

# بررسی آزمایشگاهی نقش تثبیت مکانیکی در بهبود مقاومت فشاری، کششی و خمشی خشت

منصوره درمحمدی\*، رضا رحیم‌نیا\*\*، محسن فتوحی اردکانی\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۷/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۸/۰۹/۱۳

چکیده

ایران در استفاده از خشت در معماری از کهن‌ترین کشورها محسوب می‌شود، شیوه‌ای که سالیان درازی است در ساختارها و معماری امروز کشور فراموش شده است. با توجه به اهمیت بلوک‌های خاکی مانند خشت در معماری معاصر جهان و فراوانی ساختارهای خشتی ارزشمند در ایران، لزوم استحکام‌بخشی بناهای خشتی در راستای کاربرد آن در معماری معاصر و همچنین در جهت حفاظت و مرمت آثار تاریخی، مطالعه درباره خشت ضروری است. در طی سال‌های اخیر راهکارهای گوناگونی با عنوان تثبیت خاک و خشت برای استحکام‌بخشی بناهای خشتی مطرح شده است. تثبیت مکانیکی به‌عنوان یکی از این راهکارها، با نیاز به بهبود کیفیت مصالح و افزایش دوام ساختمان‌ها به وجود آمده و با فشرده‌سازی مصالح موجب افزایش تراکم خاک و لذا بهبود رفتار بلوک خاکی در برابر عوامل آسیب‌رسان مانند رطوبت و فرسایش می‌شود.

پژوهش حاضر در پی دستیابی به رابطه بین تثبیت مکانیکی و رفتار مکانیکی خشت بوده و هدف اصلی خود را بررسی اهمیت تراکم خاک و تأثیر آن بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی خشت قرار داده است. این مطالعه در قالب یک پژوهش کمی و به شیوه تجربی انجام شده و روش انجام پژوهش مبتنی بر مطالعات میدانی، بررسی‌های محیطی و روش‌های تجربی - آزمایشگاهی بوده است. برای این منظور پس از انتخاب ۶ معدن خاک واقع در شهرستان اردکان (یزد) و تعیین خواص فیزیکی آن‌ها، نمونه‌های خشتی در دو گروه شاهد و آزمایشی ساخته شدند و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی قرار گرفتند و در نهایت نتایج آن‌ها تجزیه و تحلیل شده‌اند. مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده، رابطه مطلوب بین تثبیت مکانیکی و مقاومت مکانیکی خشت را تأیید کرده و مشخص شد که تراکم خاک در خشت تثبیت‌شده به روش مکانیکی در مقایسه با خشت بدون اعمال تراکم، به‌طور میانگین موجب افزایش ۷۹/۴۳ درصدی در مقاومت فشاری، افزایش ۴۲/۴۲ درصدی در مقاومت کششی و افزایش ۷۵ درصدی در مقاومت خمشی شده است.

**کلمات کلیدی:** خشت، تثبیت مکانیکی، رفتار مکانیکی خشت، اردکان، یزد.

\* کارشناسی ارشد، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه یزد، ایران. Dormohamadi\_m@yahoo.com

\*\* استادیار گروه مرمت و احیا بناهای تاریخی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

\*\*\* کارشناس فنی، پایگاه میراث فرهنگی بافت تاریخی اردکان، یزد.

## مقدمه

از زمان‌های دور در سراسر جهان، از خاک به‌عنوان مصالح ساختمانی خام برای رسیدن به ساختمان‌هایی با عمر طولانی استفاده شده است. سازگاری مناسب، اقتصادی بودن، سهولت و سرعت در تهیه از جمله ویژگی‌های مثبت خشت و مصالح گلی محسوب می‌شود که به دلیل مسایل اقتصادی، هم‌اکنون نیز ساخت‌وساز غالب در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از جمله کشور ما است (وطنی‌اسکویی و همکاران، ۱۳۹۵:۱۰۸؛ Adam & Zami, Lee, 2010:5; Agib, 2001).

اگرچه خشت در نگاه نخست ممکن است یک تکنولوژی مناسب با بهره‌وری انرژی و هزینه (Maini, 2005, 8؛ خوشبخت بهرمانی، سپهری مقدم، ۱۳۹۱:۵۴؛ Little & Morton, 2001) و گزینه مناسبی برای یک مصالح اقتصادی، زیست‌پذیر و پایدار به‌نظر برسد اما مشکل عمده خشت نپخته، دوام و پایداری کم و حساسیت زیاد نسبت به آب در مقایسه با همتایان پخته خود است (Norton, 1997; Harper, 2011). در همین راستا، با نیاز به بهبود کیفیت مصالح و افزایش دوام ساختمان‌ها، فشرده‌سازی در مصالح به وجود آمد (Rigassi, 1985:24) که معادل روش تثبیت مکانیکی می‌باشد، پژوهش حاضر نیز بر این روش تثبیت متمرکز شده است. در این روش می‌توان با تنظیم مقدار فشار اعمال شده بر خاک، عملکرد انواع خاک را افزایش داد (Arumala, Gondal, 2008:3) چرا که فشردگی خاک منجر به مقاومت بیشتر می‌شود (Rollins, Ilberg, 2007:17). بلوک خاک فشرده (CEB)<sup>۱</sup>، نسل جدیدی از بلوک‌های خاکی قالب‌زده-خشت<sup>۲</sup> (Guillaud et al, 1985:10) و در واقع تکنیک بهبود یافته خشت می‌باشد که از روش تثبیت

مکانیکی بهره برده است.

در ادبیات مکتوب و تجربیات شفاهی موجود در معماری گذشته ایران، اشاراتی کوتاه در زمینه اعمال فشار توسط معمار سنتی بر روی گل از طریق ورز دادن و افکندن آن در هنگام ساخت چینه و قالب‌گیری خشت شده است. این کار با هدف ایجاد تراکم نسبی و احتمالاً کاهش تخلخل گل صورت می‌گرفته است. اگرچه میزان فشاری که توسط معمار سنتی بر گل اعمال می‌شده، در مقایسه با میزان فشار اعمال شده بر بلوک‌های خاک فشرده یا دیوار خاک کوبیده<sup>۳</sup>، محدود بوده است اما همیشه به‌عنوان بخشی از تکنیک ساخت خشت در نظر گرفته می‌شده است. لذا پژوهش حاضر بر آن است تا با مطالعه تجربی تثبیت مکانیکی خاک و رفتار مکانیکی خشت (خشت مرسوم در معماری سنتی ایران)، رابطه بین این دو را بررسی نماید.

به این منظور ابتدا نسبت به ویژگی‌های فیزیکی خاک همچون دانه‌بندی و درصد رطوبت آن شناخت حاصل شد و سپس با اعمال تثبیت مکانیکی بر روی نمونه، تأثیر تراکم خاک بر خصوصیات مکانیکی خشت به‌عنوان هدف اصلی این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. لذا بر مبنای بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی، شش نمونه خاک متفاوت از معادن خاک شهرستان اردکان در استان یزد گزینش شده و نمونه‌های شاهد با روش ساخت مرسوم خشت در ایران و نمونه‌های آزمایشی با اعمال تراکم بر روی آن‌ها ساخته شدند. سپس تعدادی از آزمایش‌های مربوط به رفتار مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی) بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

## پیشینه پژوهش

موضوع بهبود مقاومت و استحکام طبیعی خاک و مصالح خاکی که عموماً بنام تثبیت خاک از آن یاد

می‌شود پیشینه‌ای بس دیرینه دارد. از عصر باستان همواره استفاده از مواد افزودنی طبیعی همچون الیاف کاه، موی بز، روغن‌های طبیعی، عصاره گیاهان مختلف، سرگین‌های حیوانی، فضولات لانه مورچگان، ذرات شن و ماسه برای اصلاح مصالحی نظیر خشت و گل، مورد توجه بشر بوده است (لانت، ۱۳۶۰:۱). با این حال سابقه پژوهش‌های علمی در این زمینه، به حدود سال ۱۹۲۰ میلادی باز می‌گردد که مواد تثبیت‌کننده خاک، به طور علمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین پس از اتمام جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۴۵ میلادی، به دلیل خرابی‌ها و ویرانی‌های ناشی از جنگ، شروع عملیات بازسازی و نوسازی شهرهای آسیب‌دیده اروپایی و نیاز شدید و فوری به ساخت مسکن و سرپناه برای هزاران بی‌خانمان، مطالعات بسیار گسترده و دامنه‌داری در طی سه دهه در زمینه معماری با خاک انجام شد. لذا به دنبال آن فنون ساخت‌وساز با مصالح خاکی توسعه بسیاری یافت (Houben, 1994).

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 بیشتری به معماری خاکی به عنوان پاسخی به مسایل زیست‌محیطی جدی در جهان پدیدار شد و تکنولوژی‌های نوین به منظور بهبود معماری گلین (Eires, Camões, Jalali, 2013:962) در کنار علاقه و تمایل به مطالعه و حفاظت معماری خاکی پا به عرصه گذاشتند. در حوزه تثبیت فیزیکی و شیمیایی مصالح خاکی، محققان بسیاری در نقاط گوناگون جهان فقط از رس به عنوان چسباننده استفاده می‌کنند. برخی از سازنده‌ها از خاکستر، آسفالت، امولسیون و ترکیبی از این مصالح به عنوان چسباننده استفاده کرده‌اند (Zami, 2010:2). در اکثر موارد برای ایجاد ثبات و بهبود دوام بلوک‌های خشتی، سیمان یا آهک به آن اضافه می‌شود که سیمان دارای اثر سمانتاسیون و آهک دارای اثر پیوستگی است (Rigassi, 1985:44). به طور کلی محققان انواع گوناگونی تثبیت‌کننده از جمله سیمان، آهک و قیر را شناسایی کرده‌اند ولی هیچ تثبیت‌کننده معجزه‌آسایی وجود ندارد که بتواند همواره مورد استفاده قرار بگیرد (Zami, Lee, 2010:2).

در حوزه تثبیت مکانیکی، می‌توان به دو تکنیک ساخت دیوار خاک کوبیده و بلوک خاک فشرده اشاره کرد که توأم با فشرده‌سازی ساخته می‌شوند (Houben, 1994:5). آغاز تاریخی بلوک خاک فشرده به عنوان تکنیکی معاصر را بایستی در سستی هزارساله جستجو کرد که به صورت بلوک‌های خاکی قالب‌زده و خشک‌شده در آفتاب مرسوم بوده است. به عبارتی می‌توان گفت بلوک خاک فشرده، نسل جدیدی از خشت است (Rigassi, 1985:24). (Guillaud et al, 1985:18) که با یک کوبنده یا دستگاه پرس فشرده می‌شود. این شیوه ساخت پس از جنگ جهانی دوم به منظور بازسازی تعدادی مسکن اجتماعی در فرانسه و جمهوری دموکراتیک آلمان مورد استفاده قرار گرفت (Doat et al, 1991:138). نیاز به صرفه‌جویی انرژی به ویژه انرژی مصرفی برای پخت مصالح در این دوران و سپس در طول بحران بنزین، توسعه بلوک خاک فشرده را سرعت بخشید و در مناطق با هزینه‌های بالای انرژی، گسترش کاربرد معماری آن را تقویت کرد (Rigassi, 1985:24). تراکم بالا در CEB که به کمک فشرده‌سازی به دست می‌آید، به طور قابل توجهی مقاومت فشاری بلوک و استحکام در برابر فرسایش و آسیب‌های ناشی از مواجهه با آب را بالا می‌برد (Guillaud et al, 1985:1; CRAterr, 1991:5). لازم به

می‌شود پیشینه‌ای بس دیرینه دارد. از عصر باستان همواره استفاده از مواد افزودنی طبیعی همچون الیاف کاه، موی بز، روغن‌های طبیعی، عصاره گیاهان مختلف، سرگین‌های حیوانی، فضولات لانه مورچگان، ذرات شن و ماسه برای اصلاح مصالحی نظیر خشت و گل، مورد توجه بشر بوده است (لانت، ۱۳۶۰:۱). با این حال سابقه پژوهش‌های علمی در این زمینه، به حدود سال ۱۹۲۰ میلادی باز می‌گردد که مواد تثبیت‌کننده خاک، به طور علمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین پس از اتمام جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۴۵ میلادی، به دلیل خرابی‌ها و ویرانی‌های ناشی از جنگ، شروع عملیات بازسازی و نوسازی شهرهای آسیب‌دیده اروپایی و نیاز شدید و فوری به ساخت مسکن و سرپناه برای هزاران بی‌خانمان، مطالعات بسیار گسترده و دامنه‌داری در طی سه دهه در زمینه معماری با خاک انجام شد. لذا به دنبال آن فنون ساخت‌وساز با مصالح خاکی توسعه بسیاری یافت (Houben, 1994).

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 بیشتری به معماری خاکی به عنوان پاسخی به مسایل زیست‌محیطی جدی در جهان پدیدار شد و تکنولوژی‌های نوین به منظور بهبود معماری گلین (Eires, Camões, Jalali, 2013:962) در کنار علاقه و تمایل به مطالعه و حفاظت معماری خاکی پا به عرصه گذاشتند.

در حوزه تثبیت فیزیکی و شیمیایی مصالح خاکی، محققان بسیاری در نقاط گوناگون جهان فقط از رس به عنوان چسباننده استفاده می‌کنند. برخی از سازنده‌ها از خاکستر، آسفالت، امولسیون و ترکیبی از این مصالح به عنوان چسباننده استفاده کرده‌اند (Zami, 2010:2).

ذکر است که گرچه فشرده‌سازی و افزایش تراکم در مصالح گلین به عنوان واحد جزء ساختمانی، موجب افزایش چگالی و جرم بنا شده اما یکی از قابلیت‌های شاخص و قابل توجه آن، امکان کاهش ضخامت جرزها خواهد بود.

مطالعات کمی و کیفی انجام‌شده در مورد تثبیت مکانیکی عمدتاً در حوزه ژئوتکنیک، راه‌سازی و همچنین کشاورزی و کمتر مرتبط با مصالح خاکی است. هرچند مطالعات زیادی در مورد بلوک خاک فشرده و دیوار خاک کوبیده به‌عنوان مصالح خاکی تثبیت‌شده انجام شده ولی عمدتاً تمرکز این مطالعات بر تثبیت فیزیکی و شیمیایی مصالح بوده است (CRAterr, 1991; Walker, 1997; Rigassi, 1985; Uddin, Mostafa, 2016; Guillaud et al, 1985; Toure et al, 2017). در این تحقیقات به رفتار مکانیکی مثبت این مصالح خاکی در مقایسه با نمونه‌های اصیل آن‌ها یعنی خشت و چینه اشاره شده است. به‌طور کلی مطالعات بسیاری اعم از داخلی یا بین‌المللی مرتبط با مصالح خاکی و خشت انجام شده و نمونه‌های قابل‌توجهی (Avrami et al, Degirmenci, 2008; Doat et al, 1991; Houben, Guillaud, 1994, 2008; Silveira et al, 2012; Morel & Kouakou, 2009; Humberto et al, Sharma et al, 2016; Cividini, 2017; Illampas et al, 2011; al, 2015; رحیم‌نیا و حیدری، ۱۳۹۰؛ اسماعیلی و قلعه‌نوی، ۱۳۹۱؛ وطنی و افضلی، ۱۳۹۵؛ حجازی و همکاران، ۱۳۹۳) موجود است که تاریخچه مناسبی برای این زمینه تحقیقاتی به وجود آورده‌اند اما تعداد کمی از این تحقیقات به بررسی رابطه تثبیت مکانیکی و خواص مکانیکی مصالح خاکی (Wu et al, 2013; Montgomery, 2002; Kerali, 2001) پرداخته‌اند. لذا جمع‌بندی پیشینه بیانگر لزوم توجه بیشتر به قابلیت‌های تثبیت مکانیکی و

فاکتورهای مؤثر بر آن در حوزه مصالح خاکی است. امروزه اعمال تثبیت مکانیکی بر انواع مصالح خاکی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده و بخش اعظم این تحقیقات، با هدف ارتقاء و افزایش مقاومت مکانیکی و توان‌بخشی بیشتر آن‌ها انجام می‌شود.

### مطالعات آزمایشگاهی (روش اجرای پژوهش)

در شهرستان اردکان واقع در استان یزد، تعداد فراوانی بنای خشتی با ارزش وجود دارد که برای مرمت و گاه بازسازی آن‌ها، از مصالح خاکی تهیه شده از خاک معادن موجود استفاده می‌شود، معادنی که مواد اولیه ساخت خشت در منطقه را فراهم می‌کنند. این تحقیق به روش تجربی، با مطالعات آزمایشگاهی بر روی خشت‌های ساخته‌شده از خاک معادن مذکور صورت گرفته است. لذا پس از بررسی میدانی خاک مناطق مختلف شهرستان اردکان و حومه آن و کسب اطلاعات لازم از متخصصین امر، بنا به مطالعات و مشاهدات بصری کیفیت خاک‌ها در محل و سابقه استفاده از این خاک‌ها در کارگاه‌های خشت‌زنی، ۶ معدن خاک به‌عنوان بهترین منابع خاک برای ساخت نمونه‌های خشتی انتخاب گردید. پس از تهیه خاک مناسب، ویژگی‌های فیزیکی آن مانند دانه‌بندی و درصد رطوبت مورد مطالعه قرار گرفت و سپس دو گروه شاهد و آزمایشی از نمونه‌ها شکل گرفت. نمونه‌های شاهد، با روش فرآوری و ساخت مرسوم خشت در ایران و نمونه آزمایشی، با روش تثبیت‌شده مکانیکی تهیه شدند. سپس مطابق جدول ۱ و با روش‌های آزمایشگاهی استاندارد، مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها اندازه‌گیری و مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت. در تمامی مراحل نمونه‌سازی و مطالعات آزمایشگاهی، ترکیب نمونه‌های خشتی ساخته‌شده از خاک هر معدن در هر گروه آزمایشی از نظر نوع خاک،

بافت و دانه‌بندی خاک، نحوه تهیه، شیوه و مدت زمان عمل‌آوری، ثابت در نظر گرفته شد و اعمال تثبیت مکانیکی به‌عنوان شاخص متغیر بین نمونه‌ها، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

نوع آزمایش	کد استاندارد	شکل و ابعاد نمونه (Cm)	تعداد نمونه‌های شاهد (خشت معمولی)	تعداد نمونه‌های آزمایشی (خشت تثبیت شده)
تعیین مقاومت فشاری	ASTM C109-90	مکعبی ۵*۵*۵	۳	۳
تعیین مقاومت خمشی	ASTM C293	منشوری ۱۶*۴*۴	۳	۳
تعیین مقاومت کششی	ASTM C307-99	بریکت (پایونی)	۳	۳

ج ۱. روش‌های مطالعه آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خشتی، مأخذ: پژوهشگران.

### خاک مورد استفاده

شناسایی خواصی از خاک مانند دانه‌بندی و آگاهی نسبی به‌میزان هریک از دانه‌ها، خاصیت پلاستیک و شکل‌پذیری، کیفیت و خواص چسباننده (رس)، تراکم و آگاهی به میزان رطوبت بهینه که کمترین انرژی برای تراکم و بیشترین چگالی را به همراه داشته باشد، برای تولید محصول خاکی باکیفیت ضروری است (Maini, 2005). لذا در این پژوهش، آزمایش‌های تعیین دانه‌بندی به روش الک مرطوب، آزمون هیدرومتری و درصد رطوبت (Carazas et al, 2000) بر روی نمونه‌های خاک مورد توجه بوده است. در این راستا

ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل درصد رطوبت و دانه‌بندی بر طبق استانداردهای بین‌المللی ASTM<sup>۴</sup> در شرایط آزمایشگاهی مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت. در آزمایش دانه‌بندی به‌طور همزمان از الک (الک‌های شماره مش  $\frac{3}{8}$ ،  $\frac{3}{16}$ ،  $\frac{3}{32}$ ،  $\frac{3}{64}$ ،  $\frac{3}{128}$ ،  $\frac{3}{256}$ ،  $\frac{3}{512}$  و  $\frac{3}{1024}$ ) و هیدرومتری استفاده شد که نتایج آن به شرح جدول شماره ۲ است. قابل ذکر است که در این مطالعه مطابق آنچه در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود، از کدهای اختصاری با حرف S (مخفف Soil) و حرف اول نام هر معدن، به جای نام کامل معدن خاک استفاده شده است.

درصد رطوبت	دانه‌بندی (درصد)					نام منطقه	
	رس	سیلت/لای	ماسه	شن	قلوه سنگ		
۱/۹۲۵	۳۷/۹	۵۱/۹	۹/۹	۰/۳	-	SE	عیش آباد
۶/۲۲۵	۳۱/۴	۵۵/۸	۱۲/۸	-	-	SM	محمدآباد قدیم
۷/۹۵	۳۴/۷	۶۰/۷	۴/۶	-	-	SH	حسین آباد
۱/۳۵	۲۹	۵۷/۴	۹/۳	۴/۲	-	SGH	قطب آباد
۱/۶	۱۰	۷۹/۷	۱۰/۱	۰/۱	-	SA	علی آباد
۱/۴	۳۵/۶	۵۲/۵	۱۱/۸	۰/۱	-	SZ	زرده

ج ۲. نتایج توزیع دانه‌ها حاصل از آزمون دانه‌بندی و درصد رطوبت خاک، مأخذ: پژوهشگران.

با این حال شاهد تفاوت‌هایی در مقاومت نمونه‌های ساخته‌شده با هر خاک خواهیم بود که نمایانگر تفاوت و اهمیت کانی‌های موجود و خواص شیمیایی خاک‌ها است.

با توجه به نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی، نمونه‌های خاک از نظر بافت تقریباً مشابه بوده و دارای میزان مناسبی رس برای ساخت خشت هستند لذا جزء خاک‌های ریزدانه و ماسه‌ای رس‌دار طبقه‌بندی می‌شوند.

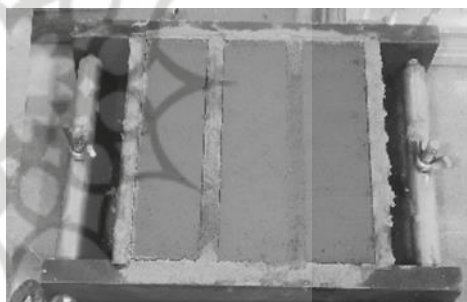
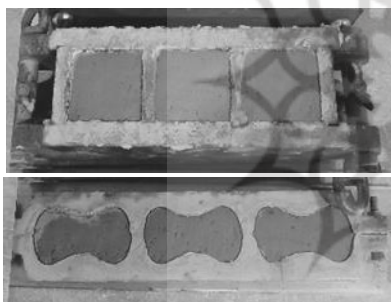
### ساخت نمونه‌های شاهد و تثبیت‌شده مکانیکی

در ادامه انجام مطالعات آزمایشگاهی و پس از بررسی خصوصیات فیزیکی خاک‌ها، ساخت نمونه‌ها مدنظر قرار گرفت. از این رو ۳ نمونه مکعبی برای سنجش مقاومت فشاری، ۳ نمونه بریکت برای تعیین مقاومت کششی و ۳ نمونه منشوری برای تعیین مقاومت خمشی، برای هر معدن خاک و به ازای هریک از گروه‌های شاهد و آزمایشی تهیه شد. در مجموع تعداد ۱۸ نمونه برای هر معدن ساخته شد که فرآیند آماده‌سازی آن‌ها در ادامه شرح داده شده است.

#### آماده‌سازی نمونه‌های شاهد (خشت)

برای گروه شاهد، سعی شده از روش ساخت مرسوم در معماری سنتی ایران استفاده شود، بدین‌صورت که پس از آبخوره کردن خاک و

گذشت مدت زمان کوتاه و معین، مخلوط به مدت تقریبی ۱۵ دقیقه با دست ورز داده شد. با این عمل، گل به خمیری سفت با حالتی یکدست و چسبنده تبدیل شده که تا حد زیادی از ترک‌های حین خشک‌شدن جلوگیری می‌کند. سپس گل به مدت ۲۴ ساعت داخل کیسه پلاستیکی بدون منفذ نگهداری شد تا رطوبت آن در معرض تبخیر قرار نگیرد و ضمن توزیع یکنواخت و همگن آب میان ذرات خاک، فرآیند عمل‌آوری صورت گیرد. پیش از قالب‌گیری، سطح داخلی قالب‌ها روغن‌کاری شده و گل با شدت و با قوای دست داخل قالب جایگیری شد و سپس با انگشتان به آن فشار آورده تا گل شکل بگیرد. همچنین نسبت به پر شدن گوشه‌ها اطمینان حاصل شد (تصویر شماره ۱).



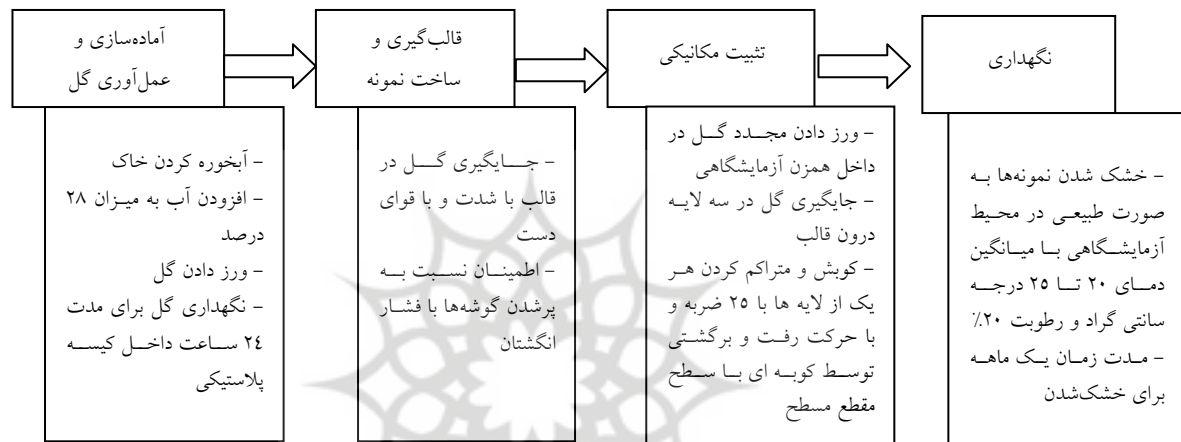
ت ۱. قالب‌گیری نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی، مأخذ: پژوهشگران.

علاوه بر ایجاد خشتی با حجم فشرده، به نظر می‌رسد در کم شدن تخلخل گل نیز نقش داشته است. **آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی (خشت تثبیت‌شده)** به‌منظور ساخت نمونه‌های تثبیت‌شده ابتدا مطالعه‌ای بر روی روش ساخت بلوک خاک فشرده صورت گرفت. یکی از تفاوت‌های خشت و بلوک خاک فشرده میزان رطوبتی است که برای ساخت مخلوط بکار می‌رود. ساخت خشت در وضعیتی صورت می‌گیرد که خاک حالت نیمه‌پلاستیک دارد اما بلوک خاک فشرده با خاکی

نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت و گیرش اولیه از قالب جدا شدند. به‌منظور ساخت نمونه‌های خشت مرسوم، پس از رجوع به استادکاران معماری سنتی و مصاحبه با ایشان و همچنین مطالعات کتابخانه‌ای، منابع شفاهی و مکتوب گوناگونی یافت شد که تأییدی بر فشرده‌سازی گل در قالب با فشار دست در هنگام ساخت خشت (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴:۷۱؛ فلامکی، ۱۳۸۷:۳۳۰؛ مسرت، ۴۳-۳۹:۱۳۹۴؛ پیرنیا، ۲۷:۱۳۸۱؛ زمرشیدی، ۸:۱۳۷۷؛ مصاحبه با معماران سنتی یزد و اردکان) بوده است. این عمل

(دینامیک)، تأثیر کمتری بر افزایش مقاومت فشاری دارد (Bahar, Benazzoug and Kenai, 2004)؛ مینکه، ۱۳۸۸:۷۰). لازم به ذکر است که هدف از پژوهش حاضر، مطالعه آزمایشگاهی بلوک خاک فشرده نیست و این تکنیک ساخت به واسطه اعمال تثبیت مکانیکی بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. لذا مطابق تصویر ۲، روش ساخت نمونه‌های آزمایشی مشابه ساخت خشت مرسوم، ولی توأم با تثبیت مکانیکی است.

با رطوبت بسیار کم و با مقدار رطوبتی مشابه خاک کوبیده ساخته می‌شود. تفاوت دیگر نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش با بلوک خاک فشرده در نحوه فشرده‌سازی است. فشرده‌سازی در بلوک‌های خاک فشرده به صورت استاتیک و در نمونه خشت‌های پژوهش حاضر به صورت دینامیک بوده است. براساس نتایج برخی تحقیقات، فشرده‌سازی خاک تحت یک نیروی ثابت (استاتیک)، در قیاس با کوبیدن یا لرزاندن



ت ۲. مراحل ساخت نمونه‌های خشت مرسوم و خشت تثبیت شده، مأخذ: پژوهشگران.

آزمایشگاهی در تعیین مقاومت مکانیکی و درصد متفاوت تراکم، از هر گروه، سه عدد ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نهایتاً بعد از تعیین میانگین، مقاومت مکانیکی برای هر اختلاط محاسبه شد (تصویر شماره ۳).

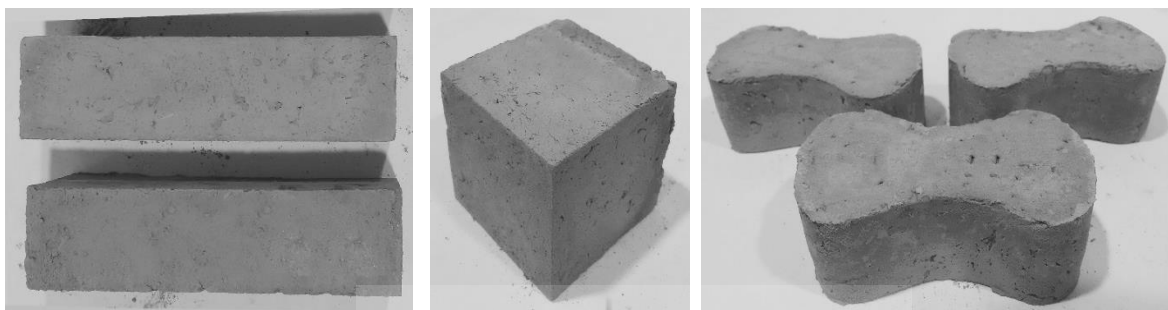
#### سنجش رفتار مکانیکی نمونه‌های خشتی

استحکام فشاری بناهای ساخته شده با مصالح بنایی، وابستگی شدید به مقاومت فشاری واحدهای بنایی (سنگ، آجر و بلوک) و همچنین مقاومت ملات، الگوی چینش، تراکم و بسیاری از عوامل دیگر دارد (Claude Morel et al, 2007)، از این رو، سنجش مقاومت فشاری به عنوان یکی از آزمایش‌های اصلی این پژوهش در نظر گرفته شد. همچنین از نظر فناوری ساخت و ساز با

یکی از اهداف مهم در تولید خشت‌های شاهد و آزمایشی این است که گل به صورت یک توده همگن و فشرده و بدون ترک‌های داخلی خشک شود. از این رو با توجه به انجام پژوهش در فصل پاییز، به خشت‌ها (نمونه‌های ساخته شده) زمان داده شد تا به صورت طبیعی در محیط آزمایشگاهی با میانگین دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۰٪ خشک شوند. یک ماه میانگین زمانی است که برای خشک شدن تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. پس از یک ماه، برای اطمینان از خشک شدن نمونه‌ها، آن‌ها را در آن با دمای ۶۰ درجه قرار داده و هر ۲۴ ساعت وزن شدند تا زمانی که به وزن ثابت (کاملاً خشک) رسیدند. به منظور به حداقل رساندن خطای

استحکام لبه‌های خشت، اهمیت پیدا می‌کند. در این راستا رفتار مکانیکی خشت‌ها در آزمون کششی و خمشی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا در ادامه، مواد و روش انجام آزمون‌های فشاری، کششی و خمشی بیان شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

خاک، مقاومت کششی مصالح خشک باارزش است زیرا سازه‌های خاکی نباید تحت کشش قرار گیرند درحالی‌که یکی از مشکلات شایع خشت در سازه‌های خشتی، ضعف مقاومت کششی است. میزان مقاومت خمشی نیز هنگام قضاوت در مورد کیفیت ملات گل و



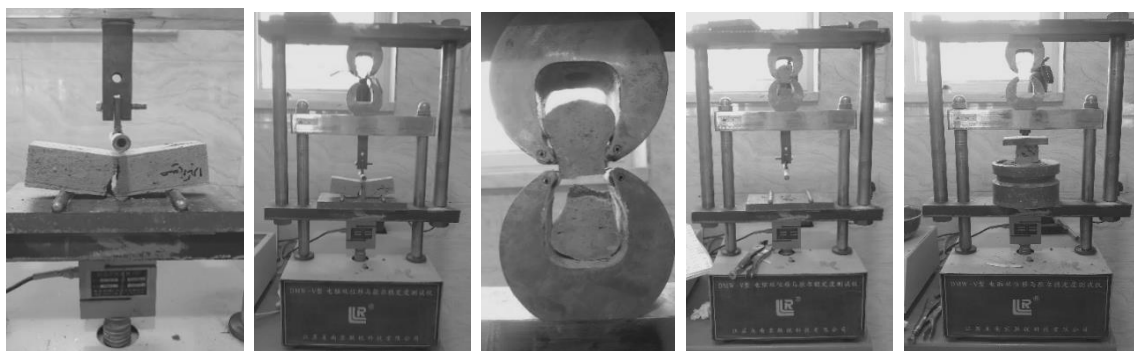
ت ۳. تصاویری از نمونه‌های تهیه‌شده برای آزمایش کششی، فشاری و خمشی، مأخذ: پژوهشگران.

#### مواد و روش‌ها

دستگاه (۱۲۰ کیلوگرم بر ثانیه) به‌گونه‌ای تنظیم شد که نیرو به‌صورت یکنواخت بر روی نمونه اعمال شود و اعمال بار تا لحظه شکست ادامه یابد. برای تعیین مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های خشتی، از خاک هر معدن و به ازای هر دو گروه شاهد و آزمایشی، ۳ نمونه مکعبی ۵\*۵\*۵ یعنی ۳۶ نمونه فشاری، ۳ نمونه بریکت یعنی ۳۶ نمونه کششی و ۳ نمونه منشوری ۴\*۴\*۱۶ یعنی ۳۶ نمونه خمشی ساخته شد. سپس مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها طبق استانداردهای جدول شماره ۱ تعیین و حداکثر نیروی قرائت‌شده از شکست هر نمونه یادداشت شد. میانگین مقاومت سه نمونه به‌عنوان مقاومت فشاری<sup>۶</sup>، کششی<sup>۷</sup> و خمشی<sup>۸</sup> آن گروه محاسبه شد (تصویر شماره ۴).

به‌منظور آزمون مقاومت فشاری، کششی و خمشی، پیش از شکست نمونه‌ها اطمینان حاصل شد که خشت‌ها کاملاً خشک شده، دارای ساختاری یکنواخت بوده و فاقد هرگونه ترک قابل مشاهده با چشم غیرمسلح باشند. سطح مقطع نمونه‌ها اندازه‌گیری شده، همچنین بررسی شد تا نمونه‌ها وزن حجمی مشابهی داشته باشند (Carazas et al, 2000). سپس هریک از نمونه‌ها را به‌صورت جداگانه و تحت شرایط یکسان داخل دستگاه قرار داده تا نیرو توسط جک مکانیکی ملات‌شکن سه‌کاره (با ظرفیت ۵ تن و دقت  $\frac{Kg}{cm^2}$ ) بر نمونه‌های خشتی اعمال شود. این دستگاه برای شکست نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداکثر سرعت بارگذاری

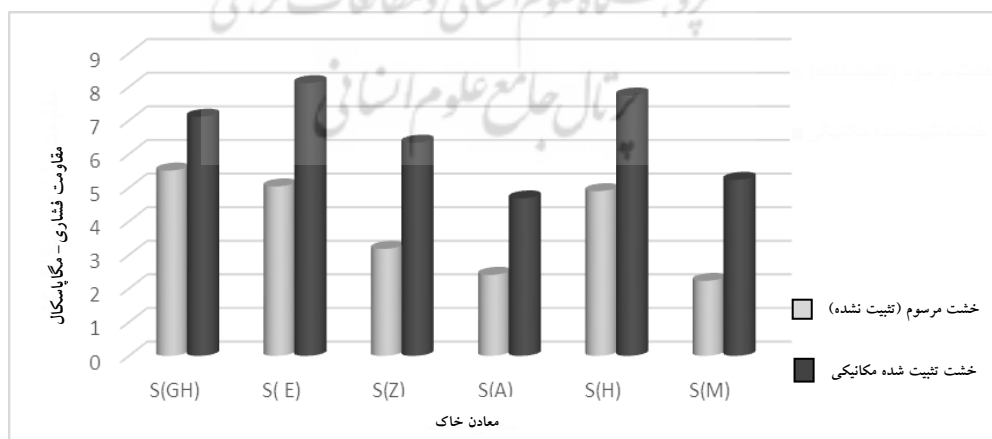




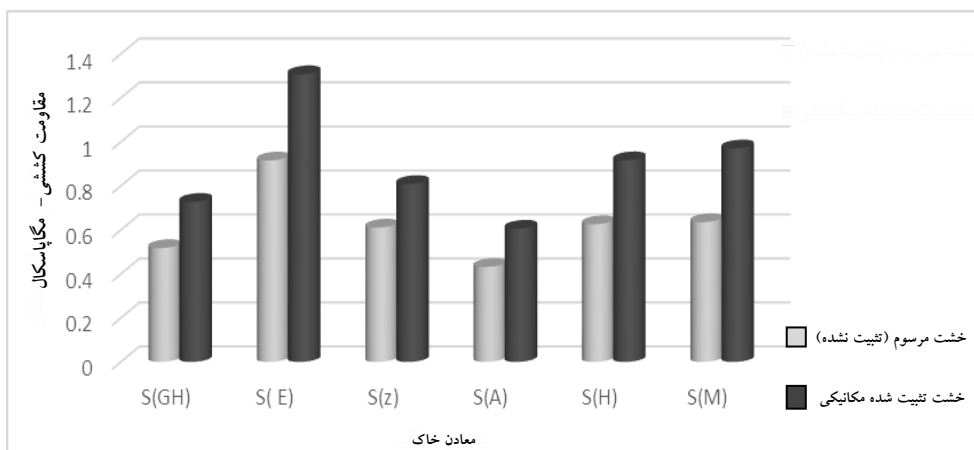
ت ۴. تصاویری از نمونه‌ها در حین سنجش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، مأخذ: پژوهشگران.

از مقاومت کششی نمونه‌ها نیز در قالب تصویر شماره ۶ ارائه شده است. بنا به این نتایج، تثبیت مکانیکی بر مقاومت کششی نمونه‌ها تأثیر مثبتی داشته است. مقاومت کششی نمونه‌های خشت مرسوم بین  $0/4$  تا  $0/9$  مگاپاسکال بوده، در حالی که مقاومت کششی نمونه خشت‌های تثبیت‌شده بین  $0/7$  تا  $1/3$  مگاپاسکال متغیر بوده است. چنانچه در تصویر شماره ۷ ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت خمشی خشت تثبیت‌شده و مقایسه آن با نمونه‌های خشت مرسوم نیز مانند دو آزمون قبلی، بیانگر تأثیر مثبت تثبیت مکانیکی بر مقاومت خمشی نمونه‌ها است.

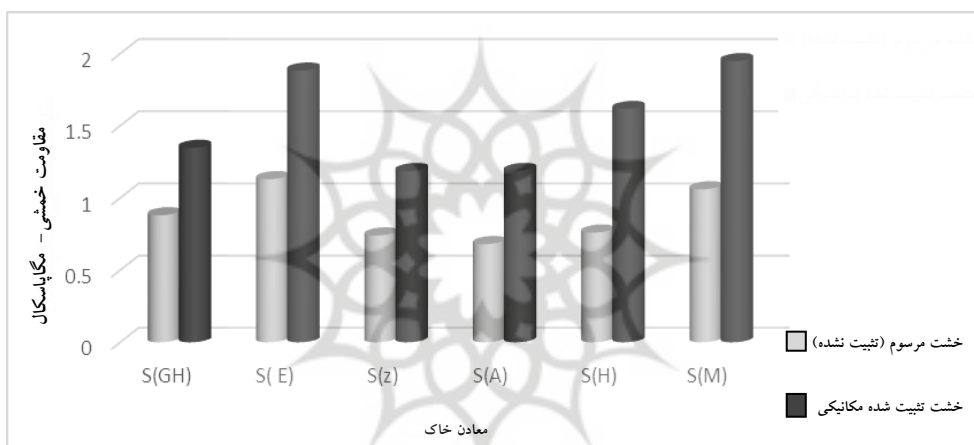
نتایج با توجه به آنچه اشاره شد، پس از سنجش مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های تهیه‌شده، نتایج اولیه حاصل از مطالعات آزمایشگاهی ثبت شد. این نتایج که در قالب نمودار ارائه شده است بیانگر افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده در تمامی آزمون‌ها نسبت به نمونه‌های خشت مرسوم است. نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌ها در تصویر شماره ۵ ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌های خشت مرسوم بین  $2/23$  تا  $5/51$  مگاپاسکال و مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده بین  $2/41$  تا  $8/11$  مگاپاسکال متغیر است. نتایج حاصل



ت ۵. مقایسه مقاومت فشاری خشت مرسوم و خشت تثبیت شده مکانیکی، مأخذ: پژوهشگران.



ت ۶. مقایسه مقاومت کششی خشت مرسوم و خشت تثبیت شده مکانیکی، مأخذ: پژوهشگران.



ت ۷. مقایسه مقاومت خمشی خشت مرسوم و خشت تثبیت شده مکانیکی، مأخذ: پژوهشگران.

پرداخته و سپس جمع‌بندی پژوهش ارائه شده است.

### مقاومت فشاری

براساس نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های خشتی در تصویر شماره ۵، خشت‌های ساخته‌شده از خاک  $S_{GH}$  و  $S_E$  و  $S_H$  بیشترین مقاومت و خشت‌های ساخته‌شده از خاک  $S_A$  و  $S_M$  کمترین مقاومت را در نمونه‌های خشت مرسوم داشته‌اند. در نمونه‌های تثبیت‌شده نیز مجدداً، خشت‌های ساخته‌شده از خاک  $S_{GH}$ ،  $S_E$  و  $S_H$  دارای بیشترین مقاومت فشاری و خشت‌های ساخته‌شده از خاک  $S_A$  و  $S_M$  کمترین مقاومت را در

### بحث و تحلیل

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش و آزمایش‌های انجام‌شده که در قسمت‌های قبل آورده شد، عمل تثبیت مکانیکی تأثیر مثبتی بر رفتار مکانیکی تمامی نمونه‌های ساخته‌شده از ۶ معدن خاک در شهر اردکان یزد داشته است، البته بعضاً میزان افزایش مقاومت با توجه به خواص شیمیایی و رفتار متفاوت کانی‌ها در انواع خاک متفاوت بوده است. در این راستا با توجه به شرایط فیزیکی خاک‌ها و نتایج حاصل در هریک از آزمون‌های فشاری، کششی و خمشی، به تحلیل جداگانه آزمون‌ها

برابر نیروهای فشاری داشته‌اند.

از طرفی با توجه به مشخصات دانه‌بندی خاک‌های معادن که در جدول شماره ۲ ارائه شده، سه معدنی که بیشترین مقاومت فشاری را بروز داده‌اند دارای میزان رس حدود ۳۰٪ و حتی بالاتر بوده‌اند، لذا با توجه به رابطه مستقیم پیوستگی ذرات خاک و مقاومت فشاری نمونه‌ها، می‌توان یکی از علل مقاومت بالا در نمونه‌های ساخته‌شده با خاک این معادن را درصد بالای رس دانست. اما در خاک معادن  $S_M$  و  $S_A$  که نمونه‌های ساخته‌شده با آن‌ها کمترین مقاومت فشاری را هم در نمونه‌های شاهد و هم نمونه‌های آزمایشی داشته‌اند، درصد متفاوتی از رس مشاهده می‌شود. خاک معدن  $S_A$  دارای درصد رس پایین است لذا کاهش پیوستگی بین ذرات خاک منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. برخلاف این خاک معدن  $S_M$  دارای درصد رس بالایی است لذا علت مقاومت فشاری پایین را بایستی در نوع کانی‌ها و خواص شیمیایی خاک جست‌وجو کرد. از طرف دیگر وجود لایه‌های نمکی بر روی تمامی نمونه‌های ساخته‌شده با این خاک مؤید وجود نمک در گل بوده که می‌تواند از دلایل کاهش مقاومت باشد.

احتمالاً این موضوع باعث سستی لایه‌های سطحی شده و براین اساس خشت مقاومت کمتری در برابر اعمال فشار از خود بروز داده است.

به‌طورکلی مقاومت فشاری در نمونه‌های خشت بین ۲/۲۳ تا ۵/۵۱ مگاپاسکال متغیر است. با توجه به ارقام متفاوتی که در مورد میزان مقاومت فشاری خشت در منابع مختلف بین ۱ تا ۳/۳ مگاپاسکال (مبحث ۸ مقررات ملی ساختمان ایران، ۱۳۸۷:۵۳؛ Harper, Abu-Hammad, Rillins, Ilberg, 2007؛ 2011؛ N.O, 2011) اعلام شده، نتایج آزمون مقاومت فشاری در نمونه‌های شاهد از میانگین مقاومت فشاری خشت در منابع مورد بررسی بالاتر بوده و مطلوب می‌باشد. نمونه‌های تثبیت شده نیز دارای میانگین مقاومت فشاری بین ۴/۶ تا ۸/۱ مگاپاسکال بوده‌اند لذا می‌توان گفت مقاومت فشاری خشت در حالت تثبیت‌شده، حدود ۱/۵ برابر مقاومت فشاری در نمونه‌های بدون تثبیت است و تثبیت مکانیکی تا حد مطلوبی، مقاومت فشاری را بهبود بخشیده است. در جدول شماره ۳، درصد تغییر مقاومت فشاری در نمونه‌های تثبیت‌شده نسبت به نمونه‌های شاهد قابل‌تأمل است.

نام معدن خاک	$S_E$	$S_M$	$S_H$	$S_{GH}$	$S_A$	$S_Z$
مقاومت فشاری خشت مرسوم	۵/۰۴	۲/۲۳	۴/۹	۵/۵۱	۲/۴۱	۳/۱۸
مقاومت فشاری خشت تثبیت شده مکانیکی	۸/۱۱	۵/۲۳	۷/۷۴	۷/۱۱	۴/۶۸	۶/۳۴
درصد تغییر نمونه‌ها (تثبیت‌شده نسبت به نمونه شاهد)	۶۰/۹۳	۱۳۴/۸۴	۵۸/۰۴	۲۹/۰۹	۹۴/۲۷	۹۹/۴۶

ج ۳. مقایسه مقاومت فشاری و درصد تغییر در خشت مرسوم و خشت تثبیت‌شده مکانیکی، مأخذ: پژوهشگران.

### مقاومت کششی

بنا به نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها (تصویر شماره ۶)، نمونه‌های خشتی ساخته‌شده از ۴ معدن خاک  $S_H$ ،  $S_{GH}$ ،  $S_Z$  و  $S_M$  که به روش مرسوم تهیه شده‌اند در برابر تنش‌های کششی، مقاومت تقریباً مشابهی داشته‌اند و

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده که از خاک ۵ معدن تهیه شده، بیش از ۵۰ درصد افزایش داشته‌اند. همچنین میانگین مقاومت فشاری در تمامی ۶ معدن، ۷۹/۴۳ درصد افزایش داشته است.

خشت‌های ساخته‌شده از خاک معادن  $S_E$  و  $S_A$  با اختلاف قابل توجهی، بیشترین و کمترین مقاومت کششی را داشته‌اند. در گروه آزمایشی، نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معادن  $S_E$ ،  $S_M$ ،  $S_H$  و  $S_Z$  و  $S_{GH}$  به ترتیب دارای بیشترین مقاومت کششی بوده‌اند، در این گروه نیز نمونه‌های تهیه‌شده از خاک  $S_A$  کمترین مقاومت کششی را بروز داده‌اند.

با نگاهی به جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود که خاک معدن  $S_E$  دارای بیشترین میزان رس است، سه معدن خاک  $S_M$ ،  $S_H$  و  $S_Z$  به‌طور تقریبی دارای میزان رس مشابهی هستند، خاک معدن  $S_{GH}$  نسبت به چهار معدن نام‌برده میزان رس کمتری دارد و خاک معدن  $S_A$  دارای کمترین میزان رس است. با مقایسه میزان رس خاک‌ها و مقاومت کششی نمونه‌های خشتی بدون تثبیت و تثبیت شده می‌توان استدلال نمود که رابطه مستقیمی بین این دو فاکتور وجود دارد، به عبارتی نمونه‌های کششی ساخته‌شده با خاک معدن  $S_E$  با بیشترین میزان رس، در هر دو گروه خشت‌های مرسوم و تثبیت شده دارای

بیشترین مقاومت در برابر نیروهای کششی بوده است. نمونه‌های کششی خشت مرسوم و تثبیت شده که با خاک ۳ معدن  $S_M$ ،  $S_H$ ،  $S_Z$  ساخته شده‌اند، دارای مقاومت تقریباً مشابهی بوده‌اند، نمونه‌های کششی ساخته‌شده با خاک معدن  $S_{GH}$  در هر دو گروه شاهد و آزمایشی نیز دارای مقاومت کششی کمتری نسبت به معادن نام‌برده است. نهایتاً نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معدن  $S_A$  که کمترین میزان رس را دارد، کمترین مقاومت کششی را در هر دو گروه شاهد و آزمایشی بروز داده است.

به‌طورکلی مقاومت کششی در نمونه‌های مرسوم بین ۰/۴ تا ۰/۹ و مقاومت کششی در نمونه‌های تثبیت شده بین ۰/۶ تا ۱/۳ متغیر است لذا عمل تثبیت مکانیکی بر مقاومت کششی نمونه‌های خشتی تأثیر مثبت داشته و موجب شده که مقاومت کششی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش داشته باشد. در جدول شماره ۴ درصد تغییر مقاومت کششی در نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه‌های مرسوم مشاهده می‌شود.

نام معدن خاک	$S_E$	$S_M$	$S_H$	$S_{GH}$	$S_A$	$S_Z$
مقاومت کششی خشت مرسوم	۰/۹۱۵	۰/۶۳۶	۰/۶۲۶	۰/۵۱۸	۰/۴۳۲	۰/۶۱۱
مقاومت کششی خشت تثبیت شده مکانیکی	۱/۳۰۸	۰/۹۷۱	۰/۹۱۷	۰/۷۲۸	۰/۶۰۶	۰/۸۰۹
درصد تغییر نمونه‌ها (تثبیت شده نسبت به نمونه شاهد)	۴۲/۸۱	۵۲/۶۷	۴۶/۴۸	۴۰/۵۴	۴۰/۲۷	۳۲/۴۰

ج ۴. مقایسه مقاومت کششی و درصد تغییر در خشت مرسوم و خشت تثبیت شده مکانیکی، مأخذ: پژوهشگران.

با توجه به نتایج مقاومت کششی این‌گونه می‌توان استدلال کرد که تراکم موجب افزایش خاصیت کشسانی خشت و تشدید چسبندگی بین ذرات خاک شده است لذا هنگام اعمال تنش کششی بر ماده چسباننده، دانه‌های درشت و دانه‌های بی‌اثر با قدرت بیشتری در کنار هم باقی ننگه داشته می‌شوند.

#### مقاومت خمشی

با توجه به نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های خشتی در

تصویر شماره ۷، در گروه شاهد، نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معدن  $S_E$  دارای بیشترین مقاومت خمشی بوده و پس از آن، نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معادن  $S_M$  و  $S_{GH}$  مقاومت خمشی مطلوبی را ارائه داده‌اند. نمونه‌های خمشی ساخته‌شده با خاک دو معدن  $S_H$  و  $S_Z$  تقریباً مشابه بوده و نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معدن  $S_A$  کمترین مقاومت خمشی را بروز داده است. در گروه آزمایشی، نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معدن  $S_E$  دارای

بیشترین مقاومت بوده، نمونه‌های خمشی ساخته‌شده با خاک معادن  $S_M$ ،  $S_H$  و  $S_{GH}$  به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند و نهایتاً نمونه‌های ساخته‌شده با خاک معادن  $S_Z$  و  $S_A$  مقاومت خمشی یکسانی داشته‌اند. با توجه به جدول شماره ۲ می‌توان این‌گونه استدلال نمود که نمونه‌های خمشی تهیه‌شده از معدن خاک  $S_E$  با بیشترین درصد رس، بیشترین مقاومت خمشی را نیز داشته‌اند. در رده بعدی، نمونه‌های تهیه‌شده از ۴ معدن خاک  $S_M$ ،  $S_H$ ،  $S_{GH}$  و  $S_Z$  که دارای درصد رس نزدیک به ۳۰ درصد و یا بالاتر هستند، مقاومت خمشی مطلوبی ارائه داده‌اند. مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته‌شده با معدن خاک  $S_A$  در هر دو گروه شاهد و آزمایشی در مقایسه با مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های ساخته‌شده با همین خاک دارای اختلاف زیادی است؛ به منظور تدقیق این اختلاف بایستی مشخصات شیمیایی این خاک مورد بررسی قرار گیرد.

براساس نتایج، میانگین مقاومت خمشی در نمونه‌های شاهد ۰/۸۷۵ و در نمونه‌های آزمایشی ۱/۵۲۷ می‌باشد و مقاومت خمشی تمامی نمونه‌های تثبیت شده که از تمامی ۶ معدن خاک تهیه‌شده، بیش از ۵۰ درصد افزایش داشته‌اند. یکی از نمونه‌های شاهد که مقاومت خمشی متوسطی در مقایسه با سایر نمونه‌ها داشته است، در اثر تثبیت مکانیکی بیش از ۱۰۰ درصد افزایش مقاومت داشته است. به‌طور میانگین، مقاومت خمشی نمونه‌های تثبیت‌شده بیش از ۷۰ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است. لذا تأثیر تثبیت مکانیکی بر مقاومت خمشی و فشاری مطلوب‌تر از مقاومت کششی نمونه‌های خشتی بوده است. در جدول شماره ۵، درصد تغییر مقاومت خمشی در نمونه‌های تثبیت‌شده نسبت به نمونه‌های مرسوم قابل مشاهده است.

نام معدن خاک					
$S_Z$	$S_A$	$S_{GH}$	$S_H$	$S_M$	$S_E$
۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۷۶	۱/۰۶	۱/۱۳
۱/۱۸۶	۱/۱۸۶	۱/۳۴۷	۱/۶۱۶	۱/۹۴۷	۱/۸۸۲
۶۰/۲۷	۷۴/۴۱	۵۳/۰۶	۱۱۲/۶۳	۸۳/۶۷	۶۶/۵۴
مقاومت خمشی خشت مرسوم					
مقاومت خمشی خشت تثبیت شده مکانیکی					
درصد تغییر نمونه‌ها (تثبیت شده نسبت به نمونه شاهد)					

ج ۵. مقایسه مقاومت خمشی و درصد تغییر در خشت مرسوم و خشت تثبیت‌شده مکانیکی، مأخذ: پژوهشگران.

### نتیجه

منظور ساخت خشت، ضمن لزوم بررسی و تحلیل مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک، می‌توان نسبت به تأثیر مطلوب تثبیت مکانیکی بر خواص مکانیکی خشت‌ها امیدوار بود.

علاوه بر این، پژوهش حاضر بیانگر رابطه معنادار میان درصد رس موجود در خاک و رفتار مکانیکی خشت‌ها است. همچنین نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد روش ساختی که در این پژوهش برای خشت پیشنهاد شده (یعنی تلفیق تکنیک ساخت خشت مرسوم و تثبیت مکانیکی)، موجب دستیابی به کیفیت بهتری در

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که تثبیت مکانیکی یا به عبارتی، تراکم و فشردگی تأثیر مطلوبی بر رفتار مکانیکی خشت‌ها در آزمون‌های سنجش مقاومت فشاری، کششی و خمشی داشته است، به‌طوری‌که مقاومت فشاری نمونه خشت‌های تثبیت‌شده به‌طور میانگین حدود ۱/۷ برابر افزایش یافته، همچنین مقاومت کششی و مقاومت خمشی نیز به ترتیب ۱/۴ و ۱/۷ برابر افزایش یافته‌اند. لذا می‌توان استدلال نمود که در صورت اعمال تثبیت مکانیکی بر خاک هر منطقه‌ای به

خشت شده است. لذا می توان گفت علاوه بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، شیوه ساخت نیز نقش بسیار مهمی در خواص مکانیکی خشت دارد.

قابل ذکر است که پژوهش حاضر صرفاً عملکرد فیزیکی خاک را مورد بررسی قرار داده و به منظور مطالعه دقیق تر و کشف علل مقاومت بالای خشت ها بدون اعمال هیچ گونه تثبیت کنندگی یا مقاومت متغیر در برخی نمونه ها، بایستی خواص شیمیایی و کانی های موجود در خاک ها نیز مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این بررسی مقاومت حرارتی و رفتار مکانیکی خشت های حاصل در برابر رطوبت و سایش نیز برای پژوهش های آتی پیشنهاد می شود.

### سیاسگزار

بدین وسیله از کلیه مسئولان آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک آزماپویان واقع در شهرستان اردکان و پایگاه پژوهشی بافت تاریخی اردکان که شرایط و امکانات لازم را برای انجام این تحقیق مهیا نمودند سپاسگزاری می شود.

### پی نوشت

1. Compressed Earth Block
  2. Adobe
  3. Rammed Earth
۴. درصد رطوبت به روش خشک کردن در آون طبق کد استاندارد ASTM 00 D4643 و دانه بندی به روش الک و هیدرومتری طبق کد استاندارد ASTM D422-87.
۵. بنا به گفته مینکه (۱۳۸۸:۷۰)، در FEB و موسسه فناوری ساختمانی زوریخ ثابت شده است که معمولاً بلوک های بدست آمده از فشرده کردن خاک های کم رطوبت در قیاس با خاکی که با میزان کافی آب مرطوب شده، با دست ورز داده شده و در قالب افکنده شده باشند (همان فرآیند ساخت خشت)، مقاومت فشاری کمتری دارند. براساس آزمایشاتی که FEB انجام داده، مقاومت فشاری در نمونه هایی که دارای آماده سازی مناسب بوده اند و خاک و آب در یک میکسر مکانیکی به مدت ۱۵-۲ دقیقه مخلوط و در قالب افکنده شده در مقایسه با نمونه هایی که صرفاً فشرده شده اند و توسط ضربه های یک وزنه ۴.۵ کوبیده شده اند، ۲۸-۳۸ درصد افزایش یافته است. بدین

معنی که نحوه آماده سازی مناسب در مقایسه با فشرده سازی، در بالا بردن مقاومت فشاری خاک اهمیت بیشتری دارد.

۶. از تقسیم نیروی فشاری بدست آمده برای هر نمونه بر سطح خالص هر نمونه که نیرو بر آن اعمال می شود، تنش فشاری هر نمونه بدست آمده است.

۷. تنش کششی تحت کشش مستقیم برای هر نمونه از تقسیم نیروی کششی لازم برای شکستن نمونه بر سطح مقطع در محل شکستن نمونه بدست آمده است.

۸. تنش خمشی از فرمول زیر بدست آمده است.

$$\frac{3}{2} \frac{P.l}{b.h^2} = \text{مقاومت خمشی}$$

نیروی وارده p؛ طول دهانه l؛ عرض نمونه b؛ ارتفاع نمونه h

### فهرست منابع

- اسماعیلی، علیرضا؛ قلعه نوری، 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 زیست، شماره ۱۳۸، صص ۶۲-۵۳.
- پیرنیا، محمدکریم. (۱۳۸۱). مصالح ساختمانی (آژند، اندود، آمود). انتشارات تعاون سازمان میراث فرهنگی کشور، چاپ اول.
- حجازی، مهرداد. هاشمی، محمود. جمالی نیا، الهه. باتوانی، محمود. (۱۳۹۴). تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت های مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان، فصلنامه مسکن و محیط زیست؛ شماره ۱۵۱؛ صص ۸۰-۶۷
- خوشبخت بهرمانی، شوکا؛ سپهری مقدم، منصور. (۱۳۹۱). ابنیه خشتی مقاوم در برابر زلزله، نشریه علمی پژوهشی هویت شهر، شماره یازدهم، سال ششم.
- دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان. (۱۳۸۷). مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث هشتم، طرح و اجرای ساختمان های با مصالح بنایی، چاپ چهارم، نشر توسعه ایران.
- رحیم نیا، رضا. حیدری بنی، داریوش. (۱۳۹۰). تأثیر دامنه خمیری خاک (PI) بر مقاومت فشاری و کششی خشت های تثبیت شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه های خشتی، مرمت آثار و بافت های تاریخی فرهنگی، شماره دوم، سال اول.
- زمرشیدی، حسین. (۱۳۷۷). معماری ایران، مصالح شناسی سنتی. انتشارات زمرد، چاپ اول.

compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21, 303—309.

-CRAterr, (1991), *Basics of Compressed Earth Blocks*, A publication of Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien – GATE, Eschborn.

-Degirmenci, N. (2008). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. *Construction and Building materials*. 22 (6), pp. 1220-1224.

-Doat, P & Hays, A & Houben, H & Matuk, S & Vitoux, F. (1991). *Building with earth*. Published 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.

-Guillaud, Hubert & Joffroy, Thierry & Odul, Pascal & CRATerre- EAG, (1985). *Compressed earth blocks: 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.

-Houben, H. & Guillaud, H, (1994), *Earth construction – A comprehensive guide*, Intermediate Technology publications, London.

-Ilberg, Antje, Rollins, Chris, (2007), *LOW COST HOUSE Construction Manual*, RISD (Rwanda Initiative for Sustainable Development).

-Illampas, R & Ioannou, I & Charmpis, D. C. (2011). A study of the mechanical behaviour of adobe masonry, *Structural Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII*, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 118.

-Kerali, Anthony Geoffrey. (2001). *DURABILITY OF COMPRESSED AND CEMENT-STABILISED BUILDING BLOCKS*. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering. University of Warwick, School of Engineering.

-Kouakou, C.H.; Morel, J.C. (2009). Strengths and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*. 44 (102), PP 34-27.

-Little, B. & Morton, T, (2001), "Building with Earth in Scotland: Innovative Design and Sustainability", Edinburgh, Department or Scottish Ministers.

-Maïni, Satprem, (2005), "Earthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology", Auroville Building Centre - INDIA.

-Montgomery, David Edward. (2002). *Dynamically-compacted cement stabilised soil blocks for low-cost walling*. Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering,

- فلامکی، محمد منصور. (۱۳۸۷). *تکنولوژی مرمت معماری*. نشر فضا، تهران.

- لانت، ام.جی. (۱۹۸۳). *خشت‌های تثبیت‌شده برای ساختمان*، ترجمه فروز روشن‌بین، نشر مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تیرماه ۱۳۶۲.

- 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، صنایع‌دستی و گردشگری، اداره کل روابط عمومی، امور فرهنگی و اجتماعی، اداره برنامه‌ریزی نشر.

- 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، صص ۱۰۷-۱۲۴

-Abu-Hammad, N.O, (2011), "Architectural Mud Brick Prototypes As Efficient and Sustainable Shelters for the Low-Income Group in Jordan", *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 5, No. 1, 2011.

Adam, E. A. & Agib, A. R. A, (2001), *Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan*, Printed by Graphoprint for the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. France, Paris, UNESCO.

-Arumala, Joseph O & Gondal, Tariq. (2008). "Can compressed earth building blocks be a viable building material for affordable housing?", Findings in built and rural environments, Month 2008 Research, Department of Technology, University of Maryland Eastern Shore, USA.

-Avrami, Erica. Hubert. Guillaud, and Mary. Hardy. (2008) , *TERRA literature Review*. Los Angeles: Getty Publication.

Bahar, R & Benazzoug, M & Kena, S.(2004). *Performance of compacted cement-stabilised soil*, *Cement and Concrete Composites*, 26 (7), pp. 811-820.

-Carzas W. & Dugelay S. & Douline A. & El Gharbi Z. & Joffroy T. & Moles O. & Moriset S. & Oliver M, (2000), *Compressed earth blocks, testing procedures*, CDE, ENTPE et CRATerre-EAG.

-Cividini, Annamaria. (2017). *Geomechanical characterization of some adobe materials*. *Procedia Structural Integrity*, Vol 5, pp 1072-1077.

-Claude Morel, Jean & Pkla, Abalo & Walker, Peter. (2007). *Compressive strength testing of*

- University of Warwick, School of Engineering.
- Norton, J. (1997). Building With Earth. London: Intermediate Technology Publications.
- Rigassi, Vincent & CRATerre-EAG. (1985). Compressed earth blocks: Manual of production, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH in coordination with BASIN.
- Sharma, Vanda. Marwaha, Bhanu M. Vinayak, Hemant K. (2016). Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. International Journal of Sustainable Built Environment, Vol 5, PP 141-155.
- Silveira, Dora & Varum, Humberto & Costa, Anibal & Martins, Tiago & Pereira, Henrique & Almeida, Joao. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. Construction and Building Materials, Vol 28, Issue 1. 36-44.
- Toure, Pape Moussa. Sambou, Vincent. Faye, Mactar. Thiam, Ababcar. (2017). Mechanical and thermal characterization of stabilized earth bricks. Energy Procedia 139, PP 676–681.
- Uddin, Nasim. Mostafa, Marwan. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. Case Studies in Construction Materials Journal. Vol 5. PP 53–63.
- Varum, Humberto. Costa, Aníbal. Fonseca, Jorge. Furtado, André. (2015). Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction. Procedia Engineering 114, PP 714 – 721.
- Walker, Peter. (1997). Characteristics of pressed earth blocks on compression. 11th international brick/block masonry conference Tongji University, Shanghai, China.
- Wu, P. Houben, L.J.M & Egyed, Christophe. (2013). Investigation of the Effects of Different Laboratory Compacting Methods on the Properties of Cement Stabilized Materials. Proceedings Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Vol 2.
- Zami, Mohammad Sharif, Lee, Angela, (2010), Contemporary earth construction in urban housing - stabilised or unstabilised?, 5th International Conference on Responsive Manufacturing- Green Manufacturing (ICRM 2010).
- <https://doi.org/10.22034/38.168.61>

