

آنالیز سازه‌ی منارهای تاریخی آجری ایرانی

مهرداد حجازی* (دانشیار)

سید محمد مویدیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مریم داعی (استادیار)

گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

مهندسی عمران شریفیه، (پاییز ۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۳، ص. ۵۸-۳۹m.hejazi@eng.ui.ac.ir
smaoeyedian@yahoo.com
m.daei@eng.ui.ac.ir

رفتار سازه‌ی ۹ منار آجری تاریخی اصفهان مربوط به قرون پنجم و ششم هجری قمری در برابر بارهای ثقلی، زلزله، تغییرات درجه حرارت و باد با استفاده از روش المان محدود غیرخطی، در ۲ حالت منار به صورت کامل (شامل پوسته‌ی منار، ستون مرکزی و راه پله) و فقط پوسته‌ی خارجی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای آنالیز دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی از ۷ شتاب‌نگاشت مناسب و مقیاس شده براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. به دلیل شکست منارها در هنگام وقوع زلزله، جهت تعیین وضعیتی که شکست رخ نمی‌دهد، بررسی پارامتری تأثیر ارتفاع، مقاومت مصالح، معیار شکست، و اندازه‌ی میرایی انجام شده است. آنالیز حرارتی نشان می‌دهد که منارها در شرایطی که اختلاف دمای داخل و خارج آنها از مقدار مشخصی بیشتر شود، دچار شکست می‌شوند. منارها می‌توانند حدود ۱/۴ برابر باد مبنای اصفهان را بدون شکست تحمل کنند.

واژگان کلیدی: منار، مصالح بنایی آجری، آنالیز تاریخچه‌ی زمانی، رفتار غیرخطی.

۱. مقدمه

بیرونی از ۱/۸-۰/۴ متر در پایه تا ۱-۰/۴ متر در بالا تغییر می‌کند. قطر ستون مرکزی از ۱/۶-۰/۳ متر است.^[۱]

۲.۲. روش آنالیز و نرم‌افزار مورد استفاده

جهت آنالیز منارهای تاریخی از روش المان محدود غیرخطی و نرم‌افزار ANSYS،^[۳] المان ۶۵ solid استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر ستون مرکزی و راه‌پله‌ی مارپیچ درون منارها در رفتار سازه‌ی آنها، آنالیزها در دو حالت: ۱. منار به صورت کامل (شامل پوسته‌ی منار، ستون مرکزی و راه‌پله)، ۲. فقط پوسته‌ی خارجی انجام شده‌اند.

۳.۲. خصوصیات مکانیکی مصالح

خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده، که در پژوهش‌های پیشین به دست آمده‌اند،^[۴] در جدول ۱ نشان داده شده است. با استفاده از نتایج تجربی حاصل شده در مطالعات پیشین،^[۵] می‌توان رابطه‌ی تنش - کرنش را برای ترکیب آجر و ملات به صورت یک نمودار خطی - سهمی براساس روابط ۱ و ۲ بیان کرد.

$$\sigma = E \varepsilon_e, \quad \varepsilon \leq \varepsilon_e \quad (1)$$

$$\sigma = (f_k/4) [\sqrt{2(\varepsilon/\varepsilon_e)} - 2(\varepsilon/\varepsilon_e)] - 2]$$

$$\varepsilon_e \leq \varepsilon \leq 2\varepsilon_e$$

$$\varepsilon_e = 0.75 f_k / E \quad (2)$$

معماری در همه‌ی دوران‌ها از تأثیرگذارترین هنرهای ایران بوده است. یکی از این عناصر که در هر دو دوره‌ی پیش و پس از اسلام نقشی چشم‌گیر و حضوری کم‌نظیر به عهده داشته است، میل یا منار است. اوج هنر منارسازی در ایران به قرون پنجم و ششم هجری قمری باز می‌گردد، که هم‌زمان با انتخاب اصفهان به پایتختی در آن زمان، منجر به آبادانی این شهر و ساخت منارهای متعددی شده است، به گونه‌ی که اصفهان به شهر منارها شهرت یافت.^[۱] از مهم‌ترین این منارها می‌توان به منارهای برسیان، چهل دختران، گار، سین، علی، ساربان، زیار، رهروان و باغ قوشخانه اشاره کرد. این ۹ منار از مصالح بنایی آجری ساخته شده و در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به طور کلی ۱ منار از ۳ قسمت پایه، بدنه و کلاهک یا تاج تشکیل شده است (شکل ۱). سازه‌ی منار شامل ستون مرکزی، پلکان مارپیچ و پوسته‌ی بیرونی است.

۲. مشخصات منارهای مورد مطالعه و فرضیات آنالیز

۱.۲. مشخصات ابعادی منارهای مورد مطالعه

در شکل ۲، نمای برخی از منارها (واقع در اصفهان) و در شکل ۳، ابعاد منارهای مورد مطالعه نشان داده شده است. ارتفاع از حدود ۲۰-۵۰ متر تغییر می‌کند. قطر خارجی در پایه حدود ۲/۵-۶ متر، و در بالا حدود ۲-۵ متر است. ضخامت پوسته‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۷

جدول ۱. خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی مناره‌ها. [۴]

ترکیب آجر و ملات	ملات	آجر	خصوصیات مکانیکی مصالح
۱۵۳۰	۱۶۰۰	۱۳۳۰	جرم حجمی (kg/m ^۳)
۲۷۳۰	۱۳۰۰	۵۳۰۰	مدول کشسانی (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)
۰٫۶ × ۱۰ ^{-۵}	۰٫۶ × ۱۰ ^{-۵}	۰٫۶ × ۱۰ ^{-۵}	ضریب انبساط حرارتی (m/m/°C)

$$TFC = ۰٫۶, \quad f_1 \neq 1 \quad (۹)$$

$$\beta_t = ۰٫۱۵ \quad (۱۰)$$

$$\beta_C = ۰٫۷۵ \quad (۱۱)$$

که در آن‌ها، $f_k, f_c, f_{cb}, f_t, f_1$ 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 هستند.

۵.۲. معیار شکست دراکر - پراگر

در برخی از آنالیزها جهت کنترل نتایج از معیار شکست دراکر - پراگر، [۶] نیز استفاده شده است، که در آن، شکست رفتار مصالح کشسان - خمیری و بدون سخت‌شوندگی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح $\Phi = ۳۸^\circ$ [۷،۵] و ضریب چسبندگی $C = ۰٫۱$ MPa [۶] به برنامه نسبت داده شده است.

۶.۲. روش کنترل شکست مناره‌ها

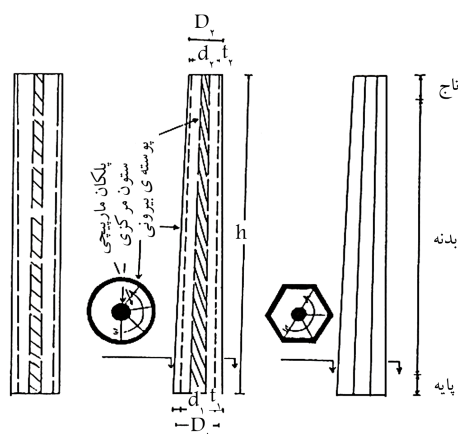
برای پیش‌بینی شکست مناره‌ها در اثر بارگذاری‌های مختلف، معیار شکست ویلام - وارنک و در مواردی معیار شکست دراکر - پراگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که معیار شکست برآورده نشود، این بدین معنی خواهد بود که ترکیب تنش‌های ایجادشده باعث شکست منار خواهد شد.

۷.۲. بارگذاری

بارهای اعمال‌شده به ۹ منار مورد مطالعه شامل: وزن، زلزله، تغییرات درجه حرارت و باد هستند.

۳. آنالیز استاتیکی تحت بار وزن

همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شود، تنش‌های ایجادشده تحت بار وزن کمتر از مقاومت مصالح هستند. توزیع تنش محوری در پوسته‌ی خارجی و پلکان مارپیچ منار برسیان در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱. اجزاء سازه‌ی منار. [۲]

که در آن‌ها، f_k مقاومت فشاری و E مدول کشسانی مصالح ترکیبی آجر و ملات هستند. برای مصالح موجود در مناره‌های مورد مطالعه، با قراردادن مقادیر جدول ۱ در روابط ۱ و ۲، رابطه‌ی تنش - کرنش به صورت روابط ۳ و ۴ در می‌آیند (شکل ۴).

$$\varepsilon_e = ۰٫۷۵ f_k / E = ۰٫۷۵ \times ۲٫۷۳ / ۲۳۷۰ = ۷٫۵ \times ۱۰^{-۴} \quad (۳)$$

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

$$\sigma = (۲٫۷۳ / ۴) [7(\varepsilon / ۷٫۵ \times ۱۰^{-۴}) - 2(\varepsilon / ۷٫۵ \times ۱۰^{-۴})^2 - 2]$$

$$۷٫۵ \times ۱۰^{-۴} \leq \varepsilon \leq ۱۵ \times ۱۰^{-۴} \quad (۴)$$

۴.۲. معیار شکست ویلام - وارنک

در همه‌ی آنالیزها از معیار شکست ویلام - وارنک، [۶] که مخصوص مصالح ترد و شکننده است، استفاده شده است. پارامترهای این معیار شکست برای ترکیب مصالح آجر و ملات جهت استفاده در نرم‌افزار ANSYS براساس روابط ۵ الی ۱۱ محاسبه، [۸-۶] و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند:

$$f_{cb} = ۱٫۲ f_c = ۱٫۲ \times ۲٫۷۳ = ۳٫۲۷۶ \text{ MPa} \quad (۵)$$

$$f_1 = ۱٫۴۵ f_c = ۱٫۴۵ \times ۲٫۷۳ = ۳٫۹۶ \text{ MPa} \quad (۶)$$

$$f_t = ۱٫۷۲۵ f_c = ۱٫۷۲۵ \times ۲٫۷۳ = ۴٫۷۱ \text{ MPa} \quad (۷)$$

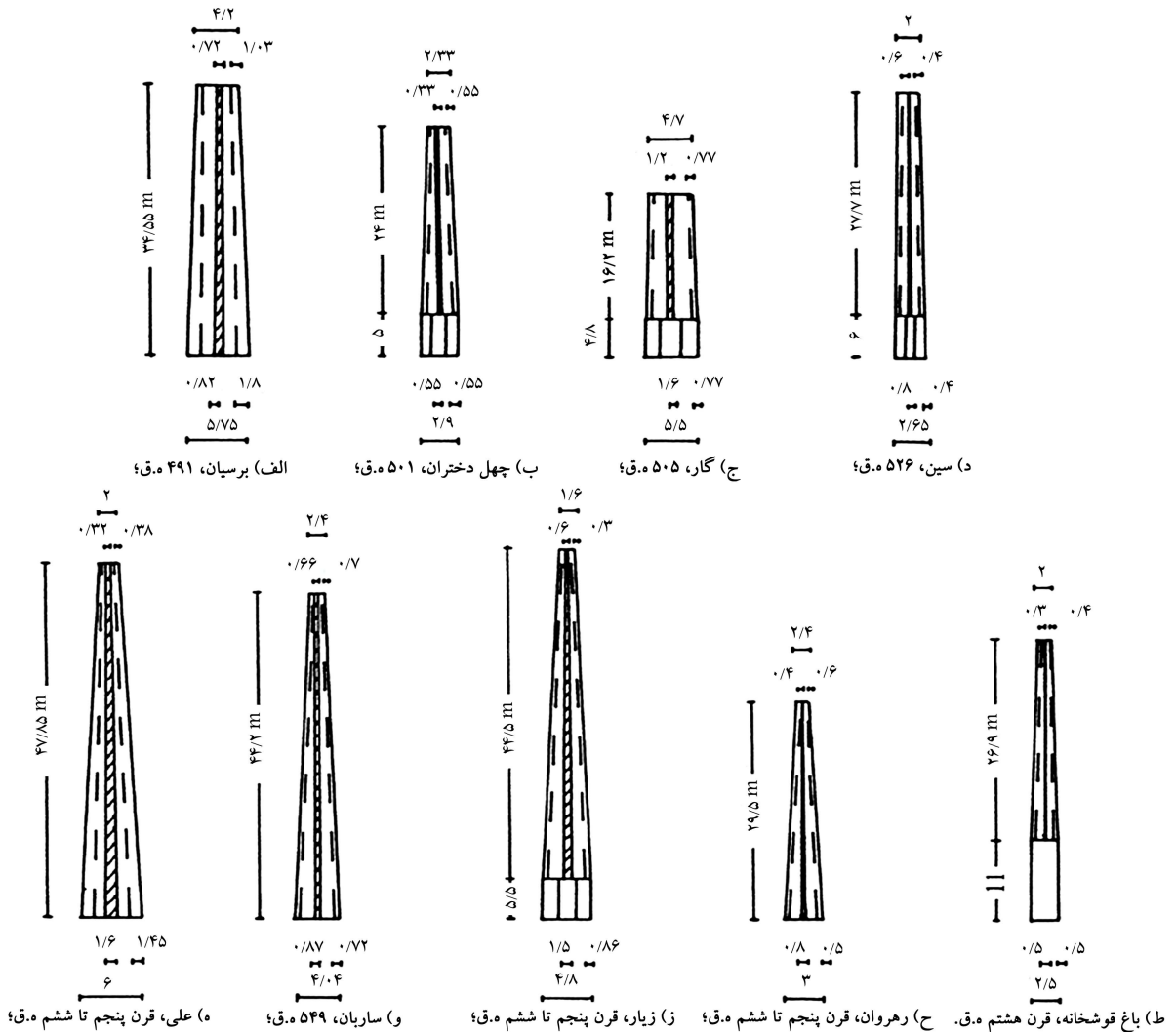
$$|\sigma_h^a| \leq ۳^{۱/۲} \quad f_c = ۴٫۷۳ \text{ MPa} \quad (۸)$$

$$TFC = \text{ضریب افزایش سختی ترک در کشش}, \quad f_1 = ۱.$$



الف ساریان؛ ب علی؛ ج چهل دختران؛ د سین؛ ه گار؛ و زیار؛ ز برسیان؛

شکل ۲. نمای برخی از منارهای مورد مطالعه.



شکل ۳. مشخصات ابعادی منارهای مورد مطالعه.

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

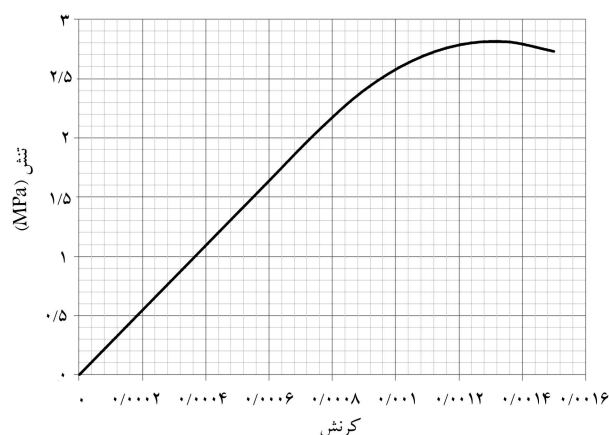
β_t	β_c	f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_{cb} (MPa)	$ \sigma_h^a $ (MPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	TFC
۰٫۱۵	۰٫۷۵	۰٫۲۷	۲٫۷۳	۳٫۲۷۶	۴٫۷۳	۳٫۹۶	۴٫۷۱	۰٫۶

جدول ۳. نتایج مربوط به بسامدهای ناشی از ۶ مود اول منارهای مورد مطالعه.

نتایج آنالیز مودال منارها	برسیان	چهل دختران	گار	سین	علی	زیار	رهران	باغ قوشخانه	ساربان
مود ۱ بسامد (Hz)	۱٫۰۹	۰٫۷۹	۲٫۳۴	۰٫۵۵	۰٫۷۸	۰٫۵۸	۰٫۷۳	۰٫۴۲	۰٫۴۸
مود ۲ بسامد (Hz)	۱٫۰۹	۰٫۷۹	۲٫۶۵	۰٫۵۵	۰٫۷۸	۰٫۵۸	۰٫۷۳	۰٫۴۲	۰٫۴۸
مود ۳ بسامد (Hz)	۵٫۱۶	۴٫۱۴	۵٫۳۷	۲٫۸۰	۲٫۶۴	۲٫۰۰	۳٫۹۶	۲٫۲۳	۲٫۲۵
مود ۴ بسامد (Hz)	۵٫۱۶	۴٫۱۴	۱۱٫۹۰	۲٫۸۱	۲٫۶۴	۲٫۰۰	۳٫۹۶	۲٫۲۳	۲٫۲۵
مود ۵ بسامد (Hz)	۸٫۰۶	۹٫۰۹	۱۱٫۸۷	۷٫۱۸	۵٫۹۰	۴٫۵۳	۸٫۵۶	۵٫۸۱	۵٫۵۰
مود ۶ بسامد (Hz)	۱۱٫۰۷	۱۰٫۴۷	۱۵٫۵۱	۷٫۱۸	۵٫۹۰	۴٫۵۳	۱۰٫۰۳	۵٫۸۱	۵٫۴۵

۴. آنالیز مودال و بسامدهای منارهای مورد مطالعه

آنالیز مودال در واقع فرایندی است که با کمک آن خواص دینامیکی یک سازه نظیر بسامدهای تحریک، مقادیر میرایی و اشکال تغییرشکل یافته‌ی سازه، که به آن شکل‌های مودی گفته می‌شود، استخراج می‌شود. نتایج مربوط به بسامدهای ناشی از ۶ مود اول هر یک از منارها در جدول ۳ و تغییرشکل منارها در مود اول در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش ترکیب آجر و ملات منارها.

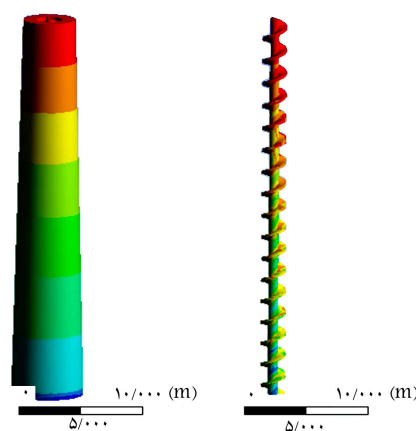
۵. آنالیز دینامیکی گذرا تحت بار زلزله

۱.۵. پارامترهای انتخاب شتاب نگاشت

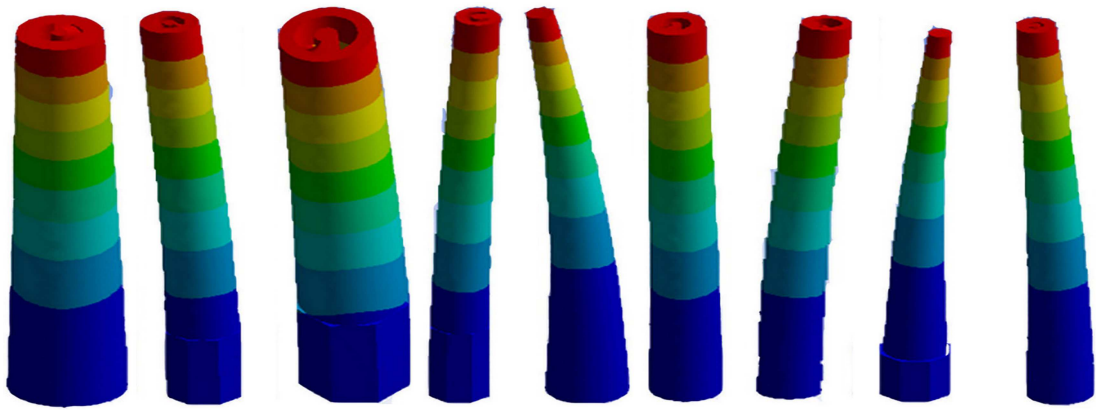
با توجه به مینا قراردادن استاندارد ۲۸۰۰^[۹] جهت انجام آنالیز تاریخی زمانی، باید شتاب نگاشت تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام زلزله باشد. بدین منظور باید دست کم ۳ و یا ۷ زوج شتاب نگاشت با ویژگی‌های عنوان شده در استاندارد ۲۸۰۰ در آنالیز مورد استفاده قرار گیرد.

منارهای مورد مطالعه در محدوده‌ی استان اصفهان واقع شده‌اند. بیشینه‌ی شتاب زمین با احتمال رویداد ۱۰٪ در ۵۰ سال در شهر اصفهان از $g \ 0.18$ تا $g \ 0.32$ متغیر است، که این مقدار در استاندارد ۲۸۰۰ ایران برابر $g \ 0.25$ تعیین شده است. همچنین زمین منطقه‌ی مورد مطالعه طبق استاندارد ۲۸۰۰ از نوع ۲ و ۳ است، که در جهت اطمینان نوع ۳ در نظر گرفته شده است.^[۱۰]

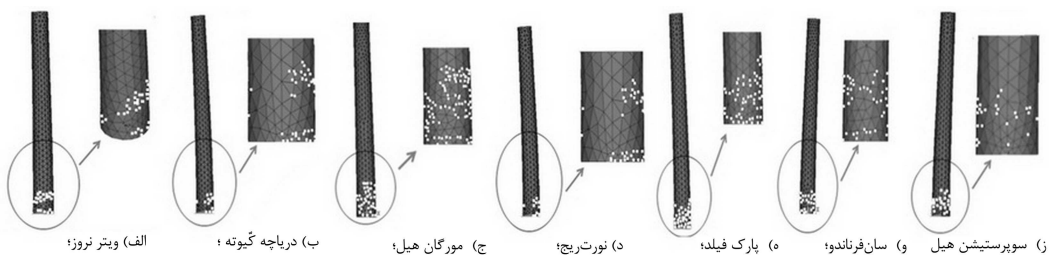
با توجه به اینکه اطلاعات شتاب نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های رخ داده در منطقه‌ی مورد مطالعه در دسترس نیست، زلزله‌های واقعی اتفاق افتاده در مناطق دیگر که با شرایط تکنیکی و لرزه‌ی اصفهان مطابقت دارند، مورد استفاده قرار گرفته و براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس شده‌اند. بدین منظور از اطلاعات لرزه‌ی جمع‌آوری شده توسط دانشگاه برکلی استفاده شده است.^[۱۱] اطلاعات مذکور



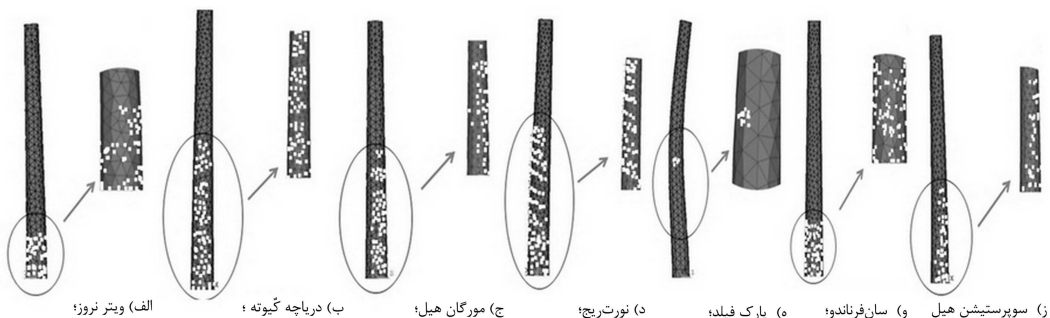
شکل ۵. توزیع تنش در منار برسیان تحت بار وزن.



شکل ۶. تغییر شکل منارها در مود اول (به صورت کامل).
 (ط) منار باغ قوشخانه. (ح) منار رهروان؛ (ز) منار زیار؛ (و) منار ساریان؛ (ه) منار علی؛ (د) منار سین؛ (ج) منار گار؛ (ب) منار چهل دختران؛ (الف) منار برسیان؛



شکل ۷. ترک‌های ایجاد شده در منار رهروان (به صورت کامل) در مرحله‌ی شکست تحت زلزله.



شکل ۸. ترک‌های ایجاد شده در منار رهروان (فقط پوسته) در مرحله‌ی شکست تحت زلزله.

جدول ۴. مشخصات زلزله‌های انتخاب شده.

شماره	نام زلزله	تاریخ	بزرگا (M)	بیشینه‌ی شتاب زمین (g)
۱	دریاچه کیوته	۱۹۷۹/۶/۸	۵٫۷	۰٫۲۴۸
۲	مورگان هیل	۱۹۸۴/۴/۲۴	۶٫۲	۰٫۲۱۲
۳	نورث ریچ	۱۹۹۴/۱/۱۷	۶٫۷	۰٫۲۴۵
۴	پارک فیلد	۱۹۶۶/۶/۲۸	۶٫۱	۰٫۲۴۶
۵	سان‌فرناندو	۱۹۷۱/۹/۲	۶٫۶	۰٫۲۱
۶	سوپرستیشن هیل	۱۹۸۷/۱۱/۲۴	۶٫۷	۰٫۲۴۷
۷	ویتر نروز	۱۹۸۷/۱/۱۰	۶	۰٫۲۴۳

مربوط به ۷ زلزله با بزرگای ۵٫۷-۶٫۷ ریشتر و تا شعاع ۱۰۰ km، و سرعت برشی خاک بین ۱۸۰-۳۶۰ m/s است. بیشینه‌ی شتاب زمین در شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده بین ۰٫۱۸-۰٫۳۲ g است. مشخصات این ۷ زلزله در جدول ۴ ارائه شده است.

۲.۵. نتایج آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی

به عنوان مثال، نتایج مربوط به منار رهروان تحت اثر ۷ زلزله در شکل‌های ۷ و ۸ و جدول‌های ۵ و ۶ و نتایج مربوط به سایر منارها تحت زلزله‌ی ویتر نروز در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی دلالت بر این دارند که همه‌ی منارها، هم به صورت کامل و هم فقط پوسته، در مراحل ابتدایی دچار شکست شده‌اند. تجمع ترک‌های ایجاد شده در قسمت اتصال راه‌پله به ستون مرکزی و پوسته‌ی خارجی است که در این محل تنش‌های کششی و فشاری به بیشترین

جدول ۵. نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی منار رهروان (فقط پوسته) تحت ۷ زلزله‌ی مورد مطالعه.

نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در مرحله‌ی شکست	دریاچه‌ی کُیوته	مورگان هیل	نورث ریج	پارک فیلد	سان‌فرناندو	سوپرستیشن هیل	ویتر نروز
زمان (s)	۱٫۵	۱٫۷۷	۶٫۰۸	۱٫۸۵	۱٫۴۳	۱٫۳۲	۱٫۰۶
تغییر مکان بیشینه (m)	۰٫۳۵۳	۰٫۳۶۱	۰٫۰۰۵۹	۰٫۱۸۵۸	۰٫۰۵۳۶	۴٫۴۸۸۰	۰٫۰۶۵۹

جدول ۶. نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی منار رهروان (به‌صورت کامل) تحت ۷ زلزله‌ی مورد مطالعه.

نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در مرحله‌ی شکست	دریاچه‌ی کُیوته	مورگان هیل	نورث ریج	پارک فیلد	سان‌فرناندو	سوپرستیشن هیل	ویتر نروز
زمان (s)	۰٫۶۴	۰٫۵۵	۰٫۷۶	۰٫۶۳	۰٫۲۸	۱٫۹۷	۱٫۰۶
تغییر مکان بیشینه (m)	۰٫۴۸۸	۰٫۴۸۷	۰٫۱۰۳۰	۰٫۰۷۴۵	۰٫۰۶۹۱	۰٫۰۶۰۷	۰٫۰۵۹

جدول ۷. نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی منارها (به‌صورت کامل) تحت زلزله‌ی ویتر نروز در مرحله‌ی شکست.

نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی منار	سین	ساربان	گار	چهل‌دختران	برسیان	باغ قوشخانه	علی	زیار
زمان (s)	۰٫۸	۰٫۷۶	۳٫۹۶	۱٫۱	۲٫۵	۰٫۷۶	۱٫۱۸	۱٫۱
تغییر مکان بیشینه (m)	۰٫۰۹۱۱	۰٫۲۹۵۴	۰٫۳۲۲۳	۰٫۱۳۲۸	۰٫۴۷۱۷	۰٫۰۷۴۱	۰٫۱۰۸۴	۰٫۱۳۵۹

جدول ۸. نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی منار رهروان (فقط پوسته) با فرض ارتفاع‌های ۱۵، ۱۰ و ۷ متر (به‌صورت حذف قسمت بالایی منار) تحت زلزله‌ی ویتر نروز.

نتایج آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی	پایین منار	پایین منار	پایین منار
وضعیت آسیب دیدگی	شکست	شکست	بدون شکست
زمان (s)	۳٫۰۴	۳٫۹۴	۲۸٫۶
تغییر مکان بیشینه (m)	۰٫۴۰۱	۰٫۳۳۱	۰٫۰۰۰۲

مقدار خود در منار می‌رسد.

به‌منظور یافتن وضعیتی که منارها در اثر زلزله دچار شکست نشوند، در ۴ بخش مختلف به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پرداخته شده است. این پارامترها شامل: ارتفاع منارها، مقاومت کششی و فشاری مصالح تشکیل‌دهنده منارها، معیار شکست و میزان میرایی هستند.

۳.۵. بررسی تأثیر ارتفاع در آنالیز تاریخچه‌ی زمانی

یکی از عوامل مؤثر در زمان شکست منارها در آنالیز لرزه‌ی، 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 شده است. این کار فقط برای بررسی تأثیر تغییر ارتفاع در قاعده‌ی ثابت صورت گرفته است و در عمل نمی‌توان از این روش برای بهبود رفتار سازه‌ی منار در مقابل زلزله استفاده کرد. نتایج مربوط به منار رهروان در جدول ۸ ارائه شده است. می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش ارتفاع منار، زمان شکست به تأخیر می‌افتد، به طوری که با ارتفاع مشخصی، منار دچار شکست نمی‌شود.

۴.۵. بررسی تأثیر تغییر خصوصیات مکانیکی مصالح در آنالیز تاریخچه‌ی زمانی

به‌منظور یافتن وضعیتی که منار در مقابل زلزله دچار شکست نشود، مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ برابر افزایش داده شده‌اند. این کار فقط به‌منظور بررسی پارامتری بوده است و در عمل امکان‌پذیر نیست. نتایج برای منارهای رهروان و زیار در جدول ۹ ارائه شده‌اند. حتی با افزایش ۵۰ برابری مقاومت مصالح، هنوز منارها دچار شکست می‌شوند. هنگامی که مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح ۱۰۰ برابر می‌شوند، شکستی در منارها به وقوع نمی‌پیوندد. این بدین معنی است که افزایش خصوصیات مکانیکی مصالح در محدوده‌ی که معمولاً عملی است، تأثیر تعیین‌کننده‌ی در بالابردن مقاومت کل سازه‌ی منار در مقابل زلزله ندارد.

۵.۵. بررسی تأثیر تغییر معیار شکست در آنالیز تاریخچه‌ی زمانی

با استفاده از معیار شکست دراگر - پراگر به جای معیار شکست ویلام - وارنک در آنالیزهای تعدادی از منارها، تأثیر تغییر معیار شکست در رفتار لرزه‌ی بررسی شده است. نتایج حاصل برای منارهای رهروان، زیار و گار تحت زلزله‌ی ویتر نروز در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند. علی‌رغم تغییر معیار شکست، منارها هنوز در همان مراحل ابتدایی اعمال زلزله دچار شکست شده‌اند و در رفتار سازه‌ی آنها بهبودی مشاهده نشده است.

۶.۵. بررسی تأثیر تغییر میرایی در آنالیز تاریخچه‌ی زمانی

پژوهش‌های پیشین نشان داده است که در مواردی تغییر اندازه‌ی میرایی در رفتار لرزه‌ی تأثیر قابل توجهی داشته است.^[۱۲] بدین منظور فرض شده است که اندازه‌ی میرایی منارها از ۵٪ به ۲۰٪ افزایش یابد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که منارهای مورد مطالعه مجدداً در همان مراحل اولیه‌ی اعمال زلزله دچار شکست

جدول ۹. نتایج آنالیز تاریخی زمانی غیرخطی منارهای رهوان و زیار با افزایش مقاومت‌های کششی و فشاری تحت زلزله‌ی ویتروژ.

منار رهوان			منار زیار		نتایج آنالیز تاریخی زمانی غیرخطی
۱۰۰ برابر	۵۰ برابر	۱۰ برابر	۱۰۰ برابر	۵۰ برابر	اندازه‌ی افزایش مقاومت‌های کششی و فشاری
بدون شکست	شکست	شکست	بدون شکست	شکست	وضعیت آسیب‌دیدگی
۲۸٫۶	۳٫۹	۳٫۰۲	۲۸٫۶	۳٫۴۶	زمان (s)
۰٫۰۰۰۳	۰٫۳۸۱۶	۰٫۴۷۶۵	۰٫۰۰۳۴	۰٫۱۲۳۴	تغییر مکان بیشینه (m)

جدول ۱۰. نتایج آنالیز تاریخی زمانی غیرخطی منارهای رهوان، گار و زیار با استفاده از معیار شکست دراگر - پراگر و تحت زلزله‌ی ویتروژ.

منار رهوان		منار زیار		منار گار	
رهروان (کامل)	رهروان (پوسته)	زیار (کامل)	زیار (پوسته)	گار (کامل)	گار (پوسته)
۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۸۰۱	۰٫۱۳۴۵	۰٫۱	۰٫۰۶۲	۰٫۰۹۶
تغییر مکان بیشینه (m)	تغییر مکان بیشینه (m)	تغییر مکان بیشینه (m)	تغییر مکان بیشینه (m)	تغییر مکان بیشینه (m)	تغییر مکان بیشینه (m)

۱. دمای داخل منار 21°C و دمای بیرون 41.4°C ؛

۲. دمای داخل منار 0°C و دمای بیرون 13.5°C - (بررسی اثر سرما)؛

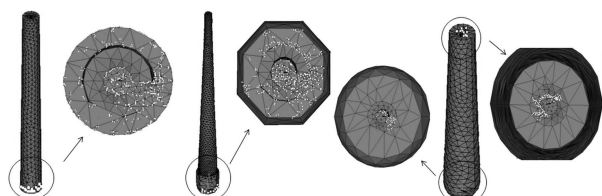
۳. دمای داخل منار 21°C و دمای بیرون 100°C (آتش سوزی)؛

۴. دمای داخل منار 21°C و دمای بیرون 13.5°C - (بررسی اثر سرما)؛

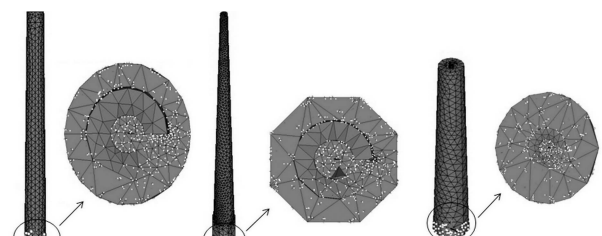
۵. گرم شدن یکنواخت کل منار تا 100°C (آتش سوزی).

۲.۶. نتایج آنالیز حرارتی منارها

به عنوان نمونه، ترک‌های ایجاد شده تحت حالات ۱ و ۲ در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. نتایج آنالیزهای انجام شده در جدول‌های ۱۱ تا ۱۵ ارائه شده است. بر این اساس، اختلاف دمای زیاد داخل و خارج منار سبب آسیب جدی به منارها می‌شود و همچنین اختلاف دما در حالت سرمایی آسیب‌های بیشتری در منار نسبت به حالت گرمایی ایجاد می‌کند.



شکل ۹. ترک‌های ایجاد شده تحت آنالیز حرارتی در حالت ۱: دمای داخل 21°C و دمای بیرون 41.4°C .



شکل ۱۰. ترک‌های ایجاد شده تحت آنالیز حرارتی در حالت ۲: دمای داخل 0°C و دمای بیرون 13.5°C -.

شده و فقط میزان جابجایی نهایی آن‌ها در حالت میرایی 20% در لحظه‌ی شکست کمتر از میزان جابجایی در حالت میرایی 5% است.

۷.۵. بررسی کارایی آیین‌نامه‌های لرزه‌ی ساختمان‌های مدرن برای

بناهای تاریخی

با توجه به آنالیزهای تاریخی زمانی صورت گرفته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ضوابط آیین‌نامه‌ها، ضوابط طراحی ساختمان‌های مدرن و آیین‌نامه‌های بهسازی لرزه‌ی سازه‌های موجود، جهت بررسی سازه‌هایی با قدمت تاریخی، بسیار سخت‌گیرانه است و به مقاومت نامناسبی می‌انجامد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که علی‌رغم افزایش 50% برابری مقاومت فشاری و کششی مصالح و یا کاهش 50% ارتفاع منارها، این سازه‌ها همچنان جوابگوی ضوابط آیین‌نامه‌ها نیستند، در صورتی که قدمت ساخت این آثار متجاوز از 900 سال است و در طی این سال‌ها همچنان پابرجا هستند. این نتایج مشابه نتایج گزارش شده از سایر پژوهشگران در بررسی لرزه‌ی بناهای تاریخی است. [13, 14] این تذکر لازم است که حتی آیین‌نامه‌های معتبر نظیر Eurocode 8 [14], FEMA [15] در مورد ارزیابی لرزه‌ی و مقاوم‌سازی بناهای تاریخی مورد خاصی را مطرح نکرده‌اند. این آیین‌نامه‌ها فقط بر اساس پارامترهای کتی 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 سازه‌ی برطرف شود.

۶. آنالیز تحت بار حرارتی

۱.۶. فرضیات آنالیز حرارتی

برای بررسی آسیب‌های احتمالی در اثر تغییر درجه حرارت منارهای مورد مطالعه در فصول مختلف با توجه به تغییرات دمایی شهر اصفهان و نیز تحت شرایط خاصی از قبیل آتش سوزی و یخ زدگی، آنالیز حرارتی غیرخطی برای 5 حالت مختلف انجام شده است. بر اساس مطالعات انجام شده برای شهر اصفهان، بیشینه‌ی مطلق دما در مردادماه برابر 41.4°C و کمینه‌ی مطلق دما در آذرماه برابر با 13.5°C - است. [16] همچنین در چند حالت، دمای داخل منار برابر دمای آسایش 21°C در نظر گرفته شده است. [17] آنالیز حرارتی در این حالات انجام شده است:

جدول ۱۱. نتایج آنالیز حرارتی منارهای رهروان، زیار، برسیان در حالت ۱.

نتایج آنالیز حرارتی منار	رهروان (کامل)	زیار (کامل)	زیار (پوسته)	برسیان (کامل)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۰۳۷	بدون شکست ۰/۰۰۱۴	بدون شکست ۰/۰۰۰۹	بدون شکست ۰/۰۰۰۷

جدول ۱۲. نتایج آنالیز حرارتی منارهای رهروان و زیار در حالت ۲.

نتایج آنالیز حرارتی منار	رهروان (کامل)	زیار (کامل)	برسیان (کامل)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۰۸۰	بدون شکست ۰/۰۱۰۷	بدون شکست ۰/۰۰۸۷

جدول ۱۳. نتایج آنالیز حرارتی منار رهروان در حالت ۳.

نتایج آنالیز حرارتی منار	رهروان (کامل)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۰۵۳

جدول ۱۴. نتایج آنالیز حرارتی منارهای رهروان، زیار، برسیان در حالت ۴.

نتایج آنالیز حرارتی منار	رهروان (کامل)	رهروان (پوسته)	زیار (کامل)	زیار (پوسته)	برسیان (کامل)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	شکست ۰/۰۰۵۹	شکست ۰/۰۰۶۲	شکست ۰/۰۰۸۵	شکست ۰/۰۰۹۷	شکست ۰/۰۰۶۴

جدول ۱۵. نتایج آنالیز حرارتی منار رهروان در حالت ۵.

نتایج آنالیز حرارتی منار	رهروان (پوسته)	رهروان (کامل)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۱۱۴	بدون شکست ۰/۰۱۱۱

جدول ۱۶. نتایج آنالیز غیرخطی منارهای زیار و رهروان تحت بار باد در حالت ۱.

نتایج آنالیز غیرخطی منار	رهروان (کامل)	زیار (کامل)	زیار (پوسته)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۲۱۷	بدون شکست ۰/۰۴۸۸	بدون شکست ۰/۰۴۹۲

جدول ۱۷. نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار تحت بار باد در حالت ۲.

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (کامل)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۶۷۷

جدول ۱۸. نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار تحت بار باد در حالت ۳.

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (کامل)	زیار (پوسته)
وضعیت آسیب‌دیدگی تغییر مکان بیشینه (m)	بدون شکست ۰/۰۹۲۸	بدون شکست ۰/۰۹۳۳

جدول ۱۹. نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار تحت بار باد در حالت ۴.

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (کامل)	زیار (پوسته)
وضعیت آسیب‌دیدگی	شکست	شکست

۷. آنالیز تحت بار باد

۷.۱. فرضیات آنالیز باد

به منظور بررسی چگونگی تأثیر باد در رفتار سازه‌ی، منارهای رهروان و زیار (بلندترین منار) تحت بار باد بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ی بارگذاری ایران،^[۱۸] مورد آنالیز استاتیکی غیرخطی قرار گرفته‌اند. برای تعیین توزیع فشار باد در اطراف منارها از آیین‌نامه‌ی بارگذاری انگلستان،^[۱۹] استفاده شده است. آنالیزها در این ۴ حالت مختلف انجام شده‌اند:

۱. سرعت ۱۱۰ km/h (سرعت مبنای باد اصفهان)؛

۲. سرعت ۱۳۰ km/h (بیشینه‌ی سرعت ثبت‌شده‌ی باد در ایران)؛

۳. سرعت ۱۵۰ km/h (برای یافتن بازه‌ی که منار در آن دچار شکست نشود)؛

۴. سرعت ۱۶۵ km/h (برای یافتن بازه‌ی که منار در آن دچار شکست نشود).

نتایج حاصل از آنالیزهای عددی کلیه‌ی آنالیزهای انجام‌شده در جدول‌های ۱۶ الی ۱۹ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود منارها تحت بار باد مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند و در سرعت‌های بیشینه‌ی وزش باد در ایران دچار شکست نمی‌شوند.

۸. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی منارها به این شرح هستند:

- تمامی منارها در لحظات ابتدایی زلزله و قبل از رسیدن به مقدار بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت دچار شکست می‌شوند. برای مثال، منار کامل رهروان تحت آنالیز توسط زلزله‌ی دریاچه‌ی گیوت، در ۰/۶۴ s دچار شکست شده، در حالی‌که بیشینه‌ی شتاب زلزله در حدود زمان ۳ s اتفاق افتاده است.
- ترک‌ها در حالت فقط پوسته، عمدتاً در محدوده‌ی ۱۰٪ ارتفاع منار از قسمت پایین و در مواردی تا ۵۰٪ ارتفاع منار از قسمت پایین پراکنده شده‌اند. ولی در حالت منار کامل، این محدوده عمدتاً شامل ۱۰٪ و در مواردی ۳۰٪ ارتفاع منار از قسمت پایین می‌شود. دلیل این امر، ایجاد تمرکز تنش در پلکان ماریج و محل‌های اتصال آن به ستون مرکزی و پوسته است.
- در مواردی شکست پوسته‌ی منار نسبت به منار کامل در زمان دیرتری اتفاق

است. برای مثال، منارهای کامل در حالتی که دمای داخل 21°C و دمای بیرون $13/5^{\circ}\text{C}$ - بوده است، دچار شکست شده‌اند؛ ولی در حالتی که دمای داخل 21°C و دمای بیرون 10°C بوده است، منار دچار آسیب شده است، اما دچار شکست نشده است. علت این امر غالباً تنش‌های کششی به تنش‌های فشاری در حالت سردشدن یکنواخت است، چرا که مصالح به‌کاررفته در برابر تنش‌های کششی، ضعف زیادی نسبت به حالت فشاری دارند.

۲. هر چه ضخامت پوسته بیشتر باشد، منار در اثر اختلاف دما در فصول مختلف سال، آسیب کمتری می‌بیند. به طور مثال جابجایی صورت‌گرفته در منار برسیان (به‌صورت کامل) با داشتن بیشترین ضخامت در بین ۹ منار، از همه‌ی موارد بسیار کمتر بوده است.

۳. آسیب‌های واردشده بر منارها در حالت گرم‌کردن و سردکردن یکنواخت، نسبتاً کمتر از حالات اعمال اختلاف دمای داخل و بیرون بوده است. برای مثال آسیب‌های واردشده به منار در حالتی که کل منار به دمای 10°C رسیده است، نسبت به حالت دمای داخل 21°C و دمای بیرون 10°C بیشتر بوده است.

۴. پوسته‌ی منار به تنهایی مقاومت بیشتری در برابر اختلاف دمای بیرون و داخل و گرم و سرد شدن یکنواخت منار دارد و آسیب‌های واردآمده به آن کمتر از منار کامل است. به این دلیل که در منار کامل تجمع ترک‌های ایجادشده در منار، بیشتر در قسمت اتصال راه‌پله به ستون مرکزی و پوسته است و به دلیل ضعف این قسمت‌ها، شکست در منار کامل زودتر از پوسته‌ی منار به تنهایی اتفاق می‌افتد.

این نتایج نیز از آنالیز منارها تحت بار حرارتی به‌دست آمده‌اند:

۱. منارها می‌توانند در دو حالت کامل و فقط پوسته‌ی بار باد با سرعت 150 km/h (حدود $1/4$ برابر باد مبنای اصفهان) را تحمل کنند و دچار شکست نشوند.

۲. پوسته به تنهایی می‌تواند جابجایی بیشتری را تحمل کند. برای مثال، جابجایی منار زیار در حالت فقط پوسته تحت بار باد با سرعت‌های 110 km/h و 150 km/h ، به ترتیب $0/83\%$ و $0/65\%$ بیشتر از حالت منار به صورت کامل بوده است.

افتاده است. دلیل این امر ضعف محل اتصال پلکان ماریچ به پوسته و ستون مرکزی است.

۴. هر چه نسبت ارتفاع به قاعده‌ی منارها کمتر باشد، شکست دیرتر اتفاق می‌افتد. به طور مثال، منارگار که کمترین نسبت ارتفاع به قاعده ($3/82$) را در بین منارها دارد، دیرتر از بقیه‌ی منارها دچار شکست شده است.

۵. با کاهش ارتفاع منار، زمان شکست به تأخیر می‌افتد. به عنوان مثال، با کاهش حدود $33/33\%$ ارتفاع منار رهروان، 29% به طول زمان شکست آن اضافه شده است.

۶. افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح حتی تا 50° برابر (که البته در عمل ممکن نیست) نمی‌تواند باعث جلوگیری از شکست منارها در مقابل زلزله شود. فقط با افزایش 10° برابری این مقادیر است که شکست رخ نمی‌دهد. البته با افزایش مقاومت مصالح، زمان شکست تا حدی به تأخیر می‌افتد.

۷. با تغییر معیار شکست ویلام - وارنک به دراکر - پراگر، منارها همچنان در همان مراحل ابتدایی شتاب‌نگاشت دچار شکست شده‌اند. جابجایی‌های مرحله‌ی شکست در معیار شکست دراکر - پراگر در همه‌ی منارهای تحت بررسی نسبت به معیار شکست ویلام - وارنک کاهش یافته است. به عنوان مثال، جابجایی در مرحله‌ی شکست برای منار رهروان با استفاده از معیار شکست دراکر - پراگر $91/54\%$ نسبت به معیار شکست ویلام - وارنک کاهش داشته است.

۸. با تغییر میزان میرایی از 5% به 20% منارها در همان مراحل قبلی دچار شکست شده‌اند، ولی مقدار جابجایی نهایی آن‌ها کمتر شده است. به عنوان مثال، در منار رهروان (فقط پوسته‌ی خارجی) تحت زلزله‌ی ویترو نوز، جابجایی در حالت میرایی 5% ، 65 m و در حالت میرایی 20% ، 52 m (حدود $8/1$ برابر حالت قبل) بوده است، ولی در هر دو حالت زمان شکست در لحظه‌ی $1/06\text{ s}$ بوده است.

از آنالیز منارها تحت بار حرارتی، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. هر چه اختلاف دما بیشتر باشد، آسیب واردشده به سازه نیز بیشتر است. همچنین آسیب واردشده به منار در حالت سردشدن نسبت به حالت گرم‌شدن بیشتر

منابع (References)

1. Moayedian, S.M. "Structural analysis of persian historical brick masonry minarets", M.Sc Thesis, University of Isfahan, Isfahan (2013).
2. Hejazi, M., *Historical Buildings of Iran: Their Architecture and Structure*, Computational Mechanics Publications (WIT Press), Southampton and Boston (1997).
3. *Basic Analysis Guide for ANSYS 14*, SAS IP Inc., New York (2011).
4. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., *Persian Architectural Heritage: Structure*, WIT Press, Southampton and Boston (2013).

5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800, Building and Housing Research Centre Tehran (1988) (in Persian).
 10. Khodadadi, A. “Seismic hazard analysis and hazard spectrum for Isfahan”, M.Sc Thesis, Science and Research Branch Islamic Azad University, Isfahan (2009) (in Persian).
 11. Silva, W. “Strong motion database”, California, <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html> (2012).
 12. EU-India Economic Cross Cultural Programme, *Benchmarking on the Seismic Behaviour of the Qutb Minar*, Rome (2006).
 13. EU-India Economic Cross Cultural Programme, *Guidelines for the Conservation of Historical Masonry Structures in Seismic Areas*, Rome (2006).
 14. *Eurocode 8. Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings*, European Committee for Standardisation, Brussels (2005).
 15. FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (2001).
 16. National Weather Service, *Historical Tornadoes*, Toronto (2003).
 17. Moghiman, M., *Air Conditioning and Central Heating Engineering*, Ferdowsi University Press, Mashhad (2003).
 18. *Iranian National Building Regulations, Loads*, Ministry of Housing and Urbanism, Tehran (2009) (in Persian).
 19. British Standard Institute-BS 6399-2, *Loading for Buildings – Part 2: Code of Practice for Wind Loads*, London (1997).