

آنالیز لرزه‌ای منارهای تاریخی آجری ایرانی*

مهرداد حجازی^(۱)سید محمد مویدیان^(۲)مریم داعی^(۳)

چکیده با توجه به ارتفاع زیاد منارها و مقاومت کششی ضعیف مصالح بنایی آجری، بررسی رفتار سازه‌ای آنها در برابر زلزله‌های آینده حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور در این مقاله نه منار تاریخی شهر اصفهان در دو حالت به صورت کامل و فقط پوسته‌ی خارجی، با استفاده از روش المان محدود غیرخطی مدل‌سازی شده‌اند. نتایج حاصل از آنالیزهای تاریخیچه زمانی غیرخطی دلالت بر این دارند که منارها تحت شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده بر مبنای ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ در مراحل ابتدایی دچار شکست از نوع ترک‌های کششی مورب در آجر و خردشدگی در مصالح می‌شوند. لذا در ادامه تأثیر چهار پارامتر شامل ارتفاع، مقاومت‌های کششی و فشاری مصالح، معیار شکست و میزان میرایی برای رسیدن به حالتی که منارها دچار شکست نشوند، بررسی شده است. تغییر متعارف در پارامترهای مذکور از شکست منارها جلوگیری در برابر زلزله نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی منار، مصالح بنایی آجری، تاریخی، ایران، زلزله، آنالیز تاریخیچه زمانی، رفتار غیرخطی.

Seismic Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets

M. Hejazi

S.M. Moayedian

M. Daei

Abstract According to high height and weak tensile strength of materials in minarets, it is necessary to study the structural behaviour of minarets under earthquake loading. Therefore nine historical brick masonry minarets in Isfahan have been modelled and analysed by applying the nonlinear finite element method for two cases: 1) the whole minaret, and 2) only the outer shell. Results show that all minarets fail due to inclined tensile cracks in bricks and bearing of materials under scaled ground motion records based on the 2800 code. Parametric study has been done to find situations in which the minarets do not undergo failure. Parameters have been the height of minarets, tensile and compressive strengths of materials, failure criterion, and damping ratio. Conventional variation of the parameters does not prevent the failure of minarets due to earthquakes.

Keywords Minaret, Brick Masonry Materials, Historical, Iran, Earthquake, Time History Analysis, Non-Linear Behaviour.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۵/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۳/۱۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

مقدمه

معماری در همه دوران‌ها از تأثیرگذارترین هنرهای ایران بوده است. بناها و عناصر معماری متعددی در این جاودانگی ازلی و ماندگی این هنر دخیل بوده‌اند. یکی از این عناصر که در هر دو دوره پیش و پس از اسلام نقشی چشمگیر و حضوری کم نظیر به عهده داشته منار است. ساخت منار در ایران پیشینه ۲۰۰۰ ساله دارد. با توجه به ویژگی‌های خاص مصالح بنایی آجری به کار رفته در این نوع سازه‌ها، از جمله مقاومت کم در مقابل تنش کششی و هم‌چنین با توجه به ارتفاع زیاد منارها این احتمال وجود دارد که بعضی از آنها در برابر زلزله‌های آینده دچار آسیب شوند، لذا با توجه به اهمیت تاریخی، فرهنگی و معماری منارها، بررسی رفتار سازه‌ای آنها لازم می‌باشد [۱].

به‌طور کلی یک منار از سه قسمت پایه (یا سکو)، بدنه (یا ساقه) و کلاهک (یا تاج) تشکیل شده است. با توجه به ارتفاع زیاد و مساحت کم قاعده، پایه مهم‌ترین نقش را در مقاومت منار داشته کوچک‌ترین سستی در این قسمت یا زمین زیر آن منجر به فروریختن بنا می‌شود.

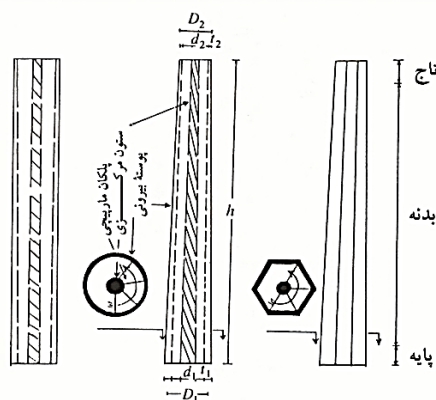
هر بدنه دارای بخش‌های دکل (ستون میانی)، پلکان و نورگیر می‌باشد. ستون میانی با مقطع چندضلعی یا به شکل استوانه‌ای است که پلکان مارپیچی به دور آن می‌چرخد و بالا می‌رود. نورگیرها به صورت روزنه‌هایی کوچک به اندازه جای خالی یک یا چند آجر و یا به صورت پنجره‌هایی بزرگ که گاهی جهت اذان گویی نیز از آنها استفاده می‌شده است، ساخته شده‌اند. اجزای سازه‌ای منار در شکل (۱) نشان داده شده است.

در تحقیقات انجام شده بر روی برج‌های تاریخی جهان می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد.

برج ناقوس «باتیز» در ایتالیا توسط «برناردسکی»

و همکارانش ابتدا تنها تحت وزن خود و سپس تحت بار وزن و بار افقی بررسی گردیده است. در واقع در این مدل‌ها رفتار لرزه‌ای لحاظ شده است. در این پژوهش توزیع ترک‌ها به صورت عددی به دست آمده و نتایج، تطابق خوبی با توزیع ترک‌ها در حالت واقعی داشته است [2]. آنالیز لرزه‌ای برج «آسینلی» در «بلوگنا» ایتالیا در سال ۱۹۹۸ توسط «ریوا» و همکارانش انجام شده است. در این پژوهش ارزیابی پایداری برج توسط حالاتی مشابه اتفاقات لرزه‌ای به صورت آنالیز دینامیکی غیرخطی روی مدل مشابه انجام شده است [3]. در سال ۲۰۱۰ میلادی مدل عددی جهت ارزیابی لرزه‌ای منار «قطب» در ترکیه توسط «پنا» و «لورنسو» انجام گرفته است که در آن به مقایسه‌ی نتایج استاتیکی و دینامیکی در برابر بارهای لرزه‌ای پرداخته شده است [4].

در این مقاله برخی از مهم‌ترین منارهای آجری تاریخی ایران تحت آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی از هفت شتاب نگاشت مناسب و مقیاس شده براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ با استفاده از روش المان محدود غیرخطی، در دو حالت منار به صورت کامل (شامل پوسته منار، ستون مرکزی و راه پله) و فقط پوسته خارجی، مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۱ اجزای سازه‌ای منار [5]

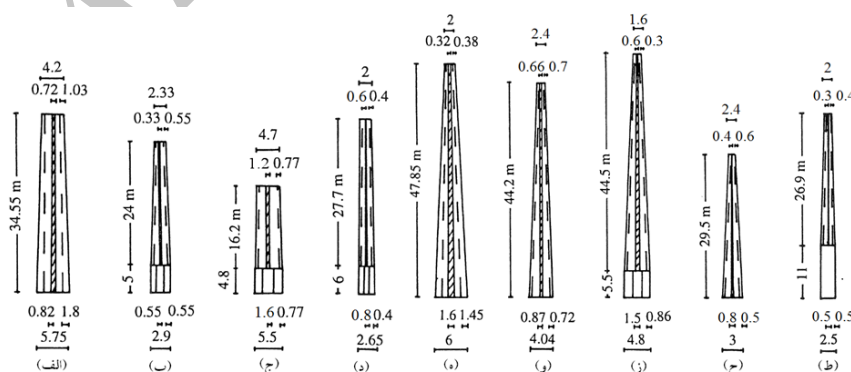
روش برای نحوه‌ی انجام محاسبات ماتریسی موجود است که در انجام این پژوهش از روش حل کامل استفاده شده است. در این روش تمامی خصوصیات خطی و غیرخطی مادی هندسی و المان‌های خطی و غیرخطی قابل اعمال می‌باشد. مدول یانگ (یا سختی به هر شکل ممکن) و چگالی (یا جرم به هر شکل ممکن) حداقل خصوصیات ماده‌ای است که بایستی تعیین شوند. هم‌چنین پارامتر انتگرالی گذرا ماهیت روش انتگرال زمانی نیومارک (روش حل ضمنی) را کنترل می‌کند.

برای انجام محاسبات از نرم‌افزار ANSYS [6] و المان solid65 استفاده شده است. این المان معمولاً برای تحلیل ترک‌خوردگی در کشش و یا له‌شدگی در فشار به کار می‌رود. این المان دارای هشت گره می‌باشد که در هر گره سه درجه آزادی وجود دارد. تغییر مکان‌ها در جهت‌های X و Y و Z سیستم مختصات گره‌ها هستند. به‌عنوان مثال این المان برای مدل‌سازی بتن تقویت شده و یا مواد مرکب تقویت شده مثل فایبرگلاس استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر ستون مرکزی و راه‌پله‌ی ماریچ درون منارها بر رفتار سازه‌ای آنها، آنالیزها در دو حالت (۱) منار به صورت کامل (شامل پوسته‌ی منار، ستون مرکزی و راه‌پله) و (۲) فقط پوسته‌ی خارجی انجام گرفته‌اند.

مشخصات منارهای مورد مطالعه و روش آنالیز

اوج هنر منارسازی در ایران به قرون پنجم و ششم هجری باز می‌گردد که در آن زمان تعداد قابل‌توجهی منار ساخته شد، و اصفهان از جمله شهرهایی است که در آن هنوز تعدادی از مهم‌ترین منارهای این دوره پابرجا هستند. از مهم‌ترین این منارها می‌توان به منارهای برسیان، چهل دختران، گار، سین، علی، ساربان، زیار، رهروان و باغ قوشخانه اشاره نمود. این منارها دارای ابعاد هندسی متفاوتی می‌باشند. در شکل (۲) ابعاد منارهای مورد مطالعه (واقع در اصفهان) نشان داده شده است. ارتفاع از حدود ۲۰ m تا بیش از ۵۰ m تغییر می‌کند. قطر خارجی در پایه بین حدود ۲/۵ m تا ۶ m، و در بالا بین ۲ m تا حدود ۵ m می‌باشد. ضخامت پوسته بیرونی از ۰/۴ m تا ۱/۸ m در پایه تا ۰/۴ m تا ۱ m در بالا متغیر است و قطر ستون مرکزی ۰/۳ m تا ۱/۶ m می‌باشد [5].

به‌منظور آنالیز این منارها از روش المان محدود تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. به‌کمک آنالیز دینامیکی گذرا (که گاهی به آن آنالیز تاریخچه زمانی هم می‌گویند) می‌توان به محاسبه‌ی پاسخ دینامیکی یک سازه تحت تأثیر بارگذاری‌های وابسته به زمان پرداخت. در این آنالیز می‌توان به محاسبه‌ی جابه‌جائی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها و نیروهای متغیر با زمان در یک سازه پرداخت. در آنالیز دینامیک گذرا سه



شکل ۲ مشخصات ابعادی منارهای مورد مطالعه: (الف) برسیان، ۴۹۱ هجری قمری؛ (ب) چهل دختران، ۵۰۱ هجری قمری؛ (ج) گار، ۵۰۵ هجری قمری؛ (د) سین، ۵۲۶ هجری قمری؛ (ه) علی، قرن پنجم تا ششم هجری قمری؛ (و) ساربان، ۵۴۹ هجری قمری؛ (ز) زیار، قرن پنجم تا ششم هجری قمری؛ (ح) رهروان، قرن پنجم تا ششم هجری قمری؛ (ط) باغ قوشخانه، قرن هشتم هجری قمری [5]

$$\sigma = (f_k / 4)[7(\varepsilon / \varepsilon_e) - 2(\varepsilon / \varepsilon_e)^2 - 2]$$

$$\sigma = (2.73 / 4)[7(\varepsilon / 7.5 \times 10^{-4}) - 2(\varepsilon / 7.5 \times 10^{-4})^2 - 2]$$

$$7.5 \times 10^{-4} \leq \varepsilon \leq 15 \times 10^{-4}$$
(۴)

$$f_{cb} = 1.2f_c = 1.2 \times 2.73 = 3.276 \text{ MPa} \quad (۵)$$

$$f_1 = 1.45f_c = 1.45 \times 2.73 = 3.96 \text{ MPa} \quad (۶)$$

$$f_2 = 1.725f_c = 1.725 \times 2.73 = 4.71 \text{ MPa} \quad (۷)$$

$$|\sigma_h^a| \leq 3^{1/2} f_c = 4.73 \text{ MPa} \quad (۸)$$

$$TFC = f_1 = 1 \text{ ضریب افزایش سختی ترک در کشش}$$

$$TFC = 0.6, f_1 \neq 1 \quad (۹)$$

$$\beta_t = 0.15^{[8]} \quad (۱۰)$$

$$\beta_C = 0.75^{[9]} \quad (۱۱)$$

که $f_1, f_2, f_{cb}, f_c, f_t$ و $|\sigma_h^a|$ به ترتیب مقاومت کششی تک‌محوری، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری دو محوری، مقاومت فشاری برای حالتی از فشار دو محوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می‌شود، مقاومت فشاری برای حالتی از فشار تک‌محوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می‌شود و تنش هیدرواستاتیک می‌باشند. در برخی از آنالیزها به منظور کنترل نتایج از معیار شکست دراکر - پراگر [11] نیز استفاده شده است. در این معیار شکست که مدت زمان زیادی است که برای مصالح بنایی مورد استفاده قرار می‌گیرد رفتار مصالح الاستیک - پلاستیک و بدون سخت‌شوندگی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح $\Phi = 38^\circ$ و ضریب چسبندگی $C = 0.1 \text{ MPa}$ به برنامه نسبت داده می‌شود [8-10].

برای پیش‌بینی شکست منارها معیارهای شکست اشاره شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که معیار شکست برآورده نشود، این بدین معنی خواهد بود که ترکیب تنش‌های ایجاد شده باعث شکست منار خواهد شد.

برای بررسی میزان آسیب‌پذیری نه منار یادشده پس از مدل‌سازی، تحت بارهای ثقلی و زلزله مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بدین منظور هفت شتاب‌نگاشت متناسب با شرایط حرکت واقعی زمین در محل احداث منارها انتخاب می‌شوند و با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ به منارها نسبت داده و سپس آنالیز تاریخی‌چپه‌ی زمانی غیرخطی انجام می‌شود.

مدل‌سازی رفتار مصالح بنایی به کار رفته در منارها

خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده که در تحقیقات پیشین [7] به دست آمده‌اند، در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. با استفاده از نتایج تجربی حاصل شده در مطالعات قبلی [8] می‌توان رابطه‌ی تنش- کرنش برای ترکیب آجر و ملات را به صورت یک نمودار خطی - سهمی براساس روابط (۱) و (۲) بیان نمود.

$$\sigma = E\varepsilon_e, \quad \varepsilon \leq \varepsilon_e \quad (۱)$$

$$\sigma = (f_k / 4)[7(\varepsilon / \varepsilon_e) - 2(\varepsilon / \varepsilon_e)^2 - 2]$$

$$\varepsilon_e \leq \varepsilon \leq 2\varepsilon_e \quad (۲)$$

$$\varepsilon_e = 0.75f_k / E$$

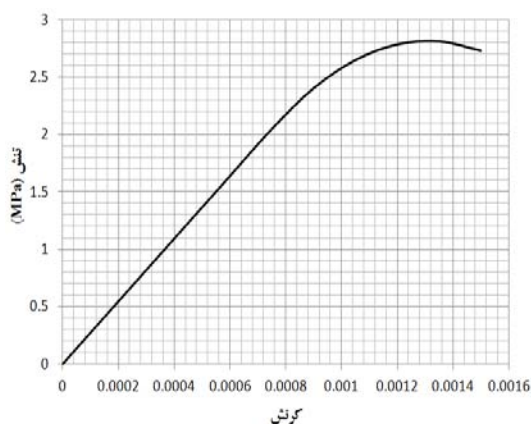
که در آن f_k مقاومت فشاری و E مدول الاستیسیته‌ی مصالح ترکیبی آجر و ملات می‌باشند. برای مصالح موجود در منارهای مورد مطالعه، با قراردادن مقادیر جدول (۱) در روابط (۱) و (۲)، رابطه‌ی تنش-کرنش به صورت روابط (۳) و (۴) در می‌آید که در شکل (۳) نشان داده شده است.

در همه‌ی آنالیزها از معیار شکست ویلام-وارنک [9] که مخصوص مصالح ترد و شکننده می‌باشد استفاده شده است. پارامترهای این معیار شکست برای ترکیب مصالح آجر و ملات برای استفاده در نرم‌افزار ANSYS براساس روابط (۵) تا (۱۱) محاسبه و در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

$$\varepsilon_e = 0.75f_k / E = 0.75 \times 2.73 / 2370 = 7.5 \times 10^{-4} \quad (۳)$$

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل دهنده ی منارها [7]

ترکیب آجر و ملات	ملات	آجر	خصوصیات مکانیکی
۱۵۳۰	۱۶۰۰	۱۳۳۰	جرم حجمی (kg/m ³)
۲۷۳۰	۱۳۰۰	۵۳۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	ضریب پواسون
۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۵۳	مقاومت کششی (MPa)
۲/۷۳	۱	۵/۳	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۶x ۱۰-۵	۰/۶x ۱۰-۵	۰/۶ x ۱۰-۵	ضریب انبساط حرارتی (m/m/°C)



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش ترکیب آجر و ملات منارها

جدول ۲ پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک برای ترکیب مصالح آجر و ملات برای استفاده در نرم افزار ANSYS

βt	βc	ft (MPa)	fc (MPa)	fcβ (MPa)	σ _{ha} (MPa)	f1 (MPa)	f2 (MPa)	TCF
۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۲۷	۲/۷۳	۳/۲۷۶	۴/۷۳	۳/۹۶	۴/۷۱	۰/۶

بررسی رفتار منارها تحت اثر بار ثقلی

با انجام آنالیز استاتیکی، تنش‌ها در سازه تحت اثر وزن سازه محاسبه شده است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شود، تنش‌های ایجاد شده تحت بار وزن کمتر از مقاومت مصالح می‌باشند. برای نمونه توزیع تنش محوری در پوسته خارجی و پلکان مارپیچ منار چهل دختران در شکل (۴) نشان داده شده است.

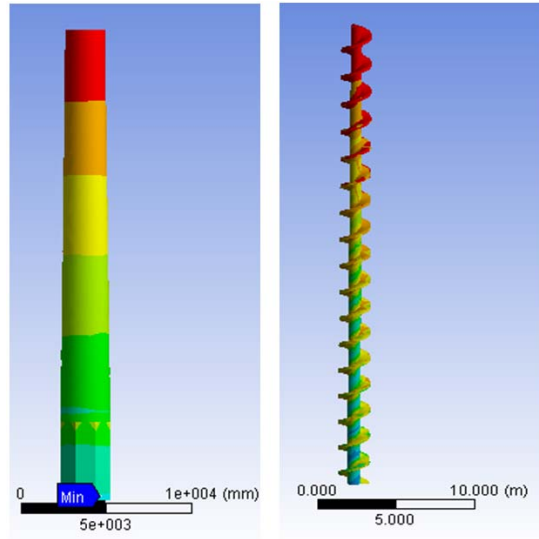
محاسبه مشخصات دینامیکی منارها

در آنالیز مودال، خصوصیات دینامیکی یک سازه نظیر فرکانس‌های تحریک، مقادیر میرایی و اشکال

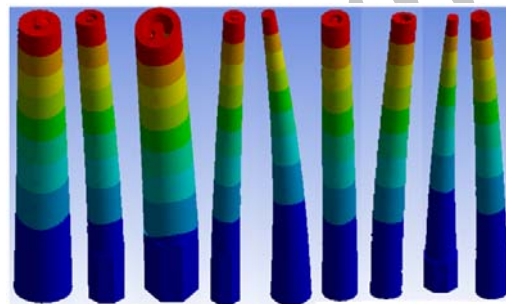
تغییر شکل یافته‌ی سازه که به آن شکل‌های مودی گفته می‌شود، استخراج می‌گردد. نتایج مربوط به فرکانس‌های ناشی از ۶ مود اول هر یک از منارها برای مقایسه در جدول (۳) و تغییر شکل منارها در مود اول در شکل (۵) آورده شده است. با توجه به نتایج این آنالیز می‌توان نتیجه گرفت که در همه‌ی موارد، فرکانس منار کامل کمتر از فرکانس پوسته‌ی منار و یا حداکثر با آن برابر است. در منار کامل وجود ستون و راه‌پله‌ها باعث افزایش جرم و کاهش فرکانس منارها می‌شود. لازم به ذکر است به علت انجام آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی، برای میرایی هر منار از میرایی رایلی

منارها و نسبت میرایی بحرانی ۵٪ محاسبه گردیده است.

استفاده شده است. در آنالیز منارها، ضرایب میرایی رایلی از روی فرکانس‌های اولین و دومین مود ارتعاشی



شکل ۴ توزیع تنش در منار چهار دختراں تحت بار وزن

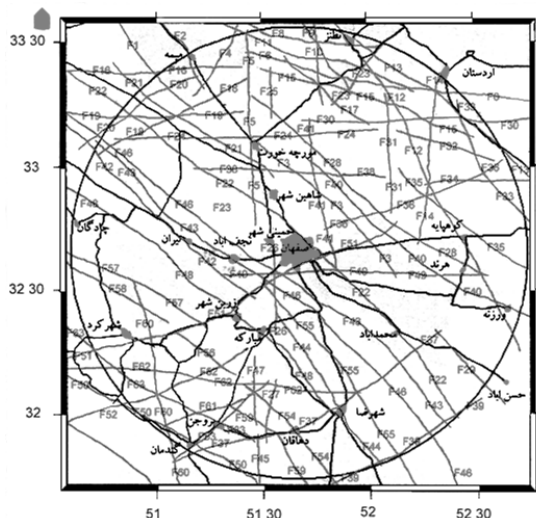


شکل ۵ تغییر شکل منارها در مود اول (به صورت کامل): به ترتیب از چپ به راست: منار برسیان؛ منار چهار دختراں؛ منار گار؛ منار سین؛ منار علی؛ منار ساریان؛ منار زیار؛ منار رهروان؛ منار باغ قوشخانه

جدول ۳ نتایج مربوط به فرکانس‌های (Hz) ناشی از ۶ مود اول منارهای مورد مطالعه

	ساریان	باغ قوشخانه	رهروان	زیار	علی	سین	گار	چهل دختراں	برسیان
مود ۱	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۷۳	۰/۵۸	۰/۷۸	۰/۵۵	۲/۳۴	۰/۷۹	۱/۰۹
مود ۲	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۷۳	۰/۵۸	۰/۷۸	۰/۵۵	۲/۶۵	۰/۷۹	۱/۰۹
مود ۳	۲/۲۵	۲/۲۳	۳/۹۶	۲/۰۰	۲/۶۴	۲/۸۰	۵/۳۷	۴/۱۴	۵/۱۶
مود ۴	۲/۲۵	۲/۲۳	۳/۹۶	۲/۰۰	۲/۶۴	۲/۸۱	۱۱/۹۰	۴/۱۴	۵/۱۶
مود ۵	۵/۵۰	۵/۸۱	۸/۵۶	۴/۵۳	۵/۹۰	۷/۱۸	۱۱/۸۷	۹/۰۹	۸/۰۶
مود ۶	۵/۴۵	۵/۸۱	۱۰/۰۳	۴/۵۳	۵/۹۰	۷/۱۸	۱۵/۵۱	۱۰/۴۷	۱۱/۰۷

طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵٪ تعیین می‌گردد و طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵٪ تعیین می‌گردد و طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب می‌شود و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته می‌شود.



شکل ۶ تعداد ۶۳ گسل شناخته شده تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری اصفهان [۱۵]

جدول ۴ مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

شماره	نام زلزله	تاریخ	بزرگا (M)	ماکزیمم شتاب زمین (g)
۱	دریاچه گیوته	۱۹۷۹	۵/۷	۰/۲۴۸
۲	مورگان هیل	۱۹۸۴	۶/۲	۰/۲۱۲
۳	نورت ریچ	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۲۴۵
۴	پارک فیلد	۱۹۶۶	۶/۱	۰/۲۴۶
۵	سان‌فرناندو	۱۹۷۱	۶/۶	۰/۲۱
۶	سوپرستیشن هیل	۱۹۸۷	۶/۷	۰/۲۴۷
۷	ویتر نروز	۱۹۸۷	۶	۰/۲۴۳

انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای انجام آنالیز دینامیکی
با توجه به مبنا قرار دادن استاندارد ۲۸۰۰ [12] به منظور انجام آنالیز تاریخیچه زمانی، می‌بایست شتاب‌نگاشت تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام زلزله باشد. بدین منظور باید حداقل سه و یا هفت زوج شتاب‌نگاشت با ویژگی‌های عنوان شده در استاندارد ۲۸۰۰ در آنالیز مورد استفاده قرار گیرد.

منارهای مورد مطالعه در محدوده استان اصفهان واقع شده‌اند. ماکزیمم شتاب زمین با احتمال رویداد ۱۰٪ در ۵۰ سال در شهر اصفهان از ۰/۱۸g تا ۰/۳۲g متغیر می‌باشد، که این مقدار در استاندارد ۲۸۰۰ ایران برابر ۰/۲۵g تعیین شده است. هم‌چنین زمین منطقه‌ی مورد مطالعه طبق استاندارد ۲۸۰۰ از نوع ۲ و ۳ می‌باشد، که در جهت اطمینان نوع ۳ در نظر گرفته شده است [13].

با توجه به این‌که اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های رخ داده در منطقه‌ی مورد مطالعه در دسترس نیست، زلزله‌های واقعی اتفاق افتاده در مناطق دیگر که با شرایط تکتونیکی و لرزه‌ای اصفهان مطابقت دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین منظور از اطلاعات لرزه‌ای جمع‌آوری شده توسط دانشگاه برکلی استفاده شده است [14].

با توجه به گسل‌های شناخته شده تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری اصفهان (شکل ۶)، اطلاعات مذکور مربوط به هفت زلزله با بزرگای بین ۴ تا ۶/۵ ریشتر و تا شعاع ۱۰۰km، و دارای سرعت برشی خاک بین ۱۸۰m/s تا ۳۶۰m/s (USGS-C) (زمین نوع ۳) می‌باشد. ماکزیمم شتاب زمین در شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۲ g می‌باشد. مشخصات این هفت زلزله در جدول (۴) ارائه شده است.

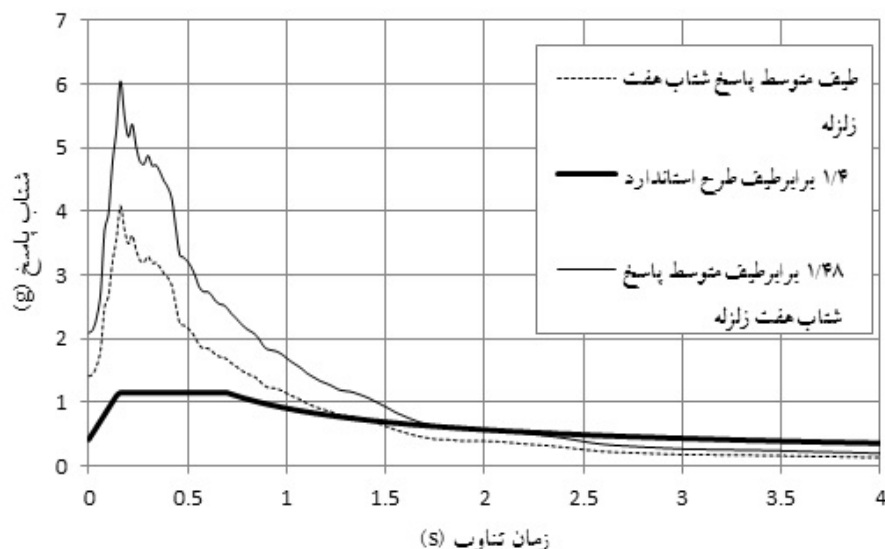
به منظور مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها براساس استاندارد ۲۸۰۰، ۷ زوج شتاب‌نگاشت معرفی شده در جدول (۴) به مقدار حداکثر خود مقیاس شده است.

برای منار رهروان در دو حالت کامل و فقط پوسته در شکل‌های (۷) و (۸) ترسیم شده است. ضریب مقیاس تعیین شده، در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده (به مقدار حداکثر خود) ضرب شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

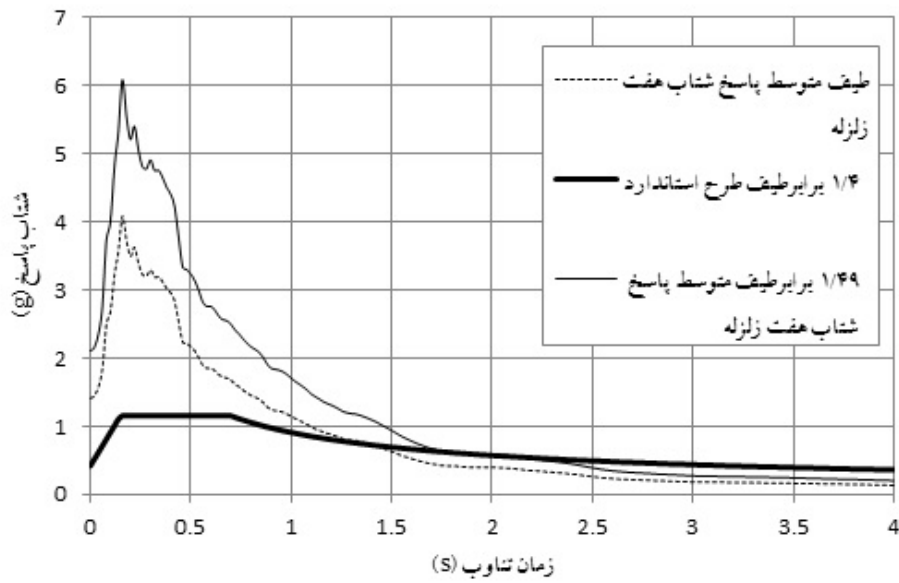
نتایج آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی

نتایج مربوط به منار رهروان و منار چهل‌دختران تحت اثر هفت زلزله در شکل‌های (۹) تا (۱۲) و جدول‌های (۶) و (۷) و نتایج مربوط به سایر منارها تحت زلزله‌ی ویترو روز در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی دلالت بر این دارند که همه‌ی منارها، هم به‌صورت کامل و هم فقط پوسته، در مراحل ابتدایی دچار شکست شده‌اند. ترک‌های ایجادشده در قسمت اتصال راه‌پله به ستون مرکزی و پوسته‌ی خارجی می‌باشد که در این محل تنش‌های کششی و فشاری به بیشترین مقدار خود در منار می‌رسد.

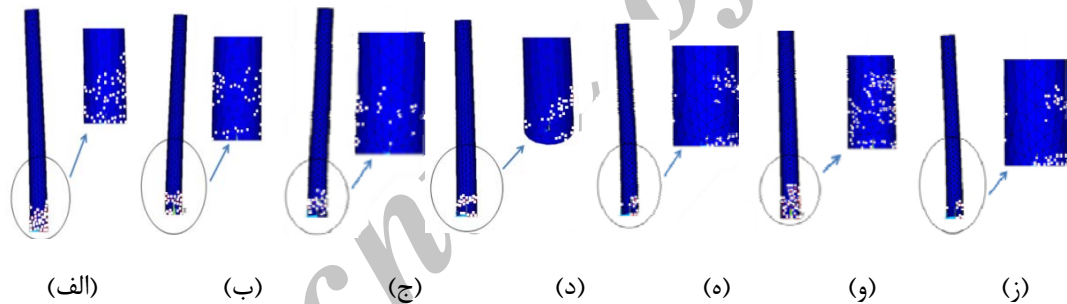
در ادامه طیف پاسخ ترکیبی هفت زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری شده و در محدوده‌ی زمان‌های تناوب $0.2T$ و $1/5T$ با طیف طرح استاندارد که از حاصل ضرب مقادیر ضریب بازتاب ساختمان برای زمین نوع ۳ در پارامترهای نسبت شتاب مبنا ($A=0.25$) پهنه با خطر نسبی متوسط (اصفهان)) و ضریب اهمیت ساختمان ($I=1/2$) ساختمان‌های با اهمیت زیاد، ساختمان‌هایی که خرابی آنها سبب از دست رفتن ثروت ملی می‌گردد) با فرض نسبت میرایی ۵٪ به دست می‌آید مقایسه گردیده و ضریب مقیاس آن‌چنان تعیین شده که در این محدوده مقادیر متوسط‌ها در هیچ حالت کمتر از $1/4$ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نمی‌باشد. لازم به ذکر است که جهت نسبت دادن شتاب زلزله به سازه می‌بایست ضریب A_I نیز در شتاب ضرب شود. حال می‌توان این ضریب را بعد از مقیاس کردن و یا قبل از مقیاس کردن در طیف اعمال کرد. به‌عنوان نمونه طیف متوسط پاسخ شتاب هفت زلزله با ضریب مقیاس و بدون ضریب مقیاس



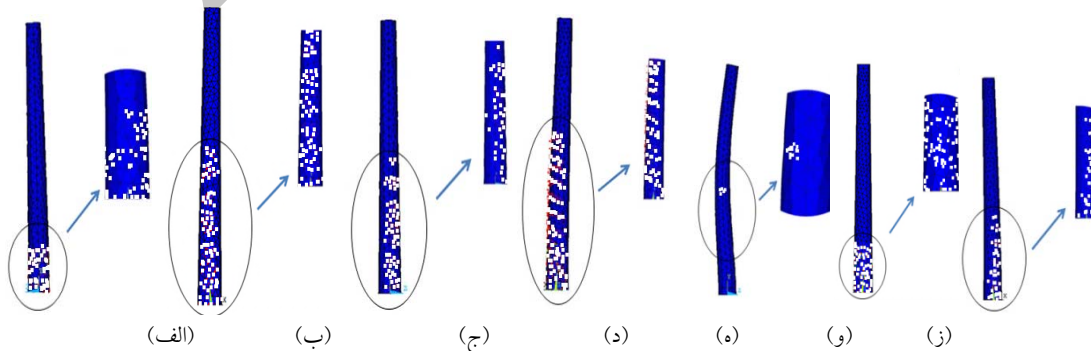
شکل ۷ مقایسه‌ی طیف متوسط پاسخ شتاب هفت زلزله با $1/4$ برابر طیف طرح استاندارد، در محدوده زمان تناوب $0/2T$ و $1/5T$ ($0.27s$) و $2/06s$) برای منار رهروان (به‌صورت کامل)



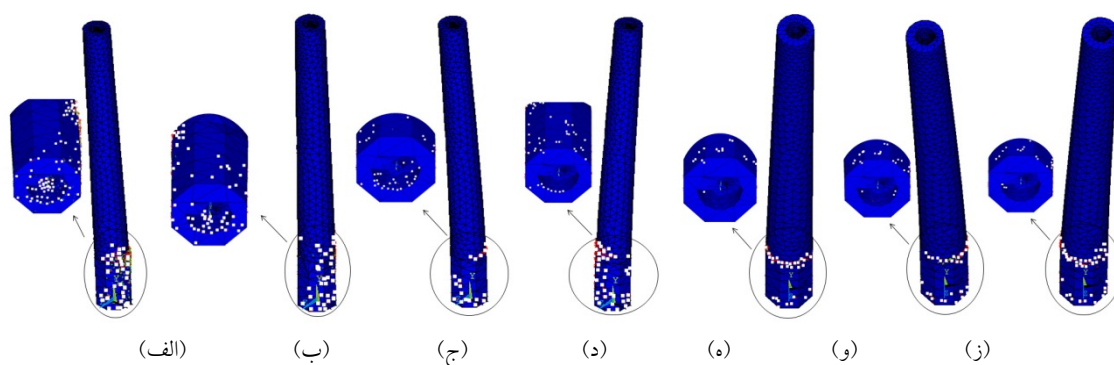
شکل ۸ مقایسه‌ی طیف متوسط پاسخ شتاب هفت زلزله با ۱/۴ برابر طیف طرح استاندارد، در محدوده‌ی زمان تناوب $0/2T$ و $1/5T$ (۰/۲۴ و $1/83$ S) برای منار رهروان (فقط پوسته)



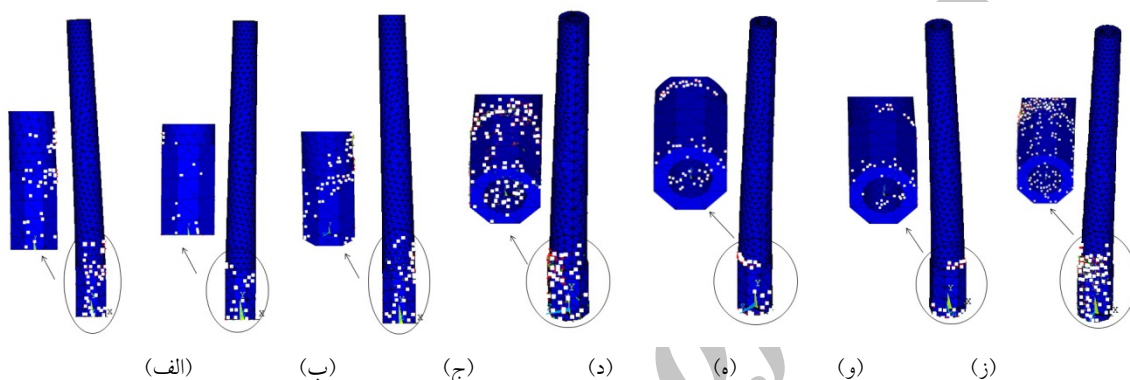
شکل ۹ ترک‌های ایجاد شده در منار رهروان (به صورت کامل) در مرحله شکست تحت زلزله‌های: (الف) ویترووز؛ (ب) دریاچه‌ی گیوته؛ (ج) مورگان هیل؛ (د) نورت ریج؛ (ه) پارک فیلد؛ (و) سان فرناندو؛ (ز) سوپرستیشن هیل



شکل ۱۰ ترک‌های ایجاد شده در منار رهروان (فقط پوسته) در مرحله شکست تحت زلزله‌های: (الف) ویترووز؛ (ب) دریاچه‌ی گیوته؛ (ج) مورگان هیل؛ (د) نورت ریج؛ (ه) پارک فیلد؛ (و) سان فرناندو؛ (ز) سوپرستیشن هیل



شکل ۱۱ ترک‌های ایجادشده در منار چهل دختران (به صورت کامل) در مرحله‌ی شکست تحت زلزله‌های: الف) ویترو نروز؛ ب) دریاچه گیوته؛ ج) مورگان هیل؛ د) نورت ریج؛ ه) پارک فیلد؛ و) سان فرناندو؛ ز) سوپرستیشن هیل



شکل ۱۲ ترک‌های ایجاد شده در منار چهل دختران (فقط پوسته) در مرحله شکست تحت زلزله‌های: الف) ویترو نروز؛ ب) دریاچه گیوته؛ ج) مورگان هیل؛ د) نورت ریج؛ ه) پارک فیلد؛ و) سان فرناندو؛ ز) سوپرستیشن هیل

جدول ۵ نتایج آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی منارها (به صورت کامل) تحت زلزله‌ی ویترو نروز در مرحله‌ی شکست

	سین	ساریان	گار	برسیان	باغ قوشخانه	علی	زیار
زمان (s)	۰/۸	۰/۷۶	۳/۹۶	۲/۵	۰/۷۶	۱/۱۸	۱/۱
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۹۱۱	۰/۲۹۵۴	۰/۳۲۲۳	۰/۴۷۱۷	۰/۰۷۴۱	۰/۱۰۸۴	۰/۱۳۵۹

جدول ۶ نتایج آنالیز تاریخیچه زمانی غیر خطی منارهای رهروان و چهل دختران (فقط پوسته) تحت ۷ زلزله

	ویترو نروز	سوپرستیشن هیل	سان فرناندو	پارک فیلد	نورت ریج	مورگان هیل	دریاچه گیوته
رهروان (پوسته)	زمان (s)	۱/۳۲	۱/۴۳	۱/۸۵	۶/۰۸	۱/۷۷	۱/۵
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۶۵۹	۴/۴۸۸۰	۰/۰۵۳۶	۰/۱۸۵۸	۰/۰۰۵۹	۰/۰۳۶۱
چهل دختران (پوسته)	زمان (s)	۱/۰۸	۴/۶۹	۰/۲۹	۰/۹۹	۱/۱۷	۰/۷۶۵
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۹۸۰	۰/۰۲۸۰	۰/۱۴۳۱	۰/۲۶۲۲	۰/۱۰۱۳	۰/۰۸۵۰

جدول ۷ نتایج آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی منارهای رهروان و چهل دختران (به صورت کامل) تحت ۷ زلزله

		دریاچه گیوته	مورگان هیل	نورت ریج	پارک فیلد	سانفرناندو	سوپرستیشن هیل	ویتر نروز
رهروان (کامل)	زمان (S)	۰/۶۴	۰/۵۵	۰/۷۶	۰/۶۳	۰/۲۸	۱/۹۷	۱/۰۶
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۴۸۸	۰/۰۴۸۷	۰/۱۰۳۰	۰/۰۷۴۵	۰/۰۶۹۱	۰/۰۶۰۷	۰/۰۵۹
چهل دختران (کامل)	زمان (S)	۰/۷۶	۰/۹۶	۱/۱۶	۰/۹۹	۰/۲۹	۵/۳۳	۱/۰۶
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۷۳۴	۰/۰۵۵۶	۰/۰۷۶۳	۰/۸۴۶۴	۰/۷۳۲۲	۰/۱۶۰۸	۰/۱۸۵۰

جدول ۸ تأثیر تغییر ارتفاع در رفتار دینامیکی منار رهروان تحت زلزله ویتر نروز

	۱۵ m پایین منار	۱۰ m پایین منار	۷ m پایین منار
وضعیت آسیب دیدگی	شکست	شکست	بدون شکست
زمان (S)	۳/۰۴	۳/۹۴	۲/۸۶
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۴۰۱	۰/۰۳۳۱	۰/۰۰۰۲

بررسی تأثیر ارتفاع و تغییر خصوصیات مکانیکی

مصالح در رفتار منارها تحت بار زلزله

به منظور یافتن وضعیتی که منارها در اثر زلزله دچار شکست نشوند، تأثیر چهار پارامتر مختلف بررسی شده است. این پارامترها شامل ارتفاع منارها، مقاومت کششی و فشاری مصالح تشکیل دهنده منارها، معیار شکست و میزان میرایی می باشند.

در مورد تأثیر ارتفاع منارها لازم به ذکر است که در واقع عامل مؤثر بر زمان شکست منارها در آنالیز لرزه‌ای، نسبت ارتفاع به قاعده است. بدین منظور با ثابت در نظر گرفتن قطر منار، ارتفاع آن از بالا به تدریج کم (با حذف قسمت بالایی منار) و آنالیز انجام گرفته است.

این کار فقط برای بررسی تأثیر تغییر ارتفاع در قاعده‌ی ثابت صورت گرفته است و در عمل نمی توان از این روش برای بهبود رفتار سازه‌ای منار در مقابل زلزله استفاده نمود.

نتایج مربوط به منار رهروان در جدول (۸) آمده

است.

می توان نتیجه گرفت که با کاهش ارتفاع منار، زمان شکست به تأخیر می افتد، به طوری که با ارتفاع مشخصی منار دچار شکست نمی شود.

به منظور بررسی اثر تغییر مشخصات مکانیکی مصالح به کار رفته در منار، مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ برابر افزایش داده شدند. اگرچه این کار صرفاً به منظور بررسی پارامتری بوده است و در عمل امکان پذیر نمی باشد. نتایج برای منارهای رهروان و زیار در جدول (۹) نشان داده شده‌اند. حتی با افزایش ۵۰ برابری مقاومت مصالح، هنوز منارها دچار شکست می شوند. هنگامی که مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح ۱۰۰ برابر می گردند، شکستی در منارها به وقوع نمی پیوندد. این بدین معنی است که افزایش خصوصیات مکانیکی مصالح در محدوده‌ای که معمولاً عملی می باشد، تأثیر تعیین کننده‌ای در بالابردن مقاومت کل سازه‌ی منار در مقابل زلزله ندارد.

جدول ۹ تأثیر افزایش مقاومت‌های کششی و فشاری برای منارهای رهروان، زیار و چهل دختران (به صورت کامل) تحت زلزله‌ی ویترو نروز

	منار زیار		منار رهروان			منار چهل دختران	
	۵۰	۱۰۰ برابر	۱۰	۵۰	۱۰۰ برابر	۵۰	۱۰۰ برابر
اندازه افزایش مقاومت های کششی و فشاری	برابر	برابر	برابر	برابر	برابر	برابر	برابر
وضعیت آسیب دیدگی	شکست	بدون شکست	شکست	شکست	بدون شکست	شکست	بدون شکست
زمان (s)	۳/۴۶	۲۸/۶	۳/۰۲	۳/۹	۲۸/۶	۴/۱۲	۲۸/۶
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۱۲۳۴	۰/۰۰۳۴	۰/۴۷۶۵	۰/۳۸۱۶	۰/۰۰۰۳	۰/۱۷۵۲	۰/۰۰۰۲

جدول ۱۰ تأثیر استفاده از معیار شکست دراکر-پراگر برای منارهای رهروان، گار و زیار تحت زلزله‌ی ویترو نروز

	رهروان (کامل)	رهروان (پوسته)	زیار (کامل)	زیار (پوسته)	چهل دختران (کامل)
زمان (s)	۰/۶۲	۱/۱	۰/۸	۱/۱	۱/۰۶
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۰۶۰	۰/۰۸۰۱	۰/۱۳۴۵	۰/۱۶۲۱	۰/۰۵۸۷

سازه‌های تاریخی وجود ندارد، لذا در این مقاله با مبنا قرار دادن استاندارد ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌های ورودی برای انجام آنالیزهای تاریخیچه‌زمانی انتخاب شده‌اند. اما نتایج آنالیز نشان می‌دهد که ضوابط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، برای بررسی سازه‌هایی با قدمت تاریخی، بسیار سخت‌گیرانه می‌باشد و به مقاوم‌سازی نامناسبی می‌انجامد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان نمود که علی‌رغم افزایش ۵۰ برابری مقاومت فشاری و کششی مصالح و یا کاهش ۵۰٪ ارتفاع منارها، این سازه‌ها همچنان جواب‌گوی ضوابط آیین‌نامه‌ها نمی‌باشند در صورتی که قدمت ساخت این آثار متجاوز از ۹۰۰ سال می‌باشد و در طی این سال‌ها همچنان پابرجا هستند. این نتایج مشابه نتایج گزارش شده از سایر محققان و در تکمیل مطالعات متعدد دیگری است که در زمینه‌ی بناهای بنایی (به جز منار) در سایر کشورها انجام گرفته است و تمامی تحقیقات منجر به نتایج مشابه شده است و به همین دلیل است که در دستورالعمل‌های یونسکو به همین نتیجه تأکید شده و نظر متخصصان به آن جلب شده است. البته همیشه استثنا نیز وجود دارد که البته نادر است. بر این اساس، آیین‌نامه‌ها و روش‌های عددی، اغلب مطابق با ساختمان‌های مدرن هستند و منجر به عدم توصیف دقیق رفتار واقعی سازه‌ی تاریخی و رفتار

با استفاده از معیار شکست دراکر-پراگر به جای معیار شکست ویلام-وارنک در آنالیزهای تعدادی از منارها، تأثیر تغییر معیار شکست در رفتار لرزه‌ای بررسی شده است. نتایج حاصل برای منارهای رهروان و زیار تحت زلزله‌ی ویترو نروز در جدول (۱۰) نشان داده شده‌اند. علی‌رغم تغییر معیار شکست، منارها هنوز در همان مراحل ابتدایی اعمال زلزله دچار شکست شده‌اند و در رفتار سازه‌ای آنها بهبودی مشاهده نمی‌گردد.

با توجه به آن که تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در مواردی تغییر اندازه‌ی میرایی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در رفتار لرزه‌ای داشته باشد [14]، لذا به عنوان آخرین پارامتر مؤثر در رفتار منارهای تحت زلزله، اندازه‌ی میرایی از ۵٪ به ۲۰٪ افزایش داده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که منارهای مورد مطالعه مجدداً در همان مراحل اولیه‌ی اعمال زلزله دچار شکست می‌شوند و فقط میزان جابه‌جایی نهایی آنها در حالت میرایی ۲۰٪ در لحظه‌ی شکست کمتر از میزان جابه‌جایی در حالت میرایی ۵٪ می‌باشد.

بررسی نتایج آنالیز از جنبه‌ی کارایی آیین‌نامه‌های

لرزه‌ای موجود

در حال حاضر در کشور آیین‌نامه‌ای برای بررسی رفتار

در محدوده‌ی ۱۰٪ ارتفاع منار از قسمت پایین پراکنده شده‌اند که دلیل این امر ایجاد تمرکز تنش در پلکان مارییج و محل‌های اتصال آن به ستون مرکزی و پوسته می‌باشد.

۳- هر چه نسبت ارتفاع به قاعده‌ی منارها کمتر باشد، شکست دیرتر اتفاق می‌افتد. به‌طور مثال، منار گار که کمترین نسبت ارتفاع به قاعده (۳/۸۲) را در بین منارها دارد، دیرتر از بقیه‌ی منارها دچار شکست می‌شود.

۴- با کاهش ارتفاع منار، زمان شکست به تأخیر می‌افتد. به‌عنوان مثال با کاهش حدود ۳۳/۳۳٪ ارتفاع منار رهروان، ۲۹٪ به طول زمان شکست آن اضافه می‌گردد.

۵- افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح حتی تا ۵۰ برابر (که البته در عمل امکان‌پذیر نمی‌باشد) نمی‌تواند باعث جلوگیری از شکست منارها در مقابل زلزله شود. تنها با افزایش ۱۰۰ برابری این مقادیر است که شکست رخ نمی‌دهد. البته با افزایش مقاومت مصالح، زمان شکست تا حدی به تأخیر می‌افتد.

۶- با تغییر معیار شکست ویلام-وارنک به دراکر-پراگر، منارها همچنان در همان مراحل ابتدایی شتاب‌نگاشت دچار شکست شده‌اند. جابه‌جایی‌های مرحله‌ی شکست در معیار شکست دراکر-پراگر در همه‌ی منارهای تحت بررسی نسبت به معیار شکست ویلام-وارنک کاهش یافته است. به‌عنوان مثال جابه‌جایی در مرحله‌ی شکست برای منار رهروان با استفاده از معیار شکست دراکر-پراگر ۹۱/۵۴٪ نسبت به معیار شکست ویلام-وارنک کاهش داشته است.

۷- با تغییر میزان میرایی از ۵٪ به ۲۰٪ منارها مجدداً در همان مراحل قبلی دچار شکست می‌شوند و فقط میزان جابه‌جایی‌های نهایی آنها بیشتر می‌شود. به‌عنوان مثال در منار رهروان (فقط پوسته‌ی خارجی) تحت

مقاومتی بناهای تاریخی می‌شوند و سبب ارزیابی غیرواقعی ضریب اطمینان سازه می‌گردند [5, 7, 16]. لازم به ذکر است که حتی آیین‌نامه‌های معتبر نظیر Eurocode8 [17] و FEMA [18] در مورد ارزیابی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی بناهای تاریخی مورد خاصی را مطرح نکرده‌اند. این آیین‌نامه‌ها فقط براساس پارامترهای کمی بنا شده‌اند در حالی که باید پارامترهای مهم کیفی نیز مورد توجه قرار گیرند. محدودیت‌ها و ضعف‌های آیین‌نامه‌ها و ضوابط قراردادی می‌تواند توسط پذیرش فعالیت‌های مکمل از قبیل بررسی تاریخی، بازدید و نظارت‌های فنی و آنالیز کیفی سازه‌ای برطرف شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تعداد نه منار از مهم‌ترین منارهای قرن پنجم و ششم هجری قمری برای بررسی میزان آسیب‌پذیری در برابر نیروهای وزن و زلزله انتخاب شد. پس از معرفی مشخصات هندسی هر کدام از منارها به معرفی خصوصیات مکانیکی مصالح آجری به کار رفته در ساخت آنها و همچنین معیارهای شکست مناسب برای مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS پرداخته شد. به‌منظور ارزیابی سازه‌ای منارها در برابر نیروی زلزله پس از انتخاب هفت شتاب‌نگاشت، متناسب با شرایط حرکت واقعی زمین در محل احداث منارها، و مقیاس کردن آنها با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، آنالیز تاریخیچه‌زمانی غیرخطی بر روی منارها انجام شد که شامل نتایج زیر می‌باشد:

۱- تمامی منارها در لحظات ابتدایی زلزله و قبل از رسیدن به مقدار بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت دچار شکست می‌شوند. در مواردی شکست پوسته‌ی منار نسبت به منار کامل در زمان دیرتری اتفاق افتاده است. دلیل این امر ضعف محل اتصال پلکان مارییج به پوسته و ستون مرکزی می‌باشد.

۲- ترک‌ها در حالت منار کامل نسبت به حالت فقط پوسته، در قسمت پایین‌تری رخ می‌دهند و عمدتاً

زلزله‌ی ویترو نروزی، جابه‌جایی در حالت میرایی ۰.۵٪،
 ۰/۰۶۵ m و در حالت میرایی ۲۰٪، ۰/۰۵۲ m
 (حدود ۰/۸ برابر حالت قبل) می‌باشد ولی در هر
 دو حالت زمان شکست در لحظه‌ی ۱/۰۶s می‌باشد.

مراجع

۱. مویدیان، س. م.، "آنالیز سازه‌ای منارهای تاریخی آجری ایران"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه اصفهان، (۱۳۹۱).
2. Bernardeschi, K., Padovani, C. and Pasquinelli, G., "Numerical modelling of the structural behaviour of Buti's bell tower", *Journal Cultural Heritage* 5, pp. 371-378, (2004).
3. Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E. and Boschi, E., "Seismic analysis of the Asinelli tower and earthquakes in Bologna", *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 17, pp. 525-550, (1998).
4. Pena, F., Lourenço, P., "Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower Engineering Structures", *Engineering Structures*, pp. 1466-1478, (2010).
5. Hejazi, M., "Historical Buildings of Iran: their Architecture and Structure", Computational Mechanics Publications (WIT Press), Southampton and Boston, (1997).
6. "Basic Analysis Guide for ANSYS 14", SAS IP Inc., New York, (2011).
7. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Form, Structure and Conservation", WIT Press, Southampton and Boston, (2013).
8. Binda, L., Fontana, A. and Frigerio, G., "Mechanical behaviour of brick masonries derived from unit and mortar characteristics", *8th Int. Brick and Block Masonry Conf. Elsevier Applied Science*, London, pp. 205-216, (1988).
9. Korany, Y., "Mechanics and modeling of URM structures", *Proceedings of Int. Short Course on Architectural and Structural Design of Masonry*, Dresden University of Technology, Dresden, (2003).
10. Betti, M., Orlando, M. and Vignoli, A., "Static behaviour of an Italian medieval castle: damage assessment by numerical modelling", *Computers and Structures*, 89(21-22), pp. 1956-1970, (2011).
11. Pineda, P., Robador, M. and Gil-Marti, M., "Seismic damage propagation prediction in ancient masonry structures: an application in the non-linear range via numerical models", *The Open Construction and Building Technology Journal*, 5, pp. 71-79, (2011).
12. "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings", (in Farsi), Standard No. 2800, Building and Housing Research Centre, Tehran, (1988).
13. Khodadadi, A., "Seismic Hazard Analysis and Hazard Spectrum for Isfahan" (in Farsi), M.Sc. Thesis, Science and Research Branch Islamic Azad University, Isfahan, (2009).
14. Silva, W., "Strong Motion Database", California, <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>, (2012).
۱۵. صفایی، ه.، "گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شناسایی و بررسی توان لرزه‌ای گسل‌های اطراف اصفهان"، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۴).
16. EU-India Economic Cross Cultural Programme, "Guidelines for the Conservation of Historical

- Masonry Structures in Seismic Areas", Rome, (2006).
17. Eurocode 8, "Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings", European Committee for Standardisation, Brussels, (2005).
 18. FEMA-356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., (2001).

Archive of SID