

بررسی عددی اثر ماسه مسلح به تراشه لاستیک‌های فرسوده بر سپری

محمد امین محمد ابراهیمی^۱، مسعود عامل سخی^{۲*}، روح اله بختیاری دوست^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

چکیده

وجود مقادیر بسیار زیاد لاستیک‌های فرسوده نیاز به نگرش زیست محیطی در خصوص این مواد بازیافتی را بسیار حائز اهمیت می‌کند. در این مقاله، با استفاده از اطلاعات موجود در مورد ویژگی‌های مخلوط خاک ماسه‌ای و تراشه‌های لاستیک با نسبت‌های حجمی ۱۵ و ۳۰ درصد مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی برش مستقیم بزرگ ۳۰*۳۰ سانتیمتر، رفتار دیوار سپری با ارتفاع‌های متفاوت و تحت اثرات افزایش عمق لایه‌ی مسلح شده در خاکریز، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود PLAXIS بررسی شده است. در این تحقیق، ارتفاع‌های ۶، ۹ و ۱۲ متر سپری، ضخامت‌های کل ارتفاع پشت سپری، دوسوم و نیز یک سوم ارتفاع سپری با استفاده از لایه مسلح به تراشه لاستیک فرسوده مورد مطالعه قرار گرفتند و همچنین درصد‌های ۱۵ و ۳۰ تراشه لاستیک به عنوان متغیر، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که استفاده از مخلوط ماسه و تراشه‌ی لاستیک به عنوان خاکریز، در مقایسه با حالت ماسه سست، منجر به کاهش جابجایی جانبی و لنگر خمشی در سپری می‌شود. استفاده از این مصالح دورریز و ارزان قیمت در مخلوط با ماسه، علاوه بر کمک به حل مشکل زیست محیطی دفع این آلاینده زیست محیطی، باعث می‌شود که نیروی مهارهای مورد استفاده در سیستم سپری نیز کاهش یابد. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌ی مسلح، به گونه‌ای که تمام خاکریز، مسلح به تراشه‌های لاستیک باشد، تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی سپری کاهش بیشتری یافته است که به وضوح اثر مثبت استفاده از ماسه مسلح به تراشه لاستیک‌های فرسوده را در پروژه‌های ژئوتکنیکی نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: سپری، تراشه لاستیک، لنگر خمشی، جابجایی جانبی، نشست

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی قم، قم amin.ebrahimi1375@gmail.com

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم amelsakhi@qut.ac.ir

۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم bakhtiaridoost@qut.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

عامل سخی (Ghazavi and Amelsakhi, 2005) با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ و سی بی آر، اثر درصد وزنی و نسبت ابعاد خرده لاستیک‌های فرسوده بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه مخلوط با تراشه‌های لاستیک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مخلوط ماسه و تراشه‌های لاستیک، نسبت به ماسه‌ی خالص، از مقاومت برشی بهتری برخوردار است و استفاده از این مصالح باعث افزایش پارامترهای چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. در تحقیق‌های انجام شده توسط این محققین، نسبت ابعاد بهینه برای تراشه لاستیک‌های فرسوده نیز بدست آمدند. برای آزمایش از دو خاک ماسه با تراکم‌های مختلف استفاده شد. عامل سخی و زائری (Amelsakhi and Zaeri, 2011) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برش مستقیم بزرگ به بررسی رفتار دینامیکی خاک مسلح به تراشه لاستیک‌های فرسوده پرداختند. ردی و کریشنا (Reddy and Krishna, 2015) به بررسی آزمایشگاهی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک، با نسبت وزنی متفاوت، به عنوان خاکریز دیوارهای حائل صلب، با در نظر گرفتن سربار استاتیکی روی دیوار، پرداختند. نتایج نشان داد که جابجایی جانبی و فشار جانبی دیوار در این حالت، ۵۰ تا ۶۰ درصد، کاهش می‌یابد. دامالا و همکاران (Dammala et al., 2015) به بررسی رفتار دیوار حائل طره‌ای با خاکریز از جنس مخلوط ماسه و تراشه‌ی لاستیک پرداختند. در این پژوهش، از مخلوط ماسه و تراشه‌های لاستیک با نسبت وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪، به عنوان مواد خاکریز با وزن سبک استفاده شد. مشاهده شد که دیوار با مخلوط ۱۵٪ در خاکریز، عملکرد بهتری نسبت به ماسه‌ی بدون چسبندگی، نشان داده است و استفاده از مخلوط ماسه و تراشه‌ی لاستیک، در خاکریز دیوار حائل، می‌تواند منجر به کاهش جابجایی دیوار و در نتیجه، کاهش ابعاد دیوار طره‌ای در حالت استاتیکی شود. بیلگین (Bilgin, 2010) اثر نوع ساخت و ساز دیوار سپری، برای شرایط مختلف خاک و دیوار با ارتفاع‌های مختلف را، با استفاده از مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل اجزای محدود بررسی کرد. در این پژوهش، تأثیر روش ساخت و

امروزه با توجه به فراگیر شدن مسئله‌ی گودبرداری در ساخت و سازهای شهری و غیرشهری، اهمیت توجه به پایدارسازی گودها و دیوارها بیشتر احساس می‌شود. یکی از روش‌های مورد استفاده در این امر، استفاده از سپرهای فولادی می‌باشد. در هنگام استفاده از سپرهای فولادی، ممکن است خاک موجود در سایت و اطراف آن برای خاکریزی پشت دیوار، از نوع خاک ضعیف باشد، بنابراین نیاز است تا با استفاده از روش‌های مختلف، این خاک تقویت شود. روش‌های متفاوتی برای تقویت خاک‌های ضعیف وجود دارد که یکی از آن‌ها، استفاده از تراشه‌های لاستیک فرسوده اتومبیل‌هاست. سالانه در جهان تعداد زیادی لاستیک اتومبیل از چرخه استفاده خارج می‌شود که این مسئله باعث چالش‌های محیط‌زیستی فراوان برای کشورها شده است. بازیافت و استفاده مجدد از این لاستیک‌های فرسوده، همراه با ماسه به عنوان مصالح پرکننده‌ی خاکریز، کمک زیادی به حفظ محیط‌زیست می‌کند. همچنین استفاده از این روش، کمک شایانی به پایدارسازی گودها و دیوارها می‌کند. تاکنون تحقیقات زیادی بر استفاده از تراشه‌های لاستیک، برای افزایش مقاومت خاک‌های ماسه‌ای صورت گرفته است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب آن‌ها در تقویت پارامترهای مقاومتی ماسه ضعیف بوده است. سچیچ و همکاران (Cecich et al., 1996)، کاربرد خرده‌های لاستیک، به عنوان مصالح سبک، برای خاکریز دیوارهای حائل را بررسی کردند. نتایج مشاهده شده، نشان دهنده‌ی افزایش ضریب اطمینان و عملکرد خوب این مواد به عنوان مصالح خاکریز بود. عامل سخی (Amelsakhi, 2001) با انجام آزمایش‌های سی بی آر و برش مستقیم بزرگ به بررسی و یافتن نسبت ابعاد بهینه برای درصد‌های مختلف لاستیک فرسوده در خاک ماسه پرداخت. در تحقیق نرم افزاری دیگری، از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و نتایج پارامترهای مقاومت برشی خاک مسلح به تراشه لاستیک‌های فرسوده در بررسی نشست پی مستقر بر خاک مسلح به این مصالح پرداخته شد (Amelsakhi and Zamani, 2013). قضاوی و

آن، بار جانبی کمتر روی آن و همچنین نشست کمتر زمین، شده است. دی و پاتس (Day and Potts, 1993) در مورد مدل‌سازی دیوارهای حائل سپری، به مطالعه پرداختند و مشاهده شد که انتخاب نوع المان، در مدل‌سازی عددی، اهمیت بسیار زیادی دارد. بیلگین (Bilgin, 2022) در یک مطالعه، تأثیر فشارهای تورمی خاک‌ها را، بر دیوارهای سپری مهارشده، مدل‌سازی و بررسی کرد. تأثیر فشارهای تورمی بر لنگر خمشی و نیروهای مهار، در این پژوهش دیده شد. مشاهده شد که با افزایش فشارهای تورمی، لنگر خمشی دیوار، افزایش می‌یابد، همچنین نیروهای مهار، برای دیوارهای نصب شده در خاک های متورم می‌تواند، حدود ۲ برابر نیروهای مهار برای دیوارهای نصب شده در خاک‌های غیرمتورم باشد.

استفاده از مخلوط ماسه و تراشه‌های لاستیک با عمق‌های مختلف در قسمت خاکریز دیوارهای سپری، می‌تواند اثرات مختلفی بر رفتار دیوار سپری داشته باشد که این مسئله تا به حال در مطالعات پیشین مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش با استفاده از اطلاعات موجود در مورد ویژگی‌های مخلوط خاک ماسه‌ای و تراشه‌های لاستیک با نسبت‌های حجمی ۱۵ و ۳۰ درصد، به بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف لایه خاک مسلح شده از بالای خاکریز، پرداخته می‌شود و اثرات افزایش عمق لایه مسلح شده، بر رفتار دیوار سپری مهارشده، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

نوآوری تحقیق حاضر در استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس و نیز آزمایش سی بی آر و بر اساس بهینه‌یابی ابعاد تراشه لاستیک‌های فرسوده طی آزمایش‌های بسیار آزمایشگاهی می‌باشد که در تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر بررسی عددی این مطلب به عنوان خاکریز پشت سپری و بررسی محل اجرای این خاک مسلح به جای خاکبرداری کل خاک و یا خاکریزی پشت سپر به جای خاکریزی کل خاک مسلح از دیگر موارد نوآوری این

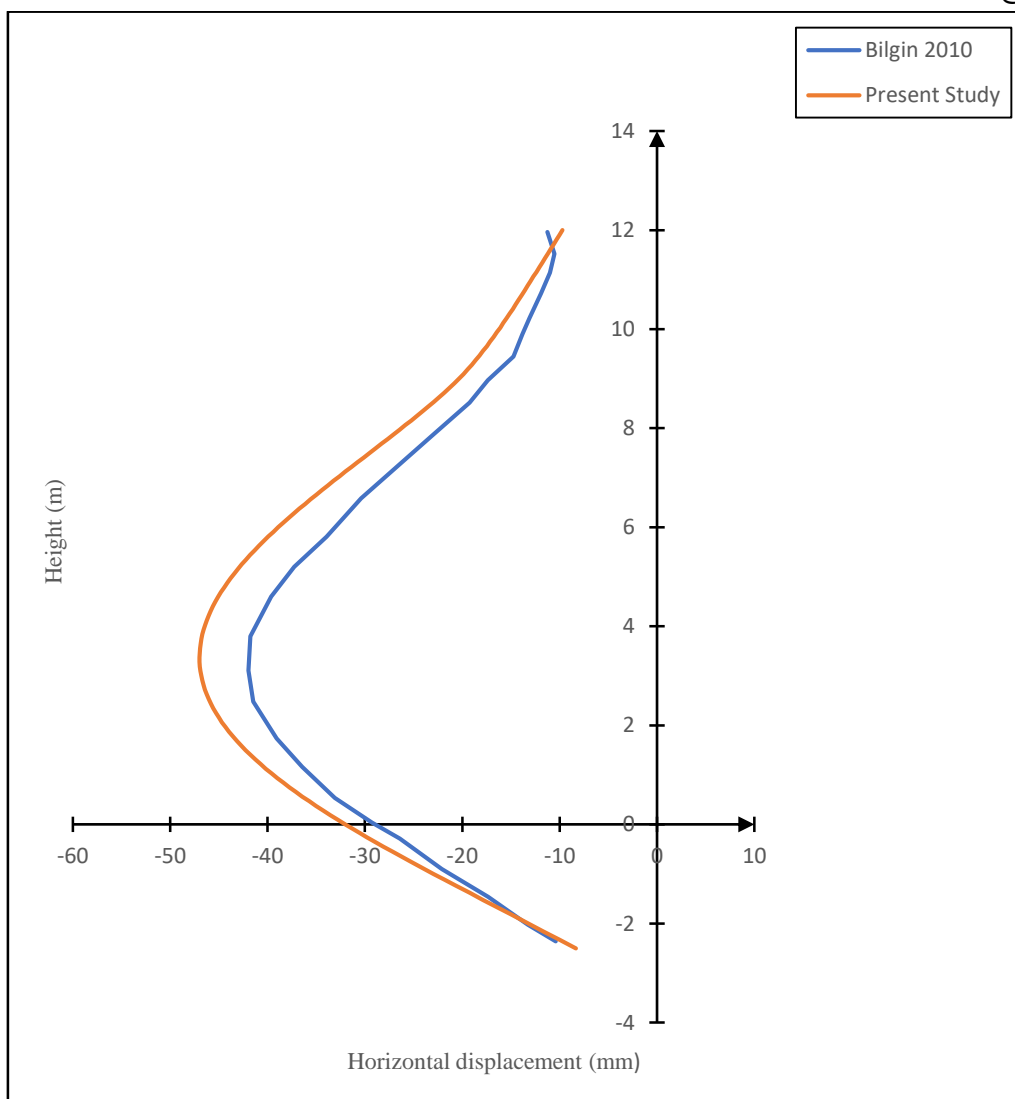
ساز بر رفتار خاک، تغییر شکل دیوار، لنگر خمشی دیوار و نیروهای مهار بررسی شد. نتایج مطالعه نشان داد که ساخت دیوار سپری با روش خاکریزی نسبت به روش خاکبرداری، لنگر خمشی و تغییر شکل دیوار را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. احمدپور و عامل سخی (Ahmadpour and Amelsakhi, 2018) با تحلیل‌های عددی حضور لایه‌ی سست رسی در یک گود مهارشده با سپری فلزی را در شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی بررسی کردند. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان داد که وجود لایه‌ی سست رسی، زیر لایه‌ی های سخت خاک رس، سبب افزایش لنگر خمشی و نیروهای وارد بر سپری می‌شود. عماره و سلیم (Emarah and Seleem, 2018) یک مطالعه‌ی پارامتری عددی، در سیستم‌های سپری تک و دو مهاری انجام دادند. این مطالعه با تغییر برخی از پارامترها، مانند عمق مدفون سپری، موقعیت میله‌های مهار و سختی خمشی دیوار سپری، تحت تأثیر قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیروهای توسعه یافته در میله‌های مهاری پایین، همیشه بیشتر از نیروهای توسعه یافته در میله‌های مهاری بالا هستند و مقدار بالاتر حداکثر لنگر خمشی در دیوار سپری سخت‌تر به دست می‌آید. سینگ و چترجی (Singh and Chatterjee, 2020) تأثیر سربار یکنواخت در سطح زمین با فاصله از دیوار را، برای لنگر خمشی، فشار خالص زمین، جابجایی جانبی سپری و نشست دیوارهای سپری طره‌ای، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود سربار یکنواخت در بالای دیوار، بر رفتار دیوار سپری طره‌ای، به طور قابل توجهی اثر می‌گذارد و با افزایش فاصله سربار یکنواخت، اثر آن کاهش می‌یابد و در فاصله‌ی بیش از ۲ برابر عمق حفاری، تأثیر سربار ناچیز است. صمدهیا (Samadhiya, 2019) رفتار دیوار سپری مجاور فونداسیون نواری را، مورد بررسی قرار داد. مشاهده شد که انحراف دیوار سپری، نشست فونداسیون و حداکثر بار جانبی وارد شده بر روی دیوار سپری، با افزایش فاصله بین دیوار و فونداسیون، کاهش یافت و در فواصل دورتر از دیواره‌ی سپری، بار وارد شده، بار جانبی کمتری را به دیوار منتقل کرده، که باعث حرکت کمتر

انتخاب این مقاله به علت در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی، معتبر بودن مقاله و صحت مطالب مندرج در آن بود. پس از مدل‌سازی و تحلیل، نتایج حاصل با نتایج موجود در مقاله، مقایسه و بررسی گردید، که انطباق خوبی بین نتایج مشاهده شد. نمودارهای مقایسه‌ای، در شکل ۱ و شکل ۲ مشاهده می‌شود. نکته قابل مشاهده و مهم در این دو نمودار این است که بیشترین جابجایی و لنگر مشاهده شده در یک سوم پایینی سپری رخ داده است.

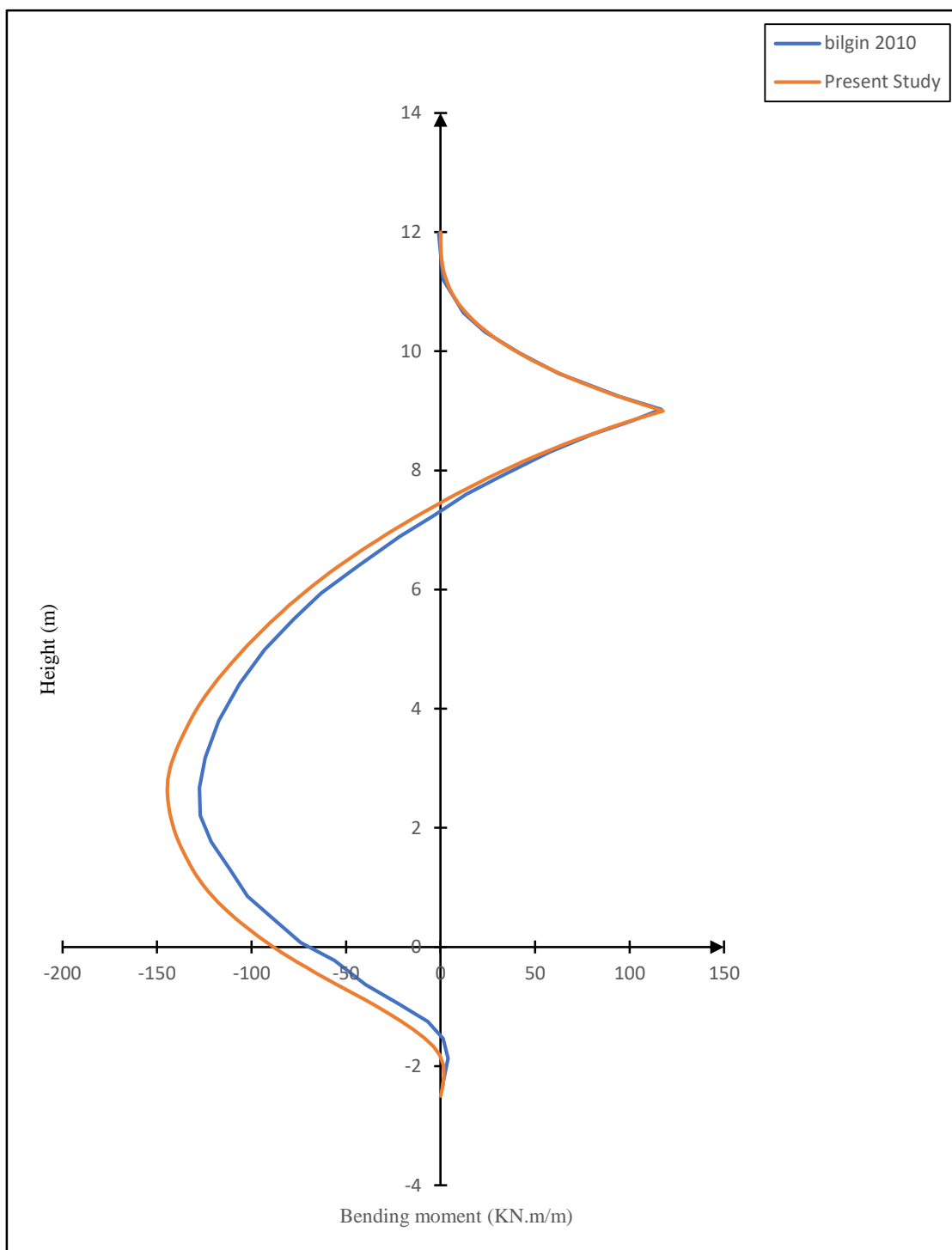
تحقیق است. لازم به ذکر است که محل و ضخامت اجرای خاک مسلح مذکور می‌تواند بر پاسخ سپری اعم از تغییر مکان‌ها، مقدار لنگرها و نیز محل وقوع لنگر حداکثر اثرگذار باشد که در این تحقیق نرم افزاری به صورت کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲. صحت سنجی

به منظور صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار و همچنین اطمینان از صحت مدل‌سازی و نتایج به دست آمده از آن، یک مقاله‌ی مرتبط با موضوع مورد پژوهش (Bilgin, 2010) انتخاب شد.



شکل ۱. نمودار جابجایی افقی دیوار سپری در مقابل ارتفاع دیوار



شکل ۲. نمودار لنگر خمشی دیوار سپری در مقابل ارتفاع دیوار

۳. مشخصات مصالح و مدل‌ها

مسلح بر ارتفاع‌های مختلف بررسی شود. عمق نفوذ سپری برای دیوارهای ۶، ۹ و ۱۲ متری، به ترتیب ۲/۵، ۴/۵ و ۵/۵

در این پژوهش، سه ارتفاع مختلف ۶، ۹ و ۱۲ متر برای دیوار سپری در نظر گرفته شده است تا اثرات تغییر ضخامت لایه‌ی

مقطع مورد نیاز برای سپری فولادی، براساس محاسبات تعادل حدی و روش پای مفصلی به دست آمده است که در جدول ۲ قابل مشاهده است. زاویه ی مهار با سطح افق در تمام مدل‌ها، ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است، سایر مشخصات مهارها در جدول ۳ و جدول ۴ آمده است. لازم به ذکر است مشخصات خاک‌ها، چه مسلح به تراشه لاستیک‌های فرسوده و چه خاک غیر مسلح بر مبنای منابع مورد اشاره در عناوین جداول مورد استفاده و استناد قرار گرفته‌اند. همانطور که اشاره گردید در انتخاب پارامترهای خاک مسلح به تراشه لاستیک‌ها از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ استفاده شده است. در دیوارهای دو مهاری، محل قرارگیری مهار اول در $0.25H$ (H)، ارتفاع گود یا همان ارتفاع دیوار سپری می- باشد) و محل قرارگیری مهار دوم، در وسط فاصله ی بین مهار اول و کف گود، یعنی $0.625H$ از بالای دیوار در نظر گرفته شد.

متر بوده است. عمق مرز مدل عددی دو برابر ارتفاع دیوار، از زیر خط لایروبی در نظر گرفته شده، همچنین عرض مدل عددی، هشت برابر ارتفاع دیوار در نظر گرفته می‌شود، که دیوار سپری در وسط عرض مدل قرار دارد. این ابعاد برای هر سه ارتفاع مختلف دیوار (۶، ۹ و ۱۲ متر) که در این پژوهش بررسی می‌شود، در نظر گرفته شده است. برای بررسی جامع تحقیق چند دیوار با ارتفاعهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا بتوان نتایج را در حالت کلی مورد تعمیم قرار داد. برای بررسی اثر خاک ماسه‌ای مسلح شده با تراشه‌های لاستیک فرسوده، قرار گرفته در قسمت خاکریز پشت دیوار، از سه نوع مختلف خاک استفاده شده است. این سه نوع خاک عبارتند از: ماسه‌ی خالص (STC0)، مخلوط ماسه و تراشه‌ی لاستیک با نسبت حجمی ۱۵٪ (STC15) و نسبت حجمی ۳۰٪ (STC30). مشخصات پارامترهای مختلف این خاک‌ها برای مدل رفتاری موهر-کولمب در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی (Djadouni et al., 2019) و (Amelsakhi, 2001)

	STC0	STC15	STC30
$\gamma \left(\frac{KN}{m^3} \right)$	15.5	15.5	15.5
$E \left(\frac{KN}{m^2} \right)$	25000	24000	23000
ν	0.3	0.303	0.306
$\phi \text{ (}^\circ \text{)}$	31	33	37
$C \text{ (KPa)}$	0	11	20
$\psi \text{ (}^\circ \text{)}$	0	3	7
$R_{interface}$	0.65	0.65	0.65

جدول ۲. مشخصات سپری‌های فولادی (Das, 2016)

	PZ22	PZ27	PZ35
$E \left(\frac{KN}{m^2} \right)$	2×10^8	2×10^8	2×10^8
$EA \left(\frac{KN}{m} \right)$	2.73×10^6	3.36×10^6	4.36×10^6
$EI \left(\frac{KNm^2}{m} \right)$	23000	50400	98600
ν	0	0	0

جدول ۳. خصوصیات ناحیه‌ی unbound مهار (Sabatini et al., 1999)

Height (m)	EA (KN)	$L_{spacing}$ (m)	$F_{max,tens}$ (KN)	$F_{max,comp}$ (KN)
6	0.3×10^5	2	156	156
9	1.47×10^5	2	782	782
12	1.47×10^5	2	1095	1095

جدول ۴. خصوصیات ناحیه‌ی bound مهار (Sabatini et al., 1999)

Height (m)	EA (KN/m)	N_p (KN/m)
6	0.15×10^5	78
9	0.73×10^5	391
12	0.73×10^5	547

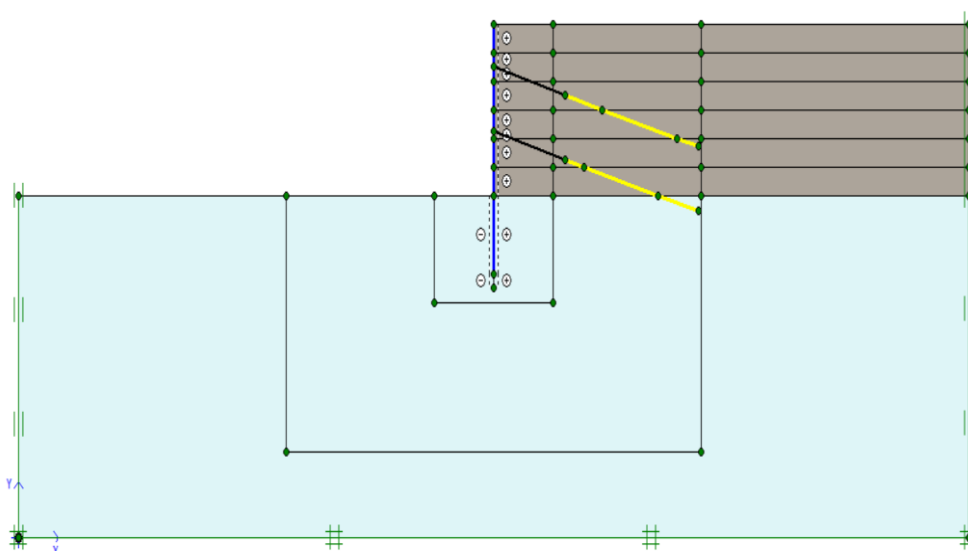
قرار گرفته در قسمت خاکریز بیان شده است. به طور مثال S6-STC0 به معنای مدل دیوار سپری با ارتفاع ۶ متر و با خاکریز تمام ماسه‌ای می‌باشد. حرف S در ابتدای نام‌گذاری، از حرف اول کلمه‌ی Sheet pile برگرفته شده است. به همین صورت برای نام‌گذاری مدل‌هایی که در آن، اثر تغییر عمق لایه خاک مسلح شده، دیده شده بود، یک عدد به انتهای نام‌گذاری مدل‌ها اضافه شده است، یعنی برای مدلی که در آن، فقط یک‌سوم بالایی خاکریز مسلح شده است، عدد ۱، برای مدلی که دو‌سوم بالایی خاکریز مسلح شده است، عدد ۲ و برای خاکریزی که به صورت کامل با تراشه‌های لاستیک مسلح شده است، عدد ۳ به انتهای نام مدل افزوده شده است. به عنوان مثال مدل S12-STC30-1 بیانگر دیوار سپری ۱۲ متری با خاکریزی که فقط یک‌سوم بالایی آن با مخلوط ماسه و تراشه‌های لاستیک با نسبت حجمی ۳۰٪ مسلح شده است می‌باشد. یک نمونه‌ی دیگر از نام‌گذاری مدل‌ها، در

در شبکه بندی اجزای محدود مورد استفاده در این تحقیق، تعداد المان‌ها برابر ۱۳۵۶، تعداد گره‌ها ۱۱۲۴۱ و تعداد نقاط تنش ۱۶۲۷۲ می‌باشد. در ابتدا، دیوار سپری دو مھاری با ارتفاع‌های ۶، ۹ و ۱۲ متر، همراه با خاکریز تمام ماسه‌ای غیرمسلح بررسی شد، سپس اثر عمق لایه خاک مسلح شده با تراشه‌های لاستیک، بر دیوارهای سپری دو مھاری مدل‌سازی گردید. برای بررسی اثر عمق خاک مسلح شده، خاک قسمت پشت دیوار به سه بخش برابر با یکدیگر تقسیم شده است.

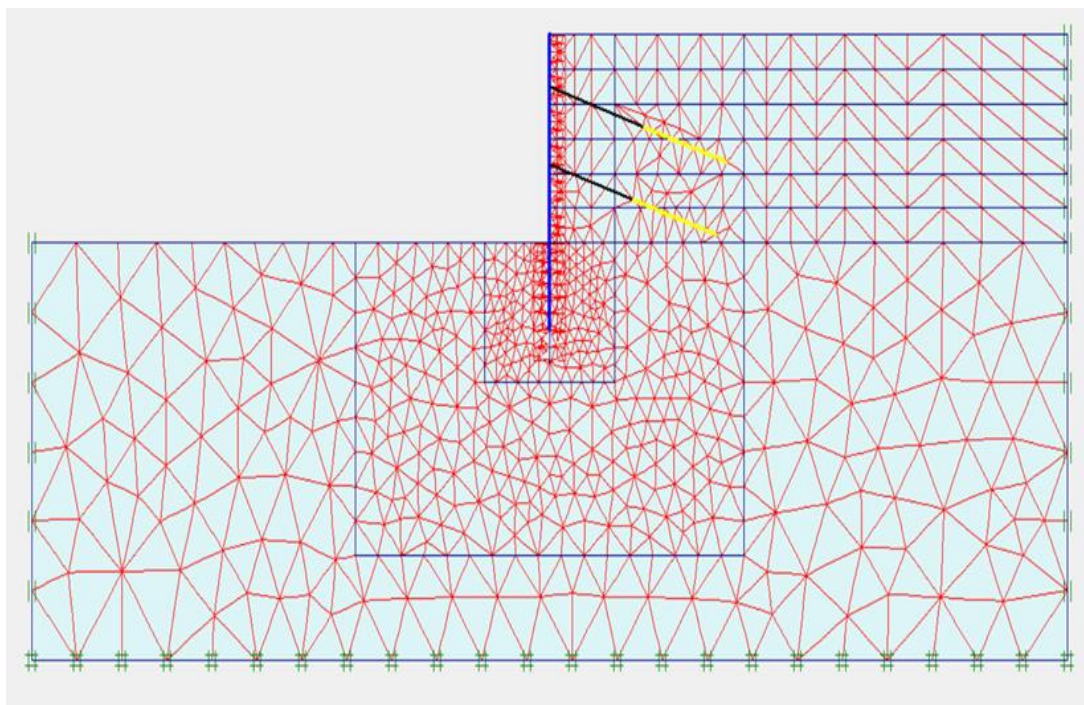
ابتدا در یک مدل، یک‌سوم بالایی خاکریز با مخلوط STC15 و دو‌سوم پایینی با خاک ماسه‌ای پر شد، سپس در مدل بعدی، دو‌سوم بالایی خاکریز با مخلوط STC15 و یک‌سوم پایینی با خاک ماسه‌ای پر شد. عینا همین مدل‌ها، با مخلوط STC30 به جای مخلوط SCT15 تکرار شد. در نهایت تمام سه قسمت خاکریز با خاک‌های STC15 و STC30 نیز پر شد تا اثر خاکریز کامل مسلح شده و اثر عمق لایه خاک مسلح شده، بر رفتار دیوار سپری دیده شود.

برای بیان نتایج، اسامی مدل‌ها، بر اساس ارتفاع دیوار و خاک

شکل ۳ ۳ مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۴ نمونه‌ای از المان‌بندی تحقیق حاضر ارائه شده است.



شکل ۳. مدل S12-STC30-3



شکل ۴. نمونه‌ای از المان بندی صورت گرفته

۴. نتایج عددی

۴-۱. نشست زمین

در دیوار با ارتفاع ۶ متر و در مدل‌های با مخلوط ۱۵ درصد، تغییرات نشست نسبت به مدل مسلح نشده بین ۰/۰۸٪ تا ۰/۷۶٪ و در مدل‌های با مخلوط ۳۰ درصد بین ۰/۱۷٪ تا ۱/۵۲٪ افزایش داشته است. با افزایش ارتفاع دیوار به ۹ متر، تغییرات نشست به ترتیب بین ۰/۰۹٪ تا ۰/۷۵٪ و ۰/۱۸٪ تا ۱/۴۹٪ می‌باشد که تقریباً مشابه با رفتار سپری ۶ متری است. با افزایش ارتفاع دیوار به ۱۲ متر، تغییرات نشست به ترتیب بین ۰/۰۹٪ تا ۰/۹۵٪ و ۰/۲۱٪ تا ۱/۹۴٪ افزایش می‌یابد که در مقایسه با دیوار با ارتفاع‌های دیگر، اندکی افزایش در درصد تغییرات را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از مخلوط ماسه با تراشه‌ی لاستیک با نسبت حجمی ۳۰ درصد، باعث افزایش بیشتر مقادیر نشست شده است. مقادیر به دست آمده برای نشست در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

۴-۲. جابجایی جانبی سپری

جابجایی جانبی سپری، در دیوار با ارتفاع ۶ متر، هنگام استفاده از خاک مسلح به تراشه‌های لاستیک، روندی کاهش را نشان می‌دهد که این کاهش به دلیل افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، در اثر مسلح‌سازی با تراشه‌های لاستیک بوده است. بیشترین کاهش به میزان ۱۲/۱۲٪ و زمانی رخ داده است که در تمام خاکریز، از خاک مسلح به تراشه‌های لاستیک استفاده شده است. رفتار دیوار سپری با ارتفاع‌های ۹ و ۱۲ متر نیز مشابه با دیوار ۶ متری می‌باشد و حداکثر کاهش در مقدار جابجایی جانبی آن‌ها به ترتیب برابر با ۴۴/۰۶٪ و ۴۵/۰۶٪ می‌باشد. نتایج به دست آمده برای جابجایی جانبی سپری در جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۵. مقادیر نشست برای مدل‌های مختلف با ارتفاع‌های متفاوت

Height (m)	6	9	12
Model	Settlement (mm)		
STC0	22.31	32.13	42.82
STC15-1	22.33	32.16	42.86
STC15-2	22.39	32.24	43
STC15-3	22.48	32.37	43.23
STC30-1	22.35	32.19	42.91
STC30-2	22.46	33.15	46.52
STC30-3	22.65	32.61	43.65

جدول ۶. مقادیر جابجایی جانبی سپری برای مدل‌های مختلف با ارتفاع‌های متفاوت

Height (m)	6	9	12
Model	Horizontal displacement (mm)		
STC0	-5.03	-11.62	-15.91
STC15-1	-5.01	-11.58	-15.84
STC15-2	-4.96	-14.71	-21.81
STC15-3	-4.42	-6.50	-8.74
STC30-1	-5.02	-11.59	-15.87
STC30-2	-4.92	-20.54	-35.70
STC30-3	-4.52	-6.78	-9.03

۳-۴. لنگر خمشی سپری

لنگر خمشی حداکثر، با مسلح سازی خاکریز با تراشه‌های لاستیک و بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک، کاهش پیدا می‌کند که این تغییرات در دیوار با ارتفاع ۶ متر و مخلوط ۱۵ درصد بین ۰/۶٪ تا ۲۴/۴۳٪ و هنگام استفاده از مخلوط ۳۰ درصد بین ۰/۴٪ تا ۲۱/۹۵٪ می‌باشد. با افزایش ارتفاع سپری نیز رفتار مشاهده شده به همین صورت می‌باشد. در سپری با ارتفاع ۹ و ۱۲ متر، حداکثر کاهش در مقدار لنگر خمشی به ترتیب برابر با ۶۰/۰۷٪ و ۵۶/۹۹٪ می‌باشد. هنگامی که دوسوم بالایی خاکریز مسلح به تراشه‌های لاستیک باشد، بیشترین

کاهش در مقدار لنگر خمشی دیده می‌شود اما در این وضعیت، مقدار جابجایی جانبی سپری افزایش می‌یابد، بنابراین برای کاهش در هر دو پارامتر، باید تمام خاکریز مسلح به تراشه‌های لاستیک شود. با توجه به نتایج مشاهده شده، در صورت استفاده از مخلوط ماسه و تراشه‌های لاستیک در قسمت خاکریز، می‌توان از مقطع کوچکتری برای سپری استفاده کرد. مقادیر لنگر خمشی سپری برای دیوار با ارتفاع‌های مختلف، در جدول ۷ مشاهده می‌شود.

جدول ۷. مقادیر لنگر خمشی سپری برای مدل‌های مختلف با ارتفاع‌های متفاوت

Height (m)	6	9	12
Model	Bending moment (KN.m/m)		
STC0	-14.94	-70.13	-127.61
STC15-1	-14.85	-70.48	-128.38
STC15-2	-11.29	-35.04	-71.67
STC15-3	-12.59	-36.26	-67.08
STC30-1	-14.88	-70.75	-128.53
STC30-2	-11.66	-28.00	-54.88
STC30-3	-13.67	-34.69	-58.74

۴-۴. نیروی مهار

در دیوار با ارتفاع ۶ متر، با افزایش عمق لایه‌ی مسلح شده، نیروی مهار بالا و پایین کاهش پیدا می‌کند. در دیوار با ارتفاع‌های ۹ و ۱۲ متر نیز، رفتار سپری مشابه می‌باشد. مشاهده می‌شود که نیروی توسعه یافته در مهار پایین، بیشتر از مهار

بالایی است که دلیل آن، قرار گرفتن میله‌ی مهار پایین در عمق بیشتر و تحمل فشار جانبی بیشتر می‌باشد. نتایج به دست آمده برای نیروی مهار بالا و پایین، در جدول ۸ و جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۸. مقادیر نیروی مهار بالا برای مدل‌های مختلف با ارتفاع‌های متفاوت

Height (m)	6	9	12
Model	Upper anchor force (KN/m)		
STC0	41.27	105.40	205.60
STC15-1	41.28	105/50	205/60
STC15-2	40.43	103.50	201.20
STC15-3	38.43	101	196.30
STC30-1	41.32	105.40	205.50
STC30-2	40.55	103.90	201.90
STC30-3	38.55	101.40	195.90

جدول ۹. مقادیر نیروی مهار پایین برای مدل‌های مختلف با ارتفاع‌های متفاوت

Height (m)	6	9	12
Model	Lower anchor force (KN/m)		
STC0	63.54	217.80	408.80
STC15-1	63.47	217.00	408.00
STC15-2	62.46	211.20	397.30
STC15-3	61.47	206.80	388.30
STC30-1	63.14	216.80	407.70
STC30-2	62.50	211.30	397.10
STC30-3	61.84	207.60	388.30

۵. نتیجه‌گیری

خمشی کاهش و تغییر مکان جانبی در این حالت نسبت به سپری با ارتفاع ۶ متر افزایش می‌یابد که امری بدیهی است. همانطور که می‌دانیم برای سپری با ارتفاع کمتر از ۶ متر می‌توان از سپری بدون مهار استفاده نمود اما برای ارتفاع‌های بیشتر نیاز به مهار کردن سپری وجود دارد. نتایج بدست آمده در این تحقیق نیز تأکیدی بر همین مطلب است. نکته قابل ذکر این است که وجود ماسه مسلح با ضخامت دوسوم برای سپری ۶ متری، منجر به کاهش توان تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی سپر شده است که این نتیجه، استفاده موثر از ماسه مسلح به تراشه لاستیک فرسوده را نشان می‌دهد. از سوی دیگر نتایج تحلیل‌های عددی به وضوح نشان می‌دهند که وجود ماسه مسلح در مقایسه با ماسه غیرمسلح، باعث کاهش لنگرهای وارده به سپری و نیز کاهش جابجایی سپری شده است. نکته بسیار مهم دیگر این است که با افزایش ضخامت لایه‌ی مسلح، به گونه‌ای که تمام خاکریز، ماسه مسلح به تراشه‌های لاستیک باشد، تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی، کاهش می‌یابد. توجه به این نکته ضروری است که استفاده از این مصالح نه تنها هزینه‌ای برای پروژه ندارد بلکه هزینه‌های زیست محیطی ناشی از این آلاینده را نیز به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. نکته دیگر این است که وجود تراشه‌های لاستیک‌های فرسوده در خاک ماسه‌ای، علاوه بر مسلح نمودن خاک، باعث کاهش وزن موثر توده خاک مسلح شده که این امر نیز در کاهش فشارهای جانبی خاک، بسیار موثر است که باعث رسیدن به طرح‌های کاملاً اقتصادی و مقرون به صرفه در طراحی سازه‌های نگهبان، سپری و دیوار حائل خواهد شد. نکته قابل ذکر و مهم دیگر، بحث زهکشی در پشت سپری است. وجود ماسه مسلح با تراشه لاستیک فرسوده، امکان زهکشی را فراهم نموده حتی باعث تسهیل بیشتر آن می‌گردد که خود این مطلب، تأکیدی دیگر بر استفاده مقرون به صرفه و فنی از این مصالح ارزان قیمت در پشت سپری و دیوارهای حائل می‌باشد.

در این پژوهش اثر ضخامت لایه‌ی مسلح شده با تراشه‌ی لاستیک، مقادیر مختلف درصد تراشه لاستیک و نیز ارتفاع‌های مختلف سپری بر رفتار دیوار سپری بررسی شده و نتایج زیر به دست آمده است: استفاده از مخلوط ماسه و تراشه‌ی لاستیک با نسبت حجمی ۱۵ و ۳۰ درصد، در قسمت خاکریز دیوار به جای خاکریز تمام ماسه‌ای، منجر به کاهش جابجایی جانبی و لنگر خمشی سپری می‌شود. همچنین نیروی مهارها نیز، کاهش می‌یابد. از آنجا که مقدار تغییرات مشاهده شده در نتایج برای درصدهای حجمی ۱۵ و ۳۰ لاستیک، چندان زیاد نمی‌باشد و از سوی دیگر، اجرا و تراکم ۳۰ درصد حجمی لاستیک از نظر اجرایی نسبت به ۱۵ درصد لاستیک، امری تاحدی مشکل است، توصیه می‌شود از درصد حجمی ۱۵ درصد لاستیک در تسلیح خاک پشت سپری استفاده شود. این مقدار علاوه بر تسلیح خاک به مقدار بالا، از نظر اجرایی و کاربردی قابل توصیه است مگر آنکه هدف، دفع بیشتر آلاینده لاستیک فرسوده باشد. نتایج تحلیل‌های عددی مختلف انجام شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که هنگامی که در یک سوم ارتفاع بالایی خاکریز از ماسه مسلح به تراشه‌های لاستیک مسلح استفاده شده باشد، تغییر شکل‌ها و نیروهای ایجاد شده از سمت خاک به سپری، تغییرات ناچیزی دارد. به عبارت دیگر نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ماسه مسلح در تنها یک سوم ارتفاع پشت سپری، اثر چندان زیادی بر کاهش نیروهای جانبی نداشته است. این نتیجه مهم از بررسی شکل‌های ۱ و ۲ نیز قابل برداشت است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که بیشتری جابجایی و نیز لنگر ایجاد شده در سپری، مربوط به یک سوم پایینی سپری است. بر این اساس می‌توان به صحت نتایج بدست آمده در این تحقیق، اتکا نمود. با افزایش ضخامت لایه‌ی ماسه مسلح شده به تراشه‌های لاستیک به دوسوم ارتفاع پشت سپری، در سپری با ارتفاع ۶ متر، تغییر مکان جانبی و لنگر خمشی سپری، کاهش می‌یابد، اما با افزایش ارتفاع سپری به ۹ و ۱۲ متر، لنگر

منابع

- Ahmadpour, B., Amelsakhi, M., Kamalian, M., 2018. "Study of Loose Soil Layer Effects on Excavations Supported by Steel Sheet Pile Walls-A Numerical Study," *Journal of Engineering Geology*, vol. 12, pp. 31-54.
- Amelsakhi, M., "Influence of optimized tire shreds on strength of sand-reinforced with tire shreds", 2001, In Partial Fulfillment of the Requirements the Degree of Master of Science, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
- Amelsakhi, M., Zaeri, F., 2011. "Numerical investigation of dynamic behavior of soil tire shred mixture", *Journal of Engineering Geology*, 4(2). 1011-1030 (in Persian).
- Amelsakhi, M., Zamani, M., 2013, "Settlement investigation of shallow foundation located on sand reinforced with tire shreds using pseudo-static analysis", *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 15(4), pp. 37-44 (in Persian).
- Bilgin, Ö., 2010. "Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions," *Computers and Geotechnics*, vol. 37(3), pp. 399-407.
- Bilgin, Ö., 2022. "Effect of potential swell pressures on anchored sheet pile walls," *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1-10.
- Cecich, V., Gonzales, L., Hoisaeter, A., Williams, J., Reddy, K., 1996. "Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures," *Waste Management & Research*, vol. 14(5), pp. 433-451.
- Dammala, P. K., Sodom, B. R., Adapa, M. K., 2015. "Experimental investigation of applicability of sand tire chip mixtures as retaining wall backfill.," *IFCEE*, pp. 1420-1429.
- Das, B. M., 2016. *principles of foundation engineering 8thedn*, United States: CENGAGE learning.
- Day, R. A., Potts, D. M, 1993. "Modelling sheet pile retaining walls," *Computers and Geotechnics*, vol. 15(3), pp. 125-143.
- Djadouni, H., Trouzine, H., Gomes Correia, A., Miranda, T. F. D. S., 2019. "2D numerical analysis of a cantilever retaining wall backfilled with sand-tire chips mixtures," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 25(6), pp. 1119-1135.
- Emarah, D. A., Seleem, S. A., 2018. "A numerical study of anchored sheet piles subjected to different types of sandy soils backfill," *HBRC journal*, vol. 14(3), pp. 422-430.
- Ghazavi, M., Amelsakhi, M., 2005. "Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand", *International Journal of Geomechanics*, vol. 5(1), pp. 58-65.
- Ghazavi, M., Amelsakhi, M., 2005. "Optimization of aspect ratio of waste tire shreds in sand-shred mixtures using CBR tests", *Geotechnical Testing Journal*, vol. 28(6), 564-569.
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C., 1999. *Ground anchors and anchored systems* (No. FHWA-IF-99-015), United States: Federal Highway Administration. Office of Bridge Technology.
- Samadhiya, N. K., 2019. "Evaluation of model sheet pile wall adjacent to a strip footing-an experimental investigation.," *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Singh, C. K., Chatterjee, A. P., 2020. "Lateral earth pressure and bending moment on sheet pile walls due to uniform surcharge," *Geomechanics and Engineering*, vol. 23(1), pp. 71-83.
- Reddy, S. B., Krishna, A. M, 2015. "Recycled tire chips mixed with sand as lightweight backfill material in retaining wall applications: an experimental investigation," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1(4), pp. 1-11.