

یادداشت تحقیقاتی

مدلسازی تجربی سرعت موج فشاری در خاک‌های ریزدانه چسبنده غیر اشباع در مسیر خشک‌شدگی

مهنوش بیگلری^{۱*}، ایمان عشایری^۲، مختار الیاسی^۳

۱. استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۲. استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۳. فارغ التحصیل کارشناس ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی

m.biglari@razi.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۶/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش ۹۷/۰۳/۲۱

چکیده

این مقاله نتایج آزمایش سه نوع خاک ریزدانه غیراشباع با حد خمیری متفاوت که با روش تحت-تراکم (under-compaction) ساخته شده‌اند و توسط دستگاه التراسونیک آزمایش شده‌اند را ارائه می‌کند. در هر خاک ۵ نقطه روی نمودار تراکم انتخاب شده و از هر نقطه با توجه به درصد رطوبت و نسبت تخلخل اولیه متفاوت چهار نمونه مشابه ساخته شده است. نمونه‌ها متعاقباً مرحله به مرحله تا خشک‌شدگی کامل در معرض جریان هوا قرار گرفته‌اند. در این آزمایش‌ها اندازه‌گیری سرعت موج فشاری (Vp) با استفاده از آزمایش فراصوت (التراسونیک) و تعیین مکش بافتی نمونه‌های غیراشباع به وسیله روش کاغذ صافی، به همراه اندازه‌گیری درصد رطوبت نمونه‌ها، مرحله به مرحله در طی فرآیند خشک‌شدگی انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با خشک شدن خاک و افزایش مکش بافتی، سرعت موج فشاری افزایش می‌یابد. نتایج روشن می‌کنند که در پیش‌بینی سرعت موج فشاری در خاک ریزدانه غیراشباع اثر مکش بافتی و نسبت تخلخل با هم در نظر گرفته شود. در ادامه مقاله یک رابطه تجربی توسعه داده شده است که به کمک آن می‌توان مقدار سرعت موج فشاری (Vp)، را برای خاک‌های ریزدانه غیراشباع در مسیر خشک‌شدگی با شرایطی شبیه به مصالح مورد آزمایش، به خوبی تخمین زد.

واژگان کلیدی: آزمایش فراصوت، کاغذ صافی، سرعت موج فشاری، خاکهای ریزدانه غیراشباع، مکش

۱- مقدمه

ای، ژئوفیزیک، و لرزه‌شناسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اولین ارتعاشات زمین موجب وارد شدن نیروی فشاری به زمین می‌شود و این نیرو جنبشی ایجاد می‌کند که در آن ذرات در راستای انتشار موج به جلو و عقب جابه‌جا می‌شوند، به این

انتشار امواج لرزه‌ای در سنگهای عمیق و لایه‌های سطحی خاک در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از قبیل ژئوتکنیک لرزه-

[8] معادلات گاسمن را با تحلیل وابستگی ویژگی‌های الاستیک سنگ متخلخل بسط دادند. لاکلایر و همکاران [9] و کارچیون و همکاران [10]، انتشار امواج الاستیک را در ترکیب دو جامد (ماسه و رس) و یک مایع تحلیل کردند. وی و مورالیتاران [11] یک تئوری پیوسته محیط متخلخل چند فازه (تئوری ترکیب با سطوح فصل مشترک، [12]) را برای ارائه امواج اکوستیک در محیط متخلخل غیر اشباع به کار گرفتند. آنها بیان داشتند که سه موج فشاری در محیط متخلخل غیراشباع انتشار می‌یابد. رویکرد ماکرو- مکانیکی معرفی شده به وسیله بیو [13]، توسط کوزی [14, 15] در ساختار ترمودینامیک محیط باز بسط داده شد تا رفتار غیرخطی محیط متخلخل غیراشباع را دربرگیرد. عشایری و همکاران [16]، بر پایه رویکرد مکانیک محیط متخلخل اخیر تئوری انتشار امواج لرزه‌ای برای خاک‌های غیراشباع را ارائه کردند که در آن محیط غیراشباع محیطی شامل برهم نهی سه محیط در زمان و فضا فرض شد. هرچند که، آنها سرعت و کاهندگی موج برشی را از راه‌حل‌های تحلیلی استخراج کردند، ولی این حلها در ارائه رابطه صریح و دقیق برای سرعت و کاهندگی امواج فشاری همچون نظریه بیو برای محیط اشباع، ناتوان بود. با این وجود، ایشان روابطی صریح و تقریبی برای سرعت و کاهندگی این امواج در فرکانس‌های پایین ارائه کردند. در بین چهار موج درونی در محیط متخلخل غیراشباع (سه موج فشاری و یک موج برشی)، ویژگی‌های امواج فشاری اول و دوم و موج برشی مشابه امواج معرفی شده در خاک‌های اشباع است، درحالیکه وجود سومین موج فشاری با فشار موئینگی مرتبط است.

با وجود جامعیت و عمق تحلیل‌های تئوری در بررسی سرعت و کاهندگی امواج لرزه‌ای منتشر شده در محیط‌های متخلخل، نتایج آزمایشگاهی در اندازه‌گیری امواج فشاری در خاک‌ها و سنگ‌های غیراشباع کافی و مناسب نیست و عموماً به رابطه بین اولین موج فشاری و درجه اشباع تمرکز دارد تا مکش. به علاوه، آزمایش‌ها عموماً روی خاک‌های ماسه‌ای و سنگها با تکرار بر آزمایش در درجه اشباع‌های مختلف متمرکز شده‌اند. ادامو و همکاران [17]، چندین اندازه‌گیری بر مقادیر مختلف سرعت موج فشاری در عمق برای درجه اشباع‌های

موج، موج فشاری (P) گفته می‌شود. شناخت امواج و سرعت انتشار آنها ما را به درک درست‌تری از تشکیلات زمین و چگونگی رفتار آنها در اثر عبور این امواج می‌رساند. امواج بعد از عبور از لایه‌های سنگی پیش از رسیدن به سطح زمین ممکن است از لایه‌های خاکی عبور کنند و دستخوش تغییراتی در دامنه و محتوای فرکانسی شوند. لایه‌های خاک می‌تواند به وسیله یک یا چند مایع اشباع شوند یا اینکه غیراشباع، یا خشک باشند.

انتشار امواج در محیط‌های خشک و اشباع تاکنون توسط پژوهشگران بسیاری مورد تحلیل‌های تئوری و آزمایشگاهی قرار گرفته است. گاسمن [1]، تئوری انتشار امواج در محیط اشباع با فرکانس پایین با شرط اینکه هیچ جابه‌جایی نسبی بین فازهای مایع و جامد رخ ندهد را ارائه کرد. بیو [2 و 3]، تئوری انتشار امواج را برای هر دو محدوده فرکانسی بالا و پایین در محیط متخلخل اشباع توسعه داد. مرز فرکانس بالا و پایین برقراری جریان سیال درون حفرات از نوع پویسلی است، که تابع ویژگی‌های مکانیکی سیال (آب و هوا) و همچنین قطر کانال‌هایی است که این سیالات در آن حرکت می‌کنند. بنابراین این مرز با تغییر تراکم خاک تغییر خواهد داشت، با این وجود برای بیشتر مسائل دینامیکی مهندسی ژئوتکنیک این مرز تا حدی بزرگ است که استفاده از نظریه بیو در فرکانسهای پایین را مخدوش نمی‌کند. تئوری بیو در محدوده فرکانس‌های پایین شامل دو موج فشاری و یک موج برشی بود که مطابق آن سرعت موج در اغلب موارد با افزایش فرکانس موج افزایش می‌یابد. بیو امواج فشاری را از لحاظ سرعت انتشار به دو نوع موج کند و تند تقسیم می‌کند. در حالت موج فشاری تند حرکتی که در محیط ایجاد می‌کند بخش جامد و مایع را به صورت هم فاز با یکدیگر حرکت می‌دهد. براتسائرت [4]، رابطه بین ضرایب لاهه و سرعت موج فشاری را در محیط متخلخل سه فازه استخراج کرد. بریمان و همکاران [5] بسطی بر تئوری بیو در حالیکه اجازه ورود سیال حفره‌ای به حفرات را می‌داد با فرض اینکه طول موج به اندازه کافی بلند باشد که تغییرات موئینگی قابل چشم‌پوشی باشد، ارائه کرد [6]. بریمان و لوملی [7]، سه سرعت موج را در سنگ اندازه‌گیری کردند. براون و کوریگا

مشاهد شد سنگ‌های با تخلخل بالا و مقاومت پایین رفتاری همانند خاک داشتند یعنی با افزایش درجه اشباع، کاهش در سرعت موج فشاری رخ می‌دهد. در سنگ‌های با تخلخل پایین و مقاومت بالا با افزایش درجه اشباع، سرعت موج فشاری افزایش می‌یابد.

با وجود مطالعات تئوری و آزمایشگاهی آثار درجه اشباع و عدد اسکمپتون بر سرعت موج فشاری، تاکنون پژوهش‌های اندکی در خصوص مطالعه تغییرات سرعت انتشار موج فشاری در خاک‌های ریزدانه غیراشباع به ویژه رسی با مکش در خاک‌های غیراشباع شده است. از آنجا که رابطه قوی بین مکش بافتی، S ، شرایط حجمی (نسبت تخلخل، e)، و سرعت موج فشاری، v_p ، به جای تغییرات درجه اشباع، مورد انتظار است، در این مقاله به این مبحث پرداخته شده است. این مطالعه نتایج سه سری آزمایش فراصوت انجام شده بر نمونه‌های ریزدانه متراکم شده را ارائه می‌کند. در هر خاک ۵ نقطه روی نمودار تراکم انتخاب شده و از هر نقطه با توجه به درصد رطوبت و نسبت تخلخل اولیه متفاوت چهار نمونه مشابه ساخته شده و متعاقباً مرحله به مرحله تا خشک‌شدگی کامل در معرض جریان هوا قرار گرفتند. سرعت موج فشاری (با استفاده از آزمایش فراصوت) و مکش (با استفاده از روش کاغذ صافی)، به همراه درجه اشباع، در مراحل مختلف در فرآیند خشک‌شدگی اندازه‌گیری شده است و در نهایت یک رابطه تجربی برای تخمین سرعت موج فشاری با توجه به مکش نیز توسعه داده شده است.

۲- مصالح مورد آزمایش

خاک‌های انتخاب شده برای این مطالعه آزمایشگاهی سه کائولینیت تجاری به نامهای $ZK1$ ، $ZK2$ ، و $ZK3$ از معدن زنوز در شمال غرب ایران هستند. همان‌گونه که در جدول (۱) گزارش شده است، مصالح مورد مطالعه به ترتیب شاخص خمیری ۹٪، ۱۵٪، و ۱۹٪ دارند و به ترتیب به عنوان رس لاغر (CL)، لای (ML)، و لای الاستیک (MH) مطابق سیستم طبقه بندی خاک متحد (USCS) [22] دسته‌بندی می‌شود.

مختلف نمونه‌های ماسه‌ای ارائه کردند. آنها روابط تئوری بین سرعت و درجه اشباع را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش درجه اشباع باعث کاهش سرعت موج فشاری می‌شود. امرسون و فوری [18]، سرعت موج فشاری را در ماسه تمیز تحت تنش‌های بسیار کم در آزمایش درون چاهی متقاطع (Cross hole) بزرگ مقیاس آزمایشگاهی برای فرکانس‌های کمتر از ۱۰ هرتز اندازه‌گیری کردند. به طور کلی، سرعت موج فشاری در محیط متخلخل تحت تأثیر درجه اشباع است، هرچند که این تغییرات زیاد نیست. تئوری بيو-گاسمن پیش‌بینی می‌کند که عموماً در شرایط درجه اشباع خیلی زیاد ($S_r > 99\%$) سرعت موج فشاری تغییرات قابل توجهی دارد. مانند درجه اشباع، عدد اسکمپتون نیز در برخی پژوهش‌ها [19]، مورد توجه بوده است. در یک پژوهش مشابه به وسیله کمار و مدهوسودهان [20]، سرعت امواج فشاری و برشی به ترتیب با استفاده از آزمایش بندر المنت و اکستندر المنت برای مصالح ماسه‌ای با تغییر تدریجی درجه اشباع بین حالت خشک و کاملاً اشباع اندازه‌گیری شد. آنها همچنین اثر تغییرات دانسیته نسبی و فشار همه‌جانبه را بررسی کردند. اندازه‌گیریها به روشنی نشان داد که با افزایش درجه اشباع سرعت موج فشاری کاهش می‌یابد و این روند تا نزدیکی درجه‌ی اشباع ۱۰۰ درصد که افزایش ناگهانی در سرعت موج فشاری دیده می‌شود ادامه دارد. درحالیکه، برای عدد B اسکمپتون بزرگتر از ۰/۹۹، مقدار سرعت موج فشاری به طور ناگهانی به مقدار مشابه آب بالا می‌رود. پیش-بینی از تئوری بيو برای تغییرات سرعت موج فشاری با درجه اشباع با داده‌های آزمایشگاهی به خوبی هماهنگی دارد. با این وجود، درحالیکه تغییرات سرعت موج فشاری در نتیجه تغییرات درجه اشباع در سنگهای متخلخل نرم (مانند، توف، مارن، ماسه سنگ، و رس سنگ) بسیار به خاک نزدیک است، رفتار سنگ‌های سخت تا حدی با خاک فرق دارد. کاراکول و الوسی [21]، سعی کردند تا ویژگی‌های مقاومتی (مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی) را با سرعت موج فشاری در انواع سنگ‌ها تحت شرایط متفاوت درجه اشباع مرتبط کنند. آنها ۱۴ نوع سنگ متفاوت را مطالعه کردند.

۳- آماده سازی نمونه‌ها

بیشینه آماده شده است. جدول (۲) شرایط اولیه همه نمونه‌های آماده شده بر منحنی تراکم را نشان می‌دهد. در جدول (۲)، نقطه‌های هر سری به وسیله اسم خاک و دو زیر نویس مشخص شده است. حروف "O"، "D"، و "W" در زیرنویس به ترتیب بر شرایط رطوبت تراکم بهینه، خشکتر از بهینه، و مرطوبتر از بهینه و اعداد "1"، و "2" در زیرنویس به ترتیب بر دانسیته خشک $0.5 \frac{kN}{m^3}$ و $1 \frac{kN}{m^3}$ کمتر یا بیشتر از دانسیته خشک بیشینه دلالت دارند (مثلاً؛ ZK1D1، یعنی خاک اول نقطه‌ای در سمت چپ منحنی تراکم پراکتور استاندارد، خشکتر از رطوبت بهینه با دانسیته خشک $\frac{kN}{m^3} / 0.5$ کمتر از دانسیته خشک بیشینه).

۴- ابزار آزمایش

سرعت موج فشاری در این مطالعه به وسیله ابزار فراصوت (التراسونیک) اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری فراصوت یکی از روش‌های ژئوفیزیکی غیر مخرب است که اغلب در کارهای مهندسی در زمینه‌های مختلفی مانند؛ مهندسی معدن، مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی فضاهای زیرزمینی، مهندسی اکتشاف نفت و گاز، پایش سلامت سازه‌ها و سایر زمینه‌ها به کار می‌رود. این روش را می‌توان هم در آزمایشگاه و هم در محل استفاده کرد. در این مطالعه، سرعت موج فشاری با استفاده از واحد تولید کننده پالس E48 و دو ترنسدیوسر (فرستنده و گیرنده) با فرکانس 54 kHz اندازه‌گیری شده است. نمونه‌های آماده شده بین دو ترنسدیوسر قرار داده شده‌اند و زمان ارسال موج فرستاده شده تا دریافت شده اندازه‌گیری شده است (شکل ۱). مقادیر سرعت موج فشاری با تقسیم طول نمونه بر زمان انتقال پالس تعیین می‌شود. هر آزمایش چند بار تکرار می‌شود و مقدار میانگین به عنوان سرعت موج فشاری در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۲) مشخصات اولیه نمونه‌ها بعد از تراکم

خاک‌ها ابتدا به وسیله ژل جاذب رطوبت (سیلیکا ژل) در دسیکاتور خشک شدند. سپس با مقدار مشخصی آب مقطر به رطوبت مورد نظر رسانده و به مدت ۱۶ تا ۲۴ ساعت در شرایط دما و رطوبت ثابت نگهداری شدند. از خاک مرطوب شده، نمونه‌های استوانه‌ای مشابهی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در غالب تراکم مخصوص به روش تحت-تراکم [23] آماده شدند.

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکها

Description	ZK1	ZK2	ZK3
Classification (USCS)	CL	ML	MH
G _s	2.64	2.64	2.65
Aterberg limits (%)			
□ _L	29	45	50
□ _P	20	30	31
I _P	9	15	19
Particle size distribution (%)			
Clay fraction	12	43	50
Silt fraction	75	57	50
Sand fraction	13	0	0
Maximum dry density (kN/m ³)	17.5	15.4	15.0
Optimum water content (%)	16.6	20.5	25.3
Chemical Analysis (%)			
SiO ₂	74	65	63
Al ₂ O ₃	16	22	24
others	10	13	13
Mineral composition (%)			
Kaolinite	41	60	64
Quartz	52	31	27
Calcite	3	3	3
others	3	16	16

Table 1 Index properties of materials

در هر خاک پنج نقطه از نمودار تراکم پراکتور استاندارد با شرایط اولیه؛ یک نمونه با درصد رطوبت و دانسیته خشک تراکم بهینه پراکتور استاندارد [24]، دو نمونه خشکتر از رطوبت بهینه با دانسیته خشک $0.5 \frac{kN}{m^3}$ و $1 \frac{kN}{m^3}$ کمتر از دانسیته خشک بیشینه، و دو نمونه مرطوبتر از رطوبت بهینه با دانسیته خشک $0.5 \frac{kN}{m^3}$ و $1 \frac{kN}{m^3}$ بزرگتر از دانسیته خشک

۱۶ ساعت به همراه تعیین مکش نمونه‌ها به وسیله کاغذ صافی [25] در هر گام، انجام شده است. آزمایش فراصوت، در شرایط محصور نشده انجام شده است. به منظور اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه‌ها، سه صفحه دایروی با قطر ۵۰ میلی‌متر از کاغذ صافی Whatman No. 42 در تماس مستقیم با نمونه‌ها قرار داده شده است. نمونه‌ها عایق بندی شده‌اند و اجازه داده شده است تا برای دوره هفت روز در محیط با دمای ثابت به تعادل برسند. پس از به تعادل رسیدن، درصد رطوبت کاغذ صافی اندازه‌گیری شده است. در نهایت، مکش بافتی خاک با استفاده از درصد رطوبت کاغذ صافی و منحنی کالیبراسیون [25] آن تعیین شده است.

شکل ۱. دستگاه تولید پالس و ترنسدیوسرها برای اندازه‌گیری

سرعت موج فشاری



Fig. 1. Pulse generator unit and transducers for P-wave velocity measurement

۶- نتایج آزمایش‌ها

شکل (۲) نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. نتایج برحسب سرعت موج فشاری (V_p)، مکش (S)، درصد رطوبت (ω)، و نسبت تخلخل برای نقاط اولیه آماده شده برحسب منحنی تراکم استاندارد برای هر سه نوع خاک است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مکش در نمونه‌های متراکم شده با درصد رطوبت و دانسیته خشک متفاوت به تنهایی کنترل کننده تغییرات سرعت موج فشاری نیست و سایر

Test	Water content (%)	Dry density ($\frac{KN}{m^3}$)	Void ratio e	Saturation Degree Sr(%)
ZK1 _O	16.6	17.5	0.51	86.1
ZK1 _{D1}	9.7	17.0	0.55	46.6
ZK1 _{D2}	7.9	16.5	0.60	34.8
ZK1 _{W1}	19.1	17.0	0.55	91.8
ZK1 _{W2}	21.6	16.5	0.61	93.0
ZK2 _O	20.5	15.4	0.71	76.2
ZK2 _{D1}	11.4	14.9	0.77	39.0
ZK2 _{D2}	4.0	14.4	0.83	12.7
ZK2 _{W1}	26.0	14.9	0.77	89.1
ZK2 _{W2}	29.5	14.4	0.83	93.8
ZK3 _O	25.3	15.0	0.76	88.2
ZK3 _{D1}	18.9	14.5	0.82	61.1
ZK3 _{D2}	14.8	14.0	0.89	44.1
ZK3 _{W1}	27.7	14.5	0.82	89.5
ZK3 _{W2}	29.2	14.0	0.89	86.9

Table 2 Initial properties of samples at compacted states

۵- مراحل انجام آزمایش

مطابق هر نقطه در نظر گرفته شده از منحنی تراکم (هر یک از پنج نقطه مورد بحث) برای هر خاک، چهار نمونه مشابه آماده شده است. به نمونه‌ها اجازه داده شده است تا در شرایط محیط در طی مدت ۱۶ ساعت خشک شوند. در طی مرحله خشک شدن، اندازه‌گیری سرعت موج فشاری در چهار مرحله؛ زمان صفر (بلافاصله پس از ساخت نمونه)، پس از گذشت ۴ ساعت، پس از گذشت ۸ ساعت، و پس از گذشت

فشاری نمونه‌ها می‌شود (شکل‌های ۳ تا ۵). از نظر مکانیکی افزایش مکش بافتی در اثر خشک شدگی باعث افزایش تنش یا درگیری بیشتر بین ذرات خاک شده و موجب افزایش سرعت موج فشاری می‌شود.

پارامترها مانند بافت ایجاد شده در حین تراکم و شاخص خمیری مواد نیز می‌تواند نقش مکش را تحت تأثیر قرار دهد. هر چند که، در هر نقطه خاص از منحنی تراکم سرعت موج فشاری مستقیماً با مکش متناسب است. افزایش در مکش با تعقیب مسیر خشک شدگی، موجب افزایش در سرعت موج

شکل ۲. رابطه بین نسبت تخلخل، درصد رطوبت، مکش، و سرعت موج فشاری در شرایط تراکم

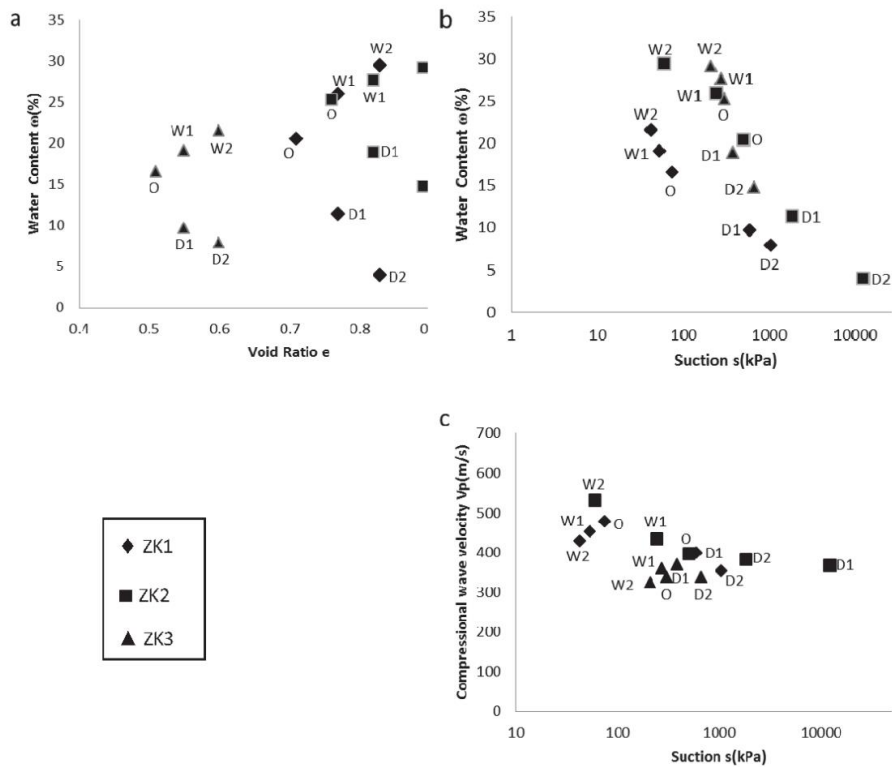


Fig. 2. Relationship between void ratio, water content, suction, and compressional wave velocity at compacted states

شکل ۳. رابطه بین درصد رطوبت، مکش، و سرعت موج فشاری برای خاک ZK1

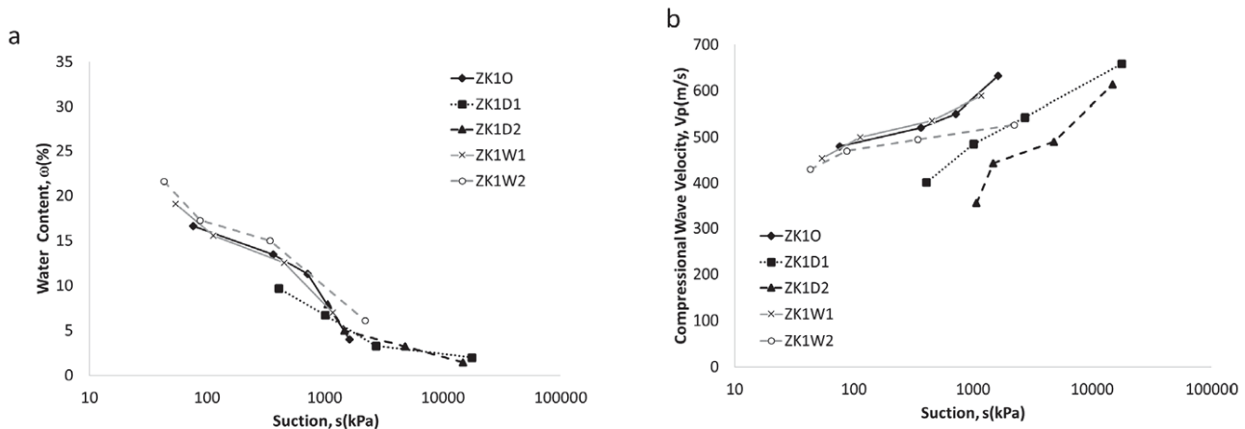


Fig. 3. Relation between water content, suction, and compressional wave velocity for ZK1

شکل ۴. رابطه بین درصد رطوبت، مکش، و سرعت موج فشاری برای خاک ZK2

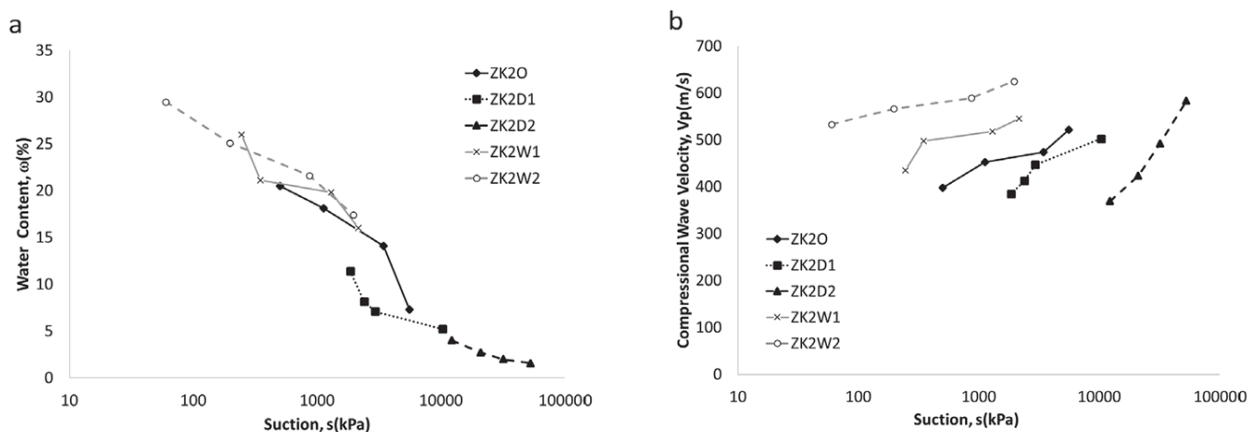


Fig. 4. Relation between water content, suction, and compressional wave velocity for ZK2

شکل ۵. رابطه بین درصد رطوبت، مکش، و سرعت موج فشاری برای خاک ZK3

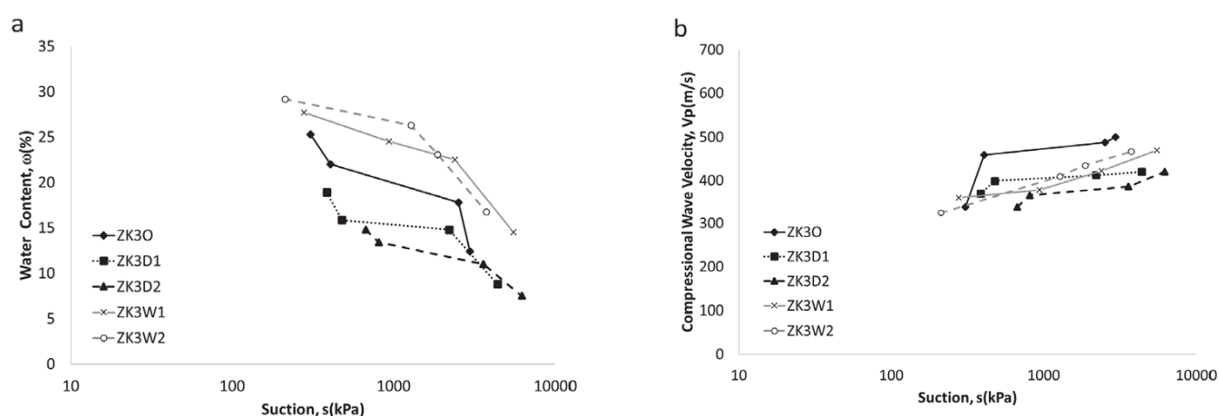


Fig. 5. Relation between water content, suction, and compressional wave velocity for ZK3

۷- مدلسازی تجربی رفتار مشاهده شده

نتایج آزمایش‌های سرعت موج فشاری (V_p) نشان دادند شکل‌های (۳، ۴، و ۵) که به عنوان تابعی از نسبت تخلخل اولیه در شرایط تراکم (e_{comp})، مکش و شاخص خمیری خاک (PI)، قابل پیش بینی هستند. بنابراین، می‌توان معادله‌ای توسعه داد که مقادیر سرعت موج فشاری (V_p) را با هماهنگی منحنی به نسبت مکش به مکش نمونه متراکم شده (s/s_{comp}) مرتبط کند.

مقدار سرعت موج فشاری در هر مکش را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد:

بعلاوه، نتایج نشان می‌دهد که، با افزایش شاخص خمیری خاک، سرعت موج فشاری با کاهش دانسیته خشک، کاهش می‌یابد. این مشاهدات با توجه به اینکه افزایش شاخص خمیری باعث کاهش سرعت موج فشاری و همچنین کاهش تراکم باعث کاهش سرعت انتقال ارتعاش در بین ذرات خاک می‌شود قابل توجیه است.

لازم به ذکر است که آزمایش‌ها در شرایط عدم حضور تنش محصورکننده انجام شده است و نتایج دربرگیرنده آثار تنش همه‌جانبه بر سرعت موج فشاری نیست. افزایش محصورشدگی می‌تواند منجر به سختتر شدن نمونه‌ها و افزایش سرعت موج فشاری شود.

شکل ۸. مقایسه معادله تجربی با نتایج آزمایشگاهی برای

خاک ZK3

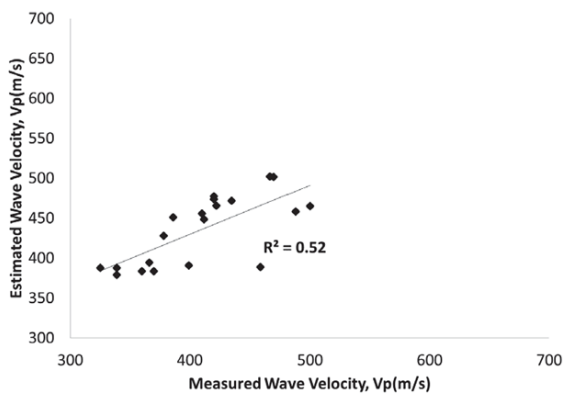


Fig. 8. Comparison of empirical equations with laboratory results for ZK3

مقایسه ضرایب همبستگی ارائه شده برای خاک‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شاخص خمیری همبستگی نتایج کاهش می‌یابد و رابطه هماهنگی بهتری با نتایج ارائه شده در خاک‌های با شاخص خمیری پایینتر دارد.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ابزار فراصوت با موفقیت برای اندازه‌گیری سرعت موج فشاری سه نمونه خاک ریزدانه در مسیر خشک شدگی به همراه تعیین مکش نمونه‌ها با کمک کاغذ صافی استفاده شد.

نتایج آزمایش‌ها پیشنهاد می‌کند که با خشک شدن خاک و افزایش مکش، سرعت موج فشاری در آنها افزایش می‌یابد. این نکته به این دلیل رخ می‌دهد که افزایش مکش باعث افزایش قیدها و پیوندهای اسکلت خاک می‌شود که به افزایش سرعت امواج درونی می‌انجامد. هر چند که، این روند با افزایش شاخص خمیری کندتر خواهد بود. با افزایش شاخص خمیری خاک، عموماً دانسیته خشک در تراکم خاک‌ها کاهش و متعاقباً سرعت موج فشاری کاهش خواهد یافت. آزمایش‌ها در شرایط عدم حضور تنش محصورکننده انجام شده است و نتایج دربرگیرنده آثار تنش همه‌جانبه بر سرعت موج فشاری نیست.

$$V_p = \left[(1300PI)^{-0.29} \left(\frac{(0.46 + e_{comp})^{0.93}}{1 + e_{comp}} \right) \left(\frac{s}{s_{comp}} \right)^{0.09} \right] \quad (1)$$

لازم به ذکر است که رابطه ارائه شده به طور تجربی از برازش نتایج آزمایش‌های انجام شده بر خاک‌های ریزدانه چسبنده به دست آمده است. بنابراین رابطه قابلیت تخمین سرعت موج فشاری در خاک‌های با شاخص خمیری صفر را ندارد.

نتایج هماهنگی مقادیر اندازه‌گیری شده و رابطه در شکل (۶) برای خاک ZK1 ارائه شده است. هماهنگی مشابه برای خاک‌های ZK2 و ZK3 نیز به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) آمده است.

شکل ۶. مقایسه معادله تجربی با نتایج آزمایشگاهی برای

خاک ZK1

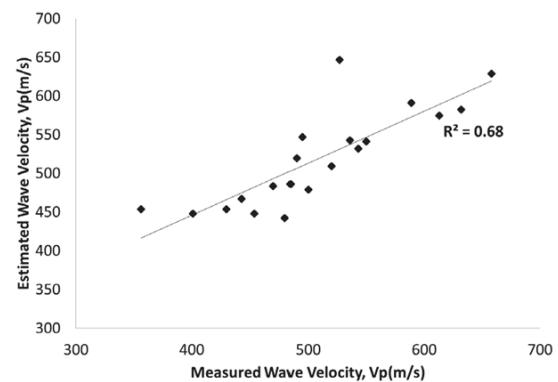


Fig. 6. Comparison of empirical equations with laboratory results for ZK1

شکل (۷) مقایسه معادله تجربی با نتایج آزمایشگاهی برای

خاک ZK2

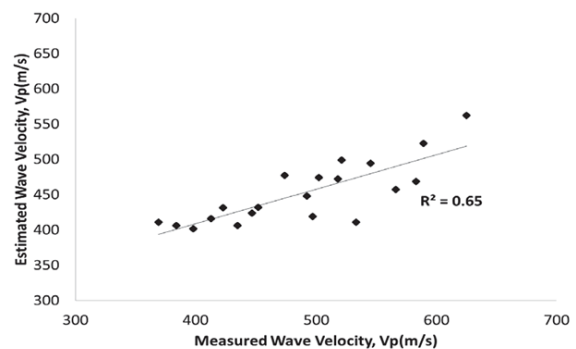


Fig. 7. Comparison of empirical equations with laboratory results for ZK2

- [11] Wei C. & Muraleetharan K. K. 2002 A continuum theory of porous media saturated by multiple immiscible fluids; I. Linear poroelasticity. *International Journal of Engineering Science*, 40, 1807-1833.
- [12] Muraleetharan K. K. & Wei C. 1999 Dynamic behaviour of unsaturated porous media: governing equations using the theory of mixtures with interfaces. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23, 1579-1608.
- [13] Biot M. A. 1955 Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, 26(2), 182-185.
- [14] Coussy O. 1955 *Mechanics of Porous Continua*. John Wiley & Sons.
- [15] Coussy O. 2004 *Poromechanics*. John Wiley & Sons.
- [16] Ashayeri I., Biglari M. & Kamalian M. 2014 Theory of seismic wave propagation for unsaturated soils. *Academy publish.org-wave propagation*, 513-539.
- [17] Adamo F., Attivissimo F., Fabbiano L., Giaquinto N. & Spadavecchia M. 2009 Velocity moisture relationships for sandy soil: experimental results and data analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, 58(2), 311-317.
- [18] Emerson M. & Foray P. 2006 Laboratory P-wave measurements in dry and saturated sand. *ActaGeotechnica*, 1, 167-177.
- [19] Xiao-qiang G., Jun Y. & Mao-song H. 2013 Laboratory investigation on relationship degree of saturation, B-value and P-wave velocity. *Journal of Central South University*, 20, 2001-2007.
- [20] Kumar J. & Madhusudhan B. N. 2012 Dynamic properties of sand from dry to fully saturated states. *Geotechnique*, 62(1), 45-54.
- [21] Karakul H. & Ulusay R. 2013 Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 981-999.
- [22] ASTM Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM standard D2487. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 2006.
- [23] Ladd R. S. 1978 Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16-23.
- [24] ASTM Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM standard D698, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 2007.
- [25] ASTM Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM standard D5298, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 1994.

نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد می‌کنند که ارتباطی بین رفتارهای حجمی و سرعت موج فشاری اندازه‌گیری شده در نتیجه تغییرات مکش وجود دارد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، در این مطالعه یک مدل تجربی توسعه داده شد. معادله توسعه یافته امکان تخمین مقدار سرعت موج فشاری در هر شرایط مکش دلخواه، با معلوم بودن شاخص خمیری و نسبت تخلخل نمونه در زمان تراکم ارائه می‌کند. رابطه برای خاک‌های ریزدانه چسبیده به دست آمده است و قابلیت تخمین سرعت موج فشاری در خاکهای با شاخص خمیری صفر را ندارد.

References

۹- مراجع

- [1] Gassmann F. 1951 Elastic waves through a packing of spheres. *Journal of Geophysical Research*, 16(4), 673-685.
- [2] Biot M. A. 1956 The theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid: I. Low frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 168-178.
- [3] Biot M. A. 1956 The theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid: II. Higher frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 179-191.
- [4] Brutsaert W. 1964 The propagation of elastic waves in unconsolidated granular mediums. *Journal of Geophysical Research*, 69, 243-257.
- [5] Berryman J. G., Thigpen L. & Chin R. C. Y. 1988 Bulk elastic wave propagation in partially saturated porous solids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(1), 360-373.
- [6] Wei C. L., Sposito G. & Majer E. 2007 Low-frequency dilatational wave propagation through unsaturated porous media containing two immiscible fluids. *Transport in Porous Media*, 68, 91-105.
- [7] Berryman J. G. & Lumley D. E. 1997 Inverting ultrasonic data on soil/ fluid mixtures for Biot-Gassmann parameters. *Stanford Exploration Project Rep*, 77, 249-260.
- [8] Brown J. S. & Korringa J. 1975 On the dependence of the elastic properties of a porous rock on the compressibility of the pore fluid. *Geophysics*, 40(4), 608-616.
- [9] Lacleire P., Cohen-Ténoudji F. & Aguirre-Puente J. 1994 Extension of Biot's theory of wave propagation to frozen porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 96(6), 3753-3768.
- [10] Carcione J. M., Gurevich B. & Cavallini F. 2000 A generalized Biot-Gassmann model for the acoustic properties of clayey sandstones. *Geophysical Prospecting*, 48(3), 539-577.

Empirical Modeling of Compressional Wave Velocity of Fine Grained Unsaturated Soils Subject to Drying

Mahnoosh Biglari*¹, Iman Ashayeri², Mokhtar Elyasi³

1. Mahnoosh Biglari, Assistant Professor, Civil Engineering Razi University, Kermanshah

2. Iman Ashayeri, Assistant Professor, Civil Engineering Razi University, Kermanshah,

3. Mokhtar Elyasi, MSc. Graduated student, Civil Engineering Razi University, Kermanshah

m.biglari@razi.ac.ir

Abstract:

Seismic wave propagation in surficial stratified soil and deep rock is studied in many engineering fields like Geotechnical earthquake engineering, Geophysics and seismology. Seismic waves might be generated by a significant seismic event, volume collapse in earth's mantle, chemical or nuclear explosions and surface impact sources. Although the seismic waves' path in soil layers may be shorter than their path in bedrock, they are influenced significantly by the mechanical properties of surficial soil layers. Soil layers may be saturated or not fully-saturated by a single fluid, which is known as unsaturated soil. Seismic waves generated at the source are known to be body waves of two categories (a) compressional wave (P-wave), (b) shear wave (S-wave). In spite of the abundance and deepness of theoretical analyses, experimental results on measuring the compressional waves in unsaturated soils and rocks are inadequate and mainly have focused on the relation between first compressional wave velocity and degree of saturation instead of suction. Furthermore, the experiments focus on the specimens of sandy soils and rocks with a series of repeated experiments in various degree of saturation conditions.

This paper presents the results of three series of ultrasonic tests carried out on fine grained soils. The soils chosen for experimental study are three commercial kaolin named ZK1, ZK2, and ZK3, from Zenoz mine in northwest Iran. These materials have plasticity index (IP) of 9%, 15%, and 19%, and classified as lean clay (CL), silt (ML), and elastic silt (MH) respectively according to Unified Soil Classification System. 15 specimens were compacted at different initial water contents and void ratios and subsequently allowed to dry gradually until air-dry. cylindrical samples, 50 mm in diameter and 100 mm high, were prepared in a mold by compacting a soil – distilled water mixture at proctor optimum dry density and another four points of standard proctor compaction curves; two at 0.5 kN/m³ less than optimum dry density in both dry and wet side of optimum water content point and two at 1 kN/m³ less than optimum dry density in dry and wet side of optimum water content point. All samples were compacted in seven layers using the under-compaction technique to ensure specimen homogeneity along the height. Measurements of compressional wave velocity (V_p) (using ultrasonic) and matrix suction (using the filter paper technique), together with water content, were made at various stages during the drying process (4 times for each specimens; at the time of making the sample and after 4, 8, and 16 hours). The results of the tests suggest that, as a soil dries, its compressional wave velocity increases with increasing suction. The results imply that in prediction of compressional wave velocity the effectiveness of void ratio must be considered as well as the suction effects. Both compressional wave velocity (V_p) and the corresponding suction (s), have been shown to vary in consist and predictable manner as a function of the initial void ratio at compaction state (e_{comp}), the suction and the soil's plasticity index (PI). Thus, an empirical expression was developed which permits estimation of the value of compressional wave velocity, V_p of compacted fine grained soils subject to drying at the suction and material properties expected in prototype conditions.