

ساخت خشت فشردۀ با استفاده از پسماندهای ریشه فرش و تقویت آن با پایدارکننده

نسیم کارگر*، علی شفاعت**، سهراب ویسه***

تاریخ دریافت مقاله:

۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۴۰۲/۰۲/۲۰

چکیده

بلوک خاک فشردۀ، ارزان بوده، برای تهیه آن از منابع محلی استفاده می‌شود و به‌منظور کسب مقاومت کافی، به‌جای پخته شدن تحت فشار بالا قرار گرفته، فشردۀ سازی و متراکم می‌شود، به همین دلیل نسبت به دیگر مصالح ساختمانی از انرژی نهفته کمتری برخوردار است. یکی از معایب بلوک خاک فشردۀ برای اینکه به‌عنوان سیستم باربر (یا جزئی از آن) در ساختمان استفاده شود، مقاومت کم آن است. بسیاری از راهکارهایی که در سال‌های اخیر برای افزایش مقاومت بلوک‌های خاکی ارائه شده است، پایداری بلوک‌های خاک فشردۀ را خدشه‌دار می‌کند. این مسئله که بتوان از زباله‌ها و ضایعات تولیدی الیاف تولید کرده و در ساخت و تقویت بلوک‌های خاکی از آن‌ها استفاده کرد، علاوه بر بهبود عملکرد بلوک‌های خاکی می‌توان بخشی از زباله تولیدی را به شیوه‌ای پایدار مورد استفاده قرار داد. در این پژوهش از الیاف ضایعات صنعتی ریشه فرش (با درصدهای ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰)، به‌منظور تقویت بلوک‌های خاک فشردۀ استفاده شد و برخلاف عمده پژوهش‌ها، تنها از آهک هیدراته سنتی (۴ درصد جرمی خاک) به‌عنوان تثبیت‌کننده استفاده شده است (چراکه سیمان پرتلند منجر به افزایش هزینه و اثرهای زیست‌محیطی خواهد شد). در این پژوهش، ترکیبات در فرم اصلی بلوک (نه نمونه مکعبی یا استوانه‌ای)، مورد آزمون قرار گرفتند و نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نشان داد که وجود آهک در بلوک خاک فشردۀ تأثیر مثبت داشته و منجر به افزایش مقاومت بلوک در تمامی ترکیبات خواهد شد و حضور ۲/۰ درصد الیاف (ریشه فرش) می‌تواند عملکرد بلوک خاک فشردۀ را بهبود بخشد. حضور الیاف علاوه بر تغییراتی که در مقاومت فشاری و خمشی نهایی بلوک ایجاد می‌کند باعث کاهش تردی و شکنندگی بلوک شده و در بلوک‌های خاک فشردۀ مانند پل در بین ترک‌ها عمل کرده و باعث می‌شود بلوک وارد مرحله سخت‌شوندگی شده و دچار تغییر شکل دائمی شود تا مانع فروپاشی ناگهانی و بدون اخطار بلوک‌ها شود.

کلمات کلیدی: بلوک خاک فشردۀ، الیاف ضایعات ریشه فرش، تثبیت‌کننده، تقویت بلوک خاکی.

* کارشناس ارشد فناوری معماری، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

** استادیار، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. a_shafaat@sbu.ac.ir

*** استادیار، بخش مصالح ساختمانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران.

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول است.

مقدمه

در گذشته به منظور ساخت و ساز در مناطق گرم و خشک (نظیر استان یزد) به دلیل عدم دسترسی به منابع سنگ و چوب و وفور خاک، از خشت و آجر تهیه شده از خاک محل خاک برداری بنا استفاده می شد. به تدریج به دلیل دوام و مقاومت کم این مصالح در مقایسه با تکنولوژی های جدید، استفاده از آن ها به عنوان مصالح ساختمانی کاهش قابل ملاحظه ای یافت. در سال های اخیر به دلیل اهمیت تکنولوژی های غیرآلاینده و معماری پایدار به منظور دستیابی به سازگاری و هماهنگی با محیط زیست، بهبود آب و هوا، جلوگیری از اتلاف انرژی و همچنین جلوگیری از آثار منفی ساخت و ساز بر محیط زیست، تولید مصالح ساختمانی در دسترس، بوم آورد، ارزان قیمت، بازگشت پذیر و پایدار بسیار اهمیت پیدا کرده است (Ambers, 2017; Wachira, 2018).

بلوک خاک فشرده (Compressed Earth Block (CEB)) به عنوان مصالح ارزان قیمت، پایدار، قابل بازیافت و با کمترین میزان پردازش و آلاینده، گزینه مناسبی برای استفاده در صنعت ساختمان است. بلوک خاک فشرده که از خاک با مقداری رطوبت و در برخی موارد، افزودنی یا مقدار نسبتاً کمی تثبیت کننده (در اکثر موارد سیمان) تشکیل شده است، درواقع مصالح بهبود و تغییر یافته خشت است و برخلاف آجر که با استفاده از پختن خاک به وجود می آید، از روش فشرده سازی مکانیکی به صورت دستی یا هیدرولیکی به وجود می آید. درواقع تفاوت آن با آجر در فرایند تولید آن است که تحت فشار زیاد متراکم شده و به آن برای افزایش قدرت و دوام، تثبیت کننده و در برخی موارد الیاف اضافه می شود. این بلوک ها را می توان در کارگاه ساختمانی محلی تولید کرد تا

هزینه های حمل و نقل کاهش یابد. این بلوک ها در مقایسه با آجر (خشت پخته شده) و بلوک بتنی پروسه تولید ساده تر و سریع تری دارند و از انرژی نهفته کمتری برخوردار هستند.

در سال های اخیر تحقیقات مربوط به مصالح خاکی به طور چشمگیری توسعه یافته است، اما هنوز هم تولید مصالح خاکی به جای روش ها و استانداردهای دقیق، بر اساس تکنیک های سنتی و تجربه فردی است. به منظور گسترش استفاده از بلوک های خاک فشرده در ساختمان سازی، لازم است تکنیک های تولید بهبود یابد تا بلوک هایی با کیفیت بهتر و با هزینه کمتر تولید شوند؛ همچنین مصالح خاکی سنتی همیشه استحکام و مقاومت کمی چه از لحاظ فشاری و چه به لحاظ کششی داشته اند (Jesudass et al., 2021) که لازم است برای به کارگیری مجدد آن ها، این نقص ها برطرف شوند تا پاسخگوی نیازهای بشر امروز باشند.

در طول تاریخ بشریت، بشر همواره زباله تولید کرده است، بنابراین مدیریت پسماند جامد موضوع جدیدی نیست، آنچه تغییر کرده انواع و مقدار زباله های تولید شده است. امروزه دفع ضایعات صنعتی چالش بزرگی برای جوامع بشری است و این مسئله که بتوان از زباله ها و ضایعات تولیدی الیاف تولید کرد و در ساخت و تقویت بلوک های خاکی از آن ها استفاده کرد، علاوه بر بهبود عملکرد بلوک های خاکی، می توان بخشی از زباله تولیدی را به شیوه ای پایدار دفع کرد. استان یزد یکی از تولیدکنندگان فرش دستباف در سطح کشور است. به ازای تولید هر فرش دستباف در این صنعت، مقدار زیادی ضایعات ریشه فرش تولید می شود. نخ های ریشه فرش معمولاً گران قیمت هستند و زمانی که ریشه به طور یکنواخت و مرتب برش داده می شود مقدار زیادی از این نخ های گران قیمت به عنوان

رفتار بلوک خاک فشرده چگونه است؟

- آهک چه تأثیری بر میزان تغییر شکل بلوک‌های خاکی پیش از فروپاشی خواهد گذاشت؟

ادبیات موضوع

مصالح خاکی سستی همیشه استحکام و مقاومت کمی چه از لحاظ فشاری و چه به لحاظ کششی دارند. راه‌های متعددی برای تقویت خاک شامل استفاده از افزودنی‌ها (شامل تثبیت‌کننده‌ها، الیاف طبیعی و مصنوعی، پسماندهای صنعتی و ...)، کنترل میزان تراکم خاک، کنترل رطوبت خاک و ... وجود دارد که بسیاری از آن‌ها همچنان در دست تحقیق و بررسی است. تثبیت خاک با افزودن ماده‌ای دیگر به منظور افزایش دوام آن، از دهه ۱۹۲۰ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است و منجر به افزایش انسجام خاک، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام آن خواهد شد (Adam & Agib, 2001). در حال حاضر تثبیت و تقویت بلوک‌های خاک فشرده با سیمان پرتلند بسیار رایج است. در جدول شماره ۱، چند پژوهش که در آن‌ها از سیمان به منظور تثبیت و تقویت خاک استفاده شده است به همراه درصد سیمان مورد استفاده و نتایج آزمون‌های انجام شده در پژوهش، ارائه شده است.

با بررسی نتایج پژوهش‌های پیشین که در آن‌ها از سیمان به عنوان تثبیت‌کننده استفاده شده است، می‌توان مشاهده کرد که سیمان در اکثر موارد موجب بهبود عملکرد بلوک‌های خاک فشرده می‌شود؛ اما نکته‌ای که در سیمان قابل تأمل است این است که، استفاده از سیمان پرتلند به عنوان تثبیت‌کننده در بلوک خاک فشرده، منجر به افزایش هزینه و آثار زیست‌محیطی بلوک‌های خاک فشرده می‌شود. چندین پژوهش برهم‌کنش بین آهک و خاک را نیز مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند. کاملاً قابل درک است که

اضافات برش داده شده و به عنوان ضایعات و زباله شناخته می‌شوند. این پژوهش قصد دارد تا با استفاده از اضافات بریده شده از ریشه فرش که دورریز بوده و غیرقابل استفاده هستند و به عنوان ضایعات شناخته می‌شوند، در مصالح ساختمانی موردنظر (بلوک خاک فشرده)، بخشی از این زباله تولید شده را به گونه‌ای پایدار دفع کند.

این پژوهش قصد دارد ضمن مطالعه خواص فیزیکی، مکانیکی و رفتار بلوک‌های خاک فشرده، جزئیات فنی و تکنیک‌هایی برای تولید بلوک‌های خاکی با کیفیت بهتر ارائه داده و موادی همچون آهک و الیاف پسماندهای صنعتی را به طرح اختلاط بلوک اضافه کند، تا علاوه بر دفع مواد زائد صنعتی ریشه فرش از طبیعت، در صورت امکان به مصالحی پایدار، مقرون به صرفه و با درون‌مایه سستی اما به مراتب با کیفیت، دوام و مقاومت بالاتر برسد و بستری برای استفاده از مصالح سستی و پایدار که رفته رفته با صنعتی شدن و روی کار آمدن تکنولوژی‌های جدید مورد بی‌توجهی قرار گرفته است، فراهم کند. در پژوهش‌های پیشین در بررسی خواص مکانیکی اعم از مقاومت فشاری و خمشی، از نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی استفاده شده است، حال آنکه در ساختمان‌سازی از این چنین فرم‌هایی کمتر استفاده می‌شود. از آنجایی که فرم بلوک‌های خاک فشرده تأثیر بسزایی بر مقاومت مکانیکی آن‌ها دارد، در این پژوهش تلاش شد تا نمونه‌ها با فرم کاربردی در ساختمان‌سازی مورد آزمایش قرار گیرند.

در نهایت هدف این پژوهش یافتن پاسخ سؤالات زیر است:

- آیا می‌توان با استفاده از الیاف ضایعات صنعتی ریشه فرش، عملکرد بلوک‌های خاک فشرده را بهبود بخشید؟
- تأثیر آهک در ترکیب با الیاف صنعتی ریشه فرش بر

آهک منجر به بهبود استحکام، مقاومت و جذب آب خاک می‌شود (Croft, 1967, 1968).

ج ۱. پژوهش‌های انجام‌شده بر روی درصد‌های متفاوت سیمان

منبع	مقدار رس (%)	PI (%)	میزان فشار اعمال‌شده (MPa)	مقدار سیمان (%)	مقاومت فشاری خیس (MPa)	مقاومت فشاری خشک (MPa)	مقدار جذب آب (%)
Walker & (Stace, 1997)	۹	۱۰	۴	۵	۱/۶	۳/۶۷	۱۴/۶
	۹	۱۰		۱۰	۳/۲	۷/۱۱	۱۳/۱
	۴۰	۳۵		۵	۰/۳	۰/۳	۲۷/۳
	۴۰	۳۵		۱۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۲۵/۹
Blight, (1994)	۱۲	-	۱۰	۰	-	۰/۹	-
				۴	-	۴/۱۷	۴/۲
				۶	-	۴/۲	۲/۷۵
				۸	-	۷/۹۳	۲/۷۲
Guettala et (al., 2002)	۱۸	۱۴	۱۵	۵	۹	۱۵/۴	۸/۲۷
				۸	۱۲/۷	۱۸/۴	۷/۳۵
(Pave, 2007)	-	-	۱۰	۵	۳/۱	۶/۱	-
				۷	۴/۸	۸/۲	-
				۱۰	۹	۱۳/۶	-

تاریخی‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد در گذشته دور از الیاف طبیعی مانند کاه و موی اسب برای تقویت مصالح خاکی برای جلوگیری از ترک‌های ناشی از خشک شدن و بهبود مقاومت کششی استفاده شده است (Prasad, Nambiar & Abraham, 2012).

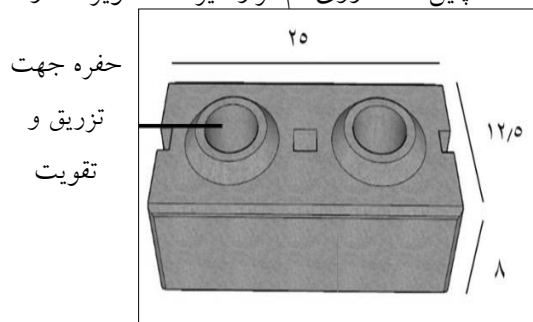
پژوهش‌های زیادی بر روی استفاده از الیاف طبیعی در بلوک خاک فشرده انجام شده است، به‌عنوان مثال، لایبی^۱ و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر طول الیاف گیاهی کنف را بر ویژگی مکانیکی و حرارتی بلوک‌های خاک فشرده، موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که می‌توان ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی بلوک‌های CEB را با افزودن الیاف بهبود بخشید. البته در این پژوهش به این مسئله نیز اشاره شد که این رفتار لزوماً همراه با بهبود استحکام خمشی نیست.

آکبولوت، آراسان و کالکان^۲ (۲۰۰۷) استفاده از الیاف مواد ضایعاتی نظیر ضایعات تایر، پلی پروپیلین و پلی اتیلن در خاک را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که این مواد، مقاومت و رفتار دینامیکی خاک را بهبود می‌بخشد. آرجی^۳ و همکاران (۲۰۱۱) ویژگی‌های

به‌تازگی تحقیقات زیادی بر روی تقویت خاک با استفاده از الیاف انجام شده است (Akbulut et al., 2007). با افزودن الیاف به ترکیبات مصالح خاکی می‌توان به‌طور چشمگیری باعث کاهش جمع‌شدگی غیرالاستیک و ترک‌خوردگی بلوک‌های خاک فشرده شد و همچنین سختی آن‌ها را نیز افزایش داد (Hejazi et al., 2012). اگرچه افزودن الیاف در مواردی تأثیر منفی بر مقاومت مصالح خاکی (خصوصاً مقاومت فشاری) گذاشته است (Prasad, Nambiar & Abraham, 2012)، بلوک‌های خاکی تقویت‌شده با الیاف از نمونه‌های فاقد الیاف از شکل‌پذیری بیشتری برخوردار بوده و با جذب انرژی می‌تواند در برابر بارهای بیشتری مقاومت کرده و برای استفاده در مناطق زلزله‌خیز بادوام‌تر است (Prasad, Nambiar & Abraham, 2012). به‌طورکلی الیاف‌ها را می‌توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی دسته‌بندی کرد. الیاف طبیعی از مواد طبیعی با منشأهای حیوانی، گیاهی و یا معدنی تولید می‌شوند. این در حالی است که الیاف مصنوعی دارای منشأ غیرطبیعی و ساخت انسان هستند. شواهد

۱۵ درصد وزن آنها بیشتر شود.

بلوک تولیدشده در این پژوهش از نوع Rhino Block است (Ambers, 2017) که دارای حفره‌ای در وسط به منظور تزریق و تقویت هستند، همچنین در دو طرف بلوک نیز شیارهایی تعبیه شده تا در ارتباط با بلوک کناری حفره‌ای جهت تزریق و تقویت ایجاد شود. در بالا و پایین بلوک برآمدگی و فرورفتگی‌ای به صورت نر و ماده تعبیه شده تا بلوک‌ها بتوانند به صورت خشکه‌چین کاملاً روی هم قرار گیرند (تصویر شماره ۱).



ت ۱. Rhino Block. (ابعاد بر اساس سانتی متر است)

از آنجایی که فرم بلوک‌های خاک فشرده تأثیر بسزایی بر مقاومت مکانیکی آنها دارد، در این پژوهش نمونه‌ها با فرم Rhino Block مورد بررسی خواص مکانیکی اعم از مقاومت فشاری و خمشی قرار گرفتند.

روش تحقیق

هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد بلوک‌های خاک فشرده با ترکیبات مختلف است. بدین جهت نمونه‌های بلوک‌های خاک فشرده با ترکیبات مختلف ساخته شدند و سپس تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی قرار گرفتند.

مواد و مصالح مورد نیاز

خاکی که در این پژوهش به عنوان ماده پایه در بلوک خاک فشرده مورد استفاده قرار گرفته است از منطقه علی‌آباد شهر اردکان استان یزد، از عمق ۰/۵ تا ۱/۵ متر

فیزیکی بلوک CEB که با استفاده از پسماندهای پلاستیکی تقویت شده‌اند را با CEB تقویت نشده مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تقویت با پسماندهای پلی‌اتیلن مقاومت را به اندازه ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد. بینچی، آکسوغان و شاه^۴ (۲۰۰۵) ویژگی‌های مکانیکی خاک ترکیب‌شده با الیاف مواد زائد به همراه تثبیت‌کننده‌ها را مورد بررسی قرار دادند و به نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری خاک ترکیب‌شده با الیاف مواد زائد، افزایش می‌یابد و از میان سه نوع الیاف کاه، پلاستیک و پلی‌استایرن، پلاستیک بیش از دو مورد دیگر مقاومت فشاری خشت را افزایش می‌دهد.

مقایسه نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و خمشی سه نقطه‌ای پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که برخلاف مطالبی که من باب ارتباط مستقیم این دو مؤلفه در برخی از پژوهش‌ها ذکر شده است، می‌توان مشاهده کرد که لزوماً این ارتباط مستقیم وجود ندارد. تحقیقات متعددی بر روی تأثیر طرح اختلاط و تأثیر مواد افزودنی مختلف و مقدار آنها بر رفتار بلوک خاک فشرده انجام شده است. از طرف دیگر، روش‌های اندازه‌گیری خصوصیات مکانیکی بلوک‌های خاکی نیز توسط محققان تعیین شده است. استانداردهای مختلفی نیز در رابطه با خصوصیات مکانیکی بلوک خاک فشرده تدوین شده است. میانگین حداقل مقاومت فشاری مصالح بنایی خاکی در اکثر قوانین ساختمانی ایالات متحده آمریکا، مانند استاندارد مصالح ساختمانی نیومکزیکو ۲/۰۷ مگاپاسکال است (Bureau, 1991) و حداقل مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مصالح خاکی، در استاندارد مصالح ساختمانی نیومکزیکو ۰/۳۵ گزارش شده است (Bureau, 1991). همچنین طبق استاندارد IS:3495 (بخش دوم) ۱۹۷۶ میانگین جذب آب بلوک‌ها نباید از

از سطح زمین، استخراج شده است. باید توجه داشت که خاک مورد استفاده باید عاری از هرگونه مواد آلی باشد. خاک برداشت شده حاوی مقدار زیادی ذرات بزرگ‌تر از یک سانتی‌متر است. بنابراین لازم است تمام خاک مورد نظر پیش از استفاده، با استفاده از دستگاه خردکن، خرد شود تا از الک شماره ۴ عبور کند. به همین دلیل در این پژوهش آزمون دانه‌بندی که با

استفاده از عبور از الک‌های شماره ۴، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ انجام می‌شود، دیگر بی‌معنا است. بنابراین استاندارد ۱۱۶۲ ملی ایران (استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۶۲: خاک - خاک رس جهت ساخت آجر رسی - ویژگی و روش آزمون، ۱۳۷۶) و استانداردهای ASTM مربوطه، مبنای کار قرار گرفت. خلاصه نتایج به‌دست آمده در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

ج ۲. خصوصیات فیزیکی خاک

خصوصیات فیزیکی	
پارامتر	مقدار
حد روانی (%)	۲۵/۶
حد خمیری (%)	۲۱/۵
نشانه خمیری (%)	۴/۱
مانده روی الک مش ۱۰۰ (%)	۳/۷۹

در این پژوهش سعی شد تنها از ۴ درصد پودر آهک هیدراته سستی (شکفته) که به‌صورت کارگاهی با اضافه کردن مقدار کمی آب به آهک زنده به دست آمد، به‌منظور تثبیت خاک در ترکیبات استفاده شود. به‌منظور انجام تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای، تمام ترکیبات تولیدی با آهک، با همان ترکیبات بدون آهک نیز تولید شد.

باتوجه به اینکه بسته به نوع خاک مورد استفاده، میزان آب بهینه مورد نیاز برای تولید بلوک متفاوت است و خاک در هر پژوهش می‌تواند منحصربه‌فرد باشد و رفتاری متفاوت از خود نشان دهد، به همین منظور در این پژوهش نمونه‌هایی با ترکیبات خشک مشابه (درصد آهک و الیاف و مقدار خاک مشابه) و با درصدهای جرمی متفاوت آب (۵ درصد، ۷ درصد، ۱۰ درصد و ۱۳ درصد) تولید شد و مورد مقایسه قرار گرفت تا درصد بهینه آب در نمونه‌ها باتوجه به نوع خاک مورد استفاده در این پژوهش، مشخص شود. با مقایسه نمونه‌های تولید شده، بلوک با ۱۰ درصد آب از مقاومت اولیه خوبی بهره‌مند بوده و خاک ترکیب شده با آب (پیش از تولید بلوک) از میزان رطوبت خوبی نیز

بهره‌مند بود. همچنین باتوجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از تحقیقات پیشین، آزمون سقوط نیز برای درصدهای جرمی متفاوت آب اضافه شده به خاک (۵ درصد، ۷ درصد، ۱۰ درصد و ۱۳ درصد) انجام شد و نتایج نشان داد که ۱۰ درصد جرمی آب، محتوای آب مناسب برای فشرده‌سازی خاک مورد نظر است و بدین ترتیب در این پژوهش درصد بهینه آب مورد نیاز برای تولید بلوک‌های خاک فشرده ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. این میزان رطوبت هنگام استفاده از تثبیت‌کننده شیمیایی اندکی تغییر می‌کند (۱٪+ برای تثبیت‌کننده آهک) (Houben & Guillaud, 1995).

الیاف ریشه‌های فرش که مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها عمدتاً ترکیب پلی‌استر و پنبه است، به قطعاتی به طول ۳ سانتی‌متر برش داده شدند تا به‌عنوان الیاف مورد استفاده قرار گیرند. مقدار الیاف به دلیل جرم حجمی کم این مواد، ۰/۰۵ درصد، ۰/۱ درصد و ۰/۰۲ درصد جرمی مجموع جرم اقلام خشک ترکیب است. به‌منظور انجام تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای، تمام ترکیبات تولیدی با الیاف، با همان ترکیبات بدون

X درصد الیاف ضایعات ریشه فرش را نشان می‌دهد. برای مثال، نمونه LM-Y0.02 نمونه حاوی ۴ درصد آهک و ۰/۰۲ درصد الیاف ریشه فرش است. جدول شماره ۳، نام نمونه‌ها و فرمولاسیون ترکیبات آن‌ها را نشان می‌دهد.

ج ۳. نام نمونه‌ها و فرمولاسیون ترکیبات آن‌ها

نام نمونه	آب (%)	آهک (%)	الیاف (%)	خاک (kg)
PM	۱۰	۰	۰	۴
PM-Y0.05	۱۰	۰	۰/۰۵	۳/۹۹۸
PM-Y0.1	۱۰	۰	۰/۱	۳/۹۹۶
PM-Y0.2	۱۰	۰	۰/۲	۳/۹۹۲
LM	۱۱	۴	۰	۳/۸۴۰
LM-Y0.05	۱۱	۴	۰/۰۵	۳/۸۳۸
LM-Y0.1	۱۱	۴	۰/۱	۳/۸۳۶
LM-Y0.2	۱۱	۴	۰/۲	۳/۸۳۲

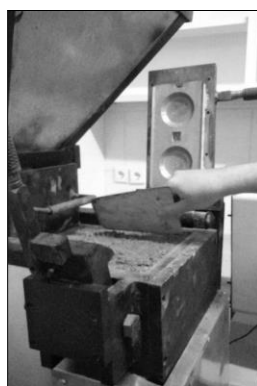
الیاف نیز تولید شد. مشابه پژوهش فرانسوی^۵ و همکاران (۲۰۲۱) نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت PM(LM)- Yx است. که در آن PM (Plain Mortar) به معنی ملات ساده خاک و فاقد آهک و LM (Lime Mortar) به معنی ملات خاک و ۴ درصد آهک است و

بستگی دارد (Wachira, 2018). دستگاهی که در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است، برای ساخت بلوک‌های خاکی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه به صورت هیدرولیکی ترکیباتی که در قالب ریخته می‌شود را تحت فشاری از ۸۵ بار (۸/۵ مگاپاسکال) تا ۱۶۰ بار (۱۶ مگاپاسکال) (فشار زیاد تا خیلی زیاد) (Organisation, 1996) فشرده می‌کند. تصویر شماره ۳-الف، شیوه پر کردن قالب از ترکیبات برای تولید بلوک خاک فشرده و تصویر شماره ۳-ب، بلوک تولیدشده را نشان می‌دهد.

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بلوک خاک فشرده در داخل آزمایشگاه و در دمای اتاق (به منظور جلوگیری از تابش مستقیم نور خورشید و از دست دادن رطوبت) همه اجزا روی یک سطح صاف و غیرقابل نفوذ مانند نایلون با هم ترکیب می‌شوند، این ترکیبات فشرده شده و بلوک خاکی با چگالی و مقاومت کافی و با میزان تخلخل و جذب آب کم حاصل می‌شود (Head, 1980). فشرده‌سازی بلوک خاک فشرده به دو شیوه دستی (با استفاده از اهرم) و هیدرولیکی انجام می‌شود و میزان فشار اعمال‌شده نیز به نوع دستگاه

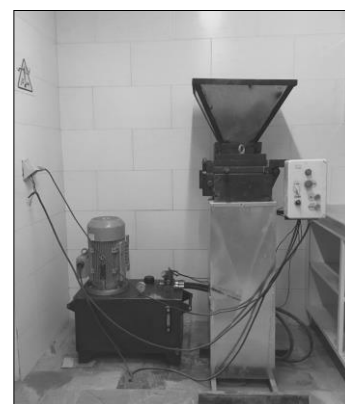


ب



الف

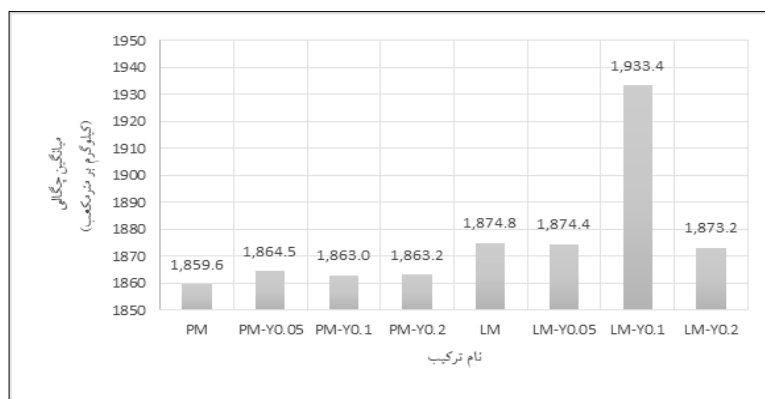
ت ۳. الف- ریختن ترکیبات در قالب؛ ب- بلوک تولیدشده با دستگاه پرس



ت ۲. دستگاه پرس بلوک

نامحسوس است، اما در ترکیبات حاوی تثبیت کننده آهک، مقدار چگالی بلوک افزایش می یابد. دلیل این امر را می توان به تشکیل ماده سنگین و چگال نسبت داد. به منظور حفظ رطوبت درونی نمونه ها، در ۴ روز اول، بلوک ها را زیر نایلون نگهداری کرده و به مدت ۴ روز روی سطح آن ها آب اسپری می کنیم (Ambers, 2017; Pringle, 2016). عمل آوری بلوک ها لازم است ۲۸ روز متوالی انجام شود (Krosnowski, 2011).

باتوجه به پژوهش آدام و اجیب^۶ چگالی بلوک های خاک فشرده تثبیت شده در بین ۱۷۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پذیرفته است (Adam & Agib, 2001). باتوجه به تصویر شماره ۴، چگالی تمامی نمونه های ساخته شده در این پژوهش (اعم از تثبیت شده و تثبیت نشده) در فاصله ذکر شده قرار گرفته و رضایت بخش است. همان طور که در نمودار میله ای قابل مشاهده است، اثر محتوای الیاف بر چگالی



ت ۴. مقایسه چگالی بلوک با ترکیبات مختلف

طی بارگذاری گيجی به منظور اندازه گیری میزان جابه جایی بلوک در هنگام بارگذاری، بر روی صفحه پایینی جک نصب می شود تا در نهایت بتوان نمودار تنش - کرنش را برای هر نمونه ترسیم کرد (تصویر شماره ۵-ب).

آزمون خمش سه نقطه ای (مدول گسیختگی، مقاومت کششی غیرمستقیم)

هدف از آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای، بررسی تأثیر افزودنی ها شامل آهک و الیاف ریشه فرش بر مقاومت خمشی و همچنین بررسی مقاومت کششی بلوک های خاک فشرده به صورت غیرمستقیم است. باتوجه به عدم وجود اطلاعات مناسب از مشخصات آزمون خمش در استانداردهای مصالح ساختمانی خاکی موجود و بر اساس توصیه مراجع مربوطه

آزمون

در این پژوهش، نمونه ها پس از گذشت ۲۸ روز طبق استاندارد ASTM D5102 مورد آزمایش قرار گرفتند.

آزمون مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM D5102 (Elahi et al., 2020) با دستگاه تست مقاومت فشاری که در تصویر شماره ۵-الف نشان داده شده است، به منظور بررسی استحکام و مقاومت بلوک ها و همچنین بررسی تأثیر افزودنی ها شامل آهک و الیاف ریشه فرش بر مقاومت فشاری بلوک های خاک فشرده، انجام می شود. در طی انجام آزمون مقاومت فشاری، سرعت اعمال بار دستگاه بر روی تمامی بلوک ها ثابت در نظر گرفته می شود. حداکثر مقاومت فشاری (حداکثر تنش) با تقسیم حداکثر بار بر مساحت محاسبه می شود.

فاصله دو پایه (نقطه) نگه‌دارنده $L = (m)$

عرض نمونه $b = (mm)$

ضخامت نمونه $d = (mm)$

یافته‌ها

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌های شرح داده‌شده در قسمت قبل پرداخته شده و در جدول شماره ۴ نمایش داده شده است.



ت ۶. دستگاه آزمون خمش سه نقطه‌ای



ب



الف

ت ۵. الف- دستگاه سنجش مقاومت فشاری؛ ب- نمایش گیج نصب‌شده بر روی جک اعمال بار دستگاه به‌منظور اندازه‌گیری میزان کرنش بلوک

ج ۴. نمایش میانگین مقاومت فشاری و خمشی بلوک‌های خاک فشرده

میانگین مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال	میانگین مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال	درصد الیاف	نام نمونه	نوع الیاف	
۰/۶۰	۵/۰۴	۰	PM	فاقد الیاف	فاقد تثبیت‌کننده آهک
۰/۵۸	۵/۵۷	۰/۰۵	PM-Y0.05	الیاف ریشه فرش	
۰/۵۵	۷/۲۸	۰/۱	PM-Y0.1		
۰/۶۶	۵/۷۳	۰/۲	PM-Y0.2		
۰/۸۳	۹/۲۵	۰	LM	فاقد الیاف	حاوی ۴ درصد تثبیت‌کننده آهک
۰/۸۹	۹/۸۹	۰/۰۵	LM-Y0.05	الیاف ریشه فرش	
۰/۷۲	۱۰/۷۱	۰/۱	LM-Y0.1		
۰/۹۴	۱۰/۵۲	۰/۲	LM-Y0.2		

ترکیب مشابه و فاقد آهک، بیشتر است. به‌طوری‌که به‌طور میانگین مقاومت فشاری ترکیبات حاوی آهک ۷۱ درصد از مقاومت فشاری ترکیبات فاقد آهک بیشتر است. همچنین با توجه به نمودار می‌بینیم که از میان ترکیبات فاقد تثبیت‌کننده و با درصدهای متفاوت الیاف ریشه فرش (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد الیاف

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین ترکیب از نظر مقاومت فشاری، به مقایسه مقاومت فشاری ترکیبات مختلف می‌پردازیم. با توجه به تصویر شماره ۷، می‌توان مشاهده کرد که همواره متوسط مقاومت فشاری بلوک‌های حاوی تثبیت‌کننده آهک از متوسط مقاومت فشاری بلوک‌ها با

(Code, 2009; Zealand, 1998; Standard, 2010)،

آزمون خمش طبق استاندارد ASTM C78 انجام شد

(ASTM, 2010). تصویر شماره ۶، دستگاه آزمون

خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

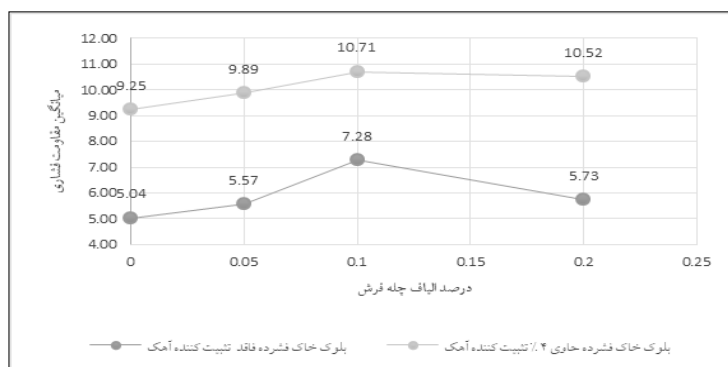
با استفاده از روابط زیر می‌توان مقاومت خمشی هر

$$\sigma_e = \frac{3FL}{2bd^2}$$

نمونه را به‌صورت مجزا به دست آورد: $F = (N)$ نیروی اعمال‌شده توسط بازوی متحرک

درصد الیاف ریشه فرش اختصاص دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیبات حاوی ۰/۱ درصد الیاف ریشه فرش چه در ترکیبات حاوی تثبیت‌کننده آهک و چه در ترکیبات تثبیت‌کننده آهک، به لحاظ مقاومت فشاری بهترین عملکرد را دارند و مقاومت فشاری بلوک خاک فشرده را نسبت به حالت بدون الیاف به‌طور میانگین ۲۶ درصد، افزایش می‌دهد.

ریشه فرش به‌طور قابل‌توجهی از متوسط مقاومت فشاری دیگر ترکیبات بیشتر است و در میان ترکیبات حاوی تثبیت‌کننده و با درصدهای متفاوت الیاف ریشه فرش، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰/۲ و ۰/۱ درصد الیاف ریشه فرش به‌طور قابل‌توجهی از مقاومت فشاری دیگر ترکیبات بیشتر است و از میان این دو ترکیب، بیشترین میزان متوسط مقاومت فشاری به نمونه‌های حاوی ۰/۱



ت ۷. مقایسه مقاومت فشاری بلوک خاک فشرده حاوی و فاقد تثبیت‌کننده

آهک و درصدهای متفاوت الیاف

متوسط مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش به‌طور قابل‌توجهی از متوسط مقاومت خمشی دیگر ترکیبات بیشتر است و در میان ترکیبات حاوی تثبیت‌کننده و با درصدهای متفاوت الیاف ریشه فرش نیز، متوسط مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش به‌طور قابل‌توجهی از متوسط مقاومت خمشی دیگر ترکیبات بیشتر است.

تأثیر تثبیت‌کننده آهک و الیاف بر تغییر شکل بلوک خاک فشرده

از جابه‌جایی عمودی ثبت‌شده در طول آزمایش مقاومت فشاری، مقادیر کرنش به دست آمد. در این پژوهش با بررسی نمودارهای تنش - کرنش ترکیبات مختلف، رفتار بلوک‌ها با ترکیبات متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

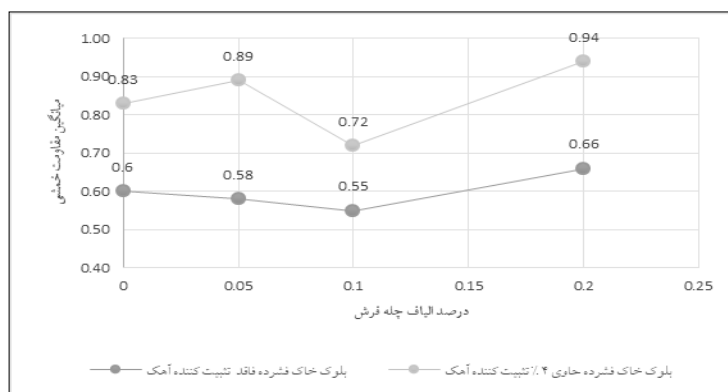
نتایج حاصل از آزمایش خمشی سه نقطه‌ای (مدول گسیختگی، مقاومت کششی غیرمستقیم)

به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین ترکیب از نظر مقاومت خمشی، به مقایسه مقاومت خمشی ترکیبات مختلف می‌پردازیم.

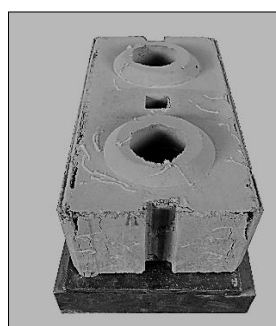
باتوجه به تصویر شماره ۸، می‌توان مشاهده کرد که همواره متوسط مقاومت خمشی بلوک‌های حاوی تثبیت‌کننده آهک از متوسط مقاومت خمشی بلوک‌ها با ترکیب مشابه و فاقد آهک، بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود آهک در بلوک خاک فشرده تأثیر مثبت داشته و منجر به افزایش مقاومت خمشی بلوک خواهد شد. همچنین باتوجه به نمودار می‌بینیم که از میان ترکیبات فاقد تثبیت‌کننده و با درصدهای متفاوت الیاف ریشه فرش (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد)،

ترک‌ها عمل می‌کند. در تصویر سمت راست می‌بینیم ترک‌ها تا حد زیادی باز شده‌اند، اما در تصویر سمت چپ الیاف ریشه فرش از باز شدن کامل ترک‌ها جلوگیری کرده‌اند. الیاف موجود در بلوک باعث می‌شود بلوک وارد مرحله سخت‌شوندگی شده و دچار تغییر شکل دائمی شود تا مانع فروپاشی ناگهانی و بدون اختطار بلوک‌ها گردد. هرچند طبق گفته دبیکی^۷ و همکاران (۱۹۸۸) این رفتار لزوماً با بهبود رفتار خمشی همراه نیست.

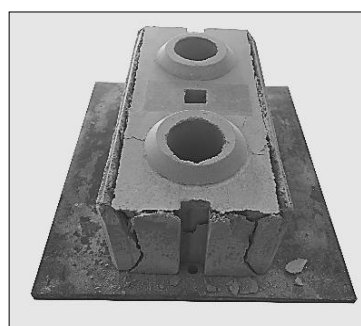
تصویر شماره ۹، فرم شکست بلوک‌های خاکی فاقد تثبیت‌کننده آهک در حالت بدون الیاف (تصویر شماره ۹-الف) و حاوی الیاف ریشه فرش (تصویر شماره ۹-ب) را نشان می‌دهد. در این تصویر می‌توان مشاهده کرد که حضور الیاف علاوه بر تغییراتی که در مقاومت فشاری نهایی بلوک ایجاد می‌کند (که قبل‌تر مفصل در مورد آن بحث شده است) باعث کاهش تردی و شکنندگی بلوک شده و در بلوک‌های خاک فشرده مانند پل در بین



ت ۸. مقایسه مقاومت خمشی بلوک خاک فشرده حاوی و فاقد تثبیت‌کننده آهک و درصدهای متفاوت الیاف



ب



الف

ت ۹. الف- فرم شکست ناشی از بارگذاری بلوک خاک فشرده فاقد الیاف.

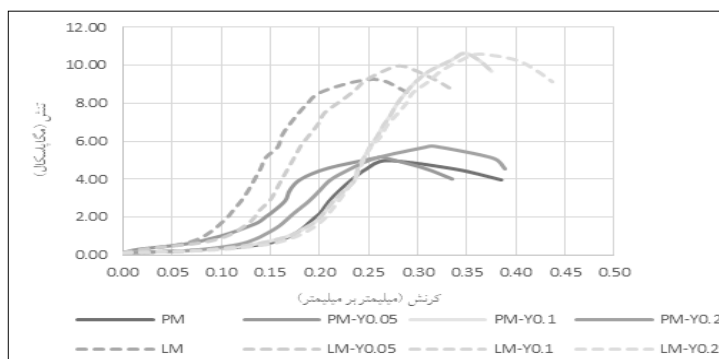
ب- فرم شکست ناشی از بارگذاری بلوک خاک فشرده حاوی الیاف ریشه فرش

۰/۲ درصد) در حالت حاوی و فاقد آهک را نشان می‌دهد. با توجه به مقایسه نمونه‌های حاوی و فاقد آهک

تصویر شماره ۱۰، نمودار تنش - کرنش بلوک‌های با درصدهای متفاوت الیاف ریشه فرش (۰، ۰/۰۵، ۰/۱ و

چسب ایجاد شده توسط آهک بر تأثیر الیاف بر شکل پذیری بلوک حاکم بوده و مانع افزایش شکل پذیری بلوک توسط الیاف می شود. الیاف زمانی که آهک در ترکیب وجود ندارد به خوبی می تواند ایفای نقش کرده و شکل پذیری بلوک را افزایش داده و مانع فروپاشی ناگهانی بلوک شود، اما در حضور آهک نقش الیاف توسط آهک خنثی شده و بلوک حاوی الیاف و آهک رفتاری ترد و شکننده از خود نشان خواهد داد.

می توان پی برد که افزودن آهک علاوه بر تغییراتی که در مقاومت فشاری و خمشی نهایی بلوک ایجاد می کند (که قبل تر مفصل در مورد آن بحث شده است)، باعث بیشتر شدن تنش تسلیم بلوک های خاکی با همان ترکیب می شود. علاوه بر آن آهک منجر به کاهش شکل پذیری نمونه ها شده و تولید ماده پوزولانی و چسباننده در حضور آهک باعث می شود ذرات خاک به یکدیگر چسبیده و باعث تردی و شکنندگی بلوک خواهد شد.



ت ۱۰. نمودار تنش - کرنش

بهینه از میان ترکیبات فاقد الیاف و ترکیب بهینه از میان ترکیبات شامل الیاف ریشه فرش که هم به لحاظ مقاومت فشاری و هم خمشی بهترین عملکرد را داشته باشند، فرایند امتیازدهی به متوسط مقاومت فشاری و خمشی ۸ ترکیب مورد نظر از ۱ تا ۸ به ترتیب از بهترین تا بدترین، انجام شد. جدول شماره ۵، امتیاز هر ترکیب را به صورت مجزا نشان می دهد. باتوجه به این جدول، از میان ترکیبات فاقد الیاف، بهترین ترکیب، ترکیب حاوی ۴ درصد آهک است و از میان ترکیبات حاوی الیاف ریشه فرش، ترکیب بهینه، ترکیب حاوی ۴ درصد تثبیت کننده و ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش است و بهینه ترین ترکیب از میان دو ترکیب نام برده شده نیز، ترکیب حاوی ۴ درصد تثبیت کننده و ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش است.

نمودار تنش - کرنش ترکیبات مختلف ارائه شده در تصویر شماره ۱۰، نرخ جابه جایی و کرنش بالاتری را در محدوده تنش کمتر از ۱/۵ مگاپاسکال نشان می دهند. در تنش های بالاتر از تقریباً ۱/۵ مگاپاسکال کرنش نسبتاً کاهش می یابد. نرخ کرنش بالای اولیه را می توان به فشردگی و تراکم ناقص ذرات خاک در مرحله تولید یا مقداری برگشت ذرات بعد از فشار زیاد نسبت داد و می توان مشاهده کرد که با تراکم کامل و با افزایش مقاومت نمونه، کرنش و جابه جایی کاهش می یابد. برخلاف پژوهش ایجنتی و خطیب^۸ (۲۰۱۵) که این انتقال در تنش ۲/۵ مگاپاسکال رخ می دهد، در این پژوهش این انتقال در محدوده تنش تقریباً ۱/۵ مگاپاسکال اتفاق می افتد.

انتخاب ترکیب بهینه

باتوجه به مطالب ذکر شده، به منظور تعیین ترکیب

ج ۵. رتبه‌بندی ترکیبات بر اساس متوسط مقاومت خمشی و فشاری

نوع الیاف	تثبیت کننده	درصد الیاف	میانگین مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال	میانگین مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال	رتبه در مقاومت فشاری	رتبه در مقاومت خمشی	جمع امتیازات
فاقد الیاف	فاقد تثبیت کننده آهک	۰	۵/۰۴	۰/۶۰	۸	۶	۱۴
	حاوی تثبیت کننده آهک	۰	۹/۲۵	۰/۸۳	۴	۳	۷
الیاف ریشه فرش	فاقد تثبیت کننده آهک	۰/۰۵	۵/۵۷	۰/۵۸	۷	۷	۱۴
		۰/۱	۷/۲۸	۰/۵۵	۵	۸	۱۳
		۰/۲	۵/۷۳	۰/۶۶	۶	۵	۱۱
	حاوی تثبیت کننده آهک	۰/۰۵	۹/۸۹	۰/۸۹	۳	۲	۵
		۰/۱	۱۰/۷۱	۰/۷۲	۱	۴	۵
		۰/۲	۱۰/۵۲	۰/۹۴	۲	۱	۳

وجود می‌آورد.

نتیجه

نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش، مقاومت فشاری به ترتیب ۸، ۲۶ و ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حضور الیاف ریشه فرش به‌طور کلی مقاومت فشاری بلوک‌های خاک فشرده را بهبود می‌بخشد که در میان آن‌ها، ترکیب حاوی ۰/۱ درصد الیاف ریشه فرش بهترین عملکرد را به لحاظ مقاومت فشاری دارد. برخلاف آهک، حضور الیاف همچنین باعث کاهش تردی و شکنندگی بلوک شده و در بلوک‌های خاک فشرده مانند پل در بین ترک‌ها عمل می‌کند، اما این رفتار لزوماً با بهبود رفتار خمشی بلوک‌ها همراه نبوده و تنها در دو ترکیب ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش مقاومت خمشی بلوک خاک فشرده نسبت به بلوک شاهد (نمونه فاقد الیاف) به‌طور میانگین ۳ و ۱۲ درصد افزایش یافته است.

این پژوهش نشان می‌دهد که با افزودن ریشه فرش به خشت فشرده نه تنها مقاومت آن افزایش می‌یابد، بلکه با این کار از آلودگی محیط زیست هم به میزان قابل توجهی کاسته می‌شود. هر بلوک در بهترین حالت (چه به لحاظ فشاری و چه به لحاظ خمشی) دارای ۸ گرم الیاف (۰/۲ درصد) است و بنابراین با ساخت یک بنای خشت فشرده در حدود ۱۱۶ کیلوگرم الیاف از محل دفن زباله کاسته خواهد شد.

این پژوهش با هدف بررسی عملکرد بلوک خاک فشرده در ترکیب با تثبیت کننده آهک و الیاف ضایعات صنعتی انجام شد. بدین منظور نمونه‌هایی با ترکیبات مختلف (حاوی و فاقد تثبیت کننده آهک و با درصدهای متفاوت (درصدهای صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲) الیاف ضایعات صنعتی) تولید شد و مورد آزمایش مقاومت فشاری و خمشی قرار گرفت. در این پژوهش برخلاف بسیاری از پژوهش‌ها، آزمون‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای که به صورت رایج مورد آزمون قرار می‌گیرند انجام نشد؛ بلکه بر روی فرم اصلی بلوک که در ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد انجام شد. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

با افزودن ۴ درصد تثبیت کننده آهک، مقاومت فشاری و خمشی ترکیبات به‌طور میانگین، به ترتیب، ۷۱ و ۴۱ درصد افزایش می‌یابد. افزودن آهک علاوه بر تغییراتی که در مقاومت فشاری و خمشی نهایی بلوک ایجاد می‌کند، باعث بیشتر شدن تنش تسلیم بلوک‌های خاکی می‌شود. علاوه بر آن، آهک منجر به کاهش شکل پذیری نمونه‌ها نیز می‌شود؛ چراکه به محض افزودن آب به ترکیب خاک و آهک کلسیم سیلیکات و آلومینات تشکیل می‌شود. کلسیم سیلیکات در حضور آب هیدراته شده و یک ترکیب چسباننده و سیمانی را به

فهرست منابع

- استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۶۲: خاک - خاک رس
جهت ساخت آجر رسی - ویژگی و روش آزمون، ۱۳۷۶.

1. Laibi
 2. Akbulut, Arasan & Kalkan
 3. RG
 4. Binici, Aksogan & Shah
 5. Francioso
 6. Adam & Ajib
 7. Debicki
 8. Egenti & Khatib
- blocks. *Construction and Building Materials*, 259, 120568.
- Francioso, V., Moro, C., Castillo, A., & Velay-Lizancos, M. (2021). Effect of elevated temperature on flexural behavior and fibers-matrix bonding of recycled PP fiber-reinforced cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 269, 121243.
- Guettala, A., Houari, H., Mezghiche, B., & Chebili, R. (2002). Durability of lime stabilized earth blocks.
- Head, K.H. (1980). *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 1. 1980: Pentech press London.
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and building materials*, 30, 100-116.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1995). *Treaty of earth construction*. Edition parenthesis, Marseille, France, 1995.
- Jesudass, A., Harish, K., Ram, S. S., & Riyas, S. M. (2021, April). Earthen blocks with Synthetic Fibres—A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1145, No. 1, p. 012039). IOP Publishing.
- Krosnowski, A.D. (2011). A proposed best practice method of defining a standard of care for stabilized compressed earthen block production. 2011, University of Colorado at Boulder.
- Laibi, A. B., Poullain, P., Leklou, N., Gomina, M., & Sohounhloué, D. K. (2018). Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 785-793.
- Organisation, A.r.s. (1996). *Compressed earth block standards*. 1996.
- Pringle, S.A. (2016). Diagonal tension testing of interlocking compressed earth block panels. 2016.
- Prasad, C.S., Nambiar, E.K., & Abraham, B.M. (2012). Plastic fiber reinforced soil blocks as a sustainable building material. *Int. J. Adv. Res. Technol.* 1(5): p. 42-45.
- Pave, R. F. (2007). *Strength evaluation of dry-stack masonry* (Doctoral dissertation).
- RG, E., Mabiala, B., Ahouet, L., Goma-Maniongui, J., & GF, D. (2011). Characterization of clayey soils from congo and physical properties of their compressed earth blocks reinforced with post-consumer plastic wastes. *Geomaterials*, 2011.
- Standard, A. (2010). *ASTM E2392/E2392M-10e1 Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.
- Wachira, K.T. (2018). *Optimization of Soil-Lime and Cement Mixes for Compressed Earth Stabilized Blocks for Low-Cost Housing in East Africa (Kenya)*. 2018: University of Missouri-Kansas City.
- Walker, P., & Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars. *Materials and structures*. 30(9): p. 545-551.
- Zealand, S.N. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*. 1998: Standards New Zealand.

DOI: 10.22034/42.182.111

- Adam, E., & Agib, A. (2001) *Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan*. France, Paris: Printed by Graphoprint for UNESCO.
- Akbulut, S., Arasan, S., & Kalkan, E. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *Applied Clay Science*, 2007. 38(1-2): p. 23-32.
- Ambers, S.E. (2017). *In-Plane Shear Wall Performance as Affected by Compressed Earth Block Shape*. 2017.
- ASTM, C. (2010). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). in *American society for testing and materials*. 2010.
- Blight, G. (1994). *Durability and material characteristics of soil-cement blocks*. 1994, BSC Thesis, Wits University, Johannesburg.
- Binici, H., Aksogan, O., & Shah, T. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and building materials*, 2005. 19(4): p. 313-318.
- Bureau, G.C. (1991). *New Mexico adobe and rammed earth building code*. General Construction Bureau, USA, 1991. 311: p. 312.
- Code, N.M.A. (2009). Chapter 7 Building Codes General: Part 4 New Mexico Earthen Building Materials Code. *Housing and Construction*, 2009.
- Croft, J. (1968). The problem in predicting the suitability of soils for cementitious stabilization. *Engineering geology*. 2(6): p. 397-424.
- Croft, J. (1967). The structures of soils stabilized with cementitious agents. *Engineering Geology*. 2(2): p. 63-80.
- Debicki, G., Bali, A., Khenfer, M. M., & Chabannet, M. (1988). Mechanical properties of date palm fibres and reinforced date palm fibre concrete in hot-dry climate'' (Doctoral dissertation, INSA).
- Egenti, C., & Khatib, J. (2015). Strain in Compressed Earth Block with Increase in Stress. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 3(2), 58-61.
- Elahi, T. E., Shahriar, A. R., Alam, M. K., & Abedin, M. Z. (2020). Effectiveness of saw dust ash and cement for fabrication of compressed stabilized earth