



همایش علمی منطقه ای معماری کویر  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان  
فروردین ۸۵

# راهکارهای حفاظت از بناهای تاریخی در برابر زمین لرزه

## Seismic Protection Methods For Historical Buildings

امید زریبافیان  
Omid Zaribafian

کارشناس ارشد مهندسی زلزله  
عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان

MS of Earthquake Engineering  
Department of Civil Engineering , Azad Islamic University of  
ARDESTAN

اسفند ماه ۸۴  
February 2006

## راهکارهای حفاظت از بناهای تاریخی در برابر زمین لرزه

امید زریبافیان \*

### چکیده

بنا های تاریخی ایران ساختمان هایی است که عموماً از مصالحی نظیر خشت ، گل ، سنگ و چوب ساخته شده است . سه ویژگی عمده آسیب پذیری اینگونه بناها را در برابر حوادث طبیعی نظیر زمین لرزه بالا می برد که عبارتند از : فرسودگی مصالح ، مقاوم نبودن مصالح و سنگین بودن سازه . بر این اساس راهکارهای حفاظت این بنا ها در برابر زمین لرزه باید متضمن رفع این نواقص باشد . در این مقاله سعی شده است راهکارهای مختلف نظیر مقاوم سازی بناها به وسیله جایگزینی مصالح جدید ، ایجاد سازه های نگهدارنده ، جداسازی لرزه ای پایه در قسمت های مختلف بنا ، سبک سازی بنا ، مورد بررسی قرار گیرد و محدوده کاربرد هر یک از این روش ها برای بناهای مختلف تاریخی در ایران تعیین گردد .

**کلمات کلیدی :** بناهای تاریخی ، حفاظت لرزه ای ، مقاوم سازی ، جداسازی لرزه ای پایه

\* کارشناس ارشد مهندسی زلزله ، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان ، email : zaribafian@gmail.com

### 1- مقدمه :

ایران کشوری است که در منطقه ای کهن و تمدن خیز از جهان واقع شده است ، از طرفی به دلیل شرایط جغرافیایی دارای مناطق مختلف آب هوایی می باشد . از این رو در نقاط مختلف این سرزمین و در دوره های مختلف تاریخی تمدن های متعدد و به تبع آن اجتماعات انسانی ، شهرها و بناهای متعدد شکل گرفته است که برخی از آنها به طور کامل باقی مانده و از برخی نیز آثار و بقایای اندکی بجا مانده است که هر یک اهمیت ویژه ای در پیشینه تاریخی و فرهنگ و تمدن ما دارد . از این رو حفظ این آثار اهمیت ویژه ای دارد .

از طرفی ایران در منطقه زلزله خیزی از جهان واقع شده است و چون بناهای تاریخی نیز هم به لحاظ ضعف مصالح مصرفی و هم به دلیل فرسودگی و آسیب دیدگی در دوره های مختلف تاریخی و احیاناً مشکلات سازه ای و ... در وضعیت نامناسبی از ایمنی لرزه ای قرار دارند ، شناخت راهکارهای مناسبی که در این راستا بکار گرفته شود اهمیت ویژه ای دارد .

در بقیه کشورها که مشخصات مشابه ایران را چه از نظر لرزه خیزی و چه از نظر بناهای تاریخی دارند ، در این زمینه کارهای متعددی انجام داده اند که در مراجع [2] و [3] به آنها اشاره شده است . در ایران برای بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود دستورالعمل مبسوطی تهیه شده است ولی در مورد بناهای تاریخی هنوز مرجع مدونی وجود ندارد که به نوبه خود یکی از نیاز های مهم کشور می باشد .

### 2 – ویژگیهای سازه ای بناهای تاریخی

— خواص بناهای تاریخی را باید حول سه محور در نظر داشت : الف – انواع و خواص مکانیکی مصالح، ب – انواع المانها و فرمهای سازه ای و ج – ویژگیهای دینامیکی و رفتار بناهای تاریخی در برابر زمین لرزه .

#### 1.1 خواص مکانیکی مصالح

خشت، گل، آجر، سنگ، چوب و ملات، مصالح تشکیل دهنده بناهای تاریخی در ایران است که البته بسته به مکان و زمان احداث بنا، ترکیبات مختلفی از مصالح فوق مورد استفاده بوده است. صرفاً برای مقایسه خواص مکانیکی این مصالح با مصالحی نظیر بتن و فولاد که در



حال حاضر برای ساخت انواع سازه ها بکار می‌رود، جدول 1 اطلاعات مفیدی در اختیار می‌گذارد.

جدول 1 - خواص مکانیکی مصالح

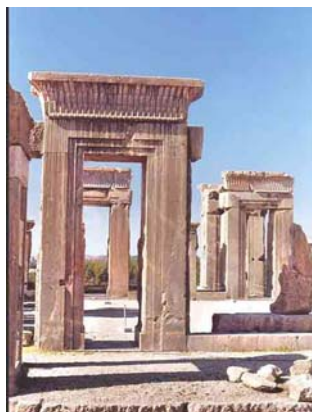
نام مصالح	مدول الاستیسیته (Gpa)	جرم حجمی ( kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری ( Mpa )
فولاد نرمه	200	7800	400
بتن معمولی	25	2300	28
سنگ گرانیث	70	2600	240
آجر فشاری	8/5	1700	8
خشت	4/5	2000	1/2
چوب صنوبر	9	600	37

همانطور که مشاهده می‌شود مشخصات مکانیکی مصالح سنتی بسیار نازل تر از مصالحی مانند بتن و فولاد است. به عنوان مثال مقاومت فشاری يك بتن معمولی حدود 23 برابر خشت می‌باشد. به همین دلیل اولین نقطه ضعف بناهای تاریخی در برابر زلزله، پائین بودن مقاومت مصالح تشکیل دهنده آنها است. ثانیاً باید اثر فرسودگی و خسارات وارد بر مصالح و اجزاء سازه ای آنها را نیز در نظر داشت که در این صورت میزان مقاومت مصالح در اینگونه بناها از آنچه در جدول 1 نیز آمده است بسیار کمتر خواهد بود. سومین نقطه ضعف مصالح در بناهای تاریخی آن است که تقریباً همه مصالح سنتی دارای گسیختگی ترد بر اثر اعمال بار می باشند و این نکته باعث آسیب پذیری بیشتر این مصالح در برابر زلزله خواهد بود.

## 2.2 انواع المانها و فرمهای سازه ای

ایران، به دلیل پیشینه تاریخی کهن و گستردگی سرزمین، در جای جای خود طی قرون و اعصار، بناهای باشکوه متعدد و متنوعی به لحاظ فرم معماری و سیستم سازه ای به خود دیده است. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف - بناهای سنگی: نظیر مجموعه کاخهای تخت جمشید که سیستم سازه ای تیر و ستون سنگی در آن به وضوح قابل مشاهده است (شکل 1). یا پلهای سنگی با دهانه‌های قوسی که بر روی رودخانه‌های متعددی قابل مشاهده است ویژگی مهم بناهای سنگی که یکی از نقاط ضعف مهم آنها در برابر زلزله نیز می‌باشد، سنگین بودن سازه می‌باشد که به همین دلیل در زلزله ها متناسب با وزن آنها نیروی جانبی بیشتری نیز بر آنها وارد می‌شود.



شکل (1) - تیر و ستون های سنگی تخت جمشید

ب - بناهای خشتی: در کاوشهای باستان شناسی که در تپه‌های سیلک کاشان انجام شده است کاربرد خشت خام، از هزاره سوم قبل از میلاد در بناهای مسکونی آن مشاهده شده است ساخت بناهای خشتی در هر دوره مورد توجه بوده است، زیرا به راحتی از خاک محل، خشت تهیه کرده و در بناها به مصرف می‌رسانده اند. به طور کلی بناهای خشتی قسمت قابل توجهی از بناهای ایران را چه در روستاها و چه در شهرکها و یا شهرهای بزرگ تشکیل



می‌داده است، چه بصورت بناهای عظیم منفرد مانند کاروانسراها، مساجد و کاخ‌ها، چه به صورت مجموعه‌هایی نظیر بازارها و بناهای مسکونی [1].  
از میان مجموعه‌هایی به جا مانده از بناهای خشتی می‌توان به ارگ بم اشاره کرد. که متأسفانه این مجموعه در زلزله دی ماه 1382 در بم، دچار آسیب‌های بسیار شدیدی شد. این بنای عظیم دارای حصارهای متعدد و دژهای مستحکم بود. بناهای مسکونی آن یک و دو طبقه و این مجموعه شامل واحدهای مسکونی عام نشین، حاکم نشین و سربازخانه‌ها بوده است (شکل 2).



شکل (2) - ارگ بم

سیستم سازه‌ای غالب در بناهای خشتی، عبارت است از دیوار باربر و انواع سقف‌های قوسی و گنبدی که در بعضی از موارد نیز از سقف‌های تخت تیر پوش با تیر چوبی استفاده شده است. نقطه ضعف اساسی بناهای خشتی در برابر زلزله، مقاومت بسیار پائین خشت و همچنین عدم انسجام بین المانهای سازه‌ای است.

ج - بناهای آجری: پیدایش ساختمانهای آجری در ایران را می‌توان از 1250 سال قبل از میلاد در بنای چغازنبیل دانست. علاوه بر اسکلت سازی این بنای آجری در سده‌های این معبد، آجر در دیوار سازی و طاق‌های سهمی به دهانه 4 متر و ارتفاع 3/8 متر کاربرد داشته که تا به امروز به یادگار مانده است. نمونه دیگر طاق کسری یا همان کاخ تیسفون است که تلفیقی از آجر، خشت و سنگ می‌باشد. در پل‌ها و سدهائی که از دوران ساسانیان به جا مانده است از آجر بسیار استفاده شده و قوس‌های مدور باربر با آجرهای مقاوم پوشش شده است. در بناهای دوران اسلامی نظیر مسجد جامع اصفهان، طاق پوش‌های مقاوم آجری همراه با اسکلت سازی بنا و ستون‌های باربر و پی سازی آجری بوجود آمده است. شاهکارهای دوران صفوی در اصفهان نظیر میدان نقش جهان نیز از جمله ساختمانهای آجری است. ساختمانهای آجری علی‌رغم آنکه مقاومت بیشتری نسبت به ساختمانهای خشتی و حتی سنگی در برابر زلزله دارند، ولی کماکان دارای همان نقطه ضعفها می‌باشند. فقط نکته مثبتی که در برخی از بناهای تاریخی آجری متأخر (مانند برخی از بناهای دوره صفوی) بیشتر دیده می‌شود استفاده از کلاف‌بندی‌ها و المانهای کششی در اینگونه بناها است که انسجام آنها را در برابر بارهای دینامیکی افزایش می‌دهد.



شکل (3) - عمارت عالی قاپو در میدان نقش جهان



### 3.2 ویژگیهای دینامیکی و رفتار بناهای تاریخی در برابر زمین لرزه

بنابر مشاهدات زلزله‌های گذشته علل فرو ریختگی بناهای تاریخی خصوصاً بناهای خشتی و آجری در برابر زلزله را در سه عامل می‌توان جستجو کرد. الف - خشت و آجر مصالح شکننده ای هستند، مقاومت کششی و شکل پذیری آنها بسیار پائین است. ب - اتصال بین قطعات آجر یا خشت بسیار ضعیف است به طوری که پس از چند سیکل ارتعاش در یک زلزله قوی، همبستگی بین اجزاء چه به صورت موضعی و چه به صورت کلی در المانهای سازه‌ای از بین می‌رود. ج - جرم زیاد اینگونه بناها باعث می‌شود نیروهای اینرسی بزرگی در اثر زلزله بر سازه وارد شود [2].

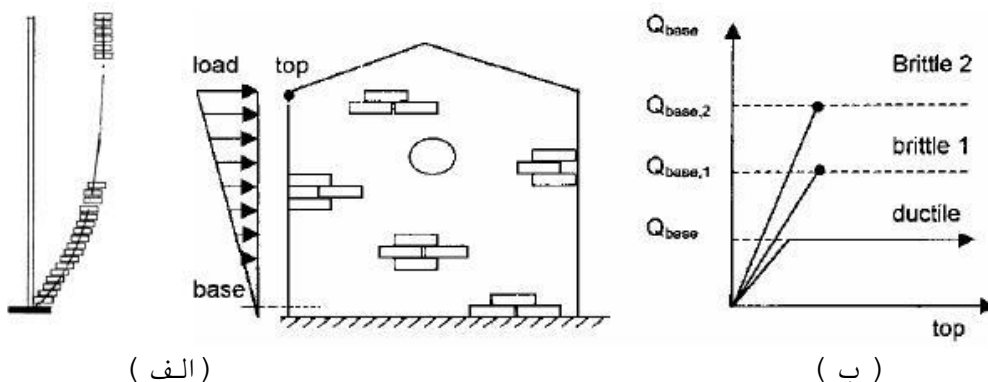
مودهای گسیختگی در اینگونه بناها عموماً عبارتند از : جدائی دیوارها، خمش خارج از صفحه، ترک در گوشه بازشوها، ترک در گنبدها خصوصاً در ناحیه تکیه گاهی خصوصیات دینامیکی بناهای تاریخی از دیدگاه طراحی لرزه‌ای بسیار نامطلوب است که به اختصار به موارد مهم آن اشاره می‌شود:

1 - پیروید اصلی ارتعاشی بناهای تاریخی (خصوصاً بناهای یک یا دو طبقه) در محدوده 0/1 تا 0/3 ثانیه قرار دارد به این معنی که سختی اولیه اینگونه سازه‌ها نسبتاً زیاد است و به همین دلیل اینگونه سازه‌ها به امواج لرزه‌ای پالس شکل که غالباً در زمین لرزه‌های میدان نزدیک اتفاق می‌افتند بسیار حساسند [2].

2 - اینگونه بناها به دلیل داشتن دیوارهای باربر با ضخامت زیاد (حداقل 60 سانتی‌متر) دارای جرم زیادی هستند به همین دلیل طبق قانون دوم نیوتن، نیروی اینرسی بیشتری ناشی از شتاب ایجاد شده در اثر زلزله، بر آنها وارد می‌شود در نتیجه بر اینگونه سازه‌ها نیروی جانبی بیشتری نسبت به سازه‌های متعارف با ابعاد هندسی مشابه وارد می‌شود.

3 - مصالحی که در ساخت بناهای تاریخی بکار رفته است به دلیل غیر همگن بودن و پائین بودن مقاومت کششی در آنها شکل پذیر نیستند و تاب تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک را ندارند به همین دلیل رفتار اینگونه بناها در برابر بارهای دینامیکی غیر شکل پذیر است و مودهای گسیختگی آنها، شکست‌های ترد را نشان می‌دهد. اطلاق انرژی دینامیکی در اینگونه بناها چندان معنایی ندارد و منحنی‌های هیستریزیس اینگونه بناها در برابر بارهای رفت و برگشتی کاملاً لاغر و با دامنه محدود می‌باشد.

شکل (4) رفتار بار - تغییر شکل برای یک سازه شکل پذیر و یک سازه ترد را با هم مقایسه کرده است. همانطور که در شکل (4) دیده می‌شود رفتار بناهای تاریخی در برابر بارهای جانبی عموماً یک رفتار برشی می‌باشد. یکی از راهکارهای حفاظتی، افزایش سختی و مقاومت بناهای غیر شکل پذیر است (شکل 4 - ب)



شکل (4) - الف : مدل رفتار برشی بناهای تاریخی در برابر بار جانبی ؛ ب : منحنی برش پایه - تغییر مکان بام تحت اثر بار جانبی استاتیکی فزاینده .



4- در برخی از بناهای تاریخی به دلیل نامنظمی در توزیع جرم و سختی در سیستم سازه ای بنا، مرکز سختی و مرکز جرم این بناها فاصله قابل توجهی دارند که باعث می شود، مودهای پیچشی در رفتار دینامیکی آنها غالب گردد. این مسئله می تواند بسیار ویرانگر باشد. نمونه چنین مسئله ای را می توان در بناهایی که دارای قطعات یا فضاهای اخافی به بدنه اصلی بنا است مشاهده کرد مثلاً در کاخ چهلستون اصفهان یا عمارت عالی قاپو که دارای ایوانهای وسیع با ستونهای چوبی هستند، این مسئله کاملاً مشهود است.

### 3- گام های اصلی در تهیه طرح بهسازی لرزه ای یک بنای تاریخی

تهیه یک طرح بهسازی لرزه ای برای یک بنای تاریخی مستلزم فعالیت های گوناگونی است که به طور کلی می توان در سه حوضه متفاوت تقسیم بندی کرد: 1- تعیین مشخصات بنا و وضعیت موجود آن، 2- تجزیه و تحلیل اطلاعات، 3- ارائه راهکارها و روش های بهسازی لرزه ای، که در ادامه به شرح مختصری از هر یک می پردازیم. فقط ذکر این نکته ضروری است که انتخاب هر یک از روشها و نحوه اجرای آنها بسته به اهمیت و ویژگی های بناهای مختلف، می تواند متغیر باشد.

### 3-1- تعیین مشخصات بنا و وضعیت موجود آن

اولین گام در تهیه یک طرح بهسازی لرزه ای شناخت دقیق از ویژگی های بنا و مشخصات محیطی آن است که از اهمیت ویژه ای برخوردار است زیرا مراحل بعدی بر نتایج این مرحله استوار است. در این مرحله به موارد زیر می توان اشاره کرد:

1- ارزیابی محیطی و شرایط ساختگاهی بنا: در این قسمت ویژگی های محیطی که بنا در آن واقع شده و اثر مستقیم بر بهسازی لرزه ای آن دارد مورد بررسی قرار می گیرد، از جمله: مطالعات ژئوتکنیک، تحلیل خطر لرزه ای و ریز پهنه بندی لرزه ای.

2- برداشت دقیق از موقعیت و وضعیت ظاهری بنا: تعیین ابعاد و اندازه ها و هندسه المان های مختلف نکته مهمی است که در مراحل بعدی، خصوصاً تهیه مدل ریاضی از سازه مورد نظر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. چنانچه در دیوارها یا سایر المانها ترک و یا هر گونه تغییر دیگری رخ داده است باید الگوی ترکها و ... بطور دقیق برداشت و ذکر شود.

3- تعیین مشخصات مکانیکی مصالح و بافت اجزاء: پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و ... از جمله مشخصاتی است که باید برای مصالح تشکیل دهنده اجزاء مختلف بنا تعیین گردد از طرفی مشخصات المان های بنا نظیر شکل مقطع دیوارها، جزئیات فونداسیون و ... و اجزاء تشکیل دهنده آنها و شیوه پیوند اجزا باید کاملاً مشخص باشد. این اطلاعات خصوصاً در مدل سازی بنا بسیار اهمیت دارند. برای تعیین پارامترهای فوق از انواع آزمایشهای خرب و غیر خرب، چه در محل بنا و چه در آزمایشگاه می توان بهره جست.

4- تعیین مشخصات دینامیکی سازه: پریودهای ارتعاشی و مودهای ارتعاشی سازه از جمله پارامترهایی است که هم برای تهیه مدل ریاضی سازه و هم برای پیش بینی رفتار سازه در برابر بارهای دینامیکی و هم برای ارزیابی وضعیت موجود بنا، بکار می آید برای تعیین این مشخصات می توان از آزمایشهای ارتعاش آزاد یا ارتعاش اجباری در محل سازه یا ثبت فرکانسهای ارتعاشی در محل بنا در اثر عوامل محیطی مثل وزش باد و ... بهره جست.

### 3-2- تجزیه و تحلیل اطلاعات

در این قسمت بر اساس اطلاعات بدست آمده از وضعیت موجود بنا و شرایط محیطی آن، میزان آسیب پذیری لرزه ای بنا و نقاط ضعف سازه مورد بررسی قرار می گیرد. که مهمترین ابزار برای اینکار تهیه مدل سازه مورد نظر می باشد این مدل می تواند به صورت مدل های فیزیکی با مقیاس های کوچکتر از سازه در آزمایشگاه تهیه شود و یا از مدل های تحلیلی به کمک نرم افزارهای رایانه ای ساخته شود. مدل فیزیکی بسته به بودجه ای که برای پروژه مورد نظر در نظر گرفته می شود ممکن است ساخته شود و یا از آن صرف نظر گردد ولی تهیه





مدل تحلیلی از ضروریترین قسمت‌های پروژه می‌باشد. خصوصاً تهیه مدل ساختمان‌های با مصالح بنائی پیچیدگی‌های خاص خود را دارد [3].

مؤثرترین روش برای مدل سازی و تحلیل دینامیکی و لرزه ای بناهای تاریخی، روش اجزاء محدود (FEM) می‌باشد. در این روش علاوه بر آنکه تمام المانهای سازه ای اینگونه بناها نظیر دیوارها، ستونها، تیرها، گنبدها، قوسها و... را می‌توان با دقت بالائی مدل سازی کرد، انواع ترک‌ها در مصالح را می‌توان به روشهای مختلف مدل سازی نمود: یک روش استفاده از گره‌های غیر متصل در دو وجه ترک برای المانهای متناظر، روش دیگر استفاده از المانهای ارتوتروپ که خواص مکانیکی آنها به موازات ترک و عمود بر آن با هم متفاوت است، یا استفاده از المانهای (GAP) که در برخی از نرم افزارها نظیر ANSYS قابل استفاده است [2].

در مورد تحلیل دینامیکی اینگونه بناها در برابر بارهای لرزه ای باید به این نکته توجه داشت که روشهای آنالیز مودال فقط در صورتی معتبر است که رفتار مصالح در محدوده الاستیک خطی باشد ولی از آنجا که همیشه می‌خواهیم در مورد اینگونه بناها وضعیت بنا را در حالت شکست نهائی المانها و نیروهای بحرانی بررسی کنیم، استفاده از روش تحلیل تاریخی زمانی غیر خطی برای اینگونه بناهای با ارزش قابل توجه و توصیه می‌باشد.

### 3-3 راهکارهای اجرایی

اصول و راهکارهای بهسازی لرزه ای بناهای تاریخی چندان تفاوتی با سایر ساختمانها ندارد، فقط ارزش فرهنگی و تاریخی اینگونه بناها از یک طرف، فرسودگی و آسیب دیدگی بسیاری از عناصر سازه ای از طرف دیگر و مهمتر از همه حفظ کلیت بنا و نماهای بیرونی و درونی بدون دست خوردگی بیش از حد، عوامل محدود کننده ای است که لازم می‌دارد روشهای بهسازی تا حد امکان ایمن، غیر مخرب، مؤثر و غیر آشکار باشند. به همین دلیل استفاده از انواع فن آوری‌های نوین هر چند با هزینه‌های بالا برای اینگونه ساختمانها قابل توجه است.

مهمترین راهکارها برای بهسازی لرزه ای بناهای تاریخی عبارتند از: افزایش ظرفیت باربری اجزاء سازه ای، ایجاد پیکر بندی منسجم و متناسب، کاهش بارهای قائم وارد بر سازه، بکار گیری سیستم جدا ساز لرزه ای، بکار گیری سیستم‌های جاذب انرژی، استفاده از سیستم کنترل فعال.

راهکارهایی که در بالا اشاره شد، هر یک می‌تواند شامل روشهای متنوع و متفاوتی باشد که بسته به شرایط و مقتضیات هر بنا انتخاب می‌شود. در بخش بعدی جزئیات هر یک تشریح خواهد شد.

### 4- راهکارها و روشهای بهسازی لرزه ای بناهای تاریخی

#### 4-1 افزایش ظرفیت باربری و تغییر شکل اجزاء سازه ای

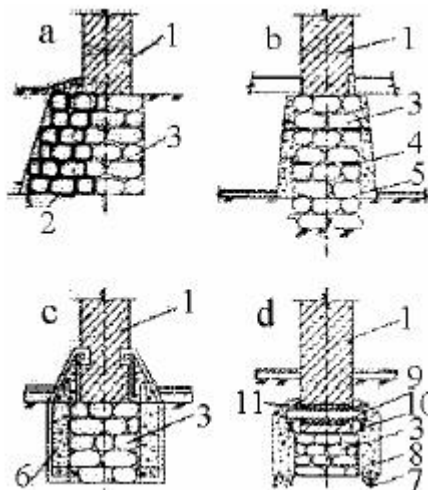
همانطور که در بخش دوم بیان شد مصالح و اجزائی که در ساخت بناهای تاریخی بکار رفته عموماً دارای ظرفیت باربری (فشاری، کششی، برشی و خمشی) پائینی هستند از طرفی این مصالح معمولاً مصالحی ترد و شکننده هستند و ظرفیت تغییر شکل بالائی ندارند به همین دلیل نمی‌توانند در استهلاک انرژی دینامیکی چندان مؤثر باشند. از این رو یکی از راهکارهای مقاوم سازی اینگونه بناها افزایش ظرفیت باربری و ظرفیت تغییر شکل اجزاء سازه ای تشکیل دهنده آنهاست که در اینجا به برخی از این روشها اشاره می‌شود:

#### 1- افزایش ابعاد مقطع

یکی از المان‌هایی که به خوبی می‌توان از این روش برای مقاوم سازی آن استفاده کرد، پی ساختمان است. در شکل (5) روشهای مختلفی نشان داده شده است. این روشها به منظور کاهش میزان تنش در سطح تماس پی با خاک زیر آن است. در حالت (a) سطح پی بوسیله مصالح سنگی جدید افزایش یافته است. برای اتصال بهتر مصالح جدید و مصالح قدیمی می‌توان از میلگردهای فولادی AIII به قطرهای 12 تا 16 میلی‌متر در فواصل 50 تا 60 سانتی‌متر استفاده کرد. در حالت (b) از پوشش بتنی در جداره های پی سنگی استفاده شده که در



اینجا نیز برای اتصال بهتر بتن و مصالح سنگی می‌توان میلگردهایی را به صورت افقی از میان درزهای سنگی در مقطع پی عبور داد و انتهای آنها را در پوشش بتنی مهار کرد. در حالت (c) مشابه حالت (b) از پوشش بتنی استفاده شده است با این تفاوت که در اینجا از بتن مسلح با میلگردهای افقی و عمودی استفاده شده است. در حالت (d) برای افزایش ظرفیت باربری بیشتر از پوشش بتنی به همراه تیرهای فولادی به فواصل  $1/5$  تا  $2$  متر استفاده شده است. در این حالت تیرهای فولادی عمود بر امتداد طولی پی در سوراخهایی به ابعاد حدود  $50\text{cm}$  در محل اتصال دیوار و پی، کار گذاشته می‌شوند و با بتن ریزی اطراف آنها در محل خود محکم می‌شوند پس از آن تیرهای فولادی طولی که نقش تکیه گاه برای تیرهای عرضی را دارند و در قسمت زیرین تیرهای عرضی واقع شده و با بتن محصور کننده اطراف پی، یکپارچه می‌شوند [2].



1. مصالح بنایی
2. مصالح بنایی جدید
3. مصالح بنایی قدیمی
4. میل مهار
5. پوشش بتنی
6. پوشش بتنی مسلح
7. ماسه
8. بتن الحاقی
9. تیر حمل
10. تیر طولی
11. بتن رویی

شکل (5) - روش های مقاوم سازی پی

## 2 - مسلح کردن اجزاء

یکی از نقاط ضعف بسیار مهم مصالح بنایی مقاومت ناچیز آنها در برابر تنش‌های کششی است به همین دلیل است که این مصالح رفتاری ترد و شکننده دارند و پتانسیل ایجاد ترک در آنها بسیار بالا است. از این رو یکی از روش‌های مقاوم سازی بناهای تاریخی و به طور کلی ساختمان‌های با مصالح بنایی بکارگیری مصالح کمکی است که بتوانند این نقطه ضعف مصالح بنایی را جبران نمایند و در جایی که تنش‌های کششی احتمال وقوع می‌یابند، بتوانند این تنش‌ها را تحمل نمایند. بسته به شرایط مصالحی که می‌توانند تنش‌های کششی را تحمل کنند عبارتند از چوب، فولاد و برخی از انواع پلیمرها خصوصاً پلیمرهای مسلح به الیاف. استفاده از چوب در بناهای تاریخی به عنوان عناصر کششی در بنا از همان ابتدا مرسوم بوده است و نقص عمده آن پائین بودن عمر مفید چوب و آسیب پذیری در برابر پوسیدگی، موربانه، آتش سوزی و ... است.

پس از پیدایش فولاد تا کنون از این مصالح در شکلهای مختلف آن نظیر پروفیل‌ها، کابل‌ها و تاندون‌ها و مهمتر از همه مش‌های فولادی برای مقاوم سازی بناهای تاریخی استفاده شده است. هنوز هم استفاده از مش‌های فولادی برای دور گیری (Confinement) مصالح بنایی بیشترین استفاده را دارد. فقط دو نقص مهم در استفاده از فولاد وجود دارد یکی خطر خوردگی و زنگ زدگی و دیگری چگالی بالای فولاد است که در صورت استفاده زیاد در بنا باعث افزایش جرم سازه می‌شود که خود منجر به افزایش بارهای لرزه ای وارد بر سازه می‌شود.

مصالح جدیدی که تحویلی بنیادین در مقاوم سازی ساختمانها بوجود آورده است، پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP) است. FRP ها متشکل از الیاف با مقاومت بالا هستند که در يك ماتریس رزینی قرار می‌گیرند. این الیاف می‌تواند از جنس کربن (CFRP)، شیشه

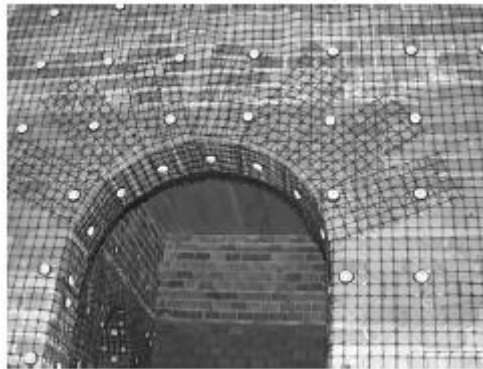




(GFRP) یا آرامید (AFRP) باشند. مقاومت کششی این الیاف در راستای طولی، چندین برابر فولاد است [4].

FRPها علاوه بر آنکه دارای مقاومتهای کششی بالایی هستند، دو مزیت دیگر نیز دارند که عبارت است از سبکی و دوام بالا در شرایط محیطی مختلف که باعث میشود در مقاوم سازی ساختمانهای موجود از جمله بناهای تاریخی قابلیت استفاده گسترده ای داشته باشند. FRPها را میتوان در شکلهای مختلف از جمله صفحه ای، نواری، میلگرد، کابل یا تاندون و مش (شبكة) تولید کرد [4].

یکی از روشهای بسیار مؤثر و ساده استفاده از شبکه (مش) های FRP است که در سطوح خارجی المانهای سازه ای از جمله دیوارها و ... بکار میرود. همانطور که در شکل (6) دیده میشود سهولت و انعطاف پذیری کاربرد این شبکه ها باعث میشود بتوان از آنها در سطوح مختلف اجزاء و بازشوها بهره جست. اثر دور گیری (Confinement) که کاربرد این شبکه ها در اجزاء مختلف و نواحی اتصال اجزاء مثل اتصال دیوارها و ... دارد باعث میشود ظرفیت باربری و ظرفیت تغییر شکل بناهای با مصالح بنائی به نحو چشمگیری افزایش یابد [3].



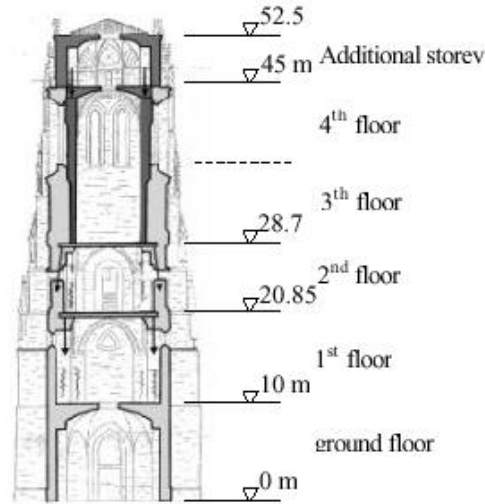
شکل (6) - تسلیح یک ساختمان آجری با شبکه های پلیمری

### 3 - پیش تنیدگی

روش پیش تنیدگی به روش پس کشیده از جمله روشهایی است که میتوان برای ترمیم و مقاوم سازی سازه های آسیب دیده خصوصاً در نواحی که تنشهای کششی باعث ایجاد ترک در مصالح و اجزاء ساختمان شده اند، بهره جست. در این روش با قرار دادن تاندونهای در نواحی مورد نظر (چه در داخل المانها و چه به صورت خارجی) و مهار کردن دو سر آنها با اعمال کشش در دو سر تاندونها باعث ایجاد تنشهای فشاری در المانهای سازه ای میشود که به این طریق میتوان میزان بازشدگی بسیاری از ترکها را کنترل کرد و یا تنشهای کششی را در قسمتهای مورد نظر حذف نمود که به این طریق ظرفیت باربری اجزاء سازه ای افزایش میابد [5].

### 4 - تزریق

یکی از روشهای ترمیم و مقاوم سازی اجزاء مصالح بنائی ترک خورده و یا پر کردن شکافها و حفره ها بین اجزاء مختلف استفاده از تزریق ملات (نظیر سیمانهای منبسط شونده گوت) و یا رزینهای مختلف است. در این حالت ماده تزریقی، حفره ها و خلل و فرج بین مصالح بنائی را پر میکند و باعث توزیع یکنواخت تر تنشها بین اجزاء مختلف میگردد که خود باعث افزایش ظرفیت باربری خواهد شد. البته استفاده از این روش در ترکیب با تکنیکهای دیگر نظیر مسلح نمودن مصالح میتواند نتایج مؤثرتری داشته باشد.



شکل (7) - برج کلیسای سنت ماری در تانگین

همانطور که در شکل (7) دیده می‌شود برای ترمیم برج کلیسای سنت ماری در تانگین از دو مرحله تزریق در طبقات اول و دوم در دیوارها استفاده شده است. در مرحله اول با استفاده از گروت با پایه سیمانی حفره‌ها پر شده و در مرحله دوم با تزریق رزین اپوکسی چسبندگی داخلی ملات و همچنین چسبندگی آن به مصالح قدیمی تقویت شده است [6].

#### 4-2 - ایجاد پیکر بندی منسجم و متناسب

رفتار مطلوب یک سازه در برابر بارهای لرزه‌ای و دینامیکی تابع ویژگی‌هایی متعددی است از جمله منظم بودن سازه در پلان و ارتفاع، تناسب هندسی اجزاء سازه‌ای و انسجام بین اجزاء مختلف سازه. در بسیاری از بناهای تاریخی با توجه به علوم مهندسی امروز نظیر دینامیک سازه‌ها، بسیاری از موارد فوق‌نقض شده است. به منظور رفع این نواقص می‌توان از روش‌های زیر بهره‌جست.

##### 1- رفع یا کاهش نامنظمی در بنا

موارد نامنظمی در بناهای مختلف می‌تواند به گونه‌های متفاوت ظاهر شود. به عنوان نمونه عدم تطابق فاحش مرکز جرم و مرکز سختی می‌تواند باعث بوجود آمدن مودهای پیچشی در رفتار دینامیکی سازه گردد که در مورد بناهای تاریخی می‌تواند بسیار ویرانگر باشد. در این مورد همانگونه که قبلاً نیز بیان شد در بناهایی نظیر عمارت عالی قاپو که دارای ایوانهای وسیع می‌باشند این مسئله به وضوح دیده می‌شود در این حالت می‌توان با تغییر سختی و نحوه توزیع آن در سازه به کمک اضافه کردن مهار بندهای پنهان این مسئله را تا حدودی برطرف کرد.

به عنوان نمونه دیگر بناهایی که از الحاق قسمتهای مختلف با پیوندهای ارتعاشی کاملاً متفاوت ساخته شده‌اند نمونه دیگری از نامنظمی می‌باشند به عنوان مثال مساجدی که از الحاق مناره‌های خیلی بلند به بدنه نسبتاً کوتاه صحن مسجد بوجود آمده‌اند دارای رفتار کاملاً نامناسب لرزه‌ای می‌باشند به این منظور یکی از راه‌های مقابله با این وضعیت ایجاد درز انقطاع بین دو قسمت متفاوت سازه است که البته با مطالعات فراوان و ایجاد تمهیدات ایمنی قابل انجام است.

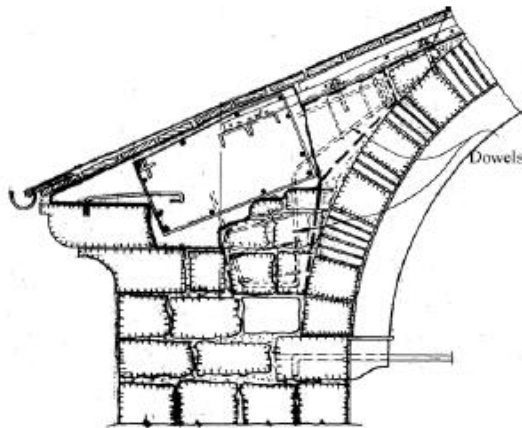
##### 2 - اصلاح تناسبات هندسی اجزاء

در برخی از بناها ابعاد نامتناسب بازشوها مثل طول یا ارتفاع زیاد و یا ابعاد نامتناسب دیوارها می‌تواند باعث ایجاد رفتار لرزه‌ای نامطلوب شود که می‌توان به کمک یکی از روش‌های بحث (L4) آنها را اصلاح نمود.



#### 4-3 - ایجاد سازه های نگهبان

در بسیاری از موارد چنانچه خود المانها توانایی تحمل یا انتقال بارهای وارده را نداشته باشند می‌توان با ایجاد المانهای جدید یا سیستم‌های سازه ای کمکی، بنای تاریخی را به لحاظ باربری و ظرفیت تحمل تغییر شکل ارتقاء داد. یکی از مرسوم‌ترین این روشها کلاف بندی اجزاء مختلف بنا به کمک المانهای کششی است. از کلاف بندی می‌توان در تراز پی برای بهم بستن پی‌های سازه و هم در تراز سقف و نواحی اتصال دیوارها و یا سایر اجزاء استفاده کرد. به عنوان نمونه دیگر همانطور که در شکل (8) دیده می‌شود قوس بتن مسلحی که در روی قوس موجود ساخته شده و قوس قدیمی به آن متصل شده، نقش سازه محافظ برای قوس موجود را دارد زیرا علاوه بر آنکه بارهای قائم و حتی افقی وارد بر قوس را تحمل می‌کند بلکه وزن مرده خود قوس را نیز تحمل می‌نماید [2].



شکل (8) - قوس بتنی مسلح بر روی قوس قدیمی

#### 4-4 - کاهش بارهای قائم وارد بر سازه

افزایش بارهای قائم علاوه بر اینکه ممکن است به بسیاری از المانهای سازه ای در بناهای تاریخی آسیب وارد نماید باعث افزایش جرم سازه شده و در نتیجه نیروهای اینرسی ناشی از زمین لرزه را افزایش می‌دهد. از این رو سبک سازی و کاهش جرم ساختمان یکی از راهکارهای مؤثری است که می‌توان ایمنی بنا را در برابر بارهای لرزه ای افزایش داد. اینکار می‌تواند به شیوه‌های مختلف صورت گیرد. یک روش کاهش جرم ساختمان بوسیله کاهش جرم اجزاء آن خصوصاً سقف است، در بسیاری از بناهای تاریخی سقف بنا بدون جهت دارای وزن زیادی است مثلاً با انباشته شدن لایه‌های مختلف کاهگل در دوره‌های مختلف، وزن سقف بی‌جهت سنگین شده است که با برداشتن لایه‌های اضافی و ایزولاسیون مناسب سقف می‌توان وزن سقف را به میزان قابل توجهی کاهش داد [1].

روش دوم که بیشتر یک روش مدیریتی است، کاهش سربارهای وارد بر طبقات مختلف بنا است. به عنوان نمونه اشیاء یا قطعات سنگینی که در طبقات فوقانی یک بنا وجود دارد و الزام خاصی در وجود آنها در طبقات فوقانی بنا وجود ندارد می‌توان به طبقه همکف و یا مکان مناسبی انتقال داد. یا نمونه دیگر کنترل سربار بوسیله کاهش بازدیدکنندگان و یا عدم ورود آنها به طبقات فوقانی بنا است. در همین مورد می‌توان به پله‌های تاریخی شهر اصفهان اشاره کرد. تا حدود سی سال پیش عبور اتومبیل‌های سواری از روی سی و سه پل اصفهان کاملاً مرسوم بود ولی با جلوگیری از عبور وسایل نقلیه سنگین کمک بسیار بزرگی برای کاهش صدمات وارد بر بنا به عمل آمد.

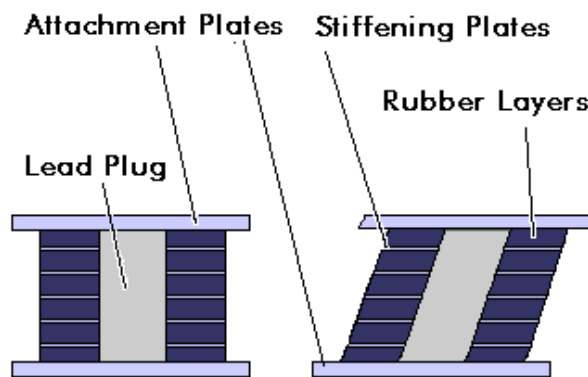
به عنوان روشی دیگر در این زمینه می‌توان به حذف باربرف بر روی بام بناهای تاریخی اشاره کرد. یکی از روشها آنست که با تعبیه تأسیسات حرارتی روی بام ساختمان از انباشت برف بر روی بام جلوگیری کرد.



#### 4-5 - جدا سازی لرزه ای

مفهوم جدا سازی لرزه ای در دو دهه گذشته پیشرفت گسترده ای داشته و امروزه تبدیل به روش تکامل یافته ای برای حفاظت لرزه ای ساختمانهای مختلف از جمله بناهای تاریخی شده است. ایده اصلی این روش بر اساس کاهش انتقال انرژی دینامیکی ناشی از زمین لرزه به ساختمان مورد نظر استوار است به این ترتیب که با افزایش قابل ملاحظه پریود ارتعاشی غالب سازه، اختلاف آن را با پریود ارتعاشی غالب زمین لرزه افزایش می دهد در این صورت انرژی انتقال یافته به سازه به نحو چشمگیری کاهش می یابد. این کار بوسیله جدا ساز (Isolator) هایی که دارای سختی افقی خیلی کم و میرایی مناسبی هستند، صورت می گیرد. این جدا سازها معمولاً از جنس الاستومرهای هستند که با صفحات فولادی برای افزایش باربری قائم تقویت شده اند. چنانچه از این جداسازها در تراز پایه ساختمان استفاده شود به آنها جداساز پایه می گویند. البته از جدا سازها می توان در تراز سقف برای جداسازی سقف و یا یک جزء منفرد استفاده کرد [7].

از این روش در بسیاری از سازه ها، پلها، نیروگاههای هسته ای استفاده شده است ولی استفاده از آن برای بناهای تاریخی پیچیده تر است. زیرا اولاً خصوصیات دینامیکی بناهای مختلف معمولاً متفاوت و تا حدودی ناشناخته است از این رو در مورد هر بنای تاریخی باید سیستم مناسب انتخاب و بکار گرفته شود، ثانیاً برای کاربرد جداسازی پایه معمولاً نیاز به یک پی گسترده زیر کل بنا می باشد که ساخت آن برای بنای موجود خود یک پروژه بسیار پیچیده و حساس است. یک نمونه از کاربرد این روش برای یک ساختمان قدیمی، سالن اجتماعات شهر سانفرانسیسکو در کالیفرنیا ایالات متحده است که در زلزله 1989 لوماپریتا دچار خسارتهایی شده بود [7]. شکل (9) یک نمونه جدا ساز لرزه ای را نشان می دهد.



شکل (9) - جداساز لرزه ای

#### 4-6 - سیستم های اتلاف انرژی غیر فعال

مطالعات و تجربیات اخیر نشان داده است که استفاده از سیستم های اتلاف انرژی غیر فعال قابلیت زیادی در کاهش خسارات لرزه ای در انواع سازه ها داشته اند. این سیستم ها انواع مختلفی نظیر: سیستم های ویسکوز، الاستوپلاستیک، ویسکوالاستیک و الکترومغناطیس دارند. سیستم های اتلاف انرژی، بخش اعظم انرژی دینامیکی را در خود مستهلک می نمایند و از آسیب رساندن به اجزاء سازه ای جلوگیری می کنند. یکی از انواع سیستم های جاذب انرژی با استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA) عمل می نماید [7].

آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA) فلزاتی هستند که دو خاصیت منحصر به فرد از خود نشان می دهند: 1 - انعطاف پذیری این مواد تقریباً مشابه با انعطاف پذیری یک قطعه لاستیک است. 2 - این مواد چنانچه پس از اعمال تغییر شکلهای زیاد در آنها، حرارت داده شوند، کاملاً به حالت اولیه خود باز می گردند. یکی از آلیاژهایی که در برابر خوردگی نیز مقاوم است آلیاژ نیکل و تیتانیوم (NiTi) می باشد.



در بهسازی و ترمیم کلیسای سن فرانسیس (شکل 10) در محل اتصال سقف جناح کلیسا از این سیستم اتلاف انرژی استفاده شده است [7].



شکل (10) - ترمیم کلیسای سن فرانسیس

#### 4 - سیستم کنترل فعال

سیستم کنترل فعال، متشکل از دستگاههای محرکی است که به طور همزمان در تعامل با حسگرها (Sensor) و کنترل کننده‌ها در سازه تعبیه شده و به وسیله یک پردازشگر مرکزی راهبری می‌شود. چنین سیستمی همزمان با اعمال تحریکات محیطی به سازه در اثر باد، زلزله و ... به کمک حسگرها و سیستم پردازشگر مرکزی، اطلاعات مربوط به میزان نیروها و تغییر شکل‌های تمپلی به سازه را دریافت و پردازش کرده و به وسیله سیستم‌های محرک خود نیروها و تغییر شکل‌های متضادی را در زمان بسیار کوتاهی در سازه ایجاد می‌کند، به طوری که اثر تحریکات محیطی را خنثی نموده و در نتیجه، سازه عملاً تغییر شکلها و نیروهای بسیار کمتری را در طول زمان تحریکات محیطی تجربه می‌کند.

ساختمانهای متعددی با این روش در برابر زلزله در آمریکا، ژاپن و چین، حفاظت شده‌اند ولی در مورد بناهای تاریخی هنوز در حد کارهای پژوهشی قرار دارد ولی در ایتالیا یک پروژه تحقیقاتی ملی برای حفاظت بناهای تاریخی در برابر زلزله در این مورد انجام شده است [3].

#### 5- نتیجه گیری

بناهای تاریخی به لحاظ ارزش فرهنگی از یک طرف، فرسودگی و آسیب دیدگی بسیاری از عناصر سازه ای آنها از طرف دیگر و مهمتر از همه حفظ کلیت بنا و نماهای بیرونی و درونی بدون دست خوردگی بیش از حد، عوامل محدود کننده ایست که لازم می‌دارد روش‌های بهسازی لرزه ای برای اینگونه بناها تا حد امکان ایمن، غیر مخرب موثر و غیر آشکار باشند. به همین دلیل استفاده از انواع فناوریهای نوین نظیر کنترل فعال، میراگرهای انرژی، جداسازهای لرزه ای در کنار روش‌های مرسوم، هر چند با هزینه‌های بالا برای اینگونه ساختمانها قابل توجیه است.

#### 6- مراجع

- [1] زمرشیدی، حسین، 1380، معماری ایران- اجرای ساختمان با مصالح سنتی، انتشارات زمرد، 1380
- [2] C.T. Christov, et al, ' State of Art of Technologies for Safeguarding Historic Structures in Bulgaria ' , VTU, Sofia, Bulgaria - 2002
- [3] A.Nappi, 'State of the Art on New Technologies for Safeguarding Cultural Heritage : A short Report and some Personal Points of view from Italy 'Department of Civil Engineering - University of Trieste - Italy - 2002
- [4] Shrive,N.G,'Use of Fiber Reinforced Polymersto improve Seismic Resistance of Masonry' , 6<sup>th</sup> congresso Nacional de sismologia e Engenharia Sismica, SISMICA 2004.
- [5] Ganz,H.R,'Post-Tensioned Masonary structures',VSL Report Series , Berne , Switzerland
- [6] Gemert,D.V, et al, ' Structural Consolation and Strengthening of Masonary : Historical Overview and Evolution', K.U. Leuven , Belgium - 2004



- [7] Clemente, P. , etal , ' Seismic Preservation of the Collective Memory' , International Conference ' choices and strategies for Preservation of the Clollective Memory' , Dobbiaco , 2002

## **Seismic Protection Methods For Historical Building**

Omid zaribafian

### **Abstract**

Historical buildings in Iran are buildings constructed of adobe , brick , mud stone and wood .Three important properties increase seismic vulnerability of historical building which are : material deterioration , unresistant material , structure's heaviness .According to that , seismic protection methods used for these buildings must include ways to reduce these problems . This paper includes different methods of historical building's seismic protection , such as : strengthening building by replacing new materials , create auxiliary structure , seismic base isolation and lightening .

**Key word :** Historical building , Seismic protection , Strengthening , Seismic base isolation