

## ابنیه خشتی مقاوم در برابر زلزله\*

دکتر شوکا خوشبخت بهرمانی\*\*، دکتر منصور سپهری مقدم\*\*\*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۸۹/۰۸/۱۷

### چکیده

امروزه بیش از یک سوم مردم جهان در ابنیه خاکی زندگی می کنند. آیین نامه های موجود در ایران استفاده از خشت را علی رغم قابلیت های بسیار محدود کرده است. این در شرایطی است که امکان ساخت بنا با اسکلت فولادی یا بتنی برای بسیاری افراد وجود ندارد. در صورتی که مقاومت کششی ابنیه خشتی تقویت گردد، استفاده عمومی در ساخت این گونه ابنیه مقدور خواهد گردید. در غالب نمونه های باقیمانده از معماری گذشته ایران به کمک تبدیل نیروهای کششی به فشاری این ضعف برطرف شده است. نتایج پژوهش نشان می دهد همنشینی خشت، سیمان و میل گرد جهت تثبیت ساختمان های خشتی مناسب است و اگرچه دیوار خشت فشرده تثبیت شده به لحاظ مقاومت و میزان تغییر مکان رکوردها، واجد امتیاز کمتری از دیوار بتنی است، ولی انطباق لازم با آیین نامه های موجود را دارا است. همچنین این سامانه واجد کارایی ساختمان های آجری با کلاف فولادی نیز می باشد.

### واژه های کلیدی

معماری خاکی، خشت، توسعه پایدار، بلوک خشتی فشرده تثبیت شده، زلزله

\* مقاله برگرفته از رساله دکتری به راهنمایی دکتر منصور سپهری مقدم و دکتر حمزه شکیب با عنوان؛ معماری با خشت، راهبردهای ساخت ابنیه خشتی مقاوم در برابر زلزله، است که در دانشکده هنر و معماری واحد علوم و تحقیقات ارائه گردیده است.

\*\* دانش آموخته دوره دکتری معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (مسئول مکاتبات)

Email: shooka.khoshbakht@gmail.com

Email: dr\_m\_sepehri @iust.ac.ir

\*\*\* استادیار دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

عظیم میسر نیست.

آیین نامه‌ها و ضوابط موجود در ایران با حذف صورت مساله، استفاده از خشت را علی‌رغم قابلیت‌های بسیار، محدود نموده است. این در صورتی است که امکان ساخت بنا با اسکلت فولادی و یا بتنی برای بسیاری افراد به لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نیست؛ امروزه کشورهای توسعه یافته استفاده از مصالح صنعتی را به دلیل آلودگی محیط محدود کرده‌اند، استانداردهای موجود در ایران آن را تشویق می‌نماید (خوشبخت بهرمانی، ۱۳۸۸).

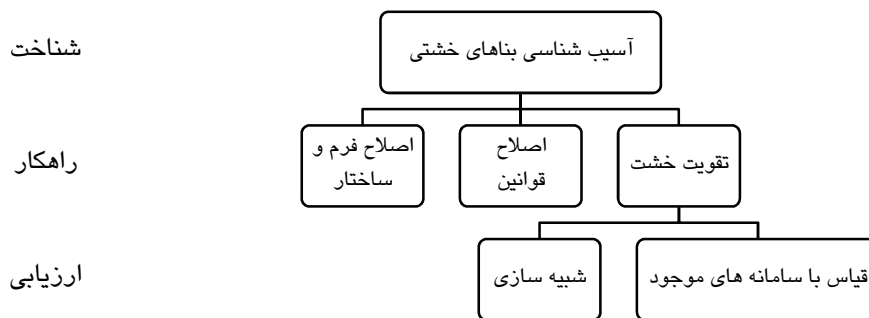
روش‌های مختلفی برای باسازی و ساخت ابنیه خشتی در دنیا پیشنهاد شده است که با توجه به شرایط بومی مناطق بوده است و می‌توان به عنوان نمونه به مطالعات و ساخت ابنیه خشتی در اوگاندا (CRATerre Editions, 2005) اسکاتلند (Little and Morton, 2001): استرالیا (Heathcote and Moor, 2002): پرو (Torrelva and Villa Garcia, 2002) و عربستان سعودی (Facey, 1998) اشاره کرد. شرایط زلزله خیزی و اقلیمی ایران و روش‌های مرسوم ساخت و دسترسی به مصالح سبب گردید سامانه متشکل از دیوار با بلوک خشتی فشرده تثبیت شده پیشنهاد گردد. برای این منظور سامانه پیشنهادی با نرم افزارهای محاسباتی شبیه‌سازی و با دیوارهای مشابه با بلوک خشتی ساده و آجری واجد کلاف قائم و عمودی مقایسه گردید (شکل ۱).

### ضرورت موضوع

واضح است ابنیه خاکی به استواری ابنیه ساخته شده از سنگ یا آجرهای رسی پخته، در برابر شرایط جوی مقاوم نمی‌باشد ولی درس‌های فراوانی از ساختمان‌های خاکی سنتی وجود دارد که می‌تواند الهام بخش معماری خاکی جدید بومی گردد. بسیاری از ابنیه مربوط به دوران قبل از اسلام و اوایل دوره اسلامی با خشت بنا شده بودند مانند زیگورات چغازنبیل در خوزستان که متعلق به حدود ۱۲۵۰

امروزه بیش از یک سوم مردم جهان در ساختمان‌هایی زندگی می‌کنند که از مصالح خاکی ساخته شده است. در کشور انگلستان بیش از نیم میلیون نفر در خانه‌هایی سنتی و یا مدرن با مصالح خاکی ساکن هستند (Little and Morton, 2001). بیش از بیست میلیون نفر از ساکنین روستاها در ایران، در خانه‌های روستایی ساخته شده از مصالح بنایی زندگی می‌کنند. اکثر قریب به اتفاق این گونه خانه‌ها بدون هیچ گونه تمهیدی برای تحمل نیروی جانبی و توسط خود اهالی ساخته می‌شود. رفتار این سازه‌ها کاملاً ترد و شکست آن‌ها در اثر بارهای جانبی زلزله‌آنی است و فرصت عکس‌العمل را از ساکنین در زمان زلزله سلب می‌نماید (تابش‌پور، ۱۳۸۶). به عنوان مثال قسمت عمده تلفات زلزله‌های اخیر نظیر بم با بیش از چهل هزار کشته و زرندها حدود ششصد و پنجاه کشته ناشی از این موضوع بوده است (دهقان بنادکی، ۱۳۸۷). در خارج از ایران هم، زلزله سال ۲۰۰۱ کشور السالوادور، نزدیک به ۲۰۰ هزار خانه خشتی را تخریب نمود و جان ۱۱۰۰ نفر را گرفت و یک میلیون نفر را بی‌خانمان کرد. در همان سال در جنوب پرو زلزله‌ای دیگر سبب تخریب کامل ۲۵۰۰۰ واحد مسکونی با مصالح خاکی و مرگ ۸۱ نفر شد (تابش‌پور و فرهنگ‌فر، ۱۳۸۴).

ساخت ابنیه خشتی سبب کاهش هزینه اجرا و کاهش آلودگی محیط (در عدم استفاده از مصالح صنعتی)، نسبت به سایر مصالح بنایی می‌گردد و ضعف اصلی آن مقاومت کم در برابر نیروهای جانبی زلزله است. در غالب نمونه‌های باقی مانده از معماری گذشته ایران که در مقیاس بناهای عمومی است، به کمک تبدیل نیروهای کششی به فشاری این ضعف برطرف شده است. وجود قوس‌ها و طاق‌های عظیم شاهد این تلاش است. اما در معماری مسکونی با مقیاس کوچک و به صورت مدولار، که مناسب اسکان خانواده‌ها باشد، امکان ساخت طاق و قوس



شکل ۱. نمودار کلی تحقیق

آئین نامه های معتبر دیگر ارجاع داده است (رضاوندی و جناب زاده، ۱۳۸۲). از لحاظ ساختار معماری، آئین نامه مقاوم سازی ساختمان ها در برابر زلزله اشکال ویژه ای از ساختمان را مد نظر قرار داده است، اما ضوابط موجود در این آئین نامه برای ساختمان های روستایی و گونه های موجود کافی نیست. (ثقفی، ۱۳۸۵) تنها در آیین نامه طراحی ساختمان های مقاوم در برابر زلزله (در بخش ۲-۲ آیین نامه ۲۸۰۰)، احداث ساختمان های سنتی که با گل و خشت ساخته می شوند را به علت ضعف مصالح و مقاومت محدود آن در مقابل لرزه محدود نموده است و به طور استثنا ایجاد این گونه ساختمان ها تنها را در نواحی دوردست و مطابق دستورالعمل فنی ویژه ای مجاز شمرده است. همچنین در بخش ۱۴-۱۰ با عنوان "اجرای دیوارهای سازه ای" آیین نامه ۲۸۰۰ "طراحی ساختمان در برابر زلزله" ذکر شده است: "در ساختمان های با مصالح بنایی استفاده از ملات گل و یا گل آهک مجاز نمی باشد." همچنین در این آیین نامه برای "تدوین و ترویج ضوابط و دستورالعمل های فنی ویژه با به کارگیری عناصر مقاوم بتنی" به وجود نداشتن آیین نامه خاص در این رابطه اشاره نموده است و بر اهمیت و ضرورت تدوین آن تاکید نموده است. "در مبحث هشتم مقررات ملی به عنوان ضوابط و مقررات مربوط به ساختمان های بنایی در ایران احداث ساختمان های خشتی بدون کلاف ممنوع شده و در مورد بقیه ساختمان های خشتی که در مقابل نیروهای قائم یکپارچگی نسبی اجزا خود را حفظ نمایند و واجد حداقل مقاومت لازم در مقابل لرزه های خفیف و متوسط باشند، اجرای آنها را بلامانع دانسته است" (ازدر و مهرنهاد، ۱۳۸۷). با مقایسه ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ با ضوابط تجربی آئین نامه های سایر کشورها (جدول ۱)، مشاهده می شود ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ در برخی موارد فاقد شرایط ایمنی است. همچنین تأکید آئین نامه ۲۸۰۰ در مورد ایجاد ساختمان های

سال قبل از میلاد است (طیبسی، ۱۳۸۴). البته باید متذکر شد، عمر ساختمان های خاکی تنها به مصالح و شیوه ساخت بستگی ندارد بلکه کیفیت کار کارگران و طراحی مناسب منطبق با بستر طرح نیز تاثیر بسیاری بر عمر ساختمان دارد.

شیوه های سنتی ساختمان های خاکی می تواند با ساختارهای مدرن به روز گردد. ساختمان هایی که در ساخت آنها از مصالح طبیعی همچون خاک، نی، چوب و سنگ استفاده شده است کیفیت پایداری دارند که از مزایای آن ها می توان در ساخت های جدید استفاده کرد. به ویژه فناپذیری مصالح خاکی امکان استفاده مجدد از مصالح را به صورت ایمن و بدون آلودگی و با حداقل مصرف انرژی فراهم می نماید (Little and Morton, 2001).

با توجه به این که در ساختمان های خاکی با اجرای سنتی امکان اجرای بازشوه های بزرگ و متعدد و ساخت چند طبقه وجود ندارد، محدودیت هایی برای طراحی که تمایل دارند از پلان و نمای آزاد استفاده نمایند و یا بناهای چند طبقه بسازند، به وجود می آید، از این رو خاک و گل محبوبیت خود را به عنوان مصالح ساختمانی در این رویکردها از دست داده است.

در روش های سنتی اگر چه استحکام مصالح نقش به سزایی داشته ولی شکل و فرم قرارگیری آن ها نیز بی تاثیر نبوده است (مجبایی، ۱۳۸۴). مهم ترین نقاط ضعف خشت در مقاومت پایین آن در مقابل باران و رطوبت بالارونده؛ انقباض سطحی؛ باد و طوفان و عوامل زیستی دسته بندی می شود (کی نژاد، ۱۳۸۴).

بر خلاف گستردگی سازه های بنایی، برنامه طراحی برای این گونه از سازه ها در نظر گرفته نشده است و فقط به صورت کلی به اجرای کلاف های قائم و افقی برای کاهش خطر زلزله بسنده شده است، و روش های طراحی و محاسباتی؛ این دسته از ساختمان ها را به

جدول ۱. استاندارد موجود ساخت ابنیه خشتی در برخی کشورها

آمریکا	مسلح کردن فلزی عمودی دیوارها در مناطقی که واجد خطر زلزله بالای یک هستند ( تقریباً کل آمریکا را در برمی گیرد). توصیه شده است (Moquin, 2000).
مکزیک	قوانین، ساخت بناهای خشتی در مناطق با سابقه تاریخی توصیه نموده است و در بازنگری های اخیر، ضرورت استفاده از مقطع فلزی عمودی حذف شده است (Moquin, 2000).
آلمان	پس از خرابی های جنگ جهانی دوم ۴۰۰۰۰ خانه خشتی ساخته شد اما به سال ۱۹۷۰ دولت آلمان ساخت خانه های خشتی را ممنوع نمود. با افزایش نگرانی ها جهت آلودگی محیط زیست و افزایش توجه به معماری پایدار مجدداً قوانین آلمان به ساخت بناهای خشتی تمایل یافته است (Moquin, 2000).
افغانستان	به سال ۲۰۰۳ میلادی به علت عدم وجود آیین نامه ای مشخص، مرکز توسعه منطقه ای سازمان ملل با همکاری وزارت توسعه شهری افغانستان به تدوین راهنمایی برای طراحی و ساخت سازه های خشتی مقاوم در برابر زلزله پرداخت (پارسا et al, ۱۳۸۶).

## تقویت ابنیه خشتی با سامانه دیوار با بلوک خشتی فشرده

تقویت ابنیه خشتی در سه حوزه اصلاح ساختار، سازه بنا و افزایش مقاومت خشت، امکان پذیر است. اصلاح ساختار با افزایش کیفیت مصالح، افزایش مقاومت اتصال دیوارها در کنج ها، سبک کردن ساختمان، محکم کردن تکیه گاه بنا بر روی زمین و تقویت سازه ایجاد می گردد (جهان آبادیان، ۱۳۸۴).

در ساختمان های خشتی، دیوار نقش اساسی در رفتار لرزه ای سامانه سازه ایفا می کند (محمدی و علیزاده تقی آباد، ۱۳۸۷). در تقویت سازه بنا، بارهای متمرکز بر دیوارها و یا بخشی از آن، (به عنوان مثال با استفاده از نعل درگاه های بالای بازشوها و یا با به کارگیری صفحات زیر سری برای توزیع بار)، به حداقل رسانده شود. دیوار بندی باید ساده و با شکست های محدود صورت گیرد (لانت، ۱۳۸۲). برای افزایش مقاومت خشت به روش مکانیکی، با افزایش فشار و تراکم و بدون استفاده از تثبیت کننده ها دانه های خاک خشت را متراکم تر نموده و بلوکی با تراکم متوسط و موئینگی مناسب به وجود آورد. در روش فیزیکی با افزایش تثبیت کننده خشتی مناسب و با ایجاد شبکه محدود کننده، حرکت خشت تقویت می گردد (کی نژاد، ۱۳۸۴).

با توجه به راهکارهای تقویت ابنیه خشتی و استانداردهای موجود در ایران، همچون آیین نامه ۲۸۰۰، مبحث هشتم ضوابط ساخت مصالح بنایی و همچنین مطالعات موجود در حوزه تعیین خشت بهینه در مرمت ارگ بم، زیگورات چغازنبیل استانداردهای موجود خارجی متمرکز بر ساخت بلوک خشتی تثبیت شده، شامل استانداردهای جی. اتی. زد<sup>۱</sup> در آلمان، موسسه تحقیقاتی آروبل در هندوستان، موسسه تحقیقاتی کراتر در فرانسه، استاندارد واحد ساختمان در آمریکا، طرح بلوک خشتی فشرده تثبیت شده با مشخصات زیر پیشنهاد گردیده است (خوشبخت بهرمانی، ۱۳۸۸) (جدول ۲).

جهت افزایش مقاومت کششی سامانه با بلوک خشتی فشرده، سازه ای خطی نیز مورد نیاز است. از این رو در درون بلوک های خشتی منافذی برای عبور میلگرد تعبیه شده است. این میلگردها به کمک مقدار محدودی سیمان در جایگاه خود درون حفره ها ثابت خواهند شد. خاموت های موجود در فاصله بین بلوک های خشتی سبب جلوگیری از تغییر مکان میلگردهای قائم در مقابل نیروی زلزله خواهد شد. ابعاد هسته مرکزی این شناژ، دو مکعب با قاعده ۲۰×۵ سانتی متر است. شناژ افقی خشتی که با میلگرد و سیمان تقویت شده است، همچون یک کلاف افقی دیوار را محافظت خواهد نمود. مقطع شناژ افقی خشتی به صورت U شکل است و سطح میانی آن با بتن و میلگرد تقویت

نوساز است. پیشنهادات این آئین نامه در مقاوم سازی ساختمان های خشتی و آجری غیرمسلح موجود در بافت های قدیمی شهرها تقریباً قابل اجراء نمی باشد و یا بسیار هزینه بر و از لحاظ اجرائی مشکل و غیرکارا خواهد بود (رازانی، ۱۳۸۴). با وجود امتیازات بسیار در فصل سوم استاندارد ۲۸۰۰، نواقص متعددی موجود است (سرلک، ۱۳۸۵) که باید ملحوظ گردد و می توان به محدودیت تعداد طبقات و محدودیت نسبت ارتفاع یا طول به ضخامت بین تکیه گاه ها اشاره نمود (طارق وارشاد، ۱۳۸۶).

## هدف، سوال و فرضیه تمقیق

پژوهش درصدد دستیابی به استعدادهای نهانی مصالح جدید استخراج شده از خاک است و همچنین بررسی تاثیر استفاده از آن در محیط طبیعی مدنظر بوده است. هدف نهایی دست یافتن به شاخصه هایی بوده که با ارائه نمونه خشتی، در معماری امروزی راهگشایی جهت معضلات کاهش خطرلر ناشی از زلزله، گرانی مسکن، اشتغال زایی و کاهش مصرف انرژی باشد. در حقیقت وسعت بخشیدن به کاربرد گل به صورت خام به عنوان یک مصالح ساختمانی اصلی از نتایج پژوهش بوده است.

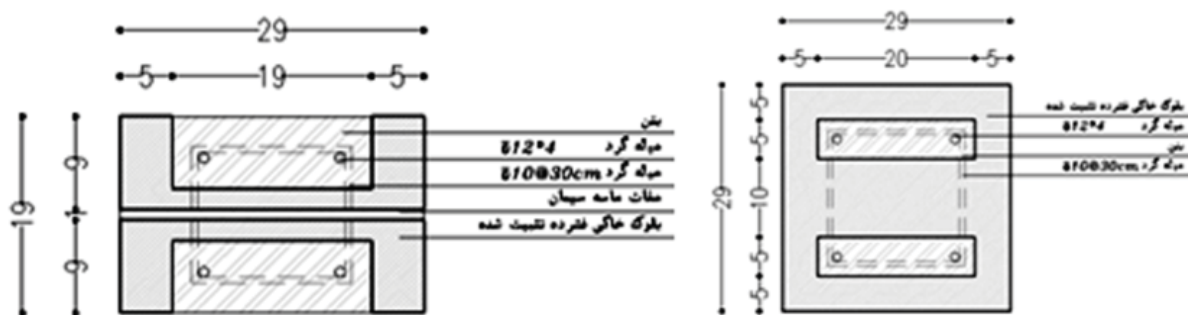
سوالات مطروحه به شرح زیر است:

- آیا ضوابط و آیین نامه های موجود پاسخگویی مناسب برای معماری خشت را می توان مقاومت خشت را در حد مصالح دیگر بالا برد؟ آیا می باید خشت را با مصالح دیگری جایگزین و یا ترکیب نمود؟  
- رفتار لرزه ای ابنیه خشتی در برابر زلزله چگونه است؟ و چگونه می توان آن را ارتقاء داد؟

پیش فرض پژوهش بر مبنای دوام ساختمان های خشتی طی چندین هزارسال بوده است. به نظر می رسد با یافتن راهکارهای جدید در جهت تثبیت، خشت می تواند همچنان به عنوان یک ماده ساختمانی پایدار مورد توجه قرار گیرد. زلزله خیز بودن ایران نیازمند تدوین قوانین و اصولی است که مقاومت بنای خشتی در برابر زلزله و سایر نیروها تامین گردد. اشاره مشخص آیین نامه ۲۸۰۰ برای «تدوین و ترویج ضوابط و دستورالعمل های فنی ویژه با به کارگیری عناصر مقاوم بتنی» روندی اصولی برای ارائه نمونه کاربردی از ساخت ابنیه خشتی را متذکر می گردد. به نظر می رسد در این راستا باید، " رفتار لرزه ای ابنیه خشتی " مورد مطالعه قرار گیرد؛ " الزامات موجود طراحی و سازه ابنیه خشتی " تحلیل شود؛ و " راهبردهای اجرایی جهت ساخت ابنیه خشتی مقاوم در برابر زلزله " ارائه گردد.

جدول ۲. مشخصات خاک مورد استفاده در بلوک خاکی فشرده پیشنهادی بر مبنای شاخص های موسسه آروویل (خوشبخت بهرمانی، ۱۳۸۸)

مشخصات	مقدار	واحد	نشانه
مقاوت فشاری ۲۸ روزه خشک (+ ۲۵ پس از یک سال)	0.15 - 0.35	-	$\sigma$
مقاوت فشاری ۲۸ روزه خشک (پس از یک روز غوطه‌وری در آب)	$1.10^{-5}$	mm/sec	
مقاوت کششی ۲۸ روزه خشک	5 - 10	% weigh	-
مقاوت خمشی ۲۸ روزه خشک	~ 0.85	KJ/Kg	C
مقاوت برشی ۲۸ روزه خشک	0.46 - 0.81	W/m°C	$\sigma$
آب رفتگی (با رطوبت طبیعی)	5 - 10	%	m
ضریب انبساط	خوب	-	-
آماس پس از اشباع (پس از یک روز غوطه‌وری در آب)	ضعیف	-	-
نسبت پویسن	5 - 10	MPa	$\sigma$ d 28
نفوذ پذیری	2 - 3	MPa	$\sigma$ w 28
میزان جذب آب	1 - 2	MPa	$\sigma$ 28
دمای معین	1 - 2	MPa	$\beta$ 28
ضریب رسانایی	1 - 2	MPa	S 28
ضریب تعدیل	0.2 - 1	mm/m	-
مقاوت در برابر آتش	0.010-	mm/m°C	-
قابلیت اشتعال	0.5 - 1	mm/m	-



شکل ۲. برش عمودی و افقی شناژ خشتی فشرده تثبیت شده

### روش تمقیق

به منظور ارزیابی میزان مقاومت بلوک خشتی پیشنهادی با سایر روش های اجرای مرسوم در برابر زلزله، شبیه سازی رایانه ای از نه سامانه دیوار با سامانه های خشتی، مصالح بنایی با کلاف فولادی و خشت بهینه شده با کلاف خشتی- بتنی با نرم افزار آباکیوس<sup>۲</sup> صورت

شده است. جهت سهولت ساخت و قالب زنی بلوک خشتی مقطع شناژ افقی به صورت دو بلوک خشتی پشت به پشت یکدیگر است که با ملات ماسه سیمان به یکدیگر متصل شده اند (خوشبخت بهرمانی، ۱۳۸۸).

(شکل ۲)

منحنی تنش کرنش، نرم افزار قادر به مدلسازی رفتار نزولی نمی باشد لذا انتهای منحنی باید به صورت افقی معرفی شود. براساس اطلاعات آزمایشگاهی و توانایی نرم افزار در حالتی ساده تر و به دلیل محدود بودن رفتار غیر خطی در خشت در مدل سازی، از مدل الاستیک ساده نیز استفاده شده است (خوشیخت بهرمانی، ۱۳۸۸).

برای تحلیل اجزاء محدود مدل و اختصاص آن به دیوار از عنصر ۶ وجهی مکعب شکل که واجد ۸ گره در گوشه ها می باشد استفاده شد. عنصر مورد نظر دارای ۳ درجه آزادی در امتداد محورهای اصلی (۱ و ۲ و ۳) است، که قابلیت پذیرش انواع بارهای جرمی انتقالی و دورانی و همچنین بارهای سطحی و خطی با شدت های مختلف را دارا می باشد.

### مقایسه سامانه پیشنهادی با سایر سامانه های موجود

دیوار به عنوان مهمترین بخش بنای خشتی باید مقاومت لازم در برابر زلزله را داشته باشد. مدل سازی سازه دیوار خشتی پیشنهادی باید در صد قابل قبولی از نظر مقاومت و کاهش هزینه در مقابل دیوارهای خشتی معمول و دیوارهای با مصالح بنایی داشته باشد (جدول ۳). نتایج مدل سازی نشان داد، دیوار خشتی گسیختگی به صورت ترک خوردگی قطری دارد و در بخش پاشنه تخریب شده است در نتیجه استفاده از دیوار خشتی قطعاً نیازمند بهسازی است. در روش های معمول بهسازی نیز نتایج نشان داد بهترین روش استفاده از صفحات اف. آر. پی. به صورت قائم و افقی است که سبب بالارفتن هزینه اجرا می گردد در صورتی که باز هم قابل رقابت با دیوار آجری با کلاف فولادی نیست. با روشی نسبتاً مشابه توسط سایر محققین که با آزمایش نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته

گرفت و میزان تغییر مکان و تنش فشاری بر هر یک از آنها محاسبه شد. بررسی رفتار سازه های خشتی یا بنایی، به دلیل شرایط خاص ناپیوستگی ها، رفتارهای غیر همسان، غیر همگن و غیر خطی آن ها بسیار پیچیده است، لذا انجام چنین بررسی لزوم استفاده از برنامه های تحلیل عددی جامع با قابلیت های بالا را ایجاد می نماید و سپس با استفاده از برنامه کامپیوتری آباکیوس نگارش شش با بهره گیری از روش های اجزای محدود، جهت تحلیل و طراحی سیستم های مهندسی پیشنهاد گردید. این برنامه امتیازات ویژه ای نسبت به برنامه های مشابه به شرح زیر دارد.

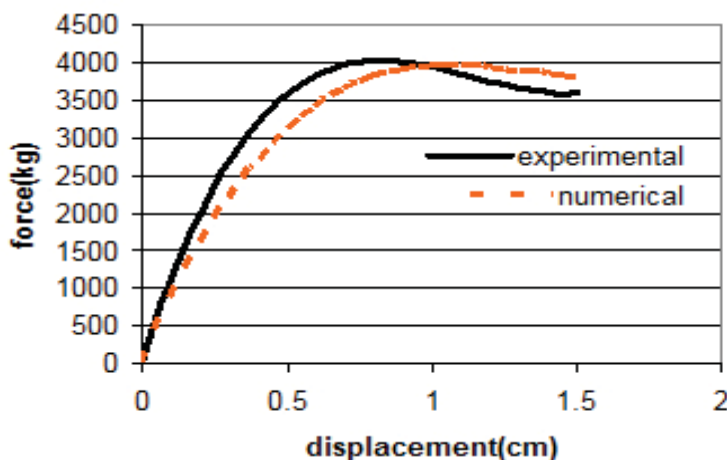
- انواع تحلیل استاتیکی و دینامیکی

- علاوه بر تحلیل خطی این برنامه توانایی بالایی جهت انجام تحلیل های غیرخطی را نیز دارد به طوری که می توان هم مصالح و هم هندسه سازه را به صورت خطی و یا غیر خطی مدل سازی کرد.

- وجود عناصر مختلف در این برنامه شامل عناصر یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی با درجه آزادی های متفاوت از دیگر توانایی های برنامه است. - استفاده از زیرسازه ها، ارتعاشات تصادفی، آکوستیک و بهینه سازی سازه ها، نیز از امتیازات ویژه این نرم افزار است.

با توجه آزمایش های صحت سنجی نتایج عددی که در دانشگاه مینهو توسط آقای دانیل ویتورینو الیویرا و با نظارت پرفسور "لورنزو" و پرفسور "رکا" انجام گرفته است، نتایج این مدلسازی واجد دقت مناسب نیز است (شکل ۳).

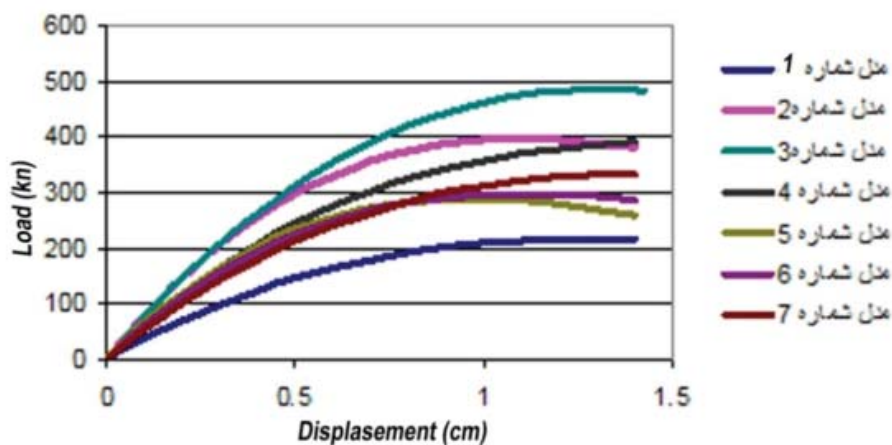
در مدل سازی با توجه به مصالح خشتی و رفتار پایه خاکی آن ها و همچنین شرایط نرم افزار موجود و اطلاعات آزمایشگاهی، بلوک ها از مدل رفتاری دراکر پراگر استفاده شده است. از آن جا که در معرفی



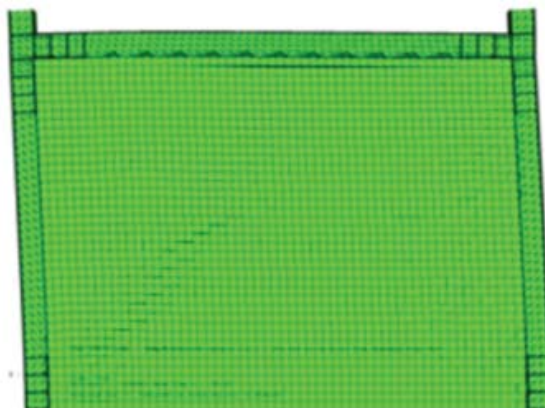
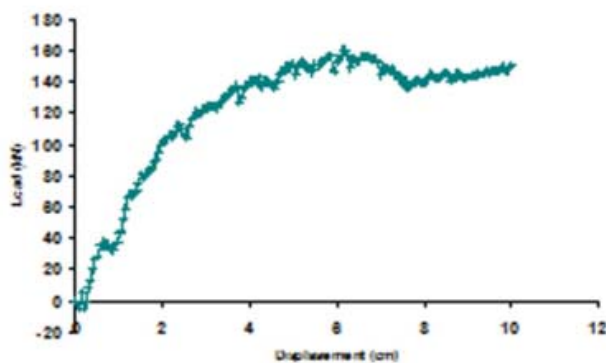
شکل ۳. نمودار نیرو- تغییر مکان مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول ۳. مشخصات مدل های مورد مقایسه

مدل کنترلی و فاقد سیستم بهسازی	خشتی معمولی ۱
دو ردیف الیاف در ابتدا و انتها بصورت قائم در هر دو سمت	خشتی معمولی ۲
سه ردیف الیاف در ابتدا و انتها و وسط بصورت قائم در هر دو سمت	خشتی معمولی ۳
استفاده از الیاف بصورت ضربدری در دو سمت دیوار	خشتی معمولی ۴
دو ردیف الیاف در ابتدا و انتها بصورت افقی در هر دو سمت	خشتی معمولی ۵
سه ردیف الیاف در ابتدا و انتها و وسط بصورت افقی در هر دو سمت	خشتی معمولی ۶
استفاده از توری	خشتی معمولی ۷
کلاف فولادی	بنایی
کلاف خشتی - بتنی	خشتی فشرده تثبیت شده

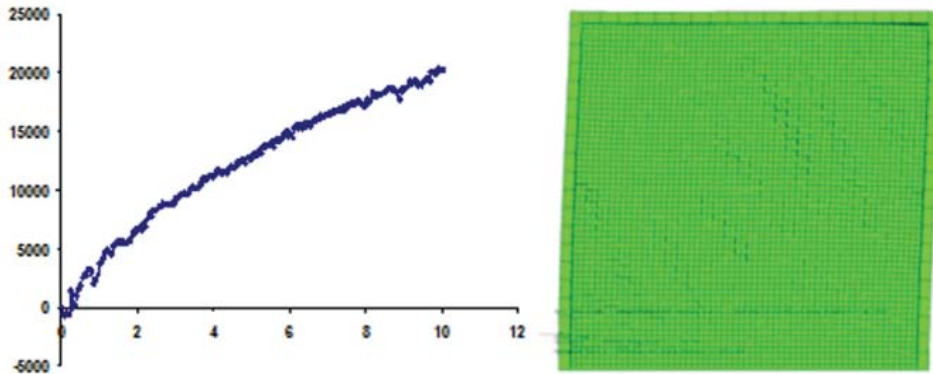


شکل ۴. نمودار نیرو-تغییر مکان همزمان مدل دیوار خشتی ۱ تا ۷

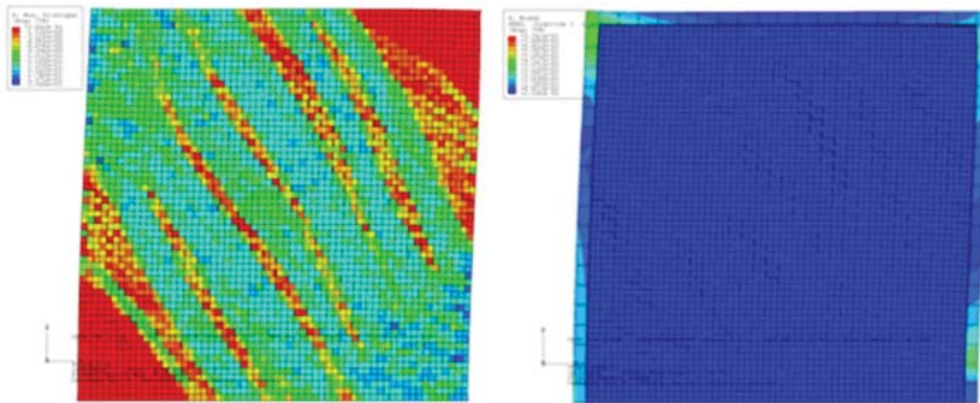


شکل ۵. نمودار نیرو-تغییر مکان و مدل اجزا محدود دیوار بنایی با کلاف فولادی بعد از تحلیل





شکل ۶. نمودار نیرو- غیر مکان دیوار خشتی بهینه و مدل اجزا محدود دیوار بعد از تحلیل



شکل ۷. توزیع تنش فشاری بر روی دیوار خشتی بهینه

### نتیجه گیری

در غالب نمونه‌های باقی مانده از معماری گذشته ایران که در مقیاس بناهای عمومی است، به کمک تبدیل نیروهای کششی به فشاری این ضعف برطرف شده است. در صورتی که خشت جهت افزایش مقاومت کششی تقویت گردد، امکان استفاده عمومی آن بنا به مشخصات زلزله‌خیزی منطقه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تقویت و تزریق تثبیت کننده در نقاطی که بیشترین بار نیروی کششی را متحمل می‌شود، سبب افزایش مقاومت آن در برابر نیروی زلزله می‌گردد. لذا هم‌نشینی خشت و سیمان و میلگرد، با استفاده از سامانه دیوار خشتی تثبیت شده پیشنهاد می‌گردد.

از این جهت با توجه مشخصات خاک موجود برش‌های مختلف دیوار در سطوح مختلف طراحی گردیده و جهت تثبیت ایده و آزمایش

است، این موضوع تایید شده است (عدل پرور ۱۳۸۶) (شکل ۴). همانطور که انتظار می‌رود در چنین دیوار بنایی به علت وجود کلاف فولادی تا حد زیادی رفتار سامانه تحت بار جانبی بهبود یافته و میزان تغییر مکان دیوار بالاتر و مقاومت جانبی بیشتری نیز نسبت به دیوارهای خشتی دارد (شکل ۵). این نوع دیوار اگرچه از لحاظ میزان مقاومت و میزان تغییر مکان رفتار مناسبی دارد، ولی به علت تفاوت فاحش سختی دیوار و کلاف فولادی عملاً دو قسمت سامانه یعنی بخش فولادی و بخش بنایی به صورت کاملاً جدا رفتار می‌کنند و امکان رفتار هم زمان این دو بخش وجود ندارد و دیوار صرفاً نقش پر کننده بین کلاف را ایفا می‌کند و این مطلب موجب می‌شود طراحان سختی دیوار را در محاسبات لحاظ نکنند و این موضوع خود ضعف‌های متعددی در طراحی و رفتار دیوار بنایی در برابر بارهای جانبی ایجاد می‌کند (شکل ۶ و ۷).



"تحلیل عددی آسیب پذیری نوعی از ساختمانهای متداول خشتی - گلی ایران در برابر بارهای لرزه ای چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران". دانشگاه تهران، سایت مرجع دانش (سیویلیکا). ۹. رازانی، ر. (۱۳۸۴). "نگاهی به تجربیات کشورهای زلزله خیز در مقاوم سازی ساختمانهای خشتی و آجری غیر مسلح و نکات مهم آئین نامه های ساختمانی اخیر نخستین همایش ملی استحکام بخشی ساختمانهای بنایی غیرمسلح و بناهای تاریخی". شهرداری شیراز، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۱۰. رضواندی، آ. و جناب زاده، ر. ش. (۱۳۸۲). "مطالعه موردی یک ساختمان دو طبقه آجری با مقایسه آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران و ضوابط پیشنهادی سازمان UNIDO در خصوص استفاده از کلاف". ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، عمران، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۱۱. سرلک، م.، وثوقی، فر. ح. و شاهانی، ع. (۱۳۸۵). "ارزیابی کمی آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های بنایی با نگاه به زلزله های اخیر". اولین همایش بین المللی مقاوم سازی لرزه ای. تهران سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۱۲. طارق، م. و ارشاد، ل. (۱۳۸۶). "بررسی ضوابط ساختمانهای بنایی غیر مسلح در استاندارد ۲۸۰۰ پنجمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله". تهران - پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۱۳. طیبی، م. (۱۳۸۴). "ارائه ترکیب بهینه برای استحکام بخشی خشت های مصرفی در مرمت بناهای تاریخی کوه خواجه سیستان". هنرهای زیبا، ۲۳.

۱۴. عدل پرور، م.، معتمد، ژ.، جهانپور، ع. و درویش زاده، گ. (۱۳۸۶). "یک روش کامل برای تقویت ساختمانهای خشتی ضد زلزله در ایران دومین کنفرانس ملی بهسازی و مقاوم سازی ایران". کرمان، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۱۵. کی نژاد، ف. (۱۳۸۴). "نتایج فعالیت های انجام گرفته بر روی خشت مناسب (معرفی خشت برگزیده)". تهران، پروژه نجات بخشی ارگ بم.

۱۶. لانت، ا. ج. (۱۳۸۲). "خشت های تثبیت شده برای ساختمان". تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۱۷. مجابی، س. م. (۱۳۸۴). "ممنوعیت استفاده از خشت و آجر". تهران، راه و ساختمان.

۱۸. محمدی، ر. ا. و علیزاده تقی آباد، س. (۱۳۸۷). "مقاوم سازی ساختمان های مصالح بنایی موجود با استفاده از انواع میلگرد". دانشگاه یزد، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

19. Craterre Editions, (2005), "Earth Architecture in Uganda: Pilot project in Bushenyi 2002-2004", Grenoble, France.

20. FACEY, W. (1998), "Back to Earth: Adobe Building in Saudi Arabia", London, Tauris & Co Ltd.

کارایی سامانه دیوار نمونه با بلوک خشتی فشرده تثبیت شده با سامانه های مشابه با بلوک خشتی ساده و آجری با کلاف قائم و عمودی مدل سازی رایانه ای و مقایسه گردید. این سامانه اگرچه از لحاظ مقاومت و میزان تغییر مکان در مجموع امتیازات کمتری از دیوار بنایی کسب نمود، ولی منطبق بر آیین نامه های موجود است. سامانه پیشنهادی این امکان را به طراحان می دهد که سختی معدلی برای مجموعه دیوار و کلاف در نظر بگیرد که موجب طراحی دقیق تر و عدم نیاز به استفاده از ضرایب اطمینان بالا می شود و سبب کاهش هزینه کلی سازه نیز می گردد، همچنین این سامانه از حد یک سامانه سنتی خارج و امکان طراحی ساختمان های چند طبقه را فراهم می نماید.

## پی نوشت ها

1. GTZ
2. ABAQUS

## فهرست مراجع

۱. اژدر، س. و مهرنهاد، ح. (۱۳۸۷). "بررسی مقاوم سازی و بازسازی مسکن روستایی در ایران". همایش ملی مقاوم سازی ایران. دانشگاه یزد، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۲. پارسا، ر.، داودی، ا. و علاقه بندیان، ر. (۱۳۸۶). "مقایسه ضوابط سازه های بنایی آیین نامه های افغانستان و ۲۸۰۰ سومین کنگره ملی مهندسی عمران". دانشگاه تبریز، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۳. تابش پور، م. (۱۳۸۶). "بررسی ضوابط ساده طراحی ساختمانهای بنایی (آجری، خشتی و سنگی) پنجمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله". تهران - پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).

۴. تابش پور، م. و فرهنگ فر، ح. (۱۳۸۴). "مقاوم سازه های لرزه ای سازه های بنایی خشتی". راه و ساختمان، ۲۸.

۵. تقی، م. ج. (۱۳۸۵). "آسیب شناسی ساختمان". هنرهای زیبا، ۲۶.

۶. جهان آبادیان، ه. (۱۳۸۴). "مطالعه و شناخت ارگ بم و خانه میر (تاجر هندی) و طرح حفاظت، مرمت و احیاء خانه میر". در مختاری، ا. (Ed). سالنامه گزارش فعالیت های مطالعاتی / اجرایی پروژه نجات بخشی میراث فرهنگی بم. تهران، رسانه پرداز.

۷. خوشبخت بهرمانی، ش. (۱۳۸۸). "معماری با خشت". راهبردهای ساخت ابنیه خشتی مقاوم در برابر زلزله. دانشکده معماری و شهرسازی. تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.

۸. دهقان بنادکی، آ.، قناده، م.، بخشی، ع. و لطفعلی پور، م. (۱۳۸۷).

21. HEATHCOTE, K. & MOOR, G. , (2002), "Earth building in Australia - Durability research. Modern Earth building. Berlin".

22. LITTLE, B. & MORTON, T. , (2001), "Building with Earth in Scotland: Innovative Design and Sustainability", Edinburgh, Department of Scottish Ministers.

23. MOQUIN, M. (2000), "Adob. IN ELIZABETH,

L. & ADAMS, C. (Eds.) Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods". America, John Wiley & Sons.

24. TORRELVA, B. M. & VILLA GARCIA, G. , (2002), "Adobe in Peru: Tradition, Research and Future. Modern Earth Building 2002 International Conference and Fair". Berlin, Germany.