



روش‌های تشخیص دانه‌بندی و رطوبت بهینه خاک در ساختارهای خاکی به شیوه خاک کوبیده

سمیه امیدواری* فاطمه فقیه خراسانی**

چکیده

خاک یکی از قابل دسترس‌ترین مصالح طبیعی است که به صورت بسیار ارزان در بسیاری از نقاط جهان استفاده می‌شود. در معماری عموماً خاک به شیوه‌های متفاوتی در ترکیب با آب و دیگر مصالح، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مصالح خاکی عموماً در سه سیستم ساختمانی متفاوت از جمله سیستم‌های ماسونری، سیستم‌های منولوتیک، و سیستم‌های پرکننده عمل می‌کنند. یکی از سیستم‌های مطرح در سازه‌های خاکی، سیستم‌های منولوتیک یا یکپارچه است. در این سیستم، عناصر معماری و ملات به صورت یک کل یکپارچه عمل می‌کنند و به هم پیوند می‌خورند. روش اجرایی خاک کوبیده در میان شیوه‌های متفاوت خاکی به عنوان یکی از سیستم‌های ساختمانی منولوتیک می‌باشد که از طریق ریختن خاک در میان قالب‌های چوبی و یا فلزی و کوبیدن آن‌ها، امکان ایجاد دیوارهای سازه‌ای قوی را فراهم می‌آورد. این روش ساخت‌وساز در بسیاری از نقاط جهان به خصوص در اروپا، رواج داشته است. در فرایند اجرای بناها با خاک کوبیده یکی از مهم‌ترین موضوعات، شناسایی و تشخیص خاک مناسب از نظر دانه‌بندی و رطوبت بهینه جهت کوبیدن و شکل دادن به دیوار است. بسیاری از پژوهش‌ها در تلاش‌اند که به اراییه یک نسبت و درصد مشخص از دانه‌بندی و رطوبت بپردازند، اما چون ماهیت مصالح خاک با دیگر مصالح نوین متفاوت است، و از سویی، خاک هر منطقه واجد ویژگی‌های خاص و متفاوتی می‌باشد، اراییه درصدهای مشخص و تعریف شده نمی‌تواند سازندگان را در هر منطقه به اجرای صحیحی از این شیوه ساختمانی راهنمایی کند؛ تنها مخاطبان را به یک شناخت نسبی از این ترکیبات می‌رساند. برای تشخیص خاک مناسب و رطوبت بهینه، آزمون‌های مختلفی پیشنهاد می‌شود، که انجام این آزمون‌ها بر روی خاک محل می‌تواند سازندگان را در شناخت دقیق یاری رساند. این مقاله، مبتنی بر یک پژوهش مروری است که نویسندگان در آن می‌کوشند با مطالعات و تحلیل‌های کتابخانه‌ای به اراییه راهکارهای مناسب جهت تشخیص دانه‌بندی و رطوبت بهینه برای دیوارهای خاک کوب دست یابند.

واژگان کلیدی: ساختارهای خاکی، خاک کوبیده، آزمون‌های تشخیص، دانه‌بندی خاک، رطوبت بهینه.

مقدمه

عموماً خاک به‌عنوان یکی از مواد طبیعی و قابل دسترس، در نقاط مختلف جهان وجود داشته است و تولیدات آن غالباً می‌تواند بسیار ارزان در اختیار افراد با منابع اقتصادی محدود، قرار گیرد. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه خاک به‌عنوان یک ماده ساختمانی اصلی و مهم، به‌صورت گسترده استفاده می‌شود و به‌عنوان جایگزینی مناسب در برابر مواد صنعتی قیمت بالایی دارد. از سویی، باتوجه به بحران‌های زیست‌محیطی در جهان، ضرورت مراجعه و بازگشت به مصالح بومی و قابل بازگشت به طبیعت، دوچندان شده است.

باتوجه به ارزان و در دسترس بودن این ماده طبیعی، در هر منطقه بسته به جنس خاک و میزان مهارت و توانایی افراد، از قابلیت‌های متفاوت آن بهره گرفته، و از تولیدات مختلف آن از جمله خشت، گل، چینه، بلوک خاکی فشرده، خاک کوبیده و غیره استفاده کرده‌اند. از منظر ساختاری، این تولیدات خاکی را می‌توان در سه دسته کلی: سیستم‌های ماسونری، سیستم‌های منولوتیک، و سیستم‌های پرکننده جای داد. سیستم‌های ساختمانی ماسونری آن دسته از بناهای خاکی را شامل می‌شوند که اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها واحدهای خشتی و یا بلوک‌های خاکی فشرده هستند که به‌همراه ملات، ساختار کلی بنا را شکل می‌دهند. سیستم‌های خاکی منولوتیک در بناهایی هستند که اجزای دیوارها به‌صورت یک کل یکپارچه هستند و دیوارها به‌صورت پیوسته در فرایند ساخت مصالح ایجاد می‌شوند. در این دسته ساختمان‌ها می‌توان به روش‌های خاک کوبیده و چینه اشاره نمود. دسته سوم سیستم‌های ساختمانی‌ای را شامل می‌شود که خاک و مصالح خاکی نقش پرکننده را ایفا می‌نمایند، و ساختار این بناها را عموماً مصالح دیگری از جمله چوب، بامبو و غیره شکل می‌دهند.

روش خاک کوبیده به‌عنوان یکی از ساختارهای منولوتیک یا یکپارچه شناخته می‌شود. این روش عموماً با فتاوری بسیار ساده قابل ساخت است و به‌دلیل اینکه مواد اولیه مورد نیاز در محل موجود می‌باشد، از لحاظ هزینه مصالح روشی به‌نسبت ارزان و اقتصادی است. خاک کوبیده یک ماده طبیعی پایدار و تجدیدپذیر می‌باشد که به‌راحتی می‌تواند به چرخه طبیعت باز گردد. برای تنظیم دمای داخلی و رطوبت هوا با خواص بیولوژیکی، بسیار مفید است و برای ساختن بنا به استفاده از انرژی و هزینه بالا نیازی نیست (Preciado et al., 2017).
 (3). ساختار حاصل از این مصالح طبیعی واجد ظرفیت حرارتی بسیار مناسب است؛ در زمستان می‌تواند به‌عنوان جرم حرارتی،

گرما را در درون خود ذخیره نماید، و در تابستان به‌عنوان عایق حرارتی عمل و فضای داخل را از گرمای محیط بیرون حفظ کند (Sahu & Singh: 2017:116). چنین ساختاری عایق صوتی مناسب برای کاهش سروصدا، و از سویی، غیرقابل احتراق و به بیانی ضدآتش است. در مقایسه با دیگر روش‌های معماری خاک، ساخت‌وسازها با این شیوه، به آب کمتری نیاز دارد و برای مناطق کم‌آب و خشک مناسب می‌باشد. از سویی غالباً به افزودنی و ترکیبات اضافی برای بهبود و مناسب‌سازی خاک نیازی ندارد. ساخت دیوارها با این روش، به‌گونه‌ای نقش باربری را دارند و در کاهش هزینه‌های سازه‌ای بسیار مؤثر هستند. این نوع ساختمان‌ها با حداقل ضخامت ۴۰ سانتی‌متر دیوارها، امکان باربری ساختمان را تا چهار طبقه را دارند. خطر موربانه‌ها و سایر آفات در این نوع سازه‌های خاکی کمتر است. باوجود قابلیت‌های فراوانی که ذکر شد، یکی از محدودیت‌های این روش آن است که به‌دلیل اجرای فنی ساخت‌وساز، تا اندازه‌ای گران تمام می‌شود. از سویی، ساخت قالب در این روش بخش اصلی کار می‌باشد که به نجانان ماهر برای ساخت آن نیاز دارد. کوبیدن خاک در این شیوه نیز بخش نسبتاً سخت فیزیکی و وقت‌گیری است که باید در اجرای آن دقت ویژه‌ای داشت (Dabaieh, 2014).
 (9). باتوجه به توانایی‌های این روش در اجرای سازه‌های خاکی، اولین گام در اجرای این روش خاکی، شناسایی دانه‌بندی مناسب خاک در اجرا و روش‌های تشخیص رطوبت بهینه خاک جهت کوبیدن می‌باشد. لذا سؤال اصلی این تحقیق آن است که روش‌های تشخیص دانه‌بندی مناسب خاک و رطوبت بهینه در اجرای روش خاک کوبیده کدام است؟ این تحقیق مبتنی بر روش توصیفی-تحلیلی و بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای، به دنبال یافتن پاسخ این سؤال است.

سابقه تحقیق

روش خاک کوبیده یکی از قدیمی‌ترین روش‌های ساخت‌وساز به‌شکل طبیعی است که قدمت بسیار زیادی در تمام قاره‌های جهان دارد (شکل ۱). البته این روش، تاریخ شروع چندان دقیق و مشخصی ندارد. مستندات تاریخی اولین کاربرد این روش را به ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد، به دوران تمدن آشوریان و از سویی تمدن‌های چین نسبت می‌دهند (Taghiloha, 2013: 41). کاوش‌ها در چین، کشف ساخت‌وساز خاک کوبیده را به دیوار بزرگ چین نسبت می‌دهند. به تعبیر برخی از پژوهشگران، اشکال مختلف این روش در دیوار بزرگ چین و مناطق آفریقا یافت شده و از آن پس به‌سرعت در امتداد مناطق اقیانوس اطلس، آسیا و اروپا گسترش یافته است.

می‌دهند. تا سال ۲۰۰۳، هیچ استاندارد ملی یا اسناد مرجع برای ساخت‌وسازهای خاکی در انگلستان منتشر نشد. در طول پنجاه سال گذشته، تعدادی از استانداردها و اسناد مرجع ملی در استرالیا، آلمان، نیوزیلند، اسپانیا، ایالات متحده آمریکا و غیره منتشر شده است. شاید جای تعجب نباشد که بسیاری از این کشورها باعث بازاحیای ساخت‌وساز با مصالح خاکی شده‌اند (maniatidis & peter, 2003:3).

تعریف روش خاک کوبیده

خاک کوبیده، یک روش ساخت‌وساز باستانی است. در این روش، از خاک برای ایجاد دیوارهای ضخیم و بادوام استفاده می‌شود. در این حالت دیوار می‌تواند قابلیت باربری و ذخیره گرما را داشته باشد. این روش که معمولاً با نام فرانسوی آن پیزه؛ "Pise" شناخته می‌شود، بیشتر در مناطقی اجرا می‌شود که ترکیب خاک آنجا دارای دانه‌بندی‌های شن و ماسه باشد (Easton, 1996; Keable, 1994). به نقل از (Dabaieh, 2014: 6). این نوع دیوارها، سنگین‌ترین شکل ساخت دیوارهای خاکی می‌باشد که می‌تواند به‌عنوان دیوار برابر عمل نماید. حتی خاک‌های کوبیده می‌توانند به‌عنوان بلوک‌های خاکی بزرگ در قالب‌های پیش‌ساخته عمل نمایند که آن‌ها در کارگاه ساخته و در زمین به‌هم متصل و بر روی هم نصب می‌شوند.

این روش در ابتدا با قالب‌ها و کوبه‌های چوبی جهت نگهداری و کوبیدن خاک به‌صورت دستی انجام می‌شد. بعداً این قالب‌های چوبی به فلزی تبدیل شدند. فشار وارد شده به خاک در این قالب‌های چوبی یا فلزی، باعث ایجاد تراکم از طریق جابه‌جا شدن هوای منافذ می‌شود. این عنصر جامد که پس از کوبیدن می‌تواند به‌عنوان یک عنصر برابر استفاده شود، بسته به ارتفاع دیوار و سیستم سقف، ضخامت‌های مختلفی از ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر را می‌تواند داشته باشد (Preciado et al., 2017: 2). خاک مخلوط ریخته‌شده در

اروپایی‌ها بعداً این روش را اتخاذ نمودند و در نهایت این روش اجرایی به آمریکا انتقال یافت. تقریباً در سده ۱۸۰۰ میلادی بود که بناهایی در بعضی از شهرهای آمریکا به این شیوه ساخته شد. این روش کم‌کم در جنوب آمریکا، مناطق هیمالیا، مرکز اروپا و ازسویی تمامی روستاها در شمال آفریقا و حوزه خاورمیانه گسترش یافت (D'Ambra, 2016). از دهه ۱۹۷۰ به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و بحران انرژی، استفاده از خاک کوبیده در اروپا و ایالات متحده به‌عنوان یک مصالح ساختمانی پایدار مطرح شد و به‌عنوان یک روش ساخت‌وساز آسان و ارزان و سریع، به حساب آمد. در سال ۲۰۰۱، انجمن ساخت‌وساز خاکی استرالیا یک پیش‌نویس مقررات را که حاوی دستورالعمل‌های طراحی برای ساخت‌وسازهای خاکی^۱ بود، منتشر کرد. آلمان غرب یکی از اولین کشورهای جهان بود که استانداردهای ساخت‌وسازهای خاکی را ارائه داد. مقررات مربوط به ساخت‌وسازهای خاک کوبیده، بین سال‌های ۱۹۴۷ تا ۱۹۵۶ منتشر شد. باین‌حال این اسناد اردها در سال ۱۹۷۰ حذف و در سال ۱۹۹۹ دوباره منتشر شدند (maniatidis & peter, 2003:3).

در سال ۱۹۹۸، نیوزیلند استانداردهایی را برای مصالح ساختمانی غیرحرارتی (خشت، بلوک آجر فشرده، خاک کوبیده و ...) و یا بدون تثبیت‌کننده‌های شیمیایی، به‌صورت سه‌آیین‌نامه جداگانه منتشر کرد. وزارت حمل‌ونقل اسپانیا در سال ۱۹۹۲، یک راهنما برای طراحی و ساخت سازه‌های خاکی منتشر کرد. این مقررات دارای پنج قسمت اصلی بود و تمرکز اصلی آن بر روی سازه‌های خاک کوبیده بود. نیومکزیکو در ایالات متحده آمریکا دارای کد ساختمانی خاص خود برای خشت و خاک کوبیده بوده است (New Mexico Building Code, 1991). این کدها دستورالعمل‌های بسیار محدودی را در مورد خاک مناسب، محتوای رطوبت، شرایط لازم برای قالب‌بندی، روش‌های ساخت، آزمایش و ... ارائه



شکل ۲. نمونه بناهای اجراشده با خاک کوبیده در معماری معاصر اسپانیا (Url 2)



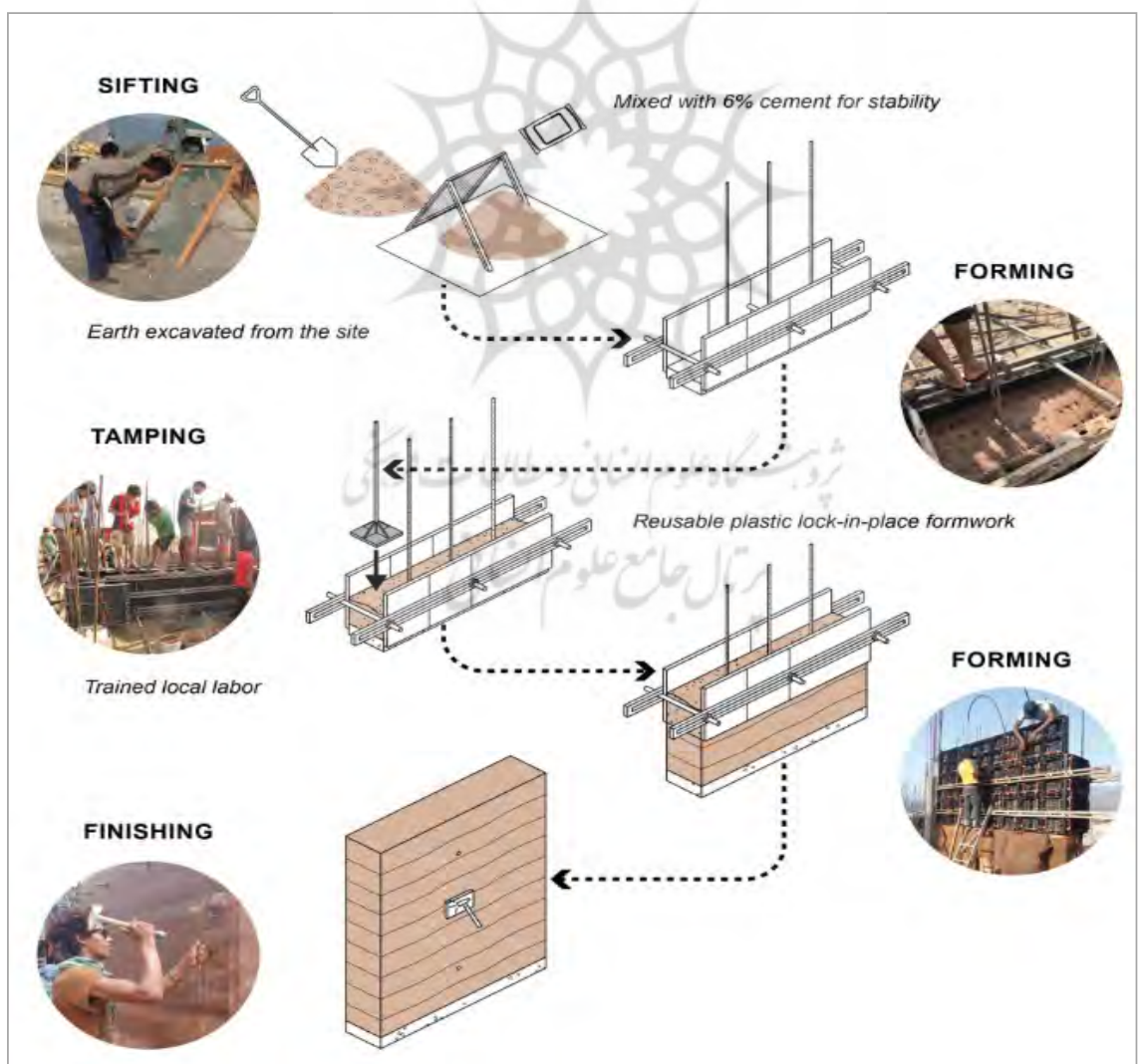
شکل ۱. نمونه بناهای اجراشده با خاک کوبیده در معماری چین (Url 1)

در جهت دوام بخشیدن بهتر به این ساختارها می‌باشد. در جدول ۱، ویژگی‌های مورد نیاز کوبه‌ها با توجه به پیشنهادات نویسندگان مختلف آورده شده است.

فرایند کلی آماده‌سازی خاک جهت خاک کوب

تهیه و آماده‌سازی خاک مناسب جهت خاک کوب یکی از مراحل مهم اجرای ساخت‌وسازهای خاکی با این روش است. در صورتی که خاک مورد استفاده ایدئال و دارای دانه‌بندی مناسب باشد، به طرح اختلاط نیازی نیست. ولی این وضعیت، حالت استثنایی دارد و در حالت معمول، به غربالگری و بعضاً طرح اختلاط نیاز می‌شود. یکنواختی خاک در ساخت‌وسازهای خاک کوب بسیار مهم است. مراحل اولیه آماده‌سازی خاک جهت خاک کوب شامل حفاری، غربالگری، مخلوط کردن، و تصحیح رطوبت است. در ادامه به تفصیل، این مراحل آورده شده است.

قالب باید یک سطح یکنواخت تقریباً ۱۵ سانتی‌متری داشته باشد که بعد از کوبیدن به ۱۰ سانتی‌متر برسد. بعد از اینکه لایه اول ریخته و متراکم شد، دیگر لایه‌ها به ترتیب ریخته و کوبیده می‌شوند. از دو نوع کوبه دستی و الکتریکی برای کوبیدن خاک استفاده می‌شود. کوبه‌های دستی با الکترونیکی از یک ورق تخت و دسته فولادی ساخته شده‌اند. وزن کوبه‌ها و اندازه صفحات متفاوت است و متناسب با هدف‌های مختلف مانند شیب گوشه‌ها و غیره تغییر می‌کند. عرض قالب‌ها کاربران را قادر می‌سازد تا در داخل آن قرار بگیرند و اطمینان حاصل کنند که تمام گوشه‌ها و لبه‌ها به درستی کوبیده شده‌اند (Dabaieh, 2014: 18). امروزه برای زیباسازی این سازه‌ها از لایه‌های رنگی در لایه‌های کوبیده‌شده خاک استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که شیوه‌های قدیمی و جدید اجرای این روش چندان متفاوت نیست. در دوره جدید تلاش سازندگان



شکل ۳. فرایند کلی تهیه دیوار با روش خاک کوب (Ur13)

حفار^۲

مواد افزودنی، مواد از یکدیگر جدا شوند (Keable, 1994) به نقل از (Maniatidis & Walker, 2003: 47). هنگامی که خاک خشک باشد، پودر کردن به سادگی انجام می‌گیرد. سنگ‌شکن‌های برقی می‌توانند 20-30m³ خاک را در ۸ ساعت خرد کنند (Minke, 2000)؛ به نقل از (Maniatidis & Walker, 2003: 47).

انبار^۵

برای نگهداری خاک، بهتر است آن را به صورت پشته‌هایی بر روی هم ریخته، مرتفع و متراکم کنیم و آن را در سطح گسترده نکنیم؛ چراکه در زمان گسترده شدن در سطح با علف‌ها و دیگر ناخالصی‌ها ترکیب می‌شود و خاصیت اصلی خود را از دست می‌دهد. هر چه پشته خاک فشرده‌تر باشد بهتر است چراکه از تأثیرات عوامل خارجی جلوگیری می‌کند. همچنین این موضوع بسیار مهم است که خاک را از باران محافظت کنیم چراکه برای کوبیدن، باید تقریباً خشک باشد. اگر خاک خیلی مرطوب باشد، این خاک قبل از خشک شدن قابل استفاده نخواهد بود، و اگر بسیار خشک باشد مقدار کمی آب برای آنکه مناسب کار شود، کفایت خواهد کرد (de Morsier, n.d.: 7). خاک‌های خاک کوب باید همیشه با یک مقدار رطوبت بهینه، فشرده و کوبیده شوند. به کاهش میزان رطوبت خاک در آب‌وهوای نامتعادل باید توجه شود. همچنین توجه به اقدامات لازم برای جلوگیری از خیس شدن کامل خاک در هنگام بارندگی، بسیار مهم می‌باشد. در صورت نیاز هم باید امکان حرکت هوای آزاد بر روی خاک وجود داشته باشد (Maniatidis & Walker, 2003: 47).

مخلوط کردن^۶

خاک‌ها قبل از کوبیدن باید به خوبی مخلوط شوند اگر
- بیش از یک منبع خاک برای کوبیدن وجود داشته باشد،
- نیاز به تثبیت‌کننده‌ها برای اضافه شدن وجود داشته باشد،

معمولاً خاک‌های سطحی به دلیل وجود مواد آلی و خاصیت اسفنجی و منفذدار، مناسب برای خاک کوب نیستند (de Morsier, n.d., p. 7) گاهی لازم است به خاک محل برخی از مکمل‌ها اضافه شود تا آن را مناسب برای کوبیدن کند، به عنوان مثال، خاک‌های رسی باید با مقداری ماسه مخلوط شوند و خاک‌های ماسه‌ای با مقداری خاک رس. در صورت نیاز باید خاک از قسمت‌های زیرین برداشته شود. لایه بالایی خاک معمولاً از طریق تفاوت رنگ قابل تشخیص می‌باشد و بیشتر وقت‌ها ۲۵-۵۰ mm است (Easton, 1996). برای حفاری و خاک‌برداری از تجهیزات مکانیکی مانند بیل مکانیکی، بولدوزر و ابزارهایی مشابه استفاده می‌شود (Houben & Guillaud: 1994) به نقل از (Maniatidis & Walker, 2003: 46).

غربالگری^۳

در خاک کوب، شن‌ها نباید از ۲۰-۱۰ میلی‌متر بزرگ‌تر باشند. بسته به درجه‌بندی نسبی ذرات در برخی پروژه‌ها این اندازه‌ها می‌توانند به ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر هم برسند. وجود شن‌ها با ابعاد بزرگ معمولاً مشکلاتی را در سطح نهایی کار و گوشه ایجاد می‌کند و سطح صاف و یکدستی به وجود نمی‌آید. در غربالگری، دانه‌های درشت‌تر از ۵۰ میلی‌متر را می‌توان به صورت دستی از مخلوط جدا کرد. روش‌های مختلفی برای غربالگری به صورت ماشینی با استفاده از صفحات ارتعاش‌کننده در دسترس است؛ به طوری که با استفاده از یک غربال استوانه‌ای با حرکت افقی و زاویه‌دار، می‌توان دانه‌ها را از یکدیگر متمایز کرد (Maniatidis & Walker, 2003: 47).

خرد کردن - پودر سازی^۴

معمولاً برای خاک‌های رسی و گچی که حاوی توده‌های سخت هستند، لازم است قبل از مخلوط کردن با شن و یا

جدول ۱. ویژگی‌های کوبه‌های دستی باتوجه به مراجع مختلف

وزن کوبه (kg)	شکل سر	جنس سر	سطح سر کوبه (cm ²)	طول دسته (m)	مرجع
5-9	متغیر	چوب-فلز	64 به طور کلی < 225	1.3-1.4	(Houben & Guillaud, 1994)
5-10	گرد	چوب-فلز	50-110	1.5-1.8	(Keable, 1996)
6/3-8/2	مخروطی	چوب با صفحه پایینی فلزی	25-39	1.5	(Middleton, 1952-1953)
70-10	مکعبی	چوب-فلز	80-100	1.5-1.8	(Norton, 1997)

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

- نیاز به آب اضافه برای به دست آوردن رطوبت بهینه وجود داشته باشد.

اختلاط مهم‌ترین فعالیت جهت اطمینان از همگن بودن و یک جنس بودن خاک مورد نظر است. برای رسیدن به نتایج بهینه، توصیه می‌شود غربالگری خاک انجام شود و خرد کردن و مخلوط کردن آن در یک فرایند بهینه قرار گیرد. روش‌های مختلفی برای ایجاد توزیعی یکنواخت از مخلوط وجود دارد که از آن جمله دستگاه‌های مخلوط ملات و دوغاب-مخلوط چرخان، تراکتورهای ساده و ابزارهایی مشابه است (Mink, 2000). ایستون (۱۹۹۶) ادعا می‌کند یک نوع از تجهیزات که برای همه خاک‌ها قابل استفاده است، بچینگ‌های بتنی هستند که می‌توانند رطوبت مورد نیاز خاک را تأمین کنند. اما این تجهیزات بسیار گران است

و کاربرد عملی آن‌ها محدود است. برای مقادیر زیاد خاک سریع‌ترین روش اختلاط، یک اپراتور ماهر با استفاده از یک سطل تراکتور است (Maniatidis & Walker, 2003: 47-48). در جدول ۲، فرایند کلی آماده‌سازی خاک جهت خاک کوب آورده شده است.

روش‌های شناسایی و تشخیص خاک

در اجرای هر نوع از انواع روش‌های ساخت‌وساز با خاک، آزمایش‌هایی عمومی برای شناسایی صحیح نوع خاک محل وجود دارد. قبل از اجرای هر تکنیک می‌توان با انتقال بخشی از خاک کارگاه به داخل آزمایشگاه و انجام آزمایش‌های عمومی، به شناختی صحیح از ترکیبات خاک دست یافت. این آزمایش‌ها شامل آزمایش الک مرطوب،

جدول ۲. فرایند کلی آماده‌سازی خاک جهت خاک کوب

مراحل	توصیه	منبع
حفاری	خاک‌های سطحی به دلیل وجود مواد آلی و خاصیت اسفنجی، برای خاک کوب مناسب نمی‌باشند.	(de Morsier, n.d.:7)
	خاک برای خاک کوب نباید سطح قابل توجهی از محتوای مواد آلی را درون خود داشته باشد. در صورت نیاز باید خاک از قسمت‌های زیرین برداشته شود.	(Easton, 1996)
غربالگری	شن‌ها نباید از ۲۰-۱۰ میلی‌متر بزرگ‌تر باشند و بسته به درجه‌بندی نسبی ذرات، در برخی پروژه‌ها این اندازه‌ها ممکن است حتی تا ۱۰۰-۵۰ میلی‌متر هم برسند.	(Maniatidis & Walker, 2003: 47)
	وجود شن‌ها با ابعاد بزرگ معمولاً مشکلاتی را در سطح نهایی کار و گوشه ایجاد می‌کند؛ سطح صاف و یکدستی به وجود نمی‌آید و لازم است به صورت دستی از گوشه‌ها حذف شوند. در غربالگری دانه‌های درشت‌تر از ۵۰ میلی‌متر را باید به صورت دستی از مخلوط جدا کرد.	
خرد کردن- پودرسازی	برای خاک‌های رسی و گچی که حاوی توده‌های سخت هستند، لازم است قبل از مخلوط کردن با شن و یا مواد افزودنی، مواد از یکدیگر تجزیه و جدا شوند.	(Keeble, 1994)
	قبل از خیس شدن مخلوط خاک، ضرورت جداسازی ذرات خاک وجود دارد.	(Keeble, 1994)
انبار	باید امکان حرکت هوای آزاد بر روی خاک جهت جلوگیری از انباشتگی رطوبت و خیس شدن خاک وجود داشته باشد.	(Maniatidis & Walker, 2003: 47)
	بهتر است خاک را به صورت پشته‌های خاک بر روی هم ریخته، مرتفع و متراکم کنیم و آن را در سطح گسترده نکنیم؛ چراکه در زمان گسترده شده در گوشه با علف‌های خاک‌های بالاتر و دیگر ناخالصی‌ها ترکیب می‌شود و خاصیت اصلی خود را از دست می‌دهد. هر چه پشته خاک فشرده‌تر باشد بهتر است چراکه از آن در برابر تأثیرات عوامل خارجی محافظت می‌شود. تلاش شود خاک در برابر باران محافظت شود.	(de Morsier, n.d.:7)
مخلوط کردن	خاک‌ها قبل از کوبیدن باید به خوبی مخلوط شوند.	(Mink, 2000)
	اختلاط مهم‌ترین فعالیت جهت اطمینان از همگن بودن و یک جنس بودن خاک مورد نظر است.	(Houben & Guiland, 1994)
	روش‌های مختلفی برای ایجاد توزیع یکنواخت مخلوط وجود دارد که به صورت دستی یا با تجهیزات ماشینی است.	(Mink, 2000)

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

تعیین درصد دانه‌بندی مناسب خاک

برای آنکه بدانیم آیا خاک مناسب کوبیدن هست یا نه، باید در ابتدا، دانه‌بندی آن مورد آزمایش قرار گیرد. بهترین خاک آن است که دارای ترکیبی از اندازه‌های متفاوت دانه‌بندی باشد تا اجازه دهد قطعات بزرگ‌تر در یکدیگر قفل شوند و مصالح ریزتر به‌عنوان نوعی چسب یا پرکننده، بین قطعات بزرگ‌تر قرار گیرند. وجود هر گونه فضای خلاً یا خالی، به هر اندازه که کوچک باشد، ساختار را ضعیف خواهد کرد. لذا وجود دانه‌های ریز و به‌خصوص خاک رس (دانه‌هایی با قطر کمتر از ۰/۱ میلی‌متر) لازم است تا به‌وسیله آن‌ها بتوان فاصله ریز بین دانه‌ها را پر کرد. البته رس زیاد باعث انعطاف‌پذیری خاک هم خواهد شد. بنابراین خاک ایدئال آن است که تنوع مناسبی از انواع مختلف دانه‌ها را داشته باشد. بسیاری از آزمایش‌های عملی و بسیار آسان برای تست خاک وجود دارد. خاک خاک کوب باید حاوی هر چهار نوع دانه‌بندی در خاک باشد. دارای شن، ماسه، مقداری لای و به مقدار کافی رس باشد تا به‌عنوان یک اتصال‌دهنده و چسب در تراکم خاک، عمل نماید (McHenry, 1984). طبق استانداردهای انگلیس، اندازه دانه‌ها به این صورت تعریف می‌شود: شن: 2-60 mm، ماسه: 0.06-2 mm، سیلیت: 0.002-0.06 mm، خاک رس: کمتر از 0.002 mm (Maniatis & Walker, 2003:7). به‌منظور افزایش مقاومت مکانیکی و افزایش دوام خاک در برابر هوا، بهتر است که میزان حفره‌های ذرات خاک را به حداقل برسانیم. از نظر تئوری، در صورتی می‌توان یک دیوار خاک کوب بدون حفره به دست آورد که ذرات

آزمایش رسوبی (سدیمانومتری)، آزمایش متیلن بلو، آزمون سیلندر^۷ و ... می‌باشد. در منابع مکانیک خاک به‌صورت مفصل به آن‌ها پرداخته شده است و از بیان مجدد جزئیات این نوع آزمایش‌ها پرهیز می‌شود. اولین و شاید مهم‌ترین گام در اجرای سازه خاکی خاک کوب، شناسایی خاک با دانه‌بندی مناسب و تعیین درصد رطوبت بهینه خاک می‌باشد. دو روش شناسایی در این پژوهش: روش مبتنی بر اسناد و مدارک کتابخانه‌ای، و روش مبتنی بر آزمون‌های تجربی است. روش شناسایی دانه‌بندی بر اسناد، مدارک و مطالعات کتابخانه‌ای، تنها سازندگان را به درصد نسبی از دانه‌بندی و رطوبت راهنمایی می‌کند و باتوجه به ماهیت خاص خاک و تفاوت آن در مناطق مختلف، نمی‌تواند مخاطبان را در اجرای دقیق و صحیح شناسایی خاک یاری رساند. اما در روش آزمایشگاهی و یا تجربی می‌توان با آزمون و تست‌های کوچک، این ساخت‌وساز را در هر منطقه‌ای با هر خاک ویژه‌ای تجربه، و نتایج دقیق‌تری استخراج کرد. روش‌های شناسایی و تشخیص خاک در خاک کوب، در جدول ۳ ارائه شده است.

روش‌های مبتنی بر اسناد و مدارک جهت شناسایی دانه‌بندی و رطوبت خاک

برای ساخت‌وسازهای خاک کوب با اینکه انتظار یک برنامه دقیق وجود دارد اما دستورالعمل مشخصی برای این نوع ساخت‌وساز ارائه نشده است. البته برخی منابع مکتوب درصدهایی از دانه‌بندی و میزان رطوبت بهینه را ارائه داده‌اند که به‌تفصیل به بیان آن پرداخته خواهد شد.

جدول ۳. روش‌های شناسایی و تشخیص خاک در خاک کوب

تعیین درصد دانه‌بندی مناسب خاک	روش‌های مبتنی بر اسناد و مدارک
درصد رطوبت خاک - میزان آب اضافه‌شده به مخلوط خاک	
محاسبه کنترل فشاری	
آزمون بویایی (حضور خاک ارگائیک)	روش‌های مبتنی بر آزمون‌های تجربی
آزمون بطری یا شیشه (رسوب‌گذاری ساده)	
آزمون الک - غربالگری و تعیین ابعاد دانه‌بندی	
آزمون رول - سیگار و کنترل محتوای رس موجود در خاک	
آزمون تعیین میزان رطوبت خاک: آزمون گلوله خاکی	
آزمون فشار؛ تعیین میزان مقاومت فشاری نمونه	

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

خاک کروی باشند و توزیع آن‌ها از فرمول زیر تبعیت کنند. وقتی دانه‌ها کاملاً کروی باشند، مقدار n برابر با $0/5$ است. به‌رحال (می‌توان حذف کرد) در سازه‌های خاکی مقدار n بین $20.0 - 25.0$ است که بستگی به شکل دانه‌ها دارد.

$$P=100(d/D)^n$$

(نسبت دانه‌ها با قطری معین $P=$)، (قطر دانه برای تعیین $d=d$)، (بزرگ‌ترین قطر دانه $D=$)، (ضریب دانه‌بندی $n=$) در حقیقت، در طبیعت یافتن خاک‌هایی با چنین توزیع ایدئالی غیرممکن است. خاک ایدئال، ترکیبی از اندازه‌های مختلف دانه‌بندی است. پیشنهاد‌های مختلف نسبت‌های بین $30-70\%$ میان نسبت رس - سیلت و شن - ماسه را ارائه می‌دهند (Preciado et al., 2017: 3). کیل (۱۹۹۶) تأکید دارد خاک‌ها باید دارای محتوای نسبتاً بالایی از ماسه، شن و کمی سیلت، و فقط مقدار کافی از رس را داشته باشند. آن هم برای آنکه عمل چسبندگی انجام دهند و در ترکیب برای اتصال بهتر آن‌ها کمک کند. به‌گفته‌ی نورتون (۱۹۹۷)، هر ماده‌ای که بیش از $5-10$ میلی‌متر باشد، باید از بین برود. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که افزایش اندازه سنگ، باعث کاهش مقاومت فشاری خاک کوبیده می‌شود. باین‌وجود، تحقیقات دقیقی لازم است تا میزان دانه‌بندی خاک مشخص شود؛ (Berglund, 1986)؛ (Easton, 1996)؛ (Dayton, 1991).

پژوهشگران اشاره می‌کنند هیچ خاکی به‌لحاظ دانه‌بندی ایدئال نیست. به‌همین دلیل، محققان در سراسر جهان معمولاً برای هر بخش خاک از حد بالا و پایین استفاده می‌کنند. یکی از پژوهشگران اشاره می‌کند خاک ایدئال برای این نوع ساختار، ترکیبی از اندازه‌های متفاوت دانه‌بندی است. (خاک رس $10-40\%$)، (سیلت $10-40\%$)، (ماسه $35-65\%$) و حتی مقدار کمی شن‌های ریز (7: de Morsier, n.d.). استاندارد زیمباوه در توزیع دانه‌بندی خاک بیان می‌کند خاک مورد استفاده برای سازه‌های خاک کوب باید فاقد مواد آلی و سایر مواد غیرخاکی از جمله زباله، مواد مضر و ... باشد. همچنین دارای $70-50\%$ شن ریز و ماسه، $15-30\%$ سیلت، و $5-15\%$ رس باشد.

در شکل ۴، از منظر پژوهش‌های مختلف به نسبت استفاده از دانه‌بندی‌های مختلف خاک اشاره شده است. حداقل درصد ترکیب خاک رس و سیلت باید بین 20% - 25% ، و حداکثر بین 30% - 35% باشد. به‌طور مشابه، حداقل درصد شن و ماسه باید بین 50% - 55% ، و حداکثر

بین 70% - 75% باشد (maniatidis & peter, 2003) (8-9). به‌طور کلی، درصدها برحسب جرم هستند، گرچه در بعضی موارد (McHenry, 1986) مشخص نیست آیا درصد اعلام‌شده توسط نویسنده برحسب حجم یا جرم بوده است.

درصد رطوبت خاک - میزان آب اضافه‌شده به مخلوط خاک

آب مورد استفاده در ترکیب خاک کوب باید از یک منبع تمیز باشد. این آب باید عاری از مواد آلی و سایر مواد مضر باشد و از هرگونه آلاینده‌ای پاک باشد. مخلوط را باید به حالتی آب پاشید که مطمئن شویم تمام ذرات مرطوب خواهند شد. مقدار آب اضافه‌شده به خاک بسیار مهم است، زیرا اگر مخلوط حاوی آب کمی باشد، خاک به‌خوبی فشرده نخواهد شد. از سویی آب بیش از حد نیز خاک را خیس می‌کند و مخلوط را در برابر فشرده‌گی مقاوم می‌گرداند (Dabaieh, 2014: 12).

مقدار مناسب آب باید بر روی مخلوط افشانه شود تا رنگ آن در کل کار یکسان باشد. چنانچه آب به مخلوط اضافه شود و آن حاوی مقداری از خاک رس باشد، خاک‌ها گلوله می‌شوند. همان‌طور که خاک در اطراف میکسر می‌چرخد، عناصر رس منسجم به‌همراه ذرات دیگر جمع می‌شوند تا توپ‌های کوچکی از خاک را شکل دهند که 2 تا 20 میلی‌متر قطر دارند. گلوله شدن مانع از توزیع یکنواخت رطوبت در خاک می‌شود و شاید بیشترین اثرات را بر روی ظاهر دیوار تمام‌شده نشان خواهد داد (Maniatidis & Walker, 2003: 47-48). شرایط سایت نیز بسیار مهم است، به‌عنوان مثال چنانچه آب در هوای گرم مخلوط شود، تبخیر می‌گردد. کنترل میزان آب نیز در فرایند مخلوط مهم می‌باشد. برای دستیابی به نتایج بهینه توصیه می‌شود غربالگری، خرد کردن و اختلاط خاک به‌عنوان یک فرایند مداوم انجام شود. مهم آن است که در ابتدا اطمینان کافی از توزیع یکنواخت رطوبت در مخلوط خاک داشته باشیم. به‌طور کلی میزان آب بین 10% تا 15% مخلوط است (Dabaieh, 2014: 12). در استاندارد نیوزلند میزان این رطوبت قدری متفاوت تعریف شده است. از نظر استاندارد نیوزلند، رطوبت نباید کمتر از 3 درصد پایین‌ترین حد مطلوب و بیشتر از 5 درصد بالاترین حد مطلوب در این استاندارد باشد (NZS (4298: 1998 w1x).

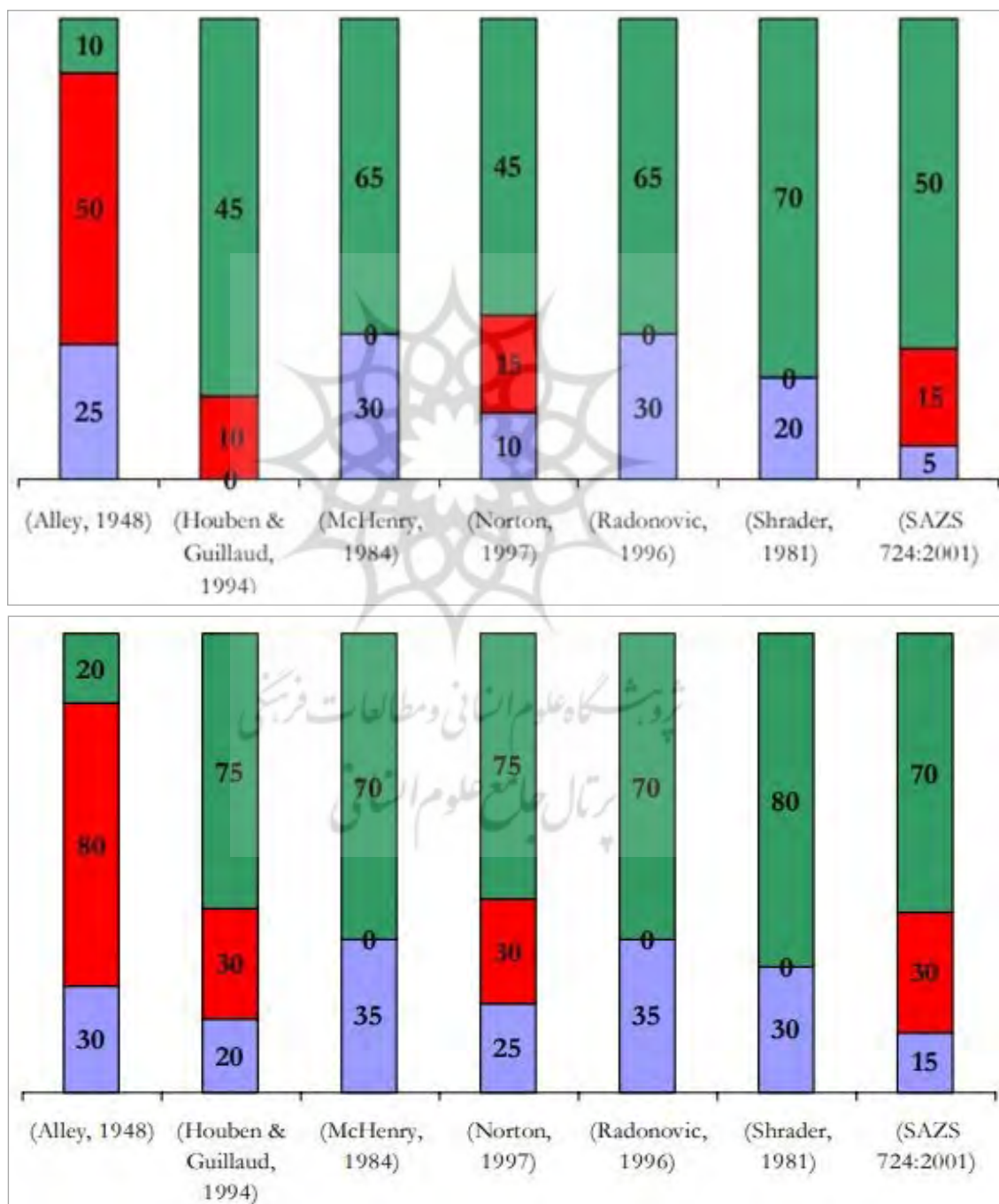
در دستیابی به یک ترکیب مناسب در این روش ایفا می کند (Dabaieh, 2014: 11).

آزمون بویایی (حضور خاک ارگانیک)^۸

خاک مناسب برای اجرای خاک کوب نباید از خاک‌های سطح رویی و خاک‌های آلی باشد چراکه خاک‌های ارگانیک سطحی، قابلیت چسبندگی مناسبی ندارند و منجر به انقباض^۹

آزمون‌های تجربی جهت کنترل دانه‌بندی و رطوبت خاک

منابع مکتوب در صدهایی از دانه‌بندی و میزان رطوبت بهینه خاک را ارائه می‌دهند اما از آنجاکه خاک هر منطقه ویژگی خاصی دارد، وجود روش‌های تجربی جهت شناسایی خاک مناسب ضروری است و البته، تجربه نقش مهمی را



شکل ۴. (اول) حد پایین، (دوم) حد بالای توزیع دانه‌بندی ذرات رس (آبی)، سیلت (قرمز)، شن و ماسه (سبز) در خاک کوب براساس استانداردها و تئوری صاحب‌نظران در این حوزه (Maniatidis & Walker, 2003:8)

بالا و افزایش فرسایش بیولوژیکی از جمله افزایش قابلیت حمله حشرات می‌گردند. همچنین این نوع خاک‌ها در رفتار تثبیت‌کننده‌هایی مانند سیمان اثر می‌گذارند و دخالت‌هایی را در رفتار آن‌ها ایجاد می‌کنند (Maniatidis & Walker, 2003: 7). برای تشخیص خاک مناسب می‌توان از آزمون بویایی خاک استفاده کرد. خاک‌های رویی عموماً تازه، مرطوب و بوی کپک‌زدگی دارند (de Morsier, n.d.:7). عموماً خاک مناسب، خاک برداشت‌شده از محل در عمق ۰.۵ متری می‌باشد که مواد آلی سطح، شامل آن نمی‌شود.

آزمون گاز گرفتن با دندان (محتوای ماسه و رس)^{۱۰}

مقداری خاک را در دهان خود بگذارید و بین دندان‌ها فشار دهید اگر خاک ماسه‌ای باشد اجزای سخت ماسه به‌طور ناخوشایندی در زیر دندان‌ها خرد می‌شوند. اگر خاک مملو از سیلت باشد زیر دندان خرد می‌شود اما چندان ناخوشایند نیست اما اگر خاک رسی باشد شبیه آرد نرم و حتی چسبنده و لزج می‌گردد (de Morsier, n.d.:7).

آزمون بطری یا شیشه (رسوب‌گذاری ساده)^{۱۱}

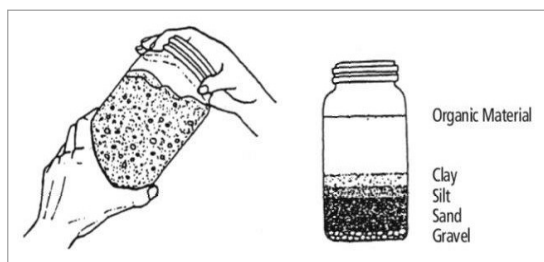
تعیین توزیع اندازه ذرات با تست‌های رسوب‌گذاری انجام می‌شود که روش قابل قبولی برای ارزیابی دانه‌بندی‌های خاک در خاک کوب می‌باشد. تغییر دانه‌بندی خاک بر روی ویژگی‌های فیزیکی دیوار خاک کوب و همچنین استحکام و مقاومت آن، تأثیرگذار است (Maniatidis & Walker, 2003: 7). برای آگاهی از نسبت اندازه ذرات مختلف خاک می‌توان از آزمون جار یا بطری استفاده کرد. آزمون جار، یک آزمایش میدانی است که برای تعیین نسبت حجمی اجزای اصلی خاک استفاده می‌شود و یک ارزیابی اولیه را ارائه می‌دهد. مقدار مناسبی از خاک را به عنوان نمونه‌ای از خاک اجرایی برداشته، آن را درون شیشه‌ای استوانه‌ای (فقط یک‌چهارم تا یک‌دوم محتوای شیشه پر شود) ریخته و ۳/۴ بقیه شیشه را با آب پر می‌کنیم. آن را تکان می‌دهیم تا کل خاک آغشته به آب، در داخل شیشه معلق شود. اجازه دهید مخلوط یک ساعت ته‌نشین شود و آن را دوباره تکان دهید و همین کار را بعد از ۲ ساعت مجدد انجام دهید. ذرات مختلف با سرعتی متفاوت شروع به ته‌نشین شدن می‌کنند. ذرات بزرگ سریع‌تر و ذرات کوچک با سرعت کمتری ته‌نشین می‌شوند. بعد از گذشت تقریباً ۸ ساعت شما می‌توانید شاهد لایه‌های مختلفی از مخلوط خاک باشید. در لایه‌های پایین، اجزای سنگین‌تر و شن و ماسه قرار گرفته‌اند، پس از آن و در لایه‌های بالاتر سیلت و در

لایه‌های نهایی خاک رس قرار گرفته است. با اندازه‌گیری ارتفاع هر لایه می‌توان نسبت ماسه، سیلت و خاک رس را تشخیص داد. به دلیل آنکه جنس خاک می‌تواند از یک محل به محل دیگر متفاوت باشد، بهتر است تست‌های متعدد را با توده‌های مختلف خاک انجام داد. نحوه اجرای آزمون بطری در شکل ۵ آورده شده است (de Morsier, n.d.:10).

آزمون الک - غربالگری و تعیین ابعاد دانه‌بندی^{۱۲}

اگر می‌خواهید درباره دانه‌بندی خاک با دقت بیشتری بدانید، شما می‌توانید تست الک - غربالگری را انجام دهید. برای این تست لازم است از الک‌های مختلف مانند ۵mm - ۲mm - ۱mm - ۰.۵mm - ۰.۲mm - ۰.۱mm استفاده شود. شما می‌توانید الک‌ها را به ترتیب بر روی یکدیگر قرار دهید به شکلی که الک‌های درشت در قسمت بالا و الک‌های ریز در قسمت پایین باشند. بر روی هر الک، دانه‌هایی که از الک اندازه قبلی کوچک‌تر و از بعدی بزرگ‌تر هستند، باقی می‌ماند. با وزن کردن محتوای هر الک به صورت جداگانه، می‌توانید درصد وزن دانه‌های مختلف را به دست آورید. در این آزمون با استفاده از الک‌های مختلف با چشمه‌های متفاوت، می‌توان میزان هر یک از دانه‌های شنی، ماسه‌ای و سیلتی - رسی را تعیین نمود. بعد از تعیین دانه‌بندی و ترسیم نمودار دانه‌بندی، می‌توان این نمودار را با نمودار دانه‌بندی مناسب روش خاک کوبیده مقایسه کرد. در صورتی که هر محدوده از دانه‌ها از حد معمول کمتر بود، می‌توان از طرح‌های اختلاط مختلف جهت مناسب‌سازی دانه‌بندی خاک در این روش استفاده کرد.

غربالگری دانه‌ها بهتر است در یک جریان آب صورت گیرد. این عمل، به دانه‌های کوچک‌تر کمک می‌کند تا از درون شن‌ها عبور کنند. در این شرایط وزن دانه‌ها باید بعد از خشک شدن اندازه‌گیری شود. شکل ۶، محدوده نمودارهای توزیع مناسب دانه‌بندی ذرات (رس، سیلت، شن و ماسه) را در خاک کوب نشان می‌دهد.



شکل ۵. نحوه اجرای آزمون بطری (Minke, 2006: 53)

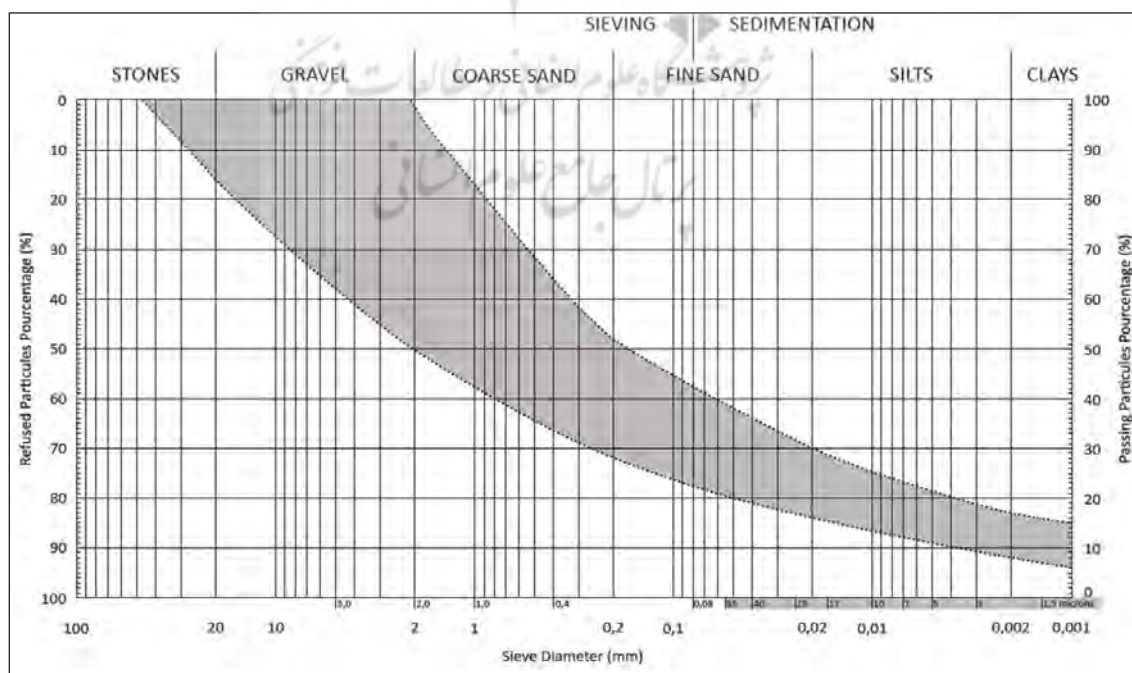
آزمون رول ۱۳ - سیگار ۱۴ و کنترل محتوای رس موجود در خاک

یکی دیگر از آزمایشات میدانی برای کنترل خاک مناسب برای خاک کوب، تست روبان ۱۵ می باشد. در منابع مختلف بیان نحوه تست روبان یا سیگار، متفاوت از دیگری است. مثلاً در برخی منابع گفته شده است نمونه‌ای از مخلوط خاک و آب را بر می‌داریم و رول‌هایی به اندازه سیگار درست می‌کنیم. اگر قبل از تبدیل شدن به قطر 3mm شروع به خرد شدن کند، بر میزان آب آن اضافه می‌کنیم. هنگامی که مقدار آب مناسب باشد، رول با فشردن بین انگشت شست صاف می‌شود. در این حالت، روبانی به طول ۳۰۰-۱۵۰ میلی‌متر با ضخامت ۲-۶ میلی‌متر تهیه می‌شود. سپس بررسی می‌شود حداکثر طولی که روبان می‌تواند تحمل کند، چه اندازه است. یک روبان طولانی (بیش از ۲۰ سانتی‌متر) نشان‌دهنده خاک رس زیاد است و یک روبان کوتاه نشان‌دهنده خاک رس کم و عدم مقاومت کافی خاک می‌باشد (Maniatidis & Walker, 2003: 13-14).

در منابعی دیگر آورده شده، مقداری از خاک محل را برداشته و به اندازه کافی رطوبت به آن اضافه می‌کنیم تا بتواند شکل‌پذیر شود و چسبناک نباشد. نواری از خمیر خاک را به صورت سوسیس یا سیگاری به قطر ۱۲ میلی‌متر درآورده و سعی می‌کنیم طول نوار خمیری را با کاهش ضخامت آن

و فشار دادن آن بین انگشتان شست و نشانه، افزایش دهیم. اگر طول نوار سیگاری به ۳۰-۲۵ سانتی‌متر برسد، مقدار رس خاک بیش از اندازه بوده و شاید نیاز به تثبیت از طریق اضافه کردن ماسه و سیمان دارد. اگر طول نوار سیگاری به حداکثر ۱۰-۵ سانتی‌متر برسد، مخلوط حاوی خاک رس بسیار کمی است و احتمالاً برای دیوارهای خاک فشرده یا خاک کوب مناسب است (de Morsier, n.d.:10). این آزمون در شکل ۷ آورده شده است. تفسیرهای تست روبان که توسط نویسندگان مختلف پیشنهاد شده است، نتایج مبهمی دارد و مشخص می‌کند روش‌های این آزمایش بسته به کاربران مختلف، نتایج متفاوتی داشته است. ارزیابی نتایج تست روبان با توجه به منابع مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

در استانداردهای زیمباوه اشاره شده، برای یافتن خاک مناسب به منظور خاک کوب باید یک مشت از خاک سرنده نشده را برداشته، مرطوب کرده و یک توپ درست کنیم. بعد از خشک شدن در آفتاب آن را به زمین می‌اندازیم اگر از هم جدا شد، خاک رس بسیار کمی دارد و باید خاک عوض شود. مینکه^{۱۶} (۲۰۰۰) پژوهشگر آلمانی ادعا می‌کند که این آزمایش می‌تواند خطا داشته باشد و این تست‌ها فقط می‌توانند در مراحل اولیه به صورت تست‌های تخمینی عمل کنند. در طول فعالیت باید آزمایشات دقیقی هم در لابراتوار انجام شود (Maniatidis & Walker, 2003: 13-14).

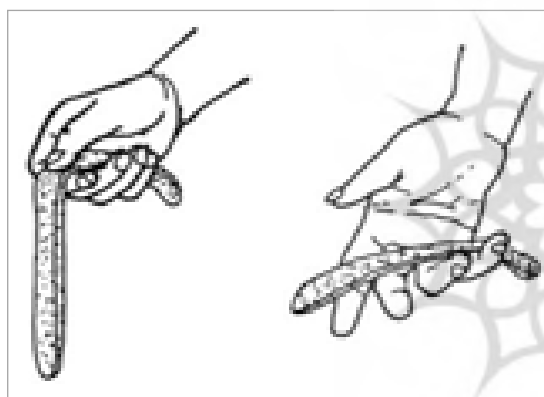


شکل ۶. محدوده نمودارهای توزیع مناسب دانه‌بندی ذرات (رس، سیلت، شن و ماسه) در خاک کوب (Ur1 4)

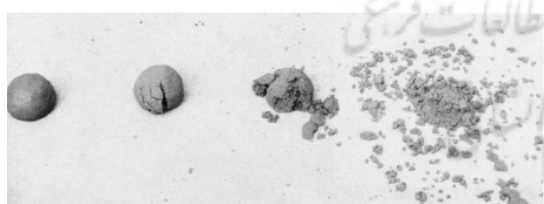
آزمون تعیین میزان رطوبت خاک: آزمون گلوله خاکی^{۱۷}

یکی از روش‌های کنترل کیفیت خاک، کنترل و سنجش درجه رطوبت آن می‌باشد. میزان بهینه آب بسیار مهم است زیرا در مقاومت و استحکام دیوار تمام‌شده خاک کوب اثر بسزایی دارد. خاک برای کوبیدن باید به اندازه کافی خشک باشد و رطوبت بسیار کمی داشته باشد. البته در صورت کم بودن آب هم، خاک نمی‌تواند به درستی فشرده شود. اگر مخلوط دارای رطوبت زیادی هم باشد، حالت گل پیدا کرد و رطوبت موجود در خاک مانع از کوبیدن کامل می‌شود و در مقابل تراکم مقاومت می‌کند. مقدار ایدئال رطوبت از یک مخلوط به مخلوط دیگر، متفاوت است. با برخی از روش‌های تجربی می‌توان میزان رطوبت بهینه را در خاک تشخیص داد. برای کنترل رطوبت خاک از تست توپ استفاده می‌کنیم. چند مشت از خاک غربال‌نشده سایت را برداشته و مرطوب می‌کنیم و با دست به صورت یک توپ در می‌آوریم و چند دقیقه آن را می‌گذاریم تا کمی خشک شود، بعد آن را از ارتفاع شانه به زمین پرتاب می‌کنیم. براساس شکل آن هنگام خرد شدن می‌توان میزان رطوبت خاک را کنترل کرد. در صورتی که گلوله به ذرات بسیار ریز تبدیل شود، این خاک رطوبت بسیار کمی دارد. در صورتی که گلوله خاکی خرد نشود و به صورت یک تکه باقی بماند، این ترکیب دارای رطوبت بسیار زیادی است. رطوبت بهینه در حالتی است که گلوله خاکی پس از انداختن از ارتفاع شانه به ۵-۶ تکه کلی تبدیل شود (de Morsier, n.d.: 10). این آزمون در شکل ۸، آورده شده است.

خاک عامل مهمی در مقاومت خاک به شمار می‌رود. بنابراین بسیار سخت است که اندازه مشخصی را به چگالی و تراکم بدهیم. تقریباً پیش‌بینی یک اندازه دقیق برای توان فشاری خاک بدون هرگونه آزمایش قبلی غیرممکن می‌باشد. خاک کوب مانند دیگر سازه‌های خاکی دارای مقاومت فشاری به نسبت خوب است اما در برش و کشش به صورت ضعیف عمل می‌کند. بهترین روش برای تست مقاومت فشاری خاک، ساخت یک نمونه کوچک از خاک کوبیده در ابعاد ۱۰*۱۰*۱۰ و یا ۱۵*۱۵*۱۵ یا به صورت حجم استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. یک قالب چوبی درست کرده و مقداری خاک با رطوبت بهینه را در آن بکوبید. اجازه دهید به مدت یک روز خشک شود سپس می‌توانید آن را باز کنید و دستگاه مربوط به کنترل مقاومت فشاری بتن، نمونه‌ها را آزمایش کنید. بهتر است این آزمایشات را در مراحل اولیه انجام



شکل ۷. نحوه اجرای آزمون سیگار (Minke : 2006,53)



تصویر ۸: نحوه اجرای آزمون گلوله خاکی ماخذ: (Minke : 2006,53)

تست‌های آزمایشگاهی، آزمون فشار؛ تعیین میزان مقاومت فشاری نمونه^{۱۸}

مقاومت فشاری خاک وابستگی بسیاری نسبت به حفره‌های خاک بعد از کوبیدن، میزان چسبندگی ذرات خاک، استحکام یا مقاومت توده و شرایط رطوبت در طول آزمایش دارد. تراکم

جدول ۴. ارزیابی نتایج تست روبان باتوجه به مراجع مختلف

تشخیص کیفیت خاک	طول روبان (mm)				
	Easton, 1996	Standards ustralia, 2002	Houben & Guillaud, 1994	Keable, 1996	Norton, 1997
خاک نامناسب بنا بر دلیل ذکر شده در حال خشک شدن است	>200	>80	250-300	>120	>150
خاک با مقاومت پایین	<100	<40	50-100	<80	<80

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

که برای بتن، آجر و بلوک به کار می‌روند. نمونه‌ها می‌توانند به صورت استوانه یا مکعب و با یک تراکم و نیروی کوبیدگی مشخص ساخته شوند. سطح نمونه‌ها با استفاده از یک تخته‌سنگ، گچ یا مواد مشابه پوشانده می‌شود سپس یک بار متمرکز به صورت مداوم بر آن وارد می‌شود تا به مرحله خرابی برسد و حداکثر بار وارد شده در این مرحله ثبت گردد. برخی گزارشات به افزایش مقاومت فشاری خاک با گذر زمان اشاره می‌کنند. این موضوع نیاز به مطالعات وسیع و گسترده‌ای دارد (Maniatidis & Walker, 2003: 15). مطالب جدول ۵، جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی و مطالب جدول ۶، حداقل مقاومت‌های مورد نیاز را با توجه به مراجع مختلف بیان می‌کنند.

دهید تا زمان خشک شدن و کاهش حجم آن مشخص باشد و بتوانید ترک‌ها و توانایی در مقابل ضربه و فشار را کنترل کنید. یک نمونه کوچک‌تر هم تهیه کنید تا در صورت نیاز بتوانید به راحتی آن را حمل کنید. لازم به ذکر است که در برخی از کشورها، بعضی از افزودنی‌ها به خاک محل اضافه می‌شود تا مقاومت فشاری افزایش یابد که از آن جمله می‌توان به سیمان،^{۱۹} آهک،^{۲۰} فیبر،^{۲۱} سیلیکات سدیم^{۲۲} و موادی مشابه اشاره کرد. همچنین می‌توان نمونه‌ها را در معرض باران و سایر عوامل خارجی قرار داد تا چگونگی رفتار آن را کنترل کرد. مثلاً می‌توان چند آزمایش متفاوت را با درصد‌های مختلف سیمان ۲٪-۵٪ و یا حتی بیشتر انجام داد تا نتایج کنترل شود (de Morsier, n.d.:11).

تست‌هایی که در آزمایشگاه برای کنترل مقاومت فشاری خاک کوب انجام می‌شود، تقریباً همان تست‌هایی می‌باشد

جدول ۵. جزئیات نمونه تست‌های مقاومت فشاری با توجه به منابع مختلف

مراجع	جزئیات نمونه‌ها					حداقل نمونه مورد نیاز
	نمونه استوانه‌ای		نمونه مکعبی			
	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	ارتفاع (mm)	طول (mm)	عرض (mm)	
Bulletin 5; Earth-Wall Construction,CSIRO	150	110	150	150	1.3 × h	5
Standards Australia, 2002	150	300	N/A	N/A	N/A	۱ نمونه برای هر 25-100 m ²
New Mexico Adobe & Rammed Earth Building Code(Tibbets, 2001)	N/A	N/A	102	102	102	N/S
NZS	N/A	N/A	N/S	N/S	2 × h	5

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

جدول ۶. مقادیر پیشنهادی مقاومت مشخصه فشاری محصور نشده با توجه به منابع مختلف

مراجع	مقاومت مشخصه فشاری محصور نشده (N/mm ²)
Bulletin 5; (Middleton, 1992)	0.7
Standards Australia, 2002	0.4-0.6
NZS 4298:1998, 1998	0.5

(نگارندگان، ۱۴۰۲)

نتیجه‌گیری

روش خاک کوبیده یکی از روش‌های مهم در سیستم‌های خاکی یکپارچه می‌باشد که در مناطق مختلف با خاک رس محدود به عنوان یک سیستم ساختمانی مطلوب با خاک به شمار می‌رود. از آنجاکه هر روش ساختمانی با خاک، ترکیب‌بندی خاصی از این ماده را طلب می‌کند، لذا شناسایی و تشخیص خاک مناسب، مهم‌ترین موضوع در آغاز

اجرای این روش است. استانداردهای متفاوت، درصدهای مختلفی از دانه‌بندی را برای ترکیبات خاک پیشنهاد می‌دهند. به‌طور معمول در عمده استانداردها حداقل درصد نسبی خاک رس و سیلت بین ۲۰٪-۲۵٪، و حداکثر بین ۳۰٪-۳۵٪ بیان می‌شود. به‌طور مشابه، حداقل درصد شن و ماسه را در مخلوط خاک کوب بین ۵۰٪-۵۵٪، و حداکثر آن را بین ۷۰٪-۷۵٪ تعریف می‌کنند. در تعریف رطوبت بهینه نیز میزان آن را بین ۱۰٪ تا ۱۵٪ تعریف می‌کنند. البته از این نسبت‌ها نمی‌توان به‌عنوان یک دستورالعمل مشخص و ثابت استفاده کرد چراکه هر منطقه با توجه به ترکیب‌بندی خاک، به درصدهای متفاوتی نیاز دارد. مهم‌ترین راه شناسایی میزان ترکیبات در خاک مورد نظر، آزمون‌های تجربی خاص در محل کارگاه می‌باشد. آزمون‌های معرفی شده از جمله؛ آزمون بویایی، آزمون جار یا بطری، آزمون سیگار، آزمون گلوله خاکی و آزمون فشار می‌توانند کمک بسیاری به سازندگان در جهت شناسایی و کنترل ترکیب‌بندی خاک مورد نظر نمایند. بی‌شک استفاده از روش‌های آزمایشگاهی نقش مؤثری در اجرا و ساخت این سازه‌های خاکی ایفا می‌کنند. با توجه به ناشناخته بودن این روش در ایران، این مقاله با ارائه روش‌های متفاوت شناسایی دانه‌بندی خاک، مهم‌ترین شیوه را به‌منظور آغاز ساخت نمونه‌های اولیه از این روش در جهت رسیدن به معماری پایدار ارائه داده است.

پی‌نوشت

1. Earth Building Association of Australia
2. Excavation
3. Screening
4. Pulverization
5. Stockpiling
6. Mixing
7. Strength test
8. The Smell Test (Presence of Organic Soil)
9. shrinkage
10. The Biting Test (Content Sand and Clay)
11. The Jar Test (Simplified Sedimentation)
12. The sieve test (granularity)
13. Roll Test
14. Coil test
15. Ribbon Test
16. Minke
17. The drop test -ball test
18. The sample (resistance and aspect)
19. Cement stabilization
20. Lime stabilization
21. Fibre stabilization
22. Sodium silicate stabilization



فهرست منابع

- Preciado, A., Ayala, K., Torres, S., Villareal, K., Gutiérrez, N., Flores, A., & Hernandez, V. (2017). Performance of a self-built rammed earth house in a high seismic zone of Mexico. In 3rd International Conference on Protection of Historical Constructions, Lisbon, Portugal.



- Berglund, M. (1986). Rammed-earth portfolio: New forming techniques make houses competitive, but hardly dirt cheap. *Fine Homebuilding*, 35.
- Birznieks, L. (2013). Design and building with compressed earth. *MSC Thesis*.
- Blondet,, Vargas, -, & Tarque, -. (2008). Available low-cost technologies to improve the seismic performance of earthen houses in developing countries. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12–17, 2008, Beijing, China.
- Boltshauser, Roger & Rauch, Martin (2011). *Haus Rauch: ein Modell moderner Lehmarchitektur - The Rauch house: a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser
- D. Silveira, H. Varum & A. Costa, « Rehabilitation of an important cultural and architectural heritage: the traditional», *www.witpress.com*, ISSN 1743-3541 (on-line) *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 102, 2007
- Dabaieh, M. (2014). Building with rammed earth: A practical experience with Martin Rauch. *Basehabitat Summer School*.
- Dayton, L. Saving mud monuments, *New Scientist*, 25 May 1991, pp. 38-42.
- de Morsier, Y. (n.d.). Our experience with rammed earth: A manual for rammed earth building (Desert Creek House, Bega, NSW). *Desert Creek House*. Retrieved November 17, 2025, from <https://desertcreekhouse.com.au/building2/rammedearth.pdf>.
- Earth Building Association of Australia, 2001, *Earth Building Book*. Draft for Comment. Draft Code 05/01. Earth Building Association of Australia, Wangaratta, Australia.
- Easton, D. (1996). *The rammed earth house*. White River Junction, Vt.: Chelsea Green Pub. Co.
- Easton, D. (2007). *Completely Revised Edition. The Rammed Earth House*. Vermont: Green.
- Houben, H. and Guillaud H., 1994, *Earth Construction, A comprehensive Guide*. Intermediate Technology Publications, London, UK.
- Keable, J., (1996), *Rammed Earth Structures. A code of Practice*. Intermediate Technology Publications, London, UK.
- Keable, J. (1994). *Rammed Earth Standards*. ODA Final Project Report R 4864C.
- Manish Kumar Sahu, Lokesh Singh, “Critical review on types of bricks type 4: Adobe Bricks”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Volume- 5, Issue-11, Nov.-2017.
- Maniatidis Vasilios & Walker Peter, 2003, “A Review of Rammed Earth Construction”, *Natural Building Technology Group Department of Architecture & Civil Engineering University of Bath*.
- McHenry, P. G., 1984, *Adobe and Rammed Earth Buildings. Design and Construction*. A WileyInterscience Publication, New York, USA.
- Minke, G., (2000). *Earth Construction Handbook. The building Material Earth in Morden Architecture*. WIT Press, Southampton, UK.
- MOPT (Ministerio de Obras Publicas y Transportes), 1992. *Bases Para el Diseno y Construction con Tapial*, Madrid.
- *New Mexico Adobe and Rammed Earth Building-Code (1991)*. Published by Regulation & Licensing Department, Construction Industries Division, General Construction Bureau, Santa Fe, New Mexico.
- Nicholas J. D’Ambra,) 2016 (, *Rammed Earth Compressive Testing Using Soils From San Luis Obispo*”, *California Polytechnic State University .San Luis Obispo*.



Received: 2023/05/14

Accepted: 2024/07/08

Suitable Aggregate and Optimal Soil Moisture Detection Method in Implementing Earthen Structures with Rammed Earth Technique

Somayeh Omidvari* Fatemeh Faghieh Khorasani**

Abstract

3

Soil is one of the natural materials that is cheap, easily available and used in many parts of the world. Generally, in architecture soil is used in different methods in combination with water and other materials. This earthen material operates generally in three different building systems, including Masonry systems, monolithic systems, and filler systems. One of the most important systems in earthen structures have been the monolithic or integrated systems in which architectural and mortar elements act as integrated and are interconnected. Execution technique of rammed earth among different soil techniques is one of the monolithic building systems that allow constructing strong structural walls by pouring the soil in wooden or metal molds and ramming it. This technique has become popular in many parts of the world, especially in Europe.

In the process of constructing buildings with rammed earth, has been one of the most important issues to identify and assessing suitable soil for aggregate and appropriate moisture for ramming and shaping the wall. Although many studies have tried to provide a specific ratio and percentage of aggregate and optimal moisture, but due to the nature of soil materials which is different from other new materials and the soil of each region has special and different characteristics, therefore providing definite percentages is not possible to guide the builders of each region for proper execution of this technique. In order to identify the appropriate soil and optimal moisture in the rammed earth technique, various tests are suggested, that by performing these tests on local soil can help the builders to accurately identify the soil and optimal moisture. This paper, based on the empirical-field research method and library studies, an attempt has been made to provide appropriate solutions for assessing suitable soil for rammed earth walls.

Keywords: Soil Structure, Rammed Earth, Diagnostic Tests, Soil Aggregate, Optimum Moisture

* Associate Professor, Department of Art and Architecture, Science and Arts University, Yazd.

** Science and Arts University, Yazd.