

تثبیت مکانیکی خاک و تبیین جایگاه آن در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک

منصوره درمحمدی^{۱*}، رضا رحیم نیا^۲

۱- کارشناسی ارشد، مدرس مدعو گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مرمت و احیا بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱، تاریخ پذیرش نهائی: ۱۳۹۶/۰۹/۰۳)

چکیده

خاک یکی از قدیمی‌ترین و گسترده‌ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده توسط بشر به‌ویژه در نواحی گرم و خشک بوده است؛ لذا شناخت روش‌های تاریخی تثبیت و استحکام‌بخشی مصالح خاکی که در اقلیم گرم و خشک مورد استفاده بوده، می‌تواند زمینه به‌کارگیری مجدد آن‌ها در بناهای معاصر را نیز فراهم نماید. در فرآیند فرآوری خاک برای تولید مصالح خاکی در اقلیم گرم و خشک، مرحله مهمی برای ورز دادن و با شدت افکندن گل وجود دارد که موجب تراکم نسبی، کاهش تخلخل و نتیجتاً بهبود رفتار مصالح خاکی می‌شود. این روش در دانش مهندسی ساختمان، تثبیت مکانیکی نامیده می‌شود و علی‌رغم آنکه قابلیت آن در بهبود خواص مکانیکی مصالح خاکی کاملاً شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته، مطالعه در مورد قابلیت‌های ورز دادن و افکندن گل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف تبیین جایگاه تثبیت مکانیکی در ساختار مصالح بومی اقلیم گرم و خشک شکل گرفته است و مروری بر انواع روش‌های تثبیت مکانیکی و عوامل تأثیرگذار بر آن و همچنین مصالح خاکی تولید شده با این شیوه خواهد داشت. لذا این بررسی در قالب یک پژوهش کاربردی و با تکیه بر روش‌های ترکیبی (توصیفی و میدانی) انجام شده است. برای این منظور پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای و همچنین بررسی‌های میدانی، چرایی و چگونگی اعمال تثبیت مکانیکی بر مصالح خاکی مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعه در حوزه تثبیت مکانیکی مصالح خاکی، بیانگر تأثیر مطلوب ورز دادن و افکندن گل با میزان رطوبت کافی در مقایسه با شیوه امروزی تثبیت مکانیکی یعنی تراکم خاک با رطوبت کم است؛ لذا می‌توان این‌گونه استنتاج نمود که معماران سنتی این اقلیم، به‌طور ضمنی با روش صحیح تثبیت مکانیکی و وجود رابطه مثبت بین این تکنیک و خصوصیات مکانیکی مصالح بومی در اقلیم گرم و خشک آگاه بوده‌اند. با توجه به تأثیر مطلوب تثبیت مکانیکی بر خواص مکانیکی مصالح خاکی، در صورت تلفیق صحیح این تکنیک با روش ساخت سنتی مصالح خاکی، در عصر حاضر نیز قابلیت بازکاربری این مصالح در معماری اقلیم گرم و خشک وجود دارد.

کلید واژه‌ها: تثبیت مکانیکی، اقلیم گرم و خشک، معماری با خاک، مصالح بومی

*Email: Dormohamadi_m@yahoo.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.29252/smb.5.6.29>

۱- مقدمه

خاک در دسترس‌ترین و ارزان‌ترین مصالح ساختمانی است که در تمام دنیا به وفور یافت می‌شود، توانایی سازگاری با اقلیم‌های مختلف را دارد و همچنان در کشورهای توسعه یافته (اغلب در جهت استفاده از مصالح تجدیدپذیر) و کشورهای درحال توسعه (اغلب در جهت استفاده از مصالح ارزان و در دسترس) مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجربه نشان داده است که با توجه به افزایش هزینه مصرف انرژی ناشی از تولید مصالح ساختمانی مدرن، خاک یک ماده حیاتی محسوب می‌شود (Zami, Lee, 2010: 5)؛ به طوری که پس از دهه ۱۹۵۰ و به طور عمده در سال‌های گذشته، پیرو پیشرفت‌های علمی گسترده در زمینه‌های مختلف مهندسی و نظر به کمبود منابع انرژی در جهان، گرایش دوباره به معماری خاکی به عنوان پاسخی به مسائل زیست‌محیطی جدی در جهان پدیدار گشت و تکنولوژی‌های نوین به منظور بهبود معماری گلین (Eires et al, 2013: 962) در کنار علاقه و تمایل به مطالعه و حفاظت معماری خاکی پا به عرصه گذاشتند. لذا مؤسسات تحقیقاتی مختلفی برای مطالعه و بهبود رفتار خاک تأسیس شد که امکان بررسی تجربیات سنتی و تلفیق آن‌ها را با روش‌های نوین فراهم می‌کنند (Houben, Guillaud, 1994: 14). در ایران نیز بازگشت به موضوع معماری خاکی و مطالعات در حوزه مقاوم‌سازی خشت و بناهای خشتی، پس از دوران پهلوی اول، مجدداً جان تازه‌ای به خود گرفت^۱ (اسماعیلی، قلعه‌نوی، ۱۳۹۱: ۵۴).

لذا در طی سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری به منظور استحکام‌بخشی بناهای خاکی، رفع معایب و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی صورت گرفته است. البته راهکارهای مورد استفاده به منظور

بهبود کیفیت مصالح و افزایش دوام ساختمان‌های گلین محدود به دوران معاصر نبوده و شواهدی از بکارگیری آن‌ها به سه شیوه تثبیت فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی پیش از این وجود دارد. تاکنون دو شیوه اول و افزودنی‌های مورد استفاده جهت تثبیت‌کنندگی به وفور مورد بررسی‌های علمی و آزمایشگاهی قرار گرفته اما تثبیت مکانیکی یا به عبارتی فشرده‌سازی در مصالح کمتر مورد پژوهش بوده است. در این روش می‌توان با تنظیم مقدار فشار اعمال شده بر خاک، عملکرد انواع خاک را افزایش داد چرا که فشردگی خاک منجر به مقاومت بیشتر آن‌ها خواهد شد (Rollins, Ilberg, 2007: 17). "بلوک خاک فشرده"^۲ (CEB)، در واقع تکنیک بهبود و تغییر یافته "خشت"^۳ است که از روش تثبیت مکانیکی بهره برده است. در این تکنیک ساخت و همچنین تکنیک ساخت "دیوار خاک کوئیده"^۴، به منظور افزایش مقاومت، با افزایش فشار و تراکم و بدون استفاده از تثبیت‌کننده‌ها، دانه‌های خاک را متراکم‌تر نموده تا بلوکی با تراکم متوسط و موئینگی مناسب به وجود آید. نتایج نشان داده‌اند که این مصالح در مقایسه با بلوک دست‌ساز، دارای مقاومت بیشتری نسبت به تنش‌های فشاری و دوام بیشتری در مواجهه با رطوبت می‌باشند (CRAterre, 1991: 5).

با این حال علی‌رغم توسعه تحقیقات جهانی در حوزه بهبود کیفیت مصالح خاکی، آئین‌نامه‌ها و ضوابط موجود در ایران با حذف صورت مسئله، استفاده از خشت در معماری معاصر را محدود نموده است و اساساً آئین‌نامه یا استاندارد خاصی در مورد ساختمان‌های گلین موجود نیست. در یک نگاه کلی، آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (آئین‌نامه ۲۸۰۰)، استفاده از خشت و گل را به علت ضعف مصالح و مقاومت اندک آن‌ها در برابر

تثبیت مکانیکی و همچنین جایگاه تثبیت مکانیکی در معماری اقلیم گرم و خشک شکل گرفته که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۲- روش پژوهش

با توجه به ساختار ارائه شده از اجزای پژوهش و در جهت نیل به اهداف مدنظر، رویکردی کیفی برای این مطالعه اتخاذ شده است. بدین ترتیب در گردآوری اطلاعات، بررسی‌های کتابخانه‌ای و میدانی مدنظر قرار گرفته‌اند. بررسی‌های کتابخانه‌ای در قالب موضوع تثبیت خاک و تثبیت مکانیکی، شکل‌دهنده مطالعات مفصل مربوط به ادبیات و پیشینه پژوهش هستند که بخش مهمی از اطلاعات این مقاله را فراهم آورده‌اند. بررسی‌های میدانی تکمیلی نیز در جهت دستیابی به نشانه‌های بهره از این تثبیت مکانیکی در معماری اقلیم گرم و خشک مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر در قالب پژوهشی کاربردی انجام گرفته و تحلیل و پردازش اطلاعات نیز مبتنی بر رویکردی توصیفی-تحلیلی است. گفتنی است برخی از بررسی‌های میدانی در قالب پرسش‌های محدود از معماران بومی و برخی نیز با مشاهدات میدانی در آثار معماری خاکی موجود در اقلیم گرم و خشک فراهم آمده است.

۳- تثبیت خاک و هدف از آن

هرچند موضوع بهبود مقاومت و استحکام طبیعی خاک و مصالح خاکی که عموماً بنام تثبیت خاک از آن یاد می‌شود پیشینه‌ی بس دیرینه‌ای دارد و از عصر باستان، استفاده از مواد افزودنی طبیعی، همچون: الیاف کاه، موی بز و ذرات شن و ماسه برای اصلاح مصالحی نظیر خشت و گل، همواره مورد توجه بشر بوده است ولی سابقه پژوهش‌های علمی در این زمینه، به حدود سال ۱۹۲۰ میلادی

نیروهای ناشی از زلزله ممنوع کرده^۵ و خانه‌های خشتی و گلی را در ردیف خانه‌های با مصالح بی‌دوام و کم‌دوام قرار داده است^۶ (اهری، ۱۳۶۷: ۶۳). این در حالی است که موضوع تثبیت مکانیکی خاک پیش از این نیز در معماری اقلیم گرم و خشک ایران به روش‌های گوناگون و به‌منظور بهبود کیفیت مصالح خاکی وجود داشته و از قدیم‌الایام به صورت ضمنی توسط معماران سنتی نیز بکار گرفته می‌شده است. یکی از این روش‌ها، ورز دادن و افکندن گل بوده که معادل روش تثبیت مکانیکی و از روش‌های شناخته شده و متداول برای بهبود خواص رفتاری خاک است. لذا با توجه به اینکه درصد زیادی از مساحت ایران را مناطق گرم و خشک و کویری تشکیل داده است، پژوهش حاضر در تلاش است تا ضمن معرفی روش‌های تثبیت به‌ویژه تثبیت مکانیکی و عوامل تأثیرگذار بر آن، جایگاه و اهمیت تثبیت مکانیکی در مصالح خاکی این اقلیم را مورد بررسی قرار داده و همچنین زمینه‌ای برای باز کاربری این شیوه تثبیت در معماری عصر حاضر را فراهم نماید. از این رو پاسخ به سؤالات زیر را در ساختار این پژوهش می‌توان جستجو نمود:

- تکنیک‌های ساخت با خاک از نوع تثبیت‌شده مکانیکی در مصالح خاکی جهان و اقلیم گرم و خشک ایران چیست؟
- در معماری اقلیم گرم و خشک ایران، بهبود خواص مصالح خاکی بدون افزودن تثبیت‌کننده چگونه صورت پذیرفته است؟

در این راستا، پژوهش حاضر با اتکا به بررسی‌های کتابخانه‌ای و میدانی و با نگاهی توصیفی-تحلیلی انجام پذیرفته است. شاخصه‌های مورد توجه در این نوشتار در سه بخش تثبیت خاک (با تمرکز بر تثبیت مکانیکی)، تکنیک‌های ساخت با خاک توأم با

دارد (Houben, Houben, Guillaud, 1994: 14) Rigassi, Garnier, 1996: 9) و هدف بهبود خواصی همچون مقاومت فشاری، نفوذناپذیری، دوام در مجاورت با آب و پایداری در برابر سایش را دنبال می‌کند (Rollins, Ilberg, 2007)؛ با این حال، تثبیت خاک به دلیل پارامترهای زیادی که دخیل هستند، یک مسئله پیچیده است. علاوه بر تولید مصالحی نظیر خشت تقویت‌شده، بلوک فشرده گلی، بلوک‌های قفل‌بست شونده و اندوهای ضد آب گلین، در بخش دوم فناوری‌های ارتقایافته‌ای مثل خاک کوبیده، حصیرگل و کاربرد عناصر کششی از پرکاربردترین تجربیات جهانی در این حوزه می‌باشند (وارن، ۱۳۸۷: ۹) که در جهت ارتقا و ویژگی‌های خشت و مصالح خاکی مورد توجه بوده‌اند.

علاوه بر این علی‌رغم بسیاری از محدودیت‌های موجود در مصالح گلی و خانه‌های ساخته شده با خاک، مصالح خاکی تثبیت‌شده به مراتب ارزان‌تر از مصالح متعارفی مانند آجر و بتن بوده و از لحاظ زیست‌محیطی نیز پایدار هستند. به طور کلی می‌توان بیان کرد که اهداف اصلی در تثبیت‌کنندگی خاک عبارت‌اند از: دستیابی به عملکرد مکانیکی بهتر (افزایش مقاومت فشاری خشک و مرطوب)، کاهش تخلخل و تغییرات حجم (تورم و انقباض ناشی از تغییرات رطوبت) و بهبود توانایی مقاومت در برابر فرسایش ناشی از باد و باران (کاهش سایش سطحی و افزایش خاصیت ضدآبی)؛ مواردی که همگی در قالب روش‌های متفاوتی ایجاد شده و در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

۴- روش‌های تثبیت خاک

با توجه به مطالب اشاره شده و بررسی ادبیات موجود، مکانیسم تثبیت خاک به گونه‌ای است که

بازمی‌گردد که مواد تثبیت‌کننده خاک، به‌طور علمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. این پژوهش‌های علمی در سال ۱۹۴۵ در جهت ساخت مسکن و سرپناه برای مردم جنگ‌زده اروپا (Houben, Guillaud, 1994) و در ادامه با مطالعات گسترده دهه ۷۰ میلادی در کشور پرو در مورد ساختمان‌های خشتی ادامه یافت که شامل انواع مختلف تقویت با استفاده از مصالح محلی و افزودنی‌ها به ملات بوده است (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۹). با این وجود، بیشتر این مطالعات در آغاز، با هدف بهینه‌سازی خاک از دیدگاه مهندسی راه و ساختمان، برای بهبود زیرسازی جاده‌ها و تثبیت خاک آن‌ها برای عبور و مرور وسایط نقلیه و خودروها و همچنین احداث سدهای خاکی، پوشش کانال‌ها و غیره بود ولی به تدریج این پژوهش‌ها در سایر حوزه‌ها، از جمله معماری و مرمت نیز مورد توجه قرار گرفت و دنبال شد.

این تحقیقات درباره روش‌های تثبیت خاک نشان می‌دهند که با به‌کارگیری تثبیت‌کنندگی، دستیابی به معماری خاکی بادوام بیشتر امکان‌پذیر است لذا افزایش دوام ساختمان خاکی می‌تواند به تغییر برداشت نابجا و تعصبی که هنوز در مورد مصالح خاکی وجود دارد، کمک کند (Eires et al., 2013: 962). به‌طور کلی، استحکام بخشی در حوزه معماری گلین به دو بخش تثبیت مصالح و تثبیت فناوری ساخت تقسیم شده است که بخش اول شامل تقویت مصالح گلین به شیوه‌های مختلف با استفاده از تجهیزات نوین بوده و بخش دوم بیانگر استفاده از ماشین‌آلات و فناوری‌های نوین در ساخت و ساز با خاک می‌باشد (وارن، ۱۳۸۷: ۹). درباره بخش اول، تثبیت خاک دلالت بر اصلاح خواص مجموعه خاک-آب-هوا به منظور دستیابی به خواص پایدار و سازگار با عملکردی مشخص

Rigassi, 1985: 42; Zami, Lee, 2010: 1
(Rollins, Ilberg, 2007).

در تثبیت فیزیکی و شیمیایی، افزودنی‌های متعدد دیگری نیز اعم از مواد شیمیایی، رزین یا محصولات طبیعی همچون کاه^۷؛ الیاف نخل خرما^۸؛ الیاف پلی پروپیلین^۹؛ سنگ گچ^{۱۰}؛ آهک^{۱۱}؛ ماسه و سدیمن کربنات^{۱۲}؛ سیمان^{۱۳}؛ ترکیب آهک، سیمان و روغن^{۱۴}؛ ماسه شسته شده رودخانه‌ای، پودر و خرده‌های آجر، پودر آهک، خرده‌های سفال، الیاف خرما، کاه و پوکه صنعتی^{۱۵}؛ خرده چوب و پوسته برنج^{۱۶}؛ افزودن خاکستر پوسته برنج، سیمان و آهک به بلوک‌های خاک فشرده؛ افزودن آهک و خاکستر باگاس نیشکر به بلوک‌های خاک فشرده؛ استفاده از ضایعات آلومینا و زباله حاصل از خاکستر ذغال سنگ؛ خاکستر بادی؛ خاکستر پوسته برنج، خاکستر باگاس و خاکستر کاه برنج^{۱۷}؛ ماسه، گچ، آهک، پودر آجر و کاه^{۱۸}؛ خاکستر بادی، شن و ماسه کوارتزی^{۱۹}؛ بزاقت مصنوعی موریانه و ذرات بامبو؛ الیاف کنف^{۲۰}؛ مدنظر پژوهش‌های گوناگونی بوده است.

نکته قابل تأمل در مورد دو روش تثبیت فیزیکی و شیمیایی این است که اگرچه در چند سال اخیر از مواد سنتزی در این زمینه استفاده‌های بسیاری شده است، اما به دلایل اقتصادی همچنان تلاش می‌شود تا حد امکان، با توجه به وضعیت جغرافیایی و اقلیمی منطقه از استحکام‌بخش‌های طبیعی استفاده شود. چراکه علی‌رغم کم‌انرژی و مقرون‌به‌صرفه بودن خاک تثبیت‌شده از دو نوع فیزیکی و شیمیایی، همچنان دسترسی به آن در بسیاری از مناطق شهری و روستایی فقیرنشین دشوار بوده و گران‌تر از حد توانایی پرداخت بسیاری از مردم است. بنابراین می‌توان گفت که تثبیت فیزیکی و شیمیایی خاک، همیشه یک اصل نیست و تنها در موارد خاص و

می‌تواند در دو خصوصیت از خاک (ساختار و بافت آن) تأثیرگذار باشد. در این راستا سه روش برای اصلاح ساختار و بافت خاک وجود دارد: ۱- کاهش حجم حفره‌های بین ذرات، یعنی تأثیر بر تخلخل آن؛ ۲- مسدود کردن حفره‌هایی که نمی‌توان آن‌ها را از بین برد، یعنی تأثیر بر نفوذپذیری آن و ۳- بهبود پیوندهای اتصال‌دهنده ذرات به یکدیگر، یعنی تأثیر بر مقاومت مکانیکی آن (Rigassi, 1985: 41). این سه روش به ترتیب با عناوین تثبیت فیزیکی، تثبیت شیمیایی و تثبیت مکانیکی (فشرده‌سازی) شناخته می‌شوند. اگرچه تمرکز این مطالعه بر تثبیت مکانیکی است، اما شایسته است مفهوم دو روش دیگر تثبیت و ضرورت آن‌ها نیز به‌عنوان راهکارهای تقویت ساختارهای گلین مورد معرفی قرار گیرد.

۴-۱- تثبیت فیزیکی، تثبیت شیمیایی

تثبیت فیزیکی و شیمیایی و روش‌های آن چندان جدید نیستند و تثبیت‌کننده‌های مختلفی برای آن‌ها در سال‌های متمادی به کار گرفته شده‌اند. طی فرآیند تثبیت فیزیکی، خواص خاک را می‌توان با تغییر در بافت آن برای مثال تغییر در نسبت ترکیبی مواد تشکیل‌دهنده خاک و کنترل شکاف موجود در بین ذرات اختلاط اصلاح کرد (Houben, Rigassi, Zami, Lee, 2010: 1; Guillaud, 1994; Rollins, Ilberg, 2007; 1985: 42). در فرآیند تثبیت شیمیایی نیز، سایر مصالح یا مواد شیمیایی به خاک افزوده شده و خواص آن، هم از طریق واکنش فیزیکی- شیمیایی بین ذرات و مصالح یا مواد افزوده شده و هم با ایجاد یک ماتریس که ذرات را می‌پوشاند و به هم می‌چسباند، اصلاح می‌شود (Houben, Guillaud, 1994)؛

پرتلند معمولی، رایج‌ترین افزودنی مورد استفاده در دیوار خاک کوبیده تثبیت‌شده بوده است؛ این توضیح بدان معنی است که دیوار خاک کوبیده بدون عوامل تثبیت‌کننده (سیمان) به‌عنوان خاک تثبیت‌نشده در نظر گرفته می‌شود که با تعریف هوبن، گیلد، کینگز و بیانیه نورتون از فرآیند تثبیت خاک در تناقض است.

در مجموع با توجه به موارد بیان شده، این پژوهش با در نظر گرفتن مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی خاک تثبیت‌نشده و لزوم رفع معایب آن، به روش تثبیت مکانیکی خاک پرداخته که از طرفی سازگار با محیط‌زیست و ارزان باشد و از طرف دیگر رفتار مکانیکی مصالح را نیز بهبود ببخشد. البته همان‌طور که هارپر (Harper, 2011: 23) اشاره می‌کند، در مورد لزوم به‌کارگیری تثبیت مکانیکی و محدودیت‌های تثبیت فیزیکی و شیمیایی چندین مسئله مطرح است؛ اول اینکه تثبیت فیزیکی و شیمیایی در اغلب موارد مقرون‌به‌صرفه و زیست‌محیطی نیست، در وهله دوم بایستی توجه کرد که هیچ‌گاه تثبیت فیزیکی و شیمیایی به‌عنوان مطمئن‌ترین و مناسب‌ترین راه‌حل مطرح نشده است، به‌علاوه در موضوع حفاظت از بناهای تاریخی اغلب بایستی از مصالح خاکی بدون افزودنی فیزیکی و شیمیایی استفاده شود. همچنین باید در نظر داشت که عدم بهره‌گیری از تثبیت، مصالحی کم‌دوام را به ارمغان خواهد آورد که در برابر آسیب‌های محیطی به‌آسانی دچار فرسایش خواهند شد. در این راستا موضوع اصلی مورد بحث در این مقاله متمرکز بر تثبیت مکانیکی قرار گرفته تا این محدودیت‌ها را نیز پوشش دهد. آنچه در ادامه ارائه شده با هدف تشریح جزئیات مرتبط با تثبیت مکانیکی و همچنین قابلیت‌های آن در معماری معاصر اقلیم گرم‌وخشک است.

ضروری لازم به اجراست، چراکه مواد بهبوددهنده اغلب گران بوده و هزینه‌ی تثبیت معمولاً بیشتر از مواد اولیه خواهد شد.

۴-۲- تثبیت مکانیکی

در روش تثبیت مکانیکی، خواص خاک با اصلاح ساختار آن تغییر می‌کند: تراکم و فشردگی خاک که منجر به تغییر در چگالی^۱، مقاومت مکانیکی، تراکم‌پذیری، نفوذپذیری و تخلخل آن می‌شود، از تأثیرات این روش بر روی خاک است (Zami, Lee, 2010; Houben, Guillaud, 1994)؛ 1؛ 42؛ Rigassi, 1985؛ Rollins, Ilberg, 2007). در بسیاری از پژوهش‌ها، زمانی که تثبیت خاک مطرح می‌شود عموماً تثبیت فیزیکی یا شیمیایی مدنظر بوده درحالی‌که تثبیت‌کنندگی لزوماً به معنای تثبیت فیزیکی یا شیمیایی نیست، چنانکه تعریف هوبن و گیلد (Houben, Guillaud, 1994) از فرآیند تثبیت‌کنندگی خاک نشان می‌دهد که صرفاً افزودن تثبیت‌کننده موجب تثبیت خاک نمی‌شود. علاوه‌براین کینگز (Kings, 1996) اشاره می‌کند که اضافه کردن مواد افزودنی به خاک تثبیت‌شده لازم نیست و بیانیه نورتون (Norton, 1997) نیز به‌وضوح نشان می‌دهد خاک تثبیت‌شده تنها به معنی افزودن تثبیت‌کننده به خاک نبوده بلکه کوبیدن نیز به‌تنهایی می‌تواند خاک را تثبیت کند (Zami, Lee, 2010: 2)، لذا تثبیت مکانیکی نیز اهداف تثبیت‌کنندگی را محقق می‌کند. در این میان، نظرات متناقضی نیز وجود دارد به‌طوری‌که والکر و همکاران وی (Walker et al, 2005) بیان می‌کنند که دیوار خاک کوبیده تثبیت‌شده، حالتی خاص از ساخت با خاک کوبیده است که از خاک مخلوط با عوامل تثبیت‌کننده به‌منظور بهبود خواص فیزیکی خاک استفاده می‌شود و تاکنون سیمان

۵- تثبیت مکانیکی و عوامل مؤثر بر آن (مکانیزم تثبیت)

از آنجاکه مقاومت خاک رابطه مستقیمی با درجه تراکم ذرات و در نتیجه با وزن واحد حجم یا دانسیته آن دارد لذا ایده فشرده‌سازی و تراکم در مصالح با توجه به نیاز به بهبود کیفیت مصالح و دوام ساختمان‌ها و در راستای بهره‌وری بیشتر به وجود آمده است (Rigassi, 1985: 24). آن‌گونه که برخی از دیگر پژوهشگران نیز اشاره کرده‌اند Jimenez Delgado, Rigassi, 1985: 28) تراکم خاک، فرآیند بالا بردن دانسیته خاک است و تراکم‌پذیری خاک، به معنی حداکثر قابلیت متراکم شدن خاک بر اثر مقدار مشخصی نیروی متراکم‌کننده در درجه‌ای از رطوبت معین (رطوبت بهینه) می‌باشد. در نتیجه ایجاد تراکم بالا در خاک که به لطف فشرده‌سازی فراهم می‌آید، جرم حجمی خاک را به دو دلیل افزایش می‌دهد، یکی تغییر پیوستگی و توزیع اندازه منافذ و دیگری کاهش حجم منافذ درشت خاک است (بایرام، بهمنی، ۱۳۹۴: ۶۹). بنابراین تراکم خاک در بافت خاک تغییری ایجاد نکرده و فقط ساختار آن را به واسطه توزیع مجدد ذرات تغییر می‌دهد (Rigassi, 1985: 42). قابل توجه است که این افزایش تراکم منجر به افزایش قابل توجهی در توان باربری، مقاومت فشاری و مقاومت بلوک‌ها در برابر فرسایش و کاهش آسیب‌پذیری نسبت به رطوبت می‌شود (Rigassi, 1985: 8; Guettala, Abibsi and Houari, 2006)، موضوعی که قابلیت به کارگیری آن را برای معماری خاکی قابل توجهی می‌کند. بنابراین برای افزایش مقاومت مصالح خاکی مانند خشت به روش مکانیکی، می‌توان با افزایش فشار و تراکم و بدون استفاده از تثبیت‌کننده‌ها، دانه‌های خاک را متراکم‌تر نموده تا

در نتیجه بلوکی با تراکم متوسط و موئینگی مناسب به وجود آید. در کل مقاومت فشاری هر خاک به دانه‌بندی و پخشایش ذرات آن‌ها، میزان آب، نحوه فشرده‌سازی، استاتیک یا دینامیک خاک و در نهایت به نوع مواد معدنی موجود در آن نیز بستگی دارد (مینکه، ۱۳۸۸، ۶۹). با این مقدمه، در ادامه مجموعه‌ای از عوامل کلیدی در موضوع تثبیت مکانیکی ارائه می‌شود که نسبت به دیگر موارد در درجه اهمیت بالاتری قرار دارند.

۵-۱- شیوه تراکم

به طور معمول، دو روش برای فشرده‌سازی و تراکم خاک بکار گرفته می‌شود: روش اول تراکم استاتیکی^{۲۲} است که در این روش تراکم خاک با فشردن نسبتاً آرام نمونه بین دو سطح مسطح که به یکدیگر نزدیک می‌شوند و با فشار جک هیدرولیکی به دست می‌آید (Doat et al, 1991:141؛ قبادیان، رحیمی، ۱۳۸۵، ۲۶). روش دوم، تراکم دینامیکی^{۲۳} است که در این روش تراکم‌پذیری از طریق کوبیدن خاک و اعمال ضربات با انرژی تراکمی استاندارد به دست می‌آید (Doat et al, 1991:141؛ قبادیان، رحیمی، ۱۳۸۵، ۲۶). هر کدام از این دو روش با توجه به امکانات موجود می‌تواند در تثبیت خاک مورد کاربرد قرار گیرد.

۵-۲- نوع خاک مورد استفاده در تراکم

مخلوط خاکی که دارای خصوصیات مناسبی از نظر گسترده‌گی دانه‌بندی و خواص پلاستیسیته بوده و دارای مشخصات فیزیکی مطلوب باشد در نتیجه‌ی تراکم، تخلخل بسیار کمتری در مقایسه با حالت طبیعی داشته و نفوذپذیری آن نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه در برابر نیروهای وارده مقاومت بیشتری

نظر داشت که رطوبت نباید بیش از حد بالا باشد زیرا حفره‌ها پر از آب می‌شوند و در نتیجه فشرده‌سازی را غیرممکن می‌کند. همچنین در صورت وجود رطوبت بیش از حد، خاک ممکن است متورم شده و فشار اعمال‌شده توسط ماشین به واسطه قطرات آب به دام افتاده بین ذرات، زایل شود. از طرف دیگر، اگر مقدار رطوبت بسیار پایین باشد، ذرات به قدر کافی آغشته به آب و روان نخواهند شد لذا امکان فشرده‌سازی خاک تا کمترین حجم وجود نخواهد داشت (Rigassi, 1985: 28-36). در مجموع برای یک مقدار نیروی تراکمی معین، درصد رطوبت بهینه‌ای وجود دارد که در آن دانسیته خشک خاک یا تراکم آن به حداکثر می‌رسد^{۲۴}. از این رو تعیین مقدار رطوبتی که باید به خاک اضافه شود (رطوبت بهینه) در فرآیند تثبیت مکانیکی دارای اهمیت است.

۶- تکنیک‌های معاصر ساخت با خاک به روش تثبیت مکانیکی

معماری با خاک به صورت تکنیک‌های مختلف ساختمانی انجام می‌پذیرد که نسبت به هر منطقه، شرایط و ترکیبات متنوعی دارد. در پژوهش هوبن و گیلد (Houben, Guillaud, 1994, 5)، ساخت‌وساز با خاک به دوازده دسته کلی^{۲۵} تقسیم شده که در نهایت هجده شیوه ساخت زیرمجموعه آن‌ها قرار می‌گیرد. در این میان، تکنیک‌های ساخت "خشت"، "خاک کوبیده" و "بلوک‌های خاک فشرده" رایج‌تر و عمومی‌تر هستند (Houben, Guillaud, 1994: 107). از بین این روش‌ها، تکنیک ساخت خشت به روش قالب‌گیری با تراکم محدود و تکنیک‌های ساخت خاک کوبیده و بلوک خاک فشرده کاملاً با تکیه بر فشرده‌سازی و توأم با تثبیت مکانیکی صورت

داشته و باعث کاهش قابلیت تورم خاک‌های رسی و بهبود خواص مکانیکی خاک می‌شود. خاک با ذرات هم‌اندازه کم‌تر از خاکی با ذرات متفاوت متراکم می‌شود، زیرا ذرات کوچک خاک، فضای خالی بین ذرات بزرگ را پر نمی‌کنند (Gottelandd, Benoit, 2006: 453). آن‌گونه که حامی (۱۳۸۲: ۱۴۲) اشاره می‌کند در موضوع خشت نیز هرچه دانه‌بندی خاک خشت پیوسته‌تر باشد و نیز برای ساختن گل خشت، آب بهینه مصرف گردد و به گل با فشار شکل داده شود، تاب فشاری خشت خشک بیشتر می‌گردد. از دیگر مسائل تأثیرگذار در تراکم خاک، درصد رس موجود در خاک است. همچنان که بایرام و بهمنی (۱۳۹۴: ۶۹) نیز اشاره می‌کنند نوع خاک (درصد رس و پلاستیسیته خاک) در فرآیند تراکم‌پذیری تأثیرگذار و در نتیجه تغییر آرایش ذرات خاک‌های رسی مطمئناً در خصوصیات خاک تثبیت‌شده تأثیرگذار خواهد بود.

۵-۳- شرایط رطوبتی تراکم

لایه‌های خاک لازم است به گونه‌ای متراکم شوند که نسبت تخلخل آن‌ها به یک مقدار حداقل یا دانسیته خشک به یک میزان حداکثر برسد؛ این عمل عموماً با افزودن مقداری آب به توده خاک و کوبیدن آن به میزان معینی توسط وسایل کوبنده مثل انواع غلتک‌ها انجام می‌پذیرد. اثر رطوبت در فرآیند تراکم، ایجاد سهولت در لغزش و حرکت ذرات خاک‌های چسبنده و در نتیجه ایجاد تراکم بیشتر می‌باشد، زیرا در حالت مرطوب، رطوبت به صورت ماده روان‌کننده بین ذرات خاک عمل کرده و به ذرات خاک کمک می‌کند به راحتی متراکم شوند. گفتنی است هر چه رطوبت خاک بیش‌تر باشد عمل تراکم راحت‌تر صورت می‌گیرد (بایرام، بهمنی، ۱۳۹۴: ۷۲؛ حامی، ۱۳۸۲: ۳۵). البته باید در

مواجه به هزینه‌های بالای انرژی تقویت کرد (Rigassi, 1985: 24). از زمان ظهور بلوک‌های خاک فشرده در دهه ۵۰، فناوری تولید این بلوک‌ها و کاربرد آن در ساختمان، همچنان رو به پیشرفت بوده و ارزش علمی آن همپای ارزش فنی آن به اثبات رسیده است (Guillaud et al, 1985: 10). امروزه بلوک خاک فشرده به‌عنوان یک مصالح ساختمانی دوستدار محیط‌زیست، پایدار، ارزان-قیمت با مزایای بسیاری همچون کاهش مصرف انرژی، کاهش وابستگی به منابع تجدیدناپذیر، حداکثر استفاده از مواد قابل‌دسترس محلی، نیاز به تکنولوژی نسبتاً ساده برای ساخت و ارائه‌دهنده ویژگی‌های مناسب عایق‌بندی مطرح می‌شود (Walke, 1997: 1). همچنین به‌عنوان تکنیکی مناسب برای تأمین مسکن کم‌هزینه در جهان درحال توسعه شناخته شده و خواص مکانیکی مطلوبی نیز ارائه داده است (Harper, 2011: 2). این ویژگی‌ها در کنار رعایت گروهی دیگر از استانداردها و عوامل مؤثر بر کیفیت آن اثرات مثبت‌تری نیز خواهد داشت.

امروزه در دنیا برای ساخت بلوک‌های فشرده، به جای پر کردن قالب چوبی با دست، خاک مرطوب شده را توسط پرس دستی یا هیدرولیک درون قالب‌های فلزی یا چوبی، تحت فشار قرار می‌دهند (تصویر ۱)، لذا تراکم نسبت به حالت دستی افزایش یافته و این موضوع باعث بهبود رفتار مطلوب‌تر بلوک خاکی در برابر عوامل آسیب‌رسان خواهد شد (Guillaud et al, 1985: 18; CRAterre, 1991: 5).

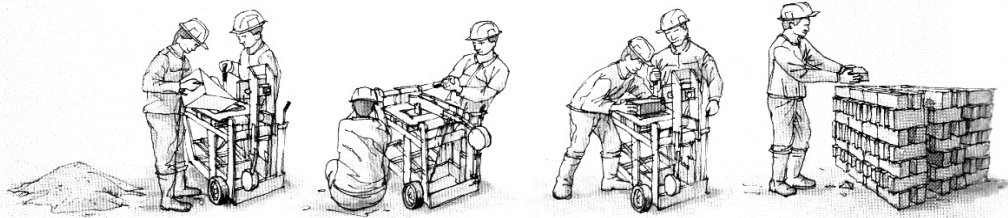
تفاوت ساخت خشت و بلوک خاک فشرده، علاوه بر تراکم، در میزان رطوبتی است که برای ساخت اختلاط بکار می‌رود.

می‌گیرند. با توجه به اینکه استفاده از خشت در معماری کاملاً شناخته شده و فرآیند فشرده‌سازی نیز محدودتر است، تمرکز بحث در ادامه بر دو روش ساخت بلوک خاک فشرده و خاک کوبیده خواهد بود تا درک کامل‌تری از تثبیت مکانیکی و پیشینه کاربرد آن در معماری اقلیم گرم و خشک را ارائه نماید.

۶-۱- بلوک خاک فشرده

با نیاز به بهبود کیفیت مصالح و افزایش دوام ساختمان‌ها، فشرده‌سازی در مصالح به‌عنوان یک روش برخورد ایجاد شد. این روش برخورد، نمایانگر یک پیشرفت واقعی از روش‌های سنتی تولید بلوک‌های خاکی اعم از خشت یا بلوک‌های دست‌ساز و بدون قالب به بلوک خاک فشرده و پاسخی در جهت بهبود مصالح بوده است (Guillaud et al, 1985: 18; CRAterre, 1991: 6). فشرده‌سازی بلوک‌های خاکی یکی از این روش‌هاست که پیشینه‌ای طولانی دارد. منشأ تاریخی تکنیک معاصر بلوک خاک فشرده یا CEB (Compressed Earth Block) را باید در سنت هزارساله ساخت بلوک‌های خاکی قالب‌زده شده و آفتاب‌پز که بیشتر به نام "خشت" (Adobe) مشهور است، جستجو کرد؛ به عبارتی می‌توان گفت بلوک خاک فشرده، نسل جدیدی از خشت است (Guillaud et al, 1985: 18; Rigassi, 1985: 24) که با یک کوبنده یا دستگاه پرس فشرده می‌شوند.

نیاز به صرفه‌جویی انرژی، به‌ویژه انرژی مصرفی برای پخت مصالح در دوران بحران (بعد از جنگ جهانی دوم به‌منظور بازسازی تعدادی مسکن اجتماعی در فرانسه و جمهوری دموکراتیک آلمان)، توسعه بلوک خاک فشرده را سرعت بخشید و گسترش کاربرد آن را در معماری مناطق



تصویر ۱- فرآیند تولید بلوک خاک فشرده

مأخذ: (Fontaine, Anger, 2009: 82)

کشورها از جمله هند، مکزیک، کالیفرنیا، آفریقای جنوبی و ... به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد در معماری مورد استفاده قرار گرفته است.

۶-۲- دیوار خاک کوبیده

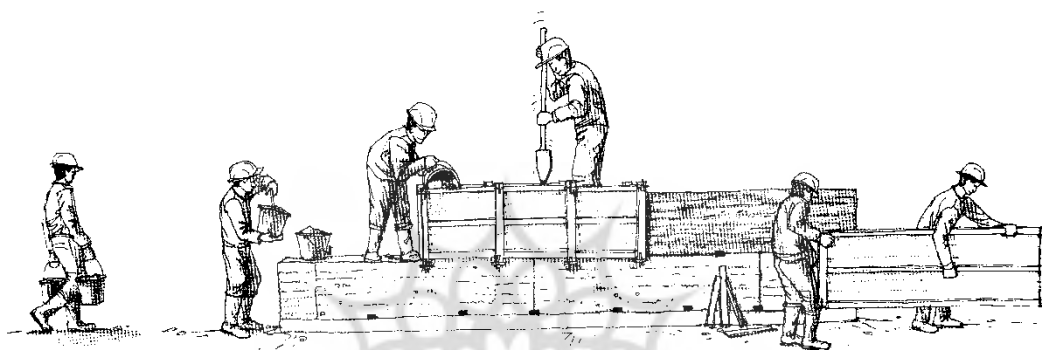
در تمامی ۵ قاره جهان، خاک کوبیده برای قرن‌هاست که به‌عنوان یک تکنیک ساخت‌وساز سنتی مشهور شده است. در حقیقت فونداسیون خاک کوبیده در تمدن آشوریان با قدمت ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد کشف شده است (مینکه، ۱۳۸۸: ۸۳). روش خاک کوبیده شده بیشتر برای ساخت دیوار استفاده شده و هسته اصلی دیوار چین نیز بدین شیوه ساخته شده است. بعد از ورود اسپانیایی‌ها به آمریکای جنوبی، این فناوری ساخت توسط آن‌ها به اروپا آورده شد و این روش هم‌اکنون نیز طرفداران زیادی در اروپا و دیگر نقاط جهان دارد. این روش در حال حاضر در استرالیا و کشورهای اروپایی مانند فرانسه یکی از شیوه‌های ساختمان‌سازی متداول با خاک به شمار می‌رود (مینکه ۱۳۸۸: ۸۴-۸۳). در تکنیک خاک کوبیده، خاک مرطوب به درون قالب‌ها در لایه‌هایی با ضخامت حدود ۱۵ سانتی‌متری ریخته می‌شود و سپس با کوبیدن فشرده می‌شود. قالب معمولاً شامل دو دیوار موازی جدا و متصل به هم به وسیله جداکننده‌ها است (مینکه،

ساخت خشت در وضعیتی صورت می‌گیرد که خاک به واسطه وجود رطوبت، حالت پلاستیک پیدا کرده است اما بلوک خاک فشرده اصطلاحاً به صورت "خاک خشک" و با مقدار آبی مشابه خاک کوبیده ساخته می‌شود (Doat et al, 1991: 137).

بلوک‌های فشرده در مقایسه با بلوک دست‌ساز، از نظر اندازه و فرم منظم‌تر هستند. تراکم بالاتر که به کمک فشرده‌سازی به دست آمده، به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری بلوک و همچنین استحکام در برابر فرسایش و آسیب‌های ناشی از مواجهه با آب را نیز در آن بالا می‌برد (CRAterre, 1991: 5; Guillaud et al, 1985: 1). به لطف کیفیت بالای بلوک‌های خاک فشرده، می‌توان پروژه‌های بنایی با کیفیت مطلوب، معادل ساختمان‌های ساخته‌شده با آجر پخته را محقق ساخت. کاربرد بلوک خاک فشرده در معماری می‌تواند از مسکن اجتماعی تا خانه‌های لوکس و ساختمان‌های عمومی مهم، متنوع باشد. همچنین روش تولید بلوک‌های فشرده از لحاظ فنی توسط کارگران محلی قابل انجام است و ساخت بنا با بلوک فشرده بیشتر نیاز به مهارت‌های اولیه کار با مصالح بنایی دارد. همانگونه که مینکه (۱۳۸۸: ۹۸-۹۹) نیز اشاره می‌کند، این روش در بسیاری از

هیدرولیکی یا پنوماتیکی به طور مثال ضربه‌زن‌های بادی و غلطک‌های لرزان برقی نیز استفاده می‌شود. در روش تثبیت فیزیکی و شیمیایی، تغییر در نسبت اختلاط اجزا خاک و اضافه نمودن مواد شیمیایی، مختلف مانند سیمان جهت افزایش مقاومت کششی، قدرت چسبندگی، ضد آب نمودن و کاهش ضریب انتقال حرارت، موضوع مورد مطالعه و تجربه در کشورهای مختلف جهان می‌باشد.

۱۳۸۸: ۸۳). استحکام بخشی در این تکنیک ساخت به هر سه روش مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود. در روش تثبیت مکانیکی، فشرده‌سازی به دو شیوه دستی و مکانیکی صورت می‌گیرد. در تراکم دستی، خاک به وسیله کوبه چوبی متراکم می‌شود؛ این روش هنوز قابل انجام‌ترین روش در کشورهای در حال توسعه می‌باشد (تصویر ۲). در تراکم مکانیکی از ویراتورها و دستگاه‌های مختلف



تصویر ۲- فرآیند ساخت دیوار خاک کوبیده
 مأخذ: (Fontaine, Anger, 2009, 29)

۷- جایگاه تثبیت مکانیکی در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک

با وجود مقدمه‌ای که مرتبط با موضوع تثبیت مکانیکی و معماری معاصر با خاک در سطح جهان ارائه شد، امروزه بهره‌گیری از این روش در معماری اقلیم گرم و خشک کمتر مورد توجه بوده است. از این رو در ادامه، شناسایی و معرفی پتانسیل‌های موجود در معماری سنتی اقلیم گرم و خشک در حوزه تثبیت مکانیکی موضوعی است که به منظور کاربرد معاصر آن در این اقلیم مورد توجه قرار خواهد گرفت. معماران سنتی در فلات مرکزی ایران با به کارگیری ابتکاراتی که به تدریج به تکامل رسیده‌اند، بناهایی را عرضه کردند که اکثراً از خاک ساخته شده و هنوز هم با گذشت

زمان زیادی از آن‌ها، قابل توجه و ماندگار هستند. در شکل‌گیری و بقای این بناها عوامل مختلفی من جمله مصالح ساختمانی مورد استفاده در آنها تأثیرگذار بوده است. تبدیل کردن خاک رس به مصالح ساختمانی در معماری خاکی هوشمندانه بوده و در عین حال نیاز به تجربه داشته است. بعد از عامل کیفیت مصالح، انتخاب روش ساخت مناسب، کیفیت ساخت و اجرای اصولی بنا نیز از اهمیت خاصی برخوردار بوده است.

چنانچه این عوامل به درستی و صحیح، انتخاب و اعمال شوند حتی با استفاده از خاک نیز می‌توان بناهای استواری برپا کرد. معماران سنتی این موضوع را به خوبی درک کرده و علی‌الخصوص در اقلیم گرم و خشک از آن بهره برده‌اند. چنانکه و

تأثیر گذار بر رفتار مکانیکی خشت و ساختار خشتی می‌دانسته‌اند. از منظری متفاوت این مراحل یعنی عمل‌آوری و آماده‌سازی خاک را می‌توان یک فرآیند میانجی و مهم برای تولید مصالح ساختمانی از خاک موجود دانست؛ موضوعی که با مروری بر تجارب معماران سنتی و آثار معماری موجود از گذشته نیز قابل پیگیری است.

همانطور که پیش از این مرور شد، امروزه تثبیت مکانیکی خاک به‌عنوان جزء مفید برای معماری با مصالح خاکی در نظر گرفته و شناخته می‌شود درحالی‌که بررسی پیشینه معماری با خاک در ایران

نشان می‌دهد ایده تراکم خاک برای بهبود کیفیت و عملکرد مصالح خاکی چندان جدید هم نیست. بنا به نگاره‌های تاریخی (تصویر ۳ تا ۵)، موضوع آماده‌سازی گل، تراکم و کوبش خاک جهت کاربرد در معماری خاکی ایران قدمتی طولانی داشته و مرحله آماده‌سازی خاک جهت تولید مصالح ساختمانی و تداوم بهره‌گیری از معماری با خاک، موضوع قابل توجهی بوده است.

معماران سنتی، پس از انتخاب خاک مناسب، آماده‌سازی گل را که شامل مراحل عمل‌آوری، ورز دادن و افکندن گل بوده، یکی از مراحل مهم



تصویر ۵- ساخت دیوارهای گلی
۱۲۳۹-۱۲۲۹ ه.ق.

مأخذ: (Grube and Michell, 1978: 112)



تصویر ۴- نگاره ای از بهزاد
۸۶۶-۸۵۹ ه.ق.

مأخذ: (آدامووا، ۲۰۰۸: ۷۹)



تصویر ۳- ساخت کاخ خورنق در عصر
ساسانی

۸۷۳ ه.ق.

مأخذ: (آدامووا، ۲۰۰۸: ۱۴۸)

۴۸ ساعت است. تجربه نشان داده که نیروی پیوستگی در خاک با این فرآیند افزایش پیدا می‌کند. همچنین "نیروی پیوستگی خاک را می‌توان با ورز دادن کافی، نیز افزایش داد. آمیختن و جا افتادن کافی به صورتی که گل کاملاً ورز داده و به هم زده شود و خمیر به دست آمده جا بیفتد، تأثیر

در معماری سنتی ایران می‌توان عمل‌آوری را به عنوان مرحله بسترسازی برای تثبیت مکانیکی دانست چرا که شرایط را برای تراکم مطلوب خاک طی عمل ورز دادن و افکندن که معادل مرحله تثبیت مکانیکی محسوب می‌شود، مساعد می‌کرده است. عمل‌آوری و جا افتادن گل^{۲۶} به معنای رها کردن و استراحت مخلوط خاک برای مدت حداقلی ۱۲ تا

خشت سقف نیز باید کاملاً خیس شده و ورز داده می‌شده است تا مقاومت کافی در سازه را داشته باشد.

۷-۱- مصالح بومی مبتنی بر تثبیت مکانیکی

در قسمت تکنیک‌های ساخت با خاک به روش تثبیت مکانیکی، بلوک خاک فشرده و دیوار خاک کوبیده به عنوان تکنیک‌های ساخت توأم با تثبیت مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. این دو تکنیک ساخت، نسل جدیدی از مصالح بومی اقلیم گرم و خشک، یعنی خشت و چینه هستند که این دو روش ساخت قدیمی نیز همراه با ورز دادن و افکندن بوده‌اند. لذا در ادامه این دو تکنیک ساخت (خشت و چینه)، به عنوان پرکاربردترین مصالح خاکی اقلیم گرم و خشک که به نوعی توأم با تثبیت مکانیکی بوده‌اند، مورد بررسی و معرفی قرار می‌گیرد. البته گفتنی است علاوه بر خشت و چینه، سیستم دیوار گل و چیر یا ترکه‌واندود که شامل اجزای عمودی و افقی ساخته شده از چوب است، نیز از تثبیت مکانیکی بهره برده است؛ چرا که علاوه بر فرآوری گل، اندود بر روی سطوح نیز با ضربه انجام می‌شده تا میزان تراکم را بیشتر نماید.

- خشت

به منظور تولید خشت، پس از تهیه مواد اولیه مناسب و عمل آوری کافی^{۲۹}، عمل خش کردن^{۳۰} صورت می‌گیرد. خش کردن هم با کمک دست هم با وسیله‌ای شانه مانند به نام رته^{۳۱} انجام می‌شود. سپس مخلوط با کمک پا و با شدت زیاد لگدکوب و زیرورو می‌شود. به منظور استحکام بیشتر خشت، گل باید چندین دفعه ورز داده شود^{۳۲} تا به صورت موئینه درآید. پس از طی مراحل آماده‌سازی گل، ورزیدن و شلاق خوردن^{۳۳} کافی و خیس کردن قالب،

مناسبی بر افزایش نیروی پیوستگی خواهد داشت" (مینکه، ۱۳۸۸: ۶۸).

اساساً چگالی گل بستگی به تراکم آن به هنگام ساخت مصالح و یا افکندن آن دارد. "در بیشتر بناهایی که در طول تاریخ با استفاده از بلوک یا قطعات گل ساخته شده‌اند فشار زیادی به کار نرفته است؛ گل آماده‌شده را لگدکوب کرده و سپس در قالب یا چارچوب ریخته و با ابزارهای دست‌ساز بدان فشار وارد می‌کردند" (وارن، ۱۳۸۷: ۶۰). در معماری سنتی ایران نیز تنها اقدامی که برای تراکم خاک در مصالحی مانند چینه یا خشت انجام می‌شود، ورز دادن گل و سپس پرتاب کردن یا افکندن گل در هنگام استفاده (چینه، ترکه‌واندود) یا قالب‌گیری (خشت) است. این عمل سبب به وجود آمدن مصالحی با حجم فشرده و فضای متخلخل و خالی کمتر می‌شود که در منابع گوناگونی نیز به این مسئله اشاره شده است (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴: ۷۱؛ قرینه، اولی‌پور، ۱۳۹۲؛ فلامکی، ۱۳۸۷: ۳۳۰؛ حامی، ۱۳۸۲: ۱۴۴-۱۴۳؛ مسرت، ۱۳۹۴: ۴۳-۳۹؛ پیرنیا، ۱۳۸۱: ۲۷؛ زمرشیدی، ۱۳۷۷: ۸؛ مصاحبه با معماران سنتی یزد و اردکان^{۲۷}). اگرچه امروزه نیز ثابت شده که هرچه نیروی بکار رفته هنگام افکندن بیشتر باشد، فشردگی و در نتیجه مقاومت آن نیز افزایش می‌یابد (مینکه، ۱۳۸۸: ۹۹).

نکته قابل تأمل در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک که از گفتگوی با معماران سنتی فراهم آمده^{۲۸}، این است که ایشان شیوه اعمال تثبیت مکانیکی در مصالح خاکی به‌ویژه خشت را مطابق با نیاز در نظر می‌گرفتند. به عنوان مثال، خشت‌های پی و دیوارها که از حساسیت کمتری نسبت به خشت‌های سقف برخوردار بوده، به همان نسبت کمتر ورز داده می‌شده است و حتی ملات مورد استفاده برای

یک مشت آب روی گل می‌ریزد و توسط پنجه‌های دست، محکم به جلو و عقب قالب فشار می‌دهد، با این کار هوا و آب درون گل بیرون رفته و گل فشرده می‌شود (تصویر ۶). علاوه بر عمل تثبیت در فرآیند آماده‌سازی خشت، در زمان چینش خشت‌ها نیز آن را با ضرب به ملات می‌کوبند تا چسبندگی بیشتری بین خشت و ملات حاصل شود.

خشت‌مال قالب را روی زمین گذارده و به اندازه مورد نیاز گل را با دو دست، برش داده و سپس پنجه کش نموده و با ضرب در وسط قالب می‌کوبد. در این مرحله سعی می‌شود با فشار دست، تمامی قالب به‌ویژه گوشه‌های آن پر شود. این عمل سبب وجود آمدن خشتی با حجمی فشرده و بدون فضای خالی و متخلخل می‌شود. سپس خشت‌مال



تصویر ۶- تولید خشت در کارگاه مسجد جامع میبد، یزد
مأخذ: (نگارندگان - تابستان ۸۸)

توضیحات ارائه شده، در صورت عدم استفاده از افزودنی‌هایی مانند گاه در خشت، حداقل تثبیت اعمال شده بر خشت، تثبیت مکانیکی بوده است.

- چینه

چینه یک روش قدیمی است که بعد از خشت، رایج‌ترین شیوه ساخت با خاک در اقلیم گرم و خشک بوده است. در این تکنیک ساخت، بریده‌هایی از گل، بدون استفاده از ملات و بدون قالب، در حالت پلاستیک با کوبیدن، فشار دادن، ضربه‌زدن یا پرتاب کردن به هم می‌چسبند؛ لذا چسبندگی و همپوشانی بریده‌های گل که بدون ملات روی هم قرار می‌گیرند، اتصال آن‌ها را تضمین می‌کند. از طرفی، ضربه‌های وارده بر هر لایه از دیوار برای افزودن بریده‌های گل به دیوار، علاوه

علاوه بر این، در قدیم الایام جهت دستیابی به آجری مقاوم و مرغوب با ابعادی یکنواخت، عمل واكوب کردن بر روی خشت اعمال می‌شده است که با فرآیند تثبیت بیگانه نیست. آن گونه که زمرشیدی (۱۳۷۷: ۳۶) می‌نویسد معماران سنتی قبل از تبخیر شدن کامل آب خشت، از قالب چوبی به نام قالب واكوب استفاده می‌کرده‌اند. با کوبیدن و تخمق زدن بر پشت قالب چوبی، قالب را که دارای چهار بدنه و کف بوده، از ناحیه سر درون خشت نیمه-مرطوب نشست داده که این عمل باعث جمع شدن حجم خشت و فشرده شدن خشت نیمه‌مرطوب می‌شده است. در واقع این عمل سبب از بین رفتن لانه‌های هوایی در خشت و ترک‌های آن می‌گردد. پس از عمل ضربه زدن به پشت قالب واكوب، خشت از قالب خارج می‌شده است. لذا با توجه به

بر اینکه موجب فشردگی گل در همان لایه شده، بر لایه‌های زیرین نیز فشار وارد کرده و باعث افزایش تراکم و تقویت اتصال در لایه‌های زیرین نیز خواهد شد (تصویر ۷).

چینه یک واحد یکپارچه است که عموماً با کاهش تقویت شده و اتصالات خطی و ضعیف ملات را ندارد، لذا باعث می‌شود از جهاتی از خشت مقاوم‌تر

باشد. موج‌ها و انحناهایی که به دیوارهای چینه‌ای داده می‌شود موجب قوی‌تر شدن آن می‌شود (وارن، ۱۳۸۷: ۶۳). علاوه بر این، به موجب ابعاد بزرگ‌تر گل چینه در مقایسه با گل خشت در هنگام افکندن، شدت فشار وارده بر گل نیز بیشتر بوده و تثبیت مکانیکی با توان بیشتر اعمال می‌شود.



تصویر ۷- اجرای چینه، حصار شهر تاریخی بشرویه، خراسان جنوبی
مأخذ: (نگارندگان - تابستان ۹۱)

۸- بحث (تثبیت مکانیکی و فرآوری مصالح خاکی در اقلیم گرم و خشک)

ساخت وسازه‌های خشتی و گلی در نقاط مختلف دنیا و از جمله ایران رواج داشته و هم‌اکنون نیز نمونه‌هایی از آن‌ها موجود است. ویژگی‌های مثبت این نوع مصالح به ویژه مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی موجب شده که تحقیقات در جهت کاهش ضعف‌ها و محدودیت‌های مصالح خاکی مورد توجه ویژه قرار گیرند، مطالعه حاضر نیز در همین راستا شکل گرفت تا جایگاه تثبیت مکانیکی یا به عبارتی، ورز دادن و افکندن گل در فرآیند فرآوری خاک برای تولید مصالح خاکی در معماری سنتی اقلیم گرم و خشک ایران را مورد بررسی قرار دهد.

در باب فرآوری مصالح مورد استفاده در معماری خاکی، امروزه دیدگاه‌های متفاوتی نسبت به میزان تأثیرگذاری فشردگی خاک در قیاس با عمل‌آوری، توأم با ورز دادن و افکندن آن وجود دارد. وارن (۱۳۸۷: ۶۰) معتقد است که تفاوت‌های جزئی در تراکم گل بستگی به نوع گل، عمل‌آوری و روش ترکیب آن دارد و تفاوت عمده، زاده‌ی میزان فشار فیزیکی است. در حالی که بنا به گفته مینکه (۱۳۸۸: ۷۰)، در برخی مؤسسات تحقیقاتی^{۳۴} ثابت شده است که معمولاً بلوک‌های به‌دست‌آمده از فشردگی خاک‌های کم‌رطوبت در قیاس با خاکی که با میزان کافی آب مرطوب شده، با دست ورز داده شده و در قالب افکنده شده باشند (یعنی همان فرآیند ساخت خشت)، مقاومت فشاری

حالت پلاستیک و مرطوب و خاک مورد استفاده برای بلوک خاک فشرده در حالت نیمه مرطوب کاربرد دارد. این اضافی آب به علت این است که بتوان با بیل، ملات مورد استفاده در خشت‌زنی را ورز داد. لذا این سری از تحقیقات مینکه نیز مهر تأییدی بر روش ساخت مصالح بومی اقلیم گرم‌وخشک بوده و اعمال نیروی فشاری کمتر به صورت ورز دادن و افکندن گل در صورت افزودن میزان کافی آب، در کنار عمل‌آوری مناسب می‌تواند منجر به ایجاد خواص مکانیکی بهتری برای مصالح خاکی شود.

۹- جمع‌بندی

امروزه پررنگ شدن نقش مصالح نوین در معماری معاصر موجبات فراموشی تدریجی مصالح خاکی را فراهم نموده، اما در عین حال، پتانسیل‌های این گونه مصالح به ویژه در حوزه مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی باعث رجوع به آن شده است. لذا به منظور کاهش آسیب‌پذیری مصالح خاکی و توسعه کاربرد در معماری معاصر با خاک و همچنین حفاظت از آثار تاریخی گلین، مقوله تثبیت مکانیکی و فرآوری خاک به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. با اشاره به آنچه مرور شد، روش‌های نوین بهره‌گیری از خاک را می‌توان تکامل یافته تکنیک‌های ساخت سنتی در معماری فلات مرکزی ایران دانست که هرچند محدود، ولی همچنان در حفاظت از آثار معماری خاکی ایران قابل بحث و توجه هستند. با این حال، بازگشت به معماری با خاک و بهره‌گیری از آن به عنوان مصالح ساختمانی در ایران نسبت به برخی دیگر از کشورها محدودتر بوده است. این در حالی است که کاربرد خاک در معماری و موضوع فرآوری و تثبیت آن در معماری ایران بدون پیشینه نبوده است؛ موضوعی که نشانه‌ها

کمتری دارند. بنا به گفته وی، عقیده بسیاری از محققان و مجریان در مورد این مسئله که پرس کردن خاک به تنهایی باعث بالا رفتن مقاومت فشاری آن می‌شود، تنها در موارد معدودی صحت دارد و عموماً نادرست است. راز ساختن گل در ساختار لایه‌لایه آن و جاذبه‌های الکتریکی میان آن‌ها نهفته است که تنها با استفاده از آب و ورز دادن فعال می‌شود. به عبارتی، با ورز دادن خاک در حالت پلاستیک، آرایش متراکم‌تر و موازی‌تر این لایه‌ها میسر می‌شود و در نتیجه نیروی پیوستگی آن‌ها بعد از خشک شدن، مقاومت فشاری آن‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. این شیوه ساخت دقیقاً با تکنیک ساخت مصالح بومی اقلیم گرم‌وخشک مانند چینه و خشت مطابقت دارد. به بیان دیگر اگرچه تاکنون در این زمینه مطالعه کمی و آزمایشگاهی دقیقی صورت نگرفته اما با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان استدلال نمود که نحوه آماده‌سازی و تثبیت مکانیکی گل در معماری بومی این اقلیم، در مسیر صحیحی برای بهبود خواص مکانیکی مصالح خاکی قرار داشته^{۳۵} و در یک گذار از خاک کوبیده به سمت خشت و چینه هدایت شده است.

از طرفی، با توجه به مطالبی که پیش از این گفته شد، مقدار بهینه آب برای ساخت مصالح خاکی به میزانی اطلاق می‌شود که در حالت خشک، حداکثر چگالی را ایجاد کند؛ اما بنا به تحقیقات مینکه (۱۳۸۸: ۷۱)، در صنعت ساخت‌وساز با خاک، حداکثر چگالش یا فشرده‌سازی و بنابراین میزان بهینه آب، ضرورتاً پارامتر دقیقی نبوده و دلیلی بر ایجاد حداکثر مقاومت فشاری نخواهد بود. قبلاً نیز اشاره شد که یکی از وجوه تفاوت خشت و بلوک خاک فشرده در میزان رطوبت آن‌ها است؛ به صورتی که خاک مورد استفاده برای خشت در

و شواهد آن در معماری اقلیم گرم و خشک و تثبیت مکانیکی مصالح آن‌ها قابل پیگیری است. بدین واسطه، در این مطالعه تثبیت مکانیکی و جایگاه آن در مصالح معماری اقلیم گرم و خشک و همچنین معماری خاکی معاصر پیگیری و مورد بررسی قرار گرفت. تثبیت مکانیکی به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی به عنوان تکنیکی اقتصادی و زیست محیطی به مصالح اعمال شده و سبب به وجود آمدن مصالحی با حجم فشرده و تخلخل کمتر می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه در حوزه تثبیت مکانیکی مصالح خاکی در اقلیم گرم و خشک، بیانگر تأثیر مطلوب و زردادن و افکندن گل با میزان رطوبت کافی در مقایسه با شیوه امروزی تثبیت مکانیکی یعنی تراکم خاک با رطوبت کم است. بنابراین می‌توان استدلال نمود که از قدیم‌الایام در ساخت مصالح گلین در معماری سنتی ایران، به صورت ضمنی و البته با نیروی تراکم محدود از روش تثبیت مکانیکی استفاده می‌شده

است. به بیان دیگر معماران سنتی، به طور ضمنی با روش صحیح تثبیت مکانیکی و وجود رابطه مثبت بین این تکنیک و خصوصیات مکانیکی مصالح بومی اقلیم گرم و خشک آگاه بوده‌اند. امروزه تثبیت مکانیکی به صورت جدی‌تر در ساخت مصالح ناسازگار با بوم و محیط‌زیست کاربرد دارد. درحالی‌که با توجه به وجود معماری خاکی ارزشمند در اقلیم گرم و خشک و لزوم حفاظت و مرمت آن‌ها از یک سو و همچنین ساخت بناهای معاصر با خاک از سوی دیگر، می‌توان موجبات باززنده‌سازی و بازکاربری تجربیات معماری بومی را در نظر داشت. در این راستا انجام پژوهش‌های کمی و بررسی تجربی رابطه تثبیت مکانیکی و رفتار مصالح خاکی اقلیم گرم و خشک، گامی در جهت تلفیق تجربیات معماری بومی با دانش مهندسی روز یا به عبارتی مقدمه‌ای برای بازکاربری تجربیات بومی خواهند بود.

پی‌نوشت

۱. با این حال، مطالعات انجام شده مرتبط با مصالح خاک و خشت در ایران بیشتر از بنای خشتی مورد توجه قرار گرفته است و متخصصان رشته‌های مختلف مرمت بنا، مرمت اشیاء، عمران و معماری مطالعات کاملی در بحث خشت و خاک و فرآوری آن‌ها پیشنهاد و اجرا کرده‌اند که نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده همچون (وارن، ۱۳۸۷؛ Bouhicha et al, 2005؛ Degirmenci, 2008؛ Avrami et al, 2008؛ Houben & Guillaud, 1994؛ Kouakou & Morel, 2009؛ لانت، ۱۳۶۰؛ ابراهیمی، ۱۳۸۰؛ طبسی، ۱۳۸۴؛ فلامکی، ۱۳۸۷؛ گروه مؤلفان، ۱۳۸۵؛ رحیمی، ۱۳۸۵؛ حامی، ۱۳۸۲؛ رحیم‌نیا و حیدری‌بنی، ۱۳۹۰؛ اسماعیلی و قلعه‌نوی، ۱۳۹۱؛ خواجه‌تراب و مهدی‌نژاد گودرزی، ۱۳۹۲؛ وطنی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۵؛ حجازی و همکاران، ۱۳۹۴) شایسته توجه است و تاریخچه مناسبی برای این مقاله به وجود آورده‌اند.

2. Compressed Earth Block

3. Adobe

4. Rammed Earth

۵. در مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان ایران (با موضوعیت طرح و اجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی) عنوان شده است که منظور از ساختمان‌های خشتی، ساختمان‌هایی هستند که دیوارهای باربر در آن‌ها از خشت و ملات ساخته شده است. در فصل ضوابط ساختمان‌های با مصالح بنایی غیرمسلح در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران نیز عنوان شده است که هدف از ساختمان‌های با مصالح بنایی، ساختمان‌هایی است که با آجر، بلوک سیمانی و یا سنگ ساخته می‌شوند لذا این ضوابط را نیز نمی‌توان اصولی برای ساخت بنای خشتی در نظر گرفت.

۶. از آنجایی که در استانداردها تفکیک مصالح برحسب بادوام، کم‌دوام و بی‌دوام صورت گرفته، خانه‌های خشتی و گلی را در ردیف خانه‌های با مصالح بی‌دوام و کم‌دوام قرار می‌دهد. بسیاری از خانه‌های قدیمی که چندین صدسال است پابرجا مانده‌اند و بافت قدیمی شهرها را شکل می‌دهند بدین ترتیب بی‌دوام تلقی می‌شوند (اهری، ۱۳۶۷:۶۳).
۷. نگاه کنید به: (Bouhicha et al, 2005؛ وطنی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۵)
۸. نگاه کنید به: (اسماعیلی و قلعه‌نوی، ۱۳۹۱؛ وطنی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۵؛ وطنی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۶)
۹. نگاه کنید به: (خواججه‌تراب، مهدی‌نژاد گودرزی، ۱۳۹۲)
۱۰. نگاه کنید به: (Degirmenci, 2008)
۱۱. نگاه کنید به: (اسماعیلی و قلعه‌نوی، ۱۳۹۱؛ Kouakou & Morel, 2009؛ El-Mahllawy et al, 2014)
۱۲. نگاه کنید به: (Kouakou & Morel, 2009)
۱۳. نگاه کنید به: (رحیم‌نیا، حیدری‌بنی، ۱۳۹۰؛ Kouakou, Morel, 2009؛ El-Mahllawy et al, 2014)
۱۴. نگاه کنید به: (Eires et al, 2013)
۱۵. نگاه کنید به: (اسرافیلی، ۱۳۸۵)
۱۶. نگاه کنید به: (وطنی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۵)
۱۷. درباره این افزودنی‌های متنوع به ترتیب نگاه کنید به:
- (Nwankwor, 2011; Alavéz-Ramírez et al, 2012; Miqueleiz et al, 2013; Trivedi et al, 2013; Anupam et al, 2013)
۱۸. نگاه کنید به: (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴)
۱۹. نگاه کنید به: (Zhang et al, 2015)
۲۰. درباره این دو افزودنی نگاه کنید به: (Corrêa et al, 2015; Calatan et al, 2016)
۲۱. خاک به هنگام حفاری معمولاً چگالی معادل $1000-1500 \frac{Kg}{m^3}$ دارد. اگر این خاک به صورت دیوارهای فشرده یا خشت کوبیده شود، چگالی آن در حدود $1700-2200 \frac{Kg}{m^3}$ نوسان می‌کند (مینکه، ۱۳۸۸:۳۴).
22. Static compaction
23. Dynamic compaction
۲۴. شخصی به نام پروکتور (۱۹۳۳) یک آزمایش تراکم آزمایشگاهی ابداع کرد تا به وسیله آن رابطه بین درصد رطوبت و دانسیته خشک یا نسبت تخلخل یک نمونه خاک تعیین شود که تحت روش استاندارد متراکم شده و هدف آن تعیین رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک قابل حصول می‌باشد (Rigassi, 1985:24؛ Jimenez Delgado, Guerrero, 2007:248)؛ این آزمایش به نام آزمایش تراکم پروکتور مشهور می‌باشد.
25. Fill, Cover, Dig, Apply, Form, Pour, Extrude, Mould, Stack, Shape, Compact, Cut (Houben, Guillaud, 1994: 107).
- گفتنی است این محققین نموداری از روشهای متفاوت بهره از خاک در معماری ارائه نموده‌اند که با ترجمه، اصلاح و افزوده‌ها در منبع زیر قابل دسترسی است:
- رحیم‌نیا، رضا. (۱۳۹۱). حفاظت و مرمت سازه خشتی با تکیه بر فن آوری بومی در جنوب خراسان، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد مرمت و احیا بناها و بافتهای تاریخی. اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان. ص ۳۳.
۲۶. جافانادن: لغتی آلمانی (Mauken)، رسیدن گل (رحیم‌نیا، ۱۳۹۲)
۲۷. مصاحبه با آقای حسین کمالی، معمار سنتی، معمار پیشکسوت استان یزد و شهرستان اردکان؛ آقایان حسین شاکری و حسین فرخ، معماران سنتی استان یزد؛ آقای محمدعلی کریمی، معمار سنتی مشغول به کار در میراث فرهنگی اردکان.
۲۸. این موضوع در مجموعه مصاحبه‌هایی که نگارنده دوم در بین سالهای ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ با گروهی از معماران سنتی در جنوب خراسان انجام داده مورد تأکید اغلب معماران قرار گرفته است.

۲۹. برای تولید خشت، نخست خاک آماده شده که بعضاً برای چسبندگی و استحکام بیشتر با افزودنی‌های طبیعی در هم آمیخته می‌شود، به صورت توده‌ای تپه مانند در آورده، میان آن را گود می‌کردند و آب می‌بستند که اصطلاحاً بدان آخوره (آبخوره) بستن می‌گویند. این مخلوط پس از یک تا سه روز که آب به خوبی در خاک نفوذ کرده و به کریستالهای نامنظم خاک خشک شکل داده، وارد مرحله ورز دادن می‌شده است.

۳۰. به هم زدن و چنگ زدن (khash)

۳۱. یک نوع پاروی چوبی با میخ‌های چوبی (ratteh)

۳۲. خشتمالان یزدی بر این باورند که گل را باید "هفت کله‌سر" بیندازند یعنی هفت بار با بیل به حالت پرتابی، بالا و پایین بیندازند تا خوب ورزیده شود. دلیل این کار تلاش در جهت استحکام بیشتر است که "هرچه گل بیشتر شلاق داده شود، خشت کمتر ترک خورده و آسیب می‌بیند، به ویژه خشت سقف که باید بیشتر شلاق داده شود تا استحکام بیشتری داده شود."

۳۳. شلاق زدن یا شلاق دادن یعنی گل را لگدمال کردن، ورز دادن، پرتاب کردن گل به بالا و پایین برای یکنواخت و چسبناک شدن آن. هرچه گل شلاق بیشتری داده شود، استحکام آن بیشتر می‌شود.

۳۴. FEB (آزمایشگاه تحقیقاتی برای ساخت و ساز آزمایشی: Forschungslabor für Experimentelles Bauen) و موسسه فناوری ساختمانی زوریخ.

بررسی‌های FEB نشان می‌دهد که خشت‌های دست‌ساز حدود ۱۹ درصد بیش از بلوک‌های خاکی فشرده شده تحت نیروی $\frac{kg}{cm^2}$ ۲۰، دارای مقاومت فشاری است.

۳۵. براساس آزمایشاتی که FEB انجام داده، مقاومت فشاری در نمونه‌هایی که دارای آماده‌سازی مناسب بوده‌اند و خاک و آب در یک میکسر مکانیکی به مدت ۱۵-۲ دقیقه مخلوط و در قالب افکنده شده در مقایسه با نمونه‌هایی که صرفاً فشرده شده‌اند و توسط ضربه‌های یک وزنه ۴٫۵ کوبیده شده‌اند، ۲۸-۳۸ درصد افزایش یافته است. بدین معنی که نحوه آماده‌سازی مناسب در مقایسه با فشرده‌سازی، در بالا بردن مقاومت فشاری خاک اهمیت بیشتری دارد (مینکه، ۱۳۸۸:۷۰).

منابع و مآخذ

- ابراهیمی، افشین. (۱۳۸۰). مطالعه میدانی- آزمایشگاهی نقش فرآورده‌های بوم‌آورد در تثبیت و استحکام بخشی خشت خام و اندود کاه گل (مطالعه موردی ذیقورات چغازنبیل). پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مرمت اشیا تاریخی و فرهنگی. دانشگاه هنر اصفهان.
- اسرافیلی، آزاده، (۱۳۸۵)، معرفی فعالیت‌های آزمایشگاه مکانیک خاک ارگ بم، پروژه نجات بخشی ارگ بم، بم.
- اسماعیلی، علیرضا؛ قلعه‌نوی، منصور. (۱۳۹۱). اثر الیاف نخل خرما و آهک به عنوان تثبیت کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت). نشریه مسکن و محیط روستا، دوره ۳۱، شماره ۱۳۸، ۶۲-۵۳.
- اهری، زهرا، ارجمندنیا، اصغر، حبیبی، محسن، خسروخاور، فرهاد، (۱۳۶۷)، مسکن حداقل، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- آدامووا، آدل. (۲۰۰۸). نگاره‌های ایرانی گنجینه ارمیتاژ: سده پانزدهم تا نوزدهم میلادی؛ مترجم: زهره فیضی. وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، انتشارات فرهنگستان هنر، ۱۳۸۷.
- بایرام، منصوره، بهمنی، امید. (۱۳۹۴). تأثیر نوع خاک و وضعیت تراکم بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک. نشریه: حفاظت منابع آب و خاک، دوره ۴، شماره ۴: ۷۸-۶۵.
- پیرنیا، محمد کریم. (۱۳۸۱). مصالح ساختمانی (آزند، اندود، آمود). انتشارات تعاون سازمان میراث فرهنگی کشور، چاپ اول.
- حامی، احمد، (۱۳۸۲). مصالح ساختمانی، دانشگاه تهران، چاپ دهم، تهران.
- حجازی، مهرداد. هاشمی، محمود. جمالی‌نیا، الهه. باتوانی، محمود. (۱۳۹۴). تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان، فصلنامه مسکن و محیط روستا؛ ۳۴ (۱۵۱): ۶۷-۸۰.

- خواجه‌تراب، جواد؛ مهدی‌نژاد گودرزی، زهرا. (۱۳۹۲). استفاده از لیاف پلی‌پروپیلن برای تقویت خشت‌های گلی. نخستین همایش فناوری و سازه‌های سنتی با محور گنبد، تهران، موسسه آموزش عالی علوم و فنون تهران.
- رحیم‌نیا، رضا. حیدری‌بنی، داریوش. (۱۳۹۰). تأثیر دامنه خمیری خاک (PI) بر مقاومت فشاری و کششی خشت‌های تثبیت‌شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی، مرمت آثار و بافت‌های تاریخی فرهنگی، شماره دوم، سال اول.
- رحیمی، حسن. (۱۳۸۵). مصالح ساختمانی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- زمرشیدی، حسین. (۱۳۷۷). معماری ایران، مصالح شناسی سنتی. انتشارات زمر، چاپ اول.
- طبسی، محسن. (۱۳۸۴). ارائه ترکیب بهینه برای استحکام‌بخشی خشت‌های مصرفی در مرمت بناهای تاریخی کوه خواجه سیستان. مجله هنرهای زیبا، شماره بیست و سوم، ص ۵۳-۵۸.
- فلامکی، محمد منصور. (۱۳۸۷). تکنولوژی مرمت معماری. نشر فضا، تهران.
- قبادیان، رسول؛ رحیمی، حسن. (۱۳۸۵). مقایسه تأثیر روش‌های آزمایشگاهی تراکم استاتیکی و دینامیکی بر مقاومت برشی خاک‌های رسی در شرایط زهکشی نشده. مجله علمی کشاورزی، دوره ۲۹، شماره ۲.
- قرینه، مجید؛ اولی‌پور، مسعود. (۱۳۹۲). بررسی مقاومت کششی خاک رسی و پارامترهای مؤثر بر آن با استفاده از دستگاه جدید کشتش مستقیم خاک. اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی. آبان ۱۳۹۲.
- گروه مؤلفان. (۱۳۸۵). مصالح ساختمانی یادنامه استاد حامی. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- لانت، ام. جی. (۱۳۶۰). خشت‌های تثبیت‌شده برای ساختمان. ترجمه مقالات علمی و فنی شماره ۱۳. ترجمه فروز روشن‌بین، تهران: سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. (۱۳۸۴). استاندارد ۲۸۰۰، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. نشر مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- مسرت، حسین. (۱۳۹۴). از خاک تا خشت (خشت از دیدگاه مردمی و مردم‌شناسی). نشر یزدا. چاپ اول.
- مینکه، گرنوت. (۲۰۰۰). راهنمای ساخت‌وساز با خاک، کاربرد مصالح خاکی در معماری مدرن. ترجمه‌ی شاهین طلوع آشتیانی ۱۳۸۸. تهران: سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری، اداره کل روابط عمومی، امور فرهنگی و اجتماعی، اداره برنامه‌ریزی نشر.
- وارن، جان. (۱۳۸۷). حفاظت سازه‌های گلین، ترجمه مهرداد وحدتی، چاپ اول، تهران: رسانه پرداز.
- وطنی اسکویی، اصغر؛ افضل‌ی، محمد؛ مددی‌پور، محمدرضا. (۱۳۹۶). تأثیر تسلیح ملات بر عملکرد دیوارهای خشتی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۲، صفحات ۴۰۳ تا ۴۰۴.
- وطنی اسکویی، اصغر؛ افضل‌ی، محمد؛ مددی‌پور، محمدرضا؛ بخشی، علی. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی دیوار خشتی تحت کشش قطری با رویکرد تقویت خشت و ملات. نشریه مسکن و محیط روستا، شماره ۱۵۴، صفحات ۱۰۷-۱۲۴.
- Alavéz-Ramírez, R, Montes-García, P, Martínez-Reyes, J, Altamirano-Juárez, D. C. & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, 34, 296-305.
- Anupam, Aditya Kumar, and Praveen Kumar. (2013). Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 264-273.
- Avrami, Erica. Hubert. Guillaud, and Mary. Hardy. (2008), *TERRA literature Review*. Los Angeles: Getty Publication.
- Bouhicha, M. Aouissi, F. Kenai, S. (۲۰۰۵). Performance of composite soil reinforced with barely straw. *Cement and Concrete Composites*. ۲۷(۵). pp. 617-621.
- Calatan, Gabriela, G. Hegyi, A. Dico, C. & Mircea, C. (2016). Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks. *Procedia Technology*, 22, 259-265.
- Corrêa, Andréa Aparecida Ribeiro, Lourival Marin Mendes, Normando Perazzo Barbosa, Thiago de Paula Protásio, Nathalia de Aguiar Campos, & Gustavo Henrique Denzin Tonoli. (2015). Incorporation of bamboo pailiicss and “yynhheic mmrttaaiiva” nnadobe oo nuuuaiion and uu llding Maaaaaa, 250-256.
- AAA 991,, “aa ccc of oo mpeessed hhhhh ooock”, A publicaion of ee ucche Zentrum fur Entwicklungstechnologien – GATE, Eschborn.
- Degirmenci, N. (۲۰۰۸). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. *Construction and Building materials*. ۲۲(۶). pp. 1220-1224.
- Doat, P & Hays, A & Houben, H & Matuk, S & oooax, F. (1991). “uu llding wtth eahhfi. Pubiihhd by The mud village society, New dehli, India.

- Eires, R. & Camões, A. & Jalali, S. (2013). Earth architecture: ancient and new methods for durability improvement. Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges, Taylor & Francis Group, London.
- El-Mahllawy, Medhat S, and Ayman M. Kandeel. (2014). Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks. HBRC Journal, 10(1), 82-91.
- Fontaine, L., & Ange, .. (2009). *à à ii en eeeeeedu gaande aabààààccccccttecuue*. France: Belin.
- Gottleand, P. H. and Benoit, O. ۲۰۰۶. Sinkage tests for mobility study, modeling and experimental validation. Journal of Terramechanics. ۴۳: 451-467.
- Grube, Ernst J. Michell, George. (1978). Architecture of the Islamic world: its history and social meaning, with a complete survey of key monuments. The University of Michigan, Morrow.
- Guettala, A. A. Abibsi and H. Houari, 2006. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. Construction and Building Materials, 20(3): 119-127.
- Guillaud, Hubert & Joffroy, Thierry & Odul, Pascal & CRATerre- GGG, 1985.. "oo mpressed eahhhblock Manual of design and construction, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE.
- Harper, Doug, (2011), "Alternative Methods of Stabilisation for Unfired Mud Bricks", School of Civil Engineering & Geosciences, Newcastle University.
- oo uben, & Gulluud, (1994., "hhhhhconstruction – A compechenvve gudd", nmmndeeeeeTechnooogy publications, London.
- oo uben, Hugo & gggass,, Vincen & Gann hllppe. 1996.. "Compressed eahhh block poduciiion equipment", CDI & CRATerre-EAG Publication.
- Ilberg, Antje, Rollins, Chris, (2007), LOW COST HOUSE Construction Manual, RISD (Rwanda Initiative for Sustainable Development).
- Jimenez Delgado, M. Carmen & Guerrero, Ignacio Canas. (2007). Construction and Building Materials. Vol 21.237–251.
- King, B. (1996). Buildings of earth and straw: structural design for rammed earth and straw-bale architecture. Ecological Design Press, California, USA.
- Kouakou, C.H. Morel, J.C. (۲۰۰۹). Strengths and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. Applied Clay Science. ۴۴(۱۰۲). pp. ۲۷-۳۴
- Miqueleiz, L; Ramirez, F; Oti, J.E; Seco, A; Kinuthia, J.M; Oreja, I & Urmeneta, P. (2013). Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production. Engineering Geology, 163, 68–74.
- Norton, J. (1997). Building with earth: A handbook (2nd edition). Intermediate Technology Publications, London, UK.
- Nwankwor, N. A. (2011). Justification for the Combination of Organic and Inorganic Stabilizers to Stabilize Traditional Earth Materials (Mud) for Quality and Capacity Utilization in Africa. In Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, Getty Publications, 239-246.
- Rigassi, Vincent & CRATerre-EGG. 1985.. "oo mpressed earhhboock Manua of poduciiion, A Pubiicaiiion", A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH in coordination with BASIN.
- Trivedi, Jyoti S. Sandeep Nair, and Chakradhar Iyyunni. (2013). Optimum utilization of fly ash for stabilization of subgrade soil using genetic algorithm. Procedia Engineering 51, 250-258.
- Vroomen, R. (2007). Gypsum stabilised Earth - Research on the Properties of cast Gypsum-stabilised Earth and its Suitability for Low Cost Housing Construction in Developing Countries. Final thesis for MSc Architecture, Building & Planning, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- Walke, Peter. (1997). Characteristics of pressed earth blocks on compression. 11th international brick/block masonry conference Tongji University, Shanghai, China.
- Walker, P. Keable, R. Martin, J. and Maniatidis, V. (2005). Rammed earth: Design and Construction Guidelines. BRE Bookshop, Zimbabwe.
- Zami, Mohammad Sharif, Lee, Angela, (۲۰۱۰), Contemporary earth construction in urban housing - stabilised or unstabilised? 5th International Conference on Responsive Manufacturing- Green Manufacturing (ICRM 2010).
- Zhang, J; Chen, W; Li, Z; Wang, X; Guo, Q & Wang, N. (2015). Study on workability and durability of calcined ginger nutsbased grouts used in anchoring conservation of earthen sites. Journal of Cultural Heritage, 16, 831–837.