

## مطالعه و مقایسه رفتار تراکمی خاک های دانه ای توسط امواج فراصوت و دستگاه طراحی شده چکش ضربه

حمیدرضا صبا<sup>۱</sup>، بهروز حلیمی<sup>۲\*</sup>، سعید جعفری مهرآبادی<sup>۳</sup>، سعید سعیدی جم<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> نام دانشکده، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

<sup>۲</sup> نام دانشکده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

<sup>۳</sup> نام دانشکده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ آذر ۱۳۹۵  
بازنگری: ۳۰ فروردین ۱۳۹۸  
پذیرش: ۱ شهریور ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۴ شهریور ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

امواج فراصوت  
دستگاه چکش ضربه  
میزان تراکم  
اعداد افقی و قائم چکش ضربه

**چکیده:** به دست آوردن پارامترهای رفتاری خاک همواره از دغدغه های اولیه در علم مکانیک خاک<sup>۱</sup> بوده است. این پارامترها اغلب در آزمایشگاه یا به صورت تست صحرایی<sup>۲</sup> به دست می آیند [۱]. این آزمایشات معمولاً نیاز به تجهیزات خاص، زمان و دقت عمل زیاد دارند که این موارد را می توان به عنوان محدودیت به حساب آورد. هدف از ارائه این مقاله معرفی روشی برای اندازه گیری تراکم خاک های دانه ای<sup>۳</sup> (مخلوط)، متشکل از ماسه<sup>۴</sup> ۸۰٪ و رس<sup>۵</sup> ۲۰٪، بدون انجام آزمایشات مفصل صحرایی و آزمایشگاهی می باشد. در این مقاله چکشی مشابه چکش اشمیت<sup>۶</sup> معرفی می شود که توسط آن می توان رفتار تراکمی خاک را با یک ضربه محاسبه کرد، این چکش ابداعی به اسم چکش ضربه RH نامیده می شود. از طرفی نتایج حاصل از چکش ضربه با نتایج تست فراصوت نیز مقایسه می شود. در این پژوهش از امواج فشاری یا اولیه<sup>۷</sup> استفاده شده است [۲] زیرا امواج فشاری نسبت به امواج برشی یا ثانویه<sup>۸</sup> دارای سرعت بیشتری بوده و از نظر سهولت در انتشار و بازگشت امواج نسبت به امواج برشی دارای برتری می باشد [۳]. ابتدا با استفاده از آزمایش تراکم اصلاح شده پروکتور<sup>۹</sup> که در استاندارد آشتو<sup>۱۰</sup> معرفی شده است مدل سازی مصالح انجام گرفته [۴] و در ادامه مصالح با محدوده دانه بندی<sup>۱۱</sup> مشخص و بر اساس پارامترهای کیفی نظیر درصد تراکم و درصد رطوبت های طبیعی و بهینه<sup>۱۲</sup> در معرض امواج فشاری دستگاه فراصوت بصورت مستقیم قرار گرفته اند [۶] و همزمان توسط دستگاه چکش ضربه تراکم سنجی می شوند [۵]. براساس نتایج حاصل از سرعت و زمان عبور امواج و تست ضربه در جهات افقی و قائم در پروسه افزایش تراکم با فراوانی بیش از سی بار تکرار، بدون هرگونه آزمایش صحرایی - آزمایشگاهی و با کاهش خطاهای انسانی و دستگاهی امکان انجام آزمایشات با فراوانی بیشتر در زمان کوتاهتر، با استفاده از نمودارهای کالیبره و روابط همبستگی و براساس نمونه فولادی مینا، درصد تراکم خاک بدست خواهند آمد [۲].

### ۱- مقدمه

های موجود می باشد [۱]. در بین پارامترهای فیزیکی و خصوصیات انواع خاک قابلیت تراکم پذیری<sup>۱۳</sup> آنها یکی از موارد مهم و قابل بحث می باشد [۴]. از طرفی میزان تراکم خاک و تاثیر آن بر ویژگی های اساسی خاک مانند قابلیت نشست پذیری<sup>۱۴</sup> و نفوذپذیری<sup>۱۵</sup> حائز اهمیت می باشد. همچنین بررسی میزان تراکم خاک ها مستقل از بررسی تغییرات وزن مخصوص<sup>۱۶</sup> و تخلخل<sup>۱۷</sup> به همراه تغییرات درصد رطوبت نمی باشد [۱].

در علم مهندسی خاک، بسیاری از پارامترهای رفتاری خاک از طریق عملیات آزمایشگاهی ویا صحرایی بدست می آیند که در این میان همواره زمان نسبتاً زیاد در انجام آزمایشات و هزینه بر بودن آن ها و نیاز به تخصص و دقت لازم جهت دستیابی به نتایج قابل قبول کم و بیش یکی از دغدغه

در سال ۲۰۰۹ روبرت بابی و مارک آلی و دیگر همکاران ایشان در دانشگاه تکنولوژی ویرجینیا در خصوص هدایت الکتریکی خاک های رسی،

\*نویسنده عهده دار مکاتبات: Behrooz.halimi@yahoo.com

- 10 AASHTO Standard
- 11 Gradation
- 12 optimal moisture content
- 13 Compactibility
- 14 Settlement
- 15 Permeability
- 16 Specific Weight
- 17 Porosity

- 1 Soil Mechanics
- 2 Field Test
- 3 Coarse Grained
- 4 Sand
- 5 Clay
- 6 Schmidt Hammer
- 7 Pressure waves/ Primary waves
- 8 Shear waves/ Secondary waves
- 9 Modified Proctor compaction test

ماسه‌ای و سیلتی تحقیقات فراوانی برای بدست آوردن تغییرات ظرفیتی کاتیون‌ها- کنترل مقادیر فشار آب حفره‌ای در اعماق خاک‌های رسی- تعیین ضخامت لایه‌ها و دیگر پارامترهایی از این قبیل را توسط ماشین‌های کشنده و خودکاری چون Truck pulling که مجهز به حسگرهای هدایت الکتریکی<sup>۱</sup> بودند را به انجام رساندند [۷].

در ادامه تحقیقات انجام یافته در این خصوص در سال ۲۰۱۲ یکی از محققین دانشگاه فلوریدا به نام رافائل کارپنا، توانست که توسط حسگرهای TDR<sup>۲</sup> نسبت به تعیین پارامترهایی چون: درصد رطوبت- درجه حرارت- میزان انقباض و جمع شدگی- میزان تورم- انرژی پالس‌های عبوری از داخل لایه‌های خاک و دیگر مشخصاتی از این قبیل در عمقی به شعاع تا ۴ اینچ از راه ارسال امواج و توسط حسگرهای ذکر شده تست و نیز توسط حسگرهای GMS اقدام به اندازه‌گیری این گونه پارامترها در خاک‌های دانه ای نماید.

در ادامه و در سال ۲۰۱۲ دانشمندان و محققینی از دانشگاه Delft واقع در کشور نیوزلند توسط روش صحرایی آزمایش (CPTU) و با کمک پروب‌های موجود الکتریکی اقدام به تعیین وزن مخصوص- چگالی- فشار آب حفره‌ای- ضرایب زاویه اصطکاک خاک و چسبندگی و ... نمودند [۸]. در سال ۲۰۱۳ فریرو و دوستان ایشان از سوی انجمن علمی خاک آمریکا یک سری تحقیقات در زمینه تعیین چگالی حجمی - میزان پتانسیل نفوذ آب در خاک بر روی نمونه‌های مخلوط شده (دست خورده) انجام دادند [۹]. در سال ۲۰۱۲ - ۲۰۱۳ دانشجویان دانشگاه صنعتی اصفهان، توسط حسگرهای Integrated شرایط آزمایشات صحرایی را توسعه دادند و توانستند مقاومت خاک‌های رسی و سیلتی را در عمق تا ۳۰ سانتی متری توسط آن حسگرها و مقایسه با نتایج Cone Index تعیین و اندازه‌گیری نمایند [۱۰].

در سال ۲۰۱۴ و در دانشگاه مالزی، تحقیقاتی در خصوص تعیین پارامترهای سختی خاک در حفاری‌های عمیق و در منطقه Kenny Hill انجام شد که در این تحقیقات روابط همبستگی بین نتایج آزمایش SPT با نرم افزارهای طراحی Plaxis و به روش مدل رفتاری Hardening Soil مورد ارزیابی قرار گرفت. که در ادامه پارامترهایی چون: سختی ادومتری- اعداد نفوذ استاندارد - سختی سه محوری خاک و اعداد تغییر مکان افقی در زون‌های مختلف منطقه با یکدیگر مقایسه شد و توانستند روابط همبستگی خوبی بین کلیه نتایج بدست آورند [۱۱].

در سال ۲۰۱۴ محققین سوئیسی پارامترهایی چون: نسبت پواسون- تنش‌های قائم موجود- مدول الاستیسیته- وزن مخصوص و دیگر ضرایب موثر و ... را در محدوده رفتار الاستیک خاک و بروش توزیع تنش بوسینسک و در عمق ۳۰ تا ۷۰ سانتی متری از سطح زمین از طریق آنالیز عددی و مطالعات صحرایی و از روش انتقال تنش‌های عمودی توسط

1 Electrical Conductivity  
2 Time-Domain Reflectometry

تایرهای ماشین‌های کشاورزی در محل با هم مقایسه نمودند [۱۲]. در سال ۲۰۱۴ و از روش‌های اجزاء محدود سه بعدی دانشمندان و محققین دانشگاه شهرکرد توانستند مقایسه‌ای در خصوص نفوذ سنج‌های افقی و زاویه دار (PR) بر اندرکنش خاک‌های رسی سیلت دار در محل و آزمایشگاه ارائه و از روی مدل‌سازی‌های صورت گرفته بروش مدل رفتاری (دراکر پراگر) توانستند پارامترهای مقاومتی خاک‌ها را اعم از: چگالی حجمی- درصد رطوبت- مدول یانگ- نسبت پواسون- فشار تک محوری و دیگر پارامترهای پلاستیسیته خاک را تخمین بزنند [۱۳].

در سال ۲۰۱۴ نیز روشی توسط دانشمندان استرالیا برای تعیین مقاومت فشاری مصالح در حال زوال (به طور مثال خاک در حال ریزش) که توسط روشی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های سرعت موج برشی در محل انجام می‌گرفت در شرایط کنترلی میزان زوال این گونه نهشته‌ها بررسی و پس از آنالیز توسط اضافه کردن سیمان برای سیمانته شدن زون‌های در حال گسیختن (زوال) تزریق انجام می‌گرفت که در انتهای تحقیق میزان در صد سیمان تزریق شده اختلاط بهینه برابر با ۲۰٪ بدست آمده است [۱۴].

در این مقاله در مرحله اول پارامترهای کیفی خاک و علی‌الخصوص نسبت تراکم<sup>۳</sup> از روی مقدار سرعت انتشار امواج فشاری که توسط دستگاه فراصوت داده می‌شود به دست می‌آید [۲]. در مرحله دوم با انجام تست ضربه در جهات افقی و عمودی توسط چکش RH سختی خاک محاسبه میشود. در این روش نسبت تراکم نیز از روی این سختی قابل محاسبه است. در مرحله آخر با مقایسه نتایج دستگاه فراصوت و دستگاه چکش ضربه، قادر خواهیم بود تا درصد تراکم خاک‌ها ی درشت دانه و از نوع نمونه مخلوط ساخته شده بر اثر امواج فشاری و ضربه ای را بدست آورده و از طریق روابط همبستگی ارتباط بین نتایج را تعیین و صحت سنجی کنیم [۱۵].

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

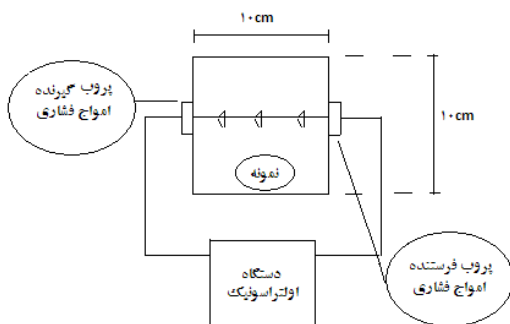
در این قسمت به معرفی دو روش مختلف جهت محاسبه سختی خاک خواهیم پرداخت.

۲-۱- انجام آزمایشات توسط فراصوت بر روی خاک دانه ای  
آزمایش تراکم اصلاح شده<sup>۴</sup> در قالب ۴ اینچ<sup>۵</sup> (روش C) روی نمونه خاک مخلوط از ۸۰٪ ماسه + ۲۰٪ رس بر روی چندین نمونه با رطوبت و وزن مخصوص مشخصی انجام شده است [۴].

منحنی وزن مخصوص خشک نسبت به درصد رطوبت « $\gamma_d - \omega$ » که منحنی تراکم نامیده میشود در شکل ۱ نشان داده شده است [۴]. با توجه به این شکل وزن مخصوص خشک حداکثر  $2/22 \text{ gr/cm}^3$  و درصد رطوبت بهینه نظیر آن برابر با  $7/35$  درصد می باشد.

3 Compression Ratio  
4 Modified Proctor compaction test  
5 4-inch-diameter mold

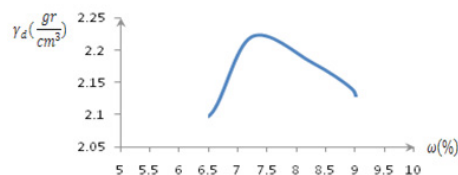
باید دقت شود که با توجه به محدود بودن شعاع امواج منتشر شده در نمونه ها و سرعت بالای امواج فشاری در نمونه های متراکم شده ابعاد نمونه ها با ابعاد نمونه های مورد آزمایش تراکم استاندارد در آزمایشگاه متناسب می باشد. طوری که استفاده کاربردی از نتایج منوط به طول و بعد حداکثر ۱۰ cm خاک و مشابهت با نوع مصالح استفاده شده در تحقیق شامل ( مصالح دانه ای مورد آزمایش تحقیق ) خواهد بود (شکل ۳) [۲].



شکل ۳: شماتیک مدار دستگاه فراصوت و ابعاد نمونه خاک متراکم

Fig. 3. Ultrasonic Circuit Schematic and Density Sample Dimensions

هر نمونه دارای رطوبت و وزن مخصوص مشخصی است که میانگین مناسبی از قرائت های سرعت و زمان حاصل از دستگاه میباشد. در ادامه با وجود چهار پارامتر اساسی شامل درصد رطوبت ، وزن مخصوص ، میانگین سرعت عبور امواج فشاری و زمان عبور امواج می توان بررسی های کیفی را بر روی انواع نمونه ها به لحاظ تنوع درصد رطوبت و تراکم انجام داد. شکل ۴ تغییرات سرعت موج فشاری بر حسب تغییرات وزن مخصوص در نمونه ها را نشان می دهد. این شکل مبین روند صعودی مقادیر سرعت موج فشاری در ازای افزایش وزن مخصوص خواهد بود [۱۷]. لازم به ذکر است که اگر امواج فشاری در محدوده سرعت ۶۴۰ m/s و بیشتر از آن بدست آید می توان نتیجه گرفت که در محدوده تراکم حداکثر این نوع مصالح قرار داریم (این عدد از برازش خط در شکل ۴ و نتایج حاصل از نمودارهای شکل ۱۲ و شکل ۱۳ تعیین شده است که البته در نقاطی از روند تحقیق به دلیل تغییرات رطوبت، دارای انحراف نیز می باشد) [۱۸].



شکل ۱: منحنی تراکم خاک دانهای

Fig. 1. Grain Soil Density Curve

برای آنکه بتوان نمونه های خاک را تحت تاثیر عبور امواج فشاری قرار داد لازم است که نمونه های خاک بصورت کامل از قالب خارج شوند. لذا نمونه های خاک مطابق با ابعاد و شرایط تراکمی مختلف (نمونه ۷) مختلف آزمایشگاهی با تراکم های از ۹۳٪ تا ۹۸٪ با اختلاف رطوبت از ۲٪ تا حداکثر ۵٪) ساخته شده و از قالب خارج می گردند و پس از توزین مطابق شکل ۲ با حفظ رطوبت و شرایط سطحی لازم در جهت افقی و بصورت مستقیم در معرض عبور امواج فشاری حاصل از دستگاه فراصوت قرار میگیرند. سرعت عبور امواج (V) و زمان عبور (t) حداقل ده بار اندازه گیری شده و در تمامی قرائت ها جهت عدم ایجاد پراکندگی و خطای امواج فرستنده و گیرنده در سطوح مرزی نمونه ها که در تماس با پروب های فرستنده و گیرنده دستگاه هستند از ژل استاندارد استفاده شده است (شکل ۲) [۱۶].

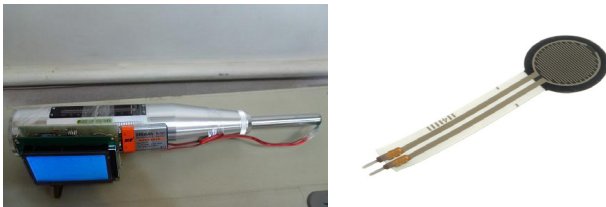


شکل ۲ آماده سازی نمونه خاک متراکم شده (بالا) و عبور امواج فراصوت از نمونه بصورت مستقیم (پایین)

Fig. 2. Preparation of dense soil samples (up) and ultrasonic transitions from the sample directly (down)

## ۲-۲- انجام آزمایشات توسط دستگاه چکش ضربه بر روی خاک دانه ای

در این قسمت به معرفی دستگاه طراحی شده جدیدی به نام چکش ضربه RH خواهیم پرداخت که در شکل ۶ قابل مشاهده است. این چکش با تغییر اساسی چکش اشمیت آنالوگ طراحی شده است به طوری که با فنر داخلی نرم تر و وزنه داخلی سبک تر ضربه به مراتب کوچکتری بر سطح خاک وارد میکند و با استفاده از حسگری که در انتهای آن تعبیه شده است قادر به محاسبه پارامترهائی همچون تراکم، وزن مخصوص و سختی سطوح مصالح خاکی می باشد. بطوری که با زدن تنها چند ضربه و قرائت اعداد چکش در جهات افقی و قائم می توان خصوصیات تراکمی مصالح را به دست آورد [۲۲].

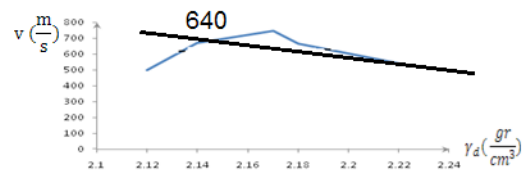


شکل ۶: حسگر FSR (سمت راست)، دستگاه چکش ضربه الکترونیکی (سمت چپ)

Fig. 6. FSR Sensor (Right), Elliptical Hammer (Left)

در ابتدا لازم است تا جزئیات دستگاه ابزار دقیق چکش ضربه معرفی شده و سپس روند انجام آزمایشات تشریح گردد. در انتهای چکش ساخته شده از حسگرهای بسیار حساسی با نام مقاومت حساس به نیرو<sup>۴</sup> در یک مدار الکتریکی استفاده شده است که متناسب با فشار وارد شده ولتاژی را تولید می کند. این حسگر در شکل ۶ نمایش داده شده است. خروجی حسگر FSR از جنس مقاومت است که این مقاومت پس از تبدیل به ولتاژ ابتدا توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال<sup>۵</sup> (ADC) میکروکنترلر AVR خوانده می شود و سپس بعد از انجام یک سری محاسبات ریاضی، مقدار مقاومت فشاری خاک بر روی یک نمایشگر LCD نمایش داده می شود [۲۳].

در شکل ۷ شماتیک چکش ضربه در سه حالت مختلف را نشان می دهد. در حالت ۱ به چکش هیچگونه فشاری وارد نشده و فنر داخلی در وضعیت بدون تحریک قرار دارد، اگر میله انتهایی چکش را به سطح خاک چسبانده و فشار وارد کنیم فنر داخلی چکش کشیده شده و نهایتاً دستگاه در حالت ۲ قرار می گیرد. در انتهای حالت ۲ ضامن<sup>۶</sup> چکش رها شده و وزنه شلیک می شود و

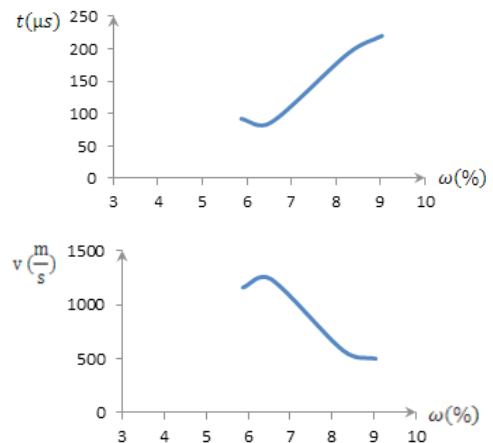


شکل ۴: تغییرات سرعت عبور موج فشاری در نمونه متراکم شده خاک نسبت به تغییرات وزن مخصوص خشک

Fig. 4. The variations of the compressive velocity of the compressed wave in the soil compacted sample relative to the dry weight variation

جهت کالیبره نمودن و همچنین صحت سنجی<sup>۱</sup> عملیات از نمونه استاندارد فولادی مبنای استفاده شده است که با توجه به عدم وجود تخلخل در آن، سرعت عبوری از نمونه استاندارد حدوداً بیش از ۴ برابر سرعت ماکزیمم در نمونه خاک بدست آمد که این تفاوت نشان از وجود تخلخل در خاک ها حتی در متراکم ترین حالت دارد [۱۹].

در انجام این تحقیق نیاز به دقت نظر خاصی در خصوص تعدیل و نرمالیزه کردن اعداد قرائت شده حاصل از امواج گیرنده دستگاه فراصوت می باشد، زیرا در محدوده رطوبت های پهنه و نزدیک به آن نتایج مناسب می باشد در حالی که در رطوبت های بالاتر از حدود ۶/۵ درصد به دلیل خاصیت پلاستیسیته خاک رس<sup>۳</sup> موجود در مخلوط متراکم شده باعث خروجی های غیر خطی شده است [۲۰] که تفسیر آن ها در این مقاله نمی گنجد (شکل ۵) [۲۱].



شکل ۵: تغییرات زمان عبور امواج نسبت به تغییرات رطوبت خاک (بالا) و تغییرات سرعت عبور امواج نسبت به تغییرات رطوبت خاک (پایین)

Fig. 5. Changes in wavelengths transmitted to soil moisture changes (up) and changes in the velocity of waves relative to soil moisture changes (down)

4 Force Sensing Resistor (FSR)

5 Analogue Digital Convertor (ADC)

6 Pawl

1 Validating

2 Standard steel round bar

3 plasticity of clay

وضعیت ۳ (در هنگام اعمال ضربه به سطح خاک) می‌پردازیم. برای این منظور از قانون پایستگی انرژی استفاده می‌کنیم:

مجموع انرژی چکش در حالت ۳ = مجموع انرژی چکش در حالت ۲  
 بسته به اینکه چکش به صورت افقی یا عمودی استفاده شود بررسی انرژی‌ها به دو صورت امکان پذیر است. در حالت افقی با فرض نقطه ثقل وزنه در حالت ۱ به عنوان مبدأ پتانسیل داریم:

انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنر فشرده شده + انرژی جنبشی وزنه در حالت حرکت = انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنر کشیده شده

$$1/2 k\Delta x_1^2 = 1/2 mv^2 + 1/2 k\Delta x_2^2$$

با استفاده از داده‌های جدول ۱ داریم:

$$\frac{1}{2} 30(0.08)^2 = \frac{1}{2} 0.05v^2 + \frac{1}{2} 30(0.04)^2$$

$$v^2 = 2.9 \rightarrow v = 1.7 \text{ m/s}$$

$$E = 1/2 30(0.08)^2 = 0.1 \text{ J}$$

$$f = k\Delta x_2 = ma \rightarrow a = (k\Delta x_2)/m = 30(0.08)/0.05 = 48 \text{ m/s}^2 = 5g$$

در حالت عمودی با فرض نقطه ثقل وزنه در حالت ۳ به عنوان مبدأ پتانسیل داریم:

انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنر فشرده شده + انرژی جنبشی وزنه در حالت حرکت = انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنر کشیده شده + انرژی پتانسیل وزنه m نسبت به مبدأ

$$mg(\Delta x_1 + \Delta x_2) + 1/2 k\Delta x_1^2 = 1/2 mv^2 + 1/2 k\Delta x_2^2$$

بار دیگر با استفاده از داده‌های جدول ۱ داریم:

$$0.05 \times 10 \times (0.08 + 0.04) + \frac{1}{2} 30(0.08)^2 = \frac{1}{2} 0.05v^2 + \frac{1}{2} 30(0.04)^2$$

$$v^2 = 5.3 \rightarrow v = 2.3 \text{ m/s}$$

$$E = 0.05 \times 10 \times (0.08 + 0.04) + 1/2 30(0.08)^2 = 0.16 \text{ J}$$

$$f = k\Delta x_2 + mg = ma \rightarrow a = (k\Delta x_2)/m + g = 30(0.08)/0.05 + g = 6g$$

همانطور که مشاهده می‌شود در حالت ایستاده انرژی بیشتری به سطح خاک انتقال پیدا می‌کند.

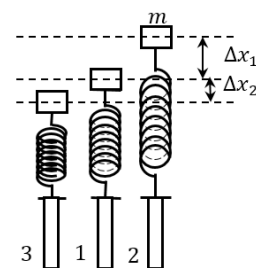
در شکل ۸ نمونه خاک‌های خشک شده (با درصد رطوبت‌های کمتر از ۱٪) و متراکم مورد استفاده در این آزمایش نشان داده شده است [۲۴]. در این مرحله توسط چکش ضربه RH ضرباتی مطابق شکل ۹ در جهات افقی و قائم بر نمونه‌های خاک اعمال می‌کنیم. این ضربات در هر جهت به تعداد ۶ بار اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که روش مذکور قبلاً توسط آزمایش‌های مرجعی چون برش مستقیم<sup>۲</sup>، سندباتل<sup>۳</sup> و آزمایش تراکم آشتو اصلاح شده<sup>۴</sup> خاک کالیبره شده اند.

2 Direct Shear

3 Sand Bottle

4 Modified Aashto Density Test

در کسری از ثانیه فنر داخلی فشرده شده و چکش در حالت ۳ قرار گرفته و بر سطح خاک ضربه ای وارد میکند.



شکل ۷: دستگاه چکش ضربه در سه حالت مختلف

Fig. 7. Impact hammer machine in three different modes

پارامترهای چکش ضربه در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی مواد اولیه

Table. 1. Impact hammer parameters

مقدار	پارامتر
۳۰ N/m	سختی فنر
۵۰ g	وزن جرم
۸ cm	حداکثر کشیدگی
۴ cm	حداکثر فشردگی

روند کار با دستگاه چکش ضربه به طور خلاصه به این صورت می‌باشد که ابتدا میله چکش بخوبی بر روی سطح خاک مورد نظر قرار داده می‌شود سپس کاربر با استفاده از رابط گرافیکی، دستور اجرای فرایند را صادر می‌کند. با اعمال فشار به چکش، میله توسط وزنه داخلی ضربه ای به سطح خاک وارد می‌کند. حسگرهای مقاومتی و ولتاژی چکش، میزان ضربه اعمال شده را محاسبه می‌کنند و سپس توسط مدارهای الکترونیکی خروجی این حسگرها به خروجی استاندارد تبدیل می‌شود. خروجی استاندارد با استفاده از مبدل ADC به میکروکنترلر داده می‌شود و میکروکنترلر با استفاده از نتایج حسگرها به محاسبه مقاومت فشاری<sup>۱</sup> می‌پردازد و نهایتاً مقاومت فشاری به دست آمده توسط میکروکنترلر بر روی LCD نمایش داده می‌شود.

در ادامه به محاسبه سرعت، شتاب و انرژی وزنه انتهایی چکش در

1 Compressive Strength

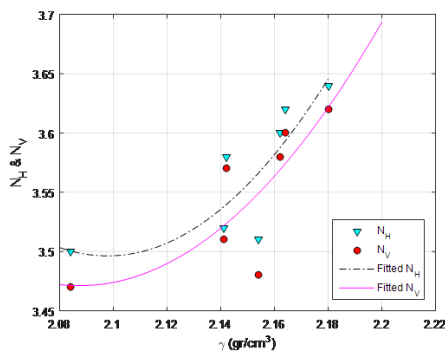


همانطوری که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشخص است اعداد قرائت شده از چکش ضربه  $(N_H, N_V)$  با افزایش نسبت تراکم افزایش یافته اند. مگر در شرائتی که درصد رطوبت بالاتر از درصد رطوبت بهینه باشد که در این حالت باعث کاهش در روند نتایج عددی خواهیم بود.

در این اشکال روند افزایش اعداد چکش در جهات افقی و عمودی طبق نتایج به دست آمده در آزمایشگاه و از روی معادلات برازشی با افزایش وزن مخصوص همراه است و رابطه مستقیم بین اعداد بزرگتر چکش با تراکم بیشتر نمونهها را نشان می‌دهد. کاربرد عملی اینگونه نتایج به وضوح آشکار می‌کند که با انجام تست صحرائی بر روی مصالح دانه‌ای مشابه با تحقیق حاضر، چکش ضربه قادر به محاسبه پارامترهای مؤثر و اساسی نظیر وزن مخصوص و درصد تراکم در کمترین زمان ممکن خواهد بود.

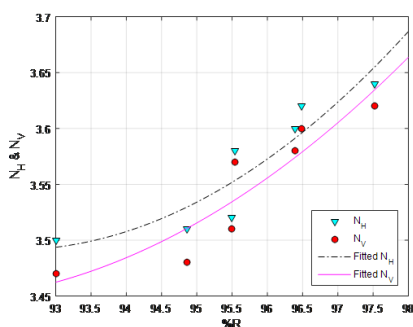


شکل ۸: نمونه خاک‌های متراکم شده برای آزمایش چکش ضربه  
Fig. 8. Sample Soil Samples for Impact Hammer Test



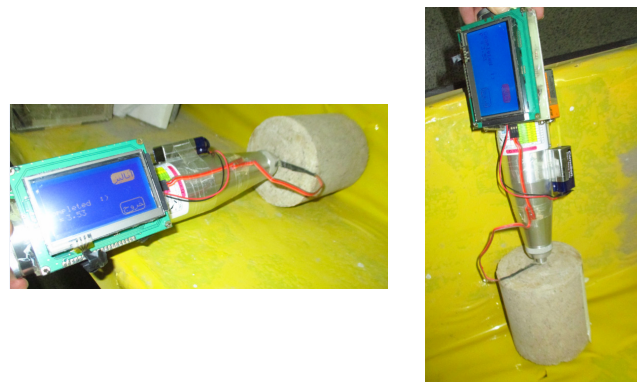
شکل ۱۰: رابطه وزن مخصوص با اعداد افقی  $(N_H)$  و عمودی  $(N_V)$  قرائت شده توسط چکش

Fig. 10. The ratio of specific gravity with horizontal numbers  $(N_H)$  and vertical  $(N_V)$  read by a hammer



شکل ۱۱: رابطه تراکم با اعداد افقی  $(N_H)$  و اعداد عمودی  $(N_V)$  قرائت شده توسط چکش

Fig. 11. The relationship between density with horizontal numbers  $(N_H)$  and vertical numbers  $(N_V)$  read by a hammer



شکل ۹: آزمایش ضربه بر روی نمونه خاک متراکم در جهت افقی (سمت راست) و جهت قائم (سمت چپ)

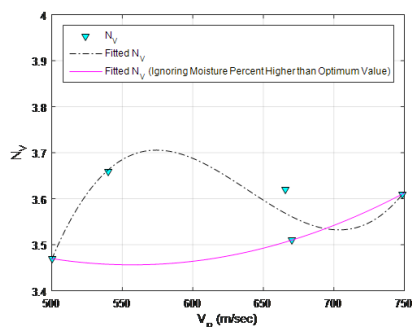
Fig. 9. Impact test on dense soil sample in horizontal direction (right) and vertical direction (left side)

پارامترهای مؤثر مکانیکی و فیزیکی نیز در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای مؤثر مکانیکی و فیزیکی

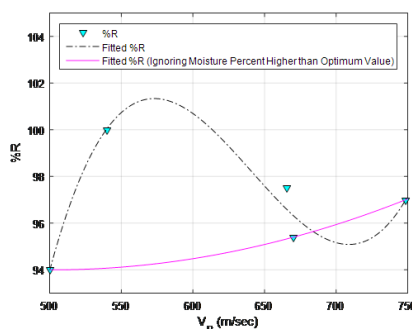
Table. 2. Effective mechanical and physical parameters

پارامتر	توضیح
$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	وزن مخصوص
%R	نسبت تراکم
$N_V$	عدد چکش ضربه در جهت قائم
$N_H$	عدد چکش ضربه در جهت افقی
$V_p$ (m/s)	سرعت موج فشاری



شکل ۱۳: رابطه سرعت موج فشاری با اعداد قائم ( $N_v$ ) قرائت شده توسط چکش با تأثیر و بدون تأثیر درصد رطوبت بالاتر از بهینه

Fig. 13. The ratio of the velocity of the compressive wave with the vertical numbers ( $N_v$ ) read by the hammer with the effect and without the effect of higher moisture content than the optimum



شکل ۱۴: رابطه تراکم با سرعت موج فشاری با تأثیر و بدون تأثیر درصد رطوبت بالاتر از بهینه

Fig. 14. The relationship between compression and compressive velocity with and without the effect of moisture content is higher than optimum

### ۳-۳ - نتیجه گیری

در این مقاله محاسبه پارامترهای مؤثر خاک دانه‌ای (وزن مخصوص و درصد تراکم) با دو روش مختلف انجام شد. در روش اول از دستگاه فراصوت و امواج فشاری و در روش دوم از دستگاه جدیدی با نام چکش ضربه RH استفاده شد. این چکش شباهت زیادی به چکش اشمیت دارد و به واسطه حسگرهای داخلی محاسبه پارامترهایی همچون مقاومت فشاری خاک را ممکن می‌سازد. چند نتیجه مهم حاصل از آزمایشات به شرح زیر است:

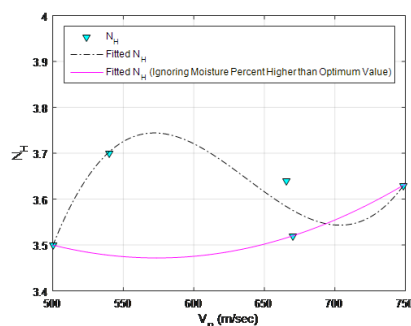
- در نمونه‌های دارای ریز دانه، افزایش سرعت و کاهش زمان انتشار امواج با افزایش وزن مخصوص و تراکم تنها در محدوده‌ی مشخصی اتفاق

### ۲-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاصل از دستگاه فراصوت و دستگاه چکش ضربه

قبل از مقایسه ذکر این نکته مهم است که در این تحقیق سعی بر آن بوده است که عملیات آزمایشگاهی توسط دستگاه‌های فراصوت و چکش ضربه RH بر روی نمونه‌ها حتی المقدور در شرایط تراکمی بالاتر از ۹۰٪ صورت پذیرد چرا که جنبه‌های کاربردی تراکم مدنظر بوده است. همانطور که از نمودارهای قسمت قبل نیز مشخص است تمامی اعداد قرائت شده چکش ضربه در جهت افقی و قائم از عدد ۳,۲۰ بزرگتر هستند که این نشان از حداقل تراکم ۹۰٪ می‌باشد.

در مرحله آخر با مقایسه نتایج دستگاه فراصوت و چکش ضربه قادر خواهیم بود تا از روی معادلات و روابط همبستگی حاکم بر نتایج حاصل از آزمایشات انجام یافته در زمینه‌های تراکم، سرعت موج فشاری، اعداد افقی و قائم چکش با داشتن تنها یکی از این پارامترها، پارامترهای دیگر را تخمین زد. نتایج در شکل ۱۲، شکل ۱۳ و شکل ۱۴ آورده شده است.

این نمودارها نشان می‌دهد با افزایش اعداد قرائت شده چکش ضربه، درصد تراکم خاک و سرعت موج فشاری افزایش می‌یابد. البته در رطوبت‌های بالاتر از رطوبت بهینه (رطوبت بیشتر از ۷/۵٪) این روند افزایشی به کاهشی تبدیل می‌شود. مصالح به کار برده شده در این تحقیق همگنی مناسبی در انجام تمامی مراحل آزمایشگاهی داشته‌اند بنابراین به سهولت و با دقت بالایی می‌توان نسبت به ارتباط و هماهنگی بین نمودارهای خروجی برای تعیین مقادیر متفاوت پارامترهایی چون تراکم، وزن مخصوص، سرعت موج فشاری، اعداد چکش افقی و قائم و تا حدی درصد رطوبت خاک اظهار نظر کرد.



شکل ۱۲: رابطه سرعت موج فشاری با اعداد افقی ( $N_H$ ) قرائت شده توسط چکش با تأثیر و بدون تأثیر درصد رطوبت بالاتر از بهینه

Fig. 12. The ratio of the velocity of the compressive wave with the horizontal numbers ( $N_H$ ) read by the hammer with the effect and without the effect of higher moisture content than the optimum

- [6] Gazavi, M. And Shahmandi, "Final Report of Geotechnical Studies of Isfahan City Projects", (in Persian) Isfahan, 2013.
- [7] Grisso, Robert and Alley, Mark, "soil electrical conductivity", Virginia Tech, 2009.
- [8] Lundberg, A. Beijer, J. Dijkstra, F. van Tol, and W. Broere. "Investigation of in-situ soil density change by resistivity measurements." (2012).
- [9] Paz-Ferreiro, J., M. de A. Marinho, L. F. S. da Silva, S. T. Motoshima, and R. da Silva Dias. "The effects of bulk density and water potential on multifractal characteristics of soil penetration resistance microprofiles measured on disturbed soil samples." *Vadose Zone Journal* 12, no. 3 (2013).
- [10] Hemmat, A., A. R. Binandeh, J. Ghaisari, and A. Khorsandi. "Development and field testing of an integrated sensor for on-the-go measurement of soil mechanical resistance." *Sensors and Actuators A: Physical* 198 (2013): 61-68.
- [11] Law, Kim Hing, Siti Zulaikha Othman, Roslan Hashim, and Zubaidah Ismail. "Determination of soil stiffness parameters at a deep excavation construction site in Kenny Hill Formation." *Measurement* 47 (2014): 645-650.
- [12] Keller, Thomas, M. Berli, S. Ruiz, Mathieu Lamandé, J. Arvidsson, Per Schjønning, and A. P. S. Selvadurai. "Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations." *Soil and Tillage Research* 140 (2014): 106-117.
- [13] Naderi-Boldaji, Mojtaba, Reza Alimardani, Abbas Hemmat, Ahmad Sharifi, Alireza Keyhani, Mehari Z. Tekeste, and Thomas Keller. "3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction. Part II: Soil bin verification of the model in a clay-loam soil." *Soil and Tillage Research* 144 (2014): 211-219.
- [14] Hanumantha Rao, B., and Taradutta Panda. "A methodology for determining crushing strength of stabilized waste from shear wave velocity." *International Journal of Geotechnical Engineering* 8, no. 1 (2014): 84-93.
- [15] Das, Braja M., and Khaled Sobhan. *Principles of geotechnical engineering*. Cengage Learning, 2013.
- [16] Ali Zadeh, A. Rezaei, p. Farrokhzad, F, "Application of microtremors in seismic microzonation" (Case study: Town of Babol), The first national conference on the improvement and (in Persian) rehabilitation of urban tissues in the vicinity of active faults, Tabriz, 2012.

می افتد ( در درصد های رطوبت بهینه و کمتر از آن ) که ناشی از خواص پلاستیسیته رس ها می باشد.

- با حفظ شرایط سطحی و مشابهت مصالح از طریق روابط همبستگی و معادلات حاصل از برآزش منحنی می توان توسط عبور امواج فشاری و ثبت نتایج مربوط به سرعت و زمان عبور امواج، در مورد پارامترهای فیزیکی نظیر تراکم، تخلخل، قرائت های افقی و قائم چکش، وزن مخصوص و تا حدی میزان رطوبت خاک قضاوت نمود.

- کنترل شرایط تراکمی ارائه شده با دستگاه های فراصوت و چکش ضربه برای خاک های منطبق بر مصالح این تحقیق، با درصد رطوبت های کمتر از ۸٪ و حداکثر تا عمق ۱۰ سانتی متری از سطح خاک قابل استناد و تفسیر می باشند.

- تعیین تخلخل، پوکی و مدول الاستیسیته<sup>۱</sup> بسترهای خاکی تنها با داشتن عدد سرعت موج فشاری و روابط همبستگی موجود امکان پذیر می باشد.

- محاسبه دقیق مقدار آب موجود و لازم برای رسیدن به رطوبت بهینه و یا تراکم موجود و مورد نظر از روی نتایج سرعت امواج فشاری دستگاه فراصوت و مشخص بودن پوکی و تخلخل.

- بر اساس معادلات ریاضی حاصل از برآزش نمودارهای مختلف تحقیق حاضر با داشتن درصد تراکم های نمونه های خاک دانه ای در آزمایشگاه مشخص شد که اعداد چکش قرائت شده بالاتر از ۳، نشان از شروع قرائت های درصد تراکم خاک از ۹۰٪ به بالا و به صورت افزایشی حاصل شده اند (از ۳٫۲ تا ۳٫۷ معادل تراکم ۹۰٪ تا ۹۸٪).

## مراجع

- [1] Dos, Brajaw, Translation, "Geotechnical Engineering Principles", Academic Edition, Fifth (in Persian) Edition, Iran, Tehran, 2008.
- [2] Mir Mohammad Hosseini, Seyyed Majeddin, "Seismic Geotechnical Engineering", International (in Persian) Journal of Seismology Research Institute, Tehran, 2009.
- [3] Makarchian, M. And Ahmadi, Q. M, "Separation of vibrations caused by explosion in soil by geophyses", Proceedings of the 7th National Congress on Civil Engineering, Volume 3, Sistan (in Persian) and Baluchestan University, Zahedan, Iran, 2013.
- [4] Eflaki, Ismail, "Soil Mechanics Laboratory", Amir Kabir University of Technology, Tehran, 1989. (in Persian)
- [5] Moghanloo, Rahmatollah, "Investigating methods for decreasing amplitude of dynamic waves on structures caused by vibrations using separator dampers in laboratory conditions", (in Persian) Mohaghegh Ardabili University, 2014.



- [21] Liu, Chao, Ai-lan Che, and Shao-kong Feng. "Propagation characteristics of elastic wave in layered medium and applications of impact imaging method." *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 18 (2013): 479-485.
- [22] Li, X., G. Rupert, David A. Summers, P. Santi, and D. Liu. "Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 33, no. 1 (2000): 1-13.
- [23] Zanalizadeh, AS. Farrokhzad, F Rezaei, S., "The study of the effect of the site using the results of microtremor and its comparison with geotechnical studies." Case study: Northwest of Babol (in Persian) ("), 7th National Congress of Civil Engineering, Zahedan, 2013).
- [24] Katte, V. Y., and G. E. Blight. "Solute suction and shear strength in saturated soils." *Bioinspired Photonics: Optical Structures and Systems Inspired by Nature* (2015): 355.
- [17] Sharma, P. K., Manoj Khandelwal, and T. N. Singh. "A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity." *International Journal of Earth Sciences* 100, no. 1 (2011): 189-195.
- [18] Heller, V., and W. H. Hager. "Wave types of landslide generated impulse waves." *Ocean Engineering* 38, no. 4 (2011): 630-640.
- [19] Maleki, Mohammad, "The Pastoral Theory", Bu-Ali Sina University Press, Hamedan, Iran, (in Persian) Hamedan, 2006.
- [20] Champiré, Florian, Antonin Fabbri, Jean-Claude Morel, Henry Wong, and Fionn McGregor. "Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material." *Construction and Building Materials* 110 (2016): 70-78.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H. R. Saba, B. Halimi, S. Jafari Mehrabadi, S. Saeedi Jam, Study and Comparison of Compaction Characteristics of Coarse Grained Soils using Ultrasonic Waves and New Designed Impact Hammer, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1033-1042.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12215.5148



