



پیش بینی رفتار تنش- کرنش زباله های جامد شهری با استفاده از مدل های پیربولیک و روش رگرسیون چند جمله ای تکاملی (EPR)

محسن کرامتی^{*}، حسین مرادی مقدم، امین رامش

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۴ دی ۱۳۹۶
بازنگری: ۱ اردیبهشت ۱۳۹۷
پذیرش: ۱۸ تیر ۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۳۱ تیر ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

زباله
لندفیل
اثر افزایش سن
هیپربولیک
EPR

چکیده: گسیختگی مراکز دفن زباله در سال های اخیر سبب اهمیت بررسی رفتار زباله ها گردیده است. زباله ها به عنوان اصلی ترین عنصر تشکیل دهنده در لندفیل ها دارای عملکرد پیچیده ای می باشند. در این تحقیق با استفاده از نتایج انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ مقیاس در ابعاد $150 \times 300 \times 300$ میلی متر بر روی زباله های با سنین تازه و سه ماهه، ۲ مدل جهت پیش بینی رفتار زباله ها ارائه شده است. هدف از این تحقیق نیز پیش بینی رفتار تنش-کرنش زباله های جامد شهری تحت اثر افزایش سن برای لندفیل کهریزک تهران به عنوان نمونه ای از لندفیل های کشورهای در حال توسعه با استفاده از مدل های ساختاری می باشد. این مدل ها عبارتند از: مدل هیپربولیک و روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به نام رگرسیون چند جمله ای تکاملی (EPR). در این سری آزمایش ها فرآیند افزایش سن تا ۳ ماهگی، به صورت مصنوعی در آزمایشگاه به نمونه ها اعمال شده است و از سه تنش قائم ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال، همچنین سه نرخ جابه جایی برشی $0/8$ ، ۸ و ۱۹ میلی متر بر دقیقه برای نمونه های با سنین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق علاوه بر ارزیابی رفتار زباله ها تحت اثر افزایش سن و پوسیدگی، نشان دهنده تطابق بالای برازش تابع هیپربولیک و EPR با آزمایش های انجام شده توسط دستگاه برش مستقیم می باشد. این مطالعه در نهایت مزیت مدل EPR نسبت به مدل هیپربولیک، در دقت بالاتر برای تمامی آزمایش های انجام شده را نشان می دهد.

۱- مقدمه

هر ساله حجم زیادی از میلیون ها تن زباله جامد شهری به صورت دفن در محل، در مراکز دفن زباله، دفن می شود. از این رو شناخت رفتار زباله ها جهت طراحی و نگهداری لندفیل ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۱ و ۲]. یکی از مخاطرات زیست محیطی نیز ناشی از شکست همین شیب های مراکز دفن زباله می باشد که در سال های اخیر نمونه هایی از آن در نقاط مختلف جهان به وقوع پیوسته است (آنولیوسیا^۱ ۲۰۰۸، لئوویگاجه^۲ ۲۰۰۵). این خرابی ها علاوه بر خطرات زیست محیطی سبب فجایع انسانی نیز می گردد. از این رو اهمیت ارزیابی پاسخ مکانیکی زباله ها تحت اثر افزایش سن و پوسیدگی به جهت جلوگیری از این حوادث بیش از پیش مورد توجه می باشد. ارزیابی رفتار مکانیکی زباله های جامد شهری به عنوان مصالح عمده تشکیل دهنده مراکز دفن زباله نزدیک به دو دهه موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده بوده است. بسیاری از محقق ها سعی بر آن داشتند که

یک چهارچوب رفتاری برای این مصالح معرفی نمایند که با اتکا بر آن بتوان رفتار مراکز دفن زباله را تحت شرایط متفاوت حاکم بر زباله ها شبیه سازی کرد. در همین راستا پژوهش های بسیاری در مورد رفتار مکانیکی زباله های جامد شهری در سال های اخیر انجام شده است که از آن جمله می توان به (شریعتمداری^۳ ۲۰۱۰؛ گبر^۴ ۲۰۰۷؛ زکاس^۵ ۲۰۰۷؛ کاوازانجیان^۶ ۲۰۰۱) اشاره نمود [۳-۶].

ایران از لحاظ پیشرفت و صنعت در رده کشورهای جهان سوم است و الگوی مصرفی متفاوت با کشورهای توسعه یافته دارد، بنابراین به نظر می رسد که ترکیبات و درصد اجزای تشکیل دهنده زباله ها و پسماندهای آن نیز مشابه کشورهای جهان سوم باشد. از جمله این کشورها که پژوهش های مشابهی در زمینه افزایش سن در آن انجام شده است برزیل می باشد، در این رابطه کریم-پورفرد^۷ ۲۰۱۱؛ ماچادو^۸ ۲۰۰۲ افزایش سن را با افزایش

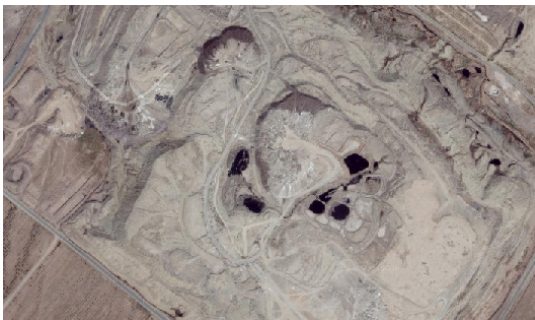
3 Shariatmadari
4 Gabr
5 Zekkos
6 Kavazanjian
7 Karimpour-Fard
8 Machado

^{*}نویسنده عهده دار مکاتبات: keramati@shahroodut.ac.ir

1 Ano Liosia
2 Leuwigajah

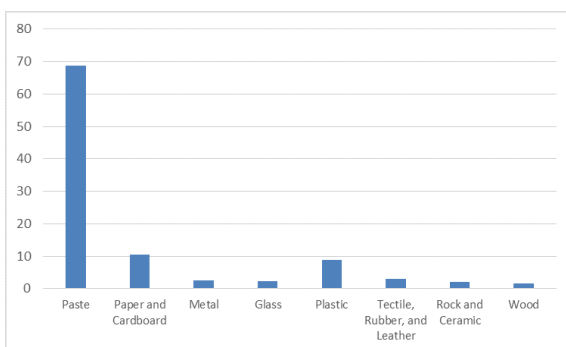
۲- آماده سازی نمونه‌ها و برنامه آزمایش‌ها

نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه از محل مرکز دفن زباله کهریزک (شکل ۱) با مساحتی در حدود ۱۵۰۰ هکتار واقع در جنوب شهر تهران تهیه شده‌اند، در حال حاضر تأسیسات مختلفی در خصوص دفع و بازیافت پسماندهای شهر تهران و شهرهای کوچک اطراف در این مجتمع مشغول به فعالیت هستند. این مرکز به عنوان بزرگ‌ترین مرکز دفن خاورمیانه روزانه پذیرای به طور متوسط ۹۵۰۰ تن زباله می‌باشد که در بهترین شرایط حداکثر ۵۰۰ تن بازیافت شده و بخش عمده آن دفن می‌شود.



شکل ۱. مرکز دفن زباله کهریزک - تهران
Fig. 1. Kahrizak landfill - Tehran

بررسی اجزای تشکیل‌دهنده مرکز دفن کهریزک (شکل ۲) با توجه به نمونه‌های اخذ شده مشابه، نشان‌دهنده دامنه وسیعی از اندازه ذرات می‌باشد که بیشترین قسمت اجزای تشکیل‌دهنده آن را پسماند تر یا همان مواد آلی تشکیل می‌دهد. تغییرات گسترده در اندازه و اجزای تشکیل‌دهنده در مراکز دفن زباله سبب انجام ارزیابی‌های مربوط به شناخت رفتار زباله‌ها به صورت محلی و منطقه‌ای شده است.



شکل ۲. اجزای تشکیل‌دهنده زباله - مرکز دفن کهریزک
Fig. 2. Waste components - Kahrizak landfill

مقاومت همراه دانستند [۷ و ۸]. بنابراین به نظر می‌رسد که زباله‌های استفاده شده در این مطالعه نیز الگوی رفتاری مشابهی داشته باشند. در این رابطه آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس با ابعاد 30×30 سانتی‌متر بر روی نمونه‌ها با سنین و نرخ‌های جابه‌جایی برشی مختلف انجام شده است تا پاسخ مکانیکی زباله همراه با افزایش سن و پوسیدگی مورد ارزیابی قرار گیرد. زباله‌های جامد شهری متشکل از ذرات تراکم‌پذیری هستند که تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله تغییرات بیولوژیکی به مرور زمان دچار کاهش وزن می‌شوند. بخش غیرخمیری زباله نیز شامل الیاف عمدتاً پلاستیک هستند که به صورت المان‌های تسلیح‌کننده عمل می‌کنند و با گذشت زمان تحت اثر افزایش سن دچار کاهش یا افزایش مقاومت می‌شوند که البته آن هم تابع عوامل مختلف است. ترکیب این دو بخش با رفتار کاملاً وابسته به زمان و متأثر از عوامل گوناگون، باعث سختی ارائه یک چهارچوب رفتاری برای این نوع از مصالح می‌گردد. سختی این هدف وقتی نمایان‌تر می‌گردد که شرایط زباله‌ها و نیز مسائل حاکم بر رفتار آن‌ها نه تنها از کشوری به کشور دیگر بلکه حتی از شهری به شهر دیگر در یک منطقه می‌تواند متفاوت باشد.

مدل هیبربولیک در ابتدا جهت پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش خاک‌ها توسط کوندنر^۱ ۱۹۶۳ ارائه گردید، فرض شده است که این مدل الاستیک هیبربولیک برای توصیف پاسخ تنش-کرنش زباله‌های جامد شهری نیز مناسب باشد. از این‌رو رفتار تنش-کرنش زباله‌های جامد شهری با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده است برای مثال (سینگ و فلمینگ^۲ ۲۰۱۰، اسدی^۳ ۲۰۱۷) [۹ و ۱۰]. در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰، دیویدسن^۴ روش رگرسیون جدیدی به نام رگرسیون سمبلیک قاعده‌ای^۵ (R-BSR) برای ساخت مدل‌های چند جمله‌ای بر اساس هر دو روش رگرسیون عددی و سمبولیک معرفی کردند [۱۱]. بر پایه ایده ارائه شده توسط دیویدسن، روش EPR در سال ۲۰۰۴ توسط گیستولیس^۶ معرفی شد و در سال‌های بعد توسعه یافت [۱۲]. از جمله کارهای صورت گرفته در این زمینه می‌توان به پیش‌بینی مقاومت برشی زباله‌های جامد شهری با استفاده از روش EPR اشاره کرد (کرامتی^۶ ۲۰۱۴) [۱۳]. نتایج کلیه پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون با توجه به اجزای تشکیل‌دهنده زباله و الگوی مصرفی در محل لندفیل مورد مطالعه متفاوت می‌باشد. از این‌رو انجام پژوهش‌های محلی برای ارزیابی رفتار مکانیکی زباله‌ها مورد تأکید می‌باشد. در نهایت اهمیت مراکز دفن زباله از نظر معیارهای زیست‌محیطی و انسانی سبب گردیده است که خصوصیات مصالح زباله در حین فرآیند پوسیدگی بیشتر مورد توجه قرار بگیرد و دو مدل هیبربولیک و EPR جهت پیش‌بینی رفتار مکانیکی زباله‌ها تحت شرایط افزایش سن ارائه شود.

- 1 Kondner
- 2 Singh Fleming
- 3 Asadi
- 4 Davidson
- 5 Rule-Based Symbolic Regression
- 6 Giustolisi

راستای فرآیند مصنوعی افزایش سن تا سه ماهگی (شکل ۴) در بشکه‌های مخصوص نگهداری شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، نمونه‌سازی در قالب ۱۵ سانتی‌متری دستگاه در ۵ لایه ۳ سانتی‌متری انجام شد. با توجه به تفاوت در اجزای تشکیل‌دهنده و متغیر بودن وزن مخصوص ذرات، نمونه‌سازی براساس انرژی تراکم ثابت در هر لایه انجام گرفت. به همین جهت وزنه تراکم استاندارد اختیار شد، به طوری که در هر لایه از ۷۵ ضربه (۳ ضربه در هر نقطه و ۲۵ نقطه در هر لایه) استفاده شده است (شکل ۵).



شکل ۴. وضعیت ظاهری نمونه‌های سه ماهه

Fig. 4. Appearance of three- months samples



شکل ۵. ساخت نمونه با استفاده از وزنه تراکم استاندارد

Fig. 5. Sample construction using standard compaction weights

آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس برای بررسی پارامترهایی همچون اثر افزایش سن و به صورت جانبی تنش قائم و نرخ جابه‌جایی برشی، در برنامه این کار تحقیقاتی قرار گرفته است. نمونه‌های زباله با سه تنش قائم ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال (بر اساس وزن مخصوص زباله‌های دفن شده و حداکثر ارتفاع اجرا شده در مرکز دفن) و سه نرخ جابه‌جایی برشی

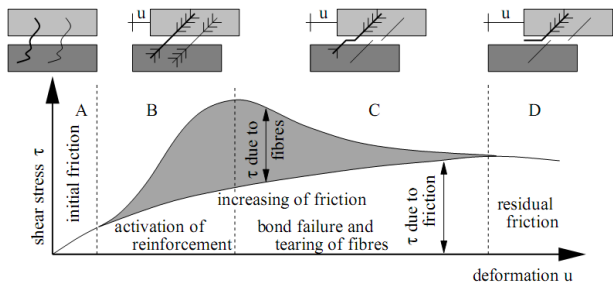
آزمایش برش مستقیم یکی از معمول‌ترین آزمایش‌ها جهت ارزیابی مقاومت برشی زباله‌های جامد شهری می‌باشد که نسبت به آزمایش‌های سه محوری مقاومت برشی کمتری را از خود نشان می‌دهد که این خود در جهت اطمینان عمل می‌کند. دستگاه مورد استفاده در این مطالعه، یک دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس (شکل ۳) با ابعاد $۱۵ * ۳۰ * ۳۰$ سانتی‌متر می‌باشد که توانایی اعمال تنش قائم تا ۹۰۰ کیلوپاسکال و قابلیت اعمال نرخ جابه‌جایی برشی از $۰/۰۰۱$ تا $۱۹/۹۹$ میلی‌متر بر دقیقه را دارا می‌باشد و در آن فاصله بین دو فک بالا و پایین در حدود $۰/۲$ الی $۰/۳$ سانتی‌متر لحاظ شده است (ASTM D3080) [۱۴]. این دستگاه از ۲ بخش تشکیل شده است: بخش اول که شامل سیستم کنترل نرخ جابه‌جایی برشی، دستگاه ثبت اطلاعات و کامپیوتر متصل به آن جهت ذخیره اطلاعات است و بخش دوم شامل جعبه برش و سیستم اعمال بار قائم و کرنش جانبی است.



شکل ۳. تصویری از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس مورد استفاده و متعلقات آن، (I. دستگاه دیتالاگر جهت ثبت داده‌ها، II. نیروسنج، III. کرنش سنج افقی، IV. کرنش سنج قائم)

Fig. 3. Image of large-scale direct shear machine and its accessories, (I. Data logger, II. Force gauge, III. Horizontal strain gauge, IV. Vertical strain gauge)

جهت بررسی اثر افزایش سن در نمونه‌ها مقرر شد که آزمایش‌هایی در دو سن تازه و سه ماهه انجام شود به همین جهت پس از نمونه‌گیری از محل مرکز دفن، با توجه به محدودیت در ابعاد دستگاه ($۳۰ * ۳۰$ سانتی‌مترمربع) و مقررات ذکر شده در آیین‌نامه ASTM D3080-98 (۱۹۹۸) ذرات درشت‌دانه و شامل ابعاد بزرگ‌تر در همان ابتدا حذف گردیدند [۱۴]. پس از انتقال نمونه‌ها به مرکز مطالعات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت بخشی از نمونه‌ها به جهت حفظ تازگی در یخچال (درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها مشابه حالتی در نمونه‌ها در شرایط طبیعی مرکز دفن می‌باشد) و سایر نمونه‌ها در



شکل ۶. مدل پیشنهادی کولش برای مکانیزم برش در زباله

Fig. 6. Kolsch proposed model for waste shear mechanism

وی فرآیند گسیختگی زباله را به ۴ بخش تقسیم‌بندی کرده است. در مرحله A الیاف موجود هنوز شل و آزاد هستند و تنها اثرات اصطکاکی در اوایل این مرحله و در حین برش فعال می‌شود. سپس، در مرحله B نیروی کششی در الیاف فعال می‌شود و منجر به افزایش چشم‌گیر در مقاومت برشی کلی می‌شود. در مرحله C، وقتی که ظرفیت باربری نهایی اصطکاک به حداکثر مقدار خود می‌رسد، الیاف رفتار نرم شوندگی از خود نشان داده و با کاهش شدید تنش برشی کلی همراه هستیم. در این حالت دو مکانیسم جهت توجیه کاهش نیروی کششی به وجود آمده توسط الیاف وجود دارد. اولاً اینکه، الیاف می‌توانند از جای خود و از داخل جسم زباله خارج شوند و در نتیجه طول مهارى خود و نیروی منتقل شده را کاهش دهند. دوماً، مقاومت کششی الیاف از نیروی وارده به آنها بیشتر باشد و الیاف دچار گسیختگی شوند. در نهایت، مقاومت برشی باقی مانده‌ای ناشی از اجزای اصطکاکی که هنوز فعال هستند طی مرحله D پدیدار می‌شود، چراکه همه عوامل تسلیح طی برش از بین رفته‌اند.

لیستی از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ آورده شده است.

۳- مدل‌های پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش

رفتار تنش-کرنش زباله‌های جامد شهری غیرخطی است، این رفتار با سخت‌شدگی شدید در ابتدا تا گسیختگی در نمونه ادامه می‌یابد، که در این تحقیق گسیختگی در کرنش ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. پیش‌بینی رفتار تنش کرنش زباله به دلیل گستردگی در اندازه و ترکیبات اجزای تشکیل‌دهنده تقریباً غیرممکن است، ولی با فرض تغییرات ناچیز اجزاء تشکیل‌دهنده در یک منطقه و الگوی مصرفی یکسان، ارائه مدل‌های ساختاری بر پایه اصول مکانیکی جهت پیش‌بینی طراحی‌های آتی بسیار مفید و قابل استفاده می‌باشد.

۸/۰، ۸ و ۱۹ میلی‌متر بر دقیقه برای زباله‌های با سنین تازه و سه ماهه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به ارزیابی‌های انجام شده توسط سازمان بازیافت شهرداری تهران وزن مخصوص در مرکز دفن کهریزک بین ۸ تا ۱۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب ارائه شده است. کاوازانجیان^۱ (۱۹۹۹) [۱۵] نشان داد نمونه‌های زباله تحت آزمایش برش مستقیم رفتار کاملاً مشابهی مستقل از وزن مخصوص اولیه خود نشان می‌دهند. وزن مخصوص دو نمونه با افزایش تنش همه جانبه به وزن مخصوص واقعی در محل نزدیک شدند و مقاومت برشی دو نمونه مشابه هم بود، در واقع میزان و نحوه تراکم که تأثیر آن روی وزن مخصوص است به عنوان یک پارامتر بحرانی در تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی زباله نمی‌باشد. این نتایج با بررسی‌های انجام گرفته توسط زکاس^۲ (۲۰۰۵) [۱۶] و ناسیمنتو^۳ (۲۰۰۷) [۱۷] مطابقت دارد.

در نهایت مشاهده شد که بعد از تحکیم وزن مخصوص برش نمونه‌ها با تنش قائم یکسان تقریباً ثابت و در محدوده ۱۰ تا ۱۴ می‌باشد. بنابراین با توجه مطالب ارائه شده از عدم اثر وزن مخصوص بر پارامترهای مقاومت برشی زباله می‌توان اثر وزن مخصوص را در ارزیابی مقاومت برشی در این تحقیق ناچیز دانست. در ادامه در جدول ۱ وزن مخصوص حدودی برای نمونه‌ها با سربارهای مختلف آورده شده است.

جدول ۱. حدود وزن مخصوص‌های استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها

Table 1. Approximate unit weights used to make samples

	۱۰۰ KPa	۵۰ KPa	۲۰ KPa	
	۱۳/۷۰	۱۳/۱۰	۱۱/۸۰	تازه
	۱۳/۷۲	۱۳/۱۳	۱۱/۸۵	سه ماهه
	۱۳/۷۸	۱۳/۲۴	۱۱/۸۷	شش ماهه

کولش^۴ در سال ۱۹۹۶ ماهیت زباله‌های جامد شهری را کاملاً اصطکاکی عنوان کرد، در حالی که همیشه این قضیه صحت ندارد. زباله را باید فراتر از توده اجزای جامد در نظر گرفت، چراکه شامل الیاف و اجزای ورقه ماندنی است. کولش در سال ۱۹۹۶ اثرات تسلیح الیاف بر رفتار اصطکاکی زباله را در شکل ۶ نشان داده است [۱۸].

- 1 Kavazanjian
- 2 Zekks
- 3 Nascimento
- 4 Kolsch

جدول ۲. لیست آزمایش‌های انجام شده

Table 2. List of performed tests

شماره	کد نمونه	سن نمونه (ماه)	تنش قائم (σ_n) (KPa)	نرخ کرنش برشی (mm/min)
۱	F-0.8-20	تازه	۲۰	۰/۸
۲	* F-0.8-20	تازه	۲۰	۰/۸
۳	F-0.8-50	تازه	۵۰	۰/۸
۴	* F-0.8-50	تازه	۵۰	۰/۸
۵	F-0.8-100	تازه	۱۰۰	۰/۸
۶	* F-0.8-100	تازه	۱۰۰	۰/۸
۷	F-8-20	تازه	۲۰	۸
۸	F-8-50	تازه	۵۰	۸
۹	* F-8-50	تازه	۵۰	۸
۱۰	F-8-100	تازه	۱۰۰	۸
۱۱	F-19-20	تازه	۲۰	۱۹
۱۲	F-19-50	تازه	۵۰	۱۹
۱۳	F-19-100	تازه	۱۰۰	۱۹
۱۴	* F-19-100	تازه	۱۰۰	۱۹
۱۵	T-0.8-20	سه ماهه	۲۰	۰/۸
۱۶	T-0.8-50	سه ماهه	۵۰	۰/۸
۱۷	* T-0.8-50	سه ماهه	۵۰	۰/۸
۱۸	T-0.8-100	سه ماهه	۱۰۰	۰/۸
۱۹	* T-0.8-100	سه ماهه	۱۰۰	۰/۸
۲۰	T-8-20	سه ماهه	۲۰	۸
۲۱	* T-8-20	سه ماهه	۲۰	۸
۲۲	T-8-50	سه ماهه	۵۰	۸
۲۳	T-8-100	سه ماهه	۱۰۰	۸
۲۴	T-19-20	سه ماهه	۲۰	۱۹
۲۵	T-19-50	سه ماهه	۵۰	۱۹
۲۶	* T-19-50	سه ماهه	۵۰	۱۹
۲۷	T-a19-100	سه ماهه	۱۰۰	۱۹
۲۸	* T-19-100	سه ماهه	۱۰۰	۱۹

موارد مشخص شده با علامت * نشان دهنده آزمایش‌ها با هدف تکرار پذیری هستند.

۳-۱- مدل هیپربولیک

یک نمونه از مدل الاستیک هیپربولیک برای خاک‌ها به صورت ترکیبی از هر دو رابطه غیرخطی تنش- کرنش و تنش وابسته به سختی توسط کوندنر (۱۹۶۳) مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. فرض شده است که این مدل الاستیک هیپربولیک برای توصیف پاسخ تنش-کرنش زباله‌های جامد شهری نیز مناسب باشد. پارامترهای این مدل ثابت و ویژه مصالح مورد آزمایش است و نیاز است تا این پارامترها از طریق آزمایش مورد ارزیابی قرار گیرند.

رابطه تنش-کرنش هیپربولیک به دست آمده از آزمایش‌های فشاری سه محوری توسط کوندنر (۱۹۶۳) برای خاک‌ها به صورت یک مدل هیپربولیک دو پارامتری تقریب زده می‌شود که به صورت رابطه (۱) بیان شده است:

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon_a}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{ult}}} \quad (1)$$

که در این معادله $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ تنش انحرافی، ε_a کرنش محوری، E_i شیب اولیه مدول یانگ و $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{ult}$ تنش انحرافی نهایی است. این مدل توسط دانکن و چانگ [۲۰] ۱۹۷۰ به یک مدل پنج پارامتری اصلاح شد که به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

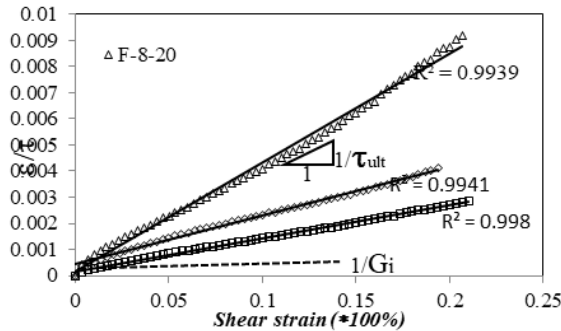
$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) = \frac{\varepsilon_a}{\frac{1}{KP_a \left(\frac{\sigma'_3}{P_a}\right)^n} + \frac{\varepsilon_a R_f (1 - \sin \phi')}{2C' \cos \phi' + 2\sigma'_3 \sin \phi'}} \quad (2)$$

این معادله از پنج پارامتر K, R_f, n, C و ϕ تشکیل شده و معرف رفتار تنش-کرنش مصالح هستند. E_i مدول یانگ اولیه، σ'_3 تنش موثر همه جانبه، P_a فشار اتمسفر که برابر ۳ کیلوپاسکال است، n و K پارامترهای بی‌بعد هستند که با توجه به شرایط اولیه نمونه‌ها و آزمایش‌ها متغیر می‌باشند. دو رابطه‌ی بیان شده بر پایه نتایج آزمایشگاهی حاصل از دستگاه سه محوری می‌باشد، در صورتی که دستگاه مورد استفاده در این مطالعه برش مستقیم می‌باشد، به همین علت روابط مدل هیپربولیک ذکر شده در بالا برای استفاده از نتایج دستگاه برش مستقیم به صورت رابطه (۳) بازنویسی شد:

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{KP_a \left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right)^n} + \frac{\varepsilon_a \cdot R_f}{\sigma_n \cdot \tan \phi + C}} \quad (3)$$

روش کار شامل ارزیابی و تخمین پارامترهای n, K و از مدل هیپربولیک با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های زباله در شرایط اولیه مختلف است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، اطلاعات استفاده شده در تعیین این پارامترها از انجام حدود ۳۰ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس در مرکز

دفن کهریزک با شرایط اولیه مختلف طی سه مرحله به دست آمده است. مرحله اول شامل تخمین G_i و R_f است، که طبق نمودار شکل ۷ شیب این خط برابر $1/\tau_{ult}$ و عرض از مبدا آن برابر $1/G_i$ است. با دانستن τ_{ult} و تنش برشی در حالت گسیختگی τ_f (در این مطالعه تنش برشی گسیختگی در کرنش ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است)، می‌توان R_f را از معادله $R_f = \tau_f / \tau_{ult}$ تخمین زد. مقدار G_i و R_f برای هر آزمایش باید ارزیابی شود.

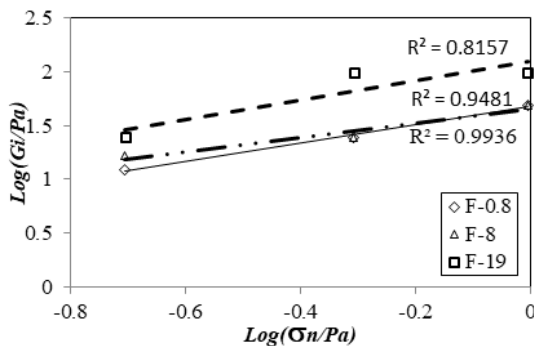


شکل ۷. ارزیابی G_i و R_f برای نمونه تازه با نرخ کرنش برشی ۸ میلی‌متر بر دقیقه

Fig. 7. Evaluation of G_i and τ_{ult} for fresh sample with shear strain rate of 8 mm / min

مرحله دوم شامل تخمین پارامترهای K و n برای هر سری تست انجام شده با تنش‌های قائم متفاوت می‌باشد که طبق رابطه (۴) و رسم نمودار شکل ۸ شیب این خط برابر n و عرض از مبدا آن از محور y ها برابر $\log K$ است.

$$\log\left(\frac{G_i}{P_a}\right) = \log(K) + n \log\left(\frac{\sigma_n}{P_a}\right) \quad (4)$$



شکل ۸: ارزیابی n و K برای نمونه تازه

Fig. 8. Evaluation of n and K for fresh sample

مرحله سوم محاسبه‌ی پارامترهای مقاومت برشی (C, ϕ) در کرنش برشی ۱۵ درصد یعنی تنش گسیختگی می‌باشد.

۳-۲- مدل EPR

توسعه در ابزارهای رایانه‌ای طی دو دهه اخیر موجب سهولت و رشد تکنیک‌های هوش محاسباتی گردیده است. استفاده از این روش‌ها در مهندسی ژئوتکنیک نیز به تازگی آغاز شده و رو به فزونی نهاده است. روش‌های جدید داده کاوی و محاسبات نرم در سال‌های اخیر به طرز چشم‌گیر و فزاینده‌ای مورد توجه جامعه علمی قرار گرفته است. روش EPR، در سال‌های اخیر توسعه یافته و در ابتدا برای مدل‌سازی پدیده‌های زیست محیطی توسط ارائه دهندگان آن به کار گرفته می‌شد. پس از آن، کارهای دیگری از جمله ارزیابی قابلیت بالاکشیدگی در حفاری‌های صندوقه‌ای برای مکش، مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح عریض، پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی و تعیین پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها توسط روش EPR انجام شده است. این روش نسبت به سایر روش‌های جبرگرایانه و مبتنی بر فرضیات فیزیکی بالاتر است. با ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به نام رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی^۱، مدلی جامع جهت پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش ارائه شده است.

دیویدسن و همکارانش^۲ [۱۱] روش رگرسیون جدیدی به نام رگرسیون سمبلیک قاعده‌ای^۲ (R-BSR) برای ساخت مدل‌های چندجمله‌ای بر اساس هر دو روش رگرسیون عددی و سمبولیک، معرفی کردند. این روش پیوندی از دو روش برنامه‌نویسی ژنتیک و رگرسیون سمبلیک محدود به عملگرهای جمع، تفریق و توان صحیح مثبت بود. بر پایه ایده ارائه شده توسط دیویدسن، روش EPR در سال ۲۰۰۴ توسط گیستولسی و همکارانش^۳ [۱۲] معرفی گردید. مشابه روش R-BSR، روش EPR نیز یک تکنیک دو مرحله‌ای برای ساخت مدل‌های سمبولیک شامل تعیین ساختار و تخمین پارامتر می‌باشد. تفاوت اصلی دو روش در نحوه جستجو و تعیین ساختار اولیه می‌باشد. در روش EPR بر جای استفاده از GP درختی به کار رفته در R-BSR، از یک الگوریتم ژنتیک ساده استفاده می‌شود.

روش EPR می‌تواند در عرض چند دقیقه مدل‌های با برازش نسبتاً بالا تولید نماید. با استفاده از این روش، چندین رابطه چند-جمله‌ای با تعداد جملات و دقت‌های متفاوت ارائه می‌شود. حداکثر تعداد جملات به ۵ محدود شده است، زیرا با بالا بردن تعداد جملات هر چند باعث پیچیده‌تر شدن مدل شده است، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت آن مشاهده نگردیده است، در ادامه ایده‌آل‌ترین این مدل‌ها با روابط و شرایط تحلیل مختلف آورده شده است. متغیرهای این مدل با توجه به شرایط اولیه آزمایش‌های انجام شده تعیین شده است و شامل سن، درصد کرنش، نرخ جابه‌جایی برشی، تنش

- 1 Evolutionary Polynomial Regression
- 2 Davidson et al
- 3 Rule-Based Symbolic Regression
- 4 Giustolisi et al

قائم، جهت‌گیری الیاف و درصد پلاستیک می‌باشد. رابطه‌ای که از روش EPR به دست می‌آید به شکل شبه چند جمله‌ای‌های رابطه (۵) می‌تواند باشد [۱۲]:

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot (X_1)^{ES(J,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(J,k)} \cdot f\left(\left(X_1\right)^{ES(J,k+1)} \cdot \dots \cdot f\left(\left(X_k\right)^{ES(J,2k)}\right)\right)$$

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot f\left(\left(X_1\right)^{ES(J,1)} \cdot \dots \cdot \left(X_k\right)^{ES(J,k)}\right)$$

$$Y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot (X_1)^{ES(J,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(J,k)} \cdot f\left(\left(X_1\right)^{ES(J,k+1)} \cdot \dots \cdot \left(X_k\right)^{ES(J,2k)}\right) \quad (5)$$

$$Y = g\left(a_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cdot (X_1)^{ES(J,1)} \cdot \dots \cdot (X_k)^{ES(J,k)}\right)$$

رابطه (۶) برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش زباله‌ای لندفیل کهریزک با توجه به آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است:

$$\tau = -0.15023 \cdot (\sigma_n \cdot O)^{0.5} + 0.13184 \cdot \sigma_n + 1.89 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_n \cdot R^3 - 2.0076 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_n^2 \cdot T^{0.5} \cdot P^2 + 1.0587 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_n^2 \cdot T^{0.5} \cdot P^{0.5} + 36.6036 \cdot (\sigma_n \cdot \varepsilon_s)^{0.5} \cdot P - 41.762 \cdot \sigma_n^{0.5} \cdot \varepsilon_s + 0.0099018 \cdot (\varepsilon_s \cdot \sigma_n \cdot R)^2 \cdot O^{0.5} - 8.6585 \quad (6)$$

که در این رابطه σ_n تنش قائم، R نرخ کرنش برشی، t سن نمونه مورد آزمایش به ماه، ε_s کرنش برشی مدنظر، O جهت‌گیری الیاف و P درصد پلاستیک می‌باشد. این رابطه به صورت یک رابطه ۵ جمله‌ای توانی است که با هدف ساده‌ترین رابطه برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش مصالح مورد آزمایش ارائه شده است.

۴- بحث و تفسیر نتایج

۴-۱- مدل هایپربولیک

پارامترهای مدل هایپربولیک برای نمونه‌های تازه در نرخ‌های تعریف شده در جدول ۳ آورده شده است. پارامترهای مقاومت برشی (C, ϕ) نیز در کرنش برشی ۱۵٪ یعنی تنش گسیختگی محاسبه شده است.

جدول ۳. پارامترهای ارزیابی شده برای زباله تازه با نرخ کرنش برشی‌های تعریف شده

Table 3. Estimated parameters for fresh waste with defined shear strain rates

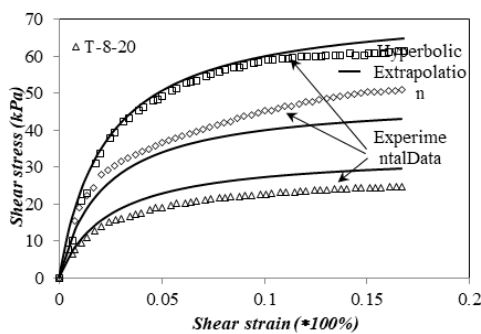
Sample ID	R_f^*	n	K	ϕ (deg)	C (kPa)
F-۰/۸	۰/۹۱	۰/۸۹	۵۲/۸۲	۲۷/۴۹	۱۴/۶۹
F-۸	۰/۹۴	۰/۶۷	۴۵/۸۱	۳۱/۹۰	۱۳/۱۶
F-۱۹	۰/۹۷	۰/۸۹	۱۲۵	۳۵/۰۹	۱۳

حال پارامترهای مورد نیاز برای مدل هایپربولیک زباله تازه را داریم، بنابراین با به کار بردن این پارامترها در رابطه (۳) می‌توان مدل هایپربولیک را جهت پیش‌بینی تغییرات تنش-کرنش با شرایط اولیه داده شده به دست

جدول ۴. پارامترهای ارزیابی شده برای زباله سه ماهه با نرخ های جابه جایی برشی تعریف شده

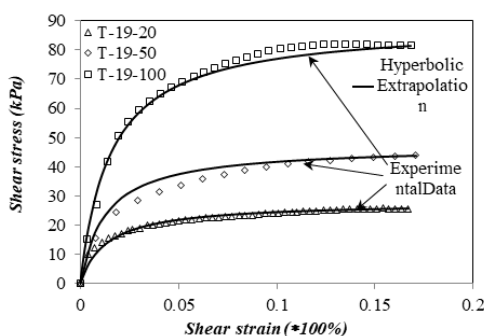
Table 4. Estimated parameters for three-months waste with defined shear strain rates

Sample ID	R_f^*	n	K	ϕ (deg)	C (kPa)
T-۰/۸	۰/۸۸۳۸	۰/۴۶۸	۳۰/۳	۲۸/۱۶	۱۳/۶۲
T-۸	۰/۸۷۵۴	۰/۵۲۴	۳۲/۲۱	۲۳/۴۲	۲۱/۱۰
T-۱۹	۰/۹۲۱۱	۰/۶۴	۵۶/۸۸	۳۵/۳۲	۱۰/۰۵



شکل ۱۱. مدل هیپربولیک در مقابل نتایج آزمایشگاهی نمونه های سه ماهه با نرخ جابه جایی برشی ۸ میلی متر بر دقیقه

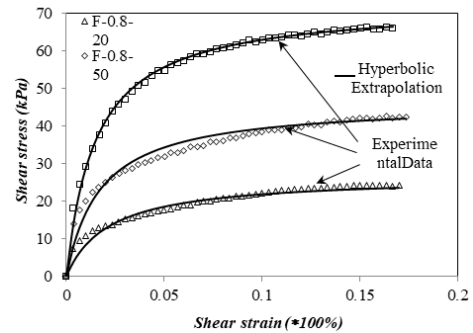
Fig. 11. Hyperbolic model versus experimental results of three-months specimens with shear strain rate of 8 mm / min



شکل ۱۲. مدل هیپربولیک در مقابل نتایج آزمایشگاهی نمونه های سه ماهه با نرخ جابه جایی برشی ۱۹ میلی متر بر دقیقه

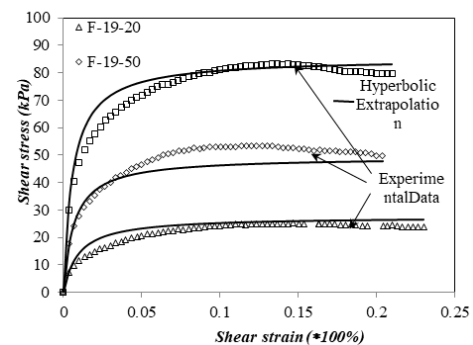
Fig. 12. Hyperbolic model versus experimental results of three-months specimens with shear strain rate of 19 mm / min

آورد. در ادامه نمونه ای از برآزش تابع هیپربولیک با آزمایش های انجام شده آورده شده است. نتایج حاکی از تطابق مناسب این مدل بر نتایج آزمایشگاهی می باشد (شکل های ۹ و ۱۰).



شکل ۹. مدل هیپربولیک در مقابل نتایج آزمایشگاهی نمونه های تازه با نرخ جابه جایی برشی ۰/۸ میلی متر بر دقیقه

Fig. 9. Hyperbolic model versus experimental results of fresh specimens with shear strain rate of 0.8 mm / min

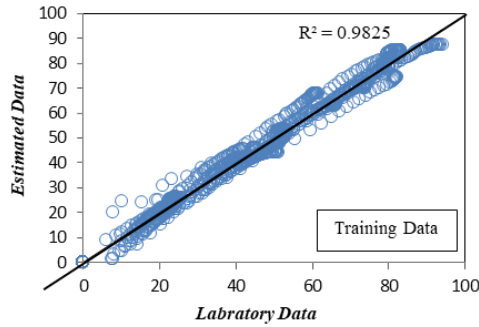


شکل ۱۰. مدل هیپربولیک در مقابل نتایج آزمایشگاهی نمونه های تازه با نرخ جابه جایی برشی ۱۹ میلی متر بر دقیقه

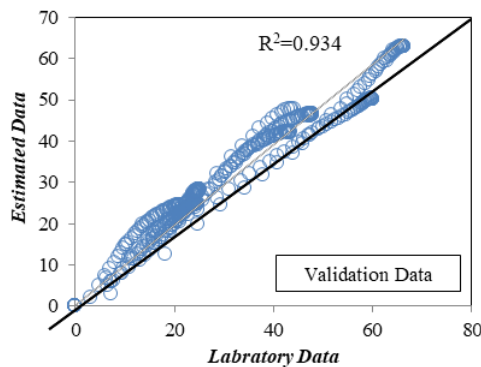
Fig. 10. Hyperbolic model versus experimental results of fresh specimens with shear strain rate of 19 mm / min

پارامترهای مدل هایپربولیک برای نمونه های سه ماهه در نرخ های تعریف شده در جدول ۴ آورده شده است، روش ارزیابی آنها مشابه روش ارائه شده برای نمونه های تازه است. پارامترهای مقاومت برشی (C, ϕ) نیز در کرنش برشی ۱۵٪ یعنی تنش گسیختگی محاسبه شده است.

با به کار بردن این پارامترها در معادله (۳) می توان مدل هایپربولیک را جهت پیش بینی تغییرات تنش-کرنش با شرایط اولیه داده شده به دست آورد. در ادامه نمونه ای از برآزش تابع هیپربولیک با آزمایش های انجام شده آورده شده است. نتایج حاکی از تطابق مناسب این مدل بر نتایج آزمایشگاهی می باشد (شکل های ۱۱ و ۱۲).



شکل ۱۴. قابلیت اطمینان مدل از طریق داده‌های مدل‌سازی
Fig. 14. Model reliability through modeling data



شکل ۱۵. قابلیت اطمینان مدل از طریق داده‌های اعتبار‌سنجی
Fig. 15. Model reliability through validation data

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مدل EPR می‌تواند به‌طور دقیق رفتار تنش-کرنش زباله‌ها را پیش‌بینی کند. مقادیر R^2 (ضریب تعیین) رابطه‌ی (۷) بالای ۹۸ درصد برای تمامی داده‌ها، به‌وضوح بیان‌گر کارایی این تکنیک در مدل‌سازی مقاومت برشی زباله‌های جامد شهری می‌باشد.

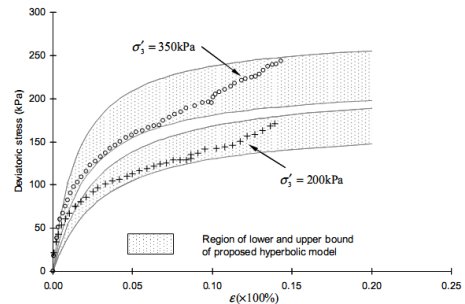
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_m - y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (y_m - \bar{y}_m)^2} \quad (7)$$

جدول ۵. عملکرد مدل پیش‌بینی EPR

Table 5. Performance of EPR prediction model

DATA	R^2
Training	۰/۹۸۲۵
Testing	۰/۹۳۴
All data	۰/۹۸

اگر چه این مدل در ابتدا برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش خاک‌ها با استفاده از نتایج دستگاه سه‌محوری ارائه شد [۲۱]، ولی با توجه به تفاوت قابل‌ملاحظه ساختار زباله با خاک، این مدل نتایج آزمایش‌های انجام‌شده با استفاده از دستگاه برش مستقیم را با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. نتایج ارائه‌شده برای مدل هیپربولیک توسط سینگ^۱ (۲۰۰۸) بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط کایسدو^۲ و همکارانش (۲۰۰۲)

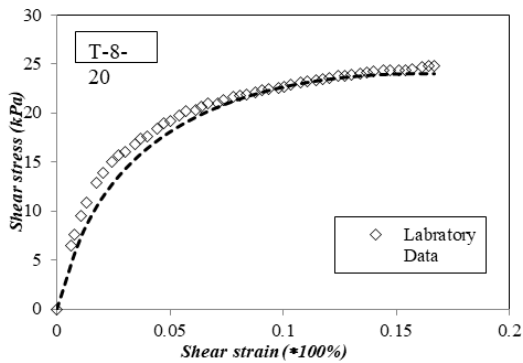
Fig. 13. The results presented for the hyperbolic model by Singh (2008) which are based on the results of experiments performed by caicedo et al (2002)

۴-۲- مدل EPR

منحنی‌های مربوط به دقت این مدل بر اساس داده‌های ارزیابی‌شده توسط مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برای هر دو سری داده‌های مدل‌سازی و اعتبارسنجی ارائه‌شده است. بالاترین دقت وقتی حاصل می‌شود که تمرکز این داده‌ها حول محور $y=x$ باشد. برای این مدل پارامتر R^2 برابر ۰/۹۸ است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

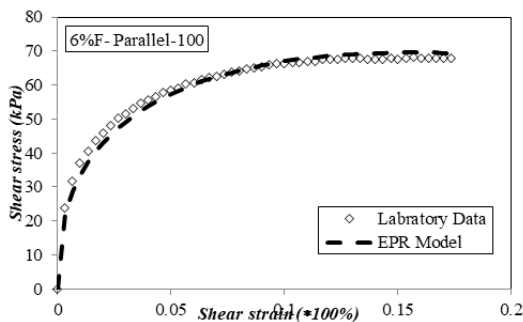
داده‌های استفاده‌شده در این مدل، حاصل از نتایج دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس می‌باشد. در مدل‌سازی با تکنیک‌های تکاملی، حدود دو سوم کل داده‌ها معمولاً برای مدل‌سازی و یک سوم باقیمانده برای اعتبارسنجی دقت مدل اختصاص داده می‌شوند. بخش‌های اول و دوم تحت نام‌های "آموزشی" و "آزمایشی" قرار دارند و داده‌های مورد استفاده در زیر مجموعه دوم هیچ دخالتی در فرآیند مدل‌سازی ندارند.

1 Singh
2 Caicedo et al



شکل ۱۸. پیش‌بینی مدل EPR برای نمونه سه ماهه، جهت‌گیری افقی الیاف، درصد پلاستیک در محل، نرخ جابه‌جایی برشی ۸ میلی‌متر بر دقیقه و تنش قائم ۲۰ کیلو پاسکال

Fig. 18. Prediction of EPR model for three-months samples, horizontal orientation of fibers, in situ plastic percentage, shear strain rate of 8 mm / min and vertical stress of 20 kPa



شکل ۱۹. پیش‌بینی مدل EPR برای نمونه تازه، جهت‌گیری افقی الیاف، ۶ درصد پلاستیک، نرخ جابه‌جایی برشی ۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال

Fig. 19. Prediction of EPR model for fresh samples, horizontal orientation of fibers, 6% plastic percentage, shear strain rate of 0.8 mm / min and vertical stress of 100 kPa

۵- نتیجه‌گیری

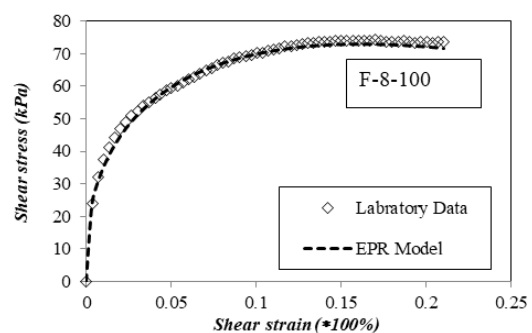
در این مطالعه با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی نمونه زباله‌های گردآوری شده از مرکز دفن کهریزک، مدل‌هایی ساختاری جهت ارزیابی اثر افزایش سن و پوسیدگی بر روی این زباله‌ها ارائه شده است. این مدل‌ها عبارتند از: مدل هیپربولیک و EPR که رفتار زباله‌ها را در سنین تازه و سه ماهه پیش‌بینی می‌کنند.

پارامترهای مدل هیپربولیک ارائه شده، جهت پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش زباله، با اتکا بر نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده ارزیابی شده

گزیده‌ای از منحنی‌های تنش-کرنش پیش‌بینی شده توسط مدل‌های EPR ارائه شده برای شرایط اولیه مختلف داده‌های آموزشی آورده شده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

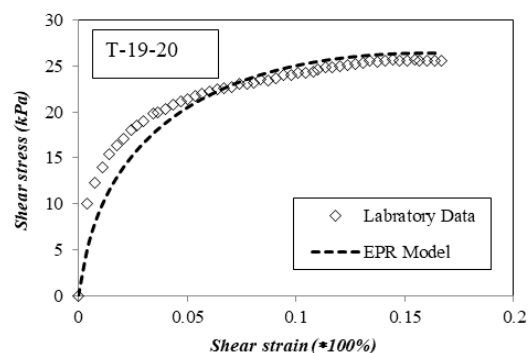
در ادامه گزیده‌ای از منحنی‌های تنش-کرنش پیش‌بینی شده توسط مدل‌های EPR ارائه شده برای شرایط اولیه مختلف داده‌های اعتبارسنجی آورده شده است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹).

همان‌طور که مشاهده می‌شود از مدل EPR نیز می‌توان برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش زباله با شرایط اولیه مختلف استفاده کرد، این مدل از دقت بالایی برخوردار است و استفاده از آن بسیار راحت‌تر و دقیق‌تر از مدل هیپربولیک است.



شکل ۱۶. پیش‌بینی مدل EPR برای نمونه تازه، جهت‌گیری افقی الیاف، درصد پلاستیک در محل، نرخ جابه‌جایی برشی ۸ میلی‌متر بر دقیقه و تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال

Fig. 16. Prediction of EPR model for fresh samples, horizontal orientation of fibers, in situ plastic percentage, shear strain rate of 8 mm / min and vertical stress of 100 kPa



شکل ۱۷. پیش‌بینی مدل EPR برای نمونه سه ماهه، جهت‌گیری افقی الیاف، درصد پلاستیک در محل، نرخ جابه‌جایی برشی ۱۹ میلی‌متر بر دقیقه و تنش قائم ۲۰ کیلو پاسکال

Fig. 17. Prediction of EPR model for three-months samples, horizontal orientation of fibers, in situ plastic percentage, shear strain rate of 19 mm / min and vertical stress of 20 kPa

- [4] M.A. Gabr, M. Hossain, M. Barlaz, Shear strength parameters of municipal solid waste with leachate recirculation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4) (2007) 478-484.
- [5] D. Zekkos, J.D. Bray, G.A. Athanasopoulos, M.F. Riemer, E. Kavazanjian, X. Founta, A. Grizi, Compositional and loading rate effects on the shear strength of municipal solid waste, in: *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2007, pp. 25-28.
- [6] E. Kavazanjian, Mechanical properties of municipal solid waste, in: *Proceedings sardinia*, 2001, pp. 415-424.
- [7] M. Karimpour-Fard, S.L. Machado, N. Shariatmadari, A. Noorzad, A laboratory study on the MSW mechanical behavior in triaxial apparatus, *Waste management*, 31(8) (2011) 1807-1819.
- [8] S.L. Machado, M.F. Carvalho, O.M. Vilar, Constitutive model for municipal solid waste, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(11) (2002) 940-951.
- [9] M. Singh, I. Fleming, Application of a hyperbolic model to municipal solid waste, *Geotechnique*, 61(7) (2011) 533-547.
- [10] M. Asadi, N. Shariatmadari, M. Karimpour-Fard, A. Noorzad, Validation of Hyperbolic Model by the Results of Triaxial and Direct Shear Tests of Municipal Solid Waste, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5) (2017) 2003-2015.
- [11] J.W. Davidson, D. Savic, G.A. Walters, Method for the identification of explicit polynomial formulae for the friction in turbulent pipe flow, *Journal of Hydroinformatics*, 1(2) (1999) 115-126.
- [12] O. Gistolisi, D. Savic, A. Doglioni, Data reconstruction and forecasting by evolutionary polynomial regression, in: *Hydroinformatics: (In 2 Volumes, with CD-ROM)*, World Scientific, 2004, pp. 1245-1252.
- [13] M. Keramati, S.K. Reshad, S. Asgarpour, M.A. Tutunchian, Predicting shear strength of municipal waste material by evolutionary polynomial regression (EPR), *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19 (2014) 53-62.
- [14] D. ASTM, 3080-90: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, *Annual Book of ASTM Standards*, 4 (1994) 290-295.

برشی، تنش قائم، جهت الیاف و درصد پلاستیک پیش‌بینی می‌کند. از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش مرکز دفن کهریزک بدون نیاز به انجام آزمایش‌های مربوطه استفاده کرد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

E_i	شیب اولیه مدول یانگ
n	پارامتر بی‌بعد هیپربولیک
K	پارامتر بی‌بعد هیپربولیک
G_i	مدول برشی
R_f	فاکتور کاهش
P_a	فشار اتمسفر
C	چسبندگی
O	جهت‌گیری الیاف
R	نرخ جابه‌جایی برشی
t	سن نمونه مورد آزمایش به ماه
P	درصد پلاستیک

علائم یونانی

ε_a	کرنش محوری
τ_{ult}	تنش برشی نهایی
τ_f	تنش برشی در حالت گسیختگی
σ'_3	تنش مؤثر همه‌جانبه
φ	زاویه اصطکاک داخلی
σ_n	تنش قائم
ε_s	کرنش برشی
$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{ult}$	تنش نهایی

مراجع

- [1] G. Blight, Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review, *Waste Management & Research*, 26(5) (2008) 448-463.
- [2] R.M. Koerner, T.-Y. Soong, Leachate in landfills: the stability issues, *Geotextiles and Geomembranes*, 18(5) (2000) 293-309.
- [3] N. Shariatmadari, M. Karimpour-Fard, M. Keramati, H. Jafari Kalarijani, Mechanical response of MSW materials subjected to shearing in direct shear test apparatus, in: *4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, Iran, 2010.

- [18] F. Kölsch, The influence of fibrous constituents on shear strength of municipal solid waste, Ph. D. Thesis, Leichtweiss-Institut, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany (in German), 1996.
- [19] R.L. Kondner, Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, J. Geotech. Engrg. Div., 89(1) (1963) 115-143.
- [20] J.M. Duncan, C.-Y. Chang, Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, (1970).
- [21] M.K. Singh, Characterization of stress-deformation behaviour of municipal solid waste, 2008.
- [15] E. Kavazanjian Jr, N. Matasovic, R.C. Bachus, Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste, in: Proceedings Sardinia, 1999, pp. 437-444.
- [16] D.P. Zeccos, Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid-waste, University of California, Berkeley, 2005.
- [17] J. Nascimento, Mechanical behavior of municipal solid waste. Ms. C, thesis, University of Sao Paulo, Sao Carlos, SP, Brazil (in Portuguese), 2007.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, A. Ramesh, Prediction of the Stress-Strain Behavior of MSW Materials Using Hyperbolic Model and Evolutionary Polynomial Regression (EPR), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 793-804.
DOI: 10.22060/ceej.2018.13955.5519

