طراحی و برنامه‌ریزی در معماری و شهرسازی
سال‌دوم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۳، صص ۶۶- ۸۲
ISSN: ۲۷۱۷-۴۳۸۷

بلوک‌های خاکی پایدار شده، یک مصالح نوآور در معماری نوین خاک

تاریخ دریافت مقاله : ۱۴۰۲/۰۷/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

امیررضا صادقیان [۱]
رکسانا عبدالهی [۲] (نویسنده مسئول)
علی اکبری [۳]
مهرداد جاویدی نژاد [۴]

چکیده

معماری خاک با تاریخچه‌ای طولانی، هنوز نیازمند تأمل و نوآوری در حوزه‌های مختلف از جمله فناوری، مهندسی و آزمایشگاهی است. پژوهش حاضر بر روی بلوک‌های خاکی پایدار شده تمرکز دارد که به عنوان مصالح نوآور در معماری خاک شناخته شده‌اند. این پژوهش با استفاده از مختصات فنی و آزمایشگاهی این بلوک‌ها، به عنوان یک رویکرد جدید در ارتقای معماری خاک و مصالح خاک مبنا، معرفی شده است. روش تحقیق این پژوهش به صورت کیفی و با استناد به اسناد علمی و آزمایشگاهی، به کمک مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده است. این تحقیقات نشان می‌دهند که معماری خاک همچنان پتانسیل‌های بسیاری برای توسعه و ارتقاء دارد و بلوک‌های خاکی پایدار شده می‌توانند به عنوان راهکارهای نوین در این حوزه مؤثر باشند.بلوک‌های خاکی پایدار شده با استفاده از روش بلوک خاک فشرده، به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین محصولات در زمینه معماری خاک شناخته می‌شوند. این بلوک‌ها از خاکی استفاده می‌کنند که نیازمند فرآیندهای فنی مانند پرس شدگی، پایدارسازی و آزمایش‌های مختلفی نظیر آزمون کوزه و تراکم‌پذیری است. آنها انعطاف پذیری و قدرت چسبندگی مناسبی دارند که اجازه می‌دهد در ابعاد و اندازه‌های مختلف تولید شوند و در ساختمان‌ها به‌عنوان عنصرهایی اساسی در فونداسیون، دیوارها، تیرها و سقف‌ها استفاده شوند. مزایای زیادی از این بلوک‌ها ناشی می‌شود، از جمله ارتقاء فنی و کاربردی معماری خاک و ایجاد فناوری جدید در این حوزه. تأکید بر اهمیت آزمایشات فنی و مراحل تولید این محصولات نیز در مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. این آزمایشات می‌توانند در توسعه و بهبود کاربردهای این مصالح نوین در سطح کشور تأثیرگذار باشند.

کلیدواژگان: معماری خاک، بلوک خاکی فشرده، آزمایش‌های فنی و مهندسی، مؤسسه آرووِیل هند

۱- گروه معماری، واحد پروفسور حسابی، دانشگاه آزاد اسلامی، تفرش، ایران.
۲- گروه معماری، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران. (پست الکترونیک: archroxa@gmail.com)
۳- گروه معماری، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴- گروه معماری، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۱- مقدمه/بیان‌مسأله

معماری، به‌عنوان یک علم و یک هنر شناخته‌شده دارای قدمتی طولانی در طول تاریخ زندگی بشر بوده و دایره فکری و عملی گسترده‌ای را در درون خود دارا هست (Ching, Jarzombek, Prakash, 2017: Xii). در این میان، «معماری خاک»[۱] به‌عنوان شاخه‌ای از معماری بومی دارای مجموعه‌ای از اصالت‌ها و ظرفیت‌های تاریخ‌مند است که در طول زمان به‌تناسب تغییرات زمانی رخداده هم‌اکنون پویایی و استفاده وسیع عمومی قبلی خود را ازدست‌داده است. بر اساس مستندات موجود؛ سنت ساختمان‌سازی با خاک تقریباً به قدمت بشریت است و خاک به‌عنوان یک ماده ساختمانی همواره در سراسر دنیا مورداستفاده بوده است (BUET, 2007; World Bank, 2011a). درواقع، خاک خام به لطف دردسترس‌بودن محلی، انرژی پردازش کم در مرحله ساخت‌وساز و قابلیت بازیافت، انرژی کمی برای تولید لازم دارد (Taylor et al, 2008). یکی از زمینه‌های قوی گسترش مجدد استفاده از معماری خاک، ارتقای مقبولیت عمومی و توسعه ساخت‌وساز با مصالح خاکی؛ روی‌آوری به مجموعه فنون جدید ساخت‌وساز با معماری خاک است که از آن می‌توان به‌عنوان «معماری نوین خاک» نام برد که در آن فنون ساخت‌وساز فراتر از کار با گِل به‌عنوان ماده پایه ساخت صورت می‌گیرد. در این زمینه فن‌های مختلف شناخته‌شده‌ای همانند استفاده از چینه‌های نوین خشتی، خشت، ابرخِشت، بلوک‌های خاکی و خاک کوبیده وجود دارد. در جدیدترین جهت‌گیری‌ها نیز روی‌آوری به سمت مصالح نوین تاب‌آور در برابر سیل در ادبیات نظری و کاربردی این حیطه از معماری مشاهده می‌گردد (Lee, 2022). تمرکز پژوهش حاضر بر روی فن جدید بلوک خاکی است. در قرن بیستم، فن جدید خاک مبنا، یعنی بلوک خاک فشرده[۲]، توسعه یافت که عموماً بنام بلوک خاک فشرده نامیده می‌شود که مشخصاً تحقیقات مفصلی در کشور هندوستان انجام‌شده است (World Bank, 2011b; Gomes, 2003)

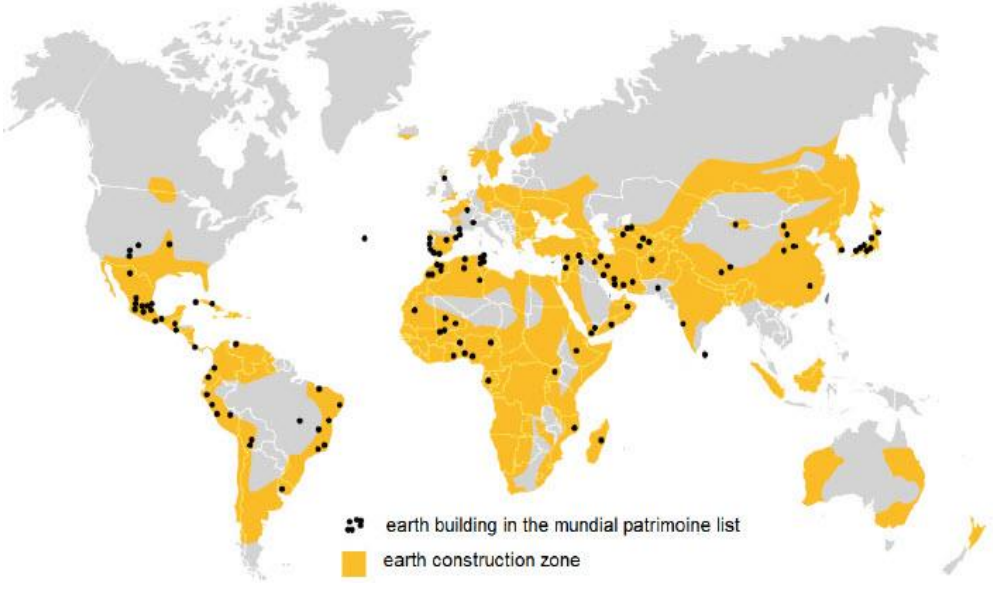
بلوک خاک فشرده در بسیاری از کشورهای دیگر در سراسر دنیا نیز محبوبیت خاصی به دست آورده است. در این راستا، برای تضمین کیفیت مناسب تولیدات و ساختمان‌ها، آیین‌نامه‌های فنی و مهندسی نیز ازجمله آیین‌نامه مؤسسه خاک آرووِیل[۳] برای ارائه جدیدترین فناوری ها ارائه گردیده است. ازلحاظ فنی اگرچه غالباً بلوک‌های خاک فشرده باسیمان یا آهک پایدار می‌شوند، ولی بلوک‌ها که امروزه با نام «بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده»[۴] نام‌گذاری گردیده اند تا بر دو مشخصه فشردگی و پایداری آن به‌طور هم‌زمان تأکید صورت گرفته باشد (World Bank, 2011c; World Bank, 2011b)

بر این مبنا؛ مؤسسه آرووِیل هند، در طی سال‌ها تبدیل به یکی از رهبران جهانی درزمینه فناوری بلوک‌های خاک فشرده پایدار و فن‌های پایدارسازی خاک شده است. به‌علاوه، مؤسسه خاک آرووِیل بخشی از یک شبکه جهانی شامل مرکز بین‌المللی ساختارهای خاکی[۵]، «ای بی سی ترا»[۶] در برزیل و تعدادی سازمان مردم‌نهاد در هند است (AVEI, 2015; Reddy et al, 2010). پژوهش حاضر، متمرکز بر بلوک‌های خاکی پایدار شده به‌ویژه بلوک‌های مؤسسه آرووِیل هند و تعیین مختصات فنی است که در ادامه مقاله هدف تحقیق دنبال شده و اجزاء و ارکان آن تشریح گردیده است.

۲- پیشینهٔ تحقیق

خاک به‌عنوان یک ماده ساختمانی در سراسر دنیا از آغاز بشریت مورداستفاده بوده است. مرکز اسکان سازمان ملل متحد ارزیابی نموده است که حدود ۱.۷ میلیارد نفر از جمعیت جهان در خانه‌های خاکی زندگی کرده که حدوداً ۵۰٪ جمعیت در کشورهای درحال‌توسعه و حداقل ۲۰٪ از جمعیت شهری و حومه شهر را شامل می‌گردد (Burroughs, 2001). بر اساس استنادات موجود نیز یونسکو اظهار داشته است که ۱۷٪ "سایت‌های میراث‌فرهنگی دنیا و ۲۵٪ "سایت‌های میراث درخطر دنیا از خاک ساخته‌شده‌اند (AVEI, 2009). آخرین برآوردهای علمی دقیق‌تر نیز گویای آن است که هم‌اکنون در هزاره سوم حداقل بین ۸ و حداکثر ۲۵ درصد از مجموعه ابنیه معماری در سرتاسر جهان از مصالح خاک و معماری خاکی برای استقرار و عملکرد بهره می‌گیرند (Marsh & Kulshreshtha, 2022:1). بخشی از وسعت و گستره قاعدتاً به

گستردگی و وسعت دسترس‌پذیری خاک به‌عنوان یک ماده پایه طبیعی بازمی‌گردد که ۷۴٪ پوسته زمین را خاک رُس و مواد مناسب برای انجام عملیات معماری خاکی تشکیل می‌دهد (دوتیه، ۱۳۹۲: ۱۴). ازنظر جایگاه استقرار و زمینه نگاه اقلیمی، عمده ساختمان‌های نشات‌گرفته از سازه‌های خاکی؛ در اقلیم‌های گرم و خشک و نیمه استوایی و معتدل دیده می‌شوند (مفاخر، ۱۳۹۵: ۹۹) و در ایران نیز در اقلیم‌های دشت‌های فلات کاربرد وسیعی داشته است (قبادیان، ۱۴۰۰: ۱۰۶-۱۰۸). پراکندگی ساختمان‌ها و معماری خاک در جهان نیز شامل گستره محسوسی در قاره‌های آسیا، آفریقا، جنوب آمریکا و آمریکای جنوبی است که می‌توان تنوع مکانی، تنوع کارکردی و تنوع فرمی را در این مجموعه از بناها مشاهده نمود. نمودار شماره ۱ نگاهی بر پراکندگی وسیع ابنیه در سرتاسر جهان دارد.



نمودار شماره ۱: پراکندگی ساختمان‌ها و معماری خاک پناه در جهان (Daudon et al, 2014)

۱-۲ سابقه شکل‌گیری بلوک‌های خاکی

بلوک خاکی فشرده توسعه فناوری جدیدی است که روش‌های باستانی «آجر خشک‌شده در آفتاب» را با «خاک کوبیده» ترکیب می‌کند. اولین تلاش‌ها برای تولید بلوک‌های خاک فشرده در اوایل قرن نوزدهم در فرانسه انجام شد. معمار مکتب فرانسوی معماری خاک یعنی فرانسوا کوانترو[۷] در یک اقدامی نوآورانه بلوک‌های کوچکی از خاک کوبیده را پیش‌ساز کرد و از کوبه‌های دستی برای فشرده کردن خاک مرطوب به درون قالب‌های چوبی کوچک، استفاده کرد (Burroughs, 2001). اولین پِرِس دستی فولادی نیز نتیجه یک برنامه تحقیقاتی انجام‌شده در ۱۹۵۶ توسط رائول رامیرز[۸] از مرکز خانه‌سازی کلمبیایی اینتر امریکن[۹] بود (Saidi et al, 2018, Head, 2000). این پِرِس می‌توانست بلوک‌هایی با شکل و اندازه منظم و به‌صورت چگالی تر و مستحکم‌تر و مقاوم‌تر در برابر آب نسبت به آجر تولید نماید. از آن به بعد بسیاری از انواع دیگر دستگاه‌ها طراحی شدند و بسیاری از آزمایشگاه‌ها تخصصی‌شده و مهارت یافتند تا خاک‌هایی را شناسایی کنند که برای ساختمان‌سازی مناسب هستند. بسیاری از کشورها در آفریقا و نیز جنوب آمریکا، هند و جنوب آسیا از آن استفاده می‌کرده‌اند. اروپا و آمریکا نیز علاقه‌مندی بسیاری نشان دادند (Pacheco-Torgal et al, 2012). گسترده‌ترین توسعه و اجرای بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده از دهه ۱۹۶۰ به بعد در آفریقا دیده شد (Bell, 1998). تقریباً تمام کشورهای آفریقایی مثال‌هایی از ساختمان‌های بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده[۱۰]، از مسکن‌های اجتماعی گرفته تا کاشانه‌های خاص و ساختمان‌های دولتی دارند. در هند، یکی از اولین مؤسساتی که این فناوری را مورد تحقیق

قرار داده و توسعه داد، مؤسسه تحقیقاتی ساختمانی مرکزی در «رورکی» [11] بود که از دهه ۱۹۷۰ در حال انجام تحقیقات بود (Gomes, 2003). مؤسسه هندی علوم بنگلور نیز تحقیقات زیادی دراین‌خصوص انجام داده است. مؤسسه خاک آرووِیل نیز تحقیقات و توسعه‌های عملی زیادی روی بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده[12] انجام داده و فن‌های مختلفی برای پایدارسازی خاک بکار برده که در سراسر دنیا بکار می‌روند (World Bank, 2011b, BUET, 2007). کشورهای جنوب آسیا نیز زمینه کاری را بسیار توسعه داده و در تایلند تحقیقات اولیه توسط مؤسسه تایلندی تحقیقات علمی و فناوری تایلند[13] در بانکوک در دهه ۱۹۶۰ انجام شد (Bell, 1996) (AVEI, 2009). آن‌ها از پِرس «سین وارام» [14] استفاده کرده و سیستمی برای متصل‌کردن[15] بلوک‌ها به هم توسعه دادند. سریلانکا روزبه‌روز بیشتر از بلوک‌ها استفاده می‌کند و مؤسسه استاندارد سریلانکا، استانداردی برای تولید و استفاده از بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده منتشر کرده است (UNDP, 2005; World Bank, 2011a). نیوزیلند و استرالیا نیز استانداردهایی در ارتباط با فن‌های خاک‌دارند که شامل بلوک‌های خاکی فشرده و پایدار شده است. در آمریکا، ایالت نیومکزیکو استانداردهایی شامل بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده و سایر فن‌های خاک منتشر کرده است (World Bank, 2006; Burroughs, 2001). همچنین در کلرادو، تگزاس و نیومکزیکو نیز از بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده و سایر فن‌های خاک پایدار شده استفاده می‌شود. اروپا نیز شاهد توسعه روزافزون فن‌های خاک است. شبکه‌هایی در آلمان، فرانسه و سوئیس وجود دارد. در فرانسه مرکز بین‌المللی ساختارهای خاکی در حال ترویج بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده و سایر فن‌های خاک است (WorldBank, 2011c). از این نظر می‌توان گفت که استفاده و ترویج بلوک‌های خاکی در سرتاسر جهان رواج داشته و وجود استانداردهای فنی در این حوزه از امتیازات این مصالح به شمار می‌رود.

۳- روش تحقیق

روش تحقیق این پژوهش کیفی و از نوع اسنادی است و فرایند پژوهش به کمک مطالعات کتابخانه‌ای تدوین گردیده است. همچنین ماهیت این پژوهش کاربردی است. سؤال اصلی متمرکز بر بلوک‌های خاکی پایدار شده به‌ویژه بلوک‌های مؤسسه آرووِیل هند و تعیین مختصات فنی آن به کمک مجموعه‌ای از اسناد علمی و فنی تدوین‌شده در مؤسسه آرووِیل هند به‌عنوان یکی از پیشگامان عرصه آموزش معماری خاک در عرصه بین‌الملل است. بر این مبنا؛ دامنه اصلی موضوعی اسناد در این پژوهش شامل بر شناخت مجموعه‌ای از مختصات فنی و آزمایشگاهی فنون مختلف ساخت در معماری خاک به‌ویژه فنون ساخت متکی بر بلوک‌های خاکی پایدار است که در چند سال اخیر میلادی مدون گردیده‌اند. رویکرد انتخاب محتوایی و مرور اسناد نیز متکی بر فرآیندهای اجرایی چرخه‌های آزمایشگاهی مقوم خاک به‌عنوان مصالح ساختمانی و ماده پایه سازنده بلوک‌های خاکی پایدار است. لازم به ذکر است که این بخش اصلی از اسناد مورداستفاده در پژوهش؛ از نوع درون موسسه‌ای به زبان انگلیسی بوده که تاکنون به زبان فارسی برگردان نشده است. متن اصلی مورد استفاده در پژوهش، منبع شماره یک پژوهش و با نام «تولید و استفاده از بلوک های خاکی پایدار:دستورالعمل اقدام" نوشته ساتپریم مائینی[16] در موسسه آموزشی آرووِیل است که نسخه اولیه آن در سال ۲۰۱۰ و نسخه ادیت شده آن در سال ۲۰۱۵ در ۱۳۶ صفحه منتشر شده و در مرداد ماه سال ۱۴۰۱ طی یک سفر آموزشی به هندوستان در اختیار نویسنده اول قرار گرفته است. علاوه بر این بدنه اصلی اسناد؛ مجموعه‌ای از اسناد علمی انگلیسی‌زبان همانند مقالات علمی نیز به‌عنوان اسناد مکمل در بخش‌های ابتدایی پژوهش مورد استناد قرارگرفته است. دامنه زمانی مورد اسناد منتخب پژوهش نیز عمدتاً بر مبنای داده‌های سال ۲۰۰۰ میلادی تا سال ۲۰۲۲ بوده است. تأکید بر سال ۲۰۰۰ میلادی به دلیل رشد محسوس تعداد مقالات علمی حول معماری خاک از این دهه به بعد در سطح بین الملل است. کلیدواژگان محوری در جستجوی اصلی منابع علمی پایه و منابع فنی- آزمایشگاهی نیز شامل بر«معماری خاک»، «بلوک خاکی پایدار»، « مقاوم‌سازی خاک»، «موسسه آرووِیل هند» و به کمک پایگاه های علمی اطلاعاتی همانند درگاه اینترنتی گوگل اسکولار می باشد. روش تحلیل داده‌های گردآوری‌شده نیز مبتنی بر نظم‌بخشی مختصات فنی ذیل پنج محور «اصول فنی و پِرِس کنندگی بلوک»،

«پایدارکننده‌ها و پایدارسازی خاک»، « معیارهای فنی و آزمایشگاهی عنصر خاک»، «محصولات و تجهیزات بلوک خـاک فشرده پایدار» و «محدودیت‌های بلوک خاک فشرده پایدار» در کنار یکدیگر است.

۴- یافته‌های تحقیق: مختصات فنی بلوک‌های خاکی پایدار

۴-۱ اصول فنی و پِرِس کنندگی بلوک

فن را می‌توان به شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی فشرده کرد. خاک پایدار شده کمی مرطوب شده و در قالب ریخته می‌شود و سپس با یک پرس دستی یا برقی فشرده می‌شود (Walker, 1995) (AVEI, 2009). یادآوری می‌شود که ماشین‌آلات مورداستفاده بلوک‌های فشرده خاکی به طور قابل‌توجهی متحول شده‌اند و اکنون هم پرس‌های دستی و هم پرس‌های برقی، واحدهای متحرک و تأسیسات کاملاً یکپارچه موجود می‌باشند (European Commission, 2001) (Mavroulidou et al, 2011). در همین زمینه پایدارکردن خاک اجازه می‌دهد بلوک‌ها استحکام تراکمی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر آب داشته باشند و بنابراین امکان ساختن ساختمان‌های بلندتر باوجود دیوارهای نازک‌تر را مهیا می‌نمایند (Pacheco-Torgal et al, 2012) (Chauhan et al, 2019).

۴-۲ معیارهای فنی و آزمایشگاهی عنصر خاک

خاک، نتیجه تبدیل سنگ مادر و تحت‌تأثیر گستره‌ای از فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که مرتبط با شرایط بیولوژیکی و آب‌وهوایی وزندگی گیاهی و حیوانی است. ویژگی‌های فنی مهم را عموماً با چهار ویژگی بنیادی توصیف می‌کنند. «درجه‌بندی یا بافت» به‌عنوان توزیع اندازه دانه یک خاک، «تراکم‌پذیری» به‌منظور فشرده‌سازی و تطبیق با رطوبت و «شکل‌پذیری»، «چسبندگی». در همین حوزه و به‌منظور «بهبود و پایدارسازی خاک‌ها» می‌توان از ماسه یا شن به‌عنوان یک بهبود ساده استفاده نمود. البته توصیه نمی‌شود که وقتی فرایند طولانی و نتیجه غیرقطعی است؛ خاک رس مخلوط شود. چراکه خاک رس، سخت‌تر از آن است که با دست مچاله شود و باید توسط دستگاه سائیده شود. همچنین می‌توان با الک‌کردن خاک یا با مخلوط‌کردن خاک‌های باکیفیت‌های مختلف، بهبود ایجاد کرد. به‌علاوه، پایدارسازی خاک نیز باعث بهبود آن خواهد شد. هدف اصلی از اعمال این اصلاحات خاک؛ تراکم‌پذیری خوب با داشتن دانه‌بندی مناسب (شن و ماسه) و انتخاب پایدارکننده بر طبق شکل‌پذیری و رفتار خاک است (AVEI, 2009; 2015). جدول شماره ۱، به جزئیات بیشتری از چگونگی بهبود و پایدارسازی خاک می‌پردازد.

جدول شماره ۱: بهبود و پایدارسازی خاک

نوع خاک	مشخصه‌ها و توصیه‌های فنی
شنی	الک‌کردن با شبکه ۸ الی ۱۰ میلی‌متر برای حذف شن‌های درشت الزامی است. حداکثر ۱۵٪ تا ۲۹٪ شن باید مجاز باشد عبور کند. اندازه بیشینه شن‌های عبوری از الک باید ∅10 mm باشد. اگر خاک خیلی شنی باشد، خاک رس بیشتری باید افزوده شود؛ اما رس خالص نباشد. پایدارسازی می‌تواند ۵٪ وزنی سیمان باشد. ۴٪ وزنی سیمان نیز می‌تواند مطلوب باشد اگر محتوای خاک رس به‌اندازه کافی بالا باشد. اگر خاک خیلی شنی باشد، ۶٪ سیمان را می‌توان افزود تا چسبندگی بیشتری بعد از بیرون آوردن به دست آورد.
ماسه‌ای	الک‌کردن با شبکه ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر تنها برای شل کردن و هوادهی خاک موردنیاز است. خاک در مکان خیلی بادی الک نگردد خصوص وقتی خاک خشک است (نه اینکه خاک رس ریز شل است)

	پایدارسازی می‌تواند ۵٪ وزنی سیمان باشد اگر خاک خیلی ماسه‌ای نباشد. اگر خاک خیلی ماسه‌ای باشد، ۶٪ وزنی سیمان بهتر است خصوصاً برای هندل کردن بلوک‌های تازه زیرا باعث افزایش چسبندگی بعد از بیرون کشیدن بلوک‌ها می‌شود. اگر خاک خیلی ماسه‌ای نباشد و خاک رس مناسبی داشته باشد، ۴٪ وزنی سیمان نیز می‌تواند نتایج خوبی ارائه کند.
سیلتی	بسته به وجود یا عدم وجود چسبندگی در سیلت کمی خراشیدن نیاز است. الک‌کردن با شبکه ۱۰ میلی‌متری نیاز است اگر کلوخه‌ها خیلی بزرگ و چسبنده باشند. افزودن ۱۰٪ تا ۲۰٪ ماسه درشت برای اسکلت دهی خاک نیاز است. دقت کنید افزودن ماسه بستگی دارد به‌اندازه سیلت: اگر اندازه دانه سیلت نزدیک به ماسه خیلی ریز است، ماسه نباید اضافه شود؛ زیرا تراکم‌پذیری خاک غیرممکن می‌شود. پایدارسازی باید حداقل ۶٪ وزنی سیمان باشد.
خاک رس	خراش غالباً لازم است و الک‌کردن با شبکه ۵ الی ۸ میلی‌متر لازم است اگر صرفاً خاک خشک باشد. افزودن ۲۰ تا ۴۰٪ ماسه درشت برای کاهش شکل‌پذیری و اسکلت بخشی به خاک لازم است. خاک‌های با بیش از ۴۰٪ خاک رس مناسب نیستند. اصول پایدارسازی: حداقل ۵ تا ۶٪ وزنی سیمان اگر خاک رس خیلی شکل‌پذیر نباشد. ماسه طبق مقدار ذکرشده در بالا اضافه می‌شود. ۶ تا ۷٪ وزنی آهک اگر خاک رس خیلی شکل‌پذیر باشد. کیفیت ماسه بسته به تراکم‌پذیری خاک، ۱۵ تا ۲۵ ٪ کاهش می‌یابد. ترکیبی از سیمان – آهک نیز می‌تواند نتایج خوبی بدهد: ۲٪ سیمان + ۵٪ آهک. هنوز هم ۱۵ تا ۲۵٪ ماسه برای تراکم‌پذیری لازم خواهد بود.
ماسه – شنی	مناسب‌بودن آن بستگی به محتوای سیلت – خاک رس دارد: نباید کمتر از ۲۵٪ باشد. اگر خاک، رُس کافی نداشته باشد، می‌تواند با خاک رسی‌تری ترکیب شود. الک‌کردن با یک ظرف شبکه ۸ تا ۱۰ میلی‌متری برای حذف شن‌های درشت الزامی است. پایدارسازی می‌تواند ۶٪ سیمان باشد، خصوصاً برای هندل کردن بلوک‌های تازه و افزایش چسبندگی.
سیلت – شنی	الک‌کردن با یک ظرف شبکه مانند ۸ تا ۱۰ میلی‌متری برای حذف شن‌های درشت. پایدارسازی می‌تواند ۵ یا ۶٪ سیمان باشد تا چسبندگی بیشتری بعد از بیرون آوردن به آن بدهد.
خاک رس – شنی	الک‌کردن با شبکه ۸ تا ۱۰ میلی‌متری برای حذف شن‌های درشت. افزودن ماسه ریز (۱۰ تا ۲۰٪) لازم است اگر درجه‌بندی آن خیلی دانه‌ای باشد. پایدارسازی می‌تواند با آهک یا سیمان: ۶٪ وزنی باشد.
شن – ماسه‌ای	مناسب‌بودن آن بستگی به محتوای سیلت – رس – دارد. درصد سیلت و خاک رس نباید کمتر از ۲۵٪ باشد. اگر خاک، رس کافی نداشته باشد، باید با خاک دیگری که رس بیشتری دارد ترکیب شود. الک‌کردن با یک ظرف مشبک ۸ تا ۱۰ میلی‌متری برای حذف شن‌های درشت. حداکثر ۱۵٪ تا ۲۰٪ شن مجاز است از الک عبور کند. پایدارسازی می‌تواند ۶٪ وزنی سیمان باشد تا چسبندگی بیشتری بعد از بیرون آوردن به آن بدهد.

سیلت – ماسه‌ای	الک‌کردن با شبکه ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متری تنها برای شل کردن و هوادهی خاک لازم است. پایدارسازی می‌تواند ۵٪ وزنی سیمان باشد اگر خاک خیلی ماسه‌ای نباشد. اگر خاک به‌اندازه کافی چسبنده نباشد، ۶٪ سیمان بهتر است خصوصاً برای هندل کردن بلوک‌های تازه، چراکه باعث افزایش چسبندگی بعد از بیرون آوردن بلوک می‌شود.
خاک رس – ماسه‌ای	الک‌کردن با یک شبکه ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متری برای هوادهی خاک و حذف کلوخه‌های رس. بسته به محتوای خاک رس، افزودن ماسه (۱۰ تا ۲۰٪) لازم است. پایدارسازی می‌تواند با آهک یا سیمان: ۶٪ وزنی باشد.
شن – سیلتی	الک‌کردن با شبکه ۸ تا ۱۰ میلی‌متری برای حذف شن‌های درشت. حداکثر ۱۵٪ تا ۲۰٪ شن عبوری از آن مجاز است. پایدارسازی می‌تواند ۵٪ وزنی سیمان باشد اگر خاک به‌اندازه کافی چسبنده باشد. اگر خاک به‌اندازه کافی چسبنده نباشد، پایدارسازی باید ۶٪ وزنی سیمان باشد خصوصاً برای هندل کردن بلوک.
ماسه – سیلتی	الک‌کردن با شبکه ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متری تنها برای شل کردن و هوادهی خاک لازم است. در فضای خیلی بادی الک نگردد خصوصاً اگر خاک خشک باشد (تا خاک رس ریز شُل نشود). پایدارسازی می‌تواند ۵٪ وزنی سیمان باشد اگر خاک خیلی ماسه‌ای نباشد. اگر خاک خیلی ماسه‌ای باشد، ۶٪ وزنی سیمان بهتر است خصوصاً برای هندل کردن بلوک‌های تازه.
خاک رس – سیلتی	خراشیدن لازم بوده و الک‌کردن با یک شبکه ۵–۸ میلی‌متری درصورتی‌که خاک خشک باشد. افزودن ۱۵ تا ۲۰٪ ماسه درشت برای کاهش شکل‌پذیری و اسکلت دهی لازم است. پایدارسازی می‌تواند به‌صورت زیر باشد: حداقل ۵ تا ۶٪ سیمان اگر خاک رس خیلی شکل‌پذیر نباشد. ۶ تا ۷٪ وزنی آهک اگر خاک رس خیلی شکل‌پذیر باشد. ۲٪ سیمان + ۵٪ آهک نیز می‌تواند نتایج خوبی بدهد.
شن – خاک رس	الک‌کردن با یک شبکه ۸ تا ۱۰ میلی‌متری برای حذف شن‌های درشت لازم است. حداکثر ۱۵٪ تا ۲۰٪ شن عبوری از صفحه مجاز و حداکثر اندازه شن عبوری از الک باید Ø10 mm باشد. افزودن ماسه لازم است اگر درجه‌بندی آن خیلی شکننده است و پایدارسازی می‌تواند ۵٪ وزنی سیمان باشد.
ماسه – خاک رس	الک‌کردن با یک شبکه ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متری تنها برای شُل کردن و هوادهی خاک لازم است. پایدارسازی می‌تواند تا ۵٪ وزنی سیمان باشد.
سیلت – خاک رس	خراشیدن لازم بوده و الک‌کردن با یک ظرف شبکه‌ای ۵–۸ میلی‌متری لازم است. افزودن ۱۵ تا ۲۰٪ ماسه درشت لازم است تا شکل شکل‌پذیری شود و خاک اسکلت دهی شود. پایدارسازی می‌تواند به‌صورت زیر باشد: حداقل ۵ تا ۶٪ سیمان، اگر خاک خیلی شکل‌پذیر نباشد. ۶ تا ۷٪ وزنی آهک اگر خاک رس خیلی شکل‌پذیر باشد. ۲٪ سیمان + ۵٪ آهک نیز می‌تواند نتایج خوبی ارائه کند.

منبع: (Chauhan et al, 2019) (AVEI, 2009; 2015)

۴-۳ پایدارکننده‌ها و پایدارسازی خاک

۴-۳-۱ انواع پایدارکننده و مناسب بودن آن‌ها

پایدارکننده‌ها؛ خاک را استحکام بخشیده و مقاومت آن‌ها در برابر آب را بیشتر می‌کنند. مهم‌ترین پایدارکننده‌ها مورداستفاده در سراسر دنیا آهک و سیمان هستند و کارآمدی آن‌ها برای پایدارسازی تقریباً یک قرن است که اثبات‌شده است. تعداد کمی از پایدارسازهای دیگری وجود دارند که به معرفی آن‌ها پرداخته شده است. قیر که در نقاطی از آفریقا مورداستفاده بود است. اگرچه امروزه به دلیل رنگ و دشواری در کنترل آن خیلی مورداستفاده قرار نمی‌گیرد. خاکستر، نیز مورداستفاده است؛ اما تا حدود کمتری، در کل خاکستر همراه باسیمان و یا آهک مورداستفاده قرار می‌گیرد. تنها خاکستر کلاس C را می‌توان به‌تنهایی بکار برد؛ زیرا حاوی حدود ۲۵٪ آهک (CaO) است.لازم به ذکر است که تولیدات مصنوعی که اغلب مبتنی بر سیلیکون یا پلیمر هستند، کارآمدی آن‌ها در طولانی‌مدت ثابت نشده است.

- **سیمان**

کلسیم سیلیکات موجود در سیمان وقتی با آب ترکیب شود، دستخوش یک واکنش شیمیایی می‌شود. آن‌ها بلوری می‌شوند و یک ماتریس ایجاد می‌کنند با دانه‌های شن و ماسه در خاک که تحرک دارند خصوصاً در خاک رس. مهم‌ترین واکنش سیمان با ذرات داخلی ماسه و شن است. همچنین با خاک رس نیز واکنش شیمیایی دارد؛ بنابراین سیمان برای خاک‌های شن و ماسه‌ای مناسب‌تر است (Chauhan et al, 2019; AVEI, 2015).

جدول شماره ۲:درصد پایدارسازی یک خاک خوب باسیمان

کمینه: ۳٪	متوسط: ۵٪	بیشینه: ۸ تا ۱۰٪ (دارای بیشینه صرفه اقتصادی)

۳٪ کمینه سیمان قابل قبول برای پایدارسازی خاک است؛ زیرا دانه‌های سیمان هم‌اندازه باسیلت هستند. افزودن کمتر از ۳٪ سیمان چسبندگی خاک را کاهش می‌دهد بجای اینکه درواقع آن را پایدار کند؛ زیرا پایدارکننده کافی وجود ندارد. ۵٪ به‌عنوان متوسط نتایج معمولاً خوبی ارائه می‌کند. اگر خاک به‌خوبی درجه‌بندی‌شده باشد ۴٪ نیز می‌تواند نتایج خوبی ارائه کند درواقع درصد بیشینه هیچ‌گونه محدودیت فنی ندارد. هرچه سیمان بیشتری به خاک اضافه شود، بلوک‌ها محکم‌تر می‌شوند خصوصاً ازنظر مقاومت در برابر آب. به‌هرحال، به دلایل اقتصادی ترجیح داده می‌شود مقدار سیمان به ۸ الی ۱۰٪ محدود شود. زیرا افزودن سیمان بیشتر از ۱۰٪ هزینه را افزایش می‌دهد، اما به همان اندازه استحکام را افزایش نمی‌دهد، اما در عوض اثر آن به‌عنوان پایدارکننده افزایش کمتری خواهد داشت (AVEI, 2009; 2015). جدول شماره ۳ مشخصات بهینه یک خاک خوب پایدار شده را نشان می دهد.

جدول شماره ۳:مشخصه‌های بهینه یک خاک خوب برای پایدارسازی باسیمان

توزیع اندازه دانه	شن: ۵۰٪	ماسه: ۵۰٪	سیلت: ۱۵٪	خاک رس: ۲۰٪
شکل‌پذیری		شاخص شکل‌پذیری: Ip=۱۰ تا ۲۰٪		محدوده مایع: WL=۲۰ تا ۳۰٪
محتوای سولفات (بر مبنای SO4): کمتر از ۲٪			ماده آلی (گیاخاک): کمتر از ۱٪	
محتوای کلرات (بر مبنای Cl): کمتر از ۱٪				

- **زمان به‌عمل‌آمدن سیمان**

به‌محض اینکه سیمان شروع به گرفتن نماید، فرایند بلوری‌شدن به مدت ۴ هفته ادامه می‌یابد؛ بنابراین عمل آوردن سیمان به مدت ۴ هفته بسیار مهم است: مخلوط سیمان هرگز به مدت ۴ هفته خشک نمی‌شود.

- **آهک**

آهک یک واکنش پوزولانی با خاک رس دارد که واکنش شکل‌پذیری خاک رس را تغییر می‌دهد؛ بنابراین آهک، گزینه مناسب‌تری برای خاک رس است تا خاک‌های ماسه‌ای. آهک اثرات بیشتری بر آن دسته از خاک‌های رس خواهد داشت

که شکل‌پذیری بالاتری دارند. شکل‌پذیری کائولینیت خیلی تحت‌تأثیر آهک نیست؛ زیرا شکل‌پذیری آن نسبتاً پایین است. ایلت به طور ملایم با آهک واکنش خواهد داد و شکل‌پذیری آن تغییر کمی خواهد داشت. آهک زنده کلسیم اکسید (CaO) را نمی‌توان برای CSEB بکار برد؛ زیرا واکنش اگزوترمیک وقتی هیدراته شود می‌تواند برای کارگران خطرناک باشد. گفته می‌شود که افزودن آهک زنده به‌صورت پودر به خاک رس مرطوب به دلیل واکنش اگزوترمیک آن باعث خشک‌شدن آن می‌شود. اما توصیه نمی‌شود؛ زیرا آهک زنده خیلی تیز است و می‌تواند باعث آسیب شود (Chauhan et al, 2019; AVEI, 2015). آهک قبل از واکنش با کربن‌دی‌اکسیدی، با خاک رس واکنش داده و شکل‌پذیری خاک رس را با تبادل یونی در طی فرایند پوزولانی تغییر می‌دهد؛ بنابراین مهم است یک‌زمان معین برای خاک‌های پایدار شده با آهک را حفظ کنیم تا اجازه دهیم شکل‌پذیری خاک رس تغییر کند. زمان بقای موردنیاز بسته به کیفیت خاک رس موجود در خاک متغیر است: خاک‌های حاوی کائولینیت خیلی تحت‌تأثیر آهک نیستند. زمان بقا را می‌توان کمینه کرد مثل سیمان. خاک‌های حاوی ایلت کمی با آهک واکنش می‌دهند. چون شکل‌پذیری آن‌ها خیلی زیاد نیست، زمان بقا می‌تواند، از ۱۵ دقیقه تا نیم ساعت، کوتاه باشد. مخلوط باید در طی زمان یاد شده پوشانده شود تا مانع تبخیر گردد. همچنین، بایستی توجه داشت که این زمان نشانگر وجود تغییرات خیلی زیادی در کیفیت خاک رس و خاک است، به‌طوری‌که نمی‌توان قوانین ثابتی برای آن ارائه کرد (AVEI, 2009; 2015).

- **تنظیم زمان و دوره عملیات آهک**

واکنش دوم با آهک، کربنی شدن است که به معنی واکنش بین کلسیم موجود در آهک و کربن‌دی‌اکسیدی موجود در هواست. این فرایند تنها وقتی رخ می‌دهد که آهک خشک‌شده باشد. واکنش کلسیم کربنات تولید می‌کند که مؤلفه اصلی سنگ‌آهک مورداستفاده برای تولید آهک است. فرایند خیلی کُند است؛ اما علی‌رغم آن، مخلوط‌های آهک – خاک به‌سرعت خشک نمی‌شوند؛ زیرا واکنش پوزولانی شدن برای کامل‌شدن نیاز به زمان دارد. درباره برخی خاک‌های رس خاطرنشان می‌شود که اگر فرایند کربنی شدن خیلی زود شروع شود، می‌تواند فرایند پوزولانی شدن را کُند کرده و یا متوقف کند. عملیات اولیه مشابه باسیمان است؛ اما کمی کوتاه‌تر است. خاک‌های پایدار شده با آهک نباید در طی حداقل ۱ تا ۲ هفته بعد از تولید خشک شوند. بعدازآن می‌توانند راحت خشک شوند. فرایند تنظیم‌شده با کربنی شدن شروع می‌شود. توجه داشته باشید که زمان عملیات مرطوب موردنیاز برای خاک‌های پایدار شده با آهک می‌تواند توانایی‌های قابل توصیفی داشته باشد. بعدازاین مدت، بلوک‌ها کنار گذاشته می‌شوند تا خشک شوند. فرایند سفت‌شدن کامل به مدت چندین ماه ادامه می‌یابد؛ اما با سرعت پایین‌تر (Chauhan et al, 2019; AVEI, 2015).

- **محاسبات پایدارسازی**

هدف آن تعریف درصد پایدارکننده و مقادیر مصالح مختلف آن در مخلوط است. محاسبات همیشه بر مبنای وزن مواد خشک انجام می‌شوند. چون اندازه‌گیری وزن‌ها در محل غیرممکن است، آن‌ها را باید تبدیل به حجم کرد. برای همین لازم است چگالی خشک، δ، را نیز بدانیم. فرمول‌ها برای تمام انواع پایدارکننده‌ها بکار می‌روند. مصالح به‌صورت خاک یا (خاک+شن) یا (خاک+ماسه) و غیره در نظر گرفته می‌شوند. درصد کل مصالح همیشه ۱۰۰٪ است؛ زیرا چسب هیچ‌وقت محاسبه نمی‌شود: درصد پایدارکننده بر مبنای مخلوط کل خاک و شن محاسبه می‌شود (Chauhan et al, 2019; AVEI, 2015). جدول شماره ۴ مختصات فنی محاسبات پایدارسازی را نشان می دهد و جدول شماره ۵ روش و جزئیات اجرای روش را نشان می دهد.

جدول شماره ۴: مختصات فنی محاسبات پایدارسازی

۱-چگالی (δ) = وزن بر لیتر
۲-وزن کل تئوری مصالح = وزن پایدارکننده لازم x (۱۰۰ منهای ٪ پایدارکننده لازم) /٪ پایدارکننده لازم
۳-حجم تئوری مصالح دانه‌ای= وزن تئوری مصالح دانه‌ای x (٪ مصالح خاص)/ چگالی مصالح خاص X ۱۰۰
۴-درصد دقیق پایدارکننده= وزن پایدارکننده لازم x ۱۰۰/ وزن کل

جدول شماره ۵: روش و جزئیات اجرای روش

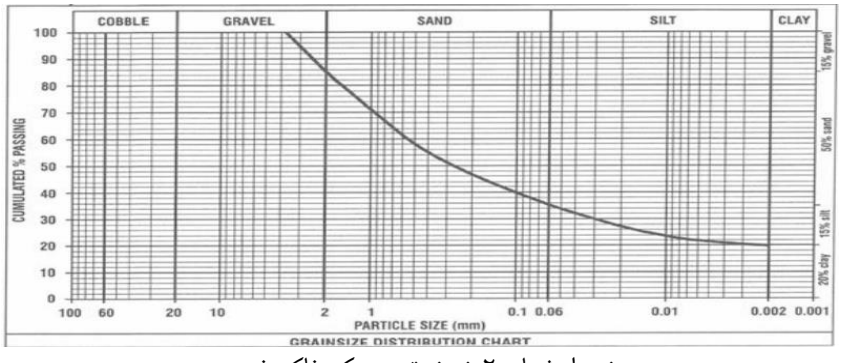
۱-پارامترها را تعریف می‌کنیم... نوع پایدارکننده، درصد و وزن پایدارکننده موردنیاز (وزن سیمان برای حداکثر ۲۵۰ لیتر از مصالح باید محاسبه شود. ۵٪ غالباً متناظر با حداکثر ۳/۱ یک کیسه به ازای هر مخلوط است). درصد ماسه، شن و سایر مصالح که شاید لازم شود افزوده شوند. حجم برحسب لیتر ظروف در دسترس (فرغون، سطل و غیره). معیار چگالی هر یک از مصالح برابر با وزن یک لیتر چک می‌گردد (فرمول ۱)
۲-وزن کل تئوری مصالح... وزن کل تئوری مصالح موردنیاز برای به دست آوردن درصد پایدارکننده موردنیاز محاسبه می‌گردد (فرمول ۲)
۳-تبدیل وزن به حجم... وزن تمام مصالح را به حجم تئوری تبدیل کنید (فرمول ۳)
۴-تقریب... حجم تئوری مصالح را طبق ظروفی که در محل در دسترس هستند تقریب زده می‌شود: هدف؛ تعریف اندازه‌گیری عملی و یک فرایند دقیق در محل است
۵-درصد دقیق پایدارکننده... درصد دقیق پایدارکننده را طبق وزن تقریبی مصالح (فرمول ۴) محاسبه می‌کنیم
۶-انتخاب... نتیجه را انتخاب می‌نماییم اگر در حیطه تقریباً ۳٪ بیشینه مقدار درصد پایدارکننده لازم است (یعنی ۴.۸۵ تا ۵.۱۵ بجای ۵٪)
۷-به‌کارگیری... اگر نتیجه رضایت‌بخش نباشد، کل فرایند را با تقریب دیگری از حجم یا با پارامترهای دیگری تکرار کنید.

- توزیع اندازه دانه

نمودارهای توزیع اندازه دانه زیر، درجه‌بندی خاک‌های مختلف و محدودیت‌های خاک که باید باسیمان یا آهک پایدارسازی شوند، را نشان می‌دهند. نمودارها باوجود نتایج ترکیبی الک‌کردن نمناک و آزمون‌های ته‌نشینی ترسیم‌شده‌اند.

- خاک خوب برای بلوک خاک فشرده پایدار شده باسیمان

خاک‌نشان داده شده در نمودار شماره ۲ خاک خوب ارزیابی‌شده است؛ زیرا حاوی ۱۵٪ شن، ۵۰٪ ماسه، ۱۵٪ سیلت و ۲۰٪ خاک رس است. اکنون خاک برای CSEB پایدار شده باسیمان ایدئال است (AVEI, 2009; 2015).

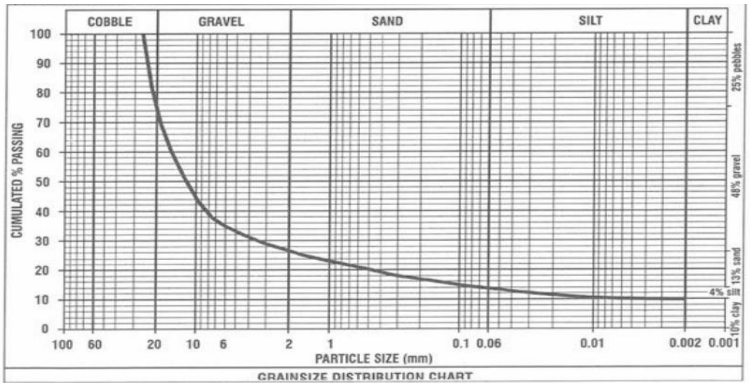


نمودار شماره ۲: نمونه توزیع یک خاک خوب

- خاک شنی

خاک‌نشان داده شده در نمودار شماره ۳ حاوی ۲۵٪ قلوه‌سنگ[۱۸]، ۴۸٪ شن، ۱۳٪ ماسه، ۴٪ سیلی‌ات و ۱۰٪ خاک رس است. ترکیب موجود خیلی برای بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده مناسب نیست و آن را می‌توان با الک کردن با شبکه ۶

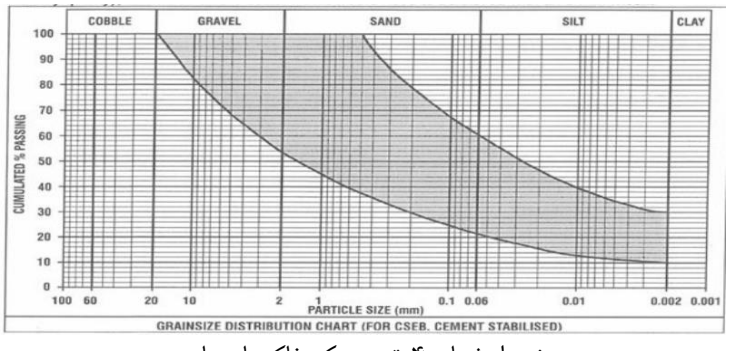
میلی‌متری اصلاح کرد. اما مقدار زباله آن زیاد است زیرا ۶۵٪ دانه‌ها بالای ۶ میلی‌متر هستند؛ بنابراین خاک نهایی برای بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده مناسب نیست (AVEI, 2009; 2015).



نمودار شماره ۳: توزیع خاک شنی

- محدوده‌های درجه‌بندی یک خاک برای CSEB پایدار شده باسیمان

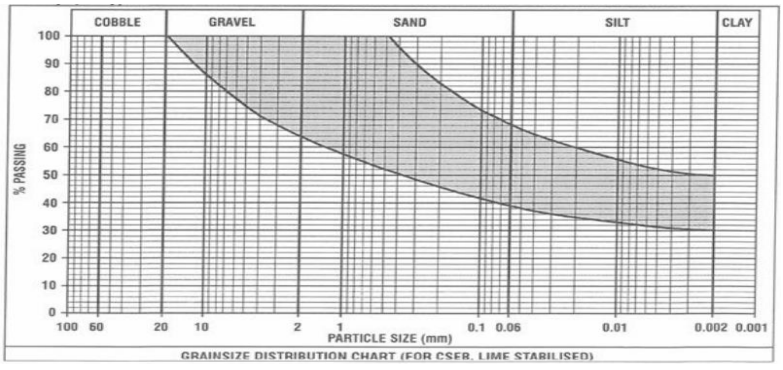
کران بالا شن ندارد، ۴۰٪ ماسه، ۳۰٪ سیلت و ۳۰٪ خاک رس دارد. کران پایین ۴۶٪ شن، ۳۲٪ ماسه، ۱۲٪ سیلی‌ات و ۱۰٪ خاک رس دارد. هرگونه خاک بین این منحنی‌ها برای تولید CSEB پایدار شده باسیمان مناسب است. اگرچه خاک کران بالا نیازمند افزودن ماسه (۱۰٪ تا ۲۰٪ بسته به کیفیت خاک رس) و خاک در کران پایین نیازمند الک‌شدن با یک شبکه ۸ میلی‌متری است (AVEI, 2009; 2015). نمودار شماره ۴ نمونه‌ای از توزیع یک خاک باسیمان به‌عنوان یک ماده پایدارکننده را نشان می‌دهد.



نمودار شماره ۴: توزیع یک خاک باسیمان

- محدوده‌های درجه‌بندی یک خاک برای بلوک خاک فشرده پایدار شده با آهک

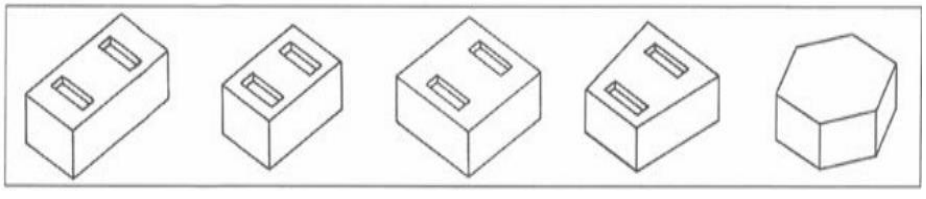
کران بالا شن ندارد، ۳۲٪ ماسه، ۱۸٪ سیلی‌ات و ۵۰٪ خاک رس دارد. کران پایین ۳۶٪ شن، ۲۶٪ ماسه، ۸٪ سیلت و ۳۰٪ خاک رس دارد. هرگونه خاک بین این منحنی‌ها برای تولید خاک بلوک‌های خاک فشرده پایدار شده پایدار شده با آهک مناسب است. اگرچه خاک در کران بالا نیازمند افزودن ماسه (۱۵٪ تا ۲۰٪ بسته به کیفیت خاک رس) و خاک در کران پایین نیازمند الک‌شدن با شبکه ۱۰ میلی‌متری است (AVEI, 2009; 2015). نمودار شماره ۵ نمونه‌ای از توزیع یک خاک با آهک به‌عنوان یک ماده پایدارکننده را نشان می‌دهد.



نمودار شماره ۵: توزیع خاک با آهک

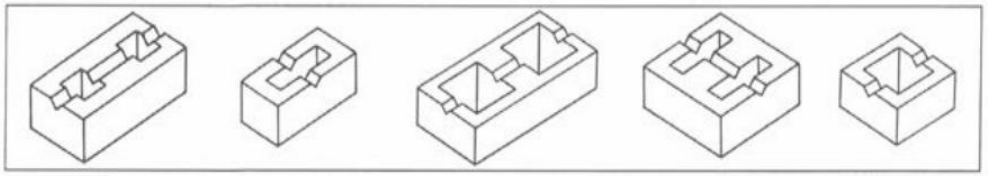
۲-۳-۴ محصولات و تجهیزات بلوک خاک فشرده پایدار

بلوک خاک فشرده پایدار را می‌توان به انواع، شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی فشرده کرد. انواع بلوک برای استفاده‌های خاصی در ارتباط با یک سیستم ساختاری/ بنایی طراحی شدند. چهار نوع اصلی بلوک‌ها را می‌توان تشخیص داد. بلوک‌های صلب، حفره‌دار، هم‌بند و ویژه. بلوک‌های صلب (توپر) را می‌توان برای حمل بار بنایی تا ۳ یا ۴ طبقه، بسته به طراحی ساختمان و کیفیت بلوک مورداستفاده قرارداد. بلوک‌های صلب معمولاً شکل مستطیلی دارند؛ اما می‌توانند مربع، ذوزنقه یا چندضلعی نیز باشند (AVEI, 2009; 2015).مصادیق بلوک‌های صلب را می‌توان در تصویر شماره ۴ مشاهده نمود.



تصویر شماره ۴: بلوک‌های صلبی

بلوک‌های حفره‌دار را نیز می‌توان برای تحمل بار بنایی بکار برد؛ اما برای بناهای با ارتفاع کم. آن‌ها ویژگی‌های عایق بهتری دارند. آن‌ها نیز به شکل مستطیلی یا مربعی هستند. نمونه بلوک‌های حفره‌دار را می‌توان در تصویر شماره ۵ مشاهده نمود.

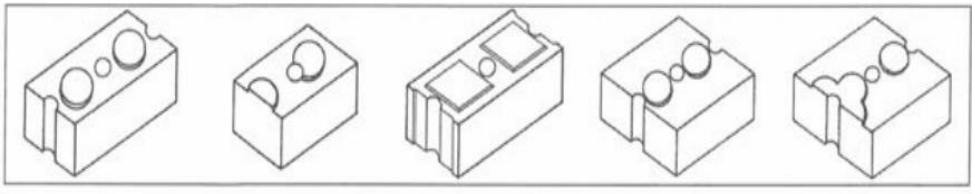


تصویر شماره ۵: بلوک‌های حفره‌دار

بلوک‌های هم‌بند می‌توانند صلب یا حفره‌دار باشند. بلوک‌های صلب را می‌توان سریع‌تر با کارگران کم‌مهارت تولید نمود؛ اما آن‌ها را نمی‌توان در نواحی لرزه‌ای بکار برد. بلوک‌های هم‌بند حفره‌دار تنها برای مقاومت در برابر بلایا به کار خواهند رفت؛ زیرا آن‌ها امکان تقویت‌شده با بتن تقویتی رادارند. آن‌ها نیز می‌توانند به شکل مستطیلی یا مربعی در دسترس باشند. نمونه بلوک‌ها را می‌توان در تصویر شماره ۶ مشاهده نمود.

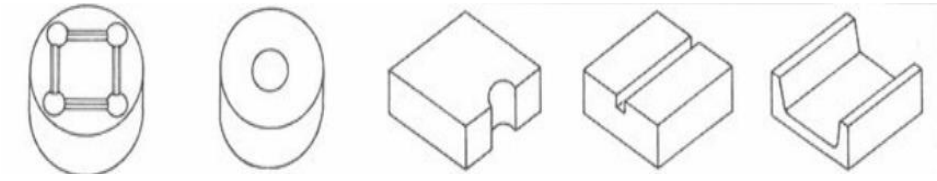
بلوک‌های هم‌بند می‌توانند صلب یا حفره‌دار باشند. بلوک‌های صلب را می‌توان سریع‌تر با کارگران کم‌مهارت تولید نمود؛ اما آن‌ها را نمی‌توان در نواحی لرزه‌ای بکار برد. بلوک‌های هم‌بند حفره‌دار تنها برای مقاومت در برابر بلایا به کار خواهند

رفت؛ زیرا آن‌ها امکان تقویت‌شده با بتن تقویتی رادارند. آن‌ها نیز می‌توانند به شکل مستطیلی یا مربعی در دسترس باشند. نمونه بلوک‌ها را می‌توان در تصویر شماره ۶ مشاهده نمود.

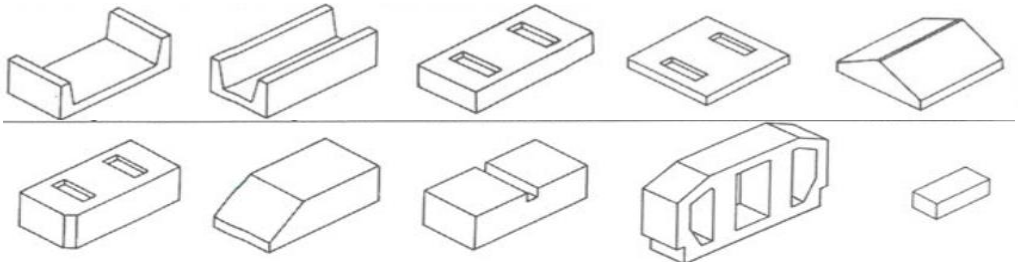


تصویر شماره ۶: بلوک‌های هم‌بند

بلوک‌های ویژه برای اهداف مختلف مثل بلوک‌های گرد حفره‌دار برای ستون‌ها، بلوک‌های دندانه‌گذاری برای مقرر کردن مجراهای برقی، بلوک‌های U شکل برای ریخته‌گری ستون‌های حلقه‌ای، بلوک‌های ظریف‌تر برای ساختن قبه‌ها و گنبدها، کاشی‌های کف، بلوک‌های هوردی[۱۹] برای کف و سقف و غیره بکار می‌روند. بلوک‌های ویژه اغلب توسط ملاط پایه با انواع مختلف تعبیه می‌شوند و در قسمت‌های مختلف ساختمان مورداستفاده‌اند (AVEI, 2009; 2015). تصاویر شماره ۷ و ۸ جزئیات این بلوک‌های ویژه را نشان می دهند.



تصویر شماره ۷: بلوک‌های ویژه- نمونه اول



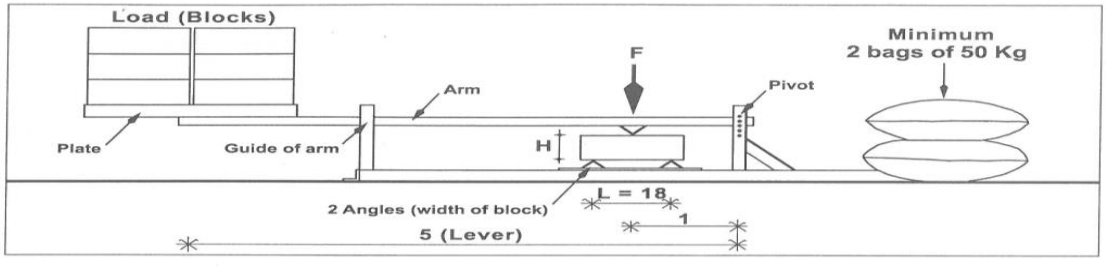
تصویر شماره ۸: بلوک‌های ویژه- نمونه دوم

۳-۳-۴ تستر بلوک میدانی و دستورالعمل آن

تستر بلوک میدانی اورام به‌منظور بررسی مقاومت نهایی بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده فشرده طراحی‌شده است. آزمون همچنین آزمون میدانی ۳ امتیازی نامیده می‌شود و می‌تواند مقاومت خمشی نهایی (O'b) و مقاومت فشاری نهایی (O'c) را نشان دهد. بلوک‌ها باید در حالت خشک آزمون شوند (AVEI, 2015).

چگونگی استفاده از تستر بلوک میدانی:

نحوه استفاده و جزئیات مهندسی استفاده از تستر بلوک میدانی در تصویر شماره ۹ نشان‌داده‌شده است.



تصویر شماره ۹: نحوه استفاده و جزئیات مهندسی استفاده از تستر بلوک میدانی

جدول شماره ۶ نحوه محاسبه مقاومت بلوک را نشان می دهد.

جدول شماره ۶: به دست آوردن مقاومت بلوک از طریق فرمول

فرمول ۱ نیروی اعمال‌شده بر بلوک (کیلوگرم)	فرمول ۲ مقاومت کششی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	فرمول ۳ مقاومت نهایی فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)
F = (بار روی صفحه + ۸.۵) x 5	$\sigma_b = \frac{3.F.L}{2W.H^2}$	$\sigma_c = \frac{F.L}{1.56W.H}\sqrt{1+\frac{L^2}{4H^2}}$
که: F = نیروی اعمال‌شده بر روی بلوک [کیلوگرم] بار روی صفحه = تعداد بلوک‌ها x وزن متوسط یک بلوک ۸.۵ کیلوگرم = وزن صفحه آزمون بلوک میدانی اورام ۵ = ضریب برای اهرم تستر بلوک میدانی اورام L =فاصله تکیه‌گاه‌ها 18 = [cm] سانتی‌متر برای تستر بلوک میدان اورام W= عرض بلوک سانتی‌متر H] = ارتفاع بلوک] سانتی‌متر ۱.۵۶ = ضریب مربوط به ارتفاع بلوک [سانتی‌متر]		توجه: نسبت ۱.۵۶ مربوط به ماده نیست، بلکه مربوط به نسبت بلوکی است که باید نسبت زیر را داشته باشد: H≥ ۰.۲۳/طول بلوک ≥ ۰.۶۲ بنابراین، حداقل ارتفاعی که می‌توان برای بلوک‌های اورام۲۰ آزمایش کرد: - ۵.۶ سانتی‌متر برای بلوک‌های ۲۴۰ - ۶.۷ سانتی‌متر برای بلوک‌های ۲۹۰

منبع: (AVEI, 2009; 2015)

جدول شماره ۷: ابعاد بلوک نسبت به بار وارده

ارتفاع بلوک (سانتی‌متر)	بلوک ۲۹۰ (۲۹× ۱۴ سانتی‌متر)		بلوک ۲۴۰-۴/۴ (۲۴ ×۲۴ سانتی‌متر)		بلوک ۲۴۰-۱/۲ (۲۴ × ۱۱.۵ سانتی‌متر)	
	بار روی صفحه (کیلوگرم)	نیروی روی بلوک (کیلوگرم)	بار روی صفحه (کیلوگرم)	نیروی روی بلوک (کیلوگرم)	بار روی صفحه (کیلوگرم)	نیروی روی بلوک (کیلوگرم)
۱۰	۵۰	۲۹۲.۵	۸۵	۴۶۷.۵	۴۰	۲۴۲.۵
۹	۴۰	۲۴۲.۵	۷۰	۳۹۲.۵	۳۰	۱۹۲.۵
۸	۳۰	۱۹۲.۵	۵۵	۳۱۷.۵	۲۰	۱۴۲.۵
۷	۲۰	۱۴۲.۵	۴۰	۲۴۲.۵	۱۵	۱۱۷.۵

۴-۳-۴ محدودیت‌های بلوک خاک فشرده پایدار

بلوک خاک فشرده پایدار مزایای زیادی در مقایسه با اغلب مواد ساختمانی، خصوصاً آجرهای کوره‌پز دارد. بااین‌وجود، مهم‌ترین محدودیت‌های آن مربوط به فقدان آگاهی مردم و نامناسب‌بودن خاک است. ازجمله دیگر محدودیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱. فقدان خاک مناسب در محل یا در نواحی نزدیک ۲. شناسایی خاک مناسب الزامی است؛ زیرا تمام انواع خاک را نمی‌توان مورداستفاده قرارداد ۳. کیفیت بد یا تجهیزات نامناسب برای تولید بلوک‌ها ۴. فقدان آگاهی از نیاز به مدیریت منابع در مصالح ۵. گروه آموزش ندیده که تولیدات باکیفیت پایین تولید می‌کنند ۶. طراحی مناسب و ویژه برای پل‌های وسیع یا ساختمان‌های بلند الزامی است ۷. عملکرد فنی پایین‌تر در مقایسه با بتن ۸. پایدارسازی بیش‌ازحد به دلیل ترس یا نادیده گرفتن که منجر به هزینه‌های بالا می‌شود ۹. پایدارسازی کم که منجر به تولیدات باکیفیت بسیار

پایین می‌شود (AVEI, 2015). تصاویر شماره ۱۰ و ۱۱ بیانگر آموزش کار با دستگاه تولید بلوک خاکی و نمونه بلوک‌های خاکی پایدار موسسه آرووِیل هستند.

تصویر شماره ۱۰: بلوک تثبیت‌شده خاک فشرده (مؤسسه آرووِیل ۲۰۲۲)

تصویر شماره ۱۱: آموزش عملی با دستگاه تولید بلوک آرووِیل تصویر شماره

۵- نتیجه‌گیری

فنون و روش‌های ساخت در معماری خاک یکی از مهم‌ترین اضلاع مهندسی و کاربردی معماری خاک است و روی‌آوری به تقویت و مقاومت فنون به کمک روش‌های مرسوم آزمایشگاهی در سرتاسر جهان شناخته‌شده و متداول است. در این میان، بلوک‌های خاکی پایدار شده، یکی از مصالح نوآور در معماری نوین خاک است که مؤسسه آرووِیل هند در سال‌های اخیر مجموعه تلاش‌های گسترده‌ای را به‌منظور ارائه دستورالعمل‌های ویژه فنی این بلوک‌ها و نیز تولید بلوک‌ها به عمل‌آورده است. بر این مبنا، پژوهش حاضر به موضوع بلوک‌های خاکی پایدار شده به‌ویژه بلوک‌های خاکی پایدار مؤسسه آرووِیل هند و دستورالعمل‌های ویژه مربوط به آن می‌پردازد. از منظر تعریف جایگاه بلوک‌های خاکی؛ بلوک‌های خاکی پایدار بی‌ارتباط با مصالح ساختمانی و جایگاه خاک در پیشینه کهن معماری خاک نیست و هر دو پیوندهایی باهم دارند. مروری بر سابقه شکل‌گیری و استفاده از فناوری بلوک خاکی نیز نشان می‌دهد که توسعه اولیه آن توسط مکتب عمل‌گرا فرانسوی معماری خاک و با حضور معماران پیش‌گامی همانند فرانسوا کوانترو بوده و زمینه‌های استقرار آن تدریجاً در تمامی مناطق جهان ازجمله هندوستان نشر داشته است. فناوری «بلوک خاک فشرده پایدار» همانند سایر مصالح خاک مبنا دارای مجموعه‌ای از مزایا و محدودیت‌ها و نیز یک دسته از آزمایش‌های فنی همانند آزمون‌های پایداری و تراکم‌پذیری است. از منظر فنی؛ بلوک‌ها می‌بایستی ازلحاظ تقویت مقاومت آزمایشگاهی توسط چند نوع آزمون عملی همانند تعیین درجه‌بندی خاک جهت تعیین توزیع اندازه دانه خاک، تراکم‌پذیری، فشرده‌سازی، تطبیق با رطوبت و شکل‌پذیری ارزیابی گردد. همچنین، در ساختار بلوک‌ها می‌توان از ماسه یا شن به‌عنوان یک بهبود ساده استفاده نمود. مجموعه عملیات را می‌توان به تفکیک نوع خاک مورداستفاده همانند «شنی»، «ماسه‌ای»، «خاک رس – شنی»، «شن – خاک رس»، «خاک رس – سیلتی» انجام داد که لازمه آن انجام ترکیبات معینی همانند الک‌کردن و تدقیق ابعاد و اندازه‌ها به‌منظور مخلوط سازی مطلوب است. «آزمون کوزه» و «آزمون تراکم‌پذیری» دو نمونه از آزمایش‌های توصیه‌شده

بدین منظور است. همچنین می‌بایستی برای بهبود از پایدارکننده‌های خاک مثل آهک و سیمان نیز به‌منظور استحکام بیشتر خاک استفاده نمود تا مقاومت آن در برابر آب به‌عنوان یکی از نقاط ضعف استفاده خام از خاک ارتقا یابد. ازنظر قابلیت استفاده، بلوک‌های خاک فشرده پایدار می‌توانند در ابعاد و اندازه‌های گوناگون تولید و در فونداسیون، دیوارها، تیرها و سقف‌ها باتوجه‌به بار وارده مورداستفاده قرار گیرند. به‌عنوان نمونه، بلوک‌های حفره‌دار، بلوک‌های هم بند، بلوک‌های ویژه سه نوع از بلوک‌های مرسوم تولیدشده به ترتیب با اهداف مختلفی همانند تحمل بار بنا، مقاومت بخشی در برابر بلایای طبیعی، و استفاده در ستون‌ها و بخش‌های مختلف سازه ساختمان استفاده می‌شوند. عملکرد فنی پایین‌تر مصالح در مقایسه با بتن، لزوم رعایت الزامات مهندسی و نیز معضل دوگانه «پایدارسازی بسیار کم» یا «پایدارسازی بسیار زیاد» نیز از دیگر ملاحظات استفاده بلوک‌ها است. درمجموع، توجه ویژه و رجوع به مجموعه آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های موجود در سطح جهانی می‌تواند زمینه‌های بسط و استفاده از آن را در داخل کشور به‌مراتب تقویت نماید. به‌طورکلی، بلوک‌های خاکی پایدار نیازمند توجه بیشتر علمی و نیز تدوین آیین‌نامه‌هایی خاصی ناظر بر کشور ایران به‌منظور تقویت جایگاه و تقویت پذیرش عمومی استفاده از آن در بین عموم مردم و اقلیم‌های مستعدی همانند اقلیم شهر یزد است. دستاوردی که می‌تواند موجب تقویت مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان شده و ارتقای پذیرش عمومی استفاده از مصالح نوینی همانند بلوک‌های خاکی پایدار و فشرده‌شده همانند سایر کشورهای پیشرو جهان همانند کشور هندوستان باشد. در همین راستا؛ توجه و کاربرد عملی آزمایش‌ها و آزمون‌های فنی ارجاع شده در مقاله نیز می‌تواند عملاً کاربردهای بلوک‌ها را توسعه و ارتقا دهد. ذکر نکته پایانی نیز خالی‌ازلطف نیست که استناد کنونی ما به فناوری بلوک خاکی ازآن‌جهت که در سطح جهانی به سطحی از تولید مناسب در مقیاس انبوه دست‌یافته می‌تواند جایگزین مناسبی برای مصالح صنعتی همانند بتن و فلز در صنعت ساخت‌وساز اعم از ساخت‌وسازهای شهری و روستایی باشد؛ بنابراین محقق‌شدن آن دور از دسترس نیست و می‌توان در افق‌های نزدیک و یا میان‌مدت بدان دست‌یافت.

پی‌نوشت‌ها

۱. Earth Architecture
۲. CSB
۳. Auroville Earth Institute, 1989
۴. CSEB
۵. Craterre
۶. ABC Terra
۷. Francois Cointreau
۸. Raul Ramirez
۹. CINVA
۱۰. CSEB
۱۱. Roorkee
۱۲. CSEB
۱۳. TISTR
۱۴. Cinvaram
۱۵. Interlocking
۱۶. Satprem Maïni
۱۷. Jar
۱۸. Cobble
۱۹. hourdi
۲۰. Aurum

منابع

۱. مفاخر، فرشاد (۱۳۹۵). *معماری خاک، فن‌آوری نوین ساخت با خاک محل*، تهران: نشر آقای کتاب، چاپ اول.
۲. قبادیان، وحید (۱۴۰۰). *تحلیل اقلیمی ساختمان‌های پایدار سنتی در ایران*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ یازدهم.

۳.دوتیه، ژان (۱۳۹۲). *معماری خاک یا آینده سنتی هزاران ساله*، ترجمه محمد احمدی‌نژاد، اصفهان: نشر خاک، چاپ دوم.
4. Auroville Earth Institute (AVEI). Production and use of compressed stabilised earth blocks, Code of practice, Ref, TM 06. Auroville Earth Institute. BY Satprem Maini.Auroshilpam.Auroville, India. 605 101, (AVEI); 2015.
5. Auroville Earth Institute (AVEI). ***Earth as a Raw Material***. UNESCO Chair EarthenArchitecture; 2009.Available:http://www.earth-auroville.com/maintenance/uploaded_pics/1-earth-raw-material-en.pdf
6. Reddy, B. V., & Kumar, P. P. (2010). Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. ***Energy and Buildings***, 42(3), 380-385.
7. Bell FG. Lime stabilization of clay minerals and soils. ***Journal of Engineering Geology***. 1996;42(4):223-37.
8. Bell FG. Stabilization and treatment of clay soils with lime. ***Journal of Ground Engineering***. 1988;21(1):10-15.
9. Burroughs VS. **Quantitative criteria for the selection and stabilization of soils forrammed earth wall construction**. PhD dissertation, Faculty of the Built Environment, University of New South Wales, Sydney, Australia; 2001.
10. Ching, F. D., Jarzombek, M. M., & Prakash, V. (2017). **A global history of architecture**. New Jersey: John Wiley & Sons.
11. Daudon, D., Y. Sieffert, O. Albarracín, L. G. Libardi, and G. Navrta. 2014. **Adobe construction modeling by discrete element method: First methological steps**. 4th International Conference on Building Resilience. Procedia Economics and Finance 18:247–254. Doi: 10.1016/S2212-5671(14)00937-X.
12. Department of Chemical Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET). **Small study on air quality of impacts of the North Dhaka brickfield cluster by modelling of emissions and suggestions for mitigation measures including financing models**; 2007.
13. European Commission (EC). Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques (BREF) in the Cement and Lime Manufacturing Industries; 2001.
14. Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. ***Construction and building materials***, 29, 512-519.
15. Gomes E, Hossain I. Transition from traditional brick manufacturing to more sustainable practices. ***Energy for Sustainable Development***. 2003;7(2):66-76.
16. Head KH. Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 1, London: Pentech Press, UK; 2000.
17. Lee, S. (2022). Flood- resilient earthen construction technology: when earth meets fabric, Earth USA.
18. Saidi, M., Cherif, A. S., Zeghmati, B., & Sediki, E. (2018). Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. ***Construction and Building Materials***, 167, 566-577.
19. Marsh, A. T., & Kulshreshtha, Y. (2022). The state of earthen housing worldwide: how development affects attitudes and adoption. ***Building Research & Information***, 50(5), 485-501.
20. Mavroulidou M, Murawski M, Hussain AH**. Properties of concrete with low energy demanding binders. Proceedings of the12th International Conference on Environmental Science and Technology,** Rhodes, Greece, September 8-10, 2011; A1218-A1225.

21. Chauhan, P., El Hajjar, A., Prime, N., & Plé, O. (2019). Unsaturated behavior of rammed earth: Experimentation towards numerical modelling. ***Construction and Building Materials***, 227, 116646.
22. Taylor, P., Fuller, R. J., & Luther, M. B. (2008). Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. ***Energy and buildings***, 40(5), 793-800.
23. Sudhakar MR, Shivananda P. Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. ***Geotechnical and Geological Engineering*****.** 2005;23(1):79-85.
24. The World Bank (WB). ***Alternative cleanerbrick making technologies***. Proposed technology diversification program. BTOR, Internal document; 2011.
25. The World Bank (WB). ***Bangladesh Country environmental analysis***. Health Impacts of Air and Water Pollution in Bangladesh. 2006;2. Report No. 36945-BD.
26. The World Bank (WB). ***Energy Sector Management Assistance Program(ESMAP).Introducing Energy-efficient clean technologies in the Brick sector of Bangladesh***; 2011. Report no. 60155-BD.
27. The World Bank. ***Improving kiln efficiency in the brick making industry in Bangladesh***. Project Design Document Form; 2011. CDM-SSC-PDD. Version 04/03/11.
28. United Nations Development Programme-Global Environment Facility (UNDP–GEF). ***Improving Kiln Efficiency for the Brick Making Industries in Bangladesh***. 2005; Project Fact Sheet - PDF B Phase (UNDP- GEF-BGD/04/014, 2005), UNDP/GEF.
29. Walker PJ. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. ***Cement and Concrete Composites***. 1995;17(4):301-10.

Designing and Planning in Architecture and Urbanism
Volume:2, Issue:1
DOI:

Stabilized Earth Blocks: Innovative Materials in Modern Earthen Architecture

Amirreza Sadeghian [1]
Roxana Abdollahi [2] (corresponding author)
Ali Akbari [3]
Mehrdad Javidinejad [4]

Abstract:

Earthen architecture, with its long history, still requires reflection and innovation in various areas such as technology, engineering, and laboratory testing. The current research focuses on stabilized earth blocks recognized as innovative materials in earthen architecture. Using technical specifications and laboratory tests, this study introduces them as a new approach to enhancing earthen architecture and its materials. The research methodology employed qualitative methods, relying on scientific and laboratory documents, along with library studies. These investigations demonstrate the considerable potential for development and improvement in earthen architecture, with stabilized earth blocks emerging as effective innovations in this field. Stabilized earth blocks, produced using the compressed earth block method, are considered among the most advanced products in earthen architecture. They utilize soil requiring technical processes like compression, stabilization, and various tests such as the jar test and compaction test. These blocks exhibit suitable flexibility and adhesive strength, enabling production in different dimensions for use in foundations, walls, beams, and ceilings of buildings. The advantages of these blocks include the advancement of earthen architecture both technically and practically, fostering new technology in the field. The importance of technical testing and production stages of these products is emphasized in the article, highlighting their potential impact on the development and improvement of these innovative materials nationwide.

Keywords: Earthen architecture, compressed earth blocks, technical and engineering tests, Arvind Institute of Earth

1 Department of Architecture, Professor Hesabi Branch, Islamic Azad University, Tafresh, Iran.
2 Department of Architecture, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran. (email: archroxa@gmail.com)
3 Department of Architecture, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4 Department of Architecture, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.