ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه فیروزکوه اصلاح‌شده با خرده لاستیک تحت بارگذاری برش ساده سیکلی

مقاله علمی -پژوهشی

آزیتا باقری (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکترا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران
امیرحسین اقبالی، استادیار، دانشگاه اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران
نوید هادیانی، استادیار، دانشگاه اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران
مریم حق بین، استادیار، دانشگاه اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **azitabagheri13621362@gmail.com**

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴- پذیرش:۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۴۸۶-۴۷۹

چکیده

پدیده روانگرایی در خاک‌های ماسه‌ای اشباع یکی از مخاطرات اصلی ژئوتکنیک لرزه‌ای است. در این پژوهش، تأثیر افزودن خرده لاستیک بازیافتی در چهار سطح ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی بر پتانسیل روانگرایی ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ به صورت تجربی و با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلی ارزیابی شده است. کلیه آزمایش‌ها در شرایط اشباع (ضریب B≥۰,۹۶)، تنش قائم مؤثر تحکیمی σ'v = ۱۰۰ کیلوپا سکال، تراکم نسبی Dr = ۳۰٪ و نسبت تنش تناوبی CSR = ۰,۱۵ (معادل دامنه تنش بر شی τ_cyc = ۱۵ کیلوپا سکال) با فرکانس ۱ هرتز انجام شد. فشار آب حفره‌ای اضافی (Δu) به صورت پیوسته ثبت و معیار روانگرایی بر اساس رسیدن Δu به ۹۵ درصد تنش قائم مؤثر اولیه (Δu ≥ ۹۵ kPa) تعریف گردید. نتایج نشان داد که در نمونه ماسه خالص، روانگرایی پس از ۱۲ سیکل بارگذاری رخ داد، در حالی که در نمونه‌های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده لاستیک، تعداد سیکل منجر به روانگرایی به ترتیب به ۲۲، ۳۱ و ۲۹ سیکل افزایش یافت. بیشینه فشار آب حفره‌ای نرمال شده (Δu/σ'v) در نمونه ماسه خالص به ۰٫۹۸ رسید، در حالی که در نمونه ۱۵ درصد لاستیک این مقدار به ۰٫۸۵ محدود شد. نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های اصلاح شده به طور میانگین ۴۰ درصد کاهش یافت. نمونه حاوی ۱۵ درصد خرده لاستیک با افزایش ۲٫۶ برابری تعداد سیکل تا روانگرایی و کاهش چشمگیر نرخ Δu بهترین عملکرد را نشان داد. افزایش لاستیک به ۲۰ درصد، علی‌رغم حفظ میرایی بالا، به دلیل کاهش شدید مدول برشی (افت ۵۳ درصدی نسبت به ماسه خالص) و کاهش سختی اولیه، بهبود قابل توجه دیگری در مقاومت روانگرایی ایجاد نکرد. به طور کلی، خرده لاستیک با مکانیزم کاهش نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای و تأخیر در رسیدن به شرایط بحرانی، می‌تواند به عنوان یک ماده مؤثر در کاهش خطر روانگرایی ماسه فیروزکوه تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: روانگرایی، خرده‌لاستیک، ماسه فیروزکوه، برش ساده سیکلی، فشار آب حفره‌ای، تعداد سیکل

۱- مقدمه

روانگرایی یکی از پدیده‌های مخرب ژئوتکنیکی است که در خاک‌های ماسه‌ای اشباع و سست تحت بارگذاری لرزه‌ای رخ می‌دهد. در این پدیده، افزایش ناگهانی فشار آب حفره‌ای باعث کاهش تنش مؤثر و در نتیجه از دست رفتن کامل مقاومت برشی خاک می‌شود (Kramer,2014). زلزله‌های مخربی مانند نیگاتا (۱۹۶۴) و کوبه (۱۹۹۵) در ژاپن و بم (۲۰۰۳) در ایران، نمونه‌های بارزی از خسارات ناشی از روانگرایی هستند (Ishihara,1981). از سوی دیگر، انباشت تایرهای

فرسوده به یک چالش جدی زیست‌محیطی تبدیل شده است. سالانه میلیون‌ها تایر فرسوده در سراسر جهان تولید می‌شوند که بخش قابل توجهی از آن‌ها بدون بازیافت رها می‌شوند (Fakharian&Ahmad,2011). استفاده از خرده لاستیک حاصل از این تایرها در بهسازی خاک، راهکاری دوگانه است که هم به حل مشکل زیست‌محیطی کمک می‌کند و هم خواص مهندسی خاک را بهبود می‌بخشد (Youd et al.,2001).

خرده لاستیک به دلیل چگالی کم، انعطاف‌پذیری بالا و خاصیت جذب انرژی، پتانسیل بالایی برای کاهش خطر روانگرایی دارد (Seed&Idriss,1971). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن لاستیک به خاک‌های ماسه‌ای می‌تواند نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای را کاهش داده و تعداد سیکل منجر به روانگرایی را افزایش دهد (Nakhaei et al.,2012، Senetakis et al.,2012). با این حال، بیشتر این مطالعات بر روی ماسه‌های مرجع خارجی (مانند ماسه تویورا و اتاوا) متمرکز بوده و در مورد ماسه فیروزکوه ۱۶۱ (به عنوان ماسه مرجع رایج در ایران) شکاف تحقیقاتی وجود دارد (Baziar&Dobry,1995).

ماسه فیروزکوه ۱۶۱ یک ماسه سیلیکاته مصنوعی با دانه‌بندی یکنواخت است که به طور گسترده در پروژه‌های ژئوتکنیکی و تحقیقاتی ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ding et al.,2017). تاکنون مطالعه جامعی بر روی تأثیر خرده لاستیک بر پتانسیل روانگرایی این ماسه خاص، به ویژه با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلی (که نزدیک‌ترین حالت به بارگذاری لرزه‌ای واقعی است) انجام نشده است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کمی تأثیر افزودن خرده لاستیک بازیافتی در درصدهای مختلف (۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) بر پتانسیل روانگرایی ماسه فیروزکوه ۱۶۱ تحت بارگذاری برش ساده سیکلی با شرایط کنترل‌شده است. همچنین تعیین درصد بهینه خرده لاستیک برای حداکثر تأخیر در وقوع روانگرایی از دیگر اهداف این تحقیق می‌باشد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- ماسه فیروزکوه ۱۶۱

ماسه مورد استفاده در این پژوهش، ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ است که از معادن اطراف فیروزکوه (استان تهران) استخراج و به صورت صنعتی توسط سنگ شکن تولید می شود. نتایج آزمایش دانه‌بندی (مطابق با ASTM D ۶۹۱۳) نشان داد که این ماسه دارای دانه‌بندی یکنواخت با ضریب یکنواختی Cu= ۲,۰۵ و ضریب خمیدگی Cc= ۰,۹۵۶ است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، این خاک در گروه SP (ماسه‌های بددانه‌بندی شده) قرار می‌گیرد. درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ (ریزدانه) تنها ۱٫۱ درصد است که نشان‌دهنده تمیزی بالای خاک است. چگالی ویژه ذرات جامد (Gs) با استفاده از آزمایش پیکنومتر (ASTM D ۸۵٤) برابر ۲٫٦۵ تعیین شد. چگالی خشک حداقل و حداکثر به ترتیب ۱٫٤۵۷ و ۱٫۷٦۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. آزمایش برش مستقیم (ASTM D ۳۰۸۰) زاویه اصطکاک داخلی خاک را ۲۹ درجه و چسبندگی ظاهری را ۰٫۲۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داد.

۲-۱-۲- خرده لاستیک

خرده لاستیک مورد استفاده در این پژوهش از بازیافت مکانیکی تایرهای فرسوده خودروهای سواری تولید شده است. دانه‌بندی خرده لاستیک در محدوده ۰٫۵ تا ۲ میلی‌متر (الک شماره ۳۵ تا ۱۰) قرار دارد. چگالی ظاهری خرده لاستیک بین ۱٫۰۵ تا ۱٫۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد که به طور قابل توجهی کمتر از چگالی ماسه است. خرده لاستیک دارای شکل نامنظم و بافت متخلخل بوده و خاصیت الستومری بالایی دارد. ترکیب شیمیایی غالب آن شامل الستومرهای پلیمری (SBR، NR)، کربن سیاه به عنوان فیلر تقویتی و مقادیر جزئی گوگرد (عامل ولکانیزاسیون) و اکسید روی (فعال‌کننده) می‌باشد.

۲-۲- دستگاه آزمایش برش ساده سیکلی

آزمایش‌های برش ساده سیکلی با استفاده از دستگاه برش ساده سیکلی حلقه‌ای (مدل ساخت شرکت ویرا ابزار آز، ایران) انجام شد. این دستگاه از نوع الکتروپنوماتیک با سیستم کنترل سروو بوده و قابلیت اعمال بارگذاری سیکلی در دو راستای قائم و افقی را به صورت مستقل دارد. مشخصات فنی اصلی دستگاه به شرح زیر است.

- ابعاد نمونه استوانه‌ای: قطر ۷۰ میلی‌متر، ارتفاع ۷۰ میلی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر ۱:۱)
- حداکثر فرکانس بارگذاری: ۲۰ هرتز (در این پژوهش از فرکانس ۱ هرتز استفاده شد)
- حداکثر نیروی محوری قابل اعمال: ۵ کیلونیوتن

- دقت حسگرهای جابجایی: ۰٫۰۰۰۱ میلی‌متر برای بارگذاری سیکلی
- دقت حسگرهای نیرو: ۱ نیوتن
- سیستم اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای با دقت ۰٫۲ کیلوپاسکال

این دستگاه مطابق با استاندارد ASTM D-۶۵۲۸ (روش استاندارد آزمایش برش ساده سیکلی برای شرایط زهکشی نشده) طراحی و کالیبره شده است.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مخلوط ماسه فیروزکوه و خرده لاستیک در چهار ترکیب وزنی ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده لاستیک (بر حسب وزن خشک ماسه) تهیه شدند. اختلاط مصالح به صورت خشک و به مدت حداقل ۸ دقیقه انجام شد تا از توزیع همگن ذرات لاستیک اطمینان حاصل گردد. نمونه‌سازی در قالب فولادی با قطر داخلی ۷۰±۰٫۰۲ میلی‌متر انجام شد. مخلوط در چهار لایه مساوی (هر لایه به ضخامت تقریبی ۱۷٫۵ میلی‌متر) ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه کوبه فلزی با جرم ۱٫۲ کیلوگرم و ارتفاع سقوط ۳۰ سانتی‌متر متراکم گردید (انرژی تراکمی تقریبی ۵٫۹ ژول بر لایه). تراکم نسبی هدف برای تمام نمونه‌ها Dr = ٪۳۰ (حالت سست) در نظر گرفته شد. جرم نهایی هر نمونه ۰٫۴۴۴ کیلوگرم با تلرانس کمتر از ±۱ گرم کنترل شد.

۲-۴- اشباع‌سازی و تحکیم

فرآیند اشباع‌سازی با اعمال خلأ ۸۰ کیلوپاسکال به مدت ۳۰ دقیقه آغاز شد. سپس آب دی‌هوادهی شده از پایین نمونه تزریق گردید. فشار پشت نمونه در سه مرحله ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال افزایش داده شد و در هر مرحله فشار همه‌جانبه به همان میزان افزایش یافت تا تنش مؤثر ثابت بماند.

پس از اعمال فشار پشت ۲۰۰ کیلوپاسکال، ضریب اشباع B اندازه‌گیری شد. ضریب B از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3$$

که در آن Δu تغییر فشار آب حفره‌ای ناشی از اعمال $\Delta \sigma_3 = ۲۰$ کیلوپاسکال افزایش گام‌گونه در فشار همه‌جانبه است. نمونه‌هایی که B بزرگتر یا مساوی ۰٫۹۶ داشتند، اشباع کامل تلقی شدند. پس از تأیید اشباع، نمونه تحت تنش قائم مؤثر هدف (۱۰۰ کیلوپاسکال) قرار گرفت. برای دستیابی به تنش مؤثر ۱۰۰ کیلوپاسکال، تنش قائم کل برابر ۳۰۰ کیلوپاسکال اعمال شد. زهکشی باز شد و نمونه به مدت ۶۰ دقیقه تحکیم یافت تا نرخ تغییر حجم به کمتر از ۰٫۰۱ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه برسد. تغییر حجم کل تحکیم بین ۳ تا ۶ سانتی‌متر مکعب ثبت شد. پس از تحکیم، زهکشی بسته شد و نمونه برای بارگذاری سیکلی آماده گردید.

۲-۵- بارگذاری سیکلی و معیار روانگرایی

پس از پایان تحکیم، زهکشی بسته شد و بارگذاری سیکلی افقی با شکل موج سینوسی و فرکانس ۱ هرتز آغاز گردید. نسبت تنش تناوبی (CSR) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$CSR = \tau_{cyc} / \sigma'_v$$

که در آن τ_{cyc} دامنه تنش برشی سیکلی و σ'_v تنش قائم مؤثر اولیه است.

در شرایط استاندارد این پژوهش ($\sigma'_v = ۱۰۰$ کیلوپاسکال و $CSR = ۰٫۱۵$)، دامنه تنش برشی برابر ۱۵ کیلوپاسکال به دست می‌آید.

$$\tau_{cyc} = CSR \times \sigma'_v = ۰٫۱۵ \times ۱۰۰ = ۱۵ \text{ کیلوپاسکال}$$

بنابراین دامنه تنش برشی رفت و برگشتی بین ۱۵+ و ۱۵- کیلوپاسکال اعمال شد. تنش برشی بر حسب زمان (t) به صورت زیر است.

$$\tau(t) = ۱۵ \times \sin(۲\pi t)$$

در طول بارگذاری، فشار آب حفره‌ای اضافی (Δu) به صورت پیوسته ثبت شد. فشار آب حفره‌ای کل (u) برابر است با:

$$u = u_0 + \Delta u$$

که در آن u_0 فشار آب حفره‌ای اولیه (پس از تحکیم) است.

تنش مؤثر قائم در حین بارگذاری نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma'_v(t) = \sigma_v - u(t)$$

که σ_v تنش قائم کل (ثابت در طول آزمایش) است.

معیار روانگرایی بر اساس استاندارد ASTM D-۶۵۲۸ به صورت زیر تعریف شد.

$$\Delta u \geq ۰,۹۵ \times \sigma'_{v۰}$$

که در آن $\sigma'_{v۰}$ تنش قائم مؤثر اولیه (پس از تحکیم) است. برای شرایط استاندارد با $\sigma'_{v۰}$ = ۱۰۰ کیلوپاسکال، روانگرایی زمانی اعلام می‌شد که Δu به ۹۵ کیلوپاسکال یا بیشتر برسد. کرنش برشی (γ) از جابجایی افقی اندازه‌گیری شده (δ) و ارتفاع اولیه نمونه (h_0 = ۷۰ میلی‌متر) محاسبه شد.

$$\gamma(\text{درصد}) = (\delta / h_0) \times ۱۰۰$$

به عنوان مثال، اگر جابجایی افقی δ = ۰,۷ میلی‌متر ثبت شود، کرنش برشی برابر ۱ درصد خواهد بود.

$$\gamma = ۰,۷ \times ۷۰ \times ۱۰۰ = ٪۱$$

در صورت وقوع روانگرایی (رسیدن Δu به مقدار بحرانی)، آزمایش متوقف می شد. در غیر این صورت، بارگذاری تا ۲۰۰ سیکل ادامه می‌یافت.

۳- یافته‌ها

۳-۱- تأثیر خرده لاستیک بر توسعه فشار آب حفره‌ای

شکل ۱ روند افزایش فشار آب حفره‌ای اضافی نرمال‌شده ($\Delta u/\sigma'v$) را بر حسب تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. در نمونه ماسه خالص، فشار آب حفره‌ای با شیب تندی افزایش یافت و پس از ۱۲ سیکل به مقدار بحرانی $\Delta u/\sigma'v$ = ۰,۹۸ رسید. در مقابل، در نمونه حاوی ۱۰ درصد خرده لاستیک، نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای به طور محسوسی کاهش یافت و روانگرایی پس از ۲۲ سیکل رخ داد. بیشترین تأخیر در وقوع روانگرایی در نمونه حاوی ۱۵ درصد خرده لاستیک مشاهده شد.

در این نمونه، فشار آب حفره‌ای تا ۲۵ سیکل اول با شیب بسیار مالیمی افزایش یافت و روانگرایی پس از ۳۱ سیکل رخ داد.

بیشینه فشار آب حفره‌ای نرمال‌شده در این نمونه به ۰٫۸۵ محدود شد که نشان‌دهنده عدم رسیدن به روانگرایی کامل در برخی سیکل‌ها است. در نمونه حاوی ۲۰ درصد خرده لاستیک، علی‌رغم افزایش تعداد سیکل تا روانگرایی به ۲۹ سیکل، نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای در سیکل‌های اولیه مشابه نمونه ۱۵ درصد بود، اما در سیکل‌های میانی افزایش سریع‌تری نشان داد. این رفتار به کاهش شدید سختی اولیه (مدول برشی ۳۱۱ کیلوپاسکال در مقابل ٦٦٧ کیلوپاسکال در ماسه خالص) و کاهش توانایی اسکلت خاک در انتقال تنش نسبت داده می‌شود.

۳-۲- تأثیر خرده لاستیک بر مدول برشی دینامیکی

مدول برشی دینامیکی (G) از شیب خط بین دو نقطه پیک مثبت و منفی منحنی تنش–کرنش در سیکل هفدهم محاسبه شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد خرده لاستیک، مدول برشی به طور پیوسته کاهش می‌یابد.

این کاهش از ٦٦٧ کیلوپاسکال در ماسه خالص به ٤٩٥، ٤٠٨ و ٣١١ کیلوپاسکال به ترتیب در نمونه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خرده لاستیک رسید (به ترتیب افت ٪۲٦، ٪۳۹ و ٪۵۳).

۳-۳- رابطه بین افت سختی و مقاومت روانگرایی

یک یافته کلیدی این پژوهش، وجود یک نقطه بهینه برای درصد خرده لاستیک است. نمونه ۱۵ درصد الستیک با وجود افت ۳۹ درصدی مدول برشی، تعداد سیکل تا روانگرایی را ۲٫٦ برابر (از ۱۲ به ۳۱ سیکل) افزایش داد. این نشان می‌دهد که مکانیزم جذب انرژی و کنترل فشار آب حفره‌ای توسط الستیک بر اثر منفی افت سختی غلبه می‌کند. در مقابل، در نمونه ۲۰ در صد الستیک، افت سختی ۵۳ در صدی باعث شد که بهبود قابل توجه دیگری در مقاومت روانگرایی حاصل نشود (افزایش تنها از ۳۱ به ۲۹ سیکل نسبت به نمونه ۱۵ درصد).

جدول ۱. خلاصه نتایج فشار آب حفره‌ای و روانگرایی

درصد خرده لاستیک	تعداد سیکل تا روانگرایی	$\Delta u_max/\sigma'v$	نرخ افزایش Δu (kPa/سیکل)
۰	۱۲	۰٫۹۸	۷٫۹
۱۰	۲۲	۰٫۹۰	٤٫۳
۱۵	۳۱	۰٫۸۵	۳٫۱
۲۰	۲۹	۰٫۸۷	۳٫٤

٤- بحث

٤-۱- مکانیزم اثر خرده لاستیک بر روانگرایی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خرده لاستیک از دو مکانیزم اصلی به کاهش خطر روانگرایی کمک می‌کند.

مکانیزم اول: جذب انرژی ارتعاشی

ذرات لاستیک به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک خود، بخشی از انرژی ورودی ناشی از بارگذاری سیکلی را به صورت تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر و اصطکاک داخلی مستهلک می‌کنند. این امر باعث کاهش انرژی انتقالی به اسکلت خاک و در نتیجه کاهش نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود (Anvari et al.,2017).

مکانیزم دوم: کاهش تراکم‌پذیری و تأخیر در افزایش فشار آب حفره‌ای حضور ذرات نرم و انعطاف‌پذیر الستیک در میان دانه‌های سخت ماسه، تماس‌های دانه به دانه را کاهش داده و از انتقال مستقیم نیروها جلوگیری می‌کند. این موضوع باعث می شود که حجم نمونه کمتر کاهش یابد و در نتیجه فشار آب حفره‌ای با شیب کمتری افزایش پیدا کند (ASTM D-17-6528,2017).

٤-۲- درصد بهینه خرده لاستیک

بر اساس یافته‌های این پژوهش، درصد بهینه خرده لاستیک برای کاهش خطر روانگرایی ماسه فیروزکوه ۱۵ درصد وزنی است. در این درصد، بیش‌ترین تأخیر در وقوع روانگرایی (۳۱ سیکل در مقابل ۱۲ سیکل ماسه خالص) با افت نسبتاً محدود سختی (٪۳۹) همراه است. افزایش الستیک به ۲۰ درصد نه تنها بهبود قابل توجهی ایجاد نمی‌کند، بلکه به دلیل افت شدید سختی (٪۵۳) ممکن است در کاربردهای عملی با محدودیت‌هایی همراه باشد. این نتیجه با یافته‌های سنتاکیس و همکاران (۲۰۱۲) بر روی ماسه–الستیک (Nakhaei et al.,2012) و همچنین نتایج دینگ و همکاران (۲۰۲۱) بر روی مخلوط‌های ماسه–الستیک برای زیرسازی راه‌آهن (Akbarimehr&Fakharian,2021) همخوانی دارد. در هر دو مطالعه، درصد بهینه در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد گزارش شده است.

٤-۳- محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی (نمونه‌های کوچک، بارگذاری یک‌جهته، فرکانس ثابت ۱ هرتز) انجام شده است. در شرایط واقعی میدانی، عواملی مانند ناهمگنی خاک، بارگذاری چند جهته، تغییرات فرکانس، و شرایط زهکشی متفاوت می‌توانند بر نتایج تأثیر بگذارند. همچنین این مطالعه تنها بر روی یک نوع ماسه (فیروزکوه ۱٦۱) با یک تراکم نسبی (Dr=٪۳۰) و یک سطح تنش قائم (۱۰۰ کیلوپاسکال=σ′v) متمرکز بوده است. بررسی شرایط دیگر (Dr بالاتر، σ′v بالاتر و CSRهای مختلف) در مقاله دیگری ارائه خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، نتیجه‌گیری‌های زیر حاصل می‌شود:

-افزودن خرده لاستیک به ماسه فیروزکوه، نرخ افزایش فشار آب حفره‌ای اضافی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در نمونه حاوی ۱۵ درصد الستیک، نرخ افزایش Δu از ۷،۹ به ۳،۱ کیلوپاسکال بر سیکل کاهش یافت.

-تعداد سیکل منجر به روانگرایی با افزودن خرده لاستیک افزایش می‌یابد. نمونه ماسه خالص پس از ۱۲ سیکل دچار روانگرایی شد، در حالی که نمونه ۱۵ درصد الستیک تا ۳۱ سیکل مقاومت کرد (افزایش ۲،٦ برابری).

-درصد بهینه خرده لاستیک برای کاهش خطر روانگرایی ماسه فیروزکوه ۱۵ درصد وزنی تعیین شد. افزایش الستیک به ۲۰ درصد بهبود قابل توجه دیگری ایجاد نمی‌کند.

-مدول برشی دینامیکی با افزایش درصد خرده لاستیک کاهش می‌یابد (از ٦٦۷ به ۳۱۱ کیلوپاسکال در نمونه ۲۰ درصد). با این حال، اثر مثبت جذب انرژی بر کاهش روانگرایی بر اثر منفی افت سختی در درصدهای بهینه غلبه می‌کند.

-خرده لاستیک بازیافتی می‌تواند به عنوان یک ماده مؤثر و دوستدار محیط زیست برای کاهش خطر روانگرایی ماسه فیروزکوه در مناطق لرزه‌خیز مورد استفاده قرار گیرد.

٦- سپاسگزاری

این پژوهش برگرفته از رساله دکتری/کارشناسی ارشد نویسنده اول در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر می‌باشد. نویسندگان از همکاری آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر و شرکت ویرا ابزار آز (تأمین‌کننده دستگاه برش ساده سیکلی) تشکر می‌کنند.

۷- مراجع

-Akbarimehr, D., & Fakharian, K. (2021). Dynamic shear modulus and damping ratio of clay mixed with waste rubber using cyclic triaxial apparatus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 140, 106430.

-Anvari, S. M., Shooshpasha, I., & Kutanaei, S. S. (2017). Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 9(5), 936-944.

-ASTM D-17-6528. (2017). Standard Test Method for Consolidated Undrained Cyclic Direct Simple Shear Test. *ASTM International, West Conshohocken,* PA.

-Ding, Y., et al. (2021). Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler. *Construction and Building Materials,* 273, 121950.

-Ding, Y., Zhang, J., Chen, X., Wang, X., & Jia, Y. (2018). Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler. *Construction and Building Materials,* 273, 121950.

-Edinçliler, A., Baykal, G., & Dengili, K. (2014). Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways. *Resources, Conservation and Recycling,* 42(3), 223-237.

-Fakharian, K., & Ahmad, A. (2021). Effect of anisotropic consolidation and rubber content on dynamic parameters of granulated rubber-sand mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 141, 106631.

-Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* San Francisco, 1, 321-327.

-Kramer, S. L. (2014). Performance-based design methodologies for geotechnical earthquake engineering. *Bulletin of Earthquake Engineering,* 12 (3), 1049-1070.

-Li, B., Huang, M., & Zeng, X. (2016). Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 28(11), 04016122.

-Nakhaei, A., Marandi, S. M., Kermani, S. S., & Bagheripour, M. H. (2012). Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 43, 124-132.

-Qalandarzadeh, A., & Farahmand, K. (2012). Undrained behavior of Firoozkuh 161 sand under monotonic loading. *9th International Congress on Civil Engineering,* Isfahan, Iran.

-Senetakis, K., Anastasiadis, A., & Pitilakis, K. (2012). Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 33, 38-53.

Assessment of Liquefaction Potential of Firoozkuh Sand Modified with Crumb Rubber under Cyclic Simple Shear Loading

Azita Bagheri, *Ph.D., Student, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Tehran, Iran.*

Amirhossein Eghbali, Assistant Professor, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Tehran, Iran.

Navid Haiyani, Assistant Professor, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Tehran, Iran.

Maryam Haghbin, Assistant Professor, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Tehran, Iran.

E-mail: azitabagheri13621362@gmail.com

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Liquefaction of saturated sandy soils is a major geotechnical hazard during earthquakes. This study experimentally evaluated the effect of adding 0, 10, 15 and 20% crumb rubber by weight on the liquefaction potential of Firoozkuh 161 standard sand using a cyclic simple shear device. All tests were conducted under saturated conditions (B≥0.96), effective vertical stress σ′v = 100 kPa, relative density Dr = %30, and cyclic stress ratio CSR = 0.15 (τ_cyc = 15 kPa) at 1Hz frequency. Excess pore water pressure (Δu) was continuously recorded, and the liquefaction criterion was defined as Δu reaching %95 of initial effective stress (Δu ≥ 95 kPa). Results showed that the pure sand sample liquefied after 12 cycles, while samples with 10, 15, and 20% crumb rubber liquefied after 22, 31, and 29 cycles, respectively. The normalized maximum pore water pressure (Δu/σ′v) decreased from 0.98 in pure sand to 0.85 in the %15 rubber sample. The rate of pore pressure buildup decreased by an average of %4 in rubber-amended samples. The %15 rubber sample exhibited the best performance with a-2/6 fold increase in cycles to liquefaction. Increasing rubber content to %20 did not provide additional significant improvement due to a severe reduction in shear modulus (%53 loss compared to pure sand). Overall, crumb rubber effectively reduces liquefaction risk in Firoozkuh sand through pore pressure control and energy absorption mechanisms.

Keywords: Liquefaction, Crumb Rubber, Firoozkuh Sand, Cyclic Simple Shear, Pore Water Pressure, Cycle Number