

بررسی آزمایشگاهی امکان‌پذیری استفاده مجدد از پسماندهای ساختمانی در پروژه‌های عمرانی (مطالعه موردی: پسماندهای حصار کرج)

مأنده خیرخواه^۱ (دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه خوارزمی)

علی قنبری (استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰

چکیده

نگاهی به آمارهای مربوط به تخریب ساختمان‌ها و آوارهای حاصل از آن در دهه‌های گذشته نشان می‌دهد که مدیریت پسماندهای ساختمانی می‌تواند مشکلات زیست محیطی در شهرهای بزرگ چون تهران و کرج را کاهش دهد. نخاله‌های ساختمانی را می‌توان در بخش‌های مختلف ساختمان‌های عمرانی نظیر محوطه سازی در پارک‌ها، تسطیح شیب‌ها، تهیه بتن و نیز به عنوان مصالح پرکننده زهکشی و زیرسازی راه‌ها به کار برد. در این پژوهش سعی شده است با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی همچون آزمایش‌های دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، تراکم اصلاح شده، لس آنجلس، برش مستقیم، CBR، جذب آب، تطویل و تورق و همچنین آزمایش‌های صحرایی همچون آزمایش‌های دانسیته در محل، SPT و PLT نشان داده شود که پسماندهای ساختمانی و بخصوص نخاله ساختمانی منطقه حصارکرج، مقاومت کافی برای استفاده مجدد در صنعت ساخت را دارند. همچنین در این مطالعه به بررسی نقش افزودن خرده بتن و ژئوگرید به نخاله‌های ساختمانی و تاثیرات وجود آن‌ها در مقاومت برشی این مصالح پرداخته شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی در ساخت بدنه راه برای جاده‌های فرعی با ترافیک کم و همچنین بستر راه‌های اصلی وجود دارد. علاوه بر این پس از تفکیک پسماندهای ساختمانی می‌توان از آنها به عنوان سنگدانه برای ساخت بتن، مصالح ساختمانی برای کف‌سازی‌ها، پوشش مدفن‌های زباله و هسته سدهای خاکی استفاده کرد.

کلمات کلیدی: پسماندهای ساختمانی، حصار کرج، بازیافت، ژئوگرید، خرده بتن.

^۱ نویسنده مسئول kheirkhahmaedeh@gmail.com

۱- مقدمه

حجم زیادی از نخاله‌های ساختمانی در اطراف شهرهای بزرگ مانند تهران و کرج وجود دارد که مشکلات زیست محیطی برای منطقه ایجاد کرده‌اند. نتایج حاصل از مطالعه بیگدلو و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که به طور متوسط روزانه ۵۹۷۳ تن (سالانه ۲۱۸۶۴۱۰ تن) نخاله ساختمانی حاصل از ساخت و تخریب در کرج تولید می‌شود که حدود سه درصد از حجم کل نخاله ساختمانی کل کشور را شامل می‌شود. روش‌های مدیریت نخاله‌های ساختمانی شامل سه راهکار انباشت، دفن و بازیافت است. مهم‌ترین مشکلی که به دنبال استفاده از دو راهکار اول به وجود می‌آید مشکلات زیست محیطی این روش‌هاست. در روش بازیافت بدون آسیب رساندن به محیط زیست نخاله‌های ساختمانی مدیریت شده و امکان استفاده مجدد از آن‌ها فراهم می‌شود. Sormunen (2019) and Karki (2017), Jin et al. (2017) و Vieira and Pereira (2015) به ترتیب در رابطه با استفاده از مصالح بازیافتی و نخاله ساختمانی در تولید کامپوزیت، آجر بنایی و مصالح پرکننده در شیروانی‌های مسلح و مواد پرکننده برای ساخت خاکریز در مطالعات خود تحقیق کرده‌اند.

در تحقیق حاضر سه نوع آزمایش صحرایی و هشت نوع آزمایش آزمایشگاهی انجام شده‌است. آزمایش‌های صحرایی شامل آزمایش دانسیته در محل (۲ مورد)، آزمایش بارگذاری صفحه (۲ مورد) و آزمایش نفوذ استاندارد (۱۴ مورد) بوده‌است. همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی چون آزمایش دانه بندی همراه با هیدرومتری (۳۴ مورد الک و ۲۳ مورد هیدرومتری)، آزمایش حدود اتربرگ (۷ مورد)، آزمایش تراکم (۲ مورد اصلاح شده و ۲ مورد استاندارد)، آزمایش برش مستقیم (۹ مورد)، آزمایش CBR (۵ مورد)، و همچنین برای بررسی کردن امکان استفاده مصالح مورد مطالعه در تهیه بتن آزمایش‌های تطویل (۱ مورد)، تورق (۱ مورد)، جذب آب (۱ مورد) و لس آنجلس (۴ مورد) بر روی مصالح سنگدانه و مصالحی که امکان استفاده شدن در بتن را داشته‌اند صورت گرفته است.

انجام آزمایش‌های مربوطه به منظور بدست آوردن ترکیب نخاله‌ها، ظرفیت باربری، میزان نشست و متغیرهای مقاومت برشی مصالح، چون چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، مدول عکس العمل بستر، چگالی خاک، تراکم نسبی خاک، مدول الاستیسیته و همچنین بررسی عمق لایه‌ها و یکنواختی لایه‌ها در منطقه حصار کرج صورت گرفته است. همچنین برای بررسی تاثیر خرده بتن و ژئوگرید در مقاومت برشی مصالح مورد مطالعه تعدادی آزمایش برش مستقیم با اضافه کردن ۱۰٪ خرده بتن به نمونه مورد مطالعه و چند آزمایش برش مستقیم با اضافه کردن یک لایه ژئوگرید دوسویه به نمونه انجام گرفته است.

اغلب مطالعات محققین قبلی (Tavakoli et al.(2020) و Ok et al.(2020) توسط آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی نشان داده‌است که می‌توان از نخاله‌های ساختمانی در پروژه‌های عمرانی استفاده نمود. محققینی چون Leite et al.(2011) توسط نتیجه‌گیری از آزمایش سه محوری به این نتیجه رسیده‌اند که می‌توان از نخاله‌های ساختمانی در لایه زیرساز جاده‌ای با ترافیک کم استفاده نمود. همچنین Zhang et al. (2020) در مطالعه خود توسط آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی مانند PLT، تراکم و... استفاده از نخاله ساختمانی برای ساخت بستر راهسازی در جاده‌های بزرگراه در چین را توصیه کرده است. هدف از تحقیق حاضر نیز بررسی امکان استفاده از پسماندهای ساختمانی در پروژه‌های عمرانی و ساخت و ساز است.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، حصار کرج که محل انباشت نخاله ساختمانی است، می‌باشد. این منطقه در شرق استان البرز، مسیر ورود به جاده چالوس از سمت اتوبان تهران کرج واقع شده است. نخاله‌های ساختمانی دارای ناهمگنی جغرافیایی هستند و خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها با تغییر محل آزمایش تغییر خواهد کرد با این حال انتخاب محل مورد نظر در مطالعه انجام شده به نحوی بوده است که به صورت متوسط بیانگر خصوصیات نخاله‌ها در منطقه می‌باشد (شکل ۲). این منطقه به مدت ۳۰ سال تا سال ۱۳۹۴ محل دپوی نخاله ساختمانی بوده است تا اینکه در سال ۱۳۹۴ ظرفیت آن تکمیل می‌شود. به‌طور کلی دو دسته نخاله‌های ساختمانی در منطقه مورد مطالعه دپو شده است، دسته اول مربوط به بازه زمانی سال‌های ۱۳۶۴ الی ۱۳۹۴ می‌باشد که هم اکنون ۳۶ سال از عمر آن گذشته است و مصالح بر روی هم متراکم گردیده و دسته دوم مربوط به بازه زمانی ۱۵ سال گذشته می‌باشند که نخاله‌ها تنها به صورت تپه‌ها بر روی یکدیگر و در کنار جاده اصلی متشکل شده از نخاله‌های ساختمانی منطقه انباشته شده‌اند. لازم به ذکر است در استان البرز روزانه به طور تقریبی ۵ الی ۱۲ هزار تن نخاله ساختمانی تولید می‌شود که این عدد و نبود جایگاه مناسبی برای دپو و بازیافت نخاله ساختمانی در این استان از مسائلی است که باید به صورت جدی به آن پرداخته شود. با مطالعاتی ژئوتکنیکی که در پژوهش حاضر در این منطقه صورت گرفته است انواع نخاله ساختمانی اعم از خاک به صورت ریزدانه و درشت دانه مرغوب و تا حدودی مرغوب، بتن، آجر، شیشه، آسفالت، گچ و سایر نخاله غیر مرتبط دیگر چون پارچه، پلاستیک، ریشه گیاهان، چوب و کاغذ رویت شده است (شکل ۱).



شکل ۱- محل دپوی پسماندهای ساختمانی منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی دپوی نخاله‌های ساختمانی و نقاط استخراج نمونه در منطقه حصار کرج

۳- آزمایش‌های صحرایی

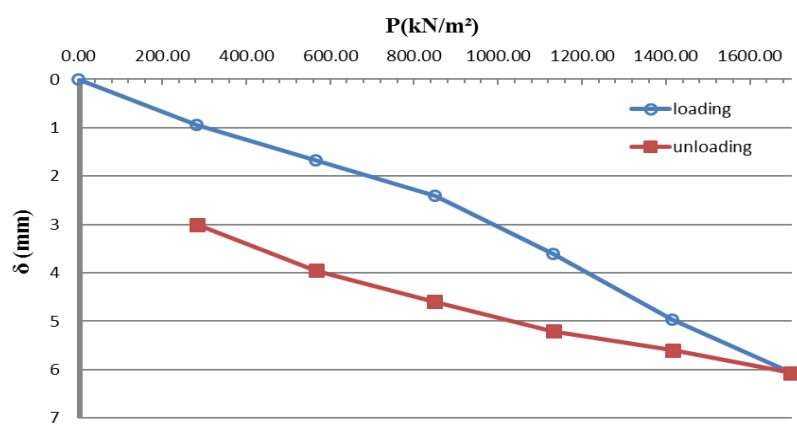
به منظور بدست آوردن خصوصیات فیزیکی و در محل مصالح، بررسی ظرفیت باربری، بررسی ضخامت لایه‌ها و ارزیابی میزان تراکم آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی نظیر بارگذاری صفحه، SPT و دانسیته در محل انجام شده است (جدول ۱ و ۲). خلاصه نتایج آزمایش‌های صحرایی انجام شده در این مطالعه به شرح جدول ۳ است. برای انجام آزمایش بارگذاری صفحه از دو صفحه هم مرکز با قطرهای ۲۰ و ۳۰ سانتی متری و برای اعمال فشار جک از محور کامیون با وزن ۱۴ تن استفاده شده است. این بارگذاری در ۶ مرحله تا بار ۱۲ تن انجام گرفته است (شکل ۳). به طور کلی دو آزمایش بارگذاری صفحه در منطقه مورد مطالعه انجام شده است (شکل‌های ۴ و ۵)، سعی بر این بوده است که این آزمایش در محیطی صورت گیرد که خاک در حالت سست‌تر از سایر نقاط دیگر منطقه باشد و همچنین در جایی که تردد زیاد ماشین‌های سنگین برای تخلیه نخاله در گذشته بودند نباشد.

جدول ۱- آزمایش‌های صحرایی

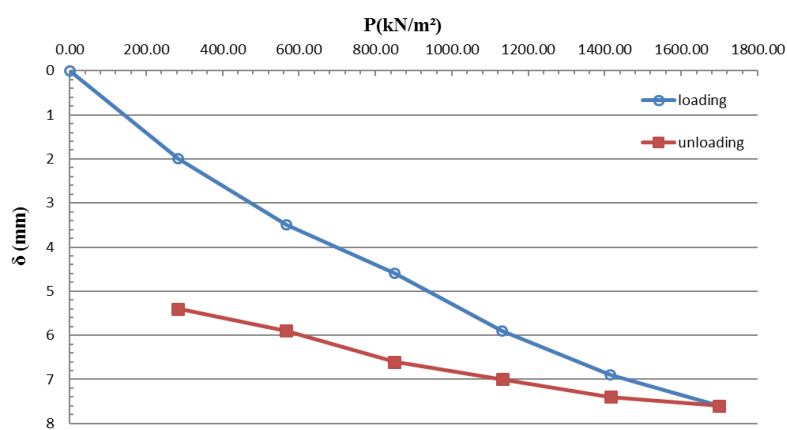
نام آزمایش	تعداد آزمایش	آیین نامه مربوطه	موارد تکمیلی
PLT(Plate load test)	۲	ASTM-D1194	این آزمایش در محلی که دارای خاک سست‌تر از جاده اصلی تردد می‌باشد یعنی در سایت F و E انجام شده است.
SPT	۱۴	ASTM-1586	۶ تست در گمانه ۲۵ متری واقع در سایت A و ۸ تست در گمانه ۳۰ متری واقع در سایت B انجام شده است.
دانسیته در محل	۲	ASTM D1556-07	این آزمایش در سایت C و D انجام شده است.



شکل ۳- محل استقرار کامیون برای اعمال بار و آماده سازی محل قرار گیری سه عدد گیج اندازه گیری نشست



شکل ۴- نتایج آزمایش بارگذاری صفحه اول



شکل ۵- نتایج آزمایش بارگذاری صفحه دوم

جدول ۲- تعیین ضریب واکنش بستر برای پی مربعی و مستطیلی بر اساس آزمایش‌های صحرایی

شماره آزمایش	PLT 1	PLT 2
مدول عکس العمل بستر بر حسب kN/m^3 (k)	352388	184621
مدول عکس العمل بستر برای پی مربعی به عرض ۱ متر kN/m^3	148884	78002
مدول عکس العمل بستر برای پی مستطیلی به عرض ۱ متر و طول ۲ متر kN/m^3	124070	65002
ظرفیت باربری پی مربعی به عرض ۱ متر توسط مدول عکس العمل بستر و نشست ۲/۵ سانتیمتر kN/m^2	3722	1950
ظرفیت باربری پی مستطیلی به عرض ۱ متر و طول ۲ متر توسط مدول عکس العمل بستر و نشست ۲/۵ سانتیمتر kN/m^2	3101	1625

در منطقه مورد مطالعه دو گمانه، به عمق ۲۵ و ۳۰ متر حفاری شده و نمونه‌هایی از هر عمق استخراج شده است (شکل ۶). همچنین در این پژوهش دو آزمایش دانسیته در محل یکی بر روی تپه‌های متراکم نشده و دیگری در پای تپه‌ها که تا حدودی مصالح بر اثر تردد متراکم شده‌اند انجام شده است. خلاصه نتایج این آزمایش در جدول (۳) ارائه شده است.

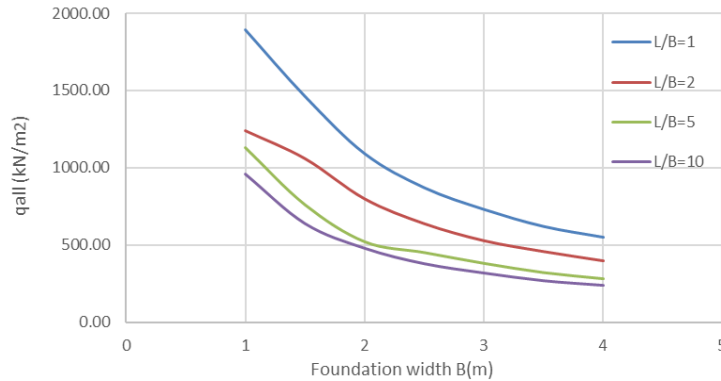


شکل ۶- عملیات حفاری در منطقه مورد مطالعه

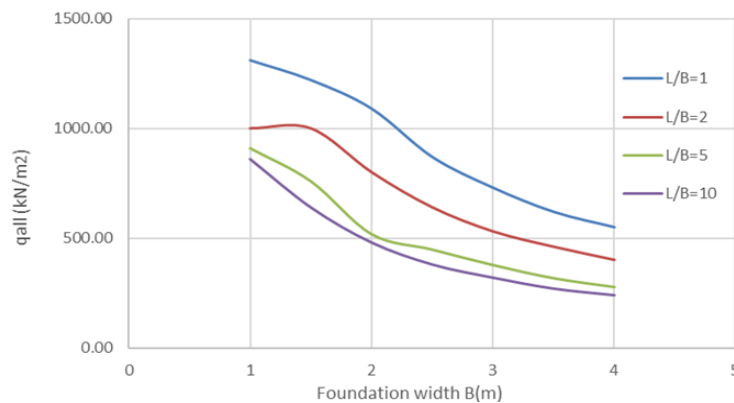
جدول ۳- خصوصیات ژئوتکنیکی حاصل از آزمایش‌های صحرایی نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه

نام آزمایش	خروجی آزمایش	توضیحات
PLT-1	$E=75518 \text{ kN/m}^2$	انجام شده بر محیط متراکم و پرتدد
	$k=352388 \text{ kN/m}^3$	
PLT- 2	$E=39565 \text{ kN/m}^2$	انجام شده بر محیط کم تردد
	$k=184621 \text{ kN/m}^3$	
SPT	$N_{SPT} > 50$	برای عمق ۴ متر به پایین $N_{SPT} > 50$ است. تخمین Dr بر اساس مطالعه Coduto(2002) تخمین ϕ بر اساس مطالعه De Mello(1971)
	$N_{60} > 32$	
	$Dr = 85 - 100$	
	$\phi = 40 - 50$	
دانسیته در محل ۱	$\gamma_t = 14.96$	انجام شده بر روی تپه تشکیل شده از انباشته شدن نمونه‌های دستی
	$\gamma_d = 14.36$	
	$\gamma = 70\%$ درصد تراکم	
دانسیته در محل ۲	$\gamma_t = 16.93$	انجام شده بر روی سطح زمین تشکیل شده از نمونه‌های متراکم
	$\gamma_d = 16.09$	
	$\gamma = 77\%$ درصد تراکم	

ظرفیت باربری پی با عمق مدفون یک متر که این خاک می‌تواند تحمل کند طبق رابطه هانسن به شکل ۷ است. ظرفیت باربری یادشده برای کمترین مقدار چسبندگی و کمترین دانسیته نسبی بدست آمده است. برای ظرفیت باربری خاک مورد مطالعه با کمترین میزان زاویه اصطکاک داخلی و کمترین میزان دانسیته نسبی شکل ۸ ارائه شده است. بررسی‌های صحرایی در قالب این تحقیق نشان می‌دهد که به دلیل روی هم انباشته شدن حجم زیادی از پسماندهای ساختمانی و تردد ماشین‌های سنگین در آن مصالح متراکم شده اند. بنابراین با افزایش مدول الاستیسته، مدول عکس العمل بستر و ظرفیت باربری مواجه هستند. این موضوع در نتایج آزمایش SPT نیز مشهود می‌باشد که نخاله ساختمانی انباشته شده در محل از عمق ۴ متر به پایین عدد اس پی تی بالایی را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۷- ظرفیت باربری پی (Df=1m) بر روی پسماند ساختمانی منطقه مورد مطالعه با لحاظ کمترین چسبندگی



شکل ۸- ظرفیت باربری پی (Df=1m) بر روی پسماند ساختمانی منطقه مورد مطالعه با لحاظ کمترین زاویه اصطکاک داخلی

۴- آزمایش‌های آزمایشگاهی

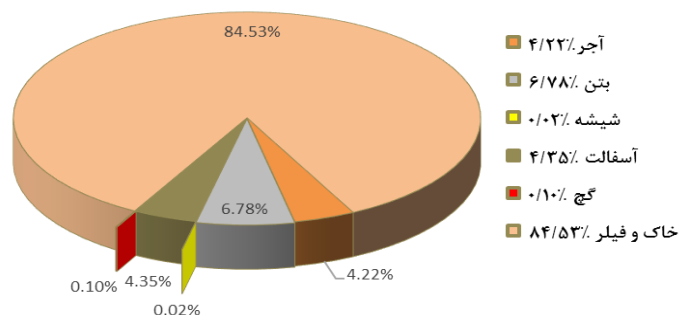
مشخصات آزمایش‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر در جدول (۴) و خلاصه نتایج حاصل از آنها در جدول (۵) ارائه شده است. همچنین ترکیب نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بر اساس آزمایش دانه‌بندی و مطابق با استاندارد نامبرده شده در جدول ۴ ارائه شده است. بر این اساس، خاک و فیلر بیشترین درصد را به خود اختصاص داده‌اند و شیشه، پلاستیک، گچ، کاشی و سرامیک کمترین درصد را دارند. متراکم شدن مصالح در منطقه مورد مطالعه طی ۳۰ سال گذشته و تردد تقریبی ۳۰۰ کامیون حمل بار روزانه از محل مورد مطالعه برای تخلیه ۵۰۰۰ هزارتن باعث شده‌است که مصالحی چون شیشه، گچ و کاشی و سرامیک توانایی مقاومت در برابر بار تحمیلی را نداشته باشند و زیر بار سنگین خرد شوند.

جدول ۴- آزمایش‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر

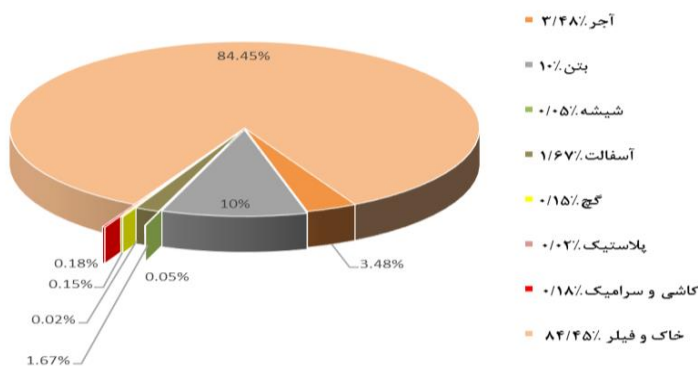
نام آزمایش	تعداد آزمایش	آیین‌نامه مربوطه	موارد تکمیلی
دانه بندی	۳۴	ASTM D: 422-87	با توجه به دو گمانه با عمق‌های ۲۵ متر و ۳۰ متر ۱۶ آزمایش دانه بندی برای گمانه با عمق ۲۵ متری و ۱۸ آزمایش دانه بندی برای گمانه با عمق ۳۰ متری صورت گرفته است.
هیدرومتری	۲۳	ASTM D: 421-58	این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های استخراج شده از گمانه‌ها انجام شده است
حدوداتربرگ	۷	ASTM D: 4318-87	
تراکم استاندارد	۲	AASHTO T99	امرتبه بر روی نمونه‌های سطحی و ۱ مرتبه بر روی نمونه‌های استخراج شده از گمانه انجام شده است.
تراکم اصلاح شده	۲	AASHTO T180	
برش مستقیم	۹	ASTM-D3080-11	این آزمایش بر روی نمونه‌های سطحی واقع در سایت D و C، G، I، H انجام شده است.
CBR	۵	ASTM D1883-07 استاندارد ملی ایران ۱۱۵۹	این آزمایش بر روی نمونه‌های سطحی واقع در سایت H، I و G انجام شده است.
لس آنجلس	۴	ASTM C131/C131M استاندارد ملی ایران ۴۴۸	این آزمایش بر روی نمونه‌های سطحی واقع در سایت H و I انجام شده است.
تطویل و تورق	۱	استاندارد B.S. 812	این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های سطحی واقع در سایت D انجام شده است.
جذب آب درشت‌دانه	۱	ASTM C127	



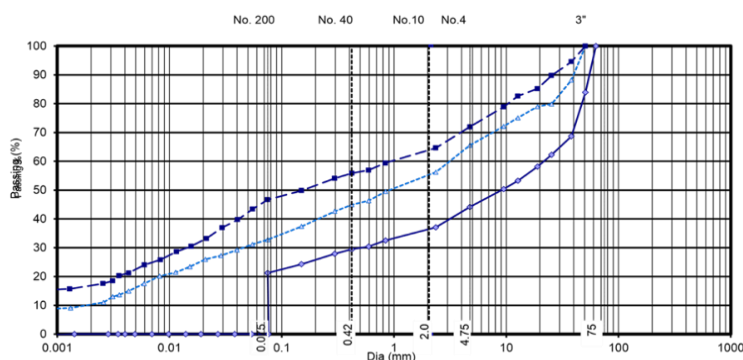
شکل ۹- نمونه‌ای از مصالح مورد مطالعه قبل و بعد از آزمایش لس آنجلس



شکل ۱۰- ترکیب نخاله‌های ساختمانی گمانه اول به تفکیک



شکل ۱۱- ترکیب نخاله‌های ساختمانی گمانه دوم به تفکیک



	Clay or Silt (%)	Sand (%)			Gravel (%)	Cobble (%)
		Fine	Medium	Coarse		
◇	21.24	22.91			55.85	-
▲	32.79	32.75			34.46	-
■	46.65	25.31			28.04	-

Symbol	BH No.	Depth(m)	U.S.C.S.	LL	PI	Cc	Cu	D100 mm	D60 mm	D30 mm	D10 mm	NO
◇	BH-1	1.0	GC	24	8	-	-	63	21.868	0.521	0.008	1
▲	BH-1	2.0	GC	24	8	-	-	50.8	3.328	0.045	0.001	2
■	BH-1	3.0	GC-GM	23	6	-	-	50.8	1.008	0.014	-	3

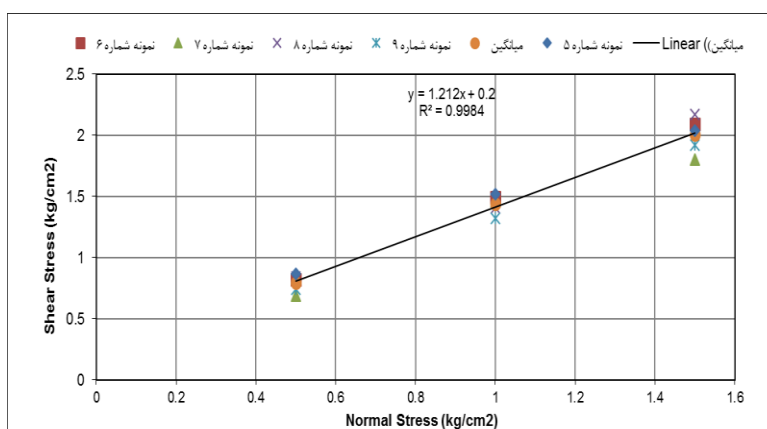
شکل ۱۲- منحنی دانه‌بندی عمق‌های ۱ تا ۳ متر گمانه اول

برای انجام آزمایش برش مستقیم دو دسته مصالح مورد آزمایش قرار گرفته است و تمامی شرایط مصالح متناسب با خصوصیات در محل مصالح می‌باشد.

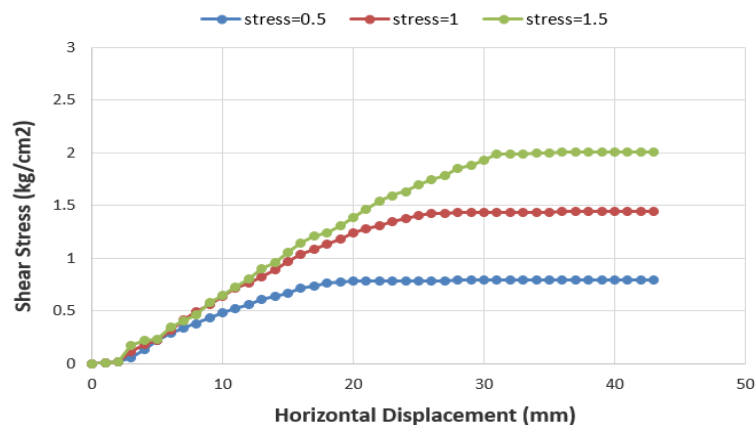
(۱) نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه با ضایعات کم (کمتر از ۵ درصد ضایعات): در این مصالح ضایعات به مقدار خیلی کم موجود بوده و تنها دست خوردگی و غیریکنواختی در مصالح دیده شده است. میانگین نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ۵ نمونه حاوی ضایعات کم در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ مشهود است.

(۲) نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه با ضایعات زیاد (به طور تقریبی ۲۵ تا ۳۵ درصد ضایعات): در این مصالح ضایعاتی چون لاستیک، کاشی، سرامیک، شیشه، بتن و آجر بوده‌اند. میانگین نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی ۴ نمونه حاوی ضایعات زیاد در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ مشهود است.

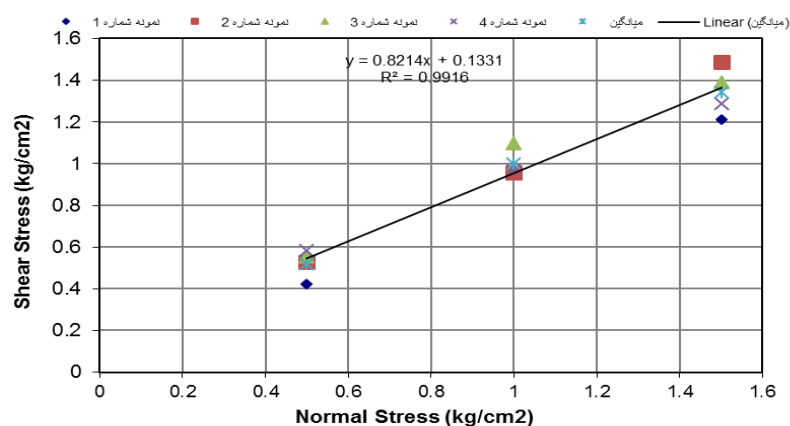
میانگین نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مصالح مورد مطالعه با ضایعات زیاد در مقایسه با مصالح مورد مطالعه با ضایعات کم میزان کمتری را به خود اختصاص داده‌اند و جابجایی در نقطه پیک در نخاله‌های ساختمانی همراه با ضایعات زیاد مقدار کمتری است.



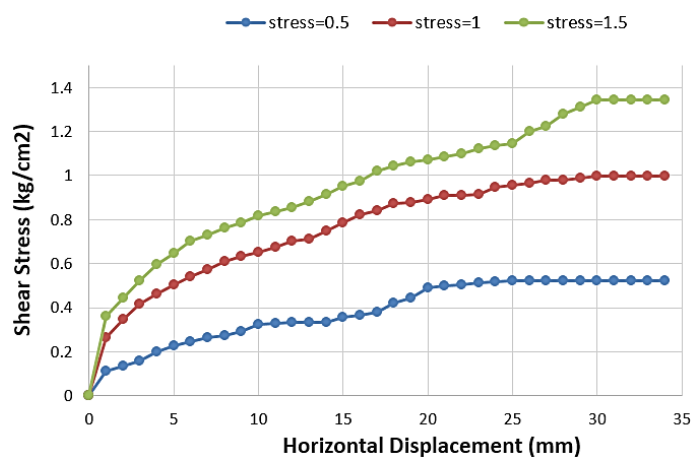
شکل ۱۳- خط موهر کولمب بر اساس میانگین نتایج آزمایش برش مستقیم نمونه‌های برداشته شده از تپه‌های انباشته از نخاله‌های ساختمانی همراه با ضایعات کم



شکل ۱۴- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی میانگین نمونه شماره ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ همراه با ضایعات کم



شکل ۱۵- پوش گسیختگی موهر کولمب میانگین نمونه شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ همراه با ضایعات زیاد



شکل ۱۶- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی میانگین نمونه شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ همراه با ضایعات زیاد

جدول ۵- خصوصیات ژئوتکنیکی حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه

نام آزمایش	خروجی آزمایش	توضیحات
دانه‌بندی	Soil type = ML/SM/GM/GC/SW-SM	طبق طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه اکثریت درشت دانه و به تعداد کمی در رده ML بوده‌اند.
حدود اتربرگ	PI = 6 - 9 PI Ave = 7.5 LL Ave = 25 PL Ave = 17.42	نوع خاک مورد مطالعه اکثریت از نوع درشت‌دانه می‌باشد و اکثریت فاقد نشانه خمیری بوده‌اند و تنها هفت مورد دارای نشانه خمیری بوده‌اند.
آزمایش برش مستقیم ۳۰*۳۰	$\phi = 35 - 44$ $\phi_{Ave} = 40$ $c = 3 - 25 \text{ kN/m}^2$ $c_{Ave} = 13.5 \text{ kN/m}^2$	نمونه‌های برداشته شده از تپه‌های انباشته از نخاله‌های ساختمانی همراه با ضایعات فراوان (نمونه شماره ۱ الی ۴)
آزمایش برش مستقیم ۳۰*۳۰	$\phi = 48 - 53$ $\phi_{Ave} = 50$ $c = 14 - 31 \text{ kN/m}^2$ $c_{Ave} = 20.2 \text{ kN/m}^2$	نمونه‌های برداشته شده از تپه‌های انباشته از نخاله‌های ساختمانی همراه با ضایعات کم (نمونه شماره ۵ الی ۹)
تراکم استاندارد	$\gamma_{dmax} = 19.7 \text{ kN/m}^3$ $\omega = 9.85\%$	انجام شده بر روی نمونه خاک‌های انباشته شده در تپه‌های با ارتفاع کم موجود در اطراف منطقه مورد مطالعه
تراکم اصلاح شده	$\gamma_{dmax} = 20.6 \text{ kN/m}^3$ $\omega = 9.95\%$	
تراکم استاندارد	$\gamma_{dmax} = 20.4 \text{ kN/m}^3$ $\omega = 10.36\%$	انجام شده بر روی نمونه‌های استخراج شده از گمانه ماشینی از عمق‌های مختلف.
تراکم اصلاح شده	$\gamma_{dmax} = 20.9 \text{ kN/m}^3$ $\omega = 9.22\%$	
CBR	CBR Ave (10 bump) = 13	انجام شده بر روی نمونه خاک‌های انباشته شده در تپه‌های با ارتفاع کم موجود در اطراف منطقه مورد مطالعه. کمترین مقدار متعلق به نمونه خاک متراکم شده در سه لایه و ۱۰ ضربه است (CBR = 3). بیشترین مقدار متعلق به نمونه خاک متراکم شده در پنج لایه و ۵۶ ضربه است (CBR = 79).
	CBR Ave (25 bump) = 24.6	
	CBR Ave (56 bump) = 26.6	
لس آنجلس	$\% ۳۴/۷۲ - ۲۶/۳۲$ = درصد سائیدگی $\% ۲۹/۹۶$ = میانگین درصد سائیدگی	انجام شده بر روی سنگدانه‌های موجود در تپه‌های کنار مسیر اصلی
تطویل و تورق	$\% ۳۱/۵۵$ = درصد تورق $\% ۱۴/۱۹$ = درصد تطویل	نمونه‌های برداشته شده از تپه‌های انباشته از نخاله‌های ساختمانی همراه با پسماند
جذب آب درشت دانه	$\% ۳/۸۷$ = درصد جذب آب	نمونه‌های برداشته شده از تپه‌های انباشته از نخاله‌های ساختمانی همراه با پسماند

۵- بهسازی نخاله‌های ساختمانی با وجود ژئوگرید و اضافه کردن خرده بتن

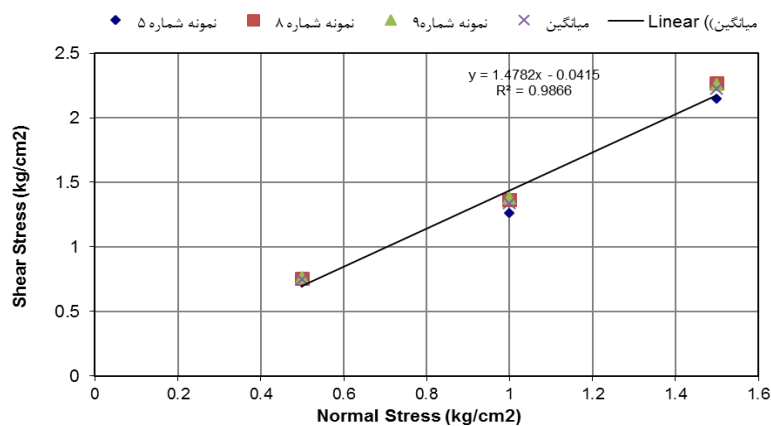
مطابق شکل ۱۷ برای بررسی تاثیر وجود ژئوگرید و خرده بتن بر مقاومت برشی مصالح تشکیل شده از نخاله‌های ساختمانی چندین آزمایش برش مستقیم در این مطالعه انجام گرفته است که در ادامه به آن پرداخته شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۶) به طور خلاصه ارائه شده است. لایه ژئوگرید در این مصالح نزدیک مرز برش قرار گرفته است. مقاومت کششی ژئوگرید ۸۰ کیلونیوتن بر متر و فاصله چشمه‌های آن از یکدیگر ۳ سانتی متر است. میانگین پوش گسیختگی هر سه نمونه همراه با وجود ژئوگرید و بدون ژئوگرید در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر مکان نقطه پیک در هر سه حالت تنش (۰/۵، ۱، ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) در حالتی مسلح شده با ژئوگرید بطور تقریبی ۶ میلی متر بیشتر از مصالح بدون ژئوگرید است.

جدول ۶- نتایج تاثیر وجود ژئوگرید در پسماندهای ساختمانی

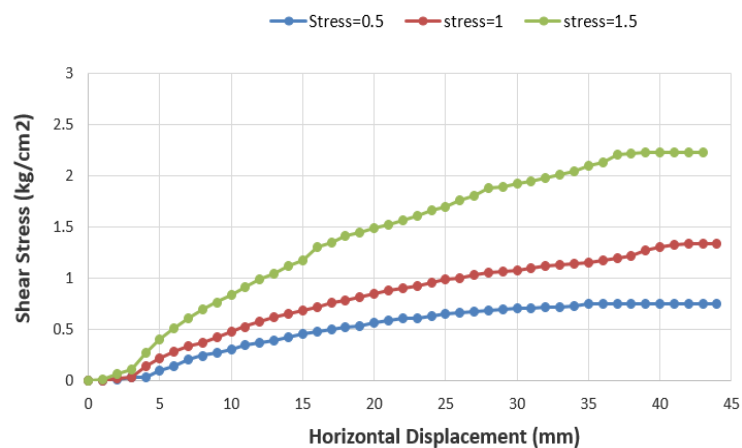
نتایج	با وجود ژئوگرید	بدون ژئوگرید	شماره نمونه
با حضور ژئوگرید چسبندگی کاهش، زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته است.	$c = 0$	$c = 31 \text{ kN/m}^2$	نمونه شماره پنج آزمایش برش مستقیم
	$\phi = 55$	$\phi = 49$	
	$c = 0$	$c = 14 \text{ kN/m}^2$	نمونه شماره هشت آزمایش برش مستقیم
	$\phi = 57$	$\phi = 53$	
	$c = 0$	$c = 15 \text{ kN/m}^2$	نمونه شماره نه آزمایش برش مستقیم
	$\phi = 56$	$\phi = 50$	



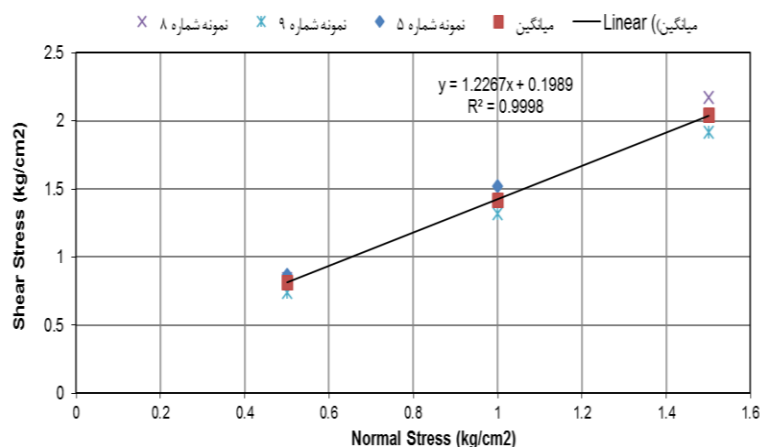
شکل ۱۷- استفاده از ژئوگرید دوسویه بر روی پسماندهای ساختمانی و قرار گرفتن آن در نزدیکی مرز برش



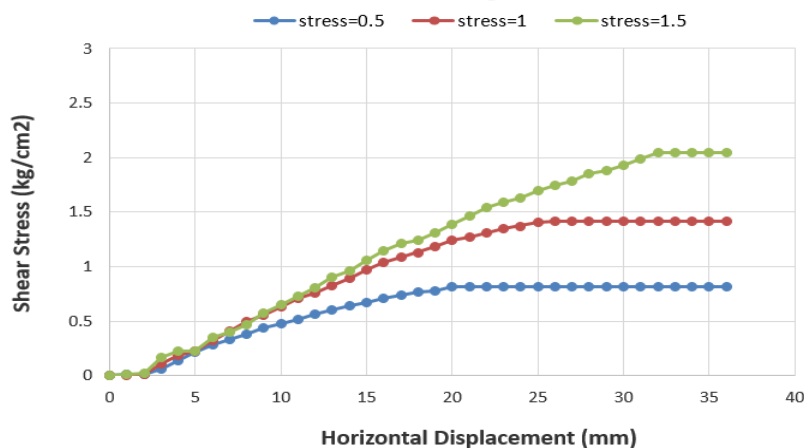
شکل ۱۸- پوش گسیختگی موهرکولمب میانگین نمونه شماره ۵، ۸ و ۹ همراه با ژئوگرید



شکل ۱۹- نمودار جابجایی برحسب تنش برشی میانگین نمونه شماره ۵، ۸ و ۹ همراه با ژئوگرید



شکل ۲۰- پوش گسیختگی موهرکولمب میانگین نمونه شماره ۵، ۸ و ۹ بدون ژئوگرید



شکل ۲۱- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی میانگین نمونه شماره ۵، ۸ و ۹ بدون ژئوگرید

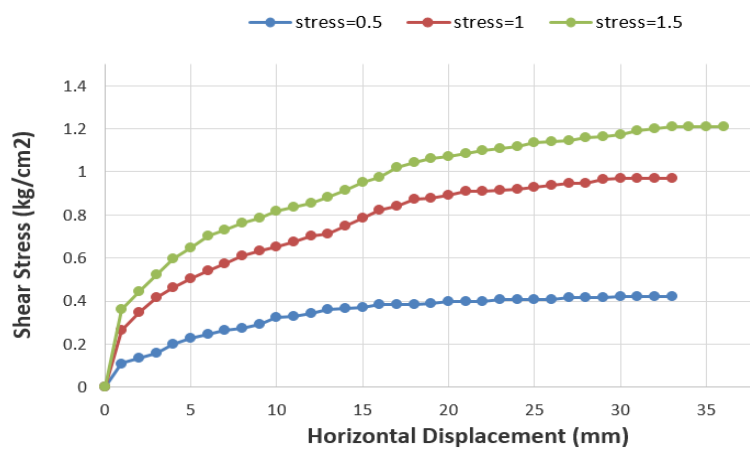
برای بررسی تاثیر وجود خرده بتن در مقاومت برشی خاک، بر روی ۲ نمونه آزمایش برش مستقیم در حالت با و بدون وجود خرده بتن انجام شده است (شکل ۲۲). نتایج حاصله در شکل‌های ۲۳ الی ۲۹ و جدول ۷ خلاصه گردیده است. طبق نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد حداقل باید ۱۵٪ خرده بتن به پسماند ساختمانی اضافه شود تا زاویه اصطکاک داخلی را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد، اما برای افزایش چسبندگی وجود ۱۰٪ خرده بتن نیز تاثیر خود را بر روی نمونه خواهد گذاشت، که برای بیشتر شدن این تاثیر می‌توان میزان خرده بتن را تا ۲۰ درصد افزایش داد. از نتایج بدست آمده همچنین می‌توان اظهار نمود که در نمونه شماره یک و دو، تغییر مکان در نقطه پیک با افزایش خرده بتن کاهش یافته است. بطوریکه در نمونه شماره یک با ۱۰٪ و ۲۰٪ خرده بتن به‌طور میانگین به ترتیب ۴/۶ و ۷/۳ میلی‌متر و در نمونه شماره دو نیز با ۱۰٪ خرده بتن به‌طور میانگین ۸/۶ میلی‌متر کاهش در تغییر مکان نقطه پیک مشاهده شده است.

جدول ۷- تاثیر اضافه کردن ۱۰٪ خرده بتن به پسماندهای ساختمانی

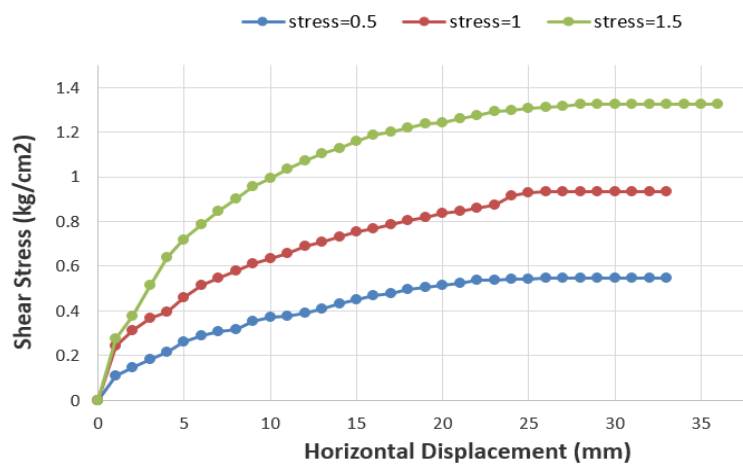
نتایج	با وجود ۲۰٪ خرده بتن	با وجود ۱۰٪ خرده بتن	بدون وجود خرده بتن	شماره نمونه
با حضور خرده بتن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته‌اند.	$c = 23$	$c = 17 \text{ kN/m}^2$	$c = 8 \text{ kN/m}^2$	نمونه شماره یک آزمایش برش مستقیم
	$\phi = 44$	$\phi = 38$	$\phi = 38$	
	—	$c = 7 \text{ kN/m}^2$	$c = 3 \text{ kN/m}^2$	نمونه شماره دو آزمایش برش مستقیم
	—	$\phi = 47$	$\phi = 44$	



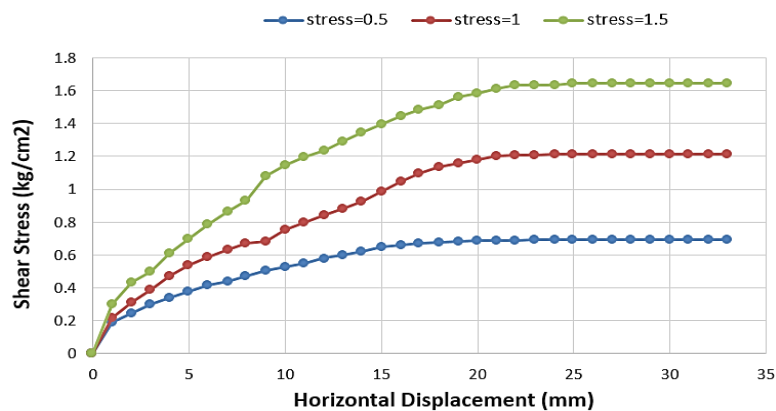
شکل ۲۲- اضافه کردن ۱۰٪ خرده بتن به پسماند ساختمانی



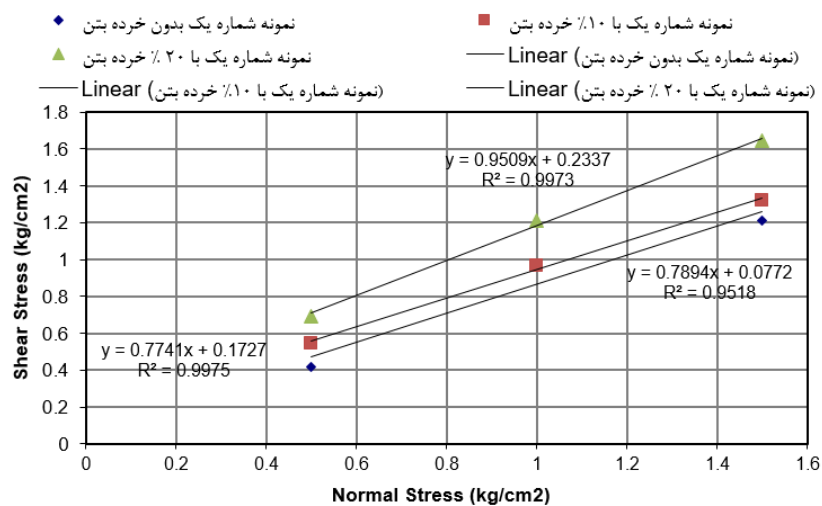
شکل ۲۳- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی نمونه شماره یک بدون خرده بتن



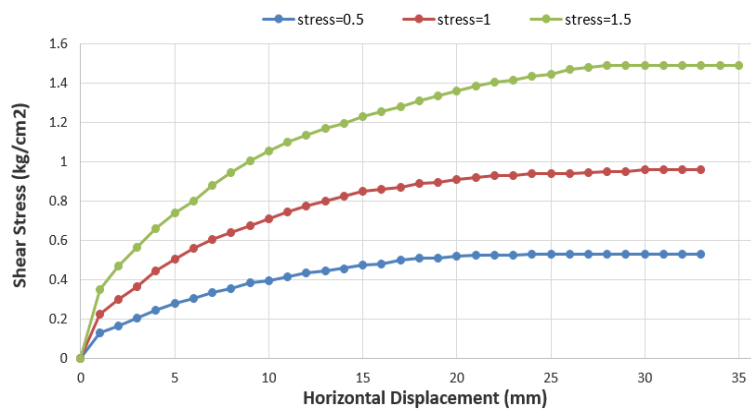
شکل ۲۴- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی نمونه شماره یک همراه با ۱۰٪ خرده بتن



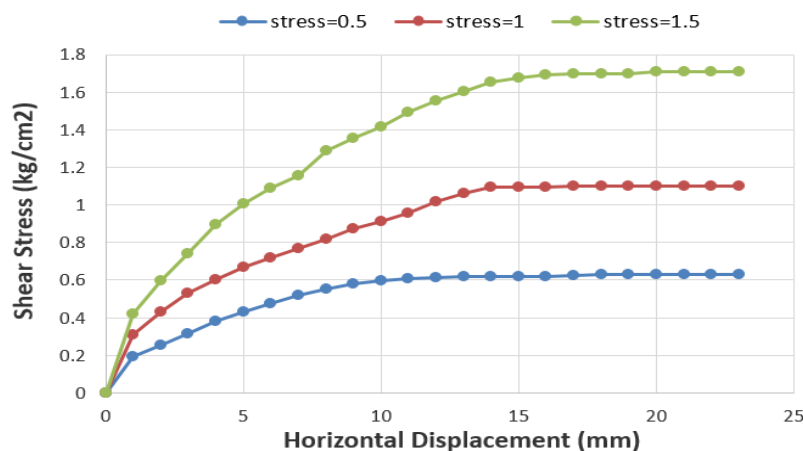
شکل ۲۵- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی نمونه شماره یک همراه با ۲۰٪ خرده بتن



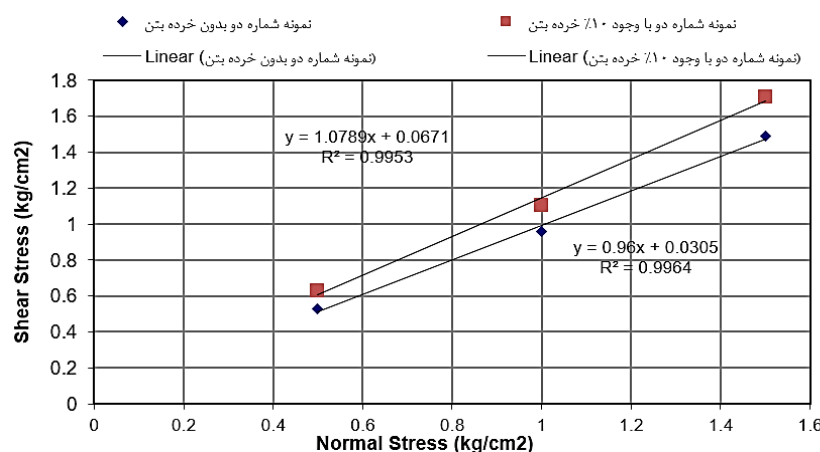
شکل ۲۶- پوش گسیختگی موهر کولمب نمونه شماره یک با و بدون حضور خرده بتن



شکل ۲۷- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی نمونه شماره دو بدون وجود خرده بتن



شکل ۲۸- نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی نمونه شماره دو با وجود ۱۰٪ خرده بتن



شکل ۲۹- پوش گسیختگی موهر کولمب نمونه شماره دو با و بدون حضور خرده بتن

۶- بررسی امکان به کارگیری دوریزهای مطالعه شده در پروژه‌های عمرانی

در این قسمت به استناد نتایج بدست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده بر روی نخاله‌های ساختمانی منطقه مورد مطالعه، کاربرد این مصالح در عرصه ساخت بررسی می‌شود.

• امکان به کارگیری دوریزهای مطالعه شده در راهسازی

میزان تراکم پسماندها برابر ۷۷ درصد بدست آمده است. مطابق مشخصات فنی عمومی راه‌های اصلی، کمترین درصد تراکم قابل قبول ۸۷ درصد می‌باشد و این یعنی عدد بدست آمده پایین‌تر از عدد ذکر شده در نشریه ۱۰۱ می‌باشد. با این حال درصد تراکم در محدوده مناسبی برای خاک ریزدانه به منظور استفاده در راه فرعی درجه دو است و برای کلیه قشرهای پایین‌تر از ۳۰ سانتیمتر بستر روسازی کاربرد خواهد داشت.

در این پژوهش عدد CBR بدست آمده برای مصالح مورد مطالعه در بازه ۳ تا ۷۹ می‌باشد که بطور میانگین برای ۱۰ ضربه تقریباً ۱۳، برای ۲۵ ضربه تقریباً ۲۵ و برای ۵۶ ضربه تقریباً ۲۷ بدست آمده است. طبق نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) می‌توان نتیجه گرفت که در بعضی از مناطق محل مورد مطالعه خاک دارای مقاومت کم می‌باشد ($CBR=3$) الی ($CBR=30$)، اما با بهسازی آن‌ها توسط تراکم سطحی یا تراکم با غلتک شرایط بهتری پیدا خواهند کرد و می‌توان از آن‌ها در خاک بستر استفاده کرد، همچنین این مصالح در دیگر مناطق محل مورد مطالعه دارای مرغوبیت بیشتر هستند که می‌توان در لایه زیراساس (حداقل $CBR=30$) استفاده کرد. مصالح مورد مطالعه برای ساخت لایه اساس (حداقل $CBR=80$) توصیه نمی‌شود.

• امکان به‌کارگیری دوریزهای مطالعه شده به عنوان مصالح ساختمانی

نتایج آزمایش لس آنجلس بر روی ۴ نمونه مختلف در جدول ۱۱ ارائه شده است. با توجه به جدول ۱۲ که براساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان حداکثر درصد ساینده‌گی و یا حداکثر مقدار کاهش وزن سنگدانه در آزمایش لس آنجلس سنگدانه‌ها را ۵۰ درصد در نظر گرفته است و با توجه به اینکه حداکثر درصد ساینده‌گی در این ۴ نمونه $34/72$ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که مصالح آزمایش شده از مرغوبیت خوبی برخوردار هستند و می‌توان از این مصالح در تهیه بتن برای ساخت ساختمان، دیوارهای حائل و سدهای بتنی استفاده کرد.

جدول ۱۱- خلاصه نتایج آزمایش لس آنجلس بر روی ۴ نمونه مورد مطالعه

شماره نمونه	1	2	3	4
درصد ساینده‌گی	32.2	26.32	34.72	26.63

جدول ۱۲- برخی از مشخصات الزامی سنگدانه‌های مصرفی در بتن (مطابق با جدول ۹-۱۰-۱۵ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و

نشریه ۲۳۴)

شرح	نوع سنگدانه	حداکثر مقدار مجاز	حداقل مقدار مجاز	شماره استاندارد ملی ایران برای روش آزمون مربوطه
میزان کاهش وزن در آزمایش لس آنجلس (درصد)	شن	۵۰	-	۴۴۸

در این پژوهش برای مصالح مورد مطالعه درصد تورق $31/55$ و درصد تطویل $14/19$ بدست آمده است با توجه به حداکثر میزان مجاز دانه‌های پولکی و سوزنی در سنگدانه‌های درشت مصرفی در بتن مطابق با جدول ۹-۱۰-۱۴ مقررات ملی ساختمان ایران و جدول ۱۳ می‌توان از این آزمایش نیز نتیجه گرفت که مصالح مورد مطالعه از مرغوبیت خوبی برخوردار هستند و میزان دانه‌های سوزنی و پولکی آن‌ها در حد مجاز می‌باشد.

جدول ۱۳- حداکثر میزان وجود دانه‌های پولکی و سوزنی در مخلوط آسفالتی و مخلوط بتنی بر اساس آیین نامه بتن ایران

نوع سنگدانه (از نظر شکل)		حداکثر وزنی مجاز (درصد)
دانه‌های پولکی	سنگدانه‌های مانده روی الک ۶۳ میلیمتر	۳۰
دانه‌های سوزنی	سنگدانه‌هایی با حداکثر قطر ۶۳ یا ۵۰ میلیمتر	۳۵
	سنگدانه‌هایی با حداکثر قطر ۲۵/۳۸ یا ۱۹ میلیمتر	۴۰
	سنگدانه‌هایی با حداکثر قطر ۱۲/۵ یا ۹/۵ میلیمتر	۴۵

• امکان به‌کارگیری پسماندهای مطالعه شده به عنوان پوشش‌های خاکی مدفن‌های زباله
 مشخصات مورد نیاز برای پوشش‌های خاکی مورد استفاده در مدفن‌های مهندسی - بهداشتی مطابق جدول ۱۴ است. با توجه به مصالح معرفی شده در جدول ۱۴ مصالح مورد مطالعه در این پژوهش برای پوشش‌های خاکی مناسب می‌باشند.

جدول ۱۴- موارد استفاده پوشش‌های خاکی در مدفن‌های مهندسی و بهداشتی (پاک، ۱۳۹۷)

پوشش‌های خاکی	مواد درشت‌دانه (شن و ماسه)	- پوشش روزانه - لایه‌های زهکش - لایه‌های جداکننده و محافظ
	مواد ریزدانه (رس و لای)	لایه‌های غیرقابل نفوذ در کف، جداره و روکش نهایی مدفن

• امکان به‌کارگیری دوریزهای مطالعه شده در ساخت اجزای سدهای خاکی و آب بندها
 در صورت لزوم می‌توان از این مصالح در تهیه اجزای مختلف سد استفاده کرد. هسته سدهای خاکی وظیفه آب‌بندی را به عهده دارد. مصالح مناسب برای هسته سد باید درصد دانه‌های عبوری از الک شماره ۲۰۰ حداقل ۱۵٪ باشد، شاخص خمیری خاک بهتر است بین ۱۰ تا ۲۰ باشد و مصالح ریزدانه در برابر واگرایی مقاوم باشند. در میان سه شرط بالا شرط اول یک شرط کلیدی و غیرقابل صرف‌نظر است. مصالح GC بهترین گزینه برای ساخت هسته سد هستند. زیرا علاوه بر سه شرط بالا، مقاومت برشی قابل توجهی هم دارد. پس از آن خاک‌هایی با طبقه بندی GM-GC، CL، SC و SM-SC نیز از وضعیت مناسبی برای استفاده در هسته سد برخوردار هستند (قنبری، ۱۳۹۳). مصالح مورد مطالعه شرط اول را دارا می‌باشند اما برای شرط دوم که شاخص خمیری کمتری دارند منبع ذکر شده توصیه کرده‌است که اگر عرض هسته ضخیم‌تر از حالت عادی در نظر گرفته‌شود و فیلترهای اطراف هسته با دقت بالاتر طراحی شود می‌توان از خاک با شاخص خمیری کمتر نیز در ساخت هسته سد استفاده کرد. این مصالح برای دیگر اجزای سدهای خاکی مناسب نمی‌باشند. برای استفاده از مصالح موجود در هسته سدهای خاکی لازم است کنترل‌های متعددی صورت پذیرد در این تحقیق صرفاً کنترل مربوط به دانه‌بندی صورت پذیرفته است، بدیهی است در صورتیکه این مصالح با هدف احداث سد خاکی به کار گرفته شود لازم است ده‌ها آزمایش دیگر از جمله آزمایش واگرایی انجام گیرد. در تحقیق حاضر انجام آزمایش واگرایی توسط pinhole انجام نشده است.

۷- مقایسه خصوصیات نخاله‌های ساختمانی کرج با دوریزهای مطالعه شده توسط سایر محققین

محققین گذشته نیز در پی پاسخ به این سوال بودند که آیا می‌توان از پسماندهای ساختمانی برای مصالح پروژه‌های عمرانی استفاده نمود یا خیر. در جدول ۱۵ مقایسه درصد ضایعات موجود در نخاله‌های ساختمانی مطالعه شده توسط محققین قبل و مطالعه حاضر نشان داده شده است.

جدول ۱۵- مقایسه درصد ضایعات موجود در نخاله‌های ساختمانی مطالعه شده توسط محققین قبل با مطالعه حاضر

درصد (%) ضایعات موجود در نخاله‌های ساختمانی										محققین	
آجر و بلوک	بتن و سنگدانه	مصالح بنایی و ملات	چوب	مصالح فلزی	پلاستیک	شیشه و سرامیک	آسفالت یا قیر	خاک	گچ		کاغذ و پشم سنگ و ...
	87					1.2	0.5	10.8		0.1	Cristelo et al. (2016)
	12		22	0	31	13			12	11	Sormunen and Karki (2019)
21	60	9	3	7	3	1.3					Islam et al.(2019)
8	36		49	4.5	0.13	0.35					Umar et al.(2020)
10.53	36.33		0.38			0.11		52.65			Ok et al.(2020)
10	35		2	2	2	6		45			Tavakoli et al.(2020)
3.85	8.39					0.23	3.01	84.49	0.125		مطالعه حاضر

اغلب مطالعات محققین قبلی (Tavakoli et al.(2020)، Ok et al.(2020) و Zhang et al. (2020)) نشان داده‌است که می‌توان از نخاله‌های ساختمانی در پروژه‌های عمرانی استفاده نمود. همچنین Islam et al.(2019) و Umar et al.(2020) به ترتیب در کشور بنگلادش و مالزی طبق مطالعات انجام شده خود در زمینه مدیریت پسماندهای ساختمانی به این نتیجه رسیده‌اند که مدیریت صحیح نخاله‌های ساختمانی و بازیافت آن‌ها می‌تواند کاهش قابل‌توجه انتشار CO_2 ، کاهش مصرف انرژی منابع طبیعی و کاهش حجم مدفن زباله را به دنبال داشته باشند. تحقیق حاضر نیز بنابر آنچه که در مطالب بالا اشاره گردید موید همین مسئله می‌باشد.

محققینی چون Leite et al.(2011) بر مبنای نتایج آزمایش سه محوری به این نتیجه رسیده‌اند که می‌توان از نخاله‌های ساختمانی در لایه زیرساخت جاده‌ای با ترافیک کم استفاده نمود. همچنین Zhang et al. (2020) در مطالعه خود توسط آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی مانند PLT، تراکم و... استفاده از نخاله ساختمانی برای ساخت بستر راهسازی در جاده‌های بزرگراه در چین را به دلیل داشتن تغییرشکل کمتر نسبت به خاک طبیعی توصیه کرده است. در مطالعه حاضر نیز با توجه به نتایج آزمایش

CBR و آزمایش SPT، PLT و سایش لس آنجلس طبق نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) می‌توان نتیجه گرفت که این مصالح به عنوان بستر راه ولایه زیر اساس برای جاده‌های با ترافیک کم در همان محل مورد مطالعه مناسب هستند و همچنین می‌توان از این مصالح در پروژه‌های راهسازی سایر مناطق دیگر استفاده کرد.

Cristelo et al. (2016) در مطالعه خود در رابطه با مسلح سازی نخاله‌های ساختمانی توسط ژئوسنتتیک پرداخته‌است و نتیجه‌گیری کرده است که وجود لایه ژئوسنتتیک باعث افزایش ظرفیت باربری نخاله‌های ساختمانی می‌شود. در این مطالعه عنوان شده است اگرچه سختی مصالح افزایش نیافته است ولی مسلح کننده توانسته روند کاهش سختی را به حداقل برساند. همچنین Tavakoli et al. (2020) در مطالعه خود به بررسی تقویت نخاله‌های ساختمانی با ژئوسل پرداخته‌اند. در این مطالعه عنوان شده‌است که تقویت نخاله‌های ساختمانی با ژئوسل رفتار این مصالح را به مصالح طبیعی نزدیک می‌کند و می‌توان از این مصالح در لایه‌های فرعی جاده به عنوان جایگزینی برای مصالح طبیعی استفاده کرد. در مطالعه حاضر نیز بر روی سه نمونه از نخاله‌های ساختمانی تقویت شده با ژئوگرید آزمایش برش مستقیم انجام شده‌است که نتایج حاکی از آن است که مصالح مسلح شده با ژئوگرید در مقایسه با مصالح بدون ژئوگرید دارای چسبندگی کمتر و زاویه اصطکاک داخلی بیشتری هستند.

برای بررسی تاثیر وجود خرده بتن در مقاومت برشی نخاله‌های ساختمانی مورد مطالعه، بر روی نمونه‌هایی آزمایش برش مستقیم در حالت با و بدون وجود خرده بتن انجام شده‌است. طبق نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد حداقل باید ۱۵٪ وزن کل مصالح مورد مطالعه، خرده بتن به پسماند ساختمانی اضافه شود تا زاویه اصطکاک داخلی را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد، اما برای افزایش چسبندگی وجود ۱۰٪ خرده بتن نیز تاثیر خود را بر روی نمونه خواهد گذاشت.

۸- نتیجه گیری

به منظور بررسی امکان به‌کارگیری پسماندهای ساختمانی در پروژه‌های ساخت و ساز، آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی متعددی انجام گردید. نتایج بدست‌آمده حاکی از آن است که پسماندهای ساختمانی می‌توانند در چرخه ساخت‌وساز به کارگرفته شوند و بر این اساس نقش موثری در کاهش هزینه و بهبود شرایط زیست محیطی داشته باشند. برخی از نخاله‌های ساختمانی دپو شده در منطقه حصار کرج دارای مقاومت کافی و مناسب برای استفاده مستقیم در پروژه‌های عمرانی را دارند، اما برای برخی دیگر که از مقاومت کمتری برخوردار هستند می‌توان با تسلیح توسط ژئوسنتتیک‌ها به نتیجه بهتری دست یافت. همچنین در صورت ترکیب خرده بتن با نخاله‌های ساختمانی شرایط آن‌ها برای استفاده در راهسازی و همچنین مواردی که نیاز به باربری بالایی وجود دارد، مهیا می‌شود. به طوریکه در این مطالعه با اضافه کردن حداقل ۱۵ درصد خرده بتن به پسماندهای موجود باعث شد که مقاومت چسبندگی تا دو برابر و زاویه اصطکاک داخلی تا ۸ درجه افزایش یابد.

پسماندهای ساختمانی موجود در حصار کرج قابلیت به‌کارگیری مستقیم در ساخت جاده‌های فرعی با ترافیک کم را دارند. علاوه بر این به عنوان مصالح بستر جاده‌های اصلی، مصالح کف‌سازی ساختمان‌ها، پوشش‌های خاکی مدفن‌های زباله، ساخت هسته

سدهای خاکی و همچنین به عنوان پی ساختمان شرایط لازم را دارند. اما باید خاطر نشان کرد که لازم است، مطالعات لازم در رابطه با اثر اشباع شدن این مصالح بر مقاومت آن‌ها در ادامه انجام شود زیرا ممکن است اشباع کامل این مصالح باعث تضعیف مقاومت آن‌ها شود. همچنین بررسی اثر ناهمگنی نخاله‌های ساختمانی موضوع پژوهش حاضر نبوده است بنابراین توصیه می‌شود این موضوع در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد زیرا ناهمگنی ممکن است باعث نشست نامتقارن گردد. خاک‌های مشکل‌آفرین یا خاک‌های مسئله‌دار در نخاله‌های ساختمانی اغلب شامل خاک‌های واگرا و رمبنده (فروریزی)، انحلال پذیر و تورم پذیر می‌باشند. بررسی شواهد کانی‌های رسی منطقه نشان می‌دهد که خاک‌های تورم پذیر، واگرا و فروریزی در میان نخاله‌های ساختمانی دیده نشده است با این حال در ارتباط با خاک‌های انحلال‌پذیر نیز لازم است تحقیقات بیشتری صورت پذیرد.

لازم به ذکر است به طور کلی بدیهی است اگر لازم باشد این مصالح به منظور استفاده در راهسازی یا ساختمان سازی یا سدسازی به کار گرفته شود لازم است آزمایش‌های تکمیلی که در طراحی سازه‌های یاد شده مورد نظر است نیز انجام شود.

منابع

- ۱- بیگدلو، سعیده، موسوی، حسن، معین‌الدینی، مظاهر، (۱۳۹۸)، "بررسی مقدار و ترکیب نخاله‌های ساختمانی کلانشهر کرج"، پژوهش و فناوری محیط زیست، دوره چهارم، شماره ۶، صفحه ۲۱-۳۰.
- ۲- پاک، علی، (۱۳۹۷)، "ژئوتکنیک زیست محیطی"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- ۳- قنبری، امیرمحمد، خاصی، مهدی، (۱۳۹۶)، "بازیافت نخاله‌های ساختمانی در ایران و جهان، روش‌ها و چشم‌اندازها"، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران.
- ۴- قنبری، علی، (۱۳۹۳)، "اصول مهندسی سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه خوارزمی.
- ۵- محمدی، علی، عادل، مهدی، (۱۳۹۵)، "بررسی روش‌های بازیافت پسماندهای ساختمانی از نخاله‌ها، در ساخت و ساز مجدد در شهرستان مسجد سلیمان"، کنفرانس بین‌المللی نوآوری در علوم و تکنولوژی.
- 6-Cristelo, Nuno, Castorina Silva Vieira, and Maria De Lurdes Lopes. 2016. "Geotechnical and Geoenviromental Assessment of Recycled Construction and Demolition Waste for Road Embankments." *Procedia Engineering* 143(Ictg):51–58. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.007.
- 7- Clayton, C. I. R., Matthews, M. C. and Simons, N. E.(1997), Site Investigation, second edition, Department of Civil Engineering, Surrey university.
- 8- Coduto , D.P.(2002) "Geotechnical Engineering –Principles and Practices", Prentice-Hall.
- 9- De Mello, V.F.B. (1971) 'The standard penetration test', *Proc. 4th PanAmerican Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, San Juan, Puerto Rico, Volume 1, pp. 1-86.
- 10-Islam, Rashidul, Tasnia Hassan Nazifa, Adhi Yuniarto, A. S. M. Shanawaz Uddin, Salmiati Salmiati, and Shamsuddin Shahid. 2019. "An Empirical Study of Construction and Demolition Waste Generation and Implication of Recycling." *Waste Management* 95:10–21. doi: 10.1016/j.wasman.2019.05.049.
- 11-Jin, Ruoyu, Bo Li, Tongyu Zhou, Dariusz Wanatowski, and Poorang Piroozfar. 2017. "An Empirical Study of Perceptions towards Construction and Demolition Waste Recycling and Reuse in China." *Resources, Conservation and Recycling* 126(April):86–98. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.07.034.
- 12- Leite, Fabiana Da Conceição, Rosângela Dos Santos Motta, Kamilla L. Vasconcelos, and Liedi Bernucci. 2011. "Laboratory Evaluation of Recycled Construction and Demolition Waste for Pavements." *Construction and Building Materials* 25(6):2972–79. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105.
- 13-Mohammadinia, Alireza, Arul Arulrajah, Hamed Haghighi, and Suksun Horpibulsuk. 2017. "Effect of Lime Stabilization on the Mechanical and Micro-Scale Properties of Recycled Demolition Materials." *Sustainable Cities and Society* 30:58–65. doi: 10.1016/j.scs. .2017. .01.004.
- 14-Ok, Bahadir, Talha Sarici, Tugrul Talaslioglu, and Abdulazim Yildiz. 2020. "Geotechnical Properties

of Recycled Construction and Demolition Materials for Filling Applications.” *Transportation Geotechnics* 24(June):100380. doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100380.

15- Oycshols, F and Kofoworola, S. 2009 , H.Gheewala Estimation of waste generation and management in Thailand. Waste management pages 731-738.

16-Roque, A. J., I. M. Martins, A. C. Freire, J. M. Neves, and M. L. Antunes. 2016. “Assessment of Environmental Hazardous of Construction and Demolition Recycled Materials (C&DRM) from Laboratory and Field Leaching Tests Application in Road Pavement Layers.” *Procedia Engineering* 143(Ictg):204–11. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.026.

17-Silva, R. V., J. de Brito, and R. K. Dhir. 2019. “Use of Recycled Aggregates Arising from Construction and Demolition Waste in New Construction Applications.” *Journal of Cleaner Production* 236:117629. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117629.

18- Skempton, A.W. (1986) ‘Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation’, *Géotechnique*, 36 (3), 425—447.

19- Sormunen, Petri, and Timo Kärki. 2019. “Recycled Construction and Demolition Waste as a Possible Source of Materials for Composite Manufacturing.” *Journal of Building Engineering* 24(March):100742. doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100742.

20- Tavakoli Mehrjardi, Gholamhosein, Alireza Azizi, Amanj Haji-Azizi, and Gholamreza Asdollahardi. 2020. “Evaluating and Improving the Construction and Demolition Waste Technical Properties to Use in Road Construction.” *Transportation Geotechnics* 23(September 2019):100349. doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100349.

21- Umar, Usman Aminu, Nasir Shafiq, and Farah Amira Ahmad. 2020. “A Case Study on the Effective Implementation of the Reuse and Recycling of Construction & Demolition Waste Management Practices in Malaysia.” *Ain Shams Engineering Journal* (xxxx). doi: 10.1016/j.asej.2020.07.005.

22- Vieira, Castorina Silva, and Paulo M. Pereira. 2015. “Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Geotechnical Applications: A Review.” *Resources, Conservation and Recycling* 103:192–204. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.07.023.

23- Zhang, Junhui, Fan Gu, and Yuqing Zhang. 2019. “Use of Building-Related Construction and Demolition Wastes in Highway Embankment: Laboratory and Field Evaluations.” *Journal of Cleaner Production* 230:1051–60. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.182.

24-Zhang, Junhui, Le Ding, Feng Li, and Junhui Peng. 2020. “Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes as Alternative Filling Materials for Highway Subgrades in China.” *Journal of Cleaner Production* 255:120223. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120223.