ساخت خشت فشرده 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 فشرده، ارزان بوده، برای تهیه آن از منابع محلی استفاده می‌شود و به‌منظور کسب مقاومت کافی، به‌جای پخته شدن تحت فشار بالا قرار گرفته، فشرده‌سازی و متراکم می‌شود، به همین دلیل نسبت به دیگر مصالح ساختمانی از انرژی نهفته کمتری برخوردار است. یکی از معایب بلوک خاک فشرده 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 فشرده 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 مورداستفاده قرار داد. در این پژوهش از الیاف ضایعات صنعتی ریشه فرش (با درصدهای ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲)، به‌منظور تقویت بلوک‌های خاک فشرده 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 فشرده تأثیر مثبت داشته و منجر به افزایش مقاومت بلوک در تمامی ترکیبات خواهد شد و حضور ۰/۲ درصد الیاف (ریشه فرش) می‌تواند عملکرد بلوک خاک فشرده 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 فشرده 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 فشرده، 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.

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

مقدمه

در گذشته به‌منظور ساخت‌وساز در مناطق گرم و خشک (نظیر استان یزد) به دلیل عدم دسترسی به منابع سنگ و چوب و وفور خاک، از خشت و آجر تهیه‌شده از خاک محل خاک‌برداری بنا استفاده می‌شد. به‌تدریج به دلیل دوام و مقاومت کم این مصالح در مقایسه با تکنولوژی‌های جدید، استفاده از آن‌ها به‌عنوان مصالح ساختمانی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافت. در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت تکنولوژی‌های غیرآلاینده و معماری پایدار به‌منظور دستیابی به سازگاری و هماهنگی با محیط‌زیست، بهبود آب‌وهوا، جلوگیری از اتلاف انرژی و همچنین جلوگیری از آثار منفی ساخت‌وساز بر محیط‌زیست، تولید مصالح ساختمانی در دسترس، بوم‌آورد، ارزان‌قیمت، بازگشت‌پذیر و پایدار بسیار اهمیت پیدا کرده است (Ambers, 2017; Wachira, 2018).

بلوک خاک فشرده (Compressed Earth Block (CEB)) به‌عنوان مصالح ارزان‌قیمت، پایدار، قابل بازیافت و با کمترین میزان پردازش و آلایندگی، 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 تثبیت‌کننده (در اکثر موارد سیمان) تشکیل شده است، درواقع مصالح بهبود و تغییریافته خشت است و برخلاف آجر که با استفاده از پختن خاک به وجود می‌آید، از روش فشرده‌سازی مکانیکی به‌صورت دستی یا هیدرولیکی به وجود می‌آید. درواقع تفاوت آن با آجر در فرایند تولید آن است که تحت فشار زیاد متراکم شده و به آن برای افزایش قدرت و دوام، تثبیت‌کننده و در برخی موارد الیاف اضافه می‌شود. این بلوک‌ها را می‌توان در کارگاه ساختمانی محلی تولید کرد تا هزینه‌های حمل‌ونقل کاهش یابد. این بلوک‌ها در مقایسه با آجر (خشت پخته‌شده) و بلوک بتنی پروسه تولید ساده‌تر و سریع‌تری دارند و از انرژی نهفته کمتری برخوردار هستند.

در سال‌های اخیر تحقیقات مربوط به مصالح خاکی به‌طور چشمگیری توسعه یافته است، اما هنوز هم تولید مصالح خاکی به جای روش‌ها و استانداردهای دقیق، بر اساس تکنیک های سنتی و تجربه فردی است. به‌منظور گسترش استفاده از بلوک‌های خاک فشرده در ساختمان‌سازی، لازم است تکنیک‌های تولید بهبود یابد تا بلوک‌هایی با کیفیت بهتر و با هزینه کمتر تولید شوند؛ همچنین مصالح خاکی سنتی همیشه استحکام و مقاومت کمی چه ازلحاظ فشاری و چه به لحاظ کششی داشته‌اند (Jesudass et al., 2021) که لازم است برای به‌کارگیری مجدد آن‌ها، این نقص‌ها 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 زباله‌های تولیدشده است. امروزه دفع ضایعات صنعتی چالش بزرگی برای جوامع بشری است و این مسئله که بتوان از زباله‌ها و ضایعات تولیدی الیاف تولید کرد 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 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 می‌شود. نخ‌های ریشه فرش معمولاً گران‌قیمت هستند و زمانی که ریشه به‌طور یکنواخت و مرتب برش داده می‌شود مقدار زیادی از این نخ‌های گران‌قیمت به‌عنوان

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

اضافات برش داده شده و به‌عنوان ضایعات و زباله شناخته می‌شوند. این پژوهش قصد دارد تا با استفاده از اضافات بریده‌شده از ریشه فرش که دورریز بوده و غیرقابل‌استفاده هستند و به‌عنوان ضایعات شناخته می‌شوند، در مصالح ساختمانی موردنظر (بلوک خاک فشرده)، بخشی از این زباله تولیدشده را به‌گونه‌ای 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، مقرون‌به‌صرفه و با درون‌مایه سنتی اما به‌مراتب با کیفیت، دوام و مقاومت بالاتر برسد و بستری برای استفاده از مصالح سنتی و پایدار که رفته‌رفته 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، حال‌آنکه در ساختمان‌سازی از این‌چنین فرم‌هایی کمتر استفاده می‌شود. ازآنجایی‌که 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.

درنهایت 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 رفتار بلوک خاک فشرده چگونه است؟

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

ادبیات موضوع

مصالح خاکی سنتی همیشه استحکام و مقاومت کمی چه ازلحاظ 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 به‌منظور افزایش دوام آن، از دهه ۱۹۲۰ به‌طور گسترده مورداستفاده 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 به‌منظور تثبیت و تقویت خاک استفاده شده است به همراه درصد سیمان مورداستفاده و نتایج آزمون‌های انجام‌شده در پژوهش، ارائه شده است.

با بررسی نتایج پژوهش‌های پیشین که در آن‌ها از سیمان به‌عنوان تثبیت‌کننده استفاده شده است، می‌توان مشاهده کرد که سیمان در اکثر موارد موجب بهبود عملکرد بلوک‌های خاک فشرده می‌شود؛ اما نکته‌ای که در سیمان قابل‌تأمل است این است که، استفاده از سیمان پرتلند به‌عنوان 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 موردبررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار داده‌اند. کاملاً قابل‌درک است که

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]

[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

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	–

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 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، به‌عنوان‌مثال، لایبی[1] 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.

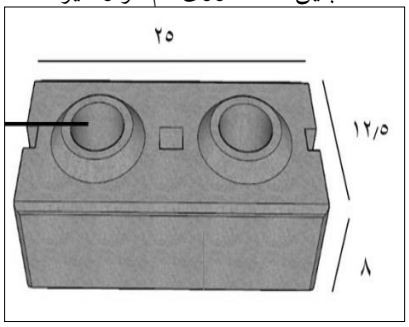
آکبولوت، آراسان و کالکان[2] (۲۰۰۷) استفاده از الیاف مواد ضایعاتی نظیر ضایعات تایر، پلی پروپلین و پلی اتیلن در خاک را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که این مواد، مقاومت و رفتار دینامیکی خاک را بهبود می‌بخشد. آرجی[3] و همکاران (۲۰۱۱) ویژگی‌های

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

فیزیکی بلوک CEB که با استفاده از پسماندهای پلاستیکی تقویت شده‌اند را با CEB تقویت‌نشده مورد مقایسه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تقویت با پسماندهای پلی‌اتیلن مقاومت را به اندازه ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد. بینیچی، آکسوگان و شاه[۴] (۲۰۰۵) ویژگی‌های مکانیکی خاک ترکیب‌شده با الیاف مواد زائد به همراه تثبیت‌کننده‌ها را موردبررسی 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 خمش سه نقطه‌ای پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که برخلاف مطالبی که من‌باب 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 ایالات‌متحده آمریکا، مانند استاندارد مصالح ساختمانی نیومکزیکو ۲/۰۷ مگاپاسکال است (Bureau, 1991) و حداقل مقاومت خمش 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 ۱۵ درصد وزن آن‌ها بیشتر شود.

بلوک تولیدشده در این پژوهش از نوع Rhino Block است (Ambers, 2017) که دارای حفره‌ای در وسط به‌منظور 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 به‌صورت نر و ماده تعبیه شده تا بلوک‌ها بتوانند به‌صورت خشکه‌چین کاملاً روی‌هم قرار گیرند (تصویر شماره ۱).



ت ۱. Rhino Block، (ابعاد بر اساس سانتی‌متر است)

ازآنجایی‌که 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. بدین‌جهت نمونه‌های بلوک‌های خاک فشرده با ترکیبات مختلف ساخته شدند و سپس تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی قرار گرفتند.

مواد و مصالح موردنیاز

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

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

از سطح زمین، استخراج شده است. باید توجه داشت که خاک مورداستفاده باید عاری از هرگونه مواد آلی باشد. خاک برداشت‌شده حاوی مقدار زیادی ذرات بزرگ‌تر از یک سانتی‌متر است. بنابراین لازم است تمام خاک موردنظر 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 به‌دست‌آمده 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 سنتی (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 تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای، تمام ترکیبات تولیدی با آهک، با همان ترکیبات بدون آهک نیز تولید شد.

باتوجه‌به اینکه بسته به نوع خاک مورداستفاده، میزان آب بهینه موردنیاز 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 باتوجه‌به نوع خاک مورداستفاده در این پژوهش، مشخص شود. با مقایسه نمونه‌های تولیدشده، بلوک با ۱۰ درصد آب از مقاومت اولیه خوبی بهره‌مند بوده و خاک ترکیب‌شده با آب (پیش از تولید بلوک) از میزان رطوبت خوبی نیز بهره‌مند بود. همچنین باتوجه‌به اطلاعات جمع‌آوری‌شده از تحقیقات پیشین، آزمون سقوط نیز برای درصدهای جرمی متفاوت آب اضافه‌شده 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 موردنظر است و بدین ترتیب در این پژوهش درصد بهینه آب موردنیاز 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 مورداستفاده 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 تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای، تمام ترکیبات تولیدی با الیاف، با همان ترکیبات بدون

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

الیاف نیز تولید شد. مشابه پژوهش فرانسیوزو[5] و همکاران (۲۰۲۱) نام‌گذاری نمونه‌ها به‌صورت 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 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.

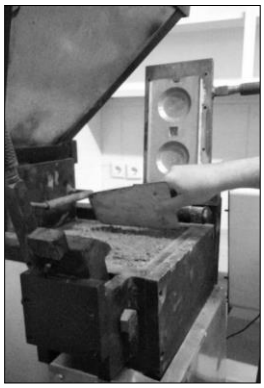
ج ۳. نام نمونه‌ها و فرمولاسیون ترکیبات آن‌ها

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

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بلوک خاک فشرده

در داخل آزمایشگاه و در دمای اتاق (به‌منظور جلوگیری از تابش مستقیم نور خورشید و از دست دادن رطوبت) همه اجزا روی یک سطح صاف و غیرقابل‌نفوذ 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 بستگی دارد (Wachira, 2018). دستگاهی که در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است، برای ساخت بلوک‌های خاکی در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفت. این دستگاه به‌صورت 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.

ت ۲. دستگاه پرس بلوک



الف

ب

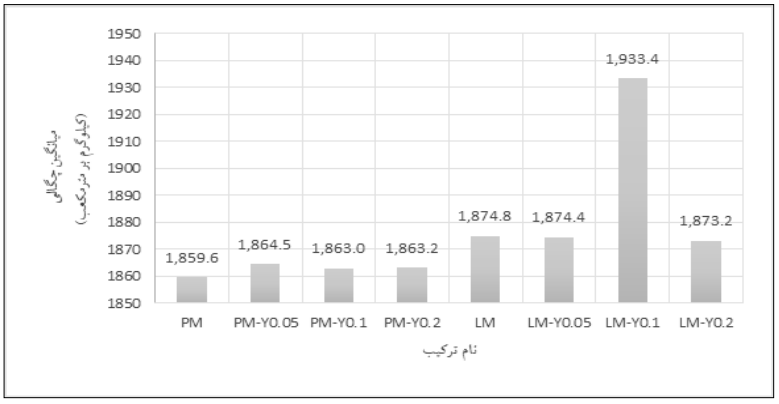
ت ۳. الف- ریختن ترکیبات در قالب؛ ب- بلوک تولیدشده با دستگاه پرس

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]

[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

باتوجه‌به پژوهش آدام و اجیب[۶] چگالی بلوک‌های خاک فشرده تثبیت‌شده در بین ۱۷۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پذیرفته است (Adam & Agib, 2001) باتوجه‌به تصویر شماره ۴، چگالی تمامی نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش (اعم از تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده) در فاصله ذکرشده قرار گرفته و رضایت‌بخش است. همان‌طور که در نمودار میله‌ای قابل‌مشاهده است، اثر محتوای الیاف بر چگالی نامحسوس است، اما در ترکیبات حاوی تثبیت‌کننده آهک، مقدار چگالی بلوک افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به تشکیل ماده سنگین و چگال نسبت داد.

به‌منظور حفظ رطوبت درونی نمونه‌ها، در ۴ روز اول، بلوک‌ها را زیر نایلون نگهداری کرده و به مدت ۴ روز روی سطح آن‌ها آب اسپری می‌کنیم (Ambers, 2017; Pringle, 2016). عمل‌آوری بلوک‌ها لازم است ۲۸ روز متوالی انجام شود (Krosnowski, 2011).



ت ۴. مقایسه چگالی بلوک با ترکیبات مختلف

آزمون

در این پژوهش، نمونه‌ها 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، به‌منظور بررسی استحکام و مقاومت بلوک‌ها و همچنین بررسی تأثیر افزودنی‌ها شامل آهک و الیاف ریشه فرش بر مقاومت فشاری بلوک‌های خاک فشرده، انجام می‌شود. در طی انجام آزمون مقاومت فشاری، سرعت اعمال بار دستگاه بر روی تمامی بلوک‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. حداکثر مقاومت فشاری (حداکثر تنش) با تقسیم حداکثر بار بر مساحت محاسبه می‌شود. طی بارگذاری گیجی به‌منظور اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی بلوک در هنگام بارگذاری، بر روی صفحه پایینی جک نصب می‌شود تا درنهایت بتوان نمودار تنش - کرنش را برای هر نمونه ترسیم کرد (تصویر شماره ۵-ب).

آزمون خمش سه نقطه‌ای (مدول گسیختگی، مقاومت کششی غیرمستقیم)

هدف از آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای، بررسی تأثیر افزودنی‌ها شامل آهک و الیاف ریشه فرش بر مقاومت خمشی و همچنین بررسی مقاومت کششی بلوک‌های خاک فشرده به‌صورت غیرمستقیم است. باتوجه‌به عدم وجود اطلاعات مناسب از مشخصات آزمون خمش در استانداردهای مصالح ساختمانی خاکی موجود و بر اساس توصیه مراجع مربوطه

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

(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 نمونه را به‌صورت مجزا به دست آورد: $\sigma e = \frac{3FL}{2bd^2}$

F = (N) نیروی اعمال‌شده توسط بازوی متحرک

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

b = (mm) عرض نمونه

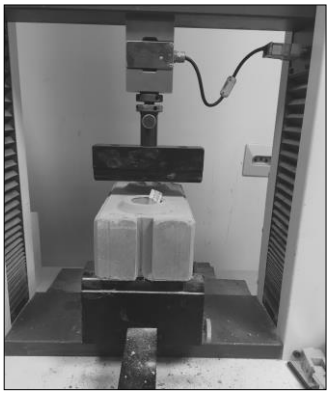
d = (mm) ضخامت نمونه

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.

الف ب

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



ت ۶. دستگاه آزمون خمش سه نقطه‌ای

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

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

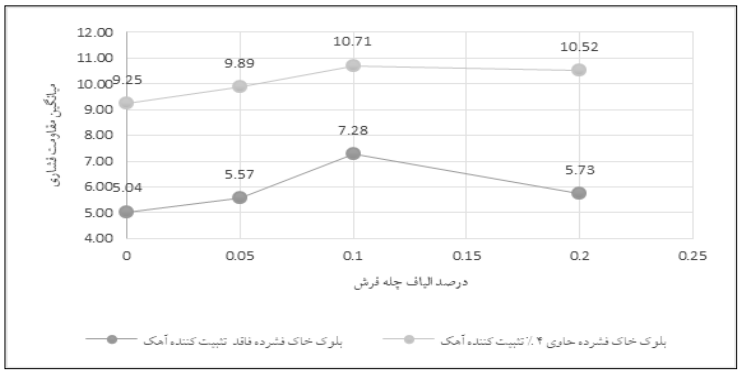
نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری

به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین ترکیب ازنظر مقاومت فشاری، به مقایسه مقاومت فشاری ترکیبات مختلف می‌پردازیم.

باتوجه‌به تصویر شماره ۷، می‌توان مشاهده کرد که همواره متوسط مقاومت فشاری بلوک‌های حاوی تثبیت‌کننده آهک از متوسط مقاومت فشاری بلوک‌ها با 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 باتوجه‌به 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

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

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 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 فاقد 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.



ت ۷. مقایسه مقاومت فشاری بلوک خاک فشرده حاوی و فاقد تثبیت‌کننده آهک و درصدهای متفاوت الیاف

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

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

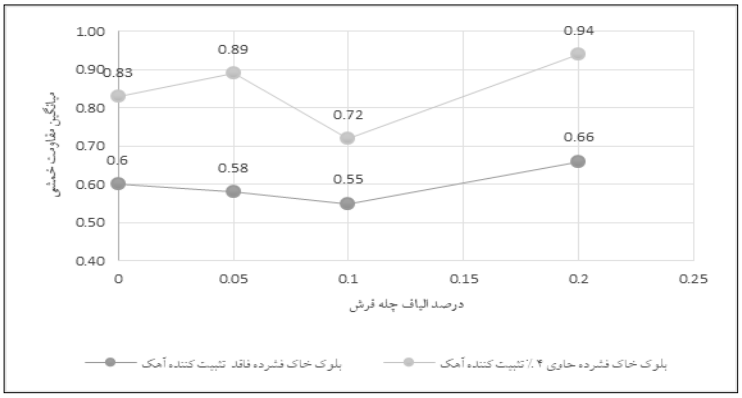
باتوجه‌به تصویر شماره ۸، می‌توان مشاهده کرد که همواره متوسط مقاومت خمشی بلوک‌های حاوی تثبیت‌کننده آهک از متوسط مقاومت خمشی بلوک‌ها با ترکیب مشابه و فاقد آهک، بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود آهک در بلوک خاک فشرده تأثیر مثبت داشته و منجر به افزایش مقاومت خمشی بلوک خواهد شد. همچنین باتوجه‌به 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 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

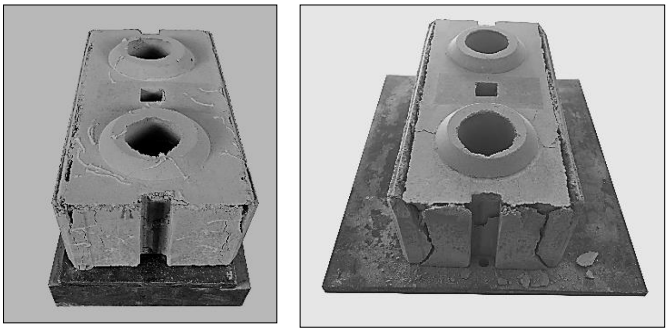
از جابه‌جایی عمودی ثبت‌شده در طول آزمایش مقاومت فشاری، مقادیر کرنش به دست آمد. در این پژوهش با بررسی نمودارهای تنش - کرنش ترکیبات مختلف، رفتار بلوک‌ها با ترکیبات متفاوت موردبررسی قرار گرفت.

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

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 ترک‌ها عمل می‌کند. در تصویر سمت راست می‌بینیم ترک‌ها تا حد زیادی بازشده‌اند، 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 اخطار بلوک‌ها گردد. هرچند طبق گفته دبیکی[۷] و همکاران (۱۹۸۸) این رفتار لزوماً با بهبود رفتار خمشی همراه نیست.



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



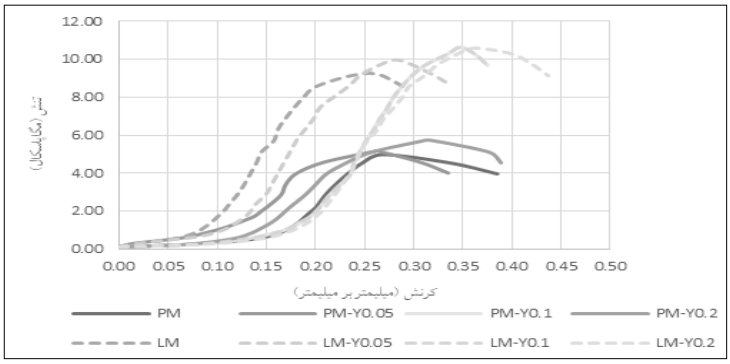
الف **ب**

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

تصویر شماره ۱۰، نمودار تنش - کرنش بلوک‌های با درصدهای متفاوت الیاف ریشه فرش (۰، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) در حالت حاوی و فاقد آهک را نشان می‌دهد. باتوجه‌به مقایسه نمونه‌های حاوی و فاقد آهک

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

می‌توان پی برد که افزودن آهک علاوه بر تغییراتی که در مقاومت فشاری و خمشی نهایی بلوک ایجاد می‌کند (که قبل‌تر مفصل در مورد آن بحث شده است)، باعث بیشتر شدن تنش تسلیم بلوک‌های خاکی با همان ترکیب می‌شود. علاوه بر آن آهک منجر به کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها شده و تولید ماده پوزولانی و چسباننده در حضور آهک باعث می‌شود ذرات خاک به یکدیگر چسبیده و باعث تردی و شکنندگی بلوک خواهد شد. چسب ایجادشده توسط آهک بر تأثیر الیاف بر شکل‌پذیری بلوک حاکم بوده و مانع افزایش شکل‌پذیری بلوک توسط الیاف می‌شود. الیاف زمانی که آهک در ترکیب وجود ندارد به‌خوبی می‌تواند ایفای نقش کرده و شکل‌پذیری 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.



ت ۱۰. نمودار تنش – کرنش

نمودار تنش – کرنش ترکیبات مختلف ارائه‌شده در تصویر شماره ۱۰، نرخ جابه‌جایی و کرنش بالاتری را در محدوده تنش کمتر از ۱/۵ مگاپاسکال نشان می‌دهند. در تنش‌های بالاتر از تقریباً ۱/۵ مگاپاسکال کرنش نسبتاً کاهش می‌یابد. نرخ کرنش بالای اولیه را می‌توان به فشردگی و تراکم ناقص ذرات خاک در مرحله تولید یا مقداری برگشت ذرات بعد از فشار زیاد نسبت داد و می‌توان مشاهده کرد که با تراکم کامل و با افزایش مقاومت نمونه، کرنش و جابه‌جایی کاهش می‌یابد. برخلاف پژوهش ایجنتی و خطیب[۸] (۲۰۱۵) که این انتقال در تنش ۲/۵ مگاپاسکال رخ می‌دهد، در این پژوهش این انتقال در محدوده تنش تقریباً ۱/۵ مگاپاسکال اتفاق می‌افتد.

انتخاب ترکیب بهینه

باتوجه‌به مطالب ذکرشده، به‌منظور تعیین ترکیب 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 موردنظر از ۱ تا ۸ به ترتیب از بهترین تا بدترین، انجام شد. جدول شماره ۵، امتیاز هر ترکیب را به‌صورت مجزا نشان می‌دهد. باتوجه‌به 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 تثبیت‌کننده و ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش است و بهینه‌ترین ترکیب از میان دو ترکیب نام‌برده‌شده نیز، ترکیب حاوی ۴ درصد تثبیت‌کننده و ۰/۲ درصد الیاف ریشه فرش است.

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

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

نوع الیاف	تثبیت‌کننده	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 تثبیت‌کننده آهک	۰	۵/۰۴	۰/۶۰	۸	۶	۱۴
	حاوی تثبیت‌کننده آهک	۰	۹/۲۵	۰/۸۳	۴	۳	۷
الیاف ریشه فرش	فاقد تثبیت‌کننده 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 تثبیت‌کننده 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

نتیجه

این پژوهش با هدف بررسی عملکرد بلوک خاک فشرده در ترکیب با تثبیت‌کننده آهک و الیاف ضایعات صنعتی انجام شد. بدین منظور نمونه‌هایی با ترکیبات مختلف (حاوی و فاقد تثبیت‌کننده 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 به‌صورت رایج مورد آزمون قرار می‌گیرند انجام نشد؛ بلکه بر روی فرم اصلی بلوک که در ساختمان‌سازی مورداستفاده قرار می‌گیرد انجام شد. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

با افزودن ۴ درصد تثبیت‌کننده 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 شکل‌پذیری 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 وجود می‌آورد.

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 به‌طورکلی 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 نه‌تنها مقاومت آن افزایش می‌یابد، بلکه با این کار از آلودگی محیط‌زیست هم به میزان قابل‌توجهی 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.

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]

پی‌نوشت

1. Laibi
2. Akbulut, Arasan & Kalkan
3. RG
4. Binici, Aksogan & Shah
5. Francioso
6. Adam & Ajib
7. Debicki
8. Egenti & Khatib

فهرست منابع

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

[Downloaded from jhre.ir on 2025-08-11]
[DOI: DOI: 10.22034/42.182.111]