

ارزیابی تأثیر عملکرد بخش خنثی در رفتار و مقاومت برشی پسماند جامد شهری تازه و سالخورده

امیرحسین صادقیپور* (استادیار)

دانشکده‌ی معماری و هنر، دانشگاه کاشان

نادر شریعتمداری (استاد)

فرشاد دگمه‌چی (کارشناس ارشد)

امیرحسین کرم‌داد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۸ (دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۶۹-۵۹)

مطالعه‌ی حاضر به منظور ارزیابی تأثیر مواد خنثی و با استفاده از آزمایش سه‌محوری بزرگ‌مقیاس در نمونه‌ی زباله‌های تازه و سالخورده در مرکز دفن کهریزک تهران انجام و برای بررسی آن، سنگ‌دانه‌های با درصد‌های شکستگی مختلف و با مقدار ۱۵٪ وزنی به نمونه‌ها اضافه شده است. نتایج نشان می‌دهد وجود بخش خنثی باعث افزایش مقاومت برشی توده‌ی زباله تا ۳ برابر مقدار اولیه شده و هر چه مواد مذکور، زبری و سطوح ناصاف بیشتری داشته باشند، مقاومت برشی افزایش بیشتری نشان می‌دهد. تأثیر وجود بخش خنثی در نمونه‌های تازه به دلیل ماهیت اجزاء زباله، بیشتر از نمونه‌های سالخورده است، ولی مقاومت برشی نمونه‌های سالخورده در شرایط یکسان تا ۵۰٪ بیشتر است. همچنین بخش خنثی، تأثیر بیشتری در افزایش پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی (Φ) دارد و می‌تواند آن را تا ۳ برابر افزایش دهد.

sadeghpour@kashanu.ac.ir
shariatmadari@iust.ac.ir
dgm.farshad@yahoo.com
amirhke@gmail.com

واژگان کلیدی: مقاومت برشی، زباله‌ی جامد شهری، آزمایش سه‌محوری، بخش خنثی، سالخوردگی.

۱. مقدمه

بررسی سوابق مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی بررسی رفتار زباله‌های جامد شهری انجام شده است. پژوهش‌های اولیه در این زمینه از دهه‌ی ۷۰ میلادی آغاز شد که به‌عنوان نمونه می‌توان به مطالعاتی در سال‌های ۱۹۷۱^[۲]، ۱۹۸۶^[۵] اشاره کرد. در سال ۲۰۰۲^[۶] نیز برای پسماندهای جامد شهری، یک مدل رفتاری ارائه و پس از آن پژوهش‌های بسیاری در مورد پارامترهای زباله انجام شد. استفاده از پژوهش‌های دیگر پژوهشگران گرچه می‌تواند در مواردی راه‌گشا باشد، اما با توجه به وابستگی شدید اجزاء زباله، به الگوی مصرف هر جامعه و تغییرات ترکیب‌های مذکور با زمان، همواره باید از نتایج پژوهش‌های محلی استفاده کرد.

در زمینه‌ی مطالعه‌ی رفتار و مقاومت برشی زباله‌های جامد شهری، حق (۲۰۰۷)^[۷] با انجام آزمایش روی نمونه‌های مختلف زباله در ۴ وضعیت متفاوت تجزیه و با افزودن خاک به مقدار ۲۰٪ تا ۳۰٪ به منظور شبیه‌سازی پوشش روزانه بیان کرد که در همه‌ی حالت‌ها، زاویه‌ی اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. ژان و همکاران (۲۰۰۸)^[۸] پایداری شیب‌ها در مرکز دفن سوزو هو در چین را مطالعه و تغییرات مقاومت برشی را به‌عنوان تابعی از سن زباله بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای

به علت توسعه‌ی مراکز دفن زباله در اطراف شهرها و مراکز جمعیتی، بررسی رفتار مکانیکی زباله‌ی جامد شهری (MSW)^۱ به‌عنوان یکی از موضوعات مهم در حوزه‌ی ژئوتکنیک زیست‌محیطی مطرح شده است. افزایش ظرفیت مراکز دفن به علت محدودیت زمین، تغییر کاربری آن‌ها پس از تکمیل ظرفیت، لزوم حفظ پایداری شیروانی‌ها در مراکز دفن فعال، و طراحی مراکز دفن جدید از جمله عواملی است که ضرورت مطالعه‌ی رفتار مکانیکی زباله را ایجاب می‌کند. ناهمگنی زباله به‌عنوان مصالح مرکب از اجزاء مختلف باعث پیچیدگی رفتار آن می‌شود و علاوه بر آن، تغییر رفتار توده با گذشت زمان به علت تجزیه، بر پیچیدگی رفتار آن افزوده است. وقوع موارد متعدد گسیختگی شیب مراکز دفن زباله در دو دهه‌ی اخیر که علاوه بر خسارت‌های زیست‌محیطی، باعث بی‌خانمانی و کشته شدن صدها نفر شده است.^[۳-۱] نشان می‌دهد که بررسی رفتار توده‌های زباله، همچنان نیازمند پژوهش و مطالعه‌ی بیشتر است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۵/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۶/۸/۲۹، پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۲

DOI:10.24200/J30.2017.2292.2167

تراز کرنش بین ۵٪ تا ۲۰٪، با افزایش سن زباله‌های جامد شهری، چسبندگی بسیج شده کاهش و زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. برای تراز تنش بزرگ‌تر از ۵۰ کیلو پاسکال، مقاومت برشی نمونه‌های جوان‌تر، پایین‌تر از نمونه‌های زباله‌ی سالخورده تعیین شد و براساس نتایج آنها، تأثیر تجزیه در بسیج شدن زاویه اصطکاک داخلی بیشتر از چسبندگی است. همچنین بیان شد که افزایش زیاد زاویه اصطکاک داخلی با افزایش سن، احتمالاً به علت تجزیه‌ی سریع مواد غذایی و فضای سبز است.

باریتر و همکاران (۲۰۱۲)^[۹]، ۱۰ مورد آزمایش برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی انجام دادند، که ۸ مورد آن با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم و ۲ مورد براساس آزمایش سه‌محوری بود. آنها آزمایش‌های خود را روی نمونه‌های بازسازی شده در دو محدوده‌ی تنش نرمال انجام دادند و نمودارهای تنش برشی و جابه‌جایی افقی را ارائه و ذکر کردند که در همه‌ی نمونه‌ها با هر ترکیبی و با هر درجه‌ی تجزیه‌پذیری، نمودارها به صورت هذلولی و هائیربولیک هستند و بعد از یک افزایش با شیب تند، به تدریج از شیب آن‌ها کاسته شده و با شیب تقریباً صفر ادامه یافته است، تا از خط فرضی مقاومت برشی عبور کند. همچنین ذکر کردند که نمونه‌هایی که در آن‌ها درصد مواد خنثی (سنگ، شیشه، فلز، خاک و ...) بیشتر بوده و وزن مخصوص (γ_d) بیشتری داشته‌اند، حالت اتساعی دارند و هر چه مقدار و وزن مخصوص آن‌ها بیشتر باشد، شدت این حالت افزایش می‌یابد و هر چه موادی مانند: کاغذ، پلاستیک، پسماند مواد غذایی و مواد آلی در نمونه‌ها بیشتر باشد، وزن مخصوص (γ_d) کمتری دارند و خاصیت فشردگی و جمع‌شدگی تحت تنش در آن‌ها بیشتر خواهد بود. آنها همچنین ذکر کردند زمانی که نمونه‌ها با مواد زائد خاک‌گونه و سنگ و شن ترکیب می‌شوند، ماتریسی از مواد زائد تشکیل می‌شود که بسیار متراکم‌تر از الیاف است. به عقیده‌ی آنها زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) اندازه‌گیری شده در زباله‌های شهری، شامل دانه‌هایی از مواد شبه خاک، شن، سنگ و مواد خنثی مشابه رفتار خاک‌های غیرچسبنده، نظیر شن و ماسه است. کرامتی و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۰] نیز با انجام آزمایش سه‌محوری بزرگ مقیاس سیکلیک بر روی نمونه‌های زباله شهری مرکز دفن کهریزک اظهار داشتند که افزایش وزن مخصوص زباله‌های شهری سبب افزایش مدول برشی و مقاومت برشی می‌شود.

همچنین شریعتمداری و همکاران (۲۰۰۹)^[۱۱]، برای ارزیابی تأثیر بخش فسادپذیر زباله‌های جامد شهری و تراکم لایه‌ها در مرکز دفن، مقادیر نشست لایه‌ها در یک مرکز دفن آزمایشی را بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد که در نواحی با تراکم بیشتر، مقادیر نشست تا ۳٪ نسبت به دیگر مناطق کاهش نشان می‌دهد. حسین و حق (۲۰۰۹)^[۱۲] با مخلوط کردن درصدهای مختلف خاک رس با نمونه‌های زباله به مقدار ۱۵٪ تا ۳۰٪ و انجام آزمایش برش مستقیم ذکر کردند که با افزودن خاک، مقاومت برشی دچار تغییر می‌شود؛ به طوری که تا مقدار ۲۰٪، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. به عقیده‌ی آنها با افزودن مقادیر کم خاک، دانه‌های آن نقش اصطکاکی ایفا و بین ذرات زباله با ترکیب بهینه‌ی از خاک، اصطکاک مناسبی ایجاد می‌کنند. مطالعه‌ی رفتار زباله‌ی تازه و سالخورده در یک مرکز دفن در شمال پرتغال با استفاده از آزمون‌های محلی CPT و SPT و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی سه‌محوری بزرگ‌مقیاس توسط گومز و همکاران (۲۰۱۳)^[۱۳] انجام شد و اظهار داشتند که مقاومت برشی زباله، تابع سطح کرنش‌ها، ترکیب‌ها و سن زباله است. مطالعات آنها نشان داد که سالخوردگی زباله با کاهش الیاف و مواد آلی و افزایش مواد خنثی و اجزاء ریزدانه همراه است و این موضوع باعث افزایش مقاومت اصطکاکی و کاهش چسبندگی زباله می‌شود.

کاستلی و ماگری (۲۰۱۴)^[۱۴]، روی نمونه‌های زباله‌ی شهری تازه و سالخورده (با سن بیشتر از ۵ سال) در یک مرکز دفن در ایتالیا مطالعه کردند و نتایج آنها نشان داد که در نمونه‌های زباله‌ی سالخورده نسبت به زباله‌ی تازه، سهم بخش خاک (مواد خنثی) به شدت افزایش می‌یابد. آنها برای مطالعه‌ی رفتار زباله در محل مرکز دفن از آزمون برجا دیلاتومتر استفاده کردند و تجهیزات سلول تراکم بزرگ‌مقیاس تک‌بعدی را در آزمایشگاه به کار بردند. نتایج آنها نشان داد که مقدار نشست نمونه‌های تازه در شرایط سربار یکسان تا ۶۰٪ بیشتر از نمونه‌های سالخورده است.

بررسی کلی تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه‌ی رفتار زباله‌های جامد شهری نشان می‌دهد که به بحث مربوط به تأثیر بخش خنثی در مقاومت توده‌ی پسماند و عوامل مختلف تأثیرگذار در آن، نظیر: شکل، اندازه، میزان زبری و جنس بخش خنثی کمتر پرداخته شده و با توجه به تأثیر قابل توجه بخش خنثی در تأمین مقاومت توده‌ی پسماند شهری، نیاز به بررسی بیشتر عامل بخش خنثی مشاهده می‌شود. در پژوهش حاضر سعی شده است تأثیر بخش خنثی در مقاومت برشی توده‌ی پسماند شهری بررسی شود؛ برای این منظور نمونه‌های تازه و سالخورده‌ی زباله در حالت اولیه و پس از افزودن سنگ‌دانه با درصد شکستگی‌های مختلف، از طریق انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ارزیابی شده است.

۲. دسته‌بندی ترکیب‌های زباله

صادقیور (۲۰۱۴)^[۱۵] اظهار داشت با توجه به اینکه مصالح زباله‌ی جامد شهری به‌عنوان یک جسم مرکب از اجزاء مختلف محسوب می‌شود، برای تحلیل رفتار آن و به منظور ارائه‌ی معیار کمی برای مقایسه و ارزیابی مقاومت برشی توده‌ی زباله، می‌توان مقاومت توده‌ی مرکب زباله را ناشی از مجموع مقاومت‌های دو جزء اصلی آن، یعنی مواد خنثی و مواد قابل احتراق، در نظر گرفت. براساس مطالعات باریتر و همکاران^[۹]، ترکیب‌های زباله به دو گروه اصلی مواد خنثی و مواد قابل احتراق تفکیک می‌شوند، که خصوصیات و اجزاء آن‌ها به این شرح است:

— مواد خنثی: شامل: خاک، سنگ، سرامیک، شیشه، و فلزات است، که تمامی آن‌ها در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس (دمای تعیین شاخص ترکیب) غیرقابل سوختن هستند. این مواد در طبقه‌بندی لاندو و کلارک^[۱۵] در گروه مواد غیرآلی قرار می‌گیرند. محتویات بخش مواد خنثی از زباله‌ی شهری، قابلیت تغییرشکل و تراکم‌پذیری بسیار کمی دارند و در روند سالخوردگی تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند. بخش عمده‌ی مواد خنثی از اجزاء زباله، نقش مواد شبه خاک^۲ را دارد و با توجه به صلبیت نسبی و غیرقابل تغییرشکل بودن آن‌ها، باعث افزایش اصطکاک بین اجزاء زباله در زمان تغییرشکل و بارگذاری می‌شود. بنابراین بخش مواد خنثی، نقش مؤثری در افزایش مقاومت برشی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی توده‌ی زباله دارد.

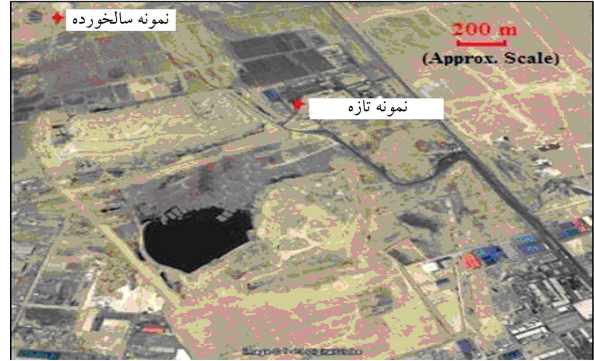
— مواد قابل احتراق: تمام اجزاء قرار گرفته در گروه مواد قابل احتراق در فرایند حرارت‌دهی در دمای ۵۵۰ درجه‌ی کوره می‌سوزند و از برخی از آن‌ها، خاکستر ناچیزی بر جای می‌ماند. ترکیب‌های ذکر شده براساس طبقه‌بندی لاندو و کلارک^[۱۵] در گروه مواد آلی قرار می‌گیرند. محتویات بخش حاضر به مقدار زیادی تغییرشکل‌پذیر هستند و تراکم‌پذیری و نشست قابل توجه زباله‌ی جامد شهری عمدتاً ناشی از آن‌هاست. گروه مواد قابل احتراق خود به دو بخش الیاف (شامل: پلاستیک/لاستیک، پارچه، چرم، موکت و ...) و بخش پسماندهای با منشأ حیوانی



الف) حفاری در محل زباله های سالخورده؛ ب) محل برداشت نمونه های تازه. شکل ۲. نمونه‌گیری از زباله‌های جامد شهری در مرکز دفن.

جدول ۱. مختصات محل نمونه‌گیری در مرکز دفن زباله‌ی کهریزک.

محل	مختصات		
	Z(m)	Y(mN)	X(mE)
نمونه‌های تازه	۱۰۲۶	۳۹۲۴۷۸	۵۲۹۴۸۶
نمونه‌های سالخورده	۱۰۹۲	۳۹۲۲۵۹۱	۵۲۹۴۹۲



شکل ۱. عکس هوایی محل‌های نمونه‌گیری زباله‌ها در مرکز دفن.

۴. اجزاء زباله‌ی تازه و سالخورده

نتایج آنالیز اجزاء زباله‌ی شهری تازه و سالخورده در مرکز دفن کهریزک در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی مقادیر اجزاء مذکور نشان می‌دهد که در نمونه‌های زباله‌ی تازه، بخش پسماند مواد غذایی، میوه و سبزیجات با سهم ۶۱/۴٪ بیشترین سهم ترکیب‌های زباله را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین سهم کلی اجزاء زباله نشان می‌دهد که بیش از ۸۰٪ ساختار زباله‌ی شهری در تهران در سه گروه پسماندهای مواد غذایی، کاغذ/مقوا و پلاستیک/پت قرار می‌گیرد. بخش خمیری در نمونه‌های سالخورده، شامل مواد آلی قابل تجزیه و یا غیرقابل تفکیک، خاک و سایر ذرات ریز و یا غیرقابل تفکیک هستند که به‌عنوان ماتریس و المان چسباننده‌ی توده‌ی زباله عمل می‌کند. در مجموع، در نمونه‌های سالخورده‌ی زباله، سه بخش اجزاء خمیری، پلاستیک/پت و پارچه/چرم/الیاف حدود ۷۵٪ توده‌ی زباله را تشکیل می‌دهند.

با توجه به اینکه آنالیز ترکیب‌های زباله بر مبنای سهم اجزاء مرطوب انجام شده است، بخشی از تغییرات سهم اجزاء گروه کاغذ/مقوا و چوب در نمونه‌های سالخورده با وجود سرعت تجزیه‌ی نسبتاً زیاد آن‌ها می‌تواند به دلیل جذب رطوبت زیاد مصالح ذکر شده پس از دفن باشد. علاوه بر آن، وجود پوشش‌های نایلونی و فسادناپذیر در اغلب زباله‌های شهری، مانع از پوسیدگی سریع کاغذ و مقوا شده است، به طوری که بعضاً کاغذ و مقوا در نمونه‌های سالخورده به‌صورت کاملاً سالم مشاهده شد. افزایش قابل توجه درصد اجزاء خاک/سنگ/سرامیک در نمونه‌های سالخورده به دلیل فسادناپذیری و تغییرات اجزاء آن‌ها با زمان است و علاوه بر آن، به نظر می‌رسد که بخشی از افزایش زیاد سهم گروه اجزاء خاک/سنگ/سرامیک به دلیل مخلوط شدن خاک در پوشش‌های روزانه و نهایی زباله‌ی مرکز دفن با نمونه‌ها باشد.

۵. برنامه‌ی آزمایش‌ها

در آزمایش‌های پژوهش حاضر، نمونه‌های زباله با مقدار یکسان سنگ‌دانه‌های شکسته با درصدهای شکستگی مختلف مخلوط و برای تعیین رفتار و پارامترهای مقاومتی، آزمایش‌های سه‌محوری بزرگ‌مقیاس در حالت تحکیم شده - زهکشی نشده روی نمونه‌ها انجام شد. به این ترتیب با تغییر میزان شکستگی سنگ‌دانه‌های مختلف در آزمایش‌ها، تأثیر شکل بخش خشتی در رفتار توده‌ی زباله ارزیابی شد. آزمایش‌های پژوهش حاضر شامل آزمایش تعیین درصد وزنی سنگ‌دانه‌های شکسته و آزمایش سه‌محوری بزرگ‌مقیاس است. مطالعات آزمایشگاهی در مرکز تحقیقات

و گیاهی (شامل: پسماند مواد غذایی، فضای سبز، کاغذ/مقوا، چوب و ...) تقسیم می‌شود. بخش الیاف مواد قابل احتراق به علت مسلح‌کنندگی توده‌ی زباله، سهم قابل توجهی در تأمین مقاومت برشی دارد.

۳. نمونه‌گیری از مرکز دفن

مرکز دفن زباله‌ی کهریزک، با مساحت ۱۲۰۰ هکتار در فاصله‌ی ۲۵ کیلومتری جنوب کلان‌شهر تهران و همچنین در جنوب شهر فعلی کهریزک واقع شده است. این محل از سال ۱۳۵۵ محل تخلیه و دفن پسماند شهر تهران بوده و در ابتدای جاده‌ی قدیم تهران - قم واقع شده است و در حال حاضر به نام مجتمع پردازش و دفع زباله‌ی آرادکوه، زیر نظر سازمان مدیریت پسماند، وابسته به شهرداری تهران فعالیت می‌کند. با توجه به آمارهای موجود سازمان مدیریت پسماند شهر تهران،^[۱۶] روزانه به طور متوسط حدود ۸۰۰۰ تن پسماند از مناطق ۲۲ گانه‌ی شهر تهران وارد مرکز دفن زباله می‌شود.

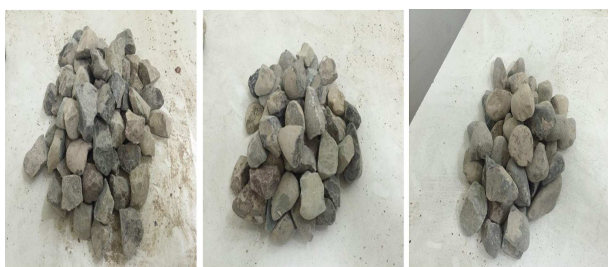
نمونه‌گیری از زباله‌های شهری در دو بخش نمونه‌گیری از زباله‌ی تازه و نمونه‌گیری از زباله‌های سالخورده انجام شده است. نمونه‌های تازه و سالخورده (با سن ۹ سال) به ترتیب از محل زباله‌های ورودی و همچنین از طریق حفاری در مرکز دفن آزمایشی واقع در مجتمع تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های پایه و ژئوتکنیکی آماده‌سازی شدند. از هر یک از محل‌های نمونه‌های تازه و سالخورده، تعداد ۱۵ نمونه با وزن تقریبی ۳۰ الی ۴۰ کیلوگرم تهیه شد. نمونه‌گیری از زباله‌های تازه، پس از اختلاط کامل زباله‌های تخلیه شده از کامیون‌های مختلف و در چند نوبت دریافت شد. برای تهیه‌ی نمونه‌های سالخورده، مرکز دفن آزمایشی و بهداشتی احداث شده در بخش جنوبی مجتمع پردازش آرادکوه انتخاب شد. براساس مطالعات منصور،^[۱۷] دفن زباله در این مرکز دفن آزمایشی در سال ۱۳۸۵ انجام شد، بنابراین در زمان نمونه‌گیری، زباله‌های جامد شهری این محل حدود ۹ سال سن داشتند. مختصات نقاط تهیه‌ی نمونه در جدول ۱ و محل حفاری برای نمونه‌گیری زباله‌های تازه در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲. آنالیز درصد ترکیب‌های زباله‌ی شهری تازه و سالخورده (۹ ساله) در مرکز دفن کهریزک.

نوع نمونه‌ی زباله	چوب	پلاستیک/پت	کاغذ/مقوا	خاک/سنگ سرامیک	پارچه/چرم الیاف	فلز	شیشه	پسماند غذایی/میوه/ سبزیجات (بخش خمیری)
تازه	۰٫۸	۱۱٫۸	۱۳٫۸	۱٫۲	۵٫۲	۲٫۲	۳٫۶	۶۱٫۴
سالخورده	۳٫۴	۲۵٫۶	۷٫۳	۹٫۷	۳٫۴	۱٫۴	۲٫۹	(۴۶٫۵)

جدول ۳. خلاصه‌ی آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر.

نام آزمایش	مشخصات مواد/مصالح نمونه	متغیرها	تعداد آزمایش
درصد رطوبت	نمونه‌های تازه و سالخورده	سن نمونه‌ها	۴
آنالیز اجزاء زباله	نمونه‌های تازه و سالخورده	شماره و سن نمونه	۶
درصد شکستگی سنگدانه	نمونه‌های سنگدانه مختلف	میزان شکستگی دانه‌ها	۹
سه‌محوری بزرگ مقیاس در حالت (CU)	نمونه‌های تازه بدون افزودن سنگدانه	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۶
	نمونه‌های تازه با افزودن سنگدانه با ۱۵ درصد شکستگی	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۴
	نمونه‌های تازه با افزودن سنگدانه با ۴۰ درصد شکستگی	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۳
	نمونه‌های تازه با افزودن سنگدانه با ۶۰ درصد شکستگی	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۳
	نمونه‌های سالخورده بدون افزودن سنگدانه	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۵
	نمونه‌های سالخورده با افزودن سنگدانه با ۱۵ درصد شکستگی	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۳
	نمونه‌های سالخورده با افزودن سنگدانه با ۴۰ درصد شکستگی	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۳
	نمونه‌های سالخورده با افزودن سنگدانه با ۶۰ درصد شکستگی	فشار همه جانبه - تکرار آزمایش	۳



الف) ۱۵٪ شکستگی؛ ب) ۴۰٪ شکستگی؛ ج) ۶۰٪ شکستگی.

شکل ۳. نمونه‌های مختلف سنگ‌دانه‌های مورد استفاده.

نمونه‌ی اشیاع برنامه‌ریزی شدند. انتخاب نوع آزمایش سه‌محوری در پژوهش حاضر (تحکیم شده - زهکشی نشده) با توجه به مرور ادبیات فنی موضوع و همچنین شرایط دفن زباله در مرکز دفن مورد مطالعه بوده است. تعداد ۳۰ آزمایش سه‌محوری در تنش‌های همه‌جانبه‌ی ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال متناسب با محدوده‌ی ارتفاع و سربار موجود در مرکز دفن انجام شده است. مقدار کمینه‌ی ضریب اسکیمیتون (B) برای تمامی نمونه‌ها معادل ۰٫۹۵ در نظر گرفته شد و بعد از اشیاع، نمونه‌ها دست‌کم به مدت ۱۵ ساعت در شرایط تحکیم قرار گرفتند. بارگذاری نمونه‌ها به روش کنترل جابه‌جایی و با نرخ ۰٫۶ میلی‌متر در دقیقه، معادل ۰٫۲۲٪ در دقیقه انجام شد. نرخ بارگذاری ذکر شده براساس معادلات پیشنهادی هید^[۲۰] تعیین و در برخی پژوهش‌ها،^[۲۱] نیز استفاده شده است. مرحله‌ی بارگذاری نمونه‌ها تا کمینه‌ی کرنش ۰٫۳٪ ادامه یافت.

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها و با توجه به ابعاد نمونه در آزمایش سه‌محوری

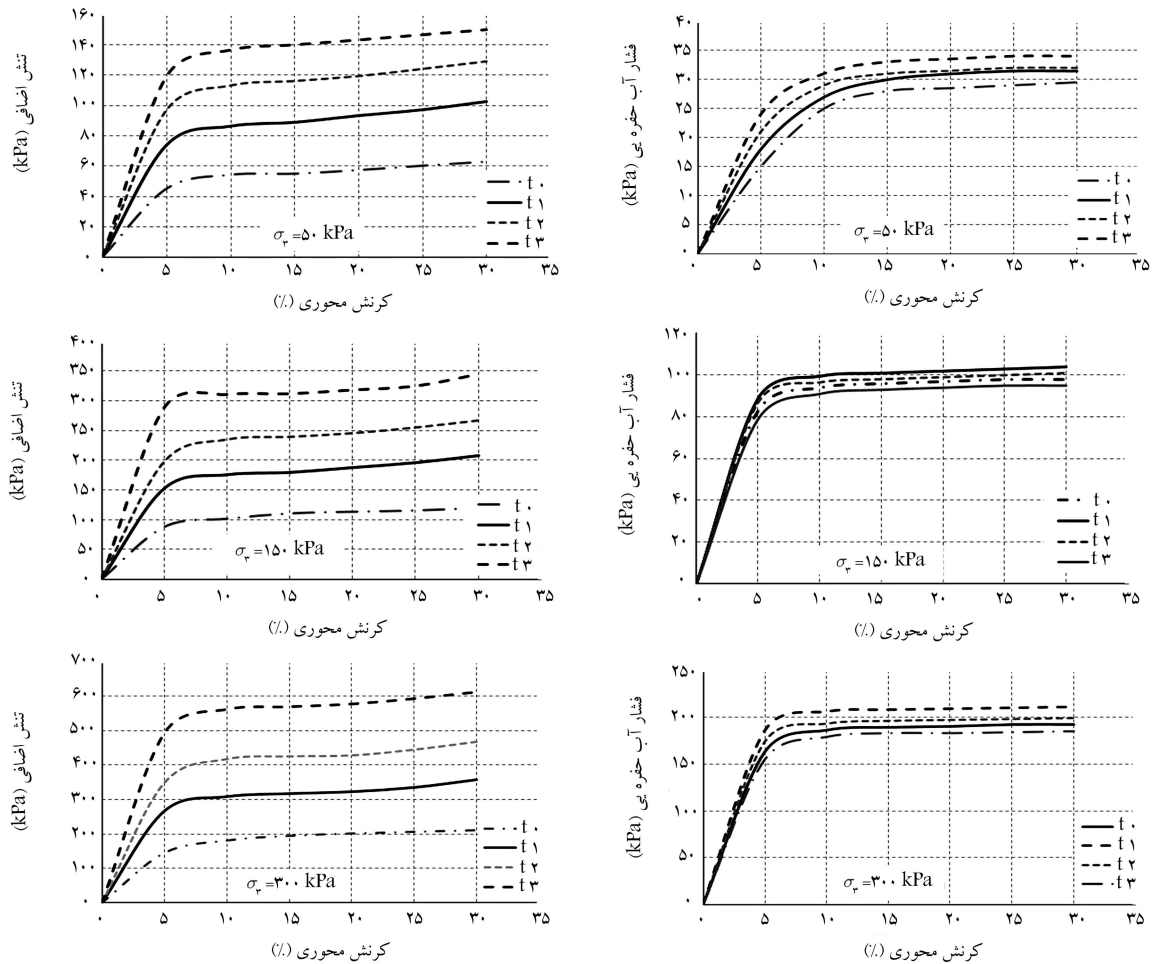
ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. کلیه‌ی آزمون‌های آزمایشگاهی براساس دستورالعمل استاندارد مرتبط از مجموع استانداردهای ASTM انجام شده و فهرست آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر در جدول ۳ ارائه شده است.

۱.۱.۵. ارزیابی شکستگی بخش خنثی

برای اندازه‌گیری تأثیر مواد خنثی و شکل آن‌ها در مقاومت برشی زباله‌های جامد شهری، سنگ‌دانه‌های مورد استفاده برای تهیه‌ی بتن استفاده شد. به این منظور، مقدار درصد وزنی سنگ‌دانه در نمونه‌ها، ۱۵٪ انتخاب شد. این درصد وزنی با توجه به مقدار متوسط بهینه براساس نتایج برخی مطالعات پیشین،^[۱۹،۱۸] تعیین شد. برای تعیین درصد شکستگی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، براساس استاندارد ASTM-D58۲۱، پس از جداسازی بخش مانده روی الک ۴، همه‌ی سنگ‌دانه‌ها بررسی و تعداد وجه‌های شکسته‌ی آن‌ها تعیین شدند. درصد شکستگی دانه‌ها از تقسیم وزن دانه‌هایی که یک وجه شکسته دارند، به کل وزن دانه‌ها به دست آمد. از نظر شکل و وضعیت شکستگی سطحی سنگ‌دانه‌های به‌کار رفته در آزمایش‌ها، ۴ گروه: بدون شکستگی، و با ۱۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ شکستگی جهت استفاده در پژوهش حاضر انتخاب شدند. در شکل ۳، تفاوت در شرایط ظاهری نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

۲.۵. آزمایش‌های سه‌محوری

انجام آزمایش‌های سه‌محوری بزرگ‌مقیاس (قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر) برای نمونه‌های بازسازی‌شده و در شرایط تحکیم شده - زهکشی نشده (CU) بر روی



f₀: نمونه تازه بدون بخش خشی

f₁: نمونه تازه با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۱۵٪

f₂: نمونه تازه با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۴۰٪

f₃: نمونه تازه با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۶۰٪

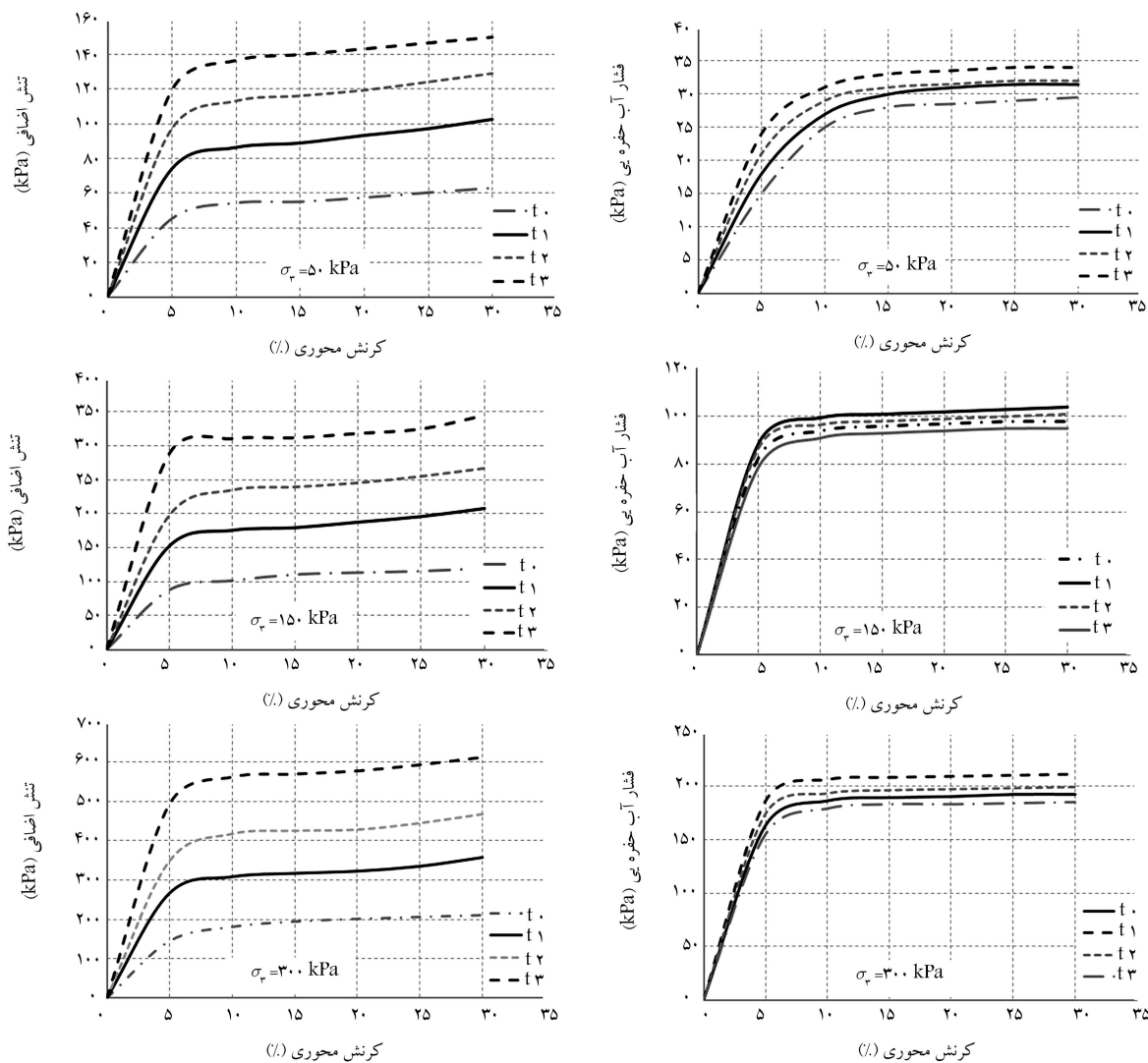
شکل ۴. نمودارهای تنش اضافی و فشار آب حفره‌یی بر حسب کرنش محوری برای نمونه‌های زباله‌ی تازه.

۶. نتایج و بحث

۶.۱. رفتار تنش - کرنش و فشار آب حفره‌یی

نمودارهای رفتاری نمونه‌های تازه در شکل ۴ ارائه شده است. با بررسی منحنی‌های تنش - کرنش و فشار آب حفره‌یی در نمونه‌های مورد بررسی موارد قابل بحث به این شرح است: در نمونه‌های زباله‌های جامد شهری همانند خاک، با افزایش تنش همه‌جانبه، سطح تنش‌های اضافی افزایش می‌یابد؛ همچنین هیچ نقطه‌ی اوجی در نمودار تنش - کرنش مشاهده نمی‌شود، یعنی با افزایش کرنش، تنش اضافی به طور پیوسته افزایش می‌یابد؛ به این ترتیب می‌توان خصوصیات مقاومت برشی زباله را تابع سطح کرنش‌ها دانست. از طرف دیگر، بخش دوم اغلب نمودارها، تقریباً به سمت بالا داشتند که با افزایش درصد مواد خشی و درصد شکستگی سنگ‌دانه‌ها افزایش یافته است. باریتز و همکاران^[۹] اظهار کردند که هر چه قدر مواد خشی بیشتر باشند، وزن مخصوص (γ_d) ترکیب زباله بیشتر است و تعرق نمودار تنش

لازم بود که قطعات بزرگ نمونه‌ها خرد شوند. بنابراین پس از اختلاط کامل، نمونه‌ها به طوری خرد شدند که بیشینه‌ی اندازه‌ی ذرات کمتر از ۳۰ میلی‌متر باشد. همچنین با توجه به مقادیر چگالی محلی اندازه‌گیری شده و به منظور ایجاد شرایط یکسان برای مقایسه‌ی نمونه‌ها، بازسازی نمونه‌های آزمایشگاهی با چگالی ۱۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب انجام شد. برای بازسازی نمونه‌ها از قالب استوانه‌یی فلزی مخصوص به همراه جک هیدرولیکی اعمال فشار جهت تراکم استفاده شد. ابتدا با توجه به حجم نمونه‌ی استوانه‌یی در آزمایش سه‌محوری و چگالی مورد نظر، وزن معینی از نمونه‌های آماده شده جدا شد. سپس نمونه در ۳ لایه‌ی مساوی داخل قالب ریخته شدند و هر لایه تا حصول به ارتفاع مشخص، فشرده شد. در انتهای مرحله‌ی بازسازی، به منظور تثبیت شکل و حصول چگالی مورد نظر، نمونه زیر بار جک هیدرولیکی مخصوص تراکم قرار گرفت. به منظور رعایت اختصار در ارائه‌ی نمودارها و جدول‌ها، برای تشخیص هر گروه نمونه از علامت‌های اختصاری استفاده شده است، که در بخش فهرست علائم معرفی شده‌اند.



t₀: نمونه سالخورده (۹ ساله) بدون بخش خنثی
 t₁: نمونه سالخورده با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۱۵٪
 t₂: نمونه سالخورده با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۴۰٪
 t₃: نمونه سالخورده با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۶۰٪

شکل ۵. نمودارهای تنش اضافی و فشار آب حفره‌یی بر حسب کرنش محوری برای نمونه‌های زباله‌ی سالخورده.

کرنش‌های حدود ۱۷ تا ۲۰ درصد به مقدار ثابتی نزدیک شده و در پایان مرحله‌ی بارگذاری تا حدود ۵۵ الی ۶۰ درصد فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر آزمایش افزایش یافته است. همچنین در تمامی منحنی‌های فشار آب حفره‌یی، تقریباً روند تغییرات و افزایش فشار آب با توجه به تفاوت در سن نمونه‌ها و همچنین تفاوت در میزان درصد شکستگی بخش خنثی به صورت مشابهی است و با یک نمو و شیب تقریباً مشابه افزایش پیدا می‌کنند و تقریباً همگی در نهایت به مقدار ثابتی میل می‌کنند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که دامنه‌ی تغییرات رفتار فشار آب حفره‌یی در نمونه‌های با سن متفاوت و همچنین میزان و درصد شکستگی‌های متفاوت تغییر چندانی نمی‌کند.

نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های سالخورده‌ی مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. ارزیابی کلی رفتار تنش - کرنش نمونه‌ها نشان می‌دهد که اضافه کردن سنگدانه به نمونه‌ها و افزایش درصد شکستگی سنگدانه‌ها باعث ایجاد تغییر در

کرنش افزایش می‌یابد. افزایش سطح تنش‌ها با افزایش تغییرشکل نسبی و عدم وجود نقطه‌ی اوج در نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌های زباله‌های جامد شهری به عنوان رفتار عمومی توده‌ی زباله توسط پژوهشگران دیگری،^[۲۱-۲۴] نیز گزارش شده است.

در تمامی نمودارهای تنش - کرنش، شیب منحنی افزایش بار تا کرنش حدود ۵٪، مقدار بیشتری نسبت به کرنش‌های بزرگ‌تر است. همچنین در اغلب نمودارها بعد از کرنش حدود ۱۵٪، افزایش شیب مجدد اما محدودی مشاهده می‌شود که می‌توان به رفتار کرنش - سخت‌شوندگی نسبت داد و به نظر می‌رسد این امر ناشی از قفل و بست داخلی سنگ‌دانه‌ها^۲ و بسیج شدن مقاومت آن‌ها در کرنش‌های بزرگ باشد.

همچنین شیب منحنی فشار آب حفره‌یی بعد از کرنش‌های بیشینه، ۵ تا ۷ درصد کاهش یافته است؛ اما افزایش فشار آب حفره‌یی تا پایان آزمایش ادامه داشته و در

به نمونه‌های تازه و سالخورده با درصد شکستگی‌های مختلف، سطوح تنش‌های اضافی افزایش می‌یابد که این به معنای افزایش مقاومت برشی نمونه‌هاست؛ همچنین با افزایش درصد شکستگی سنگ‌دانه‌ها، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. اما در مورد نرخ افزایش تنش‌های اضافی با توجه به تغییرات شیب منحنی، همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدای نمودار افزایش شیب زیادتر است، بنابراین مقاومت برشی نمونه‌ها با افزودن سنگ‌دانه‌های بخش خنثی در ابتدا افزایش قابل توجهی می‌یابد. از درصد شکستگی ۱۵ تا ۴۰، مقاومت برشی ولی با شیب ملایم‌تر همچنان در حال افزایش است، که به نظر می‌رسد در این مرحله سنگ‌دانه‌ها در حال بسیج شدن مقاومت خود هستند و در نهایت هنگامی که درصد شکستگی به ۶۰ می‌رسد، دانه‌ها در داخل یکدیگر فرو می‌روند و پدیده‌ی قفل‌شدگی دانه‌ها افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد، که به علت تنش همه‌جانبه‌ی زیاد، یک اصطکاک سطحی بین ذرات ایجاد می‌شود. تمامی فرایندهای عنوان شده باعث می‌شود که با افزایش درصد شکستگی، مقاومت برشی افزایش یابد.

نکته‌ی بعدی این است که میزان تنش‌های اضافی در تمامی سنگ‌دانه‌ها با درصد‌های شکستگی مختلف، با افزایش کرنش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در کرنش ۳۰٪ میزان تنش اضافی بیشتری نسبت به کرنش ۲۰٪ در نمودارها مشاهده می‌شود و به‌طور مشابه، مسئله‌ی کنونی برای کرنش‌های ۲۰٪ و ۱۰٪ نیز صادق است. به نظر می‌رسد عامل قفل‌شدگی دانه‌ها و اصطکاک سطحی بیشتر سنگ‌دانه در کرنش‌های بالاتر، دلیل افزایش میزان تنش‌های اضافی است.

برای مقایسه‌ی مقادیر تنش‌های اضافی در مقادیر کرنش‌های مشخص، براساس نتایج کلیه‌ی آزمایش‌های انجام شده، مقدار تنش‌های اصلی کوچک‌تر در برابر تنش اضافی برای ۳ سطح کرنش ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ در شکل ۷ مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش کرنش‌ها، میزان تنش‌های اضافی و همچنین فاصله‌ی تنش کمینه و بیشینه افزایش یافته است.

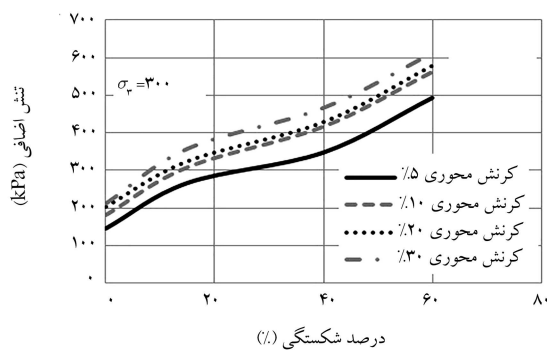
براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که برای تنش همه‌جانبه‌ی 300 kPa ، اختلاف تنش اضافی بین نمونه‌های t_0 و t_2 زیادتر است و به نظر می‌رسد که اختلاف بین رفتار نمونه‌ها در تنش‌های همه‌جانبه‌ی بزرگ‌تر و با افزایش سطح کرنش‌ها افزایش یافته و در سطوح بالاتر کرنش، نمونه‌های t_2 و f_2 بالاترین و نمونه‌های t_0 و f_0 پایین‌ترین مقاومت برشی را نشان داده‌اند. دلیل این موضوع را می‌توان ناشی از تأثیر بخش خنثی در تأمین مقاومت برشی توده‌ی پسماند ذکر کرد که با افزایش تنش همه‌جانبه و همچنین افزایش سطح کرنش‌ها، نقش بخش خنثی پررنگ‌تر می‌شود.

مقاومت نمونه‌ها و افزایش تنش‌های اضافی شده است؛ به طوری که در هر دو پسماند تازه و سالخورده با اضافه کردن سنگ‌دانه با درصد شکستگی‌های ۱۵، ۴۰ و ۶۰ درصد و مقایسه‌ی آن‌ها با نمونه‌های بدون سنگ‌دانه معلوم می‌شود که نمونه‌های سنگ‌دانه با بیشترین درصد شکستگی، بیشترین میزان تنش اضافی را دارند (t_2 در نمونه‌های سالخورده و f_2 در نمونه‌های تازه). به همین ترتیب، هر چه میزان شکستگی کاهش می‌یابد، از میزان تنش اضافی نیز کاسته می‌شود و در نهایت نمونه‌های بدون سنگ‌دانه، کمترین میزان تنش اضافی را نشان می‌دهند (f_0 و t_0).

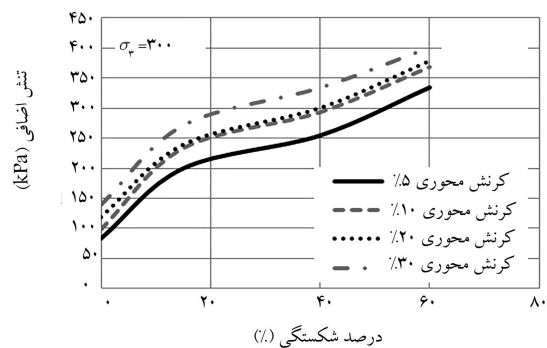
دو مورد حائز اهمیت دیگر در مورد محدوده‌ی تغییرات میزان تنش در منحنی‌ها این است که اولاً، با افزایش تنش همه‌جانبه، تنش اضافی وارده افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد ایجاد قفل و بست بین دانه‌ها از مهم‌ترین دلایل پدیده‌ی مذکور باشد. هر چه میزان شکستگی دانه‌ها بیشتر باشد، اصطکاک و قفل و بست بین دانه‌ی بیشتر است و توده‌ی بار بیشتری را می‌توانند تحمل کنند؛ از این جهت فاصله‌ی منحنی‌ها تحت تأثیر رفتار این بخش قرار می‌گیرد. نکته‌ی دوم اینکه با مقایسه‌ی منحنی‌های مربوط به نمونه‌های تازه و سالخورده مشاهده می‌شود که با افزایش سن، مقدار تنش اضافی وارد به نمونه افزایش محسوسی نشان می‌دهد. دلیل این رفتار می‌تواند ناشی از تغییر دانه‌بندی و یکنواخت و همگن شده‌ی آن و در نتیجه افزایش اصطکاک و قفل و بست مواد و افزایش مقاومت و سطح تنش‌ها باشد.

مقایسه‌ی کلی نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در تمامی تنش‌های همه‌جانبه، منحنی نمونه‌هایی که در آن‌ها سنگ‌دانه‌ها با ۶۰٪ شکستگی مخلوط شده‌اند، در بالاترین مکان نسبت به سایر منحنی‌ها و سپس به ترتیب منحنی نمونه‌های مخلوط شده با سنگ‌دانه‌های دارای ۴۰٪ و ۱۵٪ شکستگی و در نهایت منحنی نمونه‌های خام بدون بخش خنثی در پایین‌ترین محل نسبت به سایر منحنی‌ها قرار گرفته‌اند، که این موضوع به دلیل تأثیر وجود و زبری سطوح بخش خنثی در افزایش قفل و بست بین دانه‌ی و در نتیجه افزایش مقاومت برشی نمونه‌هاست. جهت بررسی تأثیر بخش خنثی و میزان شکستگی آن در مقاومت برشی زباله، نمودارهای تنش اضافی در مقابل درصد شکستگی مواد خنثی در کرنش‌های مختلف در شکل ۶ مشاهده می‌شود. به دلیل تأثیر بیشتر بخش خنثی در سطوح تنش همه‌جانبه‌ی بالاتر، نمودارهای ذکرشده برای شرایط تنش همه‌جانبه‌ی 300 kPa ارائه شده است.

با بررسی منحنی‌های شکل ۶ مشاهده می‌شود که با اضافه کردن سنگ‌دانه

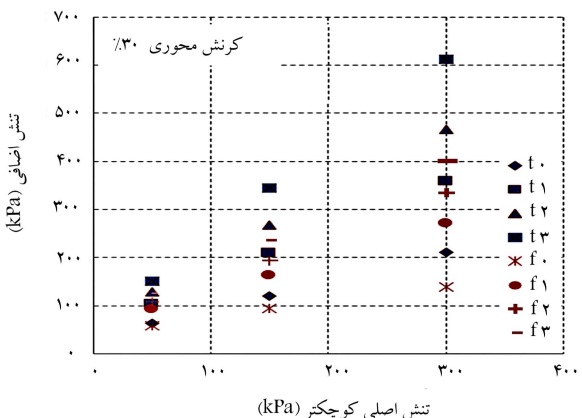
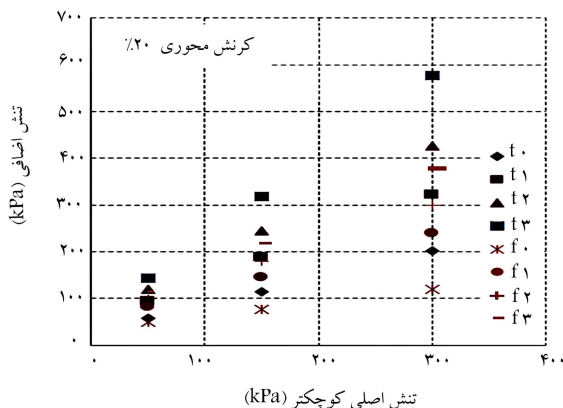
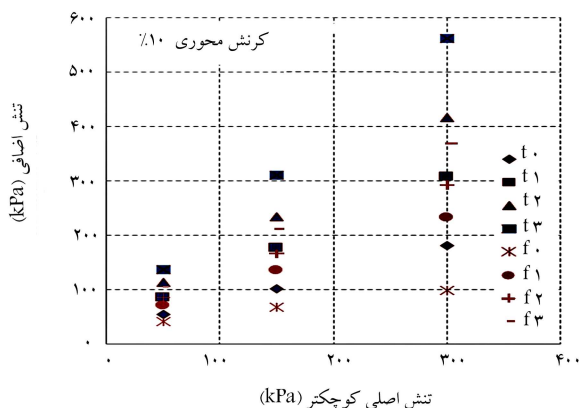


ب) نمونه‌های سالخورده.



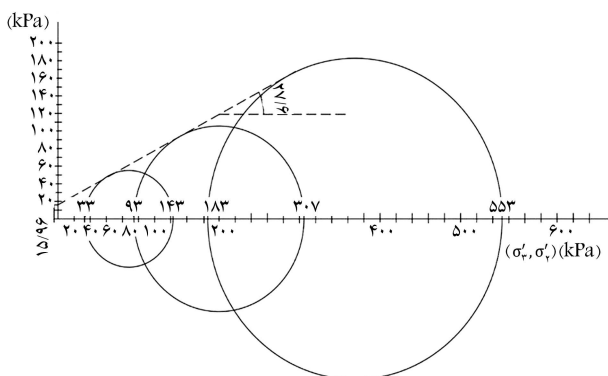
الف) نمونه‌های تازه؛

شکل ۶. نمودار تنش اضافی در مقابل درصد شکستگی بخش خنثی.



- f₀: نمونه تازه بدون بخش خنثی
- f₁: نمونه تازه با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۱۵٪
- f₂: نمونه تازه با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۴۰٪
- f₃: نمونه تازه با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۶۰٪
- t₀: نمونه سالخورده (۹ ساله) بدون بخش خنثی
- t₁: نمونه سالخورده با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۱۵٪
- t₂: نمونه سالخورده با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۴۰٪
- t₃: نمونه سالخورده با افزودن سنگدانه با درصد شکستگی ۶۰٪

شکل ۷. نمودار تنش‌های اصلی کوچک‌تر در برابر تنش اضافی برای ۳ سطح کرنش ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪.



شکل ۸. نمونه‌ی دایره‌ی موهر برای نمونه‌ی تازه با سنگ‌دانه‌ی دارای ۶۰٪ شکستگی بر حسب پارامترهای تنش مؤثر.

۲.۶. روند تغییر پارامترهای مقاومت برشی

برای تعیین نقطه‌ی گسیختگی در نمودارهای تنش - کرنش برای نمونه‌های زباله، معیارهای مختلفی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است و به نظر می‌رسد که اتفاق نظر جامعی در باره‌ی این موضوع وجود ندارد. در مطالعات رفتار مقاومت برشی انجام شده توسط تعداد زیادی از پژوهشگران^[۲۷-۲۵، ۲۱، ۱۹] از کرنش ۱۵٪ برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی زباله استفاده شده است. در پژوهش حاضر نیز با توجه به اندازه‌گیری افزایش تنش‌ها تا کرنش‌های ۳۰٪ و عدم وقوع نقطه‌ی اوج در نمودارهای تنش - کرنش، شرایط سطح کرنش ۱۵٪ برای تنش نظیر نقطه‌ی گسیختگی در محاسبه‌ی پارامترهای مقاومت برشی در نظر گرفته شده است.

شریعتمداری و همکاران^[۲۱] اظهار داشتند که به علت استفاده از پوشش خاک در لایه‌ی نهایی روی مرکز دفن‌ها و تماس آن با لایه‌های زباله، ایجاد تغییرشکل بیش از ۱۵٪ در لایه‌ی زباله می‌تواند باعث ایجاد ترک، گسیختگی و از کار افتادن لایه‌ی پوشش خاک شود و از این جهت کرنش ۱۵٪، حد بالای تغییرشکل قابل قبول در عملکرد مرکز دفن‌ها محسوب می‌شود. در شکل ۸، نمونه‌ی از دوایر موهر رسم شده براساس نتایج به دست آمده برای نمونه‌های تازه با افزودن سنگ‌دانه با مقدار شکستگی ۶۰٪ براساس پارامترهای تنش کل مشاهده می‌شود.

در جدول ۴، پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها براساس پوش موهر-کولمب برای نمونه‌های تازه و سالخورده در حالت بدون افزودن سنگ‌دانه و همچنین حالت‌های افزودن سنگ‌دانه با درصد شکستگی‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به اینکه فشار آب حفره‌ی در حین آزمایش اندازه‌گیری شده است، پارامترهای تنش کل و تنش مؤثر و مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی برای هر یک از نمونه‌ها

ارائه شده است. روند کلی تغییرات نتایج نشان می‌دهد که وجود بخش خنثی باعث افزایش مقاومت برشی توده‌ی زباله می‌شود و علاوه بر آن، شکل بخش خنثی و میزان زبری و نرمی سطوح بخش ذکر شده نیز در مقاومت برشی توده‌ی زباله تأثیرگذار است. با وجود سهم محدود بخش خنثی در کل توده (۱۵٪)، تأثیر شکل آن در رفتار توده قابل توجه است و زاویه‌ی اصطکاک داخلی را تا بیش از ۱۰٪ و چسبندگی را بیش از ۵٪ افزایش می‌دهد.

نمودارهای شکل ۹، پارامترهای مقاومت برشی محاسبه شده براساس آزمایش‌های سه‌محوری را برای نمونه‌های تازه و سالخورده در حالت بدون افزودن سنگ‌دانه و همچنین حالت‌های افزودن سنگ‌دانه با درصد شکستگی‌های مختلف نشان

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تازه و سالخورده (۹ ساله).

گروه (نوع) نمونه	علامت اختصاری	مقدار بخش خنثی (درصد)	درصد شکستگی سنگ‌دانه‌های بخش خنثی	چسبندگی (کیلو پاسکال)		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	
				کل	مؤثر	کل	مؤثر
سالخورده	t_0	۰	-	۱۰٫۸	۸٫۱	۱۲٫۶	۲۵٫۶
	t_1	۱۵	۱۵	۱۵٫۶	۶٫۰	۱۸٫۳	۳۷٫۸
	t_2	۱۵	۴۰	۱۸٫۱	۱۱٫۷	۲۲٫۴	۳۹٫۹
	t_3	۱۵	۶۰	۱۶٫۵	۱۴٫۷	۲۷٫۵	۴۳٫۰
تازه	f_0	۰	-	۱۴٫۳	۱۲٫۹	۶٫۶	۹٫۷
	f_1	۱۵	۱۵	۱۸٫۳	۱۷٫۷	۱۳٫۹	۱۷٫۹
	f_2	۱۵	۴۰	۲۰٫۰	۱۸٫۴	۱۶٫۶	۲۲٫۳
	f_3	۱۵	۶۰	۲۰٫۳	۱۶٫۰	۲۰٫۰	۲۷٫۶

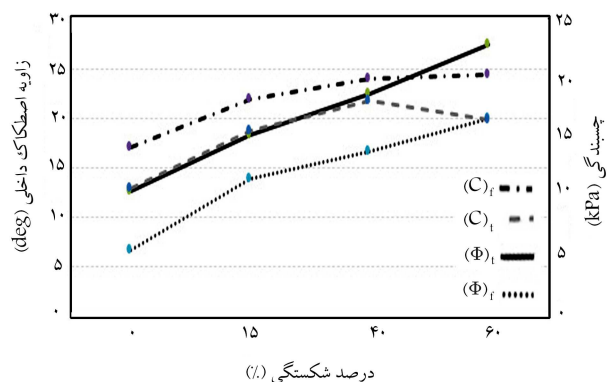
گزارش شده (باریتر و همکاران،^[۹] به نظر می‌رسد که این موضوع به دلیل تفاوت قابل توجه در ترکیب‌های نمونه‌های زباله‌ی مورد مطالعه و سهم قابل توجه بخش مواد آلی و فسادپذیر در نمونه‌ها باشد. ردی و همکاران،^[۱۲۶] تغییرات پارامترهای مقاومت برشی زباله‌های جامد شهری در مراحل مختلف تجزیه را بررسی و از زباله‌ی مصنوعی و مرکز دفن بیورآکتور برای بررسی نمونه‌های زباله در مراحل مختلف تجزیه استفاده کردند و اظهار داشتند که با پیشرفت مراحل تجزیه‌ی زباله، زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. به عقیده‌ی آنها، عدم وجود مصالح اصطکاک‌ی و وجود خاک‌های چسبیده، باعث افزایش چسبندگی و کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی با پیشرفت تجزیه می‌شود. همچنین اظهار داشتند که مغایرت در رفتار مشاهده شده در مطالعات آنها با نتایج برخی از مطالعات پیشین، شاید به دلیل خردشدگی و عدم حضور اجزاء مسلح‌کننده مثل الیاف در نمونه‌های زباله‌های مصنوعی باشد.

نکته‌ی دیگر، اختلاف میان پارامترهای مؤثر و کل در حالت نمونه‌های تازه و سالخورده است. براساس نتایج ارائه شده بین مقادیر پارامترهای کل و مؤثر حاصل از نتایج آزمایش‌ها روی نمونه‌های زباله‌ی تازه و سالخورده، اختلافی وجود دارد که ناشی از افزایش فشار آب حفره‌ی در طی مرحله‌ی برش است و این اختلاف در نتایج پارامتر زاویه‌ی اصطکاک داخلی بیشتر است؛ علاوه بر آن، میزان اختلاف زاویه‌ی اصطکاک داخلی کل و مؤثر در نمونه‌های سالخورده بیشتر از نمونه‌های تازه است.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی تأثیر بخش خنثی در پارامترهای مقاومت برشی پسماندهای جامد شهری تازه و سالخورده، دو نمونه زباله‌های جامد شهری تازه و ۹ ساله از مرکز دفن کهریرک تهران مطالعه شدند. برای این منظور، نمونه‌ها با مقدار ۱۵٪ وزنی از ۳ نوع سنگ‌دانه با درصد شکستگی‌های مختلف (۱۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪)، مخلوط و آزمایش‌های سه‌محوری بزرگ‌مقیاس بر روی نمونه‌های بازسازی شده انجام شد، که جمع‌بندی آن‌ها به این شرح است:

-- وجود بخش خنثی در نمونه‌های زباله‌ی تازه و سالخورده باعث افزایش مقاومت برشی توده می‌شود که عمدتاً به صورت رشد زاویه‌ی اصطکاک داخلی ایجاد می‌شود؛ همچنین افزایش تنش اضافی ناشی از وجود بخش خنثی در گسیختگی



شکل ۹. روند تغییرات پارامترهای مقاومتی نمونه‌های تازه و سالخورده با درصد شکستگی بخش خنثی.

می‌دهند. با توجه به اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی در حین انجام آزمایش، پارامترها برای تنش کل و تنش مؤثر محاسبه و مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی برای هر یک از نمونه‌ها در شکل مذکور ارائه شده است؛ که در آن‌ها، پارامترهای $(\Phi)_t$ و $(c)_t$ به ترتیب زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی مربوط به نمونه‌های سالخورده و پارامترهای $(\Phi)_f$ و $(c)_f$ به ترتیب زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی مربوط به نمونه‌های تازه هستند.

با توجه به نمودارهای شکل ۹ ملاحظه می‌شود که زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) با افزودن بخش خنثی (سنگ‌دانه) افزایش یافته و هر چه میزان شکستگی سنگ‌دانه‌ها بیشتر شده است، افزایش (φ) نیز بیشتر بوده است. دلیل اصلی این امر می‌تواند ناشی از افزایش قفل و بست ذرات زباله با سنگ‌دانه‌ها باشد. در نمونه‌های سالخورده به دلیل ریزتر شدن و همگن شدن دانه‌بندی، میزان قفل و بست و اصطکاک مواد بیشتر بوده و همچنین کاهش مواد آلی، باعث کاهش لغزش اجزاء و اصطکاک مواد شده است. بنابراین میزان افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر در نمونه‌های سالخورده بیشتر از نمونه‌های تازه است.

در مورد پارامتر چسبندگی (c) براساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که وجود سنگ‌دانه با درصد شکستگی‌های مختلف، باعث افزایش محدودی در مقدار چسبندگی توده شده است. اگرچه در ادبیات فنی موضوع در مواردی عدم ارتباط بین پارامتر چسبندگی با ترکیب‌ها، درجه‌ی تجزیه و یا سالخوردگی نمونه‌های زباله‌ی

در مجموع می‌توان اظهار داشت که مواد بخش خنثی در توده‌ی ناهمگن زباله‌های جامد شهری، تأثیر قابل توجهی در مقاومت برشی و رفتار تنش - کرنش آن دارد و فرم و میزان زبری سطوح آن نیز در رفتار توده‌ی زباله‌های تازه و سالخورده تأثیرگذار است.

فهرست علائم

- f_0 : نمونه‌ی تازه بدون بخش خنثی؛
 f_1 : نمونه‌ی تازه با افزودن سنگ‌دانه با ۱۵٪ شکستگی؛
 f_2 : نمونه‌ی تازه با افزودن سنگ‌دانه با ۴۰٪ شکستگی؛
 f_3 : نمونه‌ی تازه با افزودن سنگ‌دانه با ۶۰٪ شکستگی؛
 t_0 : نمونه‌ی سالخورده (۹ ساله) بدون بخش خنثی؛
 t_1 : نمونه‌ی سالخورده با افزودن سنگ‌دانه با ۱۵٪ شکستگی؛
 t_2 : نمونه‌ی سالخورده با افزودن سنگ‌دانه با ۴۰٪ شکستگی؛
 t_3 : نمونه‌ی سالخورده با افزودن سنگ‌دانه با ۶۰٪ شکستگی.

توده‌ی زباله، برای سطوح بالاتر کرنش به دلیل قفل و بست بین دانه‌ی بیشتر است.

-- شکل بخش خنثی و میزان زبری و نرمی سطوح آن به طور قابل توجهی در مقاومت برشی توده و رفتار تنش - کرنش آن تأثیرگذار است؛ به طوری که با افزایش زبری و ناهمواری سطحی در بخش خنثی، مقاومت برشی توده‌ی زباله افزایش می‌یابد که در زاویه‌ی اصطکاک داخلی مشهودتر است.

-- مقایسه‌ی رفتارهای نمونه‌های تازه و سالخورده نشان می‌دهد که در نمونه‌های سالخورده، میزان و محدوده‌ی تغییرات تنش اضافی وارد به نمونه، افزایش محسوس را نشان می‌دهد که دلیل آن می‌تواند ناشی از تغییر در دانه‌بندی و یکنواخت و همگن شدن آن و در نتیجه، افزایش اصطکاک و قفل و بست دانه‌ها در نمونه‌های سالخورده باشد.

-- با بررسی روند تغییرات مقاومت برشی نمونه‌ها می‌توان تأثیر مستقیم مواد خنثی را در افزایش مقاومت برشی شاهد بود؛ به طوری که میزان مقاومت مذکور، با افزایش درصد شکستگی مواد رشد محسوس‌تری نشان داده است.

پانوشتها

1. municipal solid waste (MSW)
2. soil-like
3. interlocking

منابع (References)

1. Jafari, N.H., Stark, T.D. and Merry, S. "The July 10, 2000 payatas landfill slope failure", *International Journal of Geoenvironmental Case Histories*, **2**(3), pp. 208-228 (2013).
2. Blight, G.E. and Fourie, A.B. "Catastrophe revisited-disastrous flow failures of mine and municipal solid waste", *Geotechnical and Geological Engineering*, **23**(3), pp. 219-248 (2005).
3. Merry, S.M., Kavazanjian, E. and Fritz, W. "Payatas landfill failure", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **19**(2), pp. 100-107 (2005).
4. Stoll, O.W. "Mechanical properties of milled refuse", ASCE National Water Resources Engineering Meeting, Phoenix, Arizona, pp. 11- 15 (1971).
5. Landva, A.O., Clark, J.I., Weisner, W.R. and et al. "Geotechnical engineering and refuse landfill", *6th National Conference on Waste Management in Canada*, Vancouver, British Columbia (1986).
6. Machado, S.L., Carvalho, M.F. and Vilar, O.M. "Constitutive model formunicipal solid waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**(11), pp. 940-951 (2002).
7. Haque, M.A. "Dynamic characteristic and stability analysis of municipal solid waste in bioreactor landfill", Doctoral Thesis, The University of Texas At Arlington (2007).
8. Zhan, T.L.T., Chen, Y.M. and Ling, W.A. "Shear strength Characterization of municipal solid waste at the suzhou landfill, China", *Engineering Geology*, **97**(3-4), pp. 97-111 (2008).
9. Bareither, C., Breitmeyer R., Benson, C. and et al. "Deer track bioreactor experiment: Field-scale evaluation of municipal solid waste bioreactor performance", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **138**(6), pp.658-670 (2012).
10. Keramati, M., Shariatmadari, A., Karimpourfard, M. and et al. "Dynamic behaviour of waste materials under cyclic triaxial testing: A case of Kahrizak landfill, Tehran, Iran ", *Iran J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, Springer, **40**(2), pp. 75-83 (2016).
11. Shariatmadari, A., Mansouri, A., Zarrabi, M. and et al. "Effect of waste compaction in landfill settlement-A case study in Iran", 12th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia (2009).
12. Hossain, M.D.S. and Haque, M.A. "The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills", *Waste Manag.*, **29**(5), pp. 1568-1576 (2009).
13. Gomes, C., Lopes, M.L. and Venda Oliveira, P.J. "Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests", *Journal of the Air & Waste Management Association*, **63**(11), pp. 1352-1368 (2013).
14. Castelli, F. and Maugeri, M. "Mechanical properties of municipal solid waste by SDMT", *Waste Management*, **34**(2), pp. 256-265 (2014).

15. Sadeghpour, A.H. "Effect of aging on shear strength behavior of municipal solid waste", Ph.D Thesis, Iran University of Science and Technology (In Persian) (2014).
16. <http://pasmand.tehran.ir>(accessed Sept., 2016).
17. Mansouri, A. "Field scale MSW settlement evaluation in warm and dry region", Ph.D Thesis, Iran University of Science and Technology (In Persian) (2009).
18. Jafari Kelarijani, S.H. "Evaluation the effect of orientation and content of fibrous material on shear strenght parameters of MSW with DST (Case Study: Kahrizak Landfill)", MS.c Thesis, Iran University of Science and Technology (In Persian) (2010).
19. Asadi, M. "Use of Hyperbolic modeling in simulation of DST results in MSW", MS.c Thesis, Iran University of Science and Technology (In Persian) (2012).
20. Head, K.H. "Manual of soil laboratory testing", Effective Stress Tests, Pentech Press, 3, London (1986).
21. Shariatmadari, N., Sadeghpour, A.H. and Razaghian, F. "Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste", *International Journal of Civil Engineering*, **12**(3), pp.226-237 (2014).
22. Grisolia, M., Napoleoni, Q., Sirini, P. and et al. "Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in-situ tests", *Proc. of The 15th Conference of Geotechnics of Torino, Societa Ingegnerie Architetti in Torino* (In Italian) (1991).
23. Nascimento, J.C.F. "Mechanical behavior of municipal solid waste", M.Sc. Thesis, University of Sao Paulo, Sao Carlos, SP, Brazil (In Portuguese) (2007).
24. Vilar, O.M. and Carvalho, M.F. "Mechanical properties of municipal solid waste", *Journal of Testing and Evaluation*, **32**(6), pp. 1-12 (2004).
25. Gabr, M.A. and Valero, S.N. "Geotechnical properties of municipal solid waste", *Geotechnical Testing Journal*, **18**(2), pp. 241-254 (1995).
26. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J. and et al. "Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation", *Waste Management*, **31**(11), pp. 2275-2286 (2011).
27. Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E. and et al. "Gemechanical properties of municipal solid waste in dona juana sanitary landfill", *Proc. of the 4th International Congress on Environmental Geotechnics, Rio De Janeiro, Brazil*, A.A. Balkema, 1, pp. 177-182 (2002).