اثر الیاف نخل خرما و آهک به‌عنوان تثبیت کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطیِ با 35 درصد رطوبت)

علیرضا اسماعیلی */ منصور قلعه نوی**

تاریخ دریافت مقاله: 1390/10/23
تاریخ پذیرش مقاله: 1391/02/20

چکیده

در بسیاری از نقاط جهان، خشت به‌عنوان مصالح ساختمانی، در بافت‌های شهری و روستایی، کاربرد فراوان دارد. بنابراین مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد که می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از مصالح خشتی بومی به همراه تثبیت کننده‌های طبیعی می‌تواند اثرات بسیار مهمی را در شکوفایی این روند، از خود به نمایش بگذارد. با توجه به اینکه درصد زیادی از مساحت ایران را مناطق گرم و خشک و کویری تشکیل داده است موضوع حذف خشت و بناهای خشتی روش درست و مناسبی به نظر نمی‌رسد. امروزه راه حل های مناسبی برای استحکام بخشی بناهای خشتی ابداع شده است. با توجه به کمبود منابع انرژی در جهان، خشت می‌تواند برای بسیاری از مناطق مناسب باشد. خشت را می‌توان به سادگی و با قیمت ارزان تولید نمود. از معایب اصلی خشت خام، شکست یک دفعه آن پس از ورود نیروهای فشاری و خمشی است که در هنگام زلزله فرصت کافی، برای نجات جان ساکنین خانه‌های خشتی را فراهم نمی نماید. در حالی که با استفاده از مصالحی نظیر الیاف نخل خرما می‌توان گام های مؤثری را در این زمینه برداشت. آهک نیز می‌تواند زمان نرم شدگی در برابر آب را افزایش دهد. همچنین آهک باعث می‌شود تا در هنگام خشک شدن و انقباض خشت، ترک‌ها کاهش یابد. در این تحقیق، بیش از 350 نمونه مکعبی خشتی با درصدهای مختلفی از آهک و الیاف نخل خرما جهت تقویت خشت تهیه شد. این نمونه‌ها که حاوی خاک شهرستان زاهدان بودند در شرایط محیطی با رطوبت 35 درصد، عمل آوری و در معرض بارهای فشاری و خمشی قرار گرفتند؛ میزان نرم شدگی در آب، زمان نفوذ آب به تمام حجم نمونه خشتی، درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها نیز ثبت شد. پس از پایان آزمایشات مذکور و بررسی نتایج مربوط به مشخصات مکانیکی نمونه‌ها، نمودارهای مقاومتی آن‌ها ترسیم و در نهایت بهینه‌ترین نمونه خشتی تثبیت شده با مصالح طبیعی (بر حسب درصدهای موجود رس و سیلت، ماسه، الیاف نخل خرما و آهک)، انتخاب گردید. نتایج حاصل نشان داد که با وجود 1 درصد الیاف نخل خرما و 15 درصد آهک، برای شرایط محیطی 35 درصد رطوبت، بهترین حالت ممکن برای نمونه‌های خشتی تثبیت شده با آهک و الیاف نخل خرما به‌وجود می‌آید.

واژگان کلیدی: خشت، الیاف نخل خرما، آهک، مشخصات مکانیکی، شرایط رطوبت محیطی.

* کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان. as.torab@yahoo.com
** استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

طرح مسئله

آیین نامه 2800 ایران استفاده از خشت و گل را به‌علت ضعف مصالح و مقاومت اندک آن‌ها در برابر نیروهای ناشی از زلزله، منع کرده و تصریح می‌نماید که باید از احداث بنا با این مصالح خودداری نمود ولی در ادامه بیان می دارد که چنانچه در نواحی دور دست که فراهم آوردن مصالح مقاوم، گران تمام شده و ضرورتاً باید این گونه ساختمان‌ها ساخته شوند، باید مطابق دستور العمل های فنی ویژه‌ای و با به‌کارگیری عناصر مقاوم چوبی، فلزی، بتنی و یا ترکیبی از آن‌ها، طوری تقویت شوند که در برابر زمین لرزه به‌طور نسبی حائز ایمنی گردند. (منابع شماره های 1 و2)

موضوع حذف خشت و بناهای خشتی به‌عنوان ابزار مناسب جهت زندگی در محیط‌های گرم و خشک، برخلاف آنچه که مهندسین سازه با آن موافق هستند، روش درست و مناسبی به نظر نمی آید چون ما در دنیایی زندگی می‌کنیم که روز به روز در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد و می بایست امروزه استحکام بخشی و ساخت بنا های خشتی به روش های نوین عملیاتی شود. در اینجا برای روشن شدن موضوع، به دو نوع نگرش متفاوت درباره خشت و نقش آن به‌عنوان مصالح ساختمانی، اشاره می‌گردد:

1. دیدگاه فنی و ساختمانی: در این دیدگاه خشت، یک ماده ضعیف ساختمانی می باشد و توصیه شده است در حد امکان از احداث بناهای خشتی، اجتناب گردد.

2. دیدگاه تاریخی و سنتی: در این نگرش، خشت به‌عنوان یک کالای فرهنگی معرفی می شود و هر آنچه که مربوط به سرگذشت خشت در بر پایی بناهای کهن تاریخی می‌باشد (و در آیه 38 سوره مبارکه قصص نیز به آن اشاره شده است) ضرورت پیدا می‌نماید. در واقع خشت در این رویکرد، نه تنها به‌عنوان یک مصالح ساختمانی بلکه به‌عنوان یک شی تاریخی، بیانگر هویت و فرهنگ مردم آن منطقه می‌باشد.

با توجه به بیان این دو رویکرد تقریباً متناقض و متضاد، مناسب ترین و مؤثرترین اقدامی که توسط جامعه مهندسین ایرانی می‌تواند در حوزه خشت، عملی گردد، اخذ یک رویکرد دو جانبه است یعنی اصلاح دیدگاه اول مبتنی بر احیای دیدگاه دوم؛ با این اقدام جامع می‌توان، با تقویت بنیان خشت و بنای خشتی از لحاظ سازه‌ای، از حذف خشت از چرخه تحقیقات مهندسی، جلوگیری و شرایط لازم برای اسکان مردم در منازل خشتیِ ایمن را مهیا نمود.

پیشینه

با توجه به پیشرفت های علمی گسترده در زمینه‌های مختلف مهندسی و نظر به کمبود منابع انرژی در جهان، کشورهای پیشرفته صنعتی بر آن شده‌اند تا با نگاه متمرکز به کاهش مصرف انرژی و بهینه نمودن آن، کلیه مطالعات خود را مجدداً برنامه‌ریزی و طرح نمایند؛ در حالی که در کشور ما، پس از بروز این همه تغییرات و پیشرفت در دنیا، هنوز موضوع ساخت و مقاوم سازی خانه‌های خشتی، در فراموشی محض به سر می‌برد. نتیجه این خلاء های پژوهشی، وارد شدن خسارات جبران ناپذیر به انسان های کم درآمد جامعه، در مواقع رخداد زلزله می‌باشد. نکته قابل تأمل اینجاست که پس از وقوع زلزله بم، به خاطر احیای اثر تاریخی ارگ قدیم، اقدامات در حوزه مقاوم سازی خشت و بناهای خشتی در ایران، پس از دوران پهلوی اول، مجدداً جان تازه‌ای به خود گرفته است؛ اما در دنیا درباره بررسی خصوصیات مکانیکی خشتِ تثبیت شده با مصالح مختلف طبیعی و مصنوعی، اقدامات فراوانی صورت پذیرفته است که برخی از نکات

ذیل جزو نتایج پـژوهش‌هـای مهندسـی اخیـر در حـوزه خشت می باشند:

1. افزودن ماسه درشت در خشت، حداکثر تا50 درصد توصیه شده است.

- با افزودن الیاف به خشت، چگالی آن کاهش امـا آب مورد نیاز برای ساخت آن افزایش می یابد.

- نرخ انقباض، با افزایش خاک رس و آب، زیاد امـا بـا افزایش الیاف، کاهش می یابد.

- خشت تقویت شده با الیاف، باعث کاهش نسبی وزن سازه می شود.

- هـر چـه رونـد عمـل آوری خشـت کنـدتر صـورت پذیرد، میزان ترک در خشت نیز کمتـر مـی گـردد. (منبـع شماره 3)

2. افزایش عایق حرارتی خشـت، بـا افـزایش الیـاف و کاهش ماسه، اتفاق خواهد افتاد.

- از آنجا که در فصول گرم سـال، از لحـاظ سـازه‌ای، خنک نگـه داشـتن خانـه هـای دارای سـقف هـای گنبـدی (Dome shap roof) نسبت به خانه‌هـایی کـه دارای سـقف مسطح (roof Flat) می باشند، آسان‌تر صورت مـی‌پـذیرد، بایستی موضوع مقاومت خمشی نمونه‌هـای خشـتی، کـه در گنبـدها و یـا در محـل هـای نعـل درگـاهی و ... اسـتفاده می‌شوند مورد توجه ویژه قرار گیرند. (منـابع شـماره‌هـای 4 و5)

3. در استاندارد ترکیه، حداقل مقاومت فشاری متوسـط بلوک‌های خشتی 981KP (10 kg/cm^2) می‌باشد، و هیچ بلوکی از سه بلوک مورد آزمایش، نبایست مقاومتش کمتر از 784KP (8 kg/cm^2) باشد. (منبع شماره 6)

4. مقاومت فشاری خشت بایـد حـداقل (12 kg/cm^2) باشد. (منبع شماره 7)

5. مقدار درصد الیاف افزوده شده به نمونه‌های خشتی، حداکثر بایستی تا 0/5 درصد وزنی آن‌ها، باشد.

- با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثری همچون کنتـرل انقباض خشک در طرح اختلاط نرمال خشـت، محـدوده میزان رس مصرفی بین 13 تا 17 درصـد بـه‌دسـت آمـده است. (منبع شماره 8)

6. امولسیون قیر را می‌توان برای عدم جذب آب توسط الیافِ درون خشت استفاده نمود.

- خرده سنگ‌های پای بـازالتی، در کنـار خـاک رس و دیگر الیاف، افزایش دهنده عایق صوتیِ خشت می‌باشـند. (منبع شماره 9)

7. دیوار های ساخته شده با خشـت‌هـای تثبیـت شـده آهکی، که توسط دستگاه های پـرس سـاده Cinva Ram تولید شده‌اند، پس از یکسال نگهداری در شـرایط جـوی ناحیه کوماسی کشور غنا، مقاومت فرسایشی بسیار خوبی را نسبت به دیوارهای خشتی معمـولی از خـود بـه جـای گذاشتند. (منبع شماره 8)

8. یکـی از روش‌هـای مطلـوب در بررسـی مقاومـت لرزه‌ای سازه‌های خشـتی قبـل از زلزلـه، اسـتفاده از میـز لرزان برای وارد نمودن ضربه و ارتعـاش بـه نمونـه مـدل شده، می‌باشد.

طرح مسئله: مشخصات خشت و مؤلفه‌های آن

تعریف خشت: خشـت (خشـت خـام)، گـل ورز داده شده‌ای است که سپس شکل گرفته و خشک شده اسـت. خشت در هزاره چهارم قبل از میلاد به‌صورت دست ساز و معمولاً با شـکلهایی نـامنظم ماننـد سـیگار بـرگ تهیـه می‌شده است.

مزایای خشت: تولید آسان وارزان، دارا بودن خاصـیت آکوستیک، قابل بازگشت به طبیعت.

معایب خشت: وزن زیاد، کمی مقاومت خشـک و تـر، ضعف در برابر آب، انقباض خشک، حساسیت نسبت بـه میزان تراکم حین سـاخت و رطوبـت اولیـه، کـم دوام در حمل و نقل و ضعف ناشی از ناهمگونی در ابعاد.

انواع خشت: خشت خام و خشت پخته

شکل خشت: خشت ها معمولاً به اشکال مکعب مستطیلی ساخته می شوند. حجم معمول آن‌ها cm^3 (5 ×20 ×20) می باشد. نصف یک خشت را یک زاو و یا همان آجر گویند. یک چهارم یک خشت را نیز یک نیمه می نامند. (منابع شماره 7 و 10)

آسیب شناسی

نتایج حاصل از برخی بررسی های میدانی نشان داده است که عوامل ذیل را می توان در ردیف موضوعات مرتبط با آسیب شناسی خشت قلمداد نمود:

1. **نرم شدگی در آب**: این حالت با ناتوان شدن خشت بر اثر نفوذ آب، رخ می دهد.

2. **جمع شدگی و یا انقباض**(Shrinkage): این خاصیت که ناشی از فرآیند خشک شدن خشت می باشد معمولاً در خشت های معمولی (همراه با ترک)، به وقوع می پیوندد.

3. **آب شستگی خشت**: این عارضه که معمولاً در پای دیوارها رخ می دهد، ناشی از وجود بافت متخلخل در خشت خصوصاً در سطح بیرونی آن و همچنین ناشی از ضربات وارده مکانیکی توسط رگبار و باران می باشد.

4. **پوسته شدن و پودره شدن:** این رخداد ناشی از پدیده مکث رطوبت در خشت می باشد.

5. **ترک خوردن:** این حالت با تکرار تناوبی "تر و خشک شدن" و یا نوسان زیاد دمای اطراف، همراه با تغییر میزان رطوبت رخ می‌دهد.

6. **از هم پاشیدگی:** این پدیده به‌علت نوسانات حرارت در طی شبانه روز رخ می‌دهد که عموماً نیز در نواحی سایه گیر بنا مشاهده می شود.

7. **شوره زنی:** این مورد ناشی از وجود نمک های محلول در ساختار خشت می باشد که معمولاً زمان قرارگیری خشت در مجاورت رطوبت، محقق می گردد.

8. **خورده شدگی:** این پدیده با نفوذ موریانه در نمونه های خشتی الیاف دار (خصوصاً نمونه‌های دارای الیاف کاه) بروز می‌یابد.

مصالح خشتی طرح

1. خاک (Earth or Soil)

برای انتخاب خاک برتر برای خشت سازی، نیاز به شناسایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه (شهرستان زاهدان) بود که پس از بررسی‌های فراوان و کسب اطلاعات لازم از متخصصین امر، در نهایت، معدن خاک محدوده فرودگاه این شهرستان به‌عنوان بهترین منبع خاکی جهت ساخت نمونه‌های خشتی طرح، انتخاب گردید.

جدول مشخصات خاک طرح

چگالی خاک	حد روانی (%)	نشانه خمیری	نوع دانه بندی U.S.C.S	رس (%)	سیلت (%)	ماسه ریز (%)
2/66	20	-	ML	/19 85	47/95	/32 2

2. ماسه (Sand)

برای ماسهِ استانداردِ مورد استفاده در نمونه‌های خشتی، از مصالح شنی موجود در شهرک صنعتی کامبوزیا، مربوط به منطقه شیر آباد زاهدان، استفاده گردید.

نوع دانه‌بندی ماسه (U.S.C.S)
ML

3. آهک (Lime)

برای آهک طرح نیز از آهک درجه یک صادراتی (تولید کارخانه سیمان مشهد) استفاده گردید. در گزارش مربوط به آنالیز شیمیایی آهک درجه یک صادراتی کارخانه سیمان مشهد که توسط آزمایشگاه تخصصی آن کارخانه ارائه شد ریز درصد ترکیبات موجود درآهک، در تصویر ذیل ثبت گردیده است.

ت1. مشخصات شیمیایی آهک درجه یک (منبع: آزمایشگاه تخصصی کارخانه سیمان مشهد)

Chemical composition of Export Lime (grade1)	
Chemical properties	Content (%)
SiO_2	۰/٤
Al_2O_3	۰/۳۳
Fe_2O_3	۰/۲۸
MgO	۳/۲٦
CaO	۹٥/۲۳
Na_2O	---
K_2O	---
SO_3	---
L.O.I	۰/٥
Totall	۱۰۰

4. الیاف نخل خرما (سیس)

تحقیقات نسبتاً وسیعی در دنیا در رابطه با اثر الیاف گیاهی مختلف از جمله الیاف نارگیل، تفاله نیشکر و خرده چوب و ... بر روی خشت صورت گرفته است، لیکن گزارشی علمی و مبسوط در رابطه با تأثیر الیاف نخل خرما در کنار آهک بر خصوصیات مکانیکی خشت هنوز ارائه نگردیده است. (منبع شماره 11)

یکی از نکات مهم در این بخش، مقاومت بسیار زیاد الیاف نخل خرماست که در برابر نفوذ و خورندگی موریانه از خود نشان می‌دهد.

فرآیند آماده سازی الیاف، برای استفاده در خشت:

الیاف اولیه از نخل جدا شده و پس از گرد گیری لبه‌های ضخیم آن‌ها جدا می‌شود. سپس مقدار الیاف باقی مانده، توسط یک قیچی مخصوص به قسمت‌های کوچکتر تقسیم می‌گردد.

ت2. خردکن برقی، کارگاه ارگ قدیم بم (نگارنده)

این ورقه‌های الیافی بریده شده را که بسیار نرم تر از لایه‌های ضخیم مجاور خود می‌باشند، برای خرد و رشته رشته شدن، به درون خردکن ریخته می‌شوند. ماشین خردکن توسط متصدی مربوطه روشن و شروع به‌کار می‌کند. این وسیله برقی از لحاظ عملکرد شبیه یک چرخ گوشت معمولی عمل می‌کند؛ یعنی پس از گذشت چند دقیقه از شروع کار ماشین، الیاف بهم تنیده قبلی تبدیل به الیاف جدا شده و رشته‌ای می‌شوند که برای استفاده در خشت کاملاً مهیا گشته‌اند. اگر چه دستگاه مذکور از لحاظ کارایی، ساده به نظر می‌رسد اما در واقع، سیستمی است که می‌تواند با کمک یک کارگر ساده، از الیاف معمولی، مصالحی برای تثبیت خشت و خانه‌های خشتی تولید نماید.

آب: به‌علت عدم وجود آب مناسب و استاندارد برای استفاده در پروژه‌های ساختمانی در شهرستان زاهدان، از آب انتقالیِ چاه نیمه سیستان به زاهدان (آب شرب فعلی زاهدان) استفاده شد.

مراحل اجرایی و آزمایشگاهی طرح

1. ساخت قالب‌های خشت زنی و نمونه‌های خشتی بر اساس ابعاد و استانداردهای نمونه‌های فشاری و خمشی خشتی: ابعاد قالب‌های نمونه فشاری و خمشی

به ترتیب (5×5×5) ، (16×4×4) سانتی متر مکعب انتخاب شد. (منبع شماره 6)

2. سنباده زنیِ سطوحِ خشت‌های عمل آوری شده قبل از اعمال نیرو های فشاری

3. شرح کلیه آزمایشات انجام شده طرح بر روی نمونه‌های خشتی

مقاومت فشاری: مقاومت فشاری نمونه‌های خشتی، در دو مقطع 28 و 56 روزگی، تحت شرایط فشاری یکسان با سرعت 4 mm/s آزمایش و ثبت شد. نتایج نهایی مقاومت فشاری هر طرح اختلاط، از روی معدل مقاومت فشاری سه نمونه، به‌دست آمد.

مقاومت خمشی: مقاومت خمشی نمونه‌های خشتی نیز در دو مقطع 28 و 56 روزگی بررسی شد. مقاومت خمشی کلیه نمونه‌های خشتی با رعایت دهانه بار گذاری100 میلی متر، با سرعت اعمال بار 4 mm/s اندازه‌گیری گردید.

وزن واحد حجم خشک نمونه‌های خشتی: وزن واحد حجم خشک نمونه‌های خشتی، در روز هفتم تعیین گردید. بدین صورت که پس از گذشت 7 روز از عمر نمونه‌های مکعبی (5×5×5) سانتی مترمکعبی، نمونه‌ها در دستگاه oven با شرایط دمایی 105 درجه سانتی‌گراد، به مدت 4 ساعت نگهداری شدند. سپس وزن کشی لازم صورت گرفت.

نرم شدگی در آب (softening in water test):
یکی از آزمایشات مهم در حوزه مقاومت خشت، آزمون مقاومت نرم شدگی در برابر آب می‌باشد. تعیین حداقل میزان نرم شدگی در آب بر روی نمونه‌های خشتی (5×5×5) سانتی متر مکعبیِ دارای عمر 28 روزه (که در فضای باز و دور از آفتاب نگهداری می‌شدند) صورت پذیرفت. ظرف مربوط به این آزمایش، به اندازه نصف ارتفاع نمونه خشتی (2/5 cm) از آب پر شد. زمان سپری شده از لحظه قرارگیری نمونه در آب، تا لحظه نرم شدگی، به‌عنوان زمان نرم شدگی ثبت می‌گردید. به عبارتی زمانی را که نمونه، به‌خاطر نفوذ آب، دیگر کاملاً نرم و ناتوان می‌شد و یا در واقع به خاطر به اصطلاح «آب شدن نمونه»، دیگر امکان برداشتنش از درون ظرف آب نبود، تحت عنوان زمان نرم شدگی پذیرفته و ثبت می‌گردید.

با توجه به اینکه برخی از نمونه‌های خیس شده در ظرف آب پس از گذشت حتی یک شبانه روز (1440 دقیقه) همچنان در برابر نفوذ آب مقاومت می‌کردند، ولی برعکس آن‌ها، خیلی از نمونه‌ها در زمان کمتر از 1440 دقیقه در ظرف آب، نرم شده و مقاومت خود را از دست می‌دادند به همین علت، (برای مقایسه نتایج نرم شدگی در آب و ترسیم نمودارهای مربوط به آن‌ها) عدد1440 (دقیقه) به‌عنوان حداکثر بازه زمانیِ نرم شدگی، انتخاب گردید.

اما برای تعدادی از نمونه‌ها، که فقط درصد کمی از حجم شان در آب نرم می‌گردید و در واقع نمونه، مقاومت اصلی خود را همچنان حفظ می‌نمود با توجه به میزان ریزش و در نظر گرفتن عدد 1440 برای یک نمونه کاملاً سالم و ریزش نکرده، نرم شدگی این نوع نمونه‌ها نیز به صورت مقایسه‌ای ثبت می‌شد؛ به عبارتی برای نمونه‌های دارای ریزش جزئی، ملاک نرم شدگی، همان درصد ریزش مصالح نسبت به کل حجم نمونه بود.

با در نظر گرفتن همه حالت‌های فوق، زمان نرم شدگی (متناسب با نوع مقاومت نمونه در برابر نفوذ آب) اندازه‌گیری و ثبت می شد.

تجزیه و تحلیل و ترسیم نمودارهای طرح

نتایج مربوط به مقاومت فشاری، خمشی، نرم شدگی در آب و زمان نفوذ آب به تمام حجم نمونه‌های خشتی در تصاویر3و4و5و6، برای انتخاب بهترین نمونه تثبیت شده با آهک و الیاف نخل خرما آورده شده است. همچنین درصد رطوبت موجود در نمونه‌های تازه ساخته شده (رطوبت بهینه) و وزن واحد حجم خشک آن‌ها در جداول بعدی (بر حسب درصد مصالح مصرفی موجود در خشت)، همراه با کد اختصاری تعریف شده طرح اختلاط، ثبت شده است.

علائم اختصاری انتخاب شده و تعاریف مربوط برای طرح اختلاط نمونه‌های خشتی

Sample : S
dry : d
Fibers : F
Lime : L
Clay & Silt : C
dry samples : S_d
Earth (or Soil) : E
i : درصد الیاف (1و0)
j : درصد آهک (20و15و10و7و3و1)

مثال برای کد طرح اختلاط: منظور از «$S_{d\ F0\ L0\ C\ 60}$» همان نمونه خشتی (Sample) نگهداری شده در فضای تقریباً خشک (35 درصد رطوبت = dry) است که فاقد الیاف نخل خرما (0% = Fibers)، فاقد آهک (0% = Lime) و دارای60% رس و سیلت (60% = Clay & Silt) می‌باشد که با جمع درصدهای فوق و کسر آن از عدد 100، مقدار ماسه استاندارد موجود در آن نمونه نیز (40% = Sand) معلوم می‌شود.

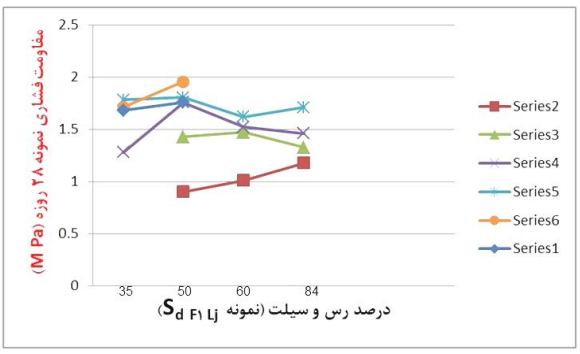
نمودارهای نهایی انتخاب شده، مربوط به کلیه ترکیبات خشتی دارای تثبیت کننده‌های طبیعی الیاف نخل خرما و آهک

نمودارهای ذیل چگونگی عملکرد خشت‌های تثبیت شده با «1% الیاف نخل خرما، و درصدهای متفاوت آهک» را در حالت S_d (با رنگ‌بندی‌های ذیل) نمایش می‌دهند:

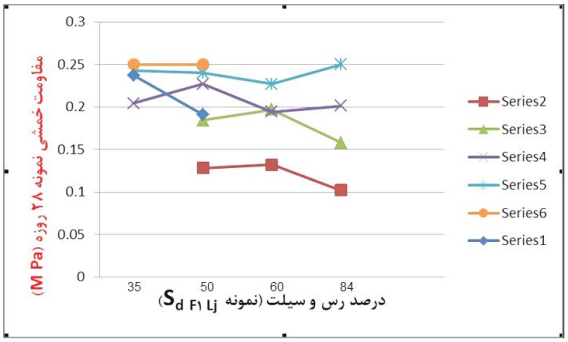
- خطوط با رنگ قرمز نشانگر عملکرد خشت‌های تثبیت شده با الیاف و 1% درصد آهک: serie s_2
- خطوط با رنگ سبز نشانگر عملکرد خشت‌های تثبیت شده با الیاف و 3% درصد آهک: serie s_3
- خطوط با رنگ بنفش نشانگر عملکرد خشت‌های تثبیت شده با الیاف و 7% درصد آهک: serie s_4
- خطوط با رنگ آبی کم نشانگر عملکرد خشت‌های تثبیت شده با الیاف و10% درصد آهک: serie s_5
- خطوط با رنگ نارنجی نشانگر عملکرد خشت‌های تثبیت شده با الیاف و 15% درصد آهک: serie s_6
- خطوط با رنگ آبی تیره نشانگر عملکرد خشت‌های تثبیت شده با الیاف و 20% درصد آهک: serie s_1

نمودارهای نهایی S_d، مربوط به خشت‌های الیاف‌دار و آهک دار با کد اختلاط ($S_{d\ F1\ Lj}$) :
(j =1و3و7و10و15و20)

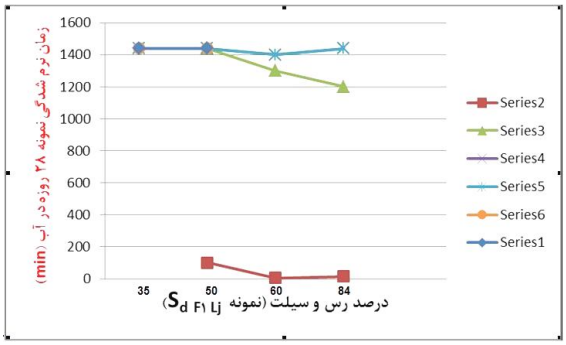
ت3. نتایج مقاومت فشاری (به‌عنوان مهم‌ترین نتایج آزمایشگاهی برای انتخاب خشت برتر) برای خشتی های با کد اختلاط ($S_{d\ F1\ Lj}$)



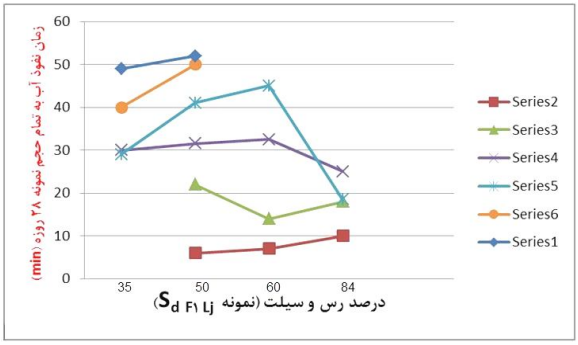
ت4. نتایج مقاومت خمشی (به‌عنوان دومین مؤلفه انتخاب خشت برتر)
برای خشت های با کد اختلاط ($S_{d\ F1\ Lj}$)



ت5. نتایج مقاومت نرم شدگی در آب (به‌عنوان سومین مؤلفه انتخاب خشت برتر)
برای خشت‌های با کد اختلاط ($S_{d\ F1\ Lj}$)



ت6. نتایج زمان نفوذ آب به کل نمونه های خشتیِ (به عنوان چهارمین مؤلفه انتخاب خشت برتر)
برای خشت های با کد اختلاط ($S_{d\ F1\ Lj}$)



نتایج مربوط به وزن واحد حجم خشک نمونه و درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خشتی تثبیت شده با 15% آهک و 1% الیاف نخل خرما و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های معمولی و مرسوم

نتایج مربوط به درصد رطوبت موجود در نمونه‌های تازه ساخته شده (رطوبت بهینه) و همچنین وزن واحد حجم خشک نمونه در روز هفتم، در جداول ذیل، بر حسب درصد مصالح مصرفی موجود در خشت با کد اختصاری تعریف شده برای آن طرح اختلاط، ثبت شده است.

ت7. درصد رطوبت و وزن واحد حجم نمونه‌های تثبیت شده با 1% الیاف نخل خرما و 15% آهک.

کد اختلاط	درصد ماسه	درصد رس و سیلت	درصد آهک	درصد الیاف خرما	درصد رطوبت نمونه موقع ساخت (رطوبت بهینه)	وزن واحد حجم خشک نمونه (روزهفتم) (gr/cm^3)
$S_{d\ F1\ L15\ C35}$	49	35	15	1	18	1/867
$S_{d\ F1\ L10\ C50}$	34	50	10	1	21	1/844

ت8. درصد رطوبت و وزن واحد حجم نمونه‌های خشتی معمولی و مرسوم (فاقد آهک، و فاقد الیاف).

کد اختلاط	درصد ماسه	درصد رس و سیلت	درصد آهک	درصد الیاف خرما	درصد رطوبت نمونه موقع ساخت (رطوبت)	وزن واحد حجم خشک نمونه (روز هفتم) (gr/cm^3)
$S_{d\ F0\ L0\ C35}$	65	35	0	0	12/5	2/135
$S_{d\ F0\ L0\ C50}$	50	50	0	0	13	2/131

نتیجه

با توجه به آزمایشات صورت پذیرفته و نمودارهای مربوطه، نتایج ذیل به‌عنوان نتایج نهایی پژوهش به دست آمد:
بهترین نمونه خشتی با مصالح مورد نظر، ترکیب خشتی($S_{d\ F1\ L15\ C50}$) به‌دست آمد. به عبارتی با استفاده از 1% الیاف نخل خرما، 15% آهک و50% رس و سیلت

بهترین نوع مقاومت در شرایط S_d (یعنی در شرایط محیطی با رطوبت 35 درصد) به وقوع می‌پیوست. مقدار ماسه مطلوب طرح در هر خشت نیز، 34% کل مصالح خشک می‌باشد.

نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن ترکیب برتر ($S_{d\ F1\ L15\ C50}$)، مقدار مقاومت فشاری متوسط سه نمونه خشتی 28 روزه آن، 1/955 مگا پاسکال می‌باشد؛ در حالی که حداقل اعلام شده در برخی استانداردها، مانند استاندارد ترکیه، 1 مگا پاسکال اعلام شده است لذا می‌توان گفت مهم‌ترین خصوصیت خشت یعنی مقاومت فشاری آن برای حالت منتخب، حدود دو برابر حداقل مقاومت استاندارد بوده و تا حد مطلوبی آن را بهبود بخشیده است. (منبع شماره 6). در اینجا مقاومت فشاری نمونه‌های 56 روزه با ترکیب ($S_{d\ F1\ L15\ C50}$) حدود 2/36 مگا پاسکال و مقاومت خمشی نمونه‌های 28 و 56 روزه به ترتیب 0/25 و 0/303 مگا پاسکال به‌دست آمد.

نتایج زمان نفوذ آب به تمام حجم نمونه با ترکیب خشتی ($S_{d\ F1\ L15\ C50}$) 50 دقیقه می‌باشد.

مقاومت نرم شدگی نمونه خشتی نیز در برابر آب، حداقل 1440 دقیقه ثبت گردید، که در واقع بسیار رضایت بخش می‌باشند. بهترین اثر وجود آهک در نمونه‌های خشتی را می‌توان در افزایش چشمگیر مقاومت خشت‌ها در برابر نفوذ آب (مقاومت نرم شدگی در آب) دانست. درصد رطوبت نمونه مربوط به زمان ساخت این نمونه‌ها 21 و وزن واحد حجم خشک نمونه نیز 1/844 گرم بر سانتی متر مکعب به‌دست آمد.

بهترین حالت استفاده از آهک برای ساخت خشت آهک دار، استفاده از آهکی است که به مدت 24 ساعت، در آب خیسانده شده است. (شیره آهک یک روزه)

نمونه‌های الیاف دار، تحت آزمون خمش، در لحظه شکست، سریعاً دو نیم شده، اما نمونه‌های الیاف دار، ضمن تلاش فراوان برای عدم دو نیم شدن خشت در لحظه شکست، فقط به‌وجود آورنده یک ترک ریز، یا ترک مویی (در وسط طول نمونه)، در آن لحظه می‌شوند. لذا استفاده از نمونه‌های الیاف دار، قطعاً بهتر از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد به عبارتی وجود الیاف نخل خرما در خشت، باعث تأخیر در زمان شکست و خرد شدن و ریزش خشت می‌شود و با این کار، امکان فرار ساکنین خانه‌های خشتی در زمان وقوع زلزله را می‌توانند فراهم نمایند.

پیشنهادها

با توجه به اینکه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن یکسری پژوهش در زمینه خشت‌های تثبیت شده انجام داده است (به‌عنوان مثال وجود حدود 7 درصد آهک را برای خشت‌های مناطق مرطوب شمال کشور مطلوب دانسته) اما برای مناطق مرطوب و گرم مانند چابهار هنوز نتایجی ثبت نشده، لذا با توجه به تنوع آب و هوایی در سطح کشور، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد. از طرفی، با توجه به اینکه بررسی رفتار لرزه‌ای خانه‌های خشتی گلی، یکی از موارد ضروری در بحث تحقیقات مهندسی زلزله می‌باشد، برای پیش بینی رفتار این بناها در برابر زمین لرزه، از مدل سازی به روش اجزا محدود می‌توان استفاده نمود. این مدلسازی عددی می‌تواند بر اساس خواص و شکل ساخت این نوع خانه‌ها انجام پذیرد و در آن مواردی همچون ابعاد متداول ساخت، ابعاد بلوک‌های خشتی، نحوه چیدمان و اثر ملات، مورد نظر قرار گیرد. تحلیل عددی آن نیز توسط نرم افزار اجزا محدود ABAQUS قابل انجام می‌باشد. نتایج این بررسی‌ها در ابتدای امر، چگونگی تخریب و روند فروپاشی را به نمایش می‌گذارد؛ آنگاه با این الگو می‌توان به موضوع مقاوم سازی و کاهش خسارات بناهای خشتی ورود نمود. همچنین می‌توان با استفاده از

روش‌های نوین و پژوهش‌های بیشتر، انعطاف قالب‌های خشتی الیاف دار را به سازه‌های خشتی و تقویت مقاومتشان در برابر بارهای جانبی، تعمیم داد. در صورت تحقق این هدف، می‌توان سازه‌های خشتی را با هزینه کم و با مصالح هم سنخ با خشت، در برابر بارهای جانبی زلزله تقویت نمود و از اتفاق وحشتناک و مرگ و میر فراوان، نظیر آنچه در سال 1382 در بم افتاد، تا حد زیادی کاست و به عبارت دیگر اطمینان خاطر و امنیت برای زندگی در منازل خشتی رقم زد. البته بایستی از تبلیغات گسترده‌ای که اخیراً با شعار کاهش مشکل مسکن، در راستای صنعتی شدن ساختمان و اجرای ساختمان های پیش ساخته در کشور آغاز گردیده، و در چند سال آینده بافت مناطق شهری و روستایی را به چالش جدی خواهد کشید، جلوگیری نمود؛ در این راستا می‌توان با مطالعات و تحقیقات مداوم مهندسین سازه و همچنین تبلیغات فراوان رسانه‌ای، اقدام لازم جهت حفظ میراث گذشتگان و به روز رسانی و تقویت مصالح ساختمانی سنتی و بومی را عملی نمود و از هیچ کوششی که برای تقویت سازه‌های سنتی و فرهنگ ساختمان سازی ایرانی- اسلامی، لازم است فرو گذار ننمود. با این کار می‌توان تعداد بندهای آیین نامه‌ای مختصر و محتاطانه موجود در مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان را گسترده‌تر و کاربردی نمود. (منابع شماره‌های 12 و 13). اگر چه تحقیقات فراوانی نیز تاکنون در بحث مقاوم‌سازی بناهای سنتی در ترکیه، پرو، مکزیک و ... صورت پذیرفته است که منجر به تدوین آئین نامه متداول در آن کشورها شده است. (منابع شماره‌های 9 و 14)

منابع

- اسماعیلی، علیرضا. (1388)، سمینار کارشناسی ارشد عمران- سازه، «بررسی بهبود خصوصیات خشت و استحکام بنای خشتی» (مطالعات علمی چندین ساله، و مصاحبه‌های صورت پذیرفته با بسیاری از متخصصین حوزه مرمت).

- «آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد 2800 ایران». (1384)، ویرایش چهارم.

- دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان. (1387)، «مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث هشتم، طرح و اجرای ساختمان های با مصالح بنایی»، چاپ چهارم، ص 53

- M.J.Lant. (1980م)، «خشت های تثبیت شده برای ساختمان»، فروز روشن بین، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ترجمه مقالات علمی و فنی، شماره 13

- نرماشیری، کامبیز؛ سهرابی، محمدرضا؛ رئوفی، فردین؛ (1385)، مقاله «اثرات اختلاط برگ نخل خرما بر روی مقاومت فشاری بتن»، دانشگاه سیستان و بلوچستان

- پرهیزکار، طیبه؛ ماجدی اردکانی، محمدحسین. (1381)، «بررسی مشکلات مصالح به کار رفته در ساخت و ساز های منطقه زلزله چنگوره - آوج»، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، سمینار درس-هایی از زلزله چنگوره- آوج

- دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان. (1387)، «مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم، بارهای وارد برساختمان»، چاپ چهارم، ص 29 و 30

- باسلیقه، فرنوش. (1385)، مقاله «ارائه راه حل‌های بهسازی لرزه-ای ساختمان‌های خشتی با استفاده از مصالح موجود در ایران»، دانشگاه صنعتی شاهرود

- Enrico Quagliarini , Stefano Lenci. (2010) "The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks" , Journal of Cultural Heritage, vol.11 , pp.309-314

- Taha Ashour, Hansjorg Wieland, Heiko Georg, Franz-Josef Bockisch, Wei Wue. (2010) "The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings" , Materials and Design , vol.31 , pp.4576-4585

- Arvind Chel, G.N.Tiwari. (2009) "Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth to air heat exchanger integrated with adobe building for New Delhi composite climate" , Energy and Buildings, vol.41 , pp.56-66

The using of waste "- Nurhayat Degirmenci. (2008) phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization" , Construction and Building Materials , vol.22 , pp.1220-1224

- Sukru Yetgin, Ozlem Cavdar, Ahmet Cavdar. (2008) "The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes" , Construction and Building Materials, vol.22 , pp.222-227

- Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Mehmet Nuri Bodur, Erhan Akca, Selim Kapur. (2007), "Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials" , Construction and Building Materials, vol.21 , pp.901-906