



مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

تحلیل منارهای تاریخی آجری ایران تحت بار باد

مهرداد حجازی^{۱*}، سید محمد مویدیان^۲، مریم داعی^۳

^۱دانشیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
^۲کارشناس ارشد مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
^۳استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۸/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۳۰

چکیده

منارها از بناهای بارز تاریخ به‌جامانده از دوران کهن در ایران می‌باشند. از مهم‌ترین منارهای آجری ایران می‌توان به منارهای آجری تاریخی اصفهان که در قرون پنجم و ششم هجری قمری ساخته شده‌اند اشاره کرد. در این مقاله به بررسی اثر بار باد بر تعدادی از منارهای آجری اصفهان در حالات مختلف با توجه به حداکثر سرعت وزش باد در اصفهان، ایران و سرعت‌های بالاتر پرداخته شده است. بدین منظور از روش المان محدود غیرخطی و معیار شکست ویلام - وارنک استفاده شده است. برای بررسی تأثیر ستون مرکزی و راه‌پله ماریچج درون منارها بر رفتار سازه‌ای آن‌ها، آنالیزها در دو حالت (۱) منار به صورت کامل (شامل پوسته منار، ستون مرکزی و راه‌پله) و (۲) فقط پوسته خارجی انجام گرفته‌اند. محاسبات بر مبنای دو ویرایش ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ می‌حسب ششم مقررات ملی ساختمان ایران انجام شده است. آنالیز تحت بار باد نشان می‌دهد که منارها در شرایط باد با حداکثر سرعت ثبت شده در اصفهان دچار شکست نمی‌شوند. در سرعت‌های بالاتر میزان آسیب وارد شده به منار تابع ارتفاع، قطر ستون مرکزی، ضخامت و قطر پوسته است.

کلمات کلیدی: منار؛ مصالح بنایی آجری؛ تاریخی؛ ایران؛ رفتار غیرخطی؛ باد

Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets under Wind Load

Mehrdad.Hejazi^{1,*}, Sayed Mohammad Moayedian², Maryam Daei³

¹Assoc. Prof., Department of Civil. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Isfahan, Isfahan, Iran

²M.Sc., Department of Civil. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Isfahan, Isfahan, Iran

³ Assist. Prof., Department of Civil. Eng., Faculty of Eng., Univ. of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

Minarets are valuable historical structures from ancient times in Iran. In this paper, the effect of wind on a number of historical brick masonry minarets in Isfahan, built in the eleventh and twelfth centuries A.D., has been studied. Different wind velocities including the maximum wind velocity of Isfahan and Iran have been used. The non-linear finite element method and the Willam-Warke failure criterion have been used. In order to investigate the effect of central column and spiral staircase on structural behaviour, analyses have been performed for two cases: 1) the whole minaret (including the outer shell, central column and spiral staircase), and 2) only the outer shell. Results indicate that under maximum wind speed recorded for Isfahan, minarets do not fail. In higher speeds, the amount damage depends on the diameter of central column, height, thickness and diameter of shell.

Keywords: Minaret; Brick Masonry Materials; Historical; Iran; Non-Linear Behaviour; wind

* مهرداد حجازی؛ تلفن: ۰۲۹-۳۷۹۳۴۰۲۹-۰۳۱

آدرس پست الکترونیک: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

منار به معنای جای نور و بنایی بلند و کشیده است که عموماً در کنار بناهای مذهبی مانند مدارس، مساجد و مقبره‌ها ساخته شده‌اند. از نقطه نظر تمثیلی منار محور ذات انسان را منعکس می‌کند. بعد متعالی و قائم وی را که برای انسان یک ژرفا یا بلندی روحانی در این وجود مادی "دو بعدی" ایجاد می‌نماید. از دیدگاه بیرونی منار سمبل انسان است. شکل معینی که به تنهایی در بین همه مخلوقات به طور مستقیم در عالم می‌ایستد. از دیدگاه درونی نیز یادآور روان انسان مشتاق بازگشت به مبدأ اصلی و ازلی خود است. با توجه به ویژگی‌های خاص مصالح بنایی آجری بکار 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 وزش بادهای سهمگین دچار آسیب شوند، به همین دلیل با توجه به اهمیت تاریخی، فرهنگی و معماری منارها، بررسی رفتار سازه‌ای آن‌ها لازم است [۱].

به طور 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 و کوچک‌ترین سستی در این قسمت یا زمین زیر آن منجر به فروریختن بنا می‌شود.

هر بدنه دارای بخش‌های دکل (ستون میانی)، پلکان و نورگیر است. 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 رابطه با اثر باد بر سازه‌های استوانه‌ای بلند می‌توان به مطالعه اثرات نیروی باد بر دودکش‌های بتنی بلند توسط «سیوا» و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ و همچنین طراحی بار باد بر دودکش‌های بتنی توسط «جان» و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد که در این تحقیق به اثرات افزایشی بار باد در ارتفاع نیز اشاره شده است. در نوشتاری دیگر فشار باد بر استوانه‌ها و دودکش‌ها توسط «هیل» [۴] در سال ۱۹۳۰

بررسی شده است. در تحقیقات انجام شده بر روی برج‌های

تاریخی جهان می‌توان به سه مورد زیر اشاره کرد:

کنترل یک ساله اثرات دینامیکی بر برج ناقوس کلیسای «سان لوزی» در سال ۲۰۱۴ توسط «کانتینی» [۵] که در این تحقیق اثرات دینامیکی مختلف از جمله اثرات باد را در طی یک سال بر روی برج ناقوس به دست آوردند.

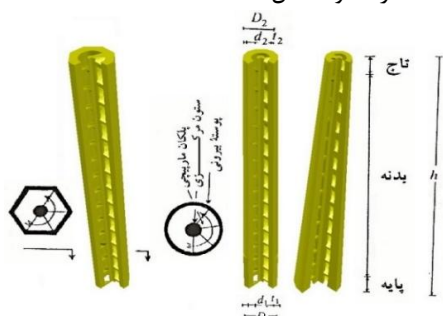
برج «تورسینتو» در ایتالیا توسط «کارپینتری» و همکاران [۶] توصیف و آنالیز شده است. در این پژوهش، روند آنالیز انجام شده به نمایش در آمده تا بتوان الگوی آسیب‌های ایجاد شده را یافت. همچنین حوادث لرزه‌ای چند سال اخیر پژوهش نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

برج ناقوس «نسترا اسرا» در «والنسیا» اسپانیا توسط «ایبورا» و «پالارز» [۷] برای توصیف رفتار دینامیکی تحت آنالیز قرار گرفته است.

تاکنون هیچ یک از تحقیقات صورت گرفته به بررسی سازه‌ای اثر باد بر منارهای تاریخی آجری نپرداخته است. در این تحقیق به بررسی اثر باد بر منارهای تاریخی آجری با استفاده از مقررات ملی ساختمان ایران و ویرایش ۱۳۸۵ [۸] در بخش ۴ و ویرایش ۱۳۹۲ [۹] در بخش ۶ پرداخته می‌شود.

۲- مشخصات منارهای مورد مطالعه و روش آنالیز

اوج هنر منار سازی در ایران به قرون پنجم و ششم هجری بازمی‌گردد که در آن زمان تعداد قابل توجهی 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، چهل‌دختران، گار، سین، علی، ساربان، زیار، رهروان و باغ قوشخانه اشاره نمود شکل ۲.



شکل ۱- اجزای سازه‌ای منار [۱۰]

سازه‌های آن‌ها، آنالیزها در دو حالت (۱) منار به صورت کامل (شامل پوسته منار، ستون مرکزی و راه‌پله) و (۲) فقط پوسته خارجی انجام گرفته‌اند.

۳- مدل‌سازی رفتار مصالح بنایی بکار رفته در منارها

خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده که در تحقیقات پیشین [۱۲] به دست آمده‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده منارها [۱۲]

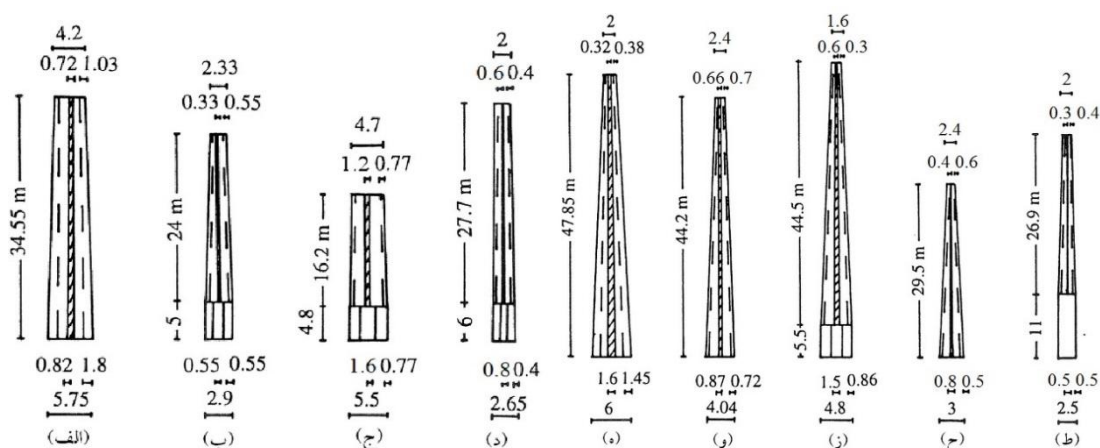
ترکیب آجر و ملات	ملات	آجر	خصوصیات مکانیکی
۱۵۳۰	۱۶۰۰	۱۳۳۰	جرم حجمی (kg/m^3)
۲۷۳۰	۱۳۰۰	۵۳۰۰	مدول الاستیسیته
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	ضریب پواسون
۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۵۳	مقاومت کششی (MPa)
۲/۷۳	۱	۵/۳	مقاومت فشاری (MPa)
$۰/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۰/۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۰/۶ \times ۱۰^{-۵}$	ضریب انبساط حرارتی ($\text{m/m}^\circ\text{C}$)



شکل ۲- (الف) منار چهل دختران (ب) منار ساربان

این منارها دارای ابعاد هندسی متفاوتی می‌باشند. در شکل ۳ ابعاد بعضی از مهم‌ترین منارهای آجری منفرد در اصفهان، شهر منارها، 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 تغییر می‌کند. قطر ستون مرکزی از ۰/۳ m تا ۱/۶ m است [۱۰].

جهت آنالیز این منارها از روش المان محدود غیرخطی و نرم‌افزار ANSYS [۱۱] استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر ستون مرکزی و راه‌پله مارپیچ درون منارها بر رفتار



شکل ۳- 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 [۱۰].

جدول (۲): پارامترهای معیار شکست ویلام - وارنک برای ترکیب مصالح آجر و ملات جهت استفاده در نرم‌افزار ANSYS

β_t	β_c	f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_{cb} (MPa)	$ \sigma_h^a $ (MPa)	f_1 (MPa)	f_2 (MPa)	TCF
۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۲۷	۲/۷۳	۳/۲۸	۴/۷۳	۳/۹۶	۴/۷۱	۰/۶

شکست برآورده نشود، این بدین معنی خواهد بود که ترکیب تنش‌های ایجاد شده باعث شکست منار خواهد شد. پارامترهای این معیار شکست برای ترکیب مصالح آجر و ملات جهت استفاده در نرم‌افزار ANSYS بر اساس روابط (۵) تا (۱۱) محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

$$f_{cb} = 1.2f_c = 1.2 \times 2.73 = 3.276 \text{ MPa} \quad (۱)$$

$$f_1 = 1.45f_c = 1.45 \times 2.73 = 3.96 \text{ MPa} \quad (۲)$$

$$f_2 = 1.725f_c = 1.725 \times 2.73 = 4.71 \text{ MPa} \quad (۳)$$

$$|\sigma_h^a| \leq 3^{1/2} f_c = 4.73 \text{ MPa} \quad (۴)$$

$$TFC = 0.6, f_1 = 1 \text{ ضریب افزایش سختی ترک در کشش}$$

$$TFC = 0.6, f_1 \neq 1 \quad (۵)$$

$$\beta_t = 0.15 \quad [۱۵] \quad (۶)$$

$$\beta_c = 0.75 \quad [۱۶] \quad (۷)$$

در این روابط $f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2, |\sigma_h^a|$ و β_t و β_c به ترتیب مقاومت کششی تک محوری، مقاومت فشاری تک محوری، 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 تک محوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می‌شود، تنش هیدرواستاتیک، ضریب جابجایی برشی ترک باز و ضریب جابجایی برشی ترک بسته می‌باشند.

با توجه به اینکه معیار شکست ویلام-وارنک رفتار غیر خطی را در نظر می‌گیرد و از نمودار غیر خطی تنش - کرنش برای مصالح در آنالیز استفاده شده است، نرم افزار قادر به در نظر گرفتن رفتار غیر خطی منارها می‌باشد. همچنین، بر اساس نتایجی که در ادامه می‌آید برخی از منارها دچار شکست می‌شوند و به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که این منارها وارد محدوده غیر خطی می‌گردند.

۴- پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه نیروی باد

اثر باد باید با توجه به حداکثر سرعت باد در منطقه، ارتفاع و شکل هندسی ساختمان‌ها و میزان حفاظتی که موانع مجاور برای آن‌ها در مقابل باد ایجاد می‌کنند، محاسبه شود.

با استفاده از نتایج تجربی حاصل شده در مطالعات قبلی [۱۳] می‌توان رابطه تنش - کرنش برای ترکیب آجر و ملات را به صورت یک نمودار خطی - سهمی بر اساس روابط (۱) و (۲) بیان نمود.

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

$$\sigma = (f_k/4)[7(\varepsilon/\varepsilon_e) - 2(\varepsilon/\varepsilon_e)^2 - 2] \quad (۲)$$

$$\varepsilon_e \leq \varepsilon \leq 2\varepsilon_e, \quad \varepsilon_e = 0.75f_k/E$$

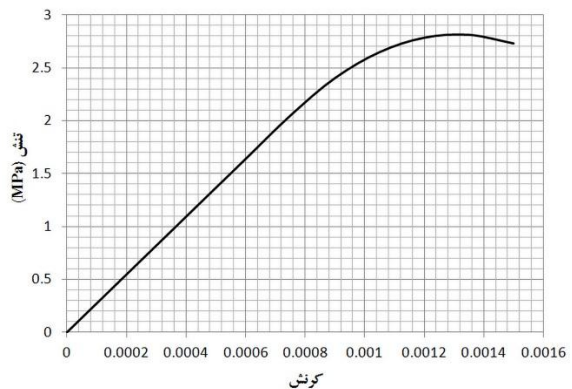
که در آن f_k مقاومت فشاری و E مدول الاستیسیته مصالح ترکیبی آجر و ملات می‌باشند.

برای مصالح موجود در منارهای مورد مطالعه، با قرار دادن مقادیر جدول (۱) در روابط (۱) و (۲)، رابطه تنش - کرنش به صورت روابط (۳) و (۴) در می‌آید که در شکل ۴ نشان داده شده است.

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

$$\sigma = (2.73/4)[7(\varepsilon/7.5 \times 10^{-4}) - 2(\varepsilon/7.5 \times 10^{-4})^2 - 2] \quad (۴)$$

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



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

در همه آنالیزها جهت پیش‌بینی شکست منارها از معیار شکست ویلام - وارنک [۱۴] که مخصوص مصالح ترد و شکننده می‌باشد استفاده شده است. در صورتی که معیار

ایجاد می‌شوند را نیز در نظر می‌گیرد. این اثرات در سازه‌های انعطاف‌پذیر، مانند ساختمان‌های بلند، ممکن است حائز اهمیت شوند و بار ناشی از باد را تحت تأثیر قرار دهند [۸].

۴-۱- سرعت مبنای باد

سرعت مبنای باد، بنا به تعریف، سرعت متوسط ساعتی باد در ارتفاع ۱۰ m از سطح زمین در منطقه‌ای مسطح و بدون مانع است که بر اساس آمار موجود در منطقه، احتمال تجاوز از آن در سال کمتر از ۲٪ (دوره بازگشت ۵۰ ساله) است.

سرعت مبنای باد برای مناطق مختلف کشور در آیین‌نامه ایران ارائه شده است [۸]. بر این اساس محاسبات در ۴ حالت مختلف زیر انجام شده‌اند:

• حالت ۱: سرعت ۱۱۰ km/h (سرعت مبنای باد اصفهان)

• حالت ۲: سرعت ۱۳۰ km/h (ماکزیمم سرعت ثبت شده باد در ایران)

• حالت ۳: سرعت ۱۵۰ km/h (برای یافتن بازه‌ای که منار در آن دچار شکست نشود)

• حالت ۴: سرعت ۱۶۵ km/h (برای یافتن بازه‌ای که منار در آن دچار شکست نشود)

۴-۲- فشار مبنای باد

فشار مبنای باد، بنا به تعریف، فشاری است که باد با سرعتی برابر با سرعت مبنای باد بر سطحی عمود بر جهت وزش باد وارد می‌کند. مقدار این فشار به ترتیب در ویرایش ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران با استفاده از رابطه (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$q = 0.05V^2 \quad (12)$$

$$q = 0.0613V^2 \quad (13)$$

V در این رابطه سرعت مبنای باد بر حسب km/h و q فشار مبنای باد بر حسب N/m^2 است. طبق آیین‌نامه ایران سرعت مبنای باد برای اصفهان ۱۱۰ km/h [۸] و [۹].

۴-۳- نیروی باد بر ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها

نیروی ناشی از باد بر روی سطوح ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$F = p \times A \quad (14)$$

برای تعیین اثر ناشی از باد باید فرض شود که باد به صورت افقی و در هر یک از امتدادها، به ساختمان اثر می‌نماید. در طراحی کافی است اثر باد در دو امتداد عمود بر هم، ترجیحاً در امتداد محورهای اصلی ساختمان، و به طور غیر هم‌زمان بررسی شود. در طراحی اعضای سازه اثر ناشی از بار باد با بار زلزله جمع نمی‌شود. کلیه اعضای سازه باید برای اثر هر یک از این دو که بیشتر باشد، طراحی شوند.

در ساختمان‌هایی که ارتفاع آن‌ها بیشتر از ۱۲۰ m و یا بیشتر از ۵ برابر عرض آن‌ها است و در سازه‌های غیر ساختمان‌های نظیر دودکش‌ها، مخازن و دکل‌ها که زمان تناوب ارتعاشات طبیعی آن‌ها بزرگتر از یک است، برای محاسبه بار باد باید یکی از دو روش زیر را بکار گرفت:

الف) روش تحلیل دینامیکی

ب) روش تجربی و استفاده از تونل باد مطابق روش‌های معتبر بین‌المللی.

در این موارد بار کل باد که برای طراحی سازه‌ها بکار گرفته می‌شود در هیچ حالت نباید کمتر از ۸۰٪ بار بر اساس ضوابطی که در ادامه می‌آید، در نظر گرفته شود [۸]. با توجه به شکل ۲، نسبت ارتفاع به قاعده مناره‌های مورد مطالعه از جمله منار رهروان و منار زیار بیشتر از ۵ است و در نتیجه می‌بایست از روش تحلیل دینامیکی جهت محاسبه بار باد در آن‌ها استفاده شود.

در هنگام وزش باد و اثر آن بر سازه، سرعت باد ثابت نبوده و به صورت لحظه‌ای تغییر می‌کند. این تغییرات در ترازهای مختلف سازه از سطح زمین و نیز در مناطق مختلف که به لحاظ تراکم ساختمان‌ها یا انبوه درختان فرق داشته باشند، متفاوت است. تغییرات لحظه‌ای سرعت باد، علاوه بر آنکه بار ناشی از باد بر سازه‌ها را تغییر می‌دهد، موجب تحریک دینامیکی سازه‌های نرم و انعطاف‌پذیر می‌گردد. این عامل خود متقابلاً بر بار ناشی از باد اثر می‌گذارد.

در روش تحلیل دینامیکی جهت محاسبه ضریب اثر تغییر سرعت، C_e که در ادامه به آن اشاره می‌شود، علاوه بر در نظر گرفتن اثرات تغییر سرعت در ترازهای مختلف سازه، موقعیت منطقه به لحاظ تراکم موانع و نیز تغییرات لحظه‌ای سرعت نسبت به سرعت متوسط، اثرات ناشی از نوسان سازه برای وزش باد و نیز بر اثر فشارهای متناوب ناشی از جریان‌های گردابی لایه‌های هوا را که در کناره‌های سازه

جدول ۳- مقادیر ضریب اثر تغییر سرعت (C_p و C_q) [۱۷]

ضریب اثر تغییر سرعت (C_p و C_q)			θ (درجه)
$h/D=25$	$h/D=7$	$h/D=1$	
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۱۵
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۳۰
-۰/۹	-۰/۸	-۰/۷	۴۵
-۱/۹	-۱/۷	-۱/۲	۶۰
-۲/۵	-۲/۲	-۱/۶	۷۵
-۲/۶	-۲/۲	-۱/۷	۹۰
-۱/۹	-۱/۷	-۱/۲	۱۰۵
-۰/۹	-۰/۸	-۰/۷	۱۲۰
-۰/۷	-۰/۶	-۰/۵	۱۳۵
-۰/۶	-۰/۵	-۰/۴	۱۵۰
-۰/۶	-۰/۵	-۰/۴	۱۶۵
-۰/۶	-۰/۵	-۰/۴	۱۸۰

۴-۵- محاسبه ضریب اثر تغییر سرعت، C_e در ویرایش ۱۳۸۵

ضریب اثر تغییر سرعت C_e ، در روش تحلیل دینامیکی محاسبه بار باد به صورت حاصل ضرب دو ضریب رابطه (۱۷) نوشته می‌شود [۸].

$$C_e = C_l \times C_g \quad (17)$$

ضرایب C_l و C_g در این رابطه به ترتیب، ضریب اثر امکان و ضریب اثر اوج باد نامیده می‌شوند و محاسبات آن مطابق پیوست ۶ مقررات ملی ساختمان - بارهای وارد بر ساختمان [۸] آمده است. برای نمونه نحوه توزیع فشار باد با سرعت 110 km/h (سرعت مبنای باد اصفهان) در ارتفاع منار زیار برای دو ویرایش ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ در شکل‌های ۶ و ۷ ترسیم شده است (اعداد مثبت بر روی محور عمودی معرف فشار و اعداد منفی معرف مکش می‌باشند).

۵- نتایج آنالیز غیرخطی تحت بار باد بر روی منارها

در این بخش نتایج عددی حاصل از آنالیز غیرخطی تحت بار باد منارهای رهروان، زیار (بلندترین منار)، علی، چهل دختران، ساریان و سین با توجه به پارامترهای محاسبه شده در بخش ۴ با در نظر گرفتن اثر وزن و شرایط مختلف سرعت باد ذکر شده در بند ۴-۱، در جدول‌های ۴ - ۷ آمده است.

در این رابطه A مساحت سطحی از ساختمان است که فشار یا مکش p بر آن وارد می‌شود. p فشار یا مکش ناشی از باد بر روی سطوح ساختمان، در هر ارتفاعی از آن، به ترتیب در ویرایش ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران از رابطه (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شود. اصطلاح فشار برای حالتی است که جهت نیرو رو به سطح و اصطلاح مکش برای حالتی است که جهت نیرو از طرف سطح به طرف خارج باشد [۸ و ۹].

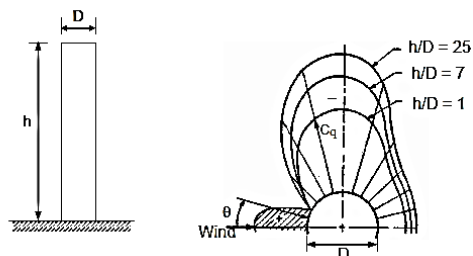
$$p = C_e \times C_q \times q \quad (15)$$

$$p = I_w q C_e C_g C_p \quad (16)$$

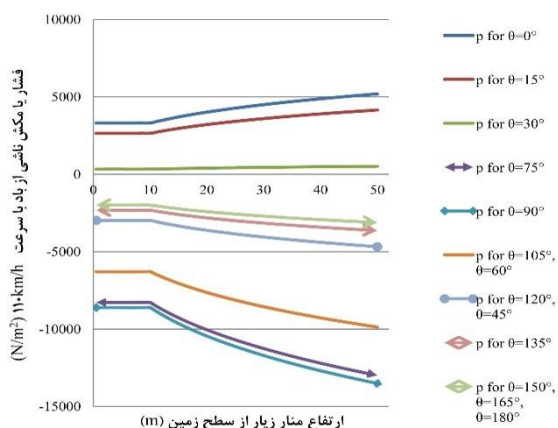
در این رابطه q فشار مبنای باد بر اساس رابطه (۱۲) است، C_p و C_q ضریبی به نام ضریب شکل است که مطابق آیین‌نامه انگلیس به دست می‌آید و C_e ضریبی به نام ضریب اثر تغییر سرعت در ویرایش ۱۳۸۵ و ضریب بادگیری در ویرایش ۱۳۹۲ است و C_g ضریب اثر جهشی باد می‌باشد که با توجه به نوع سازه و شکل هندسی آن تعیین می‌گردد.

۴-۴- محاسبه ضریب شکل، C_p و C_q

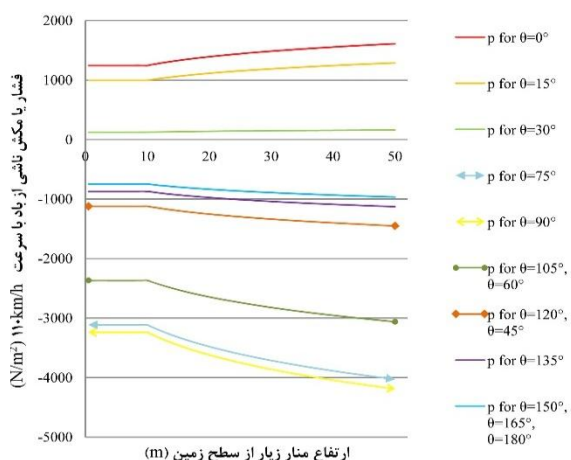
با توجه به این که آیین‌نامه ایران برای مقاطع دایره‌ای شکل مقدار ضریب C_p و C_q را به طور دقیق ارائه نداده است، از آیین‌نامه انگلیس [۱۷] که برای مقطع دایره با توجه به زوایای مختلف (θ) و نسبت ارتفاع به قاعده (h/D) ضریب C_p و C_q مناسب را ارائه داده است شکل ۵ و جدول ۳، استفاده می‌شود. نسبت ارتفاع به قاعده منارهای مورد مطالعه از جمله منار رهروان و منار زیار بیشتر از ۱۰ است و در نتیجه می‌بایست برای اطمینان از اعداد مربوط به ستون ($h/D=25$) جدول ۳ استفاده شود.



شکل ۵- شکل مربوط به محاسبه ضریب اثر تغییر سرعت (C_p و C_q) [۱۷]

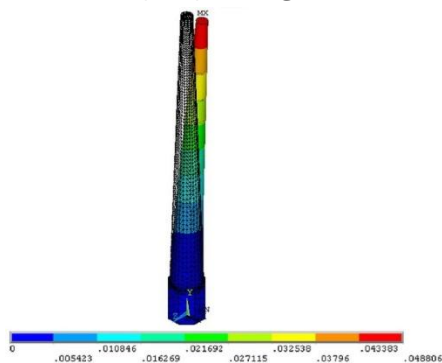


شکل ۷- توزیع فشار باد با سرعت مبنای اصفهان برابر با ۱۱۰ km/h بر روی منار زیار بر اساس ویرایش ۱۳۹۲ مقررات ملی ساختمان ایران



شکل ۶- توزیع فشار باد با سرعت مبنای اصفهان برابر با ۱۱۰ km/h بر روی منار زیار بر اساس ویرایش ۱۳۸۵ مقررات ملی ساختمان ایران

همچنین نمودار نحوه جابجایی منار زیار (به صورت کامل) تحت بار باد با سرعت ۱۱۰ km/h در شکل ۸ ترسیم شده است.



شکل ۸- جابجایی منار زیار (به صورت کامل) تحت بار وزن و بار باد با سرعت مبنای اصفهان برابر با ۱۱۰ km/h

جدول ۴- نتایج آنالیز غیرخطی منارهای زیار، رهروان، علی، چهل دختران، ساربان، سین (به صورت کامل) و منار زیار (فقط پوسته) تحت بار وزن و باد با سرعت مبنای اصفهان برابر با ۱۱۰ km/h (ویرایش ۱۳۸۵ مقررات ملی ساختمان ایران)

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (پوسته)	زیار (کامل)	رهروان (کامل)	علی (کامل)	چهل دختران (کامل)	ساربان (کامل)	سین (کامل)
وضعیت آسیب دیدگی	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۴۹۲	۰/۰۴۸۸	۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۰۱	۰/۰۱۹۶	۰/۰۵۱۲	۰/۰۵۱۹
تنش کششی ماکزیمم (kPa)	۹۷/۳۷	۱۰۸/۹۴	۱۴۸/۵۷	۵۶/۸۸	۵۵/۲۶	۱۴۹/۸۷	۱۸۳/۶۷
نسبت تنش کششی ماکزیمم به مقاومت کششی (/)	۲۴/۹۵	۴۰/۳۴	۵۵/۰۲	۲۱/۰۷	۲۰/۴۷	۵۵/۵۱	۶۸/۰۳
تنش فشاری ماکزیمم (kPa)	۷۵۳/۷۰	۸۲۶/۵۳	۸۶۶/۴۲	۵۳۳/۶۲	۷۰۸/۲۴	۱۱۱۰/۰	۱۰۶۰/۰
نسبت تنش فشاری ماکزیمم به مقاومت فشاری (/)	۲۷/۶۰	۳۰/۲۷	۴۱/۷۳	۱۹/۵۵	۲۵/۹۴	۴۰/۶۶	۳۸/۸۳

جدول ۵- نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار، چهل دختران، ساربان و سین (به صورت کامل) تحت بار وزن و باد با بیشترین سرعت ثبت شده باد در ایران برابر با 130 km/h (ویرایش ۱۳۸۵ مقررات ملی ساختمان ایران)

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (کامل)	چهل دختران (کامل)	ساربان (کامل)	سین (کامل)
وضعیت آسیب دیدگی	بدون شکست	بدون شکست	شکست	شکست
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۶۷۷	۰/۰۲۷۲	-	-
تنش کششی ماکزیمم (kPa)	۱۱۸/۳۷	۷۶/۴۱	-	-
نسبت تنش کششی ماکزیمم به مقاومت کششی (%)	۴۳/۸۲	۲۸/۳۰	-	-
تنش فشاری ماکزیمم (kPa)	۸۷۴/۴۹	۸۳۷/۲۲	-	-
نسبت تنش فشاری ماکزیمم به مقاومت فشاری (%)	۳۲/۰۳	۳۰/۶۷	-	-

جدول ۶- نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار، چهل دختران، ساربان، سین (به صورت کامل) و منار زیار (فقط پوسته) تحت بار وزن و باد با سرعت برابر با 150 km/h (ویرایش ۱۳۸۵ مقررات ملی ساختمان ایران)

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (فقط پوسته)	زیار (کامل)	چهل دختران (کامل)	ساربان (کامل)	سین (کامل)
وضعیت آسیب دیدگی	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	شکست	شکست
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۹۳۴	۰/۰۹۲۷	۰/۰۳۶۲	-	-
تنش کششی ماکزیمم (kPa)	۱۱۹/۴۴	۱۴۸/۸۶	۲۰۶/۵۳	-	-
نسبت تنش کششی ماکزیمم به مقاومت کششی (%)	۴۴/۲۳	۵۵/۱۳	۷۶/۴۹	-	-
تنش فشاری ماکزیمم (kPa)	۱۱۰۰	۱۰۷۰	۹۸۹/۸۰	-	-
نسبت تنش فشاری ماکزیمم به مقاومت فشاری (%)	۴۰/۲۹	۳۹/۱۹	۳۶/۲۶	-	-

جدول ۷- نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار، علی، برسیان، چهل دختران، گار، ساربان، سین (به صورت کامل) و منار زیار (فقط پوسته) تحت بار وزن و باد با سرعت برابر با 165 km/h (ویرایش ۱۳۸۵ مقررات ملی ساختمان ایران)

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (پوسته)	زیار (کامل)	علی (کامل)	برسیان (کامل)	چهل دختران (کامل)	گار (کامل)	ساربان (کامل)	سین (کامل)
وضعیت آسیب دیدگی	شکست	شکست	بدون شکست	بدون شکست	شکست	بدون شکست	شکست	شکست
تغییر مکان ماکزیمم (m)	-	-	۰/۰۴۶۱	۰/۰۱۳۱	-	۰/۰۰۲۵	-	-
تنش کششی ماکزیمم (kPa)	-	-	۷۴/۳۷	۵۵/۴۲	-	۷۴/۶۶	-	-
نسبت تنش کششی ماکزیمم به مقاومت کششی (%)	-	-	۲۷/۵۴	۲۰/۵۲	-	۲۷/۶۵	-	-
تنش فشاری ماکزیمم (kPa)	-	-	۷۳۹/۴۹	۷۰۶/۲۸	-	۴۵۹/۲۵	-	-
نسبت تنش فشاری ماکزیمم به مقاومت فشاری (%)	-	-	۲۷/۰۹	۲۵/۸۷	-	۱۶/۸۲	-	-

همچنین هرچه ضخامت پوسته و یا قطر منار افزایش می‌یابد، مقاومت در برابر نیروی باد بیشتر می‌شود.

با توجه به جداول ۲-۸ تا ۴-۸ مشاهده می‌شود منارها در شرایط باد با حداکثر سرعت ثبت شده در اصفهان دچار شکست نمی‌شوند و در سرعت‌های بالاتر میزان آسیب وارد شده به منار تابع ارتفاع، قطر ستون مرکزی، ضخامت و قطر پوسته است. به گونه‌ای که هرچه ارتفاع منارها بیشتر می‌شود جابجایی و امکان خرابی در آنها بیشتر می‌گردد.

۶- نتایج آنالیز غیرخطی تحت بار باد بر روی برخی از منارها با استفاده از ویرایش ۱۳۹۲ مبحث

ششم مقررات ملی ساختمان

نتایج حاصل شده در قسمت قبل مربوط به پژوهش‌های صورت گرفته در سال ۱۳۹۱ بوده است. همچنین با توجه به اینکه ویرایش جدید مبحث ۶ از مقررات ملی ساختمان از اوایل سال ۱۳۹۳ اجرایی گردید، لذا به عنوان مقایسه و نمونه، آنالیز غیرخطی تحت بار باد بر روی برخی از منارها با استفاده از ویرایش جدید تحت حداکثر سرعت وزش باد در ایران (۱۳۰ km/h) صورت گرفته است. همچنین مقایسه‌ی بین ضرایب نیروهای اعمال شده بر منارها حاصل از دو ویرایش در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس محاسبات

انجام شده، میزان بار وارد بر سازه تحت ویرایش جدید بیش از ۲/۵ برابر ویرایش ۱۳۸۵ آن مبحث می‌باشد. علت این تفاوت افزایش در مقادیر q (فشار مبنای باد) و ضرایب C_1 ، C_g و C_q (مطابق پیوست ۶ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان) می‌باشد [۹].

جهت انجام مقایسه بین آیین‌نامه مبحث ۶ ویرایش ۱۳۹۲ با ۱۳۸۵، نتایج آنالیز غیرخطی تحت بار باد بر روی منارهای زیار، گار، علی، برسیان، چهل دختران، سین و ساریان با استفاده از هر دو ویرایش آیین‌نامه در جدول ۹ آمده است.

جدول ۸- مقایسه میزان ضرایب محاسبه شده در برآورد نیروی وارد بر منار زیار در سرعت باد ۱۳۰ km/h تحت ویرایش ۱۳۸۵ و

۱۳۹۲ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان

عنوان	مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۸۵	مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۲	درصد تغییر برای منار زیار در سرعت باد ۱۳۰ km/h
$q(N)$	$q = 0.05 \times V^2$	$q = 0.0613 \times V^2$	+23
$C_l \approx C_e$	$C_{l=}(\frac{z}{10})^{0.16}$	$C_{e=}(\frac{z}{10})^{0.28}$	+60
I_w	-	$I_w = 1.15$	+15
k	0.1	0.08	-20
V_H	$V_H = \sqrt{C_{IH} \times V}$	$V_H = 39.2 \sqrt{I_w \times C_{IH} \times q}$	+684
$\frac{\sigma}{\gamma}$	$\frac{\sigma}{\gamma} = \sqrt{\frac{k}{C_{IH}} (B + \frac{S \times F}{\lambda})}$	$\frac{\sigma}{\gamma} = \sqrt{\frac{k}{C_{IH}} (B + \frac{S \times F}{\lambda})}$	+224
C_g	$C_g = 1 + g_p(\frac{\sigma}{\gamma})$	$C_g = 1 + g_p(\frac{\sigma}{\gamma})$	+85
p	$p = q C_l C_g C_q$	$p = I_w q C_e C_g C_p$	+161

جدول ۹- مقایسه نتایج آنالیز غیرخطی منار زیار، گار، علی، برسیان، چهل دختران، سین و ساربان (به صورت کامل) تحت بار وزن و باد با بیش ترین سرعت ثبت شده باد در ایران برابر با 130 km/h در دو ویرایش ۱۳۸۵ و ۱۳۹۲

نتایج آنالیز غیرخطی منار	زیار (کامل)	زیار (کامل)	گار (کامل)	گار (کامل)	علی (کامل)	برسیان (کامل)	چهل دختران (کامل)	چهل دختران (کامل)	سین (کامل)	ساربان (کامل)
ویرایش	۱۳۸۵	۱۳۹۲	۱۳۸۵	۱۳۹۲	۱۳۹۲	۱۳۹۲	۱۳۸۵	۱۳۹۲	۱۳۸۵	۱۳۹۲
وضعیت آسیب دیدگی	بدون شکست	شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	بدون شکست	شکست	شکست
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۶۷۷	-	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۴۱۳	۰/۰۱۳۰	۰/۰۲۷۲	-	-	-
تنش کششی ماکزیمم (kPa)	۱۱۸/۳۷	-	۶۲/۶۹	۷۵/۷۶	۷۵/۸۰	۵۷/۱۹	۷۶/۴۱	-	-	-
نسبت تنش کششی ماکزیمم به مقاومت کششی (%)	۴۳/۸۲	-	۲۳/۲۲	۲۸/۰۶	۲۸/۰۷	۲۱/۱۸	۲۸/۳۰	-	-	-
تنش فشاری ماکزیمم (kPa)	۸۷۴/۴۹	-	۴۱۴/۴۷	۴۶۷/۱۱	۷۱۳/۶۶	۷۰۹/۱۷	۸۳۷/۲۲	-	-	-
نسبت تنش فشاری ماکزیمم به مقاومت فشاری (%)	۳۲/۰۳	-	۱۵/۱۸	۱۷/۱۱	۲۶/۱۴	۲۵/۹۸	۳۰/۶۷	-	-	-

بار باد دارند. به عنوان مثال منار سین با ضخامت پوسته m $0/4$ و قطر ستون مرکزی m $0/8$ با سرعت باد 130 km/h دچار شکست شده ولی منار علی با ضخامت پوسته m $1/45$ و قطر ستون مرکزی m $1/6$ با سرعت باد یکسان دچار شکست نمی شود.

۳- با توجه به این که منار زیار (در هر دو حالت کامل و پوسته) تحت بار وزن و بار باد با سرعت 150 km/h دچار شکست نمی شود، می توان نتیجه گرفت این منار به عنوان بلندترین منار در بین منارهای تحت بررسی می تواند حدود $1/4$ برابر باد مبنای اصفهان را نیز تحمل کرده و دچار شکست نگردد.

۴- با توجه به نسبت حداکثر تنش های موجود به مقاومت های فشاری و کششی می توان نتیجه گرفت که هیچ یک از تنش های کششی و فشاری از مقاومت کششی و فشاری مصالح فراتر نرفته اند و در مواردی که منار دچار شکست شده است، ترکیب تنش های ایجاد شده باعث برآورده نشدن معیار شکست ویلام - وارنک در آن ها و شکست منار شده است.

۵- با افزایش سرعت باد جابجایی منارهای مورد مطالعه (در هر دو حالت کامل و پوسته) افزایش می یابد. مثلاً با افزایش سرعت از 130 km/h به 150 km/h جابجایی منار زیار (به

بر اساس جدول ۹ می توان مشاهده کرد، میزان جابجایی و تنش های وارد بر سازه تحت ویرایش ۱۳۹۲ بسیار بیشتر از ویرایش ۱۳۸۵ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان می باشد. به عنوان مثال میزان جابجایی نهایی در منار گار از m $0/018$ در ویرایش ۱۳۸۵ به m $0/032$ رسیده است و $77/7$ افزایش داشته است. در برخی موارد منارها تحت سرعت باد یکسان با ویرایش جدید دچار شکست می شوند ولی تحت ویرایش قدیم بدون شکست باقی می ماند.

۷- نتیجه

نتایج حاصل از آنالیز غیرخطی تحت بار باد منارها به شرح زیر می باشند:

۱- منارهای تاریخی مورد مطالعه تحت بار وزن و باد با سرعت 110 km/h که سرعت مبنای باد در اصفهان است و حدود 3 km/h از بالاترین سرعت باد ثبت شده در اصفهان بیش تر است، دچار شکست نمی شوند.

۲- نتایج آنالیز نشان می دهد ضخامت پوسته و همچنین قطر ستون مرکزی منار تأثیر زیادی بر عملکرد این سازه در مقابل

- [2] Siva Konda Reddy B, Rohini Padmavathi V, Srikanth Ch (2012) Study of Wind Load Effects On Tall RC Chimneys. IJAET. 3, p.p. 92-97.
- [3] John A.D, Gairola A, Ganju E, Gupta A (2011) Design Wind Loads on Reinforced Concrete Chimney – An Experimental Case Study. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Elsevier Applied Science, London, p.p. 1252-1257.
- [4] Dryden H.L, Hill G.C (1930) Wind Pressure On Cylinder and Chimneys. Int. Bureau of Standards Journal of Research, 3, p.p. 654-693.
- [5] Cantieni R (2014) One-Year Monitoring of a Historic Bell Tower. 9th Int. Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014. Elsevier Applied Science, Porto, Portugal, p.p. 1493-1500.
- [6] Carpinteri A, Invernizzi S, Lacidogna G (2005) In Situ Damage Assessment and Nonlinear Modelling of a Historical Masonry Tower. Eng. Struct. 27, p.p. 387-395.
- [7] Ivorra S, Pallares F (2006) Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower. Eng. Struct. 28, p.p. 660-667.
- [۸] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان - بارهای وارد بر ساختمان، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، تهران، ۱۳۸۵.
- [۹] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان - بارهای وارد بر ساختمان، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، تهران، ۱۳۹۲.
- [10] Hejazi M (1997) Historical Buildings of Iran: their Architecture and Structure. Computational Mechanics Publications (WIT Press), Southampton and Boston.
- [11] Basic Analysis Guide for ANSYS 14 (2011) SAS IP Inc., New York.
- [12] Hejazi M, Mehdizadeh Saradj F (2014) Persian Architectural Heritage: Form, Structure and Conservation, WIT Press, Southampton and Boston.
- [13] Binda L, Fontana A, Frigerio G (1988) Mechanical Behaviour of Brick Masonries Derived from Unit and Mortar Characteristics. 8th Int. Brick and Block Masonry Conf. Elsevier Applied Science, London, p.p. 205-216.
- [14] Korany Y (2003) Mechanics and Modeling of URM Structures, Proceedings of Int. Short Course on Architectural and Structural Design of Masonry, Dresden University of Technology, Dresden.

صورت کامل) از 0.067712 m به 0.092755 m رسیده است. به عبارتی با افزایش $15/3\%$ سرعت وزش باد، جابجایی منار زیار 37% افزوده می‌شود.

۶- تقریباً در همه موارد با افزایش سرعت باد تنش‌های اصلی ایجادشده در منارها افزایش داشته است. به عنوان مثال با افزایش سرعت باد از 130 km/h به 150 km/h در منار زیار (به صورت کامل) تنش کششی ماکزیمم از 118336 Pa به 148858 Pa رسیده است. به عبارتی با افزایش $15/3\%$ سرعت وزش باد، تنش کششی ماکزیمم $25/7\%$ افزوده می‌شود.

۷- با مقایسه جابجایی منار زیار در حالت کامل و فقط پوسته می‌توان مشاهده کرد که پوسته به تنهایی می‌تواند تا زمان شکست جابجایی بیشتری را تحمل کند. برای مثال جابجایی منار زیار (فقط پوسته) تحت بار باد با سرعت‌های 110 km/h و 150 km/h ، به ترتیب $0/83\%$ و $0/65\%$ بیشتر از منار زیار (به صورت کامل) بوده است. همچنین در سرعت 165 km/h جابجایی منار زیار (فقط پوسته) بیشتر از منار زیار (به صورت کامل) بوده است، اما با توجه به آسیب شدید منارها اعداد نمایش داده‌شده خیلی قابل اعتماد نیستند.

۸- با مقایسه نتایج حاصل از آنالیز منارها تحت نیروهای محاسبه‌شده از دو ویرایش 1385 و 1392 مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، می‌توان مشاهده کرد که در ویرایش جدید آیین‌نامه، میزان بار محاسبه‌شده در حدود $2/5$ برابر ویرایش قدیم آن می‌باشد و به همین دلیل میزان جابجایی و تنش‌های نهایی در منارها بیشتر از ویرایش قدیم می‌باشد. برای مثال تنش ماکزیمم فشاری در منار گار تحت ویرایش 1385 ، $414/47 \text{ kPa}$ و تحت ویرایش 1392 ، 1392 kPa و $467/11$ می‌باشد که افزایش $12/7\%$ داشته است.

همچنین برخی از منارها تحت ویرایش 1392 دچار شکست می‌شوند ولی تحت ویرایش 1385 بدون شکست باقی می‌مانند.

مراجع

- [۱] مؤیدیان، سید محمد؛ آنالیز سازه‌ای منارهای تاریخی آجری ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۱.

- [15] Betti M., Orlando M, Vignoli A (2011) Static Behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage Assessment by Numerical Modelling. *Computers and Structures*, pp. 1956-1970.
- [16] Pineda P, Robador M, Gil-Marti M (2011) 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*, pp. 71-79.
- [17] British Standard Institute - BS 6399-2 (1997) *Loading for Buildings – Part 2: Code of Practice for Wind Loads*, London.