نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۵، سال ۱۳۹۷، صفحات ۹۲۹ تا ۹۳۶
DOI: 10.22060/ceej.2017.12930.5293

# ارزیابی تأثیر درصد الیاف بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر زباله‌های جامد شهری

محسن کرامتی[۱*]، حسین ترابی[۲]، پوریا علیدوست[۲]، نادر شریعتمداری[۲]

[۱] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
[۲] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

**چکیده:** طی سالیان گذشته، محققان متفاوتی به ارزیابی میدانی و آزمایشگاهی جامعی از زباله‌های بازیابی شده از مرکز دفن کهریزک پرداخته‌اند. در این راستا، به منظور اندازه‌گیری سرعت موج برشی و ارزیابی مدول برشی حداکثر، از دستگاه بندر المنت نصب شده بر دستگاه سه محوری سیکلیک استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های تازه‌ی زباله در جهت ارزیابی اثرات درصد الیاف (سه ترکیب مختلف الیاف ۰، ۳ و ۶ درصد وزنی)، تنش همه جانبه (۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال) و وزن مخصوص ( ۹ و ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب) بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر تأثیر قابل توجه تنش همه جانبه و وزن مخصوص بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر زباله‌های جامد شهری بود. همچنین اثر بسزا الیاف در حرکت امواج توسط بندر المنت ثبت شد. بطوریکه با افزایش درصد الیاف سرعت موج برشی افزایش یافته، هرچند امواج در نمونه‌ها با درصد الیاف بالا، انرژی کمتری را دارا بودند. باید در نظر داشت که اثر درصد الیاف بر سرعت موج برشی در تنش‌های همه جانبه بالاتر، بیشتر می‌شود. در این بین نکته کلیدی نقش تنش‌های همه جانبه بالاتر در تراکم بیشتر نمونه است که منجر به افزایش سختی شده است. لازم به ذکر است که عواملی چون ترکیب زباله، وزن مخصوص و انرژی تراکمی بسیار به یک دیگر وابسته بوده که همین امر تعیین میزان تأثیر این عوامل را به تنهایی بر روی مدول برشی زباله بسیار دشوار ساخته است.

**تاریخچه داوری:**
دریافت: ۷ خرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۰ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۸ آبان ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۸ آذر ۱۳۹۶

**کلمات کلیدی:**
زباله‌های جامد شهری
بندر المنت
درصد الیاف
سرعت موج برشی
مدول برشی حداکثر

## ۱- مقدمه

امروزه در نتیجه‌ی افزایش جمعیت و با گسترش روز افزون تولید زباله، روند توسعه‌ی مراکز دفن زباله در اطراف شهرها اجتناب ناپذیر است. خطری که با شکست احتمالی مراکز دفن محیط زیست، مراکز جمعیتی و زندگی طبیعی را تهدید می‌کند، محققان را بر آن داشته تا تحقیقات جامعی در زمینه‌ی رفتار مکانیکی، دینامیکی و خصوصیات ژئوتکنیکی زباله جامد شهری که مصالح عمده‌ی تشکیل دهنده‌ی مراکز دفن زباله را تشکیل می‌دهد، انجام دهند [۱]. در این خصوص پارامترهای دینامیکی زباله به ویژه پارامترهای مربوط به کرنش‌های کوچک (سرعت موج برشی و متعاقب آن مدول برشی کرنش کوچک)، از ورودی-های مهم در آنالیز معادل خطی[۱] که روش معمول[۲] برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای سلول‌های مرکز دفن زباله است محسوب شده و تأثیر بسزایی در نتایج تحلیل‌های لرزه‌ای مراکز دفن زباله داشته است [۶-۲].

در این راستا مدول برشی کرنش کوچک یکی از مهمترین پارامترها در مسائل دینامیک خاک است. این پارامتر چه در زباله و چه در خاک به عوامل متعددی بستگی دارد که این امر اندازه‌گیری و تفسیر نتایج آزمایش‌ها را دشوار می‌سازد. متداول‌ترین رویکرد در محاسبه و اندازه‌گیری مدول برشی کرنش‌های کوچک، اندازه‌گیری سرعت موج برشی و وزن مخصوص و استفاده از رابطه‌ی زیر برای محاسبه مدول برشی بیشینه است [۷]:

$$G_{max}=\rho.V_s^2 \qquad (۱)$$

از دیدگاه فوق به منظور بدست آوردن مدول برشی حداکثر هم در آزمایش‌های آزمایشگاهی و هم در آزمایش‌های میدانی می‌توان استفاده نمود. لازم به ذکر است که اغلب آزمایش‌های انجام شده در زمینه‌ی ارزیابی سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش‌های کوچک بوسیله آزمایشات میدانی انجام شده است. آزمایش‌های میدانی و در محل مزایای زیادی از قبیل عدم نیاز به نمونه‌گیری را دارا بوده و خواص زباله را در شرایط طبیعی ان‌ها مورد سنجش قرار می‌دهند [۸]. همانطور که بیان شد تحقیقات محلی سرعت موج برشی بسیار پرکاربرد بوده است بطوریکه ادبیات فنی حاکی از این است که مجموع ۱۴۶ نمودار سرعت موج برشی نسبت به عمق از ۳۷ مرکز دفن زباله در سراسر جهان بدست آمده است [۹]. ارزیابی سرعت موج‌برشی و در راستای آن مدول برشی کرنش کوچک زباله‌های جامد شهری مرکز دفن کهریزک نیز با استفاده از روش امواج سطحی[۳] به‌عنوان بخشی از پروژه گسترده ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دینامیکی این مواد

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات:

1 Equivalent linear
2 State of practice
3 CSWS

در دانشگاه علم و صنعت صورت پذیرفته است[۱۰]. بر مبنای نتایج بدست امده سرعت موج برشی از الگوی افزایشی نسبت به عمق پیروی می‌کند و همچنین با افزایش سن نمونه‌ها، با افزایش سرعت موج‌برشی همراه هستیم که دلیل آن را می‌توان به پیشرفت فرآیند پوسیدگی، کاهش درصد مصالح آلی و افزایش درصد مصالح سخت و فسادناپذیر نسبت داد. در حالت کلی آزمایش‌های میدانی برای طراحی و شناخت زباله در محل بسیار مفید هستند اما محدودیت بارزی که نسبت به آزمایش‌های آزمایشگاهی دارند این است که قابلیت کنترل شرایط از قبیل زهکشی و یا فشار آب حفره‌ای در آنها وجود ندارد. با این حال در این زمینه تحقیقات آزمایشگاهی کمتری انجام شده و تعداد کمی از محققین تحقیقات جامع آزمایشگاهی را در این زمینه انجام داده‌اند[۱۱]. لی[1] و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از آزمایش‌های ستون تشدید به بررسی اثر ترکیب زباله، زمان تحت فشار و میزان کرنش بر روی مدول برشی حداکثر نمونه‌های زباله برداشت شده از مرکز دفن تری–سیتیز[2] واقع در ایالت کالیفرنیا آمریکا پرداختند. بر مبنای گزارش‌ها این محققین، مدول برشی حداکثر با افزایش فشار همه جانبه، زمان تحت فشار و فرکانس افزایش می‌یابد و با افزایش درصد اجزاء درشت زباله، این پارامتر روند کاهشی را در پیش می‌گیرد [۱۲]. سئو[3] (۲۰۰۸) با استفاده از بندر المنت نصب شده بر روی دستگاه برش ساده به ارزیابی پارامترهای متفاوت از قبیل ترکیب زباله و یا فرکانس بر روی سرعت موج برشی زباله‌های جامد شهری مرکز دفن اودو[4]واقع در کالیفرنیا پرداخت. بر مبنای یافته‌های این محقق سرعت موج برشی به علت درصد زیاد اجزای بزرگتر از ۲۰ میلی‌متر در نمونه‌ها قابل اندازه‌گیری نبوده و تنها در نمونه‌های حاوی ۱۰۰ درصد مواد کوچکتر از ۲۰ میلی‌متر توانایی اندازه‌گیری را دارد [۱۳]. یوآن[5] و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از نصب یک شتاب سنج با فرکانس ۱ هرتز در بالای نمونه‌های دستگاه برش ساده به بررسی تاثیرات ترکیب و وزن مخصوص زباله بر روی سرعت موج برشی و متعاقب آن مدول برشی کرنش کوچک زباله ها پرداختند. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌ها در تنش همه جانبه ۷۵ کیلوپاسکال تحکیم شده و مبنای بررسی اثر ترکیب زباله، درصدهای متفاوت مواد عبوری از الک ۲۰ میلی‌متر بوده است. این محققان بیان داشتند که این دو عامل تاثیر بسزایی در مقادیر مدول برشی حداکثر زباله‌ها دارند ولی ارتباط بین وزن مخصوص و ترکیب زباله تفکیک تأثیر این دو عامل را دشوار می‌سازد [۱۴]. با توجه به عدم وجود ارزیابی‌های آزمایشگاهی از سرعت موج برشی زباله‌های مرکز دفن کهریزک و همچنین لزوم تعیین خصوصیات زباله‌ها در مکان‌های متفاوت بدلیل گستردگی ترکیبات این مواد در نقاط مختلف، در تحقیق حاضر به ارزیابی سرعت موج برشی زباله‌های جامد شهری و ارزیابی تأثیر پارامترهای متفاوت بر آن با استفاده از دستگاه بندر المنت نصب شده بر روی سه محوری سیکلیک با قطر پدستال ۱۰۰ میلیمتر پرداخته شده است. لازم به ذکر است که آزمایش بر روی زباله‌ی تازه از مرکز دفن زباله‌ی کهریزک با درصد متفاوت از الیاف جهت شبیه‌سازی افزایش سن انجام شده است. در ادامه ابتدا نمونه‌های بدون الیاف با وزن مخصوص ۹ کیلونیوتن برمترمکعب و تنش همه جانبه ۷۵ کیلوپاسکال به عنوان آزمایش مرجع معرفی شده و نهایتاً تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج آزمایش ها نسبت به آزمایش مرجع بررسی و ارائه شده است.

1 Lee J.J
2 Tri-Cities
3 Seo
4 OII
5 Yuan

## ۲- مرکز دفن زباله کهریزک

مرکز دفن کهریزک با قدمتی بالغ بر چهل سال با دارا بودن مساحت ۱۳۶۴ هکتار در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۲ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی در بیست و پنج کیلومتری جاده قدیم تهران–قم و در اراضی آرادکوه واقع شده است که تنها مرکز دفن زباله‌های شهر تهران به حساب می‌آید (شکل ۱). از مهمترین دلایل انتخاب این منطقه به عنوان مرکز دفع پسماندهای شهر تهران در دهه‌ی ۱۳۵۰، می‌توان به دوری از شهر تهران، نزدیکی به جاده ارتباطی تهران–قم، زهکشی ضعیف خاک به لایه‌های زیرین (خاک بستر رسی است)، عدم وجود مناطق مسکونی و صنعتی در مجاورت این منطقه، در آن دوره اشاره کرد [۱۵].

شکل ۱: موقعیت و تصویر ماهوارهای مرکز دفن اراد کوه [۱۵]

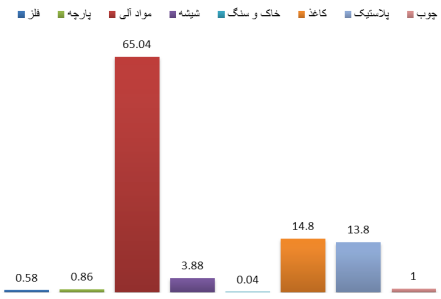
Fig. 1. Location and Aerial view of Aradkooh MSW Landfill

بر اساس اطلاعات روزانه ثبت شده در مرکز دفن کهریزک و با توجه به توزین تمامی کامیون‌های حمل زباله در ابتدای ورود به سایت، روزانه بالغ بر هشت تا یازده هزار تن زباله تولیدی تهران به مرکز دفن کهریزک وارد می‌شود از این مقدار در بهترین شرایط حداکثر ۵۰۰ تن بازیافت شده و بخش عمده آن دفن می‌شود[۱۵].

## ۳- روش نمونه‌سازی و انجام آزمایش

به‌منظور تعیین اجزای تشکیل‌دهنده زباله‌های جامد این مرکز، زباله‌های تازه اخذ شده از مرکز دفن کهریزک به محض ورود به مرکز تحقیقات

ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت به دلیل جلوگیری از تجزیه شدن در اثر زمان (که فرایند جداسازی را با مشکل روبرو می‌سازد) مورد تفکیک دستی قرار گرفتند. نتایج آنالیزهای صورت گرفته بر روی زباله مرکز دفن کهریزک به قرار شکل ۲ است. نکته حائز اهمیت در آنالیزهای صورت گرفته درصد بالای مواد آلی موجود در زباله‌های شهر تهران است که بسیار بالاتر از مقدار متوسط جهانی ۴۶ درصد است [۱۶]. لازم به ذکر است که درصد بالای مواد آلی فسادپذیر بیانگر تأثیرات بسزای زمان در تغییرات خواص توده زباله است. بدین‌صورت که پس از اینکه زباله‌ها در محل دفن زباله قرار گرفتند اجزا تشکیل دهنده زباله به ناچار با زمان دچار تغییر شده و این امر عموما به فساد بیولوژیکی مواد آلی درون آن‌ها نسبت داده می‌شود. طی تحقیقات صورت گرفته، در طول دو سال اول مواد آلی موجود در زباله‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای تجزیه یافته و کاهش میابند. این روند در حالی است که چنین رفتاری در الیاف و پلاستیک نیز دیده می‌شود اما روند کاهشی بسیار کندتر از مواد آلی است و درواقع مدت‌زمانی ماندگاری الیاف در طول زمان بیشتر بوده و باگذشت زمان درصد الیاف در نمونه نسبت به مواد آلی افزایش میابد [۱۷].




**شکل ۲: میانگین آنالیزهای فیزیکی انجام‌شده بر روی زباله‌های جامد شهری مرکز دفن آرادکوه**

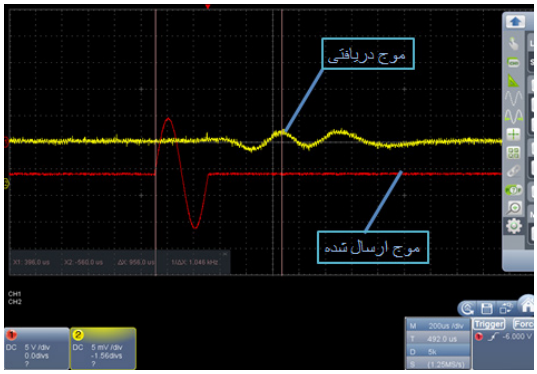
Fig. 2. Average percentage of physical characteristic of Aradkooh MSW Landfill

بر مبنای نتایج آنالیزهای انجام‌شده در این تحقیق میزان متوسط رطوبت ۱۴۵ درصد و درصد مواد آلی در حدود ۶۵ درصد را برای زباله‌های بازیابی شده از مرکز دفن کهریزک را نشان می‌دهد. بطور کلی بالا بودن سهم پسماندهای مواد غذایی، میوه و سبزیجات در زباله‌های شهری مورد مطالعه در این تحقیق از عوامل اصلی بالا بودن درصد مواد آلی و درصد رطوبت زباله‌های این مرکز دفن است.

مطالعه آزمایشگاهی پارامتر دینامیکی نمونه‌های زباله در این تحقیق با استفاده از بندر المنت نصب شده بر روی دستگاه سه محوری سیکلیک با قطر نمونه ۱۰ سانتی متر در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گردید (شکل ۳) لازم به ذکر است که دستگاه‌های متداول ارزیابی سرعت موج برشی در آزمایشگاه شامل: ستون تشدید، مجموعه‌ای از گیرنده‌ها (ژئوفون) و یک فرستنده و دستگاه سه محوری هستند که در ایران برای اولین بار از یک روند آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی زباله‌های جامد شهری استفاده شده است. البته باید در نظر داشت که دستگاه سه محوری و ستون تشدید در اعمال کرنش‌های کوچک محدود هستند [۲, ۱۸, ۱۹]. دستگاه بندر المنت مورد استفاده از یک جفت قطعه‌ی پیزوالکتریک، دستگاه تولید پالس و دستگاه ثبت داده (اسیلوسکوپ) تشکیل شده است. عضو کلیدی این دستگاه یک جفت مبدل پیزوالکتریک هستند و مکانیزم عملکرد آن به صورت خلاصه به این ترتیب است که دستگاه تولید پالس یک پالس با شکل مشخص تولید می‌کند و این پالس باعث ایجاد لرزش با ولتاژ پایین در نمونه می‌شود، عضو پیزو الکتریکی که در سمت دیگر نمونه قرار دارد این لرزش ایجاد شده را دریافت نموده و یک ولتاژ خروجی می‌دهد و این خروجی توسط اسیلوسکوپ ثبت و نمایش داده می‌شود. همچنین از تک موج سینوسی بعنوان شکل موج استفاده شد تا بتوان زمان رسیدن موج را، از اختلاف حداکثر موج ارسالی با اولین حداکثر دریافتی در پاسخ محاسبه نمود. لازم به ذکر است که روش انتخاب شده برای تعیین زمان رسیدن موج، از حوزه‌ی زمان است و از پیک یا حداکثر ولتاژ فرستاده شده تا اولین پیک قابل توجه در پاسخ به عنوان زمان رسیدن (زمان سفر) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴). همچنین در این آزمایش ولتاژ به کار رفته طبق روال ارائه شده توسط محققینی که با ابزار بندر المنت کار کرده‌اند و محدودیت‌های قطعات استفاده شده در دستگاه بندر المنت به ۱۰ ولت محدود شده است. همچنین فرکانس در محدوده‌ی ۲۰۰۰ هرتز تا ۴۰۰۰ هرتز قرار دارد که در محدوده پیشنهادی محققین فعال در زمینه‌ی استفاده از بندر المنت قرار دارد [۲۰ و ۲۱]. باید بیان شود که آزمایشات کالیبراسیون بر روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه صورت گرفت که شامل چند تست بر روی نمونه‌ها با ارتفاع‌های متفاوت می‌شد. در رابطه با آزمایشات بندر المنت باید بیان شود که زمان رسیدن موج برشی به گیرنده باید با ارتفاع نمونه رابطه خطی داشته باشد.

**شکل ۳: بندر نصب شده بر روی دستگاه سه محوری سیکلیک**

Fig. 3. A view of Bender Element that was mounted on Triaxial apparatus




**شکل ۴: نمونه ای از سیگنال ارسال شده و پاسخ آن در دستگاه ثبت داده**

Fig. 4. A sample sent signal and its response on data recording device

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای قرار دادن در دستگاه (قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر) نیاز به حذف اجزای با ابعاد بزرگ‌تر بود. در این راستا بر مبنای تحقیقات زکاس[1] (۲۰۰۵) حداکثر اندازه برای مصالح سخت، همچون سنگ و چوب، حدود ۱/۵ سانتی‌متر و برای مصالح سست، اجزای الیاف زباله، همچون کاغذ، و مصالح آلی سست، در حدود ۳ سانتی‌متر اختیار شد [۲]. همچنین به دلیل ارزیابی اثر الیاف پلاستیک در نمونه‌ها، تمامی پلاستیک از نمونه‌ها حذف و سپس بصورت درصدهای وزنی معینی (با عرض ۱ سانتی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۲۵ میلی متر) در درصدهای ۰، ۳ و ۶ درصد وزنی به نمونه‌ها اضافه شدند (شکل ۵). با توجه به اهمیت تکرارپذیری نمونه‌سازی با توزیع الیاف، در حین نمونه‌سازی لایه‌های قرارگیری در قالب با وزن‌های یکسان جدا شده و به میزان یکسان الیاف به آنها اضافه شده است. با این حال لازم به ذکر است که توزیع هیچ موادی در محیط طبیعی مرکز دفن یکنواخت نبوده و همین عامل است که رفتار مراکز دفن را پیچیده می کند.

**شکل ۵: الیاف مخلوط شده با زباله**

Fig. 5. A view of Fibers that was mixed with MSW

1 Zekkos

دلیل انتخاب پلاستیک بعنوان الیاف افزودنی به نمونه‌ها، سرعت بسیار کم تجزیه این نوع الیاف در مراکز دفن است; بطوریکه می‌توان با افزودن آن‌ها روند پوسیدگی و تغییر ترکیب زباله را تا حدی مدل‌سازی کرد. در واقع افزایش درصد پلاستیک و موادی که رفتار الیاف گونه دارند به این علت است که دیرتر نسبت به موادآلی پوسیده شده و در نتیجه رفته رفته با گذر زمان با کاهش درصد مواد آلی و ثابت بودن تقریبی الیاف، میزان درصد وزنی الیاف در مقایسه با مواد آلی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در این تحقیق خصوصیات مکانیکی الیاف مورد مطالعه قرار نگرفته که دلیل آن را می‌توان به اعمال کرنش‌های بسیار کوچک در آزمایش بندر المنت نسبت داد که توانایی ایجاد کشش در الیاف را دارا نیستند و حضور آنها در نمونه صرفاً جهت مطالعه تأثیر آنها در سرعت موج برشی و شبیه سازی تقریبی ترکیب زباله مسن است.

در مرحله بعدی، پس از جداسازی اجزای با ابعاد بزرگ، با توجه به ماهیت مصالح مورد استفاده جهت نمونه‌سازی از استاندارد ASTM D4767 که در واقع نحوه نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌های سه محوری برای مصالح چسبنده می‌باشد، استفاده شده است [۲۰]. با توجه به ماهیت مصالح مورد آزمایش، نفوذپذیری نسبتاً پایین و درصد رطوبت بالای طبیعی و شرایط نزدیک به اشباع، و مطابق با ادبیات فنی موجود، انجام آزمایش‌های سه محوری سیکلیک برای نمونه‌های بازسازی‌شده در شرایط CU بر روی نمونه‌های اشباع برنامه‌ریزی گردید. لازم به ذکر است که پس از مرحله اشباع‌سازی، نمونه‌ها حداقل به مدت ۱۲ ساعت در تنش همه‌جانبه تعیین‌شده، در شرایط تحکیم قرار می‌گرفتند، این زمان بر اساس آزمایش‌های اولیه و با توجه به ثابت شدن نرخ تغییرات حجم نمونه در نظر گرفته شده است.

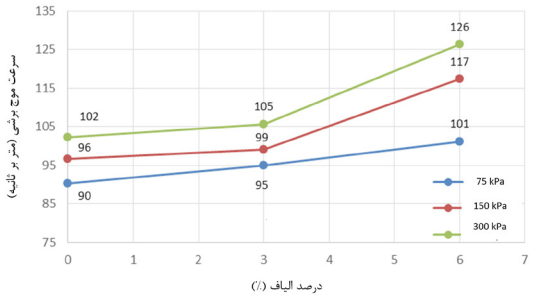
## ۴- نتایج و بحث

در این تحقیق به منظور وجود یک مبنای مناسب جهت مقایسه ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر، نمونه با وزن مخصوص ۹ کیلو نیوتن بر متر مکعب (مطابق با ادبیات فنی موجود)، بدون الیاف و تحت فشار همه جانبه‌ی ۷۵ کیلو پاسکال به عنوان آزمایش مرجع تحت آزمایش بندر المنت قرار گرفت. لازم به ذکر است که آزمایش مرجع با هدف مطالعه‌ی تأثیر عواملی همچون درصد الیاف، تنش همه جانبه و وزن مخصوص انجام شده است. همچنین با توجه به سرعت و سهولت انجام آزمایش و امکان تغییر فرکانس در هر بار آزمایش در بندر المنت، این امکان فراهم گردید که هر آزمایش برای آزمون تکرارپذیری مورد چند بار تکرار قرار گیرد. لازم به ذکر است که در انتخاب شرایط آزمایش از قبیل تنش همه جانبه و وزن مخصوص، در درجه اول ادبیات فنی مربوط به زباله‌ی مرکز دفن کهریزک مد نظر قرار گرفته و سپس سعی شده است که توانایی مقایسه آزمایش حاضر با ادبیات فنی موجود در کشورهای پیشرو در زمینه مدیریت زباله های جامد شهری نیز ایجاد شود.

### ۴- ۱- تأثیر درصد الیاف و تنش همه جانبه

این دو عامل از مهمترین عواملی هستند که بر روی سرعت موج برشی و به دنبال آن بر روی مدول برشی حداکثر تأثیر می‌گذارند. تأثیر این عامل در کرنش‌های بزرگ توسط محققین متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. به طوریکه در آزمایش‌های سه محوری تحت کرنش‌های بزرگ، الیاف بدلیل تسلیح و ایجاد سخت شوندگی مضاعف در زباله تأثیر بسزایی در رفتار نمونه‌های تحت فشار دارند. در شکل ۶ نتیجه آزمایشات به منظور تعیین تأثیر درصد الیاف و تنش همه جانبه بر موج برشی قابل مشاهده است. بر مبنای نتایج بدست آمده با افزایش میزان درصد الیاف و تنش همه جانبه روند افزایشی در مقادیر سرعت موج برشی نیز محسوس تر می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت موج برشی در کمترین حالت مقداری در حدود ۹۰ متر بر ثانیه است که به زباله بدون الیاف با تنش همه جانبه ی ۷۵ کیلو پاسکال مربوط می‌شود و در بیشترین حالت ۱۲۶ متر بر ثانیه است که به زباله با ۶ درصد الیاف و تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال مربوط می‌شود.

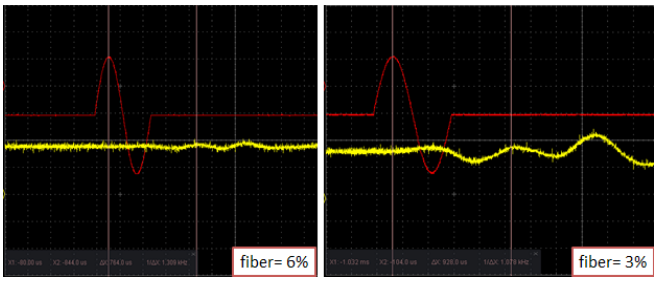
در راستای تحلیل نتایج بدست آمده باید در نظر داشت که اثر درصد الیاف بر سرعت موج برشی در تنش‌های همه جانبه بالاتر، بیشتر می‌شود. این روند در حالی است که الیاف در کرنش‌های کوچک توانایی ایجاد تسلیح را دارا نیستند. در این بین نکته کلیدی نقش تنش‌های همه جانبه بالاتر در تراکم بیشتر نمونه است که منجر به افزایش سختی نمونه شده است.




**شکل ۶: تأثیر درصد الیاف و تنش همه جانبه بر سرعت موج برشی**

Fig. 6. Effect of the fiber content and confining stress on shear wave velocity

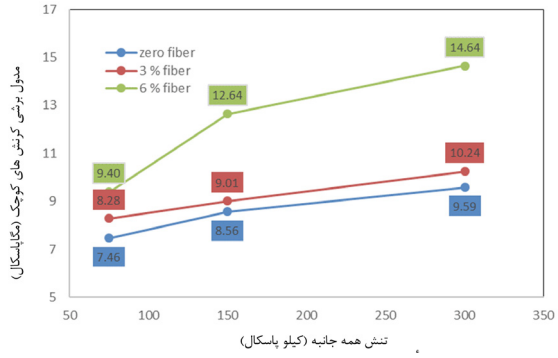
شکل ۷ نشان دهنده کاهش در زمان رسیدن موج نسبت به موج دریافتی (که نتیجه‌ی آن افزایش سرعت موج برشی است) در نمونه با ۶ درصد الیاف است ،با وجود ولتاژ کم موج دریافت شده توسط بندر گیرنده، در حالی که در داده مربوط به نمونه با ۳ درصد الیاف، مشاهده می‌شود که سرعت موج برشی کمتر شده ولی قدرت موج دریافت شده زیاد شده است.




**شکل ۷: پاسخ آزمایش بر روی نمونه با درصد الیاف ۳ و ۶**

Fig. 7. A view of test results on samples with 3 and 6 percent fiber

با توجه به اینکه مدول برشی حداکثر با داشتن سرعت موج برشی و وزن مخصوص نمونه با استفاده از معادله ۱ بدست می‌آید، باید بیان داشت که تاثیر این عامل بر مدول برشی نیز مشابه با تاثیرات ایجاد شده بر روی سرعت موج برشی است و تمامی مباحث مربوط به سازوکار تأثیر و عوامل تأثیرگذار با موارد ذکر شده در بخش سرعت موج برشی تطابق کامل دارد (شکل ۸). در رابطه با نمودار شکل ۸ لازم به ذکر است که دانسیته نمونه‌ها قبل از تحکیم یکسان بوده و طبیعی است که با افزایش فشار همه جانبه بر روی نمونه‌هاو تحکیم آنها میزان این دانسیته افزایش میابد. با توجه به تراکم‌پذیری کم الیاف اضافه شده این افزایش دانسیته در درصد الیاف‌های ۳ و ۶ کمتر است.



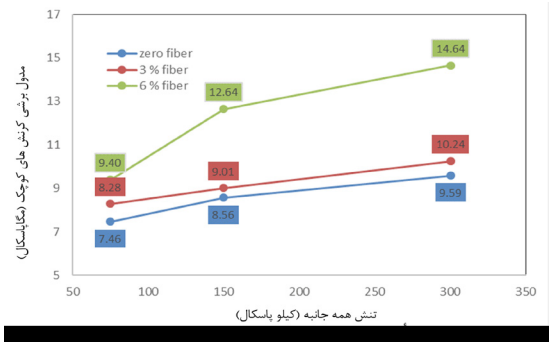

**شکل ۸: تأثیر تنش همه جانبه و درصد الیاف بر روی مدول برشی حداکثر**

Fig. 8. Effect of confining stress and fiber percentage on Maximum Shear modulus

### ۴- ۲- تأثیر وزن مخصوص

وزن مخصوص زباله در مراکز دفن به عوامل متفاوتی از قبیل ترکیب زباله، سن، میزان مواد آلی، تنش همه جانبه و مدت زمان تحمل تنش بستگی دارد. در مورد نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه نیز وزن مخصوص‌های بالاتر با افزایش لایه‌ها و افزایش میزان انرژی تراکمی حاصل می‌شوند در نتیجه شرایطی که به صورت طبیعی در مرکز دفن بر زباله حاکم است (همانند زمان زیادی که تحت سربار سایر زباله‌های دفن شده قرار می‌گیرد

و یا پوسیدگی مواد آلی) در آزمایش حاکم نخواهد بود و باید انتظار داشت که نتایج سرعت موج برشی با افزایش وزن مخصوص افزایش پیدا کند ولی میزان این افزایش کمتر از میزانی است که با آزمایش‌های محلی از اعماق مرکز دفن بدست می‌آید. شکل ۹ بیانگر مقایسه تاثیر وزن مخصوص در تنش‌های همه جانبه متفاوت بر میزان سرعت موج برشی زباله‌های جامد شهری است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر سرعت موج برشی با افزایش میزان وزن مخصوص و تنش همه جانبه روند افزایشی را در پیش گرفته‌اند. این رفتار را می‌توان به تراکم پذیری بالایی زباله نسبت داد که با افزایش تنش همه جانبه متراکم می‌شوند و نه تنها فضای خالی بین اجزا کاهش پیدا می‌کند بلکه خود اجزای تشکیل دهنده زباله تحت فشار کاهش حجم قابل توجهی را تجربه می‌نمایند. درواقع در وزن مخصوص بالا اجزای بیشتری در تماس با هم قرار می‌گیرند و انتقال موج با سرعت بیشتری انجام می‌شود.

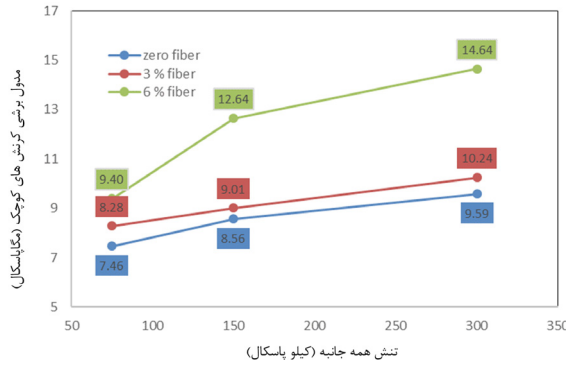



**شکل ۹: مقایسه تأثیر وزن مخصوص بر سرعت موج برشی در تنش همه جانبه متفاوت بدون الیاف**

Fig. 9. Effect of unit weight on shear wave velocity in different confining stress

میزان تأثیر وزن مخصوص در مدول برشی حداکثر در تنش‌های همه جانبه‌ی متفاوت را می‌توان در نمودار شکل ۱۰ مشاهده کرد که در واقع مقایسه‌ای بین مدول برشی حداکثر در دو وزن مخصوص ۹ و ۱۲ کیلو نیوتن بر مکعب است. بر مبنای شکل ۱۰ میزان افزایش وزن مخصوص بدلیل ایجاد سختی بیشتر در نمونه‌ها تاثیر بسزایی در مقادیر مدول برشی حداکثر زباله‌های جامد شهری را داراست.

با توجه به عدم وجود تحقیقات آزمایشگاهی بر روی سرعت موج برشی بر روی زباله جامد شهری مرکز دفن کهریزک و همچنین تفاوت‌های بنیادین بین ترکیب زباله، رطوبت (که از عوامل بسیار مهم است) و همچنین نحوه‌ی آزمایش محققانی از قبیل زکاس (۲۰۰۵)، تنها روند منطقی مقایسه آزمایش حاضر، مقایسه با آزمایش‌های میدانی CSWS انجام شده در مرکز دفن کهریزک توسط خالقی و همکاران (۲۰۱۱) بوده است [۱۰]. بر مبنای گزارشات خالقی و همکاران (۲۰۱۱) می‌توان دریافت که با افزایش سن زباله وزن مخصوص، تنش همه جانبه و سرعت موج برشی افزایش پیدا می‌کنند. در این راستا باید توجه داشت که مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های میدانی به این دلیل که زباله‌های دفن شده مدت زیادی تحت فشار همه جانبه قرار داشته‌اند و درجه پوسیدگی بیشتری دارند از مقادیر آزمایشگاهی بیشتر هستند. همچنین در مورد مرکز دفن کهریزک که پذیرای بخشی از نخاله‌های ساختمانی نیز است تفاوت‌های بیان شده فاحش‌تر به نظر می‌رسد. در این راستا با توجه به همسو بودن نتایج (تاثیرات افزایش سن در آزمایشات میدانی و همچنین افزایش الیاف به نمونه‌ها) بر مدول برشی حداکثر و سرعت موج برشی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش الیاف روندی مناسب در مدلسازی تقریبی سن زباله است.




**شکل ۱۰: مقایسه بین مدول برشی حداکثر در دو وزن مخصوص ۹ و ۱۲ کیلو نیوتن بر مکعب در حالت بدون الیاف**

Fig. 10. Effect of confining stress on maximum shear modulus in different unit weight

## ۵- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر شامل نتایج آزمایش‌های بندر المنت بر روی نمونه‌های بازسازی شده از زباله‌ی تازه با ۳ ترکیب متفاوت از الیاف است. همچنین نمونه‌ها اشباع شده با ۳ تنش همه جانبه متفاوت تحکیم شده اند. برای ارزیابی تأثیر وزن مخصوص، آزمایش‌ها با باز سازی نمونه–های بدون الیاف با ۲ وزن مخصوص ۹ و ۱۲ کیلو نیوتن بر متر مکعبی انجام شده است که نتایج آن به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است.

– درنتیجه‌ی تحقیق حاضر، سرعت موج برشی و به دنبال آن مدول برشی حداکثر با افزایش میزان درصد الیاف دچار افزایش شده است. بطوریکه سرعت موج برشی از ۹۰ متر بر ثانیه در نمونه‌های بدون الیاف تا ۹۵ و ۱۰۲ متر بر ثانیه به ترتیب برای نمونه‌هایی با ۳ و ۶ درصد الیاف که تحت فشار ۷۵ کیلو پاسکال قرار گرفته‌اند، تغییر پیدا کرده است. این میزان برای نمونه‌ها تحت فشار ۱۵۰ کیلوپاسکال در درصد های الیاف ۰، ۳ و ۶ درصد به ترتیب برابر ۹۶، ۹۹ و ۱۱۷ متر بر ثانیه و برای نمونه‌های تحت فشار ۳۰۰

کیلو پاسکال به ترتیب برابر ۱۰۲، ۱۰۵ و ۱۲۶ متر بر ثانیه است. این میزان افزایش سرعت موج برشی را می‌توان به افزایش میزان انرژی تراکم برای دستیابی به وزن مخصوص مشخص نسبت داد. در حالی که در سرعت موج برشی بدست آمده با افزایش میزان تنش همه جانبه و درصد الیاف افزایش چشمگیری پیدا می-کند که عامل آن افزایش تراکم و سختی نمونه تحت افزایش فشارهای وارده است.

- نتایج آزمایش بندر المنت بر روی نمونه‌های با درصد الیاف ۶ درصد نشان می‌دهد که میزان افزایش فشار همه جانبه بر روی روند افزایش سرعت موج برشی تأثیر مضاعف دارد. علت این پدیده را می‌توان ترکیبی از تأثیر افزایش انرژی تراکمی نمونه و افزایش فشار همه جانبه دانست که باعث افزایش قابل توجه سختی در نمونه‌ها شده‌اند.

- میزان تأثیر وزن مخصوص در سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر نمونه‌ها چشمگیر است. مدول برشی حداکثر برای نمونه با وزن مخصوص ۹ کیلو نیوتن بر مترمکعب در تنش همه جانبه‌های ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب ۷/۴، ۸/۵ و ۹/۵ مگا پاسکال است که با افزایش وزن مخصوص به ۱۲ کیلو نیوتن بر مترمکعب به ۱۱ ، ۱۴ و ۱۹ برای تنش همه جانبه ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال افزایش پیدا می‌کند. علت این امر نیز تراکم بیشتر و در هم تنیدگی بیشتر اجرای سازنده‌ی زباله است بطوریکه برای ساختن نمونه با وزن مخصوص ۱۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب، نیاز است تا میزان بیشتری از زباله را نسبت به نمونه‌ها با وزن مخصوص ۹ کیلو نیوتن بر متر مکعب در حجم ثابت قرار داده، در نتیجه انرژی تراکم بیشتری مورد نیاز است.

- عواملی چون ترکیب زباله، وزن مخصوص و انرژی تراکمی بسیار به یک دیگر وابسته بوده که همین امر تعیین میزان تأثیر این عوامل را به تنهایی بر روی مدول برشی زباله بسیار دشوار ساخته است.

## مراجع


[1] I.M. Idriss, G. Fiegel, M.B. Hudson, P.K. Mundy, R. Herzig, Seismic response of the Operating Industries landfill, Earthquake design and performance of solid waste landfills, ASCE Geotechnical Special Publication No.54, editors M.Y. Yegian, W.D. Liam Finn, pp.83-118., (1995).

[2] D.P. Zekkos, Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid-waste, University of California, Berkeley, (2005).

[3] B. Ramaiah, G. Ramana, E. Kavazanjian Jr, N. Matasovic, B. Bansal, Empirical Model for Shear Wave Velocity of Municipal Solid Waste In Situ, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (2015) 06015012.

[4] A. Abreu, O. Gandolfo, O.M. Vilar, Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques, Waste Management, 53 (2016) 116-127.

[5] I. Stokoe, Field Testing Method for Evaluating the Small-Strain Shear Modulus and Shear Modulus Nonlinearity of Solid Waste, Geotechnical Testing Journal, 38(4) (2015) 1-15.

[6] D. Zekkos, A. Sahadewa, R.D. Woods, K.H. Stokoe, Development of Model for Shear-Wave Velocity of Municipal Solid Waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 140(3) (2013) 04013030.

[7] I. Towhata, Geotechnical earthquake engineering, Springer Science & Business Media, (2008).

[8] G. Tchobanoglous, H. Theisen, S.A. Vigil, V.M. Alaniz, Integrated solid waste management: engineering principles and management issues, McGraw-Hill New York, (1993).

[9] B. Ramaiah, G. Ramana, E. Kavazanjian Jr, N. Matasovic, B. Bansal, Empirical Model for Shear Wave Velocity of Municipal Solid Waste In Situ, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (2015) 06015012.

[10] M. Khaleghi, In-situ CSWS test to determine the effect of aging on shear wave velacity of municipal solid waste (Case study: Kahrizak Landfill), Iran University of Science and Technology, (2011).

[11] N. Dixon, D. Jones, R. Whittle, Mechanical properties of household waste: In situ assessment using pressuremeters, in: Proceedings Sardinia, (1999), pp. 453-460.

[12] J.J. Lee, Dynamic Characteristics of Municipal Solid Waste (MSW) in the Linear and Nonlinear Strain Ranges The University of Texas at Austin December (2007).

[13] B. SEO, Compositional effect on the mechanical propertise of material solid waste, Arizona state university, (2008).

[14] P. Yuan, E. Kavazanjian, W. Chen, B. Seo, Compositional effects on the dynamic properties of municipal solid waste, Waste management, 31(12) (2011) 2380-2390.

[15] Evaluation the Tehran Municipal solid waste (MSW) management, Tehran Urban Research and Planning Center (TRPC), (2015). (In Persian)

[16] D. Hoornweg, P. Bhada-Tata, What a waste: a global review of solid waste management, (2012).

[17] T.L. Zhan, Y. Chen, W. Ling, Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China, Engineering Geology, 97(3-4) (2008) 97-111.

[18] O. Del Greco, A. Fassino, A. GODIOHTT, Seismic investigation for the assessment of the elastic settlement in MSW landfill, (2007).

[19] P. Yuan, E. Kavazanjian Jr, W. Chen, B. Seo, Compositional effects on the dynamic properties of municipal solid waste, Waste management, 31(12) (2011) 2380-2390.

[20] S. Yamashita, T. Fujiwara, T. Kawaguchi, T. Mikami, Y. Nakata, S. Shibuya, International parralel test on the measurement of Gmax using bender elements, Organized by Technical Comittee, 29 (2007).

[21] J. Marjanovic, The study of shear and longitudinal velocity measurements of sands and cohesive soils, Massachusetts Institute of Technology, (2012).

[22] D 4767-04: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils, in: ASTM Int., West Conshohocken, Pa, (2004).

[23] J. Li, D. Ding, Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12) (2002) 977-983.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Keramati, H. Torabi, P. Alidoust, N. Shariatmadari, Evaluating the effect of fiber content on the shear wave velocity and small-strain shear modulus of municipal solid waste using bender element (BE), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 929-936.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12930.5293