

بررسی ارتعاشات ناشی از جریان باد بر روی سازه بلندمرتبه و کنترل بهینه آن توسط میراگر جرمی تنظیم شده با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها و مطالعه پارامترهای مهم تاثیرگذار بر آن

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

علی آجیلیان ممتاز

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

انوشیروان فرشیدیان*[†]

چکیده

در سال‌های اخیر روش‌های تحلیل سازه بهبود یافته و مهندسين قادر به ساخت سازه‌های مرتفع شده‌اند. در احداث ساختمان‌های بلند بایستی توجه داشت که افزایش ارتفاع اغلب با افزایش نرمی سازه همراه است که سبب افزایش حساسیت سازه نسبت به نیروهای پویا همچون باد می‌شود. در پژوهش حاضر به بررسی پدیده نوسان‌های ناشی از جریان باد بر ساختمان‌های بلندمرتبه با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌های حاصل از جریان سیال و همچنین کنترل این پدیده پرداخته شده‌است. به همین منظور ابتدا معادلات کوپل حاکم بر سازه، گردابه‌های حاصل از جریان سیال و میراگر جرمی تنظیم شده معرفی و مقادیر ضرایب آن‌ها بر اساس مشخصات آسمان‌خراش ACT استخراج و در نرم‌افزار MATLAB حل می‌شوند. بعد از اعتبارسنجی نتایج، تاثیر جریان باد با پروفیل‌های مختلف با در نظر گرفتن گردابه‌ها و استفاده از میراگر جرمی، تحلیل و بررسی می‌شوند و با نتایج حالت بدون در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها مقایسه می‌شوند و محدوده عملکرد بهینه میراگر جرمی مشخص می‌شود. در انتها نیز به بررسی موردی پارامترهای مهم تاثیرگذار بر این پدیده، مانند نسبت جرمی و سرعت جریان باد، پرداخته می‌شود.

واژه های کلیدی: ارتعاشات؛ گردابه؛ سازه بلندمرتبه؛ میراگر جرمی تنظیم شده.

Investigation of Wind-Induced Vibration and the Important Affecting Parameters on Tall Building and its Optimum Control by Tuned-Mass Damper with Considering Vortex Effects

A. Ajilian Momtaz

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad., Mashhad, Iran

A. Farshidianfar

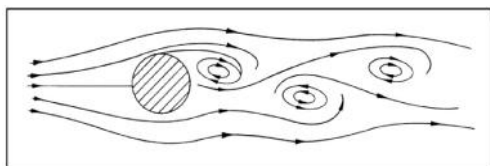
Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad., Mashhad, Iran

Abstract

Today's, structural analysis techniques have been improved, and structural engineers are able to build High-Rise Buildings. In these structures, it should be noted that elevation is often accompanied by an increase in the softness, which increases the sensitivity of the structure to dynamic forces such as wind. The purpose of the present study is to study the wind-induced vibrations on tall buildings, taking into account the effects of vortices created by the fluid flow and also the controlling this phenomena. To this end, the governing equations of the structure, the fluid flow and the tuned-mass damper are first introduced, and their coefficient values are extracted according to the characteristics of ACT skyscraper and solved using a program coded in MATLAB. After validating the results, the effects of wind loads are investigated by considering vortex effects as well as different wind velocity profiles; and the results are compared with the case where no vortices are considered and the optimal operating range of TMD is defined. At last, parametric study on mass ratio and wind speeds are presented.

Keyword: Vibration; Vortices; Tall Building; Tuned-Mass Damper (TMD).

سازه، در پشت جسم به وجود می‌آید (شکل ۱) [۱]. این گردابه‌ها نیرویی نوسانی بر سازه اعمال می‌کنند که شامل دو مولفه عمود بر جریان (نیروی برآ) و مولفه در جهت جریان (نیروی پسا) است.



شکل ۱- تشکیل گردابه در پشت جسم بلاف [۲]

حال اگر این جسم توسط تکیه‌گاه الاستیکی نگهداری شود و جرم

۱-مقدمه

ساختمان‌های بلندمرتبه سال‌هاست که در نقاط مختلف دنیا دیده می‌شوند و بعضاً به عنوان نمادی از توسعه و پیشرفت در شهرها محسوب می‌شوند. اما همواره یکی از مشکلات اصلی مهندسان، تحلیل دقیق اثرات نیروهای دینامیکی همچون باد بر نوسان‌های این‌گونه ساختمان‌ها بوده است. از آن‌جا که پدیده‌ی نوسان‌های ناشی از جریان باد حاصل اندرکنش جریان سیال و سازه است، دارای پیچیدگی‌های خاصی بوده و بایستی اثرات جریان سیال و نیروهای وارده بر جسم نوسان‌کننده از طرف گردابه‌ها، مورد توجه قرار گیرد. نوسان‌های ناشی از گردابه‌ها، پدیده‌ای غیرخطی، خودمحرک و چند درجه آزادی است که بر اثر گردابه‌های ایجاد شده ناشی از برخورد بین جریان سیال و

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: farshid@um.ac.ir

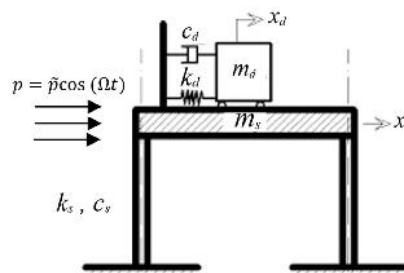
تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۷

همان‌طور که اشاره گردید در پدیده ارتعاشات ناشی از جریان باد، علاوه بر نیروی سیال بر وجه رو به باد سازه، نیروهای حاصل از گردابه‌ها نیز در پشت جسم ایجاد می‌شود که سبب وارد شدن نیروهای نوسانی بر سازه می‌شود. اما در عمده مقالات معتبر علمی که در زمینه اثرات باد بر سازه ارائه شده صرفاً نتایج اثرات نیروی باد که بر وجه رو به باد سازه اعمال می‌شود، ارائه شده است. لذا در پژوهش حاضر، تاثیر همزمان هر دو نیرو (نیروی حاصل از جریان سیال و نیروی حاصل از گردابه‌ها) مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور علاوه بر دو معادله نوسانات سازه و معادله نوسانات میراگر جرمی (که در مقالات معمول مورد بررسی قرار می‌گیرند)، معادله سومی نیز به منظور بررسی اثرات گردابه‌ها بر سازه با معادلات فوق کوپل شده است تا اثرات گردابه‌ها نیز در مدلسازی اعمال گردد. علاوه بر این در پژوهش حاضر، اثرات گردابه‌ها بر عملکرد میراگر جرمی نیز بررسی گردیده است و پارامترهای مهم تاثیرگذار بر پدیده (مانند نسبت جرمی، نسبت میرایی و سرعت باد) هم با در نظر گرفتن و هم بدون در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها به صورت خاص مورد پژوهش قرار گرفته‌اند.

۲- معادلات دیفرانسیل حاکم

در پژوهش حاضر نوسان‌های هم‌راستا با جریان حاصل از گردابه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۲ دیاگرام ساده یک ساختمان به همراه میراگر جرمی تنظیم‌شده که توسط تکیه‌گاه الاستیک نگهداری می‌شود و در معرض جریان سیال p قرار دارد، نشان داده شده است (اندیس‌های s و d به ترتیب مربوط به سازه و میراگر جرمی است).



۲- دیاگرام ساده سازه و میراگر جرمی تنظیم‌شده

با توجه به شکل ۲ معادله حرکت میراگر جرمی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۰]:

$$m_d(\ddot{X} + \ddot{X}_d) + c_d\dot{X}_d + k_d X_d = 0 \quad (1)$$

همچنین باتوجه به شکل ۲ جابجایی صفحه‌ای در راستای جریان جسم با در نظر گرفتن اثرات جریان سیال، X ، به کمک معادله نوسانی خطی (۲) توصیف می‌شود [۱۱]:

$$(m_s + m_f)\ddot{X} + (c_s + c_f)\dot{X} + k_s X = E \quad (2)$$

که در آن c_s و k_s به ترتیب میرایی و سختی مربوط به حرکت جسم در غیاب سیال هستند. اثرات هیدرودینامیکی سیال بر روی سازه با قطر هیدرولیکی D به صورت اثرات اصلی سیال که به صورت جرم

و میرایی نسبتاً پایین باشد، در اثر اعمال نیروی نوسانی شروع به ارتعاش خواهد کرد که اگر مهار نشود، می‌تواند سبب آسیب رساندن به سازه و یا حتی تخریب آن شود. این مسئله به خصوص در ساختمان‌های بلند که افراد زیادی در آن حضور دارند و یا لوله‌های استخراج مواد نفتی که در اعماق اقیانوس‌ها با صرف هزینه‌های گزاف نصب می‌شوند، بیشتر مورد توجه است. از جمله نمونه‌های عملی در نظر نگرفتن اثرات گردابه‌ها می‌توان به تخریب برج‌های خنک‌کن نیروگاه فری‌بریج در انگلستان در سال ۱۹۶۰ و پل تاکوما در واشنگتن آمریکا در سال ۱۹۴۰ اشاره نمود [۳]. این پل که برای مقاومت در برابر بادهای با سرعت ۱۰۰ mph طراحی شده بود، به دلیل در نظر نگرفتن اثرات نوسان‌های ناشی از گردابه‌ها در طراحی آن و در اثر ناپایداری پیچشی ناشی از جریان بادی با سرعت ۴۲ mph تخریب گردید.

روش‌های مختلفی به منظور جلوگیری و یا کاهش نوسان‌های ناشی از جریان باد بر روی سازه‌های بلند استفاده شده است که از رایج‌ترین آن‌ها میراگر جرمی تنظیم شده است. این میراگر معمولاً متشکل از یک جرم که بوسیله مکانیزم فنر و میراگر به محلی از ساختمان که دارای بیشترین حرکت است (عموماً نزدیک طبقات انتهایی) متصل می‌شود و نیروی اینرسی را به اسکلت و چارچوب ساختمان انتقال داده تا حرکات آن را کاهش دهد [۴]. پژوهش‌های زیادی بر روی عملکرد میراگر جرمی در ساختمان‌ها انجام شده است. بک‌داش و نیگ‌دلی^۱ روشی برای انتخاب نسبت جرم بهینه برای میراگر جرمی ارائه داده‌اند [۵]. همچنین نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که نسبت جرم، نیروی تحریک و فرکانس سازه، تاثیر زیادی بر عملکرد میراگر جرمی دارد. آلی^۲ مدلی برای طراحی میراگر جرمی برای محافظت سازه در برابر وزش همزمان باد از جهات مختلف بر روی ساختمان ارائه کرده است که عملکرد بهتری نسبت به میراگرهای متداول دارد [۶]. الیاس و ماتسگار^۳ به مطالعه پیرامون اثربخشی میراگر جرمی در کنترل پاسخ سازه که به‌طور همزمان تحت تاثیر زلزله و باد قرار دارد، پرداخته‌اند [۷]. همچنین آنها گزارش کاملی از جدیدترین پژوهش‌ها و متدهای طراحی در زمینه میراگر جرمی در سال‌های اخیر ارائه کرده‌اند [۸].

از کاربردهای میراگر جرمی تنظیم‌شده می‌توان به نصب در برج هنکک، ساختمان ۶۰ طبقه به ارتفاع ۲۴۱ متر، در ژوئن سال ۱۹۷۷ در شهر بوستون اشاره کرد [۴]. دو میراگر جرمی در دو طرف طبقه ۱۵۸م سبب خنثی کردن حرکت پیچشی شده و پاسخ ساختمان را تا ۵۰٪ کاهش می‌دهد. از سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شده در برج مرکز تجارت جهانی تایپه ۱۰۱، آسمان‌خراش ۱۰۱ طبقه‌ای که در پایتخت کشور چین تایپه در سال ۲۰۰۴ ساخته شده نیز استفاده شده است [۹] و [۱۰]. این ساختمان تا سال ۲۰۱۰ و تا قبل از افتتاح برج الخلیفه، بلندترین برج جهان بود و در حال حاضر دومین ساختمان بلند دنیا به لحاظ ارتفاع است. این میراگر جرمی به شکل پاندول است و بزرگ‌ترین (با قطر ۵.۵ متر، شامل ۴۱ لایه ۱۲/۵ سانتی‌متری از صفحات جوش‌داده شده به همدیگر) و سنگین‌ترین میراگر جرمی (۶۶۰ تن) در دنیا است که باعث ۴۰٪ کاهش دامنه نوسان‌ها در این برج می‌شود.

¹ Bekdaş and Nigdeli

² Aly

³ Elias and Matsagar

گردابه‌ها (در وجه پشت به باد سازه) است. به همین منظور در سمت راست معادله (۵) که با معادلات (۶) و (۷) کوپل می‌باشد، دو جمله p و e وجود دارد که به ترتیب بیانگر نیروهای فوق است. در معادله (۷) نیز اثرات تغییرات نیروهای گردابه‌ای ارائه شده است که در هر گام زمانی از حل معادلات، مقادیر جدید آن بایستی محاسبه و اثرات آن در معادله (۵) اعمال می‌گردد. برای حل دستگاه معادلات کوپل (۵) تا (۷) بایستی پارامترهای مختلف مدل تعیین شوند. برای بازه وسیعی از عدد رینولدز می‌توان عدد اشتروهال را 0.12 و ضریب پسا را برابر $C_{Df} = 0.12$ در نظر گرفت. بدین ترتیب ضریب M از معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$M = \frac{1}{2} \frac{0.2}{8\pi^2(0.12)^2\mu} \approx \frac{0.08}{\mu} \quad (8)$$

آخرین پارامتر، ضریب میرایی افزوده $\gamma = \frac{C_D}{4\pi St}$ است که متناسب با ضریب پسا است. برای حالتی که جسم نوسان می‌کند می‌توان ضریب پسا را حدوداً برابر با ۲ در نظر گرفت و لذا مقدار γ برابر با $1/32$ خواهد بود. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که نیروی وارد بر جسم می‌تواند تابعی از جابجایی، سرعت و یا شتاب جسم باشد که بررسی پژوهش‌های مشابه بیانگر بهتر بودن مدل کوپل‌شدگی شتاب است [۱۱]. سایر مقادیر مجهولات باقیمانده، ضرایب ثابت A و ε است که با توجه به مرجع [۱۲]، مقدار ضریب A برابر با ۱۲ و مقدار ε برابر با 0.3 نیز برای ε بدست خواهد آمد.

در این پژوهش، مدل‌سازی سازه به صورت مدل برشی انجام شده است. در این صورت هر طبقه ساختمان را می‌توان به صورت یک درجه آزادی فرض کرد که جرم آن برابر با جرم کل آن طبقه است و سختی و میرایی آن را، که وابسته به پیکربندی و جنس مصالح است، می‌توان با استفاده از فرمول بدست آورد. علاوه بر این، در تحلیل دینامیکی انجام شده، ساختمان به صورت متقارن در نظر گرفته شده و از اثرات نیروهای پیچشی صرف‌نظر شده است. همچنین ساختمان به صورت منفرد تحلیل شده و از تاثیر ساختمان‌های اطراف بر آن صرف‌نظر شده است [۱۳]. به منظور حل معادلات فوق، گام زمانی Δt تعریف شده و مقادیر شتاب، سرعت و جابجایی با استفاده از تقریب خطی نقطه-وسط مستطیلی در هر گام زمانی با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب محاسبه می‌شود. مزیت اصلی این روش، پایداری نامشروط آن است. در این پژوهش آسمان‌خراش ACT که در شهر هاماماتسو در کشور ژاپن با کاربری هتل قرار دارد، مورد انتخاب شده است [۱۳]. این ساختمان در سال ۱۹۹۴ احداث گردیده و دارای ارتفاع ۲۱۲ متر می‌باشد و به منظور کاهش نوسانات حاصل از جریان باد، از میراگر جرمی به وزن ۹۰ تن در آن استفاده شده که تا ۹۰ سانتی‌متر قابلیت نوسان دارد. سایر مشخصات این ساختمان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص سازه مورد بررسی [۱۳]

جرم برج ACT	$m = 11000000 \text{ kg}$
سختی کل برج ACT	$k = 168000 \text{ N.m}^{-1}$
عموماً مقادیر نسبت میرایی تا ۵٪ است	$\xi = 2\%$

مقادیر بهینه مربوط به خواص میراگر جرمی تنظیم شده نیز با استفاده از مرجع [۱۳] استخراج شده‌اند. با توجه به این که مطابق با مرجع [۱۴] در نسبت‌های ارتفاع به عرض سازه بیش از ۸ گردابه‌های حاصل از جریان تاثیر زیادی بر نوسان‌های سازه دارند، لذا در تحلیل

افزافه شده سیال، $m_f = \frac{1}{4}\pi C_m \rho D^2$ و میرایی اضافه شده، $c_f = \Omega \gamma \rho D^2$ مشخص شده‌اند و اثرات مربوط به گردابه‌های جریان سیال به صورت نیروی خارجی E که به صورت $E = \frac{1}{2}\rho U^2 DC_D$ تعریف می‌شود. در این روابط ρ چگالی سیال، C_m ضریب جرم اضافه شده (که معمولاً برابر ۱ فرض می‌شود)، C_D ضریب پسای نوسانی لحظه‌ای و γ ضریب میرایی جریان سیال اضافه شده است [۱۲]. همچنین فرکانس تشکیل گردابه به صورت $\Omega = \Omega_f = \frac{2\pi St U}{D}$ تعریف می‌شود که در آن St عدد اشتروهال است. با تعریف فرکانس طبیعی نوسان‌ها به صورت $\Omega_s = \left(\frac{k}{m_s}\right)^{0.5}$ ، میرایی کاهش یافته سازه به صورت $\xi_s = \frac{c_s}{2m_s\Omega}$ ، جرم کل $m = m_s + m_f$ و نسبت جرمی بی‌بعد $\mu = \frac{m_s + m_f}{\rho D^2}$ معادله (۹) را به صورت زیر می‌توان نوشت [۱۱]:

$$\ddot{X} + \left(2\xi_s\Omega_s + \frac{\gamma}{\mu}\Omega_f\right)\dot{X} + \Omega_s^2 X = \frac{E}{m} \quad (9)$$

اثرات گردابه‌ها نیز به کمک معادله وندریل (بدلیل مطابقت خوب آن با نتایج آزمایشگاهی [۱۱]) مدل می‌شود:

$$\ddot{q} + \varepsilon\Omega_f(q^2 - 1)\dot{q} + \Omega_f^2 q = F \quad (10)$$

متغیر اصلی گردابه بی‌بعد q که مربوط به ضریب پسای نوسانی بر روی سازه بوده، به صورت $q(t) = \frac{2C_D(T)}{C_{D0}}$ تعریف می‌شود. در این رابطه $C_D(T)$ ضریب پسای لحظه‌ای و C_{D0} نیز ضریب پسای مرجع (مربوط به جسم ثابت در معرض گردابه) است. ضریب $\frac{q}{2} = \frac{C_D}{C_{D0}}$ ضریب تقویت نیروی پسا در حالت نوسان‌های جسم نسبت به حالتی است که جسم ساکن است. پارامتر F نیز بیانگر تاثیر حرکت سیلندر در ناحیه تشکیل گردابه است. با افزودن اثرات میراگر جرمی به معادله حرکت سازه و تعریف دامنه نوسان بی‌بعد به صورت $x = \frac{X}{D}$ ، $\dot{x} = \frac{\dot{X}}{D}$ و زمان بی‌بعد $t = T\Omega_f$ دستگاه معادلات کوپل بی‌بعد سیستم دینامیکی سازه دارای میراگر جرمی به همراه اثرات جریان سیال و گردابه‌ها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\ddot{x} + \left(2\xi_s\delta + \frac{\gamma}{\mu}\right)\dot{x} + \delta^2 x - 2\xi_d\delta^* m^* \dot{x}_d - \delta^{*2} m^* x_d = \delta \quad (11)$$

$$\dot{p} + e + \ddot{x}_d + 2\xi_d\delta^* \dot{x}_d + \delta^{*2} x_d = 0 \quad (12)$$

$$\ddot{q} + \varepsilon(q^2 - 1)\dot{q} + q = f \quad (13)$$

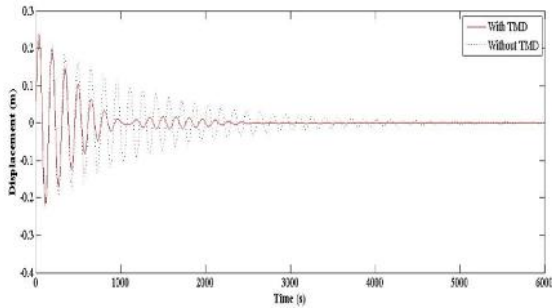
در روابط (۱۱) تا (۱۳)، $\delta = \frac{\Omega_s}{\Omega_f}$ نسبت فرکانس نوسان‌های جسم به فرکانس زاویه‌ای پیدایش گردابه که به صورت $\delta = \frac{\Omega_s}{2\pi St(\frac{U}{D})} = \frac{1}{StU_r}$ تعریف می‌شود و $\delta^* = \frac{\Omega_d}{\Omega_f}$ نسبت فرکانس میراگر جرمی به زاویه‌ای پیدایش گردابه است [۱۱]. U_r سرعت جریان کاهش یافته است که به صورت $U_r = \frac{2\pi U}{\Omega_s D}$ تعریف می‌شود. پارامترهای کوپل‌شدگی نیز به صورت روابط $e = \frac{E}{D\Omega_f^2 m} = p \frac{D}{4\pi^2 St^2 U^2 m}$ ، $\dot{p} = \frac{P}{(m_s + m_f)D\Omega_f^2}$ و $f = \frac{F}{D\Omega_f^2} = F \frac{D}{4\pi^2 St^2 U^2}$ جایگذاری در روابط فوق مقدار ضریب e به صورت $e = \frac{C_D}{8\pi^2 St^2 \mu}$ تعریف می‌شود و با تعریف ضریب M به صورت رابطه $M = \frac{1}{2} \frac{C_{D0}}{8\pi^2 St^2 \mu}$ می‌توان نوشت $e = Mq$

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید نیروی کل وارد بر سازه به صورت جمع آثار دو نیروی جریان باد (در وجه رو به باد سازه) و نیروی

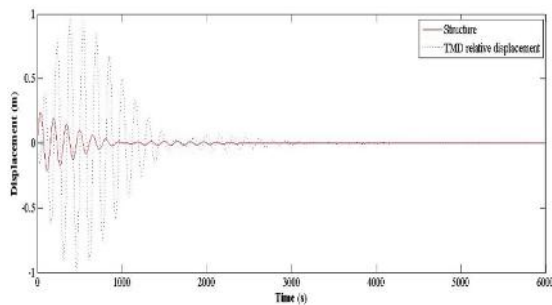
¹ Fluid-added mass

² Fluid-added damping

روند تغییرات مقادیر نمودار مطابقت خوبی داشته که بیانگر دقت مناسب کد کامپیوتری استفاده شده است.



شکل ۴- ارتعاشات آزاد سیستم با فرض وجود سرعت اولیه 0.1 m/s در سیستم و در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها



شکل ۵- جابجایی سازه و میراگر جرمی با فرض وجود سرعت اولیه 0.1 m/s در سیستم و در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

در جدول ۲ مقادیر بیشینه دامنه نوسان‌های در دو حالت ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها و بدون آن مقایسه شده‌است که بیانگر کاهش جزئی بیشینه دامنه نوسان‌ها در حالت در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها است. در این حالت گردابه‌های ایجاد شده در پشت جسم مشابه با نیروی اصطکاکی و در خلاف جهت حرکت سازه عمل کرده و سبب کاهش دامنه نوسان‌ها می‌شود.

جدول ۲- مقادیر بیشینه دامنه ارتعاشات در دو حالت در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها و بدون آن در ارتعاشات آزاد

مشخصات سازه	بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)	بیشینه دامنه ارتعاشات بدون در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)
بدون میراگر جرمی	۰.۲۳۶۷	۰.۲۳۶۱
دارای میراگر جرمی	۰.۲۳۶۵	۰.۲۳۶۰

۳-۳- بارگذاری هارمونیک با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

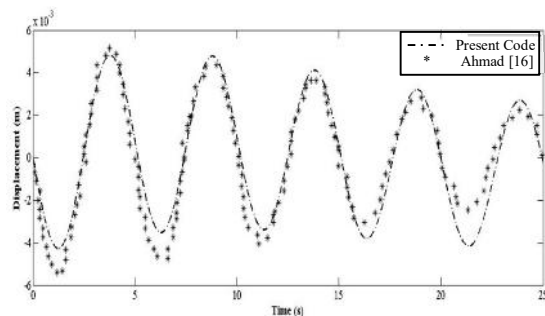
در این قسمت دامنه نیروی تحریک خارجی \bar{p} برابر 10 kN و به صورت $p = \bar{p} \cos(\alpha \times \Omega_s t)$ فرض شده‌است که در آن Ω_s فرکانس

سازه مورد بررسی این نسبت برابر 10 در نظر گرفته شده‌است. علاوه بر این به منظور بدست آوردن فرکانس تشکیل گردابه‌ها، با فرض آن که برج ACT در شهری با ویژگی‌های آب‌وهوایی مشهد ساخته شده باشد، سرعت جریان باد برابر 25 m/s فرض شده‌است [۱۵].

۲- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی نتایج

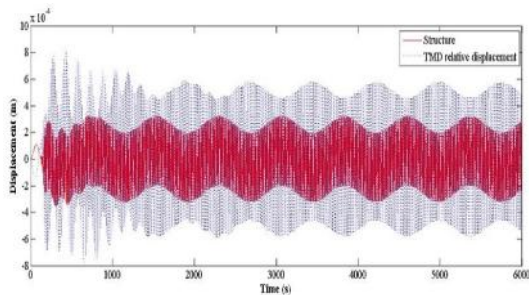
به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده و بررسی میزان دقت آن‌ها، در شکل ۳ مقادیر شتاب سازه در حضور میراگر جرمی ترسیم و با نتایج مرجع [۱۶] مقایسه شده‌است. در مرجع [۱۶] معادلات دیفرانسیل ارتعاشات یک ساختمان بلندمرتبه در معرض جریان باد با استفاده از معادله لاگرانژ استخراج شده‌است. در بالاترین طبقه این ساختمان یک میراگر جرمی متوازن قرار دارد. سیستم به صورت یک درجه آزادی مدل شده که با احتساب میراگر جرمی متوازن در بالاترین طبقه، به سیستم دو درجه آزادی تبدیل شده (مشابه با پژوهش حاضر) و معادلات سازه و میراگر جرمی با استفاده از روش رانج‌کوتا مرتبه ۴ حل شده‌اند. به منظور مقایسه بهتر نتایج، نسبت میرایی و نسبت جرمی در هر دو پژوهش برابر و به ترتیب 0.1 و 0.1 انتخاب شده‌است. علاوه بر این نیروی باد در هر دو پژوهش به صورت هارمونیک و با دامنه و فرکانس تحریک برابر با مقادیر مرجع [۱۶] مدل شده‌است. ملاحظه می‌شود که روند تغییرات مقادیر نمودار مطابقت خوبی داشته که بیانگر دقت مناسب کد کامپیوتری استفاده شده است.



شکل ۳- مقادیر شتاب سازه دارای میراگر جرمی و نتایج مرجع [۱۶]

۳-۲- ارتعاشات آزاد

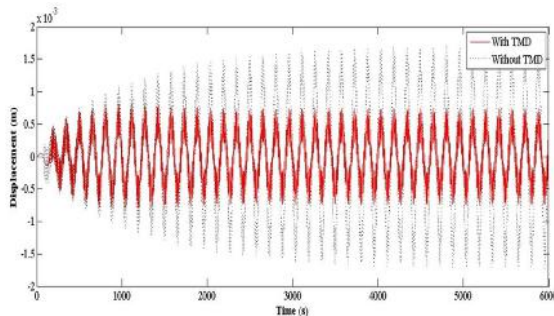
در شکل‌های ۴ و ۵ نتایج حاصل از حل مسئله با فرض عدم وجود نیروی خارجی نشان داده شده‌است. در این حالت فرض شده سازه دارای سرعت اولیه 0.1 m/s و جابجایی اولیه صفر باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حالت استفاده از میراگر جرمی بعد از 2500 ثانیه سازه به حالت پایا می‌رسد. در حالی که بدون استفاده از میراگر، این زمان به حدود 4000 ثانیه افزایش می‌یابد. همچنین سازه دارای میراگر جرمی در زمان حدود 1000 ثانیه از حرکت ایستاده و سپس بعد از زمان اندکی مجدداً شروع به نوسانات کوچک می‌کند. به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، نسبت میرایی و نسبت جرمی در هر دو پژوهش برابر و به ترتیب 0.1 و 0.1 انتخاب شده‌است. علاوه بر این نیروی باد در هر دو پژوهش به صورت هارمونیک و با دامنه و فرکانس تحریک برابر با مقادیر مرجع [۱۶] مدل شده‌است. ملاحظه می‌شود که



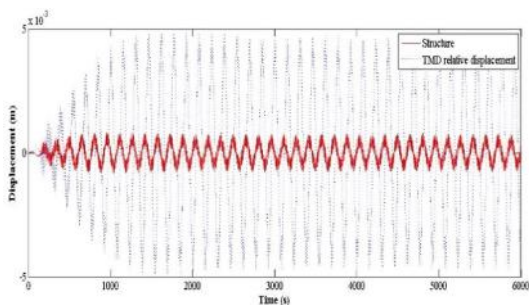
شکل ۷- پاسخ سازه و میراگر جرمی با فرض بار هارمونیک خارجی و در $\alpha = 0.2$ با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

۳-۳-۲- اثر بهینه

بهترین عملکرد میراگر جرمی در فرکانس‌های تحریک نزدیک به فرکانس طبیعی سازه است [۱۷]. براساس پژوهش انجام شده مشخص شد در حالت $0.1 < \alpha < 0.97$ میراگر جرمی سبب کاهش چشمگیر دامنه نوسان‌ها می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ در حالت $\alpha = 0.997$ نشان داده شده‌است، دامنه پاسخ سازه در حالت استفاده از میراگر جرمی بسیار کاهش یافته‌است. همچنین باتوجه به شکل ۹ در این حالت دامنه نوسان‌های میراگر جرمی بسیار بیشتر از دامنه ارتعاشات سازه است.



شکل ۸- تاثیر استفاده از میراگر جرمی با فرض بار خارجی هارمونیک و در $\alpha = 0.997$ با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها



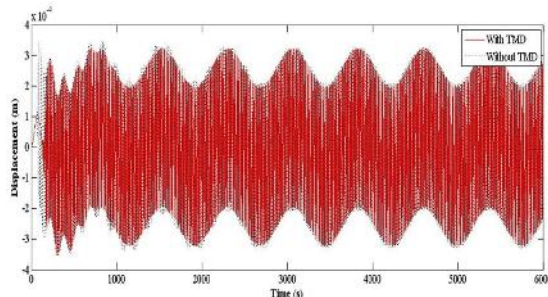
شکل ۹- پاسخ سازه و میراگر جرمی با فرض بار خارجی هارمونیک و در $\alpha = 0.997$ با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

با توجه به جدول ۴ و مشابه با قسمت قبل، گردابه‌های ایجاد شده در پشت جسم سبب افزایش بیشینه دامنه ارتعاشات می‌شود. اما در این حالت افزایش دامنه نوسان‌ها، خصوصاً در مورد میراگر جرمی، نسبت به حالت دیگر مقادیر α کمتر است.

طبیعی سازه و α ضریب بی‌بعدی است که به صورت نسبت فرکانس طبیعی سازه به فرکانس نوسانات نیروی باد تعریف شده و اثرات نیروی تحریک را با فرکانس‌های مختلف بیان می‌کند که در ادامه بررسی خواهد شد.

۳-۳-۱- بدون تاثیر

میراگر جرمی در فرکانس‌های تحریک خارجی دورتر از فرکانس طبیعی تاثیر چندانی بر کاهش نوسانات سازه ندارد [۱۷]. با توجه به پژوهش انجام شده، مشخص گردید که در ساختمان مورد بررسی، در حالت $0.79 < \alpha < 1.51$ یا میراگر جرمی تاثیری بر دامنه نوسان‌های سازه ندارد. در شکل ۶ دامنه ارتعاشات سازه در دو حالت وجود و عدم وجود میراگر جرمی در $\alpha = 0.2$ رسم شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود میراگر جرمی در این حالت تاثیری بر کاهش دامنه نوسان‌های سازه ندارد. همچنین نتایج در جدول ۳ بیانگر آن است که گردابه‌های ایجاد شده در پشت جسم سبب افزایش نیروی وارد بر سازه شده و بیشینه دامنه نوسان‌ها در این حالت بیشتر از بیشینه دامنه ارتعاشات در حالت در نظر نگرفتن اثرات گردابه‌ها است.



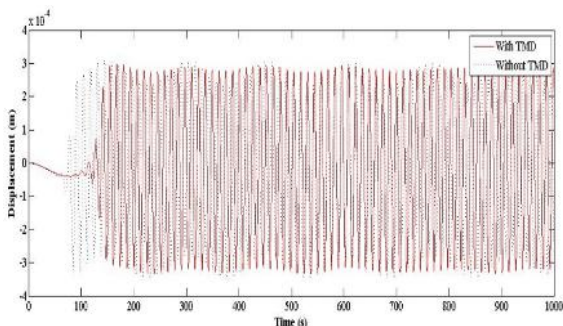
شکل ۶- عدم تاثیر میراگر جرمی در حالت وجود بار خارجی هارمونیک و در $\alpha = 0.2$ با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

جدول ۳- مقادیر بیشینه دامنه ارتعاشات در دو حالت در نظر گرفتن

اثرات گردابه‌ها و بدون آن در $\alpha = 0.2$

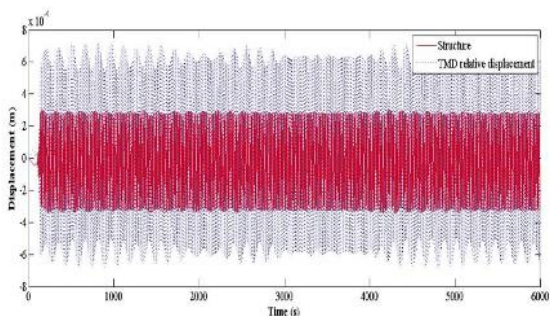
مشخصات سازه	بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)	بیشینه دامنه ارتعاشات بدون در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)
بدون میراگر جرمی	3.24×10^{-1}	1.08×10^{-1}
دارای میراگر جرمی	3.46×10^{-1}	1.09×10^{-1}

در شکل ۷ نیز پاسخ سیستم و میراگر جرمی در $\alpha = 0.2$ نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که دامنه نوسان‌های میراگر جرمی بسیار بیشتر از سازه است.



شکل ۱۱- پاسخ سازه به نیروی باد اتفاقی با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

همچنین در شکل ۱۲ جابجایی میراگر جرمی و سازه نشان داده شده‌است. نکته قابل توجه جابجایی و دامنه نوسان‌های بسیار زیاد میراگر جرمی نسبت به سازه اصلی است. در جدول ۵ نیز اثرات در نظر گردابه‌ها بر مقادیر بیشینه دامنه نوسان‌ها ارائه شده‌است. ملاحظه می‌شود در این حالت هم گردابه‌های ایجاد شده در پشت جسم سبب افزایش دامنه ارتعاشات سازه می‌شوند.



شکل ۱۲- پاسخ سازه و میراگر جرمی در برابر نیروهای باد اتفاقی با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

جدول ۵- مقادیر بیشینه دامنه ارتعاشات در دو حالت در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها و بدون آن در حالت بار خارجی اتفاقی

مشخصات سازه	بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)	بیشینه دامنه ارتعاشات بدون در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)
سازه بدون میراگر جرمی	3×10^{-4}	$2/59 \times 10^{-4}$
سازه دارای میراگر جرمی	$3/16 \times 10^{-4}$	$2/11 \times 10^{-4}$

۴- بررسی پارامترهای مهم تاثیرگذار بر ارتعاشات سازه با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، پارامترهای زیادی بر میزان دامنه نوسان‌های سازه در معرض ارتعاشات ناشی از جریان باد موثر است. لذا در این قسمت به منظور بررسی کامل‌تر اثرات گردابه‌ها و همچنین نیروی باد بر سازه‌های بلندمرتبه، به بررسی مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر این‌گونه نوسان‌ها، یعنی جرم سازه و

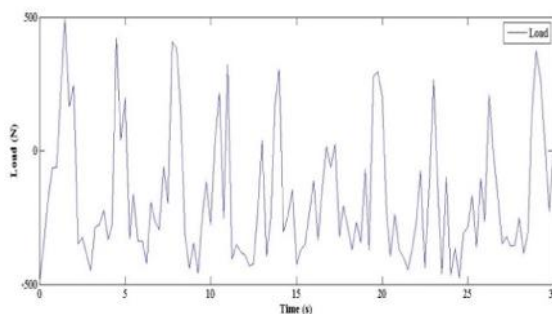
جدول ۴- مقادیر بیشینه دامنه ارتعاشات در دو حالت در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها و بدون آن در $\alpha = 0/997$

مشخصات سازه	بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)	بیشینه دامنه ارتعاشات بدون در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها (m)
بدون میراگر جرمی	$1/70 \times 10^{-4}$	$1/50 \times 10^{-4}$
دارای میراگر جرمی	$8/73 \times 10^{-4}$	$5/57 \times 10^{-4}$

۴-۳ بار خارجی غیرهارمونیک

نتایج آزمایشگاهی مدلسازی نیروی باد در منابع معتبر علمی نشان داده است که پروفیل جریان باد همواره به صورت هارمونیک نبوده و دارای مولفه‌های اتفاقی است [۱۸]. به همین منظور در معادله (۱۲) مدلسازی نیروی باد با در نظر گرفتن مولفه‌های رندوم انجام شده است تا شبیه‌سازی نیروی باد تا حد ممکن به فرم واقعی آن انجام گردد. پاسخ سازه به نیروی باد با پروفیل ذکر شده در شکل ۱۰ ترسیم شده است.

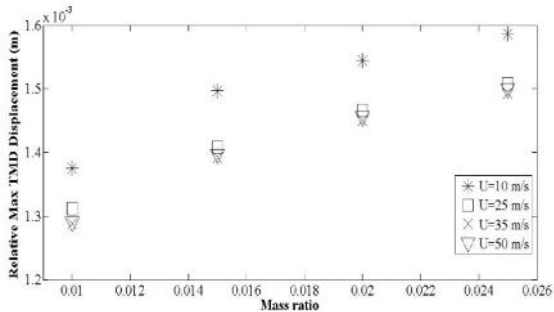
$$10 \left[\frac{2}{\pi} \text{rand} \cos^{-1}(\cos((50 + 0.5 \text{rand})\omega t)) + 0.3 \text{rand} - 1 \right] \quad (12)$$



شکل ۱۰- نیروی تحریک خارجی غیرهارمونیک

در شکل ۱۱ پاسخ سیستم به نیروی تحریک فوق ترسیم شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میراگر جرمی در ابتدا (تا زمان حدود ۱۵۰ ثانیه) سبب کاهش قابل توجه دامنه نوسان‌های سازه شده‌است. اما پس از آن پیش‌بینی حرکت به دلیل تغییرات فرکانسی بسیار سریع و پر دامنه سازه بسیار پیچیده است، به طوری که میراگر جرمی بعضاً سبب کاهش و همچنین در بعضی از زمان‌ها سبب افزایش دامنه نوسان‌های آن شده‌است. به عبارت دیگر اثر مهم و تاثیرگذار میراگر جرمی در این حالت در زمان‌های اولیه شروع ارتعاشات است.

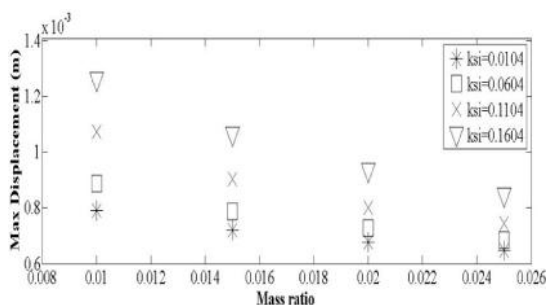
بر سازه بوده و در نتیجه بیشینه دامنه نوسان‌های سازه اصلی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴- تاثیر تغییر نسبت جرمی و سرعت جریان سیال بر بیشینه حرکت نسبی میراگر جرمی با در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به بررسی تاثیر افزایش نسبت میرایی و نسبت جرمی میراگر جرمی بر بیشینه دامنه نوسان‌های سازه و میراگر جرمی پرداخته شده‌است. در قسمت قبل مقدار بهینه نسبت میرایی، با توجه به مرجع [۱۱]، برابر 0.0604 انتخاب شده‌است. در این قسمت مقادیر نسبت میرایی بیشتر و کمتر از آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به همین منظور در شکل ۱۵ بیشینه دامنه نوسان‌های سازه و در شکل ۱۶ اختلاف دامنه ارتعاشات بیشینه میراگر جرمی و سازه نشان داده شده‌اند.

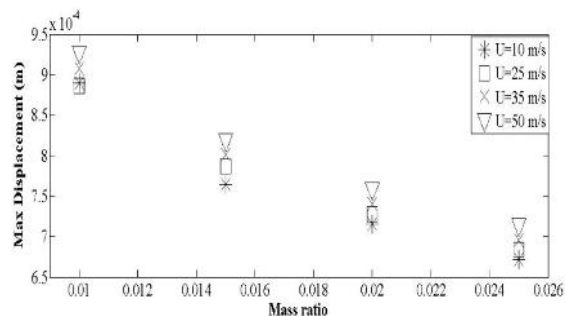
با توجه به شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود که افزایش نسبت جرمی میراگر سبب کاهش دامنه نوسان‌های سازه شده‌است (مشابه با قسمت قبل). همچنین افزایش نسبت میرایی میراگر جرمی سبب افزایش مقدار بیشینه دامنه نوسان‌ها و کاهش تاثیر میراگر جرمی شده‌است. علت آن با توجه به شکل ۱۶ مشخص می‌شود. از شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت میرایی میراگر جرمی، دامنه نوسان‌های میراگر جرمی کاهش یافته و در نتیجه از تاثیر آن بر ارتعاشات سازه کاسته شده و قادر به جذب نوسان‌های آن نمی‌باشد.



شکل ۱۵- تاثیر تغییر نسبت جرمی و نسبت میرایی میراگر جرمی بر بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه

میراگر و همچنین سرعت جریان باد بر بیشینه دامنه نوسان‌های سازه و میراگر جرمی پرداخته شده‌است (سایر پارامترها ثابت فرض شده‌اند). ضمن آن که در کلیه حالات مورد بررسی، نیروی باد وارد بر سازه مشابه با بخش ۲-۳ و $\alpha = 0.997$ که در آن میراگر جرمی در حالت بهینه عملکرد قرار دارد، فرض شده‌است.

در شکل ۱۳ به بررسی تاثیر تغییر سرعت جریان باد و همچنین نسبت جرمی (نسبت جرم میراگر جرمی به جرم سازه) بر بیشینه دامنه نوسان‌های سازه پرداخته شده‌است. سرعت باد از پارامترهای مهم در میزان نیروهای گردابه‌ای در پشت سازه است. سرعت باد در شهر مشهد با توجه به میحث ششم مقررات ملی برابر 25 m/s به‌طور معمول در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. لذا در این قسمت سرعت‌های باد کمتر و بیشتر از آن، یعنی 10 m/s ، 25 m/s ، 35 m/s و 50 m/s بررسی شده‌اند. همچنین نتایج قسمت قبل براساس نسبت جرمی برابر 0.1 بود که در این قسمت نسبت‌های جرمی 0.15 ، 0.2 و 0.25 نیز بررسی شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود در نسبت جرمی ثابت و با افزایش سرعت جریان باد دامنه نوسانات سازه تا حدود 9% افزایش یافته است. علت اصلی افزایش عدد رینولدز جریان و در نتیجه تشکیل گردابه‌های قوی‌تر و وارد شدن نیروهای گردابه‌ای بزرگ‌تر بر سازه است. از طرف دیگر افزایش نسبت جرمی، باعث کاهش بیشینه دامنه نوسانات سازه می‌شود؛ به طوری که در سرعت ثابت و با افزایش نسبت جرمی از 0.1 تا 0.25 ، میزان بیشینه دامنه نوسانات در حدود 25% کاهش یافته است. علت اصلی کاهش دامنه نوسانات آن است که با افزایش نسبت جرمی، جرم میراگر افزایش یافته و در نتیجه سازه سنگین‌تر شده و نوسانات آن کاهش می‌یابد. البته بایستی توجه داشت که سنگین‌تر شدن میراگر جرمی به هر میزان دلخواه میسر نبوده و بایستی به تاثیر آن بر وزن و استحکام سازه توجه کرد.



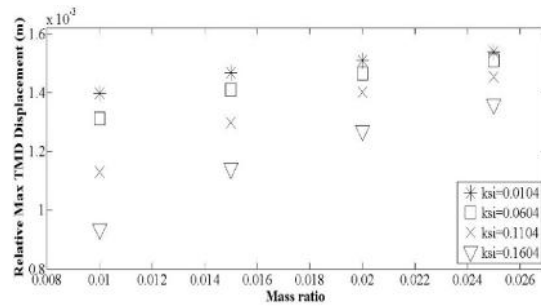
شکل ۱۳- تاثیر تغییر نسبت جرمی و سرعت جریان سیال بر بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه

همچنین با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که افزایش سرعت جریان باد، باعث نزدیک‌تر شدن دامنه نوسان‌های سازه و میراگر جرمی می‌شود. همان‌طور که از شکل ۱۴ قابل مشاهده است، در سرعت‌های بیش از 10 m/s ، مقادیر جابجایی نسبی میراگر جرمی و سازه کاهش چشمگیری یافته است. از طرف دیگر همزمان با افزایش نسبت جرمی، نوسان‌های میراگر جرمی نیز افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش نسبت جرمی از 0.1 تا 0.25 ، جابجایی نسبی میراگر جرمی و سازه تا حدود 16% افزایش یافته است. برآیند این تغییرات، افزایش دامنه ارتعاشات میراگر جرمی و تاثیر بیشتر آن در جذب نیروهای وارد شده

در این پژوهش به بررسی نوسان‌های ناشی از گردابه‌ها که بر اثر جریان باد حول سازه‌های بلندمرتبه ایجاد می‌شود و همچنین تاثیر استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده در این‌گونه سازه‌ها، پرداخته شد. به همین منظور ضمن بررسی معادلات حاکم بر سازه، گردابه‌ها و میراگر جرمی، سه معادله کوپل حاکم بر پدیده توسط کد کامپیوتری نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB حل گردید. به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، پروفیل‌های مختلف به منظور شبیه‌سازی اثرات نیروی باد بر سازه مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نتایج در فرکانس‌های مختلف تحریک در حالت استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده و همچنین در حالت عدم استفاده از آن مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج پژوهش بیانگر آن بود نیروی باد و خصوصاً گردابه‌های حاصل از آن می‌تواند سبب ایجاد نوسان‌های زیاد در ساختمان‌ها شوند. بنابراین در طراحی سازه‌های بلندمرتبه، علاوه بر نیروی زلزله (که از مهم‌ترین پارامترهای طراحی سازه است)، بایستی اثرات نیروی باد نیز به دقت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی سازه سبب کاهش چشمگیر دامنه نوسان‌ها (تا حدود ۵۰٪) می‌شود. براساس پژوهش انجام شده مشخص شد در نسبت فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی سازه بین ۰/۹۷ تا ۱/۱ میراگر جرمی دارای عملکرد بهینه در کاهش چشمگیر دامنه نوسان‌ها است. اما در سایر فرکانس‌ها از اثرات آن کاسته می‌شود. از طرف دیگر گردابه‌های ایجاد شده در اطراف سازه سبب افزایش دامنه نوسان‌های ساختمان می‌شود. مقایسه بیشینه دامنه ارتعاشات در حالت در نظر گرفتن اثرات گردابه‌ها بیانگر افزایش میزان نوسان‌های سازه است که بعضاً تا ۴۵٪ میزان ارتعاشات سازه را افزایش می‌دهد. در انتهای پژوهش نیز به بررسی موردی تاثیر نسبت جرمی و سرعت باد بر ارتعاشات سازه پرداخته شد که نتایج بیانگر آن بود که افزایش این دو پارامتر به ترتیب سبب کاهش و افزایش دامنه نوسانات سازه می‌شوند. از طرف دیگر همزمان با افزایش نسبت جرمی، نوسان‌های میراگر جرمی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه دامنه نوسان‌های سازه اصلی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش نسبت میرایی نیز سبب کاهش دامنه نوسانات سازه می‌شود.

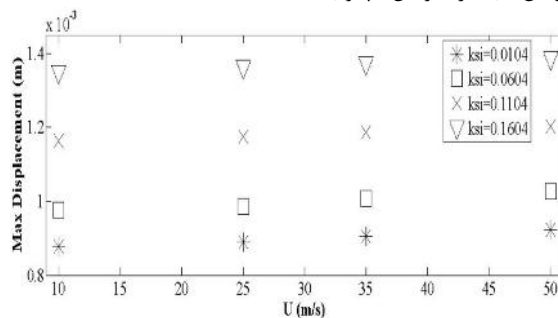
۶- مراجع

- [1] Poulos H.G., Tall building foundations: design methods and applications. *Innovation Infrastructural Solution*, Vol. 10, pp. 1-10, 2016.
- [2] Ul-Islam S., Zhou C.Y., Characteristics of flow past a square cylinder using the lattice boltzmann method. *Information Technology Journal*, Vol. 8, pp. 1094-1114, 2009.
- [3] Sarpkaya T., A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Fluid and Structures*, Vol. 19, pp. 389-447, 2004.
- [4] Kareem A., Kijewski T., Tamura Y., Mitigation of Motion of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications. *Wind and Structure*, Vol 2, pp. 201-205, 1999.
- [5] Bekdaş G., Nigdeli S. M., Mass ratio factor for optimum tuned mass damper strategies. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 71, pp. 68-84, 2013.
- [6] Aly A. M., Proposed robust tuned mass damper for response mitigation in buildings exposed to multidirectional wind. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 23(9), pp. 664-691, 2014.
- [7] Elias S., Matsagar V., Optimum tuned mass damper for wind and earthquake response control of high-rise building. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 2, pp. 1475-1487, 2015.

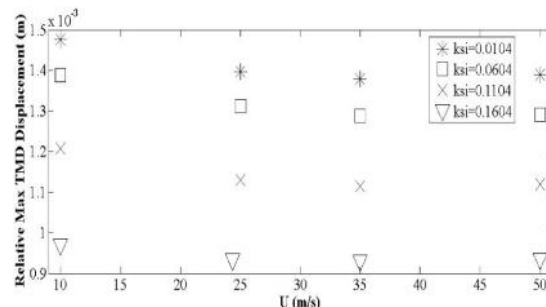


شکل ۱۶- تاثیر تغییر نسبت جرمی و نسبت میرایی میراگر جرمی بر بیشینه حرکت نسبی میراگر جرمی با در نظر گرفتن اثرات گردابه

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ تاثیر تغییر نسبت میرایی میراگر جرمی و سرعت جریان باد بر بیشینه دامنه نوسان‌های سازه و میراگر جرمی نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که افزایش سرعت جریان باد، باعث افزایش نیروی وارد بر سازه از طرف گردابه‌ها شده و در نتیجه سبب افزایش دامنه نوسان‌های سازه و میراگر جرمی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش نسبت میرایی، سبب کاهش دامنه نوسان‌های میراگر جرمی و در نتیجه کاهش تاثیر آن بر سازه شده و دامنه ارتعاشات سازه افزایش می‌یابد. البته بایستی توجه داشت که افزایش سرعت جریان، سبب تشکیل گردابه‌ها در فواصل دورتر از پشت سازه شده که در نتیجه از تاثیر آن‌ها بر سازه کاسته می‌شود. اما از طرف دیگر، سبب تقویت نیروی گردابه‌ها می‌شود. برآیند این دو عامل سبب شده که دامنه نوسان‌های سازه افزایش ناچیزی یابد.



شکل ۱۷- تاثیر تغییر سرعت جریان و نسبت میرایی میراگر جرمی بر بیشینه دامنه ارتعاشات با در نظر گرفتن اثرات گردابه



شکل ۱۸- تاثیر تغییر سرعت جریان و نسبت میرایی میراگر جرمی بر بیشینه حرکت نسبی میراگر جرمی با در نظر گرفتن اثرات گردابه

۵- نتیجه‌گیری

- [8] Elias S., Matsagar V., Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers. *Annual Reviews in Control*, Vol. 44, pp. 129-156, 2017.
- [9] Kou-Cheng Ch., Jeen-Hwa W., Bor-Shouh H., Chun-Chi L., Win0Gee H., Vibration of the TAIPEI 101 skyscraper caused by the 2011 Tohoku earthquake, Japan. *Earth Planets Space*, Vol. 64, pp. 1277-1286, 2012.
- [10] Tuan A. Y., Shang, G. Q., Vibration control in a 101-storey building using a tuned mass damper. *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 17(2), pp. 141-156, 2014.
- [11] Facchinetti M. L., de Langre E., Biolley F., Vortex-induced travelling waves along a cable. *Mech B-Fluids*, Vol. 23, pp. 199-208, 2004.
- [12] Srinil N., Zanganeh H., Day A., Two-degree-of-freedom circular cylinder with variable natural frequency ratio: Experimental and numerical investigations. *Ocean Engine*, Vol. 73, pp. 179-194, 2013.
- [13] Carlot J., *Effects of a Tuned Mass Damper on Wind-Induced Motions in Tall Buildings*, MSc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [14] Kawai H., Vortex induced vibration of tall buildings. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 41, pp. 117-128, 1992.
- [۱۵] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، مقررات ملی ساختمان ایران مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان، ۱۳۸۸.
- [16] Ahmad Sh., Suppression of Wind Induced Vibrations Using Tuned Mass Damper. *Wind & Engineering*, Vol. 5, pp. 29-38, 2008.
- [17] Connor J., *Introduction to Motion Based Design*. Prentice hall, United State, 2002.
- [18] Dan-hui D., Xiang-jie W., Xing-fei Y., Wei Ch., Estimation and Modeling of Fluctuating Wind Amplitude and Phase Spectrum Using APES Algorithm Based on Field Monitored Data. *Shock and Vibration*, Vol. 2018, pp. 1-14, 2018.