

مقاله پژوهشی

تحلیلی بر روش‌های مقاوم‌سازی بناهای خشتی مبتنی بر بکارگیری عناصر تقویت‌کننده؛ بر اساس آیین‌نامه و استانداردهای خشت در کشورهای نیوزیلند، مراکش، پرو و آمریکا

سمیه امیدواری^{۱*}

۱- دکترای معماری، استادیار دانشگاه علم و هنر، یزد، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸)

چکیده

امروزه بیش از یک سوم مردم جهان در اینبیه خاکی زندگی می‌کنند. یکی از مساله‌های قابل توجه در این بناها، ایجاد ترک و شکست در زمان زلزله و عدم مقاوم‌سازی کامل آنها در برابر نیروهای افقی و عمودی می‌باشد. مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی به واسطه بکارگیری تقویت‌کننده‌ها، یکی از راه‌حل‌های معمول در سازه‌های خشتی می‌باشد. در دوران معاصر آیین‌نامه‌های موجود در ایران استفاده از خشت را علی‌رغم قابلیت‌های بسیار، محدود کرده‌است. این درحالی است که در چند دهه اخیر بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته دنیا، در پی تنظیم و ثبت آیین‌نامه‌ها و استانداردهایی مشخص برای ساخت‌وساز با مصالح خاک و خشت بوده‌اند. کشورهای آلمان، استرالیا، آمریکا، پرو، مراکش، ترکیه و برخی دیگر از کشورها در این حوزه پیشقدم بوده و تلاش کرده‌اند بر اساس مطالعه دقیق رفتار سازه‌های خشتی، به استخراج ضوابط و استانداردهای مشخص در مقاوم‌سازی این‌گونه از بناها دست‌یابند. این مقاله از مجموع آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف؛ آیین‌نامه کشورهای نیوزیلند، مراکش، پرو و آمریکا (نیومکزیکو) را جهت مطالعه و تحلیل انواع تقویت‌کننده‌ها در جهت مقاوم‌سازی بناهای خشتی در مقابل زلزله انتخاب کرده‌است. این پژوهش مبتنی بر روش «توصیفی-تحلیلی» و «پژوهش در متن» می‌باشد و شیوه گردآوری اطلاعات، کتابخانه‌ای است. لذا می‌کوشد تا با بررسی آیین‌نامه خشت در کشورهای مورد مطالعه، به استنتاج و جمع‌بندی روشی از نحوه بکارگیری عناصر تقویت‌کننده در مقاوم‌سازی بناهای خشتی دست‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد عناصر تقویت‌کننده در آیین‌نامه کشورهای مورد مطالعه، از مصالح سخت و غیر همگن با خشت به سمت مصالح نرم و بومی پیش‌رفته‌است. قابلیت انعطاف‌پذیری مصالح تقویت‌کننده در مقابل نیروهای زلزله، یکی از موضوعاتی است که در آیین‌نامه‌های جدید بسیار به آن توصیه شده‌است. در میان آیین‌نامه کشورهای مورد مطالعه، آیین‌نامه کشورهای پرو و تا حدودی مراکش توصیه‌های بسیار به استفاده از مصالح نرم، همگن و انعطاف‌پذیر داشته‌است.

کلمات کلیدی: مقاوم‌سازی، تقویت‌کننده‌ها، بناهای خشتی، آیین‌نامه

هزاران سال است که خاک به عنوان ماده اصلی برای ساخت بناها به همراه سنگ و چوب استفاده می‌شود. امروزه بیش از یک سوم مردم جهان در ساختمان‌هایی زندگی می‌کنند که از مصالح خاکی ساخته شده‌است و تقریباً شاید بتوان گفت ۳۰٪ از مردم دنیا در خانه‌های خشتی سکونت دارند. بر اساس آمار سال ۱۳۸۵، ۳۱.۵٪ از جمعیت ایران در روستاها زندگی می‌کرده‌اند. هنوز در بسیاری از روستاهای کشور به خصوص مناطق کویری، خانه‌های خشتی محل سکونت مردم است (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۸). لذا ساخت و ساز و زندگی در بناهای خشتی یکی از موضوعاتی است که امروزه به شهروندان در بسیاری از کشورهای توسعه یافته دنیا با توانایی استفاده از خاک توصیه می‌شود. سازگاری مناسب، اقتصادی بودن، سهولت و سرعت در تهیه از جمله ویژگی‌های مثبت این نوع مصالح محسوب می‌شود که به دلیل مسائل اقتصادی، هم‌اکنون نیز می‌تواند به عنوان ساخت‌وساز مناسب در بسیاری از نقاط کشور باشد. اما مساله مهمی که در ارتباط با این ساختمان‌ها به چشم می‌خورد، عدم طراحی بسیاری از آنها برای مقابله با بارهای لرزه ای می‌باشد. به طور کلی سازه‌های بنایی غیرمسلح در برابر بارهای لرزه‌ای، آسیب‌پذیرند و نیاز به مقاوم‌سازی دارند (وطنی‌اسکویی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۸). اکثر قریب به اتفاق این گونه خانه‌ها بدون هیچ‌گونه تمهیدی برای تحمل نیروی جانبی و توسط خود اهالی ساخته می‌شود. رفتار این سازه‌ها کاملاً ترد و شکست آنها در اثر بارهای جانبی زلزله، آنی است و فرصت عکس‌العمل را از ساکنین در زمان زلزله سلب می‌نماید (تابش پور، ۱۳۸۶) و لذا خسارات جانی و مالی بسیاری را به همراه داشته‌است.

ایران در استفاده از معماری خشتی با تکیه بر اقلیم، یکی از کهن‌ترین کشورها محسوب می‌شود، شیوه‌ای که سالیان درازی است در ساختارها و معماری امروز ما فراموش شده‌است و بواسطه فراموشی، رها شدن و تخریب تدریجی آثار و عدم تربیت معماران سنتی در این زمینه، روز به روز نیاز به تحقیق و تفحص دقیقتر را در این مرز و بوم برای پژوهشگران گوشزد می‌کند، تا مقدمه‌ای برای گسترش، فهم و حفاظت معماری بومی و خشتی ایران باشد. سابقه طولانی معماری خشتی در ایران، پتانسیل و کمیت پژوهش‌های مرتبط را نیز می‌تواند افزایش دهد، ولی با این وجود همواره با کمبود و یا عدم وجود منابع مفید و قابل استفاده برای حفاظت، مرمت و استحکام بخشی بناهای خشتی مواجه بوده که این به خوبی ضرورت کنکاش در معماری خشتی را نشان می‌دهد (رحیم‌نیا و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۰). از سویی کشور ایران به عنوان یکی از کشورهای زلزله خیز جهان در طی سالیان گذشته همواره در معرض زلزله های ویران کننده قرار داشته‌است. شرایط طبیعی زمین در ایران از نقطه نظر استعداد وقوع زلزله‌های مخرب ایجاب می‌کند که مسئله مصون‌سازی جامعه از هر لحاظ در دستور کار قرار گیرد و به ویژه استانداردهای ساختمان‌سازی مقاوم در مقابل زلزله به طور جدی رعایت گردیده و اجرا گردد. طراحی نامناسب، عدم توجه کافی به اصول و ضوابط اجرایی، تعمیر و نگهداری، عدم استفاده از مصالح مناسب و کافی، آسیب‌پذیری ساختمان‌ها را افزایش داده‌است و از طرفی از عمر مفید آنها کاسته‌است (طایفی نصرآبادی، رشیدی مهرآبادی، ۱۳۸۷: ۶۰). در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله در ایران، احداث ساختمان‌های سنتی با گل و خشت را به علت ضعف مصالح و مقاومت محدود آنها در مقابل زمین لرزه محدود نموده و به طور استثناء، ایجاد این گونه ساختمان‌ها را تنها در نواحی دوردست و مطابق دستورالعمل فنی ویژه مجاز شمرده‌است (خوشبخت‌بهرمانی، سپهری‌مقدم، ۱۳۹۱: ۵۵). از سویی در آیین‌نامه ۲۸۰۰ در ایران برای تقویت ساختمان‌های بنایی استفاده از کلاف‌بندی های بتن‌آرمه در دیوار را الزام کرده‌است که این آیین‌نامه برای ساختمان‌های خشتی به دلیل رفتار سازه‌ای متفاوت خشت در مقابل زلزله قابل تسری نمی‌باشد.

موضوع مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی در مقابل زلزله بحثی است که امروزه در بسیاری از محافل علمی مطرح است و الزاماً هرگونه اجرا و ساخت بناهای خشتی باید تحت رعایت آیین‌نامه‌های مشخص باشد تا کمترین آسیب در مقابل زلزله به بنا وارد شود. از آنجا که ایران در خصوص بناهای خشتی واجد آیین‌نامه مشخص نمی‌باشد لذا تلاش این مقاله بر آن است که

با مطالعه آیین‌نامه خشت در کشورهای توسعه‌یافته، به معرفی و تحلیل عناصر تقویت‌کننده در این آیین‌نامه‌ها و ارائه پیشنهاداتی جهت بکارگیری در پروژه‌های مرمت و ساخت بناهای معاصر خشتی برآید.

پرسش‌های پژوهش

۱. چه نوع تقویت‌کننده‌هایی در انعطاف‌پذیری رفتار سازه‌های خشتی در برابر زلزله موثر بوده‌است؟
۲. بر اساس آیین‌نامه‌های خشت در کشورهای مورد مطالعه (نیوزلند، آمریکا، پرو، مراکش)، چه نوع تقویت‌کننده‌هایی در مقاوم‌سازی بناهای خشتی موثر بوده‌است؟
۳. نحوه بکارگیری تقویت‌کننده‌ها در مقاوم‌سازی بناهای خشتی در کشورهای مورد مطالعه (نیوزلند، آمریکا، پرو، مراکش) چگونه است؟

۲- پیشینه پژوهش

مطالعات علمی در زمینه مصالح خشتی در چند دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته‌است و در ایران و اکثر کشورهای دنیا تلاش‌های گسترده‌ای در جهت ساخت و مرمت بناهای خشتی انجام‌گرفته‌است. مجموعه مطالعات و پژوهش‌های انجام شده در حوزه تقویت‌کننده‌ها و نقش آنها در مقاوم‌سازی بناهای خشتی را می‌توان در سه دسته کلی قرارداد. دسته اول شامل مجموعه آیین‌نامه‌ها و استانداردهایی است که در این خصوص توسط مراجع ذیصلاح تدوین و مورد تصویب قرار گرفته‌است. دسته دوم مجموعه فعالیت‌های پژوهشی و مستندسازی در قالب کتب و مقالات که بعضاً دربرگیرنده تجربیات شخصی معماران و مرمت‌کاران در ساخت‌وساز با خشت می‌باشد که به مرحله انتشار رسیده‌است و دسته سوم مجموعه فعالیت‌های اجرایی در این حوزه می‌باشد که توسط معماران و دست‌اندرکاران مرمت بناهای تاریخی انجام شده و تقریباً می‌توان گفت مستند نشده‌است و از طریق پژوهش‌های میدانی می‌توان به آنها دست‌یافت. این سه دسته فعالیت‌ها را می‌توان در دو بخش مجموعه فعالیت‌های داخل ایران و مجموعه فعالیت‌های انجام شده در خارج از ایران تفکیک کرد و مورد تحلیل و بررسی قرارداد.

در ایران با وجود اینکه بخش عمده‌ای از بناهای تاریخی با خشت می‌باشد در حوزه استانداردسازی بناهای خشتی هنوز آیین‌نامه مصوب و مشخصی وجود ندارد و در سالهای اخیر مرکز تحقیقات مسکن تلاش‌هایی جهت تدوین آیین‌نامه‌های ساخت بناها با خشت انجام داده و پیش‌نویسی تنظیم کرده‌است که در حال بررسی و تکمیل می‌باشد. در خصوص تجربیات عملی، به دلیل خشتی بودن عمده بناهای تاریخی ایران و از سویی ثبت شهر یزد در فهرست میراث جهانی، تلاش‌های بسیاری در مرمت بناهای خشتی انجام شده است. از نمونه‌های عملی می‌توان به تجربیات مقاوم‌سازی بناهای خشتی در ارگ بم و همچنین مرمت و مقاوم‌سازی دهها بنا و خانه‌های تاریخی در شهرهای یزد، کاشان، اصفهان و غیره اشاره کرد که توسط استادکاران سنتی و متخصصین این حوزه انجام شده‌است^۱. اما متأسفانه بسیاری از این تجربیات به صورت مکتوب درنیامده و به عنوان میراث شفاهی قابل دنبال کردن است. در میان مقالات و کتابهای مستند در این حوزه، می‌توان به مجموعه مقالات در حوزه مقاوم‌سازی بناهای خشتی اشاره کرد اما عمده این منابع در مقاوم‌سازی و استحکام بخشی بناهای خشتی، توجه خود را بر روی تثبیت مصالح خشت تمرکز نموده‌اند. در میان پژوهش‌های انجام شده می‌توان به موارد زیر اشاره داشت (جدول ۱).

جدول ۱: مروری بر سوابق تحقیق. (ماخذ: نگارندگان)

نویسنده	عنوان	معرفی مقاله
باسلیقه، فرنوش (۱۳۸۴)	ارائه راه‌حل‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های خشتی با استفاده از مصالح موجود در ایران	ساخت بناهای خشتی در نقاط مختلف دنیا و از جمله در ایران رایج می‌باشد. طی زلزله‌های اخیر، بیشترین خسارات به این‌گونه ساختمان‌ها وارد شده‌است. برای سبک‌سازی این‌گونه ساختمان‌ها، باید آیین‌نامه‌های تدوین شود تا با اجرای آن بتوان از آسیب‌های شدید در این ساختمان‌ها جلوگیری به‌عمل آورد. در مقاله حاضر با استفاده از تجربیات سایر کشورها در این زمینه و تحلیل دیوارهای خشتی به ارائه راه‌حل‌های بهسازی و تقویت بناهای خشتی پرداخته شده‌است.
تابش‌پور، محمدرضا و فرهنگ‌فر، حسن (۱۳۸۴)	مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های بنایی خشتی	از آنجا که قسمت وسیعی از ساختمان‌ها در روستاهای ایران به صورت خشتی می‌باشد، ارزیابی آسیب‌پذیری و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی به عنوان یک مساله مهم مطرح می‌باشد. ساختمان‌های خشتی مقاومت لرزه‌ای کمی داشته و در برابر اثرات زلزله بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. در این مقاله به روش‌های بسیار ساده به مقاوم‌سازی اینگونه سازه‌ها پرداخته است.
میرگذارلنگرودی، میرعلیمحمد؛ لنگرودی، سیده‌صدیقه و رجبی‌کنف‌گورابی، اکبر (۱۳۸۷)	مقاوم سازی ساختمان های خشتی و گلی در مقابل زلزله	مسئله مهمی که در ارتباط با ساخت‌وسازهای خشتی و گلی در نقاط مختلف دنیا وجود دارد، عدم طراحی بسیاری از آنها برای مقابله با بارهای لرزه‌ای می‌باشد. در این مقاله به بررسی روش‌های متعارفی که برای مقاوم‌سازی این‌گونه سازه‌ها وجود دارد، پرداخته‌است. هرکدام از این روش‌ها بر پایه افزایش مقاومت و یا شکل‌پذیری دیوارهای بنایی غیرمسلح استوار می‌باشد.
دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۰)	مقررات ملی ساختمان‌های با مصالح بنایی	این آیین‌نامه در خصوص ساختمان‌های بنایی بوده‌است و اشاره به راهکارهای مقاوم‌سازی برای این‌گونه ساختمانها دارد. به نظر می‌رسد برخی از این راهکارها قابل‌تسری در بناهای خشتی باشد.
قاسمی، فاطمه و رستم‌زاده، اسماعیل (۱۳۹۰)	مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی	طی زلزله‌های اخیر بیشترین خسارات به ساختمان‌های بنایی وارد شده‌است. با توجه به اینکه مصالح مصرفی در این بنا از نوع مصالح بنایی غیرمسلح می‌باشد و همچنین با توجه به سوابق آسیب‌پذیری این بناها در برابر زمین لرزه‌های قبلی، مقاله حاضر در دو بخش به ارائه راهکارهای قابل استفاده برای بناهای آجری و خشتی می‌پردازد.
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۲)	آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران	این آیین‌نامه در خصوص ساختمان‌های بنایی بوده است و اشاره به راهکارهای مقاوم‌سازی این بناها داشته‌است. به نظر می‌رسد برخی از این راهکارها قابل تسری در بناهای خشتی می‌باشد.
حجازی، سید امیرمهداد، حجازی، بینا، مهداد، حامد، حجازی، صبا (۱۳۹۴)	مطالعه تخریب لرزه ای یک حجره خشتی در ارگ بم و ارائه طرح مرمت آن	این مقاله با تمرکز بر حجره خشتی در ارگ بم و ارائه پیشنهاداتی جهت تقویت و استحکام‌بخشی این بنا، به مدل‌سازی نمونه ساخته‌شده در نرم‌افزار پرداخته‌است. در پایان این نتیجه حاصل آمده‌است که استفاده از عناصر تقویت‌کننده چوبی در گوشه‌های دیوار و لبه‌های بازشوها و همچنین اتصالات افقی در تراز سقف، میتواند در استحکام‌بخشی و به حداقل رساندن آسیب بنا در زلزله‌های بعدی موثر باشد.
منصوری، فائقه (۱۳۹۵)	اصول طراحی سازه‌های گلین مقاوم در برابر زلزله (با تمرکز بر ساخت‌وساز با خاک در کشورهای با پهنه‌بندی زلزله مشابه ایران)	این پایان‌نامه با هدف تدوین آیین‌نامه‌ها و مقررات بناهای خشتی در ایران جهت بکارگیری در ساختمان‌های خشتی معاصر تنظیم شده‌است. در این آیین‌نامه تلاش شده تا با استخراج آیین‌نامه‌های خشتی در دنیا، به ارائه اصول و ضوابط حاکم بر معماری سنتی ایران دست‌یابد.
درمحمدی، منصوره، رحیم‌نیا، رضا (۱۳۹۶)	تثبیت مکانیکی خاک و تبیین جایگاه آن در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک	اگرچه تلاش‌های خوبی در جهت جمع‌آوری و دسته‌بندی استانداردها و آیین‌نامه‌های مذکور صورت گرفته‌است، اما استانداردهای کشورهای پرو و مراکش که واجد اهمیت زیادی بوده‌است در این رساله کمتر مورد شناسایی و تحلیل قرار گرفته‌است. در این مقاله به روش‌های تثبیت و استحکام بخشی مصالح خاکی در اقلیم گرم و خشک اشاره دارد و می‌کوشد با ارائه راهکارهایی زمینه بکارگیری آنها را در معماری معاصر فراهم آورد.

ذات اکرم، وحید، زمانی استحکام‌بخشی لرزه‌ای ابنیه خشتی روستایی (مطالعه موردی: روستای تاریخی اصفهک- طیس) فرد، علی(۱۳۹۸)

این مقاله با تمرکز بر بافت‌خشتی روستای اصفهک و بررسی نقاط قوت و ضعف بناهای خشتی آن در مقابل زلزله، به ارائه پیشنهاداتی برای روش‌های استحکام-بخشی بناهای خشتی پرداخته و با انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار، استفاده از المانهای چوبی و طناب‌های بافته‌شده با الیاف‌خرما را الگوی مناسبی برای مقاوم‌سازی بناهای خشتی معرفی می‌کند.

لازم به ذکر است در میان مقالات فوق، مقاله ذات‌کرم و همکاران(۱۳۹۸) و حجازی و همکاران(۱۳۹۴) تلاش کرده‌اند تجربیات عملی را مورد آزمایش و تحلیل قرار داده و به شکل کامل‌تری به معرفی و تحلیل تقویت‌کننده‌ها در مقاوم‌سازی بناهای خشتی بپردازند.

از دهه ۷۰ میلادی با قوت‌گرفتن بحران‌های محیط زیست و ضرورت بازگشت به مصالح تجدیدپذیر استفاده از مصالح خشت و راهکارهای مقاوم‌سازی این بناها قوت‌گرفت و تجربیات اجرایی و عملی بسیاری در دیگر کشورها بخصوص در کشورهایی با خطر زلزله بالا صورت گرفت. از منظر استاندارد و آیین‌نامه، کشورهای بسیار زیادی سعی در تدوین آیین‌نامه‌های داخلی جهت بکارگیری مصالح خشت به عنوان یک مصالح معمول نمودند. کشورهای استرالیا، آلمان، نیوزیلند، آمریکا، اسکاتلند، پرو، ترکیه، مراکش و برخی دیگر از کشورها در چند دهه اخیر پیشرو بوده‌اند. استاندارد فنی ساختمان‌های خشتی پرو^۲، استانداردهای طراحی مهندسی ساختمان‌های خشتی نیوزیلند^۳، استاندارد مصالح و روش کار نیوزیلند^۴، استاندارد مصالح خشتی بدون نیاز به طراحی ویژه نیوزیلند^۵، آیین‌نامه جدید مصالح ساختمانی خشتی مکزیک^۶، کتاب راهنمای ساختمان خشتی استرالیا و برخی دیگر از این منابع نسبت به سایر استانداردها کامل‌تر هستند. به لحاظ تجربیات اجرایی نیز تلاش‌های بسیاری در کشورهای توسعه‌یافته صورت گرفته‌است. برخی از کشورها از جمله پرو از دهه ۷۰ میلادی مطالعات گسترده‌ای در مورد ساختمان‌های خشتی آغاز کرده‌است به طوری که در سالهای اخیر دفترچه‌های تصویری ساخت‌وساز با مصالح خشتی تنظیم و در اختیار خانواده‌ها جهت ساخت‌وسازهای ایمن، قرار داده شده‌است.

از آنجا که هدف این مقاله بررسی تقویت‌کننده‌ها در استانداردها و آیین‌نامه‌های خشتی می‌باشد، لذا تمرکز اصلی بر آیین‌نامه‌های خشتی مصوب و مورد تایید مراجع ذیصلاح در کشورهای مختلف بوده‌است. پژوهش مستقلی در ایران که به این موضوع پرداخته باشد وجود نداشته‌است (جدول ۲). لذا با وجود رساله خانم منصوری، شاید بتوان گفت این مقاله یکی از نقاط آغازین بر تدوین استانداردها و آیین‌نامه‌های خشت در ایران می‌باشد.

جدول ۲: سوابق پژوهشی درباره عناصر تقویت‌کننده در بناهای خشتی. (ماخذ: نگارندگان)

منابع	انواع	ویژگی‌ها
مجموعه منابع مکتوب و تجربیات عملی داخل ایران	تجربیات عملی	تجربیات عملی در مجموعه ارگ‌بم، روستای اصفهک و مرمت بسیاری از بناهای تاریخی و خانه‌های سنتی در شهرهای تاریخی ایران از جمله؛ یزد، کاشان، اصفهان و... به جزء موارد محدودی، کمتر این تجربیات مستند و منتشر شده و به مرحله انتقال درآمده‌است. مقالات متعددی در این حوزه تدوین شده‌است. عمده مقالات و پژوهش‌های منتشر شده در خصوص مقاوم‌سازی بناهای خشتی به بحث تثبیت خشت پرداخته‌اند و کمتر در حوزه استحکام‌بخشی بناهای خشتی پژوهش‌هایی منتشر شده‌است.
استاندارد و آیین‌نامه	پژوهش و مقالات مستند	تنها آیین‌نامه موجود درباره بناهای آجری بوده‌است. در خصوص بناهای خشتی تنها بیش‌نویس اولیه توسط مرکز تحقیقات مسکن تهیه شده و حال تکمیل است.
مجموعه منابع مکتوب و تجربیات عملی خارج از ایران	تجربیات عملی	تجربیات گسترده‌ای در کشورهای مختلف، بخصوص کشورها با مصالح بومی خشت انجام شده‌است. مقالات متعددی در این موضوع کار شده‌است.
پژوهش و مقالات مستند	پژوهش و مقالات مستند	از آنجایی که تمرکز این مقاله بر روی مقاوم‌سازی بناها بر اساس آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مصوب خشت می‌باشد لذا این پژوهش‌ها کمتر می‌تواند در این مقاله کاربرد داشته‌باشد.
استاندارد و آیین‌نامه	استاندارد و آیین‌نامه	کشورهای آمریکا، پرو، مراکش، استرالیا، آلمان، نیوزیلند در این زمینه دارای آیین‌نامه‌هایی می‌باشند و هرگونه ساخت‌وساز در این کشورها با خشت باید مبتنی بر رعایت این ضوابط باشد.

در برخی از این کشورها مانند پرو این آیین‌نامه ساخت‌وساز تبدیل به کتابچه‌های کوچک جهت استفاده عموم مردم از این روش ساخت‌وساز شده‌است.

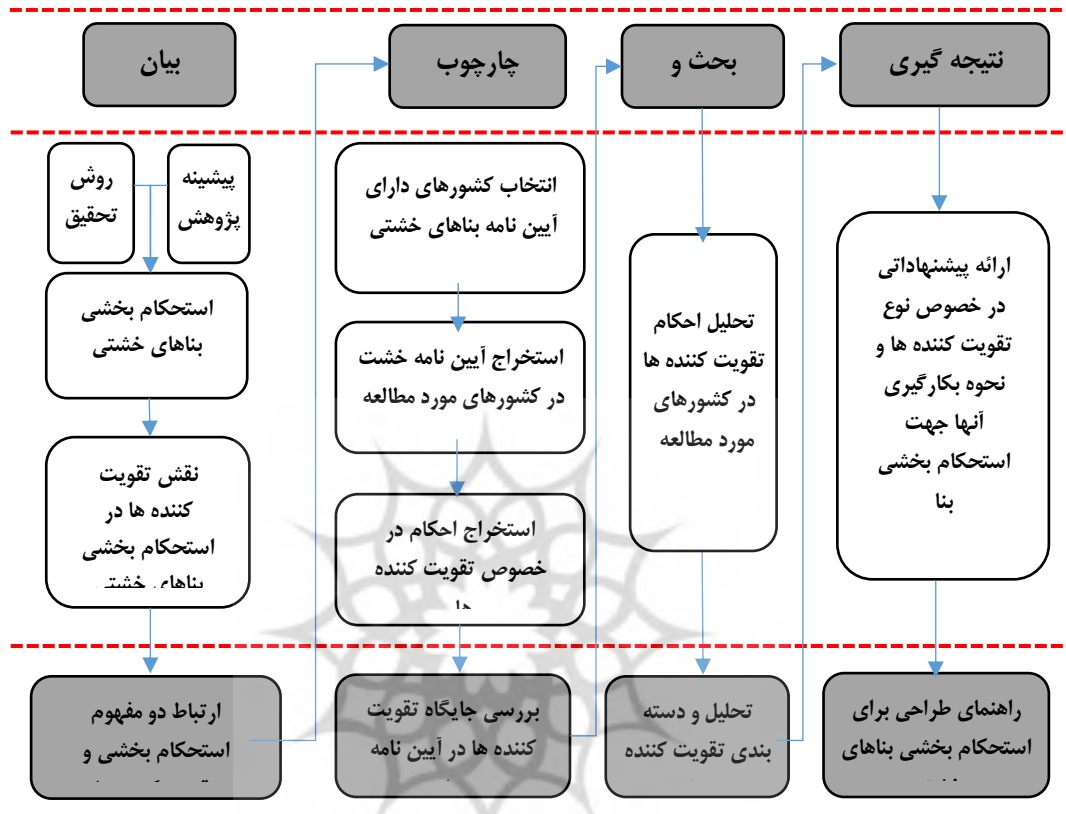
۳- روش تحقیق

روش تحقیق این مقاله مبتنی بر روش «توصیفی- تحلیلی» و «پژوهش در متن» است و به منظور گردآوری داده‌های مورد نیاز از مراجعه به منابع مکتوب و اسناد کتابخانه‌ای به ویژه رجوع به متون اصلی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مصوب بناهای خشتی در کشورهای مورد مطالعه بهره‌برده‌است. اگر چه تجربیات عملی انجام شده در حوزه تقویت‌کننده بناهای- خشتی در ایران بسیار و مقالات نیز در این حوزه منتشر شده‌است، اما از آنجا که هدف این مقاله تحلیل روش‌های مقاوم‌سازی بناهای خشتی مبتنی بر آیین‌نامه‌ها و استاندارد بناهای خشتی در دنیا می‌باشد لذا در ابتدا به مطالعه و بررسی آیین‌نامه‌های بناهای خشتی در کشورهای واجد این استاندارد پرداخته شده‌است. از میان آیین‌نامه‌های بناهای خشتی و براساس تحلیل اولیه، آیین‌نامه‌های چهار کشور نیوزیلند، آمریکا (نیومکزیکو)، پرو و مراکش مورد انتخاب قرار گرفت. در ابتدا با معرفی هر یک از آیین‌نامه‌ها، به موضوعات مورد بحث در هر کدام و آخرین تاریخ بروزرسانی آیین‌نامه در هر کشور اشاره شده‌است. با مطالعه و تحلیل محتوای آیین‌نامه‌های مذکور، بررسی در سه مقیاس واحد خشتی، دیوار خشتی و بنای خشتی انجام شد. از آنجا که مبحث تقویت‌کننده عموماً در دو مقیاس دیوار و بنای خشتی مورد پژوهش می‌باشد لذا در این دو مقیاس اطلاعات مورد نیاز استخراج گردید. در آیین‌نامه هر کشور تقویت‌کننده‌ها از سه منظر نوع مصالح بکارگرفته شده در جهت تقویت سازه خشتی، محل قرارگیری آنها نسبت به دیوار و میزان سختی و نرمی و انعطاف‌پذیری این مصالح در هم‌نشینی با خشت مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه با مقایسه و بررسی تطبیقی تقویت‌کننده‌ها در کشورهای انتخابی از سه منظر فوق، به بیان قابلیت‌ها و ضعف‌های هر نوع از تقویت‌کننده اشاره گردید. سپس با مقایسه تقویت‌کننده‌ها بر اساس تاریخ بروزرسانی و تحلیل آنها، توصیه‌هایی جهت استفاده از تقویت‌کننده در کشورهای مذکور صورت گرفت.

۴- مدل پژوهش

بحث استحکام بخشی بناها، یکی از موضوعاتی است که در انواع سازه‌ها موضوع مورد بحث می‌باشد. استحکام بخشی، به معنای افزایش مقاومت درونی بنا در مقابل اضمحلال فعلی و مصون‌سازی در برابر مخاطرات آتی است و با اساس نوع سازه و مصالح ساختمانی از مواد و روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. تقویت‌کننده‌ها یکی از عناصری است که نقش بسیار مهمی در پایداری و استحکام بخشی سازه‌های مختلف ایفا می‌نمایند. استحکام بخشی بناهای خشتی یکی از موضوعات اساسی در بافت‌های تاریخی و به خصوص ساخت‌وساز جدید با مصالح خشت می‌باشد. با توجه به آسیب‌پذیر بودن این ساختمان‌ها در طی زلزله‌های گذشته، اهمیت مطالعه رفتار و عملکرد این نوع ساختمان‌ها در برابر زلزله به شکل آشکار مشخص می‌باشد. از آنجا که حجم گسترده‌ای از بناهای خاکی در دنیا با مصالح خشت می‌باشد، لذا تجربیات متعددی در کشورهای مختلف در زمینه مرمت و استحکام بخشی و بهره‌گیری از عناصر تقویت‌کننده در جهت مقاوم‌سازی بناهای- خشتی وجود داشته‌است. مقایسه ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ در ایران با ضوابط آیین‌نامه‌های سایر کشورها، بیان‌کننده آن است که پیشنهادات این آیین‌نامه در مقاوم‌سازی بناهای خشتی و اجرای غیرمسلح موجود در بافت‌های قدیمی شهرها تقریباً قابل‌اجراء نمی‌باشد و یا دارای هزینه سنگین و از لحاظ اجرایی مشکل و غیرکارا بوده‌است (رازانی، ۱۳۸۳). این درحالی است که در بسیاری از کشورهای دنیا، آیین‌نامه‌های خاص درباره بناهای خشتی وجود دارد و تجربیات متفاوتی در حوزه مقاوم‌سازی این نوع از بناها و بکارگیری تقویت‌کننده‌های مختلف جهت استحکام بخشی آنها ثبت شده‌است. این تجربیات در برخی کشورها به آیین‌نامه تبدیل شده‌است و در بسیاری از کشورها به صورت تجربه ضمنی در حال استفاده توسط دست‌اندرکاران ساخت و مرمت بناهای خشتی بوده‌است. در استفاده از عناصر تقویت‌کننده هر کشور بسته به تجربیات بومی

و یا فناوری‌های جدید، ابزار و شیوه‌های متفاوتی را بکار گرفته‌است. هدف از این پژوهش، بررسی تقویت‌کننده‌ها در جهت استحکام‌بخشی بناهای خشتی در کشورهایی است که تجربیات ساخت‌وساز و مرمت بناهای خشتی را تبدیل به آیین‌نامه‌های مصوب و مورد تایید مراجع ذیصلاح آن کشور کرده‌اند. لازم به ذکر است نوع و میزان توجه به مبحث تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف ارتباط تنگاتنگی با زلزله‌خیزی منطقه داشته‌است و این عوامل باعث تفاوت در میزان توجه و پرداختن به مبحث تقویت‌کننده در آیین‌نامه‌های مختلف شده‌است (تصویر ۱).



تصویر ۱: مدل مفهومی تحلیل تقویت‌کننده‌ها در استحکام بخشی بناهای خشتی با تکیه بر آیین‌نامه خشت در کشورهای مورد مطالعه. (ماخذ: نگارندگان)

۵- مروری بر آیین‌نامه بناهای خشتی در کشورهای مورد مطالعه (نیوزیلند، آمریکا (نیومکزیکو)، پرو، مراکش)

عدم توجه و اهمیت دادن به بناها و سازه‌های خشتی در ضوابط و آیین‌نامه‌های امروز ایران، فقدان ساخت بناهای خشتی معاصر را باعث شده‌است. این در حالی است که بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته دنیا از چند دهه اخیر به دنبال بحران‌های زیست‌محیطی ضرورت بهره‌گیری از مصالح بومی و ساخت بناهای خشتی را در برنامه ساخت و سازهای معاصر خود قرار داده و کوشش‌هایی در جهت استخراج آیین‌نامه‌ها و استانداردهایی برای آن داشته‌اند. کشورهای ترکیه، مکزیک، آلمان، نیوزیلند، آمریکا، پرو، مراکش چند دهه است که در این حوزه پیش قدم بوده‌اند. این مقاله با انتخاب آیین‌نامه‌ها در چند کشور که واجد اعتبار بیشتر و از سویی در دسترس‌تر بوده‌اند می‌کوشد تا با تحلیل این آیین‌نامه‌ها به ضوابط و استانداردهای مقاوم‌سازی این سازه‌ها از منظر تقویت‌کننده‌ها بپردازد. لذا در ابتدا به معرفی اجمالی و تبیین این آیین‌نامه‌ها در کشورهای مورد مطالعه پرداخته خواهد شد و سپس به بررسی اهمیت و جایگاه عناصر تقویت‌کننده در آیین‌نامه‌های بناهای خشتی می‌پردازد. آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مورد مطالعه متعلق به کشورهای نیوزیلند، پرو، آمریکا (نیومکزیکو) و مراکش بوده‌است.

از میان آیین نامه‌های مورد مطالعه؛ آیین نامه بناهای خشتی نیوزیلند دارای قدمت بیشتری بوده است و آخرین ویرایش آن متعلق به ۱۹۹۸ م. است و به تبع آن مرور تجربیات جدید کمتر در آنها اعمال گردیده است. این آیین نامه به زبان انگلیسی و در سال‌های اخیر تمهیداتی جهت بروزرسانی آن در حال انجام است. به دنبال آن آیین نامه مراکش دارای قدمت بیشتر و آخرین بروزرسانی آن متعلق به ۲۰۰۸ م. می‌باشد و این آیین نامه به زبان فرانسه است. در میان آیین نامه‌های مورد مطالعه؛ پرو یکی از کشورهایی است که در حوزه بناهای خشتی تجربیات بسیاری را دنبال کرده است و آخرین آیین نامه این کشور متعلق به ۲۰۱۷ که در مجموع آیین نامه نسبتاً کاملی است و به زبان اسپانیایی می‌باشد. جدیدترین آیین نامه مورد مطالعه متعلق به آمریکا (ایالت نیومکزیکو) است و به دلیل عدم زلزله‌خیزی این منطقه، این آیین نامه بسیار خلاصه و کوتاه است. این آیین نامه به زبان انگلیسی می‌باشد.

۵-۱- آیین نامه خشت نیوزیلند^۷

آیین نامه بناهای خشتی نیوزیلند شامل سه کتابچه می‌باشد که آخرین تاریخ انتشار و بروزرسانی آن متعلق به سال ۱۹۹۸ می‌باشد. این کتابچه در سه جلد با عنوان؛ جلد اول: "طراحی مهندسی ساختمان‌های خاکی" با کد NZS4297، جلد دوم: "متریال و شیوه‌های اجرایی ساختمان‌های خاکی" با کد NZS4298 و جلد سوم: "ساختمان‌های خاکی به قوانین طراحی خاصی نیاز ندارند" با کد NZS4299 انتشار یافته است. این آیین نامه در خصوص ساختمان‌های خاکی که شامل بناهای خشتی و بناهای خاک کوب و بعضاً بناهای آجری بوده، اشاره شده است. عمده قوانین در مورد ساختمان‌های خاکی یکسان بوده است و در برخی موارد تمایزاتی بین انواع مختلف ساختمان‌های خاکی وجود داشته است. در جلد اول به تفصیل به قوانین فنی بناهای خشتی از منظر واحد خشتی پرداخته است. در جلد دوم به قوانین و آیین نامه‌ها در خصوص خشت، ملات، جزئیات تقویت کننده‌ها و اتصالات و سطح نهایی پرداخته و در جلد سوم به آیین نامه‌ها و استانداردهایی درباره سایت یا مکان طرح ساختمان‌های خاکی، فونداسیون، ضخامت دیوارها، ابعاد گشودگی‌ها، استراکچرهای سازه‌ای و انواع اتصالات و همچنین تقویت کننده‌ها اشاره کرده است.

۵-۲- آیین نامه خشت مراکش^۸

آخرین آیین نامه بناهای خاکی مراکش متعلق به سال ۲۰۰۸ می‌باشد که این آیین نامه به زبان فرانسه است و با نام "مقررات لرزه‌ای ساختمان‌های خاکی" می‌باشد. این آیین نامه با اشاره به انواع سازه‌های خاکی؛ به مناسب‌سازی و تست‌های اولیه خاک، روش‌های کنترل مقاومت فشاری و کششی، کنترل ترک‌ها و غیره در دیوارهای خشتی اشاره دارد. در ادامه توصیه‌هایی در خصوص شکل ساختمان، ضخامت و ارتفاع دیوارها، ابعاد و تناسبات درها و گشودگی‌ها بر روی دیوارهای خشتی، انواع تقویت کننده و موقعیت آنها در دیوارها اشاره دارد و با ارائه جزئیات اجرایی و فنی سعی در تبیین این استانداردها را داشته است.

۵-۳- آیین نامه خشت پرو^۹

آخرین آیین نامه خشتی کشور پرو با نام "توصیه‌های کلی برای ساختمان‌های خاکی تقویت شده" در سال ۲۰۱۷ به زبان اسپانیایی منتشر شد که این آیین نامه در سی صفحه به تبیین موضوع پرداخته است. در ابتدا با عنوان مقررات عمومی ساختمان، به معرفی استانداردهای کلی بناهای خاکی می‌پردازد. در این آیین نامه با تفکیک کشور پرو به چند حوزه از لحاظ ضرایب-زلزله؛ به ارائه ضوابط خاص در هر منطقه اشاره دارد. مباحث ضخامت دیوارها، ضرورت تقویت کننده‌های افقی و عمودی، رابطه بین طول، عرض و ارتفاع، نسبت میان عرض پنجره‌ها و گشودگی‌ها و تاکید بر اتصالات نرم در اجرای ساختمان‌های خشتی از موضوعات مورد اشاره در این آیین نامه بوده است. همچنین در نهایت به توصیه‌هایی درباره تاسیسات برقی و مکانیکی در این نوع ساختمان‌ها اشاره دارد.

۵-۴- آیین‌نامه خشت آمریکا (نیومکزیکو)^{۱۰}

آمریکا نیز از جمله کشورهایی می‌باشد که در حوزه آیین‌نامه بناهای خشتی پیش‌قدم بوده است و ایالت نیومکزیکو یکی از پیشگامان در حوزه آیین‌نامه‌ها و استانداردهای خشتی در آمریکا می‌باشد. این آیین‌نامه با عنوان "کدهای ساختمان‌های خاکی نیومکزیکو" شناخته می‌شود. آخرین ویرایشات این آیین‌نامه متعلق به سال ۲۰۱۵ می‌باشد. اگر چه پیش‌نویس‌هایی در سال ۲۰۱۹ "در خصوص نسخه جدید این آیین‌نامه تهیه شده است اما هنوز تایید نهایی را جهت چاپ به دست نیاورده است. در مجموع این آیین‌نامه بسیار کلی بوده است. در حوزه بناهای خاکی به دو نوع ساختار کلی بناهای خاکی از جمله ساختمان‌های خشتی و خاک کوب اشاره دارد. در کنار استانداردهای کلی درباره انواع سازه‌های خاکی، به آیین‌نامه اختصاصی در هر مورد می‌پردازد. در حوزه خشت نیز به دو نوع خشت از جمله خشت‌های معمولی و خشت‌های تثبیت شده اشاره می‌کند. در پایان نیز با ارائه جزئیات، به نحوه اتصالات، موقعیت در و پنجره‌ها و ابعاد آنها، همچنین موقعیت و نحوه استقرار نعل درگاه‌ها و غیره در این نوع از سازه‌ها اشاره دارد.

۶- تحلیلی بر عناصر تقویت‌کننده در آیین‌نامه خشت در کشورهای مورد مطالعه

از آنجا که هدف این مقاله بررسی و تحلیل تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه کشورهای مختلف جهت استحکام‌بخشی بناهای خشتی بوده است، لذا در ابتدا آیین‌نامه‌های مورد مطالعه در سه مقیاس واحدخشت، واحدبنا (دیوار) و بنا مورد مطالعه و مولفه‌های مورد توجه در این آیین‌نامه‌های مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه بخشی از استحکام‌بخشی بناهای خشتی وابسته به نوع خشت و ویژگی‌های کیفی آن و مقاومت واحدهای خشتی در مقابل فرسایش و توان فشاری و کششی آنها بوده است، اما از آنجا که هدف این مقاله تبیین و تحلیل نقش تقویت‌کننده‌ها در استحکام‌بخشی بناها می‌باشد، لذا تمرکز بر شناخت تقویت‌کننده‌ها در دو مقیاس دیوار و بنا بوده است.

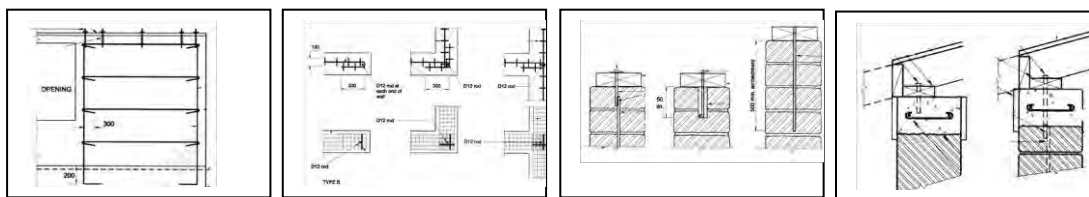
۶-۱- تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه نیوزیلند

در نیوزیلند جهت مقاوم‌سازی سازه‌های خاکی و بخصوص خشت راهکارهای متفاوتی ارائه شده است. تقویت‌کننده‌ها در بناهای خشتی در سه شکل؛ افقی، عمودی و صفحه‌ای می‌باشد که به لحاظ مصالح نیز تنوعی از مصالح از جمله فلز، بتن، چوب و شبکه‌های پلاستیکی را پیشنهاد می‌دهد ولی عمده تقویت‌کننده‌ها فلز و بتن می‌باشد. بهره‌گیری از آرماتورها به صورت افقی و عمودی و حتی به صورت مشبک و صفحه‌ای بر روی سطوح خارجی و داخلی دیوار با فاصله‌های تعریف شده، از راهکارهای عمده در این آیین‌نامه می‌باشد. راهکارهای دیگر عمدتاً به صورت بتن مسلح بوده است که در معمولاً در ترازهای کف و سقف قرار گرفته و به صورت افقی قابل کاربرد می‌باشد. در موارد نادری در این آیین‌نامه از شبکه‌های پلاستیکی و چوبی به صورت تقویت‌کننده‌های افقی در ترازهای مختلف و بخصوص در تراز اتصال دیوار به سقف استفاده می‌شود. با توجه به ضریب زلزله در مناطق مختلف این کشور، میزان متفاوتی از تقویت‌کننده در دیوارهای برشی پیشنهاد شده است (جدول ۳).

جدول ۳: تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه نیوزیلند. (ماخذ: نگارندگان)

انواع	جنس - مصالح	موقعیت	توضیحات
تقویت‌کننده‌ها	عمودی	داخل دیوار- خطی	تقویت‌کننده‌ها در حالت عمودی به صورت آرماتورهای فلزی در بین دیوارهای خشتی ظاهر می‌شوند.
		داخل دیوار- خطی	به صورت بسیار محدود در تراز سقف قرار می‌گیرد و راستاهای مختلف دیوار را به یکدیگر متصل می‌کند.
	افقی	داخل دیوار- خطی	به صورت آرماتورهای فلزی در ترازهای مختلف دیوار به فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند.

عموما به صورت بتن مسلح در تراز ارتفاعی سقف قرار گرفته و امکان اتصال دیوار به سقف را امکان پذیر می کند.	نواری	بتنی - بتن مسلح		
این عناصر به صورت شبکه پلاستیکی در ترازهای مختلف افقی دیوار قرار گرفته است.	صفحه‌ای	شبکه پلاستیکی		
به صورت شبکه آرماتور و عمودی در میانه دیوار قرار گرفته است.	سطوح داخلی	فلزی	صفحه‌ای	
به صورت شبکه مشبک آرماتور و عمودی در جداره خارجی دیوار خشتی قرار گرفته و به نمای دیوار متصل می شود.	سطوح خارجی			
به صورت شبکه مشبک آرماتور و عمودی در جداره خارجی و داخل - دیوار خشتی قرار گرفته است.	کل سطوح			



تصویر ۲: نمونه تقویت کننده‌ها در آیین نامه نیوزیلند. (ماخذ: NZS 4298.۱۹۹۸)

استفاده از مصالح سخت و غیر همگن با خشت از ویژگی‌های تقویت کننده‌ها در این آیین نامه می باشد. در مواردی نیز جهت اتصال متداخل تر آرماتورها با مصالح خشتی، پیشنهاد سوراخ کردن خشت‌ها جهت امکان ورود آرماتور به داخل آنها نیز داده شده است (تصویر ۲).

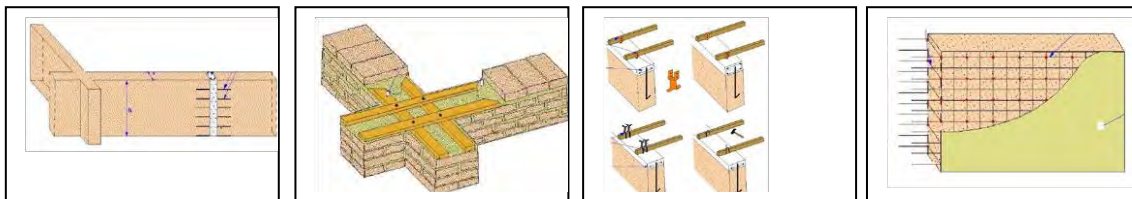
۶-۲- تقویت کننده در آیین نامه مراکش

آیین نامه سازه‌های خشتی در جهت مقاوم سازی بنا در کشور مراکش عمدتاً در جهت تاکید بیشتر بر مصالح بومی می باشد. بررسی عناصر تقویت کننده‌ها در این آیین نامه بیانگر آن است که این عناصر در سه گونه عمودی، افقی و صفحه‌ای قرار دارد. تقویت کننده‌های عمودی معمولاً به صورت دیوارهای برجسته و بیرون زده می باشد. در مواردی که از تقویت کننده‌های افقی استفاده شود این تقویت کننده‌ها عمدتاً به صورت چوب‌های چهارتراش بوده که در ترازهای مختلف قرار دارد و در گوشه‌ها به صورت کام و زبانه می باشد. در مواردی نیز از تقویت کننده‌های فلزی و بتنی استفاده می شود که در موارد فلزی به صورت مفتول های فلزی و شبکه‌های آرماتور در ترازهای مختلف دیوارها قرار دارد. در مواردی که از تقویت کننده‌های بتنی استفاده می شود عموماً این تقویت کننده‌ها در ترازهای فونداسیون و در محل اتصال دیوار به سقف قابل اجراء بوده است. در برخی موارد نیز آرماتورهای فلزی به صورت شبکه‌های فلزی بر روی سطح دیوار از یک طرف و یا از دو طرف قرار گرفته و پوسته‌نهایی بر روی آن کشیده می شود (جدول ۴).

جدول ۴: تقویت کننده ها در آیین نامه مراکش. (ماخذ: نگارندگان)

انواع	مصالح	موقعیت	توضیحات
عمودی	خشتی	خارج از دیوار	تقویت کننده‌ها به صورت دیواره آجری عمود بر دیوار اصلی و کوتاه بوده و به صورت تکیه‌گاه عمل می نموده است.
			به صورت افقی در تراز مختلف دیوار قرار می گیرد و راستاهای متعامد دیوار را به یکدیگر متصل می کند.
افقی	چوبی	خطی	به صورت آرماتورهای فلزی در ترازهای مختلف دیوار قرار گرفته است.
	فلزی	خطی	عموماً به صورت بتن مسلح در تراز ارتفاعی سقف قرار گرفته و امکان اتصال دیوار به سقف را امکان پذیر می کند.
صفحه‌ای	فلزی	سطوح داخلی	به صورت شبکه مشبک آرماتور و عمودی در میانه دیوار قرار گرفته است.

به صورت شبکه مشبک آرماتور و عمودی در جداره خارجی دیوار خشتی قرار گرفته و به نمای دیوار متصل می‌شود.	سطوح خارجی			
به صورت شبکه مشبک آرماتور و عمودی در جداره خارجی و داخل دیوار خشتی قرار گرفته‌است.	کل سطوح			



تصویر ۳: تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه مراکش. (ماخذ: RPCT, 2008)

در این آیین‌نامه علیرغم تلاش در جهت استفاده از مصالح طبیعی و بومی، همچنان استفاده از مصالح فلزی و غیرهمگن با مصالح خشت به صورت صفحه‌ای مشبک بر روی جداره‌های خشتی توصیه می‌شود. همچنین در مواردی توصیه به تقویت‌کننده‌های عمودی به صورت بتنی در دیوار می‌کند (تصویر ۳).

۶-۳- تقویت‌کننده در آیین‌نامه پرو

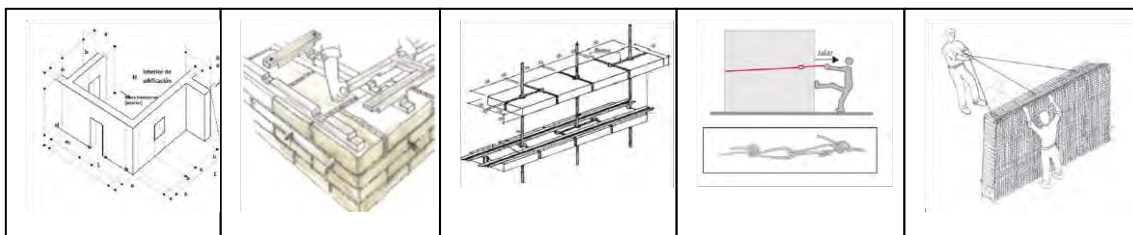
در راستای مقاوم‌سازی بناهای خشتی، آیین‌نامه کشور پرو استفاده از هرگونه مصالح غیر بومی و غیر طبیعی را به دلیل عدم همگن بودن با سازه‌های خشتی و تعارض در رفتار سازه‌ای منع کرده‌است. در این آیین‌نامه هیچ‌گونه مصالح فلزی و یا بتنی وجود نداشته‌است. تقویت‌کننده در این آیین‌نامه نیز در سه شکل عمودی، افقی و صفحه‌ای ظاهر می‌شود و عموماً از مصالح خشت، چوب و عناصر طنابی به دلیل قابلیت کشسانی و انعطاف‌پذیری آنها استفاده می‌گردد. در تقویت‌کننده‌های عمودی در صورت استفاده از مصالح خشتی، بیرون‌زدگی برجسته‌آجری در بخش اصلی دیوار ظاهر می‌شود. در مواردی که از مصالح چوبی استفاده شود عموماً از چوب‌های نیشکر توخالی و نی به صورت عناصر تک در فاصله‌های معین بین عناصر خشتی قرار می‌گیرد. در تقویت‌کننده‌های افقی نیز چوب‌ها بعضاً به صورت چوب‌های چهارتراش بوده که در محل گوشه‌ها به صورت کام و زبانه می‌باشد و در برخی موارد به صورت چوب‌های نیشکر و نی به صورت منفرد و فاصله‌دار در ترازهای مختلف جداره و بخصوص در تراز اتصال به سقف اجرا می‌گردد. در بسیاری از موارد به دلیل بالا بودن خطر زلزله در منطقه و جلوگیری از تخریب بنا از مصالح انعطاف‌پذیر و کشسانی به صورت طنابی و در سطوح مختلف داخلی و خارجی و یا هر دو استفاده می‌شود تا بتواند در مقابل زلزله یک رفتار یکپارچه و انعطاف‌پذیر را ایجاد نماید (جدول ۵).

در این آیین‌نامه استفاده از هرگونه مصالح غیربومی جهت تقویت‌کنندگی و استحکام‌بخشی به بناهای خشتی را رد می‌کند و عموماً از مصالح بومی، همگن و متجانس با مصالح خشتی به صورت‌های افقی، عمودی و صفحه‌ای بهره می‌گیرد (تصویر ۴).

جدول ۵: تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه مراکش. (ماخذ: نگارندگان)

توضیحات	موقعیت	مصالح	انواع	تقویت‌کننده‌ها
تقویت‌کننده‌ها در حالت عمودی به صورت چوب‌های نیشکر توخالی و نی بین دیوارهای خشتی قرار می‌گیرند.	داخل دیوار- خطی	چوبی	عمودی	
تقویت‌کننده‌ها در حالت عمودی به صورت چوب‌های نیشکر توخالی و نی در سطوح داخلی و خارجی دیوارهای خشتی قرار می‌گیرند.	خارج از دیوار- خطی			

	خشتی	خارج از دیوار	تقویت کننده‌ها به صورت دیواره آجری عمود بر دیوار اصلی و کوتاه بوده و به صورت تکیه‌گاه عمل می‌نموده‌است.
افقی	چوبی	نواری	به صورت افقی در تراز مختلف دیوار قرار می‌گیرد و راستاهای متعامد دیوار را به یکدیگر متصل می‌کند.
صفحه‌ای	طنابی	قسمتی از سطوح	به صورت مشبک‌طنابی در قسمتی از جداره خارجی دیوار خشتی قرار گرفته و به نمای دیوار متصل می‌شود.
		کل سطوح	به صورت مشبک‌طنابی در کل سطوح جداره داخلی و خارجی دیوار خشتی قرار گرفته و به نمای دیوار متصل می‌شود.



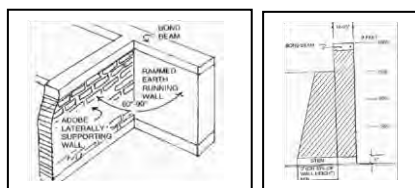
تصویر ۴: تقویت کننده‌ها در آیین‌نامه پرو. (ماخذ: PERU, 2017)

۶-۴- تقویت کننده در آیین‌نامه آمریکا (نیومکزیکو)

ایالت نیومکزیکو در آمریکا واجد استانداردهای خاص در حوزه سازه‌های خشتی بوده‌است. این آیین‌نامه، تقویت کننده‌ها به دو گونه افقی و عمودی را توصیه می‌کند. تقویت کننده‌های عمودی عمدتاً به صورت خشتی و به صورت بیرون‌زدگی در جداره دیوار بوده‌است. تقویت کننده‌های افقی نیز تنها به صورت نواری در تراز فونداسیون و تراز سقف می‌باشد که عمدتاً به صورت نوار بتن آرمه بوده و امکان کلاف کردن کل سازه بنا را فراهم می‌آورد (جدول ۶).

جدول ۶: تقویت کننده‌ها در آیین‌نامه آمریکا (نیومکزیکو). (ماخذ: نگارندگان)

توضیحات	موقعیت	مصالح	انواع	تقویت کننده‌ها
تقویت کننده‌ها به صورت دیواره آجری عمود بر دیوار اصلی می‌باشد که به صورت پشتبند عمل می‌کند.	خارج از دیوار	خشتی	عمودی	
این عناصر به صورت نواری افقی در دو تراز پایه دیوار و محل اتصال به سقف قرار گرفته و به صورت نواری در دو تراز تعریف شده، ادامه دارد.	نواری	بتنی	افقی	

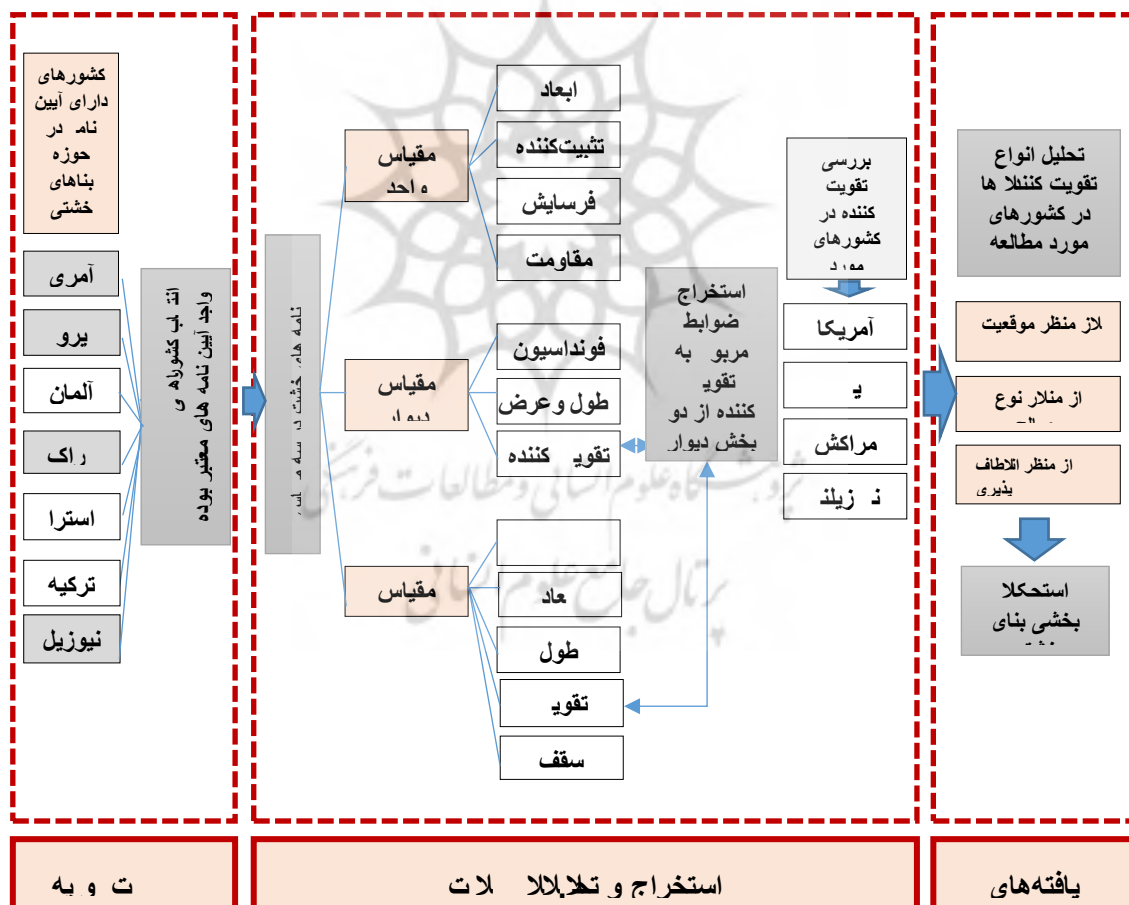


تصویر ۵: تقویت کننده‌ها در آیین‌نامه آمریکا (نیومکزیکو). (ماخذ: NMAC, 2019)

این آیین‌نامه به دلیل عدم زلزله‌خیزی محدوده مورد مطالعه، پیشنهادات محدودی برای تقویت بناهای خشتی مطرح کرده است. از سویی نوارهای بتنی مسلح به عنوان مصالحی غیرهمگن و غیرمتجانس با خشت به صورت افقی در ترازهای مختلف ارتفاعی بناهای خشتی پیشنهاد شده که بدون شک رفتارهایی غیرهمسان در زمان وارد شدن نیرو به بنا ایجاد خواهد کرد (تصویر ۵).

۷- یافته‌های پژوهش

استخراج احکام بکارگیری تقویت‌کننده در بناهای خشتی مستلزم گذر از یک فرآیند دقیق مطالعاتی جهت دستیابی به این راهکارها می‌باشد. با توجه به اینکه سقف در بناهای خشتی کشورهای مورد مطالعه به صورت سبک اجرا می‌شود لذا اهتمام ویژه در استانداردهای بناهای خشتی بر روی دیوارهای خشتی می‌باشد. این استانداردها در کشورهای مورد مطالعه بیان‌کننده آن است که در هر منطقه مبتنی بر زمان بروز رسانی استانداردها، مهارت دست‌اندرکاران و تجربه‌های بومی، تنوعی از مصالح و موقعیت متفاوت قرارگیری تقویت‌کننده‌ها در سازه‌های خشتی وجود داشته‌است. این مصالح واجد تنوعی از مصالح سخت تا نرم را شامل می‌شود که از جمله؛ فلز، بتن مسلح، چوب، خشت، شبکه‌ای پلیمری به صورت مش و عناصر طنابی بوده‌است. شیوه استفاده از آنها در مناطق مختلف بسته به مهارت و فن آوری‌های موجود در هر منطقه متفاوت بوده‌است (تصویر ۶).



تصویر ۶: فرآیند تحلیل تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه‌های خشت در کشورهای مورد مطالعه. (ماخذ: نگارندگان)

۷-۱- تحلیل تقویت‌کننده‌ها از منظر محل قرارگیری (موقعیت) در سازه‌خشتی

در آیین‌نامه‌های سه کشور نیوزیلند، مراکش و پرو می‌توان قرارگیری تقویت‌کننده‌ها به صورت افقی و عمودی و در حالت های خطی، نواری و صفحه‌ای را شاهد بود، در حالیکه که در نیومکزیکو تقویت‌کننده‌ها بسیار محدود و عمدتاً به صورت نواری می‌باشد. بررسی‌ها بیانگر آن است که محل استقرار تقویت‌کننده‌ها نقش بسیار مهمی در استحکام‌بخشی بناهای خشتی ایفا می‌نماید. تقویت‌کننده‌ها در بناهای خشتی یا در میان دیوار و سازه‌های خشتی پنهان می‌شوند و یا به صورت پوششی بر روی سطح داخلی و خارجی دیوارخشتی قرار می‌گیرند. بدون شک استفاده از تقویت‌کننده‌های پوسته‌ای در داخل دیوار، به دلیل دونیمه‌کردن دیوارخشتی امکان پذیر نمی‌باشد. در مواردی که پوسته‌های تقویت‌کننده بر روی سطح دیوار قرار می‌گیرند به واسطه کلاف‌هایی که در میان دیوار خشتی جاگذاری شده، امکان گره‌کردن این پوسته‌ها به دیوارخشتی فراهم‌شود. تقویت‌کننده‌های نواری و خطی بسته به جنس آنها عموماً در میان دیوار و یا سطح خارجی جداره خشتی قرار می‌گیرند. در مواردی که این عناصر به لحاظ جنس امکان شکستگی داشته و یا توان ایستادگی ضعیفی دارند این عناصر در میانه دیوارخشتی پنهان می‌شوند و در دیگر موارد به بخش بیرونی جداره‌خارجی دیوار منتقل می‌شوند. در مواردی که این عناصر تقویت‌کننده به صورت خطی می‌باشند عموماً در حالت افقی به صورت دوتایی در دو طرف پهنای دیوار و در حالت عمودی در وسط دیوار قرار می‌گیرند (جدول ۷).

جدول ۷: مقایسه تقویت‌کننده‌ها از منظر موقعیت قرارگیری (ماخذ: نگارندگان)

کشورها	از منظر موقعیت قرارگیری	مدل تقویت‌کننده
نیوزیلند	در بخش‌های مختلف دیوار به صورت افقی و عمودی	خطی، نواری، صفحه‌ای
مراکش	در بخش‌های مختلف دیوار به صورت افقی، عمودی	خطی، نواری، صفحه‌ای
پرو	در بخش‌های مختلف دیوار به صورت افقی، عمودی	خطی، نواری، صفحه‌ای
آمریکا (نیومکزیکو)	به تراز کف و سقف و به صورت افقی و عمودی	نواری

۷-۲- تحلیل تقویت‌کننده‌ها از منظر جنس مصالح و سازگاری با سازه‌خشتی

مطالعه آیین‌نامه‌ها بیانگر آن است که از حیث مصالح، تجربیات متنوعی در کشورهای مختلف وجود دارد اما در هر منطقه بسته به فن‌آوری، تجربیات و تبحر معماران، مصالح خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان آیین‌نامه‌های مورد مطالعه؛ کشورهای نیوزیلند و نیومکزیکو دارای عموماً مصالح غیرمتجانس با خشت و عمدتاً بتن آرمه و کشورهای مراکش و پرو عموماً به سمت مصالح طبیعی پیش‌رفته‌اند. همسازترین مصالح مورد استفاده در کشورهای مورد مطالعه خشت می‌باشد که عموماً به صورت تقویت‌کننده عمودی و به صورت پشتبند می‌باشد. در مواردی که طول دیوار زیاد باشد این عناصر نقش مهمی در استحکام‌بخشی و مقاومت دیوارهای خشتی طولی ایفا می‌کنند. از منظر جنس می‌توان از مصالح کاملاً طبیعی تا مصالح کاملاً مصنوعی را در میان تقویت‌کننده‌ها شاهد بود. به این ترتیب از مصالح خشت و چوب و طناب با الیاف طبیعی تا مصالح فلز و بتن آرمه و مش‌های پلاستیک استفاده شده‌است. همچنین به لحاظ نرمی و سختی تقویت‌کننده‌ها و سازگاری با مصالح خشتی نیز می‌توان از مصالح نرم طنابی، پلاستیکی و بعضاً چوبی تا مصالح خشتی و فلزی و بتنی را شاهد بود. بسته به میزان نرمی و سختی این مصالح محل استفاده از آنها به صورت افقی و عمودی و صفحه‌ای متفاوت بوده‌است. لازم به ذکر است مصالح نرم از جمله شبکه‌های مش پلاستیکی یا به صورت صفحه‌های عمودی بر روی سطح داخلی و یا خارجی جداره قرار می‌گیرند و یا به صورت نوارهای افقی در ترازهای مختلف داخل دیوار جاگذاری می‌شوند (جدول ۸).

جدول ۸ : مقایسه تقویت‌کننده‌ها از منظر نوع مصالح (ماخذ: نگارندگان)

کشورها	از منظر نوع مصالح
نیوزلند	استفاده از مصالح بتن آرمه، آرماتور، شبکه‌های پلاستیکی در بخش‌های مختلف
مراکش	استفاده از مصالح بتن آرمه، آرماتور، چوب و خشت (بصورت پشتبند عمودی) و تاکید بر مصالح نسبتاً بومی
پرو	استفاده از مصالح چوبی، خشتی و طنابی و تاکید بر مصالح کاملاً بومی
آمریکا(نیومکزیکو)	استفاده از مصالح بتن آرمه و بعضاً خشت (بصورت پشتبند عمودی)

۷-۳- تحلیل تقویت‌کننده‌ها از منظر سختی و نرمی و انعطاف‌پذیری

از آنجا که یکی از ویژگی‌های مهم انواع سازه‌ها و به خصوص سازه‌های خشتی رفتار همگن کل‌بنا و انعطاف‌پذیری آنها در برابر نیروهای زلزله می‌باشد لذا در انتخاب مصالح تقویت‌کننده فارغ از موقعیت و بعضاً جنسیت طبیعی یا مصنوعی، نرمی و سختی مصالح و همگن بودن آنها با مصالح خشتی در برابر نیروهای جانبی واجد اهمیت بسیار بوده‌است. بررسی تجربیات- عملی در کشورهای دارای تقویت‌کننده‌های سخت بیانگر آن است که عموماً مصالحی که سختی آن از مصالح خشتی بیشتر باشد در مقابل نیروهای زلزله مقاومت بیشتری از خود نشان داده و لذا در مقابل جابه‌جایی و نیروهای وارد بر سازه‌خشتی نه تنها نقش تقویت‌کننده را ایفا نمی‌کنند بلکه باعث تخریب سریع‌تر بنای خشتی می‌شوند. عمده تقویت‌کننده‌ها در آیین-نامه‌های کشورهای نیوزیلند و نیومکزیکو از این دسته می‌باشند. آیین‌نامه‌های کشورهای پرو و بعضاً مراکش که در سال‌های اخیر به روز رسانی شده‌است می‌توانند بیانگر این تجربیات عملی و اجرایی در خصوص تقویت‌کننده‌های نرم باشد. مصالحی مانند چوب و نی همسازی بهتر و رفتار سازگارتری با مصالح خشتی داشته‌اند. در مواردی که از مش‌های پلاستیکی و یا طناب با الیاف طبیعی استفاده شود این مصالح کاملاً حالت کشسانی داشته و می‌تواند سازگاری بسیار مناسبی را با مصالح-خشتی ایفا نماید. لازم به ذکر است که میزان این انعطاف‌پذیری بسته به اینکه در حالت افقی و یا عمودی استفاده شوند، متفاوت خواهد بود (جدول ۹).

جدول ۹ : مقایسه تقویت‌کننده‌ها از منظر نرمی و سختی مصالح (ماخذ: نگارندگان)

کشورها	از منظر نرمی و سختی و انعطاف‌پذیری مصالح
نیوزلند	عمدتاً از مصالح سخت استفاده می‌شود.
مراکش	عموماً ترکیبی از مصالح سخت و نرم استفاده می‌شود.
پرو	عمدتاً از مصالح نرم استفاده می‌شود.
آمریکا(نیومکزیکو)	عمدتاً از مصالح سخت استفاده می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

زلزله‌خیز بودن ایران نیازمند تدوین قوانین و اصولی است که مقاومت بناهای خشتی را در برابر زلزله و سایر نیروها تامین کند. در بسیاری از کشورهای پیشرفته ساخت بناهای خشتی واجد اهمیت بسیاری بوده و سالها است که دارای استاندارد و آیین-نامه‌های خاص بوده‌است. این استانداردها و آیین‌نامه که درباره تثبیت عناصر خشت، روش‌های استحکام‌بخشی، شکل و هندسه فضا، ضخامت دیوارها، ابعاد و موقعیت گشودگی‌ها و غیره در ساختمان‌های خشتی بوده‌است؛ به موضوع عناصر تقویت‌کننده در مبحث مقاومت‌سازی بناها در مقابل زلزله، اهمیت بسیاری داده‌است. در آیین‌نامه کشورهای مورد مطالعه؛ آمریکا (نیومکزیکو)، نیوزیلند، پرو و مراکش دارای تقویت‌کننده‌ها به صورت افقی، عمودی و صفحه‌ای وجود داشته که دارای تنوعی از مصالح خشت، چوب، بتن، فلز، نی و طناب بوده‌است.

جدول ۱۰: دسته‌بندی تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه کشورهای مورد مطالعه. (ماخذ: نگارندگان)

انواع	مصالح	موقعیت	کشور	تصویر
عمودی	چوبی	داخل دیوار	پرو	
	خشتی	خارج از دیوار	پرو- مراکش- نیومکزیکو	
	فلزی	داخل دیوار	نیوزیلند	
	بتنی	داخل دیوار	مراکش	
افقی	چوبی	خطی	مراکش- نیوزیلند- پرو	
	فلزی	خطی	نیوزیلند	
	بتنی	نواری	نیوزیلند- مراکش- نیومکزیکو	
	پلاستیکی	صفحه‌ای	نیوزیلند	
صفحه‌ای	فلزی	سطوح داخلی	مراکش- نیوزیلند	
		سطوح خارجی	مراکش- نیوزیلند	
		کل سطوح	مراکش- نیوزیلند	
	طنابی	قسمتی از سطوح	پرو	
کل سطوح		پرو		

در همه این آیین‌نامه مجموعه‌ای از عناصر به کمک سازه‌های خشتی آمده تا به استحکام بخشی آنها کمک کنند. این عناصر در شکل و شیوه‌های متفاوت استفاده می‌شود. تجربیات ساخت و ساز در برخی کشورها دلالت بر آن دارد که این عناصر کمکی بعضاً به عنوان عناصر الحاقی و غیرمتجانس با سازه‌های خشتی عمل نموده و حضور آنها باعث تضعیف سازه‌های خشتی می‌گردد. استفاده از آرماتورهای سخت و غیرمتجانس با سازه‌های خشتی در هر شکل، ابعاد و اندازه و در هر مکان نه تنها کمکی به تقویت بناهای خشتی نمی‌کند بلکه، امکان تخریب سریع‌تر و شدیدتر بناهای خشتی را در زمان زلزله باعث می‌شود. لذا تقویت‌کننده‌های نیوزیلند مورد نقد سازندگان و مجریان بناهای خشتی امروز دنیا قرار گرفته و آنها در صدد بازنگری و تجدیدنظر درباره این استانداردها برآمده‌اند. استانداردهای آمریکا در این خصوص بسیار محدود بوده‌است و تلاش می‌کند از حداقل عناصر تقویت‌کننده استفاده کند و تنها به صورت تقویت‌کننده‌های افقی بتنی عموماً بسنده کرده‌است. این درحالی است که کشورهای مراکش و پرو عموماً به سمت استفاده از مصالح طبیعی پیش‌رفته‌اند (جدول ۱۰).

از سویی مطالعه تقویت‌کننده‌ها بیانگر آن است که این عناصر از حالت تقویت‌کننده‌های سخت به سمت تقویت‌کننده‌های نرم و انعطاف‌پذیر در حال تغییر می‌باشد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد پرو و بعضاً مراکش تجربیات بسیار موفقی در این حوزه داشته‌است و با وجود زلزله‌خیز بودن منطقه، راهکارهای آنها توانسته‌است به کمک سازه‌های خشتی بیاید و بناها را در برابر نیروهای زلزله محافظت کند. استفاده از تقویت‌کننده‌های نرم و انعطاف‌پذیر که امکان سازگاری و رفتار مشابه را در زمان

زلزله ایجاد می‌کند می‌تواند پاسخ مناسبی به سازه‌های خشتی باشد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد در صورت استفاده از راهکارهای بومی و مصالح انعطاف‌پذیر در مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی، می‌توان حرکت‌های بسیار مناسبی در جهت تقویت این نوع سازه‌ها در مقابل زلزله به انجام رساند. بهره‌گیری از چوب‌های نی و نیشکر که قابلیت حرکت و انعطاف‌پذیری داشته است و از سویی استفاده از عناصر طنابی امکان حرکت سازگار تقویت‌کننده‌ها با سازه‌های خشتی را در زمان زلزله فراهم می‌آورد. بررسی نمونه‌ها نشان می‌دهد در صورتیکه بتوان از قابلیت پوشاندگی تقویت‌کننده‌ها استفاده نمود این عناصر می‌توانند بنای خشتی را تبدیل به یک کل یکپارچه نمایند و در مقابل نیروهای زلزله از گسیختگی آنها جلوگیری کنند. این عناصر پوشاننده عموماً به صورت پوسته‌ای در بیرون بنا ماهیت پوشاندگی جداره را دارند و یا به صورت ترکیب افقی و عمودی در میانه دیوار خشتی، نقش مقابله با نیروهای جانبی زلزله را به عهده می‌گیرند. لذا با توجه به تحلیل و دسته‌بندی تقویت‌کننده‌ها در آیین‌نامه کشورهای مورد مطالعه، میتوان توانایی هر یک از کشورها به لحاظ نوع رویکرد متفاوت می‌باشد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱: نقد و تحلیل آیین‌نامه‌های کشورهای مورد مطالعه از منظر عناصر تقویت‌کننده. (ماخذ: نگارندگان)

کشور	سال نشر	تحلیل
نیوزیلند	۱۹۹۸	به دلیل توصیه به تقویت‌کننده‌های فلزی و سخت و عدم تجانس با مصالح خشتی. در زلزله رفتار مناسبی را از خود نشان نمی‌دهد.
مراکش	۲۰۰۸	عموماً تاکید بر مصالح طبیعی و بومی داشته است و این مصالح را متجانس و هماهنگ با مصالح خشت در رفتار زلزله می‌داند.
پرو	۲۰۱۷	توصیه‌های این آیین‌نامه در حوزه تقویت‌کننده‌ها عموماً مبتنی بر مصالح بومی است که این مصالح را می‌توان جزء مصالح نرم و انعطاف‌پذیر معرفی نمود.
آمریکا (نیومکزیکو)	۲۰۱۹	توصیه‌های این آیین‌نامه در خصوص تقویت‌کننده‌ها بسیار محدود می‌باشد.

پی‌نوشت

۱. لازم به ذکر است تجربیات اجرایی بسیار ارزشمندی را اخیراً آقای مهدی صادق‌احمدی در خانه سنتی پنج‌دری در یزد به مرحله اجرا درآورده است. در این پروژه سعی شده با بهره‌گیری از تجربیات استاد کمالی (معمار سنتی) و همچنین تجربیات کشورهای مختلف در حوزه تقویت‌کننده بناهای خشتی بخصوص پرو، به اجرای طاق تالار خانه پنج‌دری بپردازد. اجرا و استحکام‌بخشی این طاق خشتی با بهره‌گیری از الیاف طبیعی و صفحات مش پلاستیکی بوده که در نوع خود تجربه خاصی می‌باشد.

- 2 . PERU: Norma E.080 Diseno Y Construcccion Con Tierra Reforzada, Published by Minister of Housing, 2017
- 3 . NZS 4297: New Zealand Standard, Engineering Design of Earth Buildings, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998
- 4 . NZS 4298: New Zealand Standard, Materials and Workmanship for Earth Buildings, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998
- 5 . NZS 4299: New Zealand Standard, Earth Buildings not requiring Specific Design, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998
- 6 . NMAC: New Mexico Historic Earthen Buildings, [USA] 2015
NMAC: IBC 2019 Pre-publication Adobe Code Text, [USA] 2019
7. NZS 4297: New Zealand Standard, Engineering Design of Earth Buildings, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998

NZS 4298: New Zealand Standard, Materials and Workmanship for Earth Buildings, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998

NZS 4299: New Zealand Standard, Earth Buildings not requiring Specific Design, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998

8 . MOROCCO: Draft Reglement Parasismique Des Constructions En Terre8, Published by Kingdom of Morocco Ministry of Equipment Public Equipment Department8, [Morroco], RPCT2008

9 . PERU: Norma E.080 Diseno Y Construcccion Con Tierra Reforzada, Published by Minister of Housing, 2017

10 . NMAC: New Mexico Historic Earthen Buildings, [USA] 2015, NMAC: IBC 2019 Pre-publication Adobe Code Text, [USA] 2019.



منابع و مآخذ

- تابش پور، محمدرضا و فرهنگ فر، حسن. (۱۳۸۴). مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌های خشتی. نشریه راه و ساختمان، شماره ۲۸.
- تابش پور، محمدرضا. (۱۳۸۶). بررسی ضوابط ساده طراحی ساختمان‌های بنایی (آجری، خشتی و سنگی). پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. تهران- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).
- حجازی، سید امیرمهرداد. حجازی، بینا. مهداد، حامد و حجازی، صبا (۱۳۹۴). مطالعه تخریب لرزه‌ای یک حجره خشتی در ارگ بم و ارائه طرح مرمت آن. دوفصلنامه علمی پژوهشی مرمت و معماری ایران. سال ۵. شماره ۹، ۸۶-۷۱.
- خوشبخت بهرمانی، شوکا و سپهری‌مقدم، منصور. (۱۳۹۱). ابنیه خشتی مقاوم در برابر زلزله، هویت‌شهر، سال ۶، شماره ۱۱، ۶۲-۵۳.
- درمحمدی، منصوره و رحیم‌نیا، رضا. (۱۳۹۶). تثبیت مکانیکی خاک و تبیین جایگاه آن در مصالح بومی اقلیم گرم و خشک. اقلیم گرم و خشک. سال ۵. شماره ۶، ۴۹-۲۹.
- ذات‌اکرم، وحید و زمانی‌فرد، علی (۱۳۹۷). استحکام بخشی لرزه‌ای ابنیه خشتی روستایی (مطالعه موردی: روستای تاریخی اصفهک- طبس). فصلنامه علمی فنی هنری اثر. شماره ۸۰، ۶۰-۴۱.
- رازانی، رضا. (۱۳۸۴). نگاهی به تجربیات کشورهای زلزله‌خیز در مقاوم‌سازی ساختمان‌های خشتی و آجری غیر مسلح و نکات مهم آیین‌نامه‌های ساختمانی اخیر نخستین همایش ملی استحکام بخشی ساختمان‌های بنایی غیر-مسلح و بناهای تاریخی. شهرداری شیراز، سایت مرجع دانش (سیویلیکا).
- رحیم‌نیا، رضا. محمودزاده، امین. تهرانی، فرهاد و زمانی‌فرد، علی. (۱۳۹۲). بازساخت تجربیات معماری بومی در جنوب خراسان، جهت حفاظت و مرمت معماری خشتی. مسکن و محیط روستا. شماره ۱۴۲، ۳۲-۱۹.
- طایفی‌نصرآبادی، عباسعلی و رشیدی‌مهرآبادی، محمدحسین. (۱۳۸۷). روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های بنایی و خشتی در برابر زلزله. مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی. سال ۱ پیش‌شماره ۲، ۷۰-۵۸.
- منصوری، فائقه. (۱۳۹۵). رساله کارشناسی ارشد. معماری اصول طراحی سازه‌های گلین مقاوم در برابر زلزله (با تمرکز بر ساخت و ساز با خاک در کشورهای با پهنه‌بندی زلزله مشابه ایران). دانشگاه یزد.
- وطن‌اسکویی، اصغر. افضلی، محمد. مددی پور، محمدرضا و بخشی، علی. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی دیوار خشتی تحت کشش قطری با رویکرد تقویت خشت و ملات. مسکن و محیط روستا. شماره ۱۵۴، ۱۲۴-۱۰۷.
- **NZS 4297:** New Zealand Standard, Engineering Design of Earth Buildings, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998
- **NZS 4298:** New Zealand Standard, Materials and Workmanship for Earth Buildings, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998
- **NZS 4299:** New Zealand Standard, Earth Buildings not requiring Specific Design, Published by Standards New Zealand, the trading arm of the Standards Council, 1998
- **PERU:** NORMA E.080 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA REFORZADA, Published by Minister of Housing, 2017.
- **MOROCCO:** Draft Reglement Parasismique Des Constructions En Terre, Published by Kingdom of Morocco Ministry of Equipment Public Equipment Department, [Morroco], RPCT2008.
- **NMAC:** New Mexico Historic Earthen Buildings, [USA] 2015.
- **NMAC:** IBC 2019 Pre-publication Adobe Code Text, [USA] 2019.

Original Research Article

Analysis Methods to Strengthen Adobe Structures with an Emphasis on Reinforcement elements based on Clay Regulations and Standards in New Zealand, Morocco, Peru and the United States

Somayeh Omidvari^{1*}

1- PhD in Architecture, Assistant Professor, Science and Arts University, Yazd, Iran.

Abstract

Today, more than a third of the world's population lives in earthen buildings. In Iran for centuries the use of building materials and bricks in the construction has been common. Cracks and failures of this buildings type during earthquakes and lacking of reinforcement is one of the problems which needs a careful study of the behavior of brick structures and analyzing the regulations of different countries for an appropriate solution. The use of different reinforcement is one of the suitable solutions for brick structures. In modern times, existing regulations in Iran have restricted the use of clay, despite its suitability and capabilities. In recent decades, many developed countries, have sought to regulate and register regulations and standards for construction on earth materials. Germany, Australia, the United States, Peru, Morocco, Turkey and some other countries have taken the lead in this issue and have strengthened it according to certain rules and standards. Based on the regulation this article selects New Zealand, Morocco, Peru and the United States buildings against earthquakes. This research, based on the content analysis method, tries to achieve reinforcing elements for the reinforcement of brick construction based on clay regulations in the studied countries, and emphasize the role of local and flexible materials in the reinforcement of buildings against earthquakes.

Keywords: Reinforcement, Reinforces, Adobe structures, Regulations.