council, Falls Church.
- Ishibashi, I., 1992, Discussion to effect of soil plasticity on cyclic response, by M. Vucetic and R. Dobry, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 118(5), 830-832.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of RTRI, 30(1), 25-33.
- Nakamura, Y., 2000, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K., 1986, Module and damping factors for dynamic analyses of cohesion less soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 112(11), 1016-1032.
- Seed, R. B., Dickenson, S. E. and Moke, C. M., 1991, Seismic response analysis of soft and deep cohesive stations: a brief summary of recent findings. Proceeding, CALTRANS first Annual Seismic Response Workshop, Sacramento, California, December 3-4.
- Rix, G. J. and Romero-Hudock, S., 2001, Liquefaction susceptibility mapping in Memphis/Shelby County, TN, Research Report, USGS NEHRP Award 01-HQ-AG-0019, 29p.
- Sesame Software, 2004, European Commission Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Street, R., Woolery, E., Wang, Z. and Harik, I. E., 1997, Soil classifications for estimating site-dependent response spectra and seismic coefficients for building code provisions in western Kentucky; Engineering Geology, 46, 331-347.
- Street, R., Woolery, E., Wang, Z. and Harris, J., 2001, NEHRP soil classifications for estimating site-dependent seismic coefficients in the Upper Mississippi Embayment; Engineering Geology, 62, 123-135.