

## عملکرد منار تاریخی گسکر در برابر مخاطرات طبیعی باد و زلزله

مجید پورامینیان\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

الهه دیده‌ور

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

Majid.pouraminian@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

### چکیده:

منارهای آجری تاریخی از عناصر اصلی معماری ایران هستند و در سراسر کشور در ابعاد و ارتفاع‌های مختلف وجود دارند. در این مقاله منار آجری گسکر به ارتفاع ۱۶/۱۲ متر به کمک مدلسازی اجزای محدود توسط برنامه‌نویسی APDL و گسسته‌سازی دقیق به منظور دستیابی به الگوی آسیب دقیق انجام گرفته است. سپس تقاضای بار باد و بار زلزله مطابق مقررات ملی ساختمان تعیین و به سازه اعمال شده است. از ماکرومدل برای مدلسازی محیط مصالح بنایی استفاده شده است. خصوصیات غیرخطی نیز به مصالح اختصاص داده شده است. نتایج نشان داد که منار در برابر بارگذاری باد طرح و شدیدترین باد ثبت شده در دنیا ایمن است. در صورتی که تا ۱۲ برابر فشار باد طرح به سطح بادگیر منار اعمال شود رفتار غیرخطی بنا آغاز میگردد. همچنین منار در برابر زلزله طرح آسیب‌پذیر بوده و آسیب‌های خفیف در پای منار ایجاد شده است و بیانگر این است که منار در معرض ریسک خرابی قرار دارد.

**کلید واژگان:** منار آجری تاریخی، اجزای محدود، بارگذاری باد، بارگذاری زلزله، ترک خوردگی

## ۱- مقدمه

منارها نقش کلیدی در معماری ایران دارند و جزو میراث با ارزش دوران کهن در ایران می باشند. منار به معنی جای نور و بنایی بلند و کشیده است. با توجه قدمت چندصد ساله منارها و عدم لحاظ نمودن بارهای جانبی تقاضای ساختگاه در زمان طرح و ساخت این بناها را در برابر بارهای طبیعی سیل، باد و زلزله آسیب پذیر نموده و لازم است عملکرد سازه ای و آسیب پذیری آنها مطالعه شود و در صورتی که سطح ایمنی لازم را نداشته باشد راهکاری جهت بهسازی و حفظ این میراث برای نسل های آینده ارائه نمود. مطالعات زیادی در رابطه با مخاطرات طبیعی نظیر سیل، بادهای سهمگین و زلزله بر سازه های تاریخی از جمله منارها انجام شده است [۱۳-۱۱]. دانگ و همکاران [۵]، روشی برای ارزیابی ریسک خرابی سازه بنایی غیرمسلح در برابر زلزله و شستگی ناشی از سیل ارائه نمودند. طبق آمار اغلب سیل ها بعد یا قبل از وقوع زلزله رخ می دهند بنابراین بررسی ریسک همزمان خطر سیل و زلزله اهمیت زیادی دارد. ساختمان همکف مورد مطالعه توسط روش اجزای محدود با نرم افزار انسیس بررسی شد که برای رفتار غیرخطی و تامین شرط همگرایی در ناحیه فشاری مصالح بنایی به کمک رابطه تنش- کرنش و از مقاومت کششی ناچیز مصالح بنایی صرف نظر شده است. نتایج تحقیق نشان داد نیروی کنترل کننده عملکرد سازه ای زلزله است و سیل تاثیر کوچکی در منحنی شکنندگی آسیب کم و متوسط و تاثیر نسبتا بزرگی در آسیب های بالا دارد. در مطالعه ای جامع توسط حجازی و همکاران [۷،۸]، رفتار ۹ منار های آجری شهر اصفهان تحت بار زلزله و باد و دما به کمک روش اجزای محدود انجام گرفته است. مشخصات هندسی منارها شامل: ارتفاع منارها ۱۶/۲ الی ۴۴/۵ متر، قطر پایه (سکو) ۵/۵ تا ۴/۸ متر و قطر تاج (کلاهک) ۴/۷ تا ۱/۶ متر و ضخامت دیواره ۰/۷۷ تا ۰/۳۸ متر است. نتایج نشان داد در صورتی که تغییرات دما بیرون و داخل منارها در نظر گرفته شوند منجر به خرابی می شود. بار باد ساختگاه قادر به خرابی هیچ یک از منارها نیست. بار زلزله ساختگاه منجر به خرابی تمامی منارها می شود. با افزایش مقاومت مصالح و با کاهش ارتفاع منارها، خرابی به تاخیر می افتد. ارزیابی خرابی منارهای سنگی کشور ترکیه تحت بادهای سهمگین با در نظرگیری عدم قطعیت های باد توسط یورال و همکاران [۱۳] انجام شده است. منار مورد مطالعه در ناحیه انتقال از پایه به ساقه (قسمت میانی منار) دارای تغییر مقطع از شکل مربعی به دایره است. بعد پایه ۲/۲\*۲/۲ مترمربع و ارتفاع منار ۳۴/۵ متر از مشخصات هندسی منار مورد مطالعه است. بار باد که به نیمه رو به باد مدل اجزای محدود منار اعمال شده است توسط تحلیل آماری روی داده های محلی

باد اداره هواشناسی بدست آمده است. تحلیل سازه منار تحت بار باد بصورت استاتیکی غیرخطی انجام گرفته است. نتایج نشان داده تنش کششی قبل از تنش فشاری به مرحله غیرخطی می رسد طوری که شروع رفتار غیرخطی در کشش و فشار به ترتیب در کرنش های ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۴ بوده و عامل اصلی فروپاشی منار تنش کششی تعیین شده است. شروع خرابی از ناحیه انتقالی منار است. دوگانگون و همکاران [۴] با ارزیابی پاسخ دینامیکی تاریخچه زمانی سازه بنایی منارهای با ارتفاع ۲۰ تا ۳۰ متر نشان دادند بیشینه تنش های فشاری ایجاد شده کمتر از حد تنش فشاری قابل تحمل توسط مصالح بنایی سازه بوده اما بیشینه تنش های کششی موجود دارای مقادیر قابل توجهی بوده و فراتر از تنش کششی مجاز مصالح است و ایمنی کافی ندارد. یورداکول و همکاران [۱۲] با بررسی تاریخچه پاسخ لرزه ای منار سنگی با ارتفاع ۲۹ متر که رفتار الاستیک خطی مصالح و مدل ازای محدود نرم افزار سپ<sup>۲</sup>تایجی مشابه یافته یورال و همکاران داشتند که اغلب خسارت به منارها در محل تغییر مقطع از پایه به ساقه است. بطور کلی ادبیات فنی سازه های بنایی تاریخی بیانگر عدم تامین ایمنی در بیشینه تنش های کششی می باشد. آدام ماهر و همکاران [۱] شرایط سازه ای منار تاریخی با ارتفاع ۴۲ متر واقع در کشور مصر را تحت بار غیرهمزمان باد و زلزله ارزیابی نموده اند. تورکلی و همکاران [۱۱] پاسخ دینامیکی منارهای بنایی را تحت اثر باد و زلزله بررسی نمودند. منار ۲۱ متری مورد مطالعه از ناحیه انتقال آسیب پذیر بود و اغلب منارها بدون بروز رفتار شکل پذیر به خرابی می رسند. در این مطالعه بار باد بعنوان بار غالب بدست آمد و بعنوان یک نتیجه توصیه شده است که در ارزیابی پاسخ منارها بایستی برای باد و زلزله بررسی شوند. ادبیات فنی گفته شده در بالا کمک شایانی به درک رفتار سازه های بنایی و بویژه منارهای تاریخی در برابر خطرات طبیعی باد، آتش سوزی، زلزله و سیل می نماید. اما ویژگی های متفاوت هر منار شامل هندسه خاص منارها که با توجه به معماری زمان ساخت و منطقه جغرافیایی و مصالح ساختمانی در دسترس، خطرات طبیعی ساختگاه اهمیت ارزیابی مستقل برای هر منار را نشان می دهد. بنابراین در این تحقیق مناره آجری گسکر، یکی از زیباترین بناهای برج مانده از دوره سلجوقی است که در شمال ایران بنا شده است و در فهرست آثار تاریخی ملی ثبت شده مورد ارزیابی قرار گرفته است و بصورت کیفی ریسک خرابی تحت خطرات باد سهمگین و زلزله ارائه شده است.

## ۲- معرفی منار تاریخی گسکر

مناره آجری گسکر (مناره بازار)، در غرب شهرستان صومعه سرا استان گیلان بنا شده است که تصویر هوایی آن در شکل (۱) قابل مشاهده است. مصالح بکار رفته در بدنه منار از آجرهای مربعی شکل با ابعاد ۲۰ سانتی متر و ضخامت ۵ سانتی متر و ملات ساروج با ضخامت بند ملات ۱ تا ۱/۵ سانتی متر است. بازشوهای منار شامل یک درب ورودی در جنوب غربی دارای قوس زینتی و دو نورگیر به ارتفاع ۱ متر و عرض ۱۰ سانتی متر و عمق دیواره منار است. راه پله مارپیچی که دور ستونی مربعی شکل به ابعاد ۰/۹\*۱ متر مربع و ارتفاع منار می چرخد. ۴۷ گام پله با ارتفاع هر یک ۳۰ سانتی متر و عرض شعاعی پله ۴۵ تا ۱۸ سانتی متر می باشد. راه پله و دیواره منار پیوسته کار شده است. در دهه های قبل بخش هایی از این بنا تخریب و بازسازی شده است و ارتفاع فعلی آن کوتاه تر از ارتفاع منار اولیه است.



شکل ۱- تصویر هوایی منار گسکر

## ۳- مدل اجزای محدود

بکارگیری تحلیل اجزای محدود در مدلسازی و تحلیل سازه های تاریخی با استفاده از هر دو روش میکرو مدل<sup>۴</sup> و ماکرو مدل<sup>۵</sup> منجر به نتایج دقیقی می شود [۱۲]. پژوهش های زیادی از روش ماکرو مدل برای مدلسازی محیط مصالح بنایی و ارزیابی رفتار آنها استفاده نموده اند [۲۳-۱]. در این روش اجزای مصالح بنایی ( واحد<sup>۶</sup> و ملات<sup>۷</sup>) و سطوح بند ملات بصورت مجزا مدل نمی شوند بلکه بصورت ماده ای همگن و پیوسته با مشخصات مکانیکی یکسان مدل سازی می شوند. استفاده از روش میکرو مدل برای سازه هایی با تعداد واحدهای بنایی زیاد و هندسه پیچیده علاوه بر اینکه پیش بینی مد گسیختگی را دشوار می سازد محدودیت های مدلسازی و محاسباتی به همراه دارد. در مقاله حاضر نیز از این روش استفاده شده است. مدل گسسته سازی شده توسط جزء حجمی ۸ گرهی SOLID65 که قابلیت پکیدگی<sup>۸</sup> و ترک خوردگی<sup>۹</sup> را دارد در شکل (۲) نشان داده شده است. محور مختصات در راستای ارتفاع بنا و محور X از مرکز سطح پایه به سمت درب پلکان است. از مدلسازی نورگیرها در مدل اجزای محدود صرف نظر شده است. در ساخت مدل اجزای محدود از روش مستقیم تولید مدل<sup>۱۰</sup> توسط ۶۳۹۸ گره و ۸۴۳۹ جزء برای سرعت در ایجاد مدل و به حداقل رساندن خطاهای احتمالی برنامه نوشته شده به زبان APDL<sup>۱۱</sup> می باشد. در روش مستقیم، مدل اجزای محدود از پایین به بالا<sup>۱۲</sup> ساخته می شود یعنی از گره ها، جزء و از جزء ها مدل سازه ایجاد می شود. استفاده از این روش در مدل های پارامتری یا وابسته به متغیر باعث افزایش سرعت و کاهش خطاهای کاربر می گردد. وزن منار ۴۷۹ تن است. پایه منار صلب فرض شده است و برای سادگی از لحاظ نمودن اثر نرمی خاک صرف نظر شده است و برای محاسبه پاسخ دقیقتر لازم است تحلیل سازه با در نظر گیری اندرکنش سازه- خاک انجام شود. طبق اطلاعات کسب شده خاک منطقه نرم است و نتایج گمانه برداری تا عمق ۲۰ متر از رس لای دار CL است و عمق تراز آب زیرزمینی در محل حدود ۳ الی ۴ متر از سطح زمین است.

4 Cracking 9  
5 Direct Generation 0  
5 ANSYS Parametric Design Language  
5 Bottom to Up Design Model<sup>2</sup>

4 Micro Model 4  
4 Macro Model 5  
4 Unit 6  
4 Mortar 7  
4 Crushing 8

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی منار

| پارامتر      | واحد       | هم    | ویلام-وارنکه | منحنی فشاری |
|--------------|------------|-------|--------------|-------------|
| وزن مخصوص    | $(kg/m^3)$ | ۱۶۲۰  | -            | -           |
| مقاومت فشاری | $(MPa)$    | ۱/۶۲  | -            | -           |
| مقاومت کششی  | $(MPa)$    | ۱/۱۳۵ | -            | -           |
| $\beta_t$    | -          | -     | ۰/۲۵         | -           |
| $\beta_c$    | -          | -     | ۰/۷۵         | -           |

\*،\*

۰/۰۰۰۵، ۰/۷

۰/۰۰۱، ۱/۲۶

۰/۰۰۱۵، ۱/۵

۰/۰۰۱، ۱/۲۶

۰/۰۰۱۸، ۱/۶

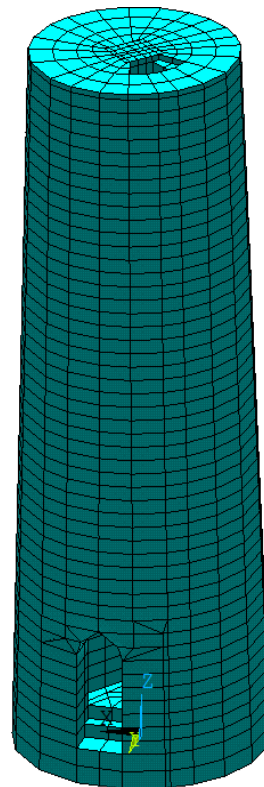
۰/۰۰۲۲، ۱/۶

۰/۰۰۱، ۱/۲۶۲

۰/۰۰۲۵، ۱/۵۱

۰/۰۰۳، ۱/۴۲

مختصات نقاط واقع بر  
منحنی کرنش و تنش  
فشاری با در نظر گیری نرم  
شوندگی  $[\Delta]$



شکل ۲- مدل اجزای محدود منار

(۱)

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1/96 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - 0/96 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \Rightarrow \left( 0 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} < 1 \right)$$

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1/2 - 0/2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \Rightarrow \left( 1 \leq \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \leq 1/6 \right)$$

$$\varepsilon_0 = 0/001185$$

پریود تجربی برای مناره های بنایی بلند و لاغر طبق رابطه (۲) بدست می آید [۱۲ و ۲۴] و با مقادیر پارامترهای توصیه شده برای مناره‌ها، پریود اصلی مناره گسکر ۰/۲۰۳ ثانیه بدست آمده است.

$$T_1 = \frac{CH \left( \frac{H}{w+H} \right)^\delta}{w^\phi} = 0/203 \text{ sec} \quad (2)$$

$$C = 1, \phi = 1, \delta = 5/84m, H = 16/1m$$

شکل طیف تقاضای ساختمانی منار ( خاک نوع III و شتاب مبنای زلزله  $A = 0/3$  ) که از آیین نامه ۲۸۰۰ بدست آمده است و مقادیر

#### ۴- ویژگی های مکانیکی مصالح و ارتعاشی منار

خصوصیات مکانیکی مصالح منار با توجه به بازدید از سازه منار و آزمایش‌های انجام شده توسط مولف اول در بناهای تاریخی شمال و شمال غرب کشور و همچنین بناهای نزدیک به محل منار و سازه‌های هم عصر منار گسکر که تعدادی از این سازه‌ها دارای ابعاد یکسان با ابعاد آجرهای منار دارند (ارگ علیشاه تبریز، پل کوچه کرمانشاه، پل خشتی لنگرود و موزه کاخ رامسر) [۱۴ و ۱۵ و ۱۸ و ۲۳]. خصوصیات مصالح در جدول (۱) آورده شده است. برای در نظر گیری رفتار ترد کششی مصالح بنایی از معیار ویلام-وارنکه استفاده شده است. همچنین از منحنی چند خطی رفتار مصالح بنایی در فشار استفاده شده است. به منظور مشکلات عدم همگرایی قابلیت پکیدگی مصالح خاموش شده است و مطابق رابطه (۱) و نقاط جدول (۱) رفتار فشاری مصالح تحت فشار به برنامه داده شده است. ضریب انتقال برش در حالت ترک باز و بسته نیز طبق تجربه و صحیح و خطا در نظر گرفته شده است.

درختان و نواحی خارج از شهرها و نواحی با درختان پراکنده تعیین می‌شود. در این رابطه ها  $Z$  ارتفاع تراز مورد نظر بنا برای محاسبه فشار باد است. با توجه به خارج از شهر بودن، وجود زمین‌های کشاورزی و نبود درخت از رابطه (۶) مقادیر ضریب ( $C_e$ ) برای منار ۲ و ۲/۲ به ترتیب تا ارتفاع ۱۰ متر و ۱۰ متر به بالا بدست آمده است. ضریب ( $C_q$ ) نیز برابر ۰/۸ است. بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، سرعت مبنای باد برای ساختمان منار  $V = 90 \text{ km/hr}$  است [۲۶]. به این معنی که احتمال تجاوز سرعت باد در ساختمان منار کمتر از ۲٪ در سال است ( دوره بازگشت ۵۰ ساله). پروفیل فشار باد وارده به سطح بادگیر منار در شکل (۴) قابل مشاهده است. گفتمنی است که بیشترین سرعت باد ثبت شده در دنیا برابر  $205 \text{ km/hr}$  در ایالات متحده آمریکا بوده است.

$$p = C_e \times C_q \times q \quad (۳)$$

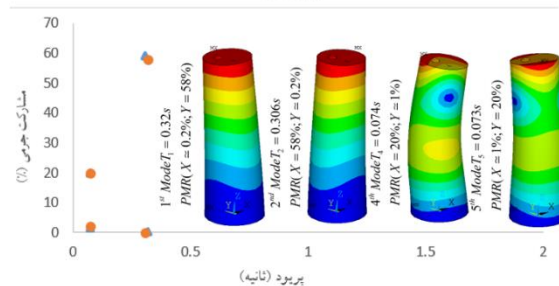
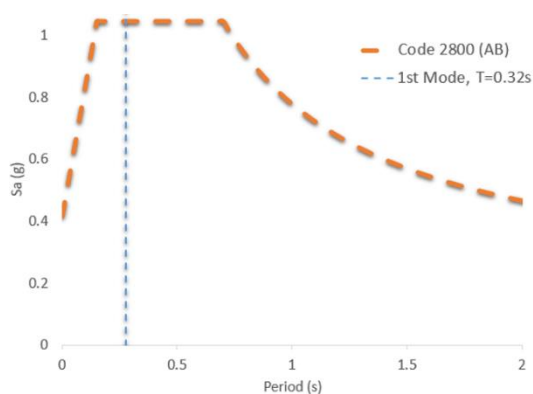
$$q = 0.005 V^2 \quad (۴)$$

$$C_e = 1/6 \left( \frac{Z}{1.0} \right)^{0.24}; C_e \geq 1/6 \quad (۵)$$

$$C_e = 2 \left( \frac{Z}{1.0} \right)^{-0.16}; C_e \geq 2 \quad (۶)$$

بر اساس پروفیل فشار باد طرح در راستای محور  $-Y$  ( راستا و محور بحرانی تر) تغییر شکل منار طبق شکل (۵) نمایش داده شده است. همچنین پاسخ منار برای بارگذاری شدیدترین باد ثبت شده توسط بشر نیز نمایش داده شده است. نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد منار تحت بارگذاری باد منطقه ایمنی کافی داشته و در معرض ریسک خرابی قرار ندارد که از دلایل آن متوسط بودن سرعت باد منطقه، کوتاه بودن منار و نسبتا چاق بودن منار (که باعث سنگینی و پایداری آن مقابل بار باد می‌شود) می‌تواند باشد. در شکل (۶) آسیب وارده به منار پس از سطوح مختلف بار باد نمایش داده شده است. شروع ترک خوردگی جزئی پله‌های پای منار در بار بادی معادل ۱۲ برابر باد طرح ساختمان بدست آمده است. نتیجه حاصل شده در این بخش در رابطه با تامین ایمنی در برابر باد برای منار مشابهی (از نظر هندسه و ارتفاع) واقع در اصفهان به نام منار گار که در مراجع [۷۸] بررسی شده است تطابق دارد. بنابراین با توجه به رفتار کاملاً خطی و الاستیک منار در برابر بار باد طرح انتظار می‌رود در این سازه نیروی بحرانی نیروی باد نباشد.

پریود مودهای موثر به همراه مشارکت‌های جرمی مودهای موثر مدل اجزای محدود در راستاهای افقی در شکل (۳) نشان داده شده است. مود غالب جهت  $X$  مود دوم و مود غالب در جهت  $Y$  مود اول است که هر دو در قسمت ثابت شتاب طیفی<sup>۴</sup> با مقدار زیاد واقع شده اند [۹ و ۲۴].



شکل ۳- نتایج تحلیل مودال

## ۵- بارگذاری باد

بار باد ( $F$ ) در هر یک از امتدادهای اصلی سازه جداگانه اعمال می‌شود. کل نیروی وارد از باد به سازه برابر است با  $(F = p \times A)$  که  $A$  سطحی (سطح بادگیر یا سطح رو به باد منار) از سازه است که فشار به آن وارد می‌شود. فشار باد وارد بر سازه طبق رابطه (۳) تعیین می‌شود که به آن فشار مبنای باد گفته می‌شود و به ضریب اثر تغییرات سرعت ( $C_e$ )، ضریب شکل ( $C_q$ ) و شدت بار ناشی از باد در منطقه ( $q$ ) بستگی دارد. شدت بار باد با داشتن سرعت مبنای باد منطقه مطابق رابطه (۴) بدست می‌آید [۲۶]. ضریب اثر تغییرات سرعت نیز توسط روابط (۵) و (۶) به ترتیب برای نواحی داخل شهرها یا تراکم انبود

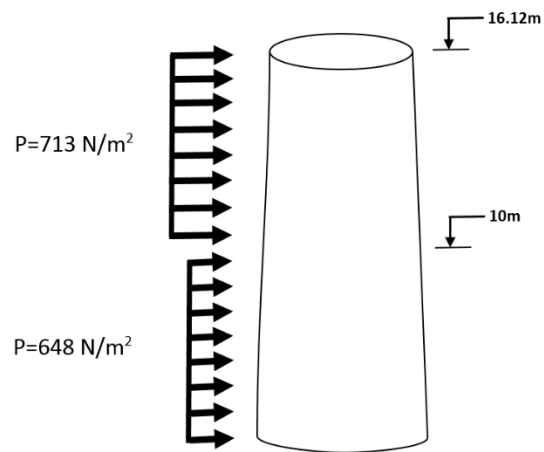
<sup>5</sup> Spectral Acceleration

4

<sup>5</sup> Participation Mass

3

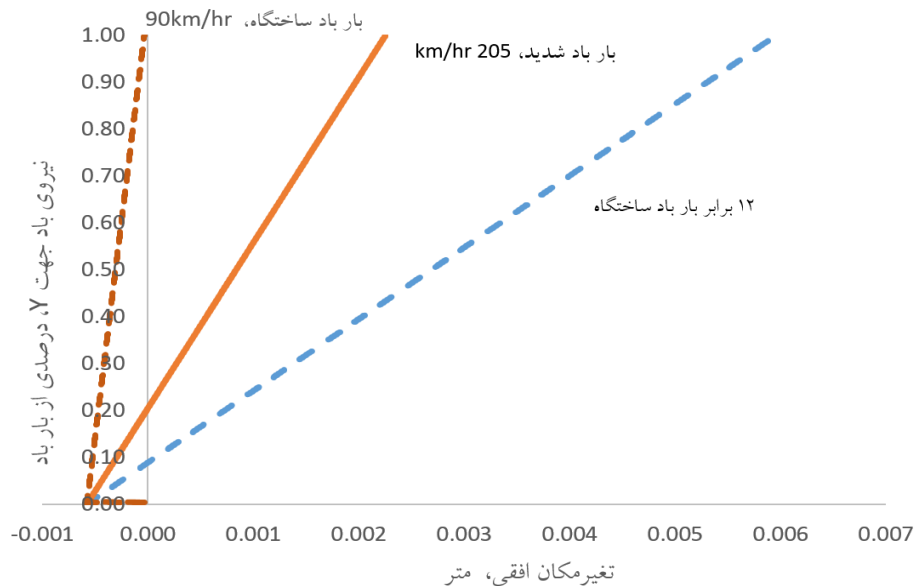
مطالعات انجام گرفته در رابطه با پهنه بندی خطر زلزله در شمال ایران انجام شده است [۲۸]. بیشینه شتاب ساختمانی منار برای زلزله‌های سطح خطر ۱ و ۲ به ترتیب برابر  $0.38g$  و  $0.66g$  است. گام زمانی شتابنگاشت  $0.1s$  انتخاب شده است. از میرایی متناسب جهت حل معادلات حرکت استفاده شده و ضرایب ماتریس جرم  $\alpha$  و سختی  $\beta$  برای جهت‌های  $X$  و  $Y$  به ترتیب  $(1/902,0/00083)_X$  و  $(1/847,0/00082)_Y$  محاسبه شده است. برای کاهش زمان محاسبات تحلیل غیرخطی، شتابنگاشت طبق معیار آریاس مدت موثر ۵ تا ۹۵ درصد شتابنگاشت انتخاب شده است. در شکل‌های (۷) و (۸) تاریخچه پاسخ نقطه کنترلی واقع در بالای منار نشان داده شده است. هرچند بیشینه تغییر مکان جانبی<sup>۵۵</sup> بدست آمده کمتر از مقادیر مجاز برای بناهای مصالح بنایی است و منجر به فروپاشی بنا نشده اما آسیب وارده به بخش پایینی منار در شکل (۹) قابل رویت است. منار سازه‌ای کنسولی است و بیشترین لنگر و برش هنگام ارتعاش به قسمت پایینی آن وارد می‌شود به همین دلیل الگوی آسیب نشان داده شده در این ناحیه است. دریافت معیار آسیب پذیری منار در نظر گرفته شده است.



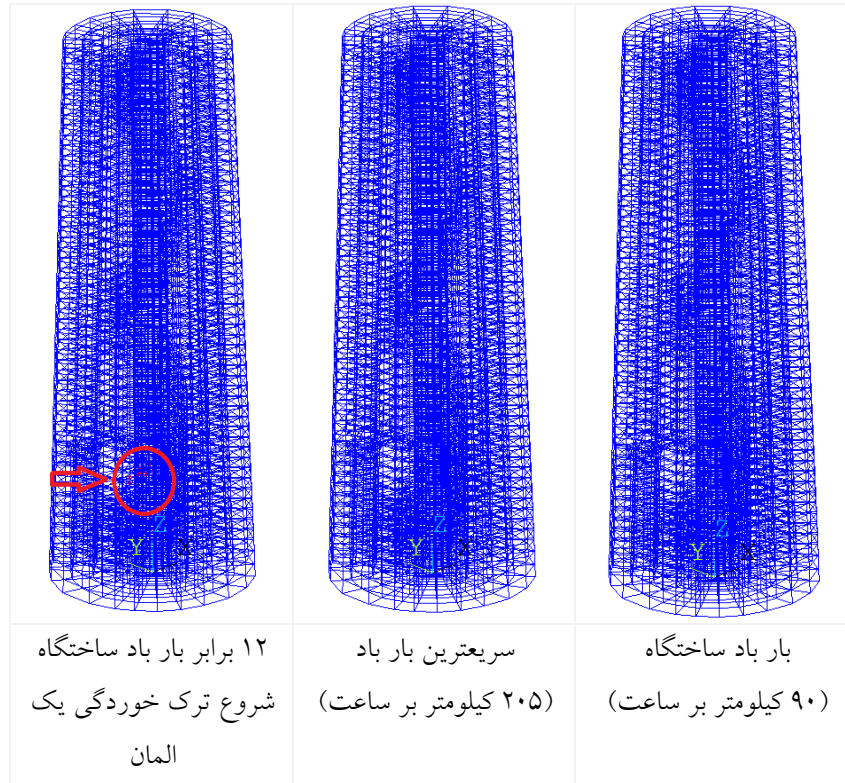
شکل ۴- بارگذاری باد طرح ساختمانی

#### ۶- بارگذاری زلزله سطح خطر ۱

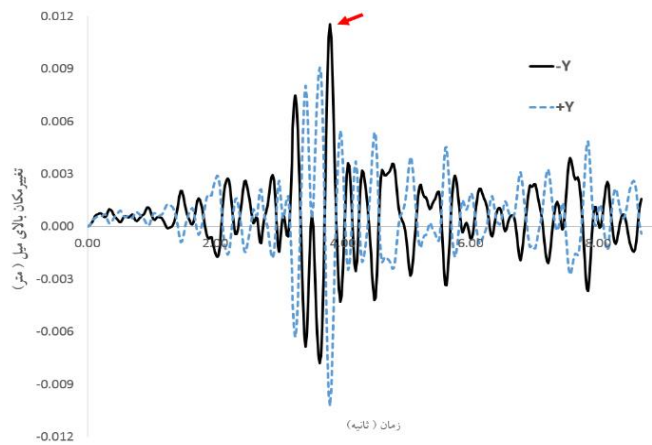
برای بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای دو مولفه افقی شتابنگاشت ورزقان ۲۰۱۲ ( $RSN : 5579101$ ) انتخاب و به زلزله طرح ساختمانی مقیاس شده است بطوری که مقیاس شتاب طیفی در پریود مود اصلی  $S_a(T_1)$  انجام شده است. شتاب مبنای طرح ساختمانی با استفاده از



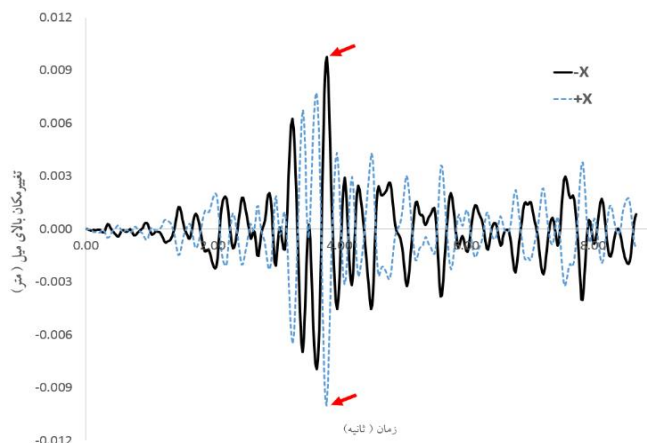
شکل ۵- تغییر شکل منار تحت بارگذاری باد



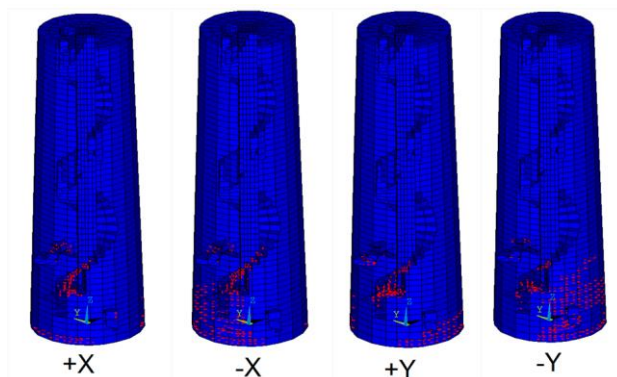
شکل ۶- آسیب وارده به منار پس از بارگذاری باد



شکل ۷- تغییر شکل نقطه بالای منار در اثر بارگذاری شتابنگاشت ورزقان در راستای Y



شکل ۸- تغییر شکل نقطه بالای منار در اثر بارگذاری شتابنگاشت ورزقان در راستای X



شکل ۹- الگوی آسیب منار تحت زلزله طرح ورزقان ( آسیب از چپ به راست بیشتر می شود)

رابطه (۸) موسسه بتن آمریکا برای تغییر مکان جانبی دودکش‌ها [۲۹]:

$$\begin{aligned} Y_{\max} &\leq 3 / 33 h_i; \\ h_i = 16 / 11; Y_{\max} &\leq 53 \text{ mm} \end{aligned} \quad (8)$$

رابطه (۹) برای تغییر مکان جانبی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح [۵]:

مقادیر مجاز تغییر مکان نسبی سازه های مصالح بنایی غیر مسلح طبق توصیه محققان در روابط زیر نشان داده شده است. رابطه (۷) پیشنهاد شده توسط تورکلی و همکاران [۱۱]:

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} &\leq \frac{0.02 h_i}{R}; \\ R = 3; h_i = 16 / 11; \Delta_{\max} &\leq 10 / 7 \text{ cm} \end{aligned} \quad (7)$$



- منار در برابر بارگذاری باد ساختگاه و بار باد شدید ساختگاه دارای حاشیه ایمنی بسیار خوبی است و در معرض ریسک خرابی قرار ندارد و در صورتی که بارگذاری باد ۱۲ برابر بار باد ساختگاه اعمال شود رفتار سازه منار وارد ناحیه غیرخطی شده است که این حالت بارگذاری باد نیز دارای احتمال وقوع بسیار کم خواهد بود و در چنین بارگذاری نادری، ریسک خرابی کم است زیرا ورود به ناحیه غیرخطی به منزله خرابی سازه منار نمی باشد.
- منار در برابر بارگذاری زلزله تکان قوی آسیب پذیر است و علیرغم اینکه تغییر شکل های نسبی کم و مقادیر اغلب در محدوده مجاز را پس از اتمام بارگذاری زلزله تجربه نمود اما الگوی آسیب بدست آمده بیانگر ورود منار به رفتار غیرخطی است و این برای سازه های با اهمیت زیاد و دارای ارزش تاریخی قابل قبول نمی باشد چون در زلزله سطح ۲ در ریسک خیلی بالای فروپاشی قرار خواهند گرفت.
- از میان سه رابطه پیشنهادی برای حالات حدی تغییر شکل نسبی سازه بنایی غیرمسلح، رابطه سوم مطابقت بیشتری با مشاهدات آسیب پذیری منار مطالعه حاضر دارد و دو رابطه پیشنهادی اول به نظر می رسد مقادیری فراتر از تحمل سازه بنایی غیرمسلح تاریخی باشند.
- با بررسی تاریخچه تعمیر مکان جانبی بالای منار مشخص است، سازه در راستای  $Y$  آسیب پذیرتر از راستای  $X$  است. همچنین سازه منار در جهت  $-Y$  آسیب پذیر تر از  $+Y$  است. بطور مشابه سازه منار در جهت  $-X$  آسیب پذیر تر از  $+X$  است. آسیب پذیری سازه بطور خلاصه بصورت مقابل نشان داده می شود:

$$+X < -X < +Y < -Y$$

## مراجع

- [1] Adam MA, El-Salakawy TS, Salama MA, Mohamed AA. Assessment of structural condition of a historic masonry minaret in Egypt. Case Studies in Construction Materials. 2020 Dec 1;13:e00409.
- [2] Aşıkoğlu A, Avşar Ö, Lourenço PB, Silva LC. Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering. 2019 Jun;17(6):3365-95.
- [3] Bilgin H, Huta E. Earthquake performance assessment of low and mid-rise buildings: Emphasis

$$No.damage : \theta \leq \frac{1}{1400}$$

$$(\theta \leq 1/15cm)$$

$$Slight.damage : \frac{1}{1400} \leq \theta \leq \frac{1}{700} : \quad (9)$$

$$(1/15cm \leq \theta \leq 2/3cm)$$

$$Moderate.damage : \frac{1}{700} \leq \theta \leq \frac{1}{200}$$

$$Sever.damage : \frac{1}{200} \leq \theta \leq \frac{1}{100}$$

$$Collapse : \theta \geq \frac{1}{100}$$

که طبق دو رابطه پیشنهادی اول منار گسکر ایمن است در حالی که طبق رابطه پیشنهادی سوم (رابطه ۹) سازه متحمل خسارت خفیف شده که در جدول ۲ بصورت خلاصه آورده شده است. بیشینه مقادیر تغییر مکان نسبی موجود از تغییر مکان افقی بالای منار در طول بارگذاری دینامیکی بدست آمده است.

جدول ۲- کنترل تغییر مکان نسبی ( سانتیمتر)

| بیشی | مجاز             | مجاز | مجاز   |
|------|------------------|------|--------|
| نه   | مجاز             | مجاز | مجاز   |
| موجو | دانگ و همکاران   | ACI  | تورکلی |
| د    |                  |      |        |
| ۱/۱۶ | ۵/۳              | ۱۰/۷ | ۱/۱۶   |
|      | (۱/۱۵ ≤ θ ≤ ۲/۳) |      |        |

## ۷- نتیجه گیری

منارهای تاریخی جزو سازه های بنایی غیرمسلح می باشند که تجربه خرابی آنها در اثر وقوع بادهای سهمگین و زلزله های تکان قوی در دهه های گذشته در نقاط مختلف دنیا ثبت و گزارش شده است که اهمیت مطالعه موردی رفتار هر یک از بناهای ارزشمند تاریخی را می رساند. در مقاله حاضر منار آجری تاریخی گسکر مورد بررسی دقیق قرار گرفته تا میزان آسیب پذیری این بنا در برابر خطرات محتمل باد سهمگین و زلزله تکان قوی تعیین گردد. پس از مدل سازی دقیق و منظم در نرم افزار اجزای محدود به کمک کدنویسی بارهای تقاضا ساختگاه منار گسکر تعیین و قابلیت رفتار غیرخطی مصالح به مدل سازه ای اختصاص داده شد. ناحیه آسیب پذیر که دچار ترک خوردگی و فشار بیش تنش تحت بارگذاری های مختلف بدست آمده است. همچنین مهمترین کنترل معیار آسیب پذیری تغییر مکان نسبی جانبی در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده به شرح ذیل است:

arch bridge under service loads using SFEM. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2019 Dec;4(1):1-3.

[15] Sadeghi AR, Pouraminian MA. An investigation of the vulnerability of Arge Tabriz (Tabriz Citadel). In 8th International Masonry Conference in Dresden, July 2010.

[16] Pouraminian M, Sadeghi A, Pournakhshian S. Seismic behavior of Persian brick arches. *Indian Journal of Science and Technology*. 2014 Apr 1;7(4):497.

[17] Hosseini M. Seismic Safety Evaluation of Tabriz Alisha Historical Citadel Using Finite Element and Simplified Kinematic Limit Analyses. *Modares Civil Engineering journal*. 2016 Jun 10;16(2):91-102.

[18] Pouraminian M, Pournakhshian S, Noroozinejad Farsangi E, Berenji S, Keyani Borujeni S, Moosavi Asl M, Mohammad Hosseini M. Reliability-based safety evaluation of the BISTOON historic masonry arch bridge. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2020;30(1).

[19] Pouraminian M, Hosseini M. Seismic safety evaluation of Tabriz historical citadel using finite element and simplified kinematic limit analyses. *Indian Journal of Science and Technology*. 2014 Apr 1;7(4):409.

[20] Pouraminian, M., Sadeghi, A., Pournakhshian, S. An Investigation on the Seismic Stability of Persian Brick Arches. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012; 42.1(66): 49-55.

[21] Fathi A, Sadeghi A, Emami Azadi MR, Hoveidaie N. Assessing seismic behavior of a masonry historic building considering soil-foundation-structure interaction (Case Study of Arge-Tabriz). *International Journal of Architectural Heritage*. 2020 Jul 2;14(6):795-810.

[22] Fathi A, Sadeghi A, Azadi MR, Hoveidaie N. Assessing the soil-structure interaction effects by direct method on the out-of-plane behavior of masonry structures (case study: Arge-Tabriz). *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020 Nov;18(14):6429-43.

[23] Pouraminian M, Pournakhshian S. Seismic vulnerability evaluation of historical buildings by performance curves, case study for Ramsar Museum. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*. 2013;5(11):1446-53.

[24] Shakya M, Varum H, Vicente R, Costa A. Empirical formulation for estimating the fundamental frequency of slender masonry

on URM buildings in Albania. *Earthquakes and Structures*. 2018 Jun 1;14(6):599-614.7

[4] Dogangun A, Acar R, Sezen H, Livaoglu R. Investigation of dynamic response of masonry minaret structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2008 Aug;6(3):505-17.

[5] Dong ZQ, Li G, Song B, Lu GH, Li HN. Failure risk assessment method of masonry structures under earthquakes and flood scouring. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2021 Feb 3:1-6.

[6] Genç AF, Ergün M, Günaydin M, Altunişik AC, Ateş Ş, Okur FY, Mosallam AS. Dynamic analyses of experimentally-updated FE model of historical masonry clock towers using site-specific seismic characteristics and scaling parameters according to the 2018 Turkey building earthquake code. *Engineering Failure Analysis*. 2019 Nov 1;105:402-26.

[7] Hejazi M, Moayedian SM, Daei M. Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets under Wind Load. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2015 Mar 21;5(1):165-76. (In Persian).

[8] Hejazi M, Moayedian SM, Daei M. Structural analysis of Persian historical brick masonry minarets. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016 Apr 1;30(2):04015009.

[9] Khaloo A, Khoshnevis A, Yekrangnia M. On the vulnerability of the Shrine of Prophet Daniel through field observation and numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*. 2019 Aug 1;102:237-59.

[10] Torelli G, D'Ayala D, Betti M, Bartoli G. Analytical and numerical seismic assessment of heritage masonry towers. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020 Feb;18(3):969-1008.

[11] Türkeli E. Dynamic Seismic and Wind Response of Masonry Minarets. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2020 Mar 9;64(2):353-69.

[12] Yurdakul M, Yılmaz F, Artar M, Can Ö, Öner E, Daloğlu AT. Investigation of time-history response of a historical masonry minaret under seismic loads. In *Structures* 2021 Apr 1 (Vol. 30, pp. 265-276). Elsevier.

[13] Ural A, Firat FK. Evaluation of masonry minarets collapsed by a strong wind under uncertainty. *Natural Hazards*. 2015 Mar 1;76(2):999-1018.

[14] Pouraminian M, Pournakhshian S, Hosseini MM. Reliability analysis of Pole Kheshti historical

structures. *International Journal of Architectural Heritage*. 2016 Jan 2;10(1):55-66.

[25] Standard No 2800 (2014). Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings, 4<sup>th</sup> Edition, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.

[26] Iranian National Building Code (2013). Part 6: loads on the building / the office of development and promotion of national building regulations (Ministry of Roads and Urban Development) - 2013 edition.

[27] Khoshnevis N, Taborda R, Azizzadeh-Roodpish S, Cramer CH. Seismic hazard estimation of northern Iran using smoothed seismicity. *Journal of Seismology*. 2017 Jul;21(4):941-64.

[28] Kheyroddin A, Anvari A.M. Loading of structures, Third Edition, 2014, Semnan University Press (In Persian).

[29] American Concrete Institute "ACI 307/98 with commentary: Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 1998

## Performance of Gaskar Historical Minaret against Natural Wind and Earthquake Hazards

Majid Pouraminian

Department of civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University,  
Ramsar, Iran

Elahe Didehvar

Department of civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University,  
Ramsar, Iran

Majid.pouraminian@gmail.com

### Abstract

Historical brick minarets are the main elements of Iranian architecture and exist throughout the country in diverse dimensions and heights. In this research, Gaskar brick minaret with a height of 16.12 meters has been modeled by the finite element software by APDL programming and precise discretization, in order to achieve an accurate damage pattern. Then the demand for the both wind and earthquake loads is determined according to the national building codes and applied to the minaret structure. Macro-modeling has been utilized to model the masonry materials domain. Nonlinear properties are also assigned to masonry materials. The results presented that the minaret is safe against both of the design wind load (90km/h) and the fastest recorded wind in the world (205km/h). If up to 12 times the design wind load is applied to the windshield surface of the minaret, the nonlinear behavior of the building will begin. The minaret is also vulnerable to earthquakes and minor damage has occurred at the bottom of the minaret, indicating that the minaret is at risk of collapse.

**Keywords:** Brick Minaret, Finite Element, Wind Loading, Earthquake Loading, Cracking.