



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Steel Structures with Fractional Viscoelastic Dampers Considering Uncertainty Variables

Maryam Beheshti¹, Payam Asadi^{2*}

1- M.S. Graduated, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

ABSTRACT

Using viscoelastic (VE) dampers is one of the most effective tools for seismic retrofitting of steel structures. The results of many experimental studies demonstrated that using fractional derivative terms for modelling viscoelastic dampers offers an acceptable level of accuracy. Unlike viscous dampers the damping force is not linearly dependent to velocity and it is also highly affected by excitation frequency and ambient temperature. For this reason, solving the dynamic equation and calculating the seismic response of the structures equipped with VE dampers have many complexities. In this paper, the responses of a viscoelastically damped structure are calculated and the seismic performance of the building is evaluated while considering the effects ambient temperature as well as the inherent uncertainties related to ground motion excitation. The proposed relationships were used to calculate the structural responses and assess the seismic performance of a 5-story steel structure retrofitted with fractional viscoelastic dampers. The maximum relative displacement of the controlled structural at the operation, design, and maximum considered expected hazard levels were compared to those of the initial structure (without damper). Furthermore, fragility curves were used to compare responses and exceedance probabilities of performance limit states. The results show great improvement in structural seismic performance related to the reduction of both structural responses and exceedance probabilities of limit states. The effect of temperature changes in results has been also demonstrated.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 February 2019

Revise Date: 26 April 2019

Accept Date: 17 May 2019

Keywords:

Fractional Viscoelastic Damper
Seismic Performance Assessment
Temperature effect
Fragility Curve
Weak Steel Frame

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.171919.1785

*Corresponding author: Payam Asadi
Email address: asadi@aut.ac.ir

ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای سازه فولادی مقاوم‌سازی شده با میراگر مشتق کسری با لحاظ متغیرهای غیرقطعی

مریم بهشتی^۱، پیام اسدی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک یکی از موثرترین راهکارها برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها هستند. نتایج بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که مدل‌های مشتق کسری برای مدلسازی میراگرهای ویسکوالاستیک دارای دقت بسیار بالایی بوده است. نیروی میراگر ویسکوز تنها دارای رابطه خطی با سرعت است، اما نیروی میراگر ویسکوالاستیک مشتق کسری، علاوه بر این که رابطه خطی با سرعت ندارد، به مقادیر فرکانس تحریک و دمای محیط نیز مرتبط است. همچنین معادله دینامیکی سازه مجهز به این نوع میراگرها و محاسبه پاسخ این سازه‌ها تحت تحریک زلزله، دارای پیچیدگی‌های بسیاری است. در این مقاله پاسخ‌های سازه‌های مجهز به این نوع میراگرها، محاسبه شده و ارزیابی لرزه‌ای آنها با توجه به تغییرات دمای محیط و همچنین تصادفی بودن شتاب‌نگاشت تحریک، انجام شده است. معادلات ارائه شده برای سازه فولادی ۵ طبقه‌ای که با میراگرهای ویسکوالاستیک دارای رفتار مشتق کسری، مقاوم‌سازی شده است، به کار گرفته شده است. مقادیر حداکثر جابجایی نسبی طبقه‌ای سازه کنترل شده در سطوح خطر زلزله بهره‌برداری، طرح و حداکثر با سازه اولیه مقایسه شده و همچنین با توجه به تصادفی بودن تحریک‌ها از منحنی شکنندگی برای مقایسه پاسخ‌ها استفاده شده است. نتایج نشان داده است، که این میراگرها مقادیر پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله و احتمال فراگذشت از حدود عملکردی را کاهش داده‌اند. همچنین تغییرات دما در تغییر مقادیر پاسخ‌ها بسیار موثر بوده است.

کلمات کلیدی: میراگر مشتق کسری، آسیب‌پذیری لرزه‌ای، اثر دما، منحنی شکنندگی، قاب فولادی ضعیف

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.171919.1785	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.171919.1785	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۲۷	۱۳۹۸/۰۲/۲۷	۱۳۹۸/۰۲/۰۶	۱۳۹۷/۱۱/۲۴
				پیام اسدی	*نویسنده مسئول:	
				cc.iut.ac.ir	پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مشخصات میراگر ویسکوالاستیک با دو پارامتر مدول ذخیره سازی و مدول اتلاف بیان می شود. آزمایش ها روی میراگرهای ویسکو الاستیک نشان داده است که این دو پارامتر به تغییرات فرکانس و دما وابسته اند. چنانچه میراگر ویسکوالاستیک از نوع غیر کلاسیک باشد، ماتریس میرایی در معادله مقدار ویژه موثر است و پاسخ معادله مقدار ویژه در این حالت به صورت اعداد مختلط خواهد بود [۱]. در بسیاری از مطالعات از مدل مشتق کسری برای مدلسازی میراگرهای ویسکوالاستیک استفاده نموده اند [۶-۲]. چنگ و سینگ [۲] روشی برای تجزیه مودال قاب چند طبقه برشی مجهز به میراگر ویسکوالاستیک ارائه نمودند. آن ها برای مدل کردن میراگر ویسکوالاستیک از مدل مشتق کسری استفاده کردند، که پس از تجزیه مودال سازه، معادلات همچنان شامل مشتقات کسری بوده است. لواندوسکی و کورازبوسکی [۳] دو روش برای برای به دست آوردن مقادیر پارامترهای میراگرهای ویسکوالاستیک مدل شده با استفاده از مدل های ۳ پارامتری مشتق کسری کلونین و ماکسول ارائه نمودند. سینگ و همکاران [۴]، روشی برای تحلیل قاب های چند طبقه مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک مشتق کسری، تحت شتابنگاشت زلزله ارائه دادند. روش های پیشنهادی بر اساس فرض های مختلف مقادیر سرعت در بازه های زمانی تحریک و روش بتا-نیومارک به صورت تحلیل های گسسته بوده است. زو و همکاران [۵] مطالعه آزمایشگاهی بر روی میراگرهای ویسکو الاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل مشتق کسری کلونین معادل تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی مربوط به میراگرهای ویسکوالاستیک جامد دارد، خصوصاً که این مدل از قابلیت لحاظ توام اثرات دما و فرکانس برخوردار است. لواندوسکی و پلورا [۶] به آنالیز حساسیت سازه های الاستیک دارای میراگر ویسکوالاستیک با مدل های رئولوژیک کلاسیک و مدل های مشتق کسری پرداختند. آن ها برای آنالیز حساسیت سازه ها از روش های دیفرانسیل مستقیم و متغیرهای الحاقی استفاده کردند. در این مطالعه، حساسیت فرکانس های اصلی و ضرایب میرایی بی بعد نسبت به پارامترهای میراگر بررسی شده است.

ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای سازه های کنترل شده و یا مقاوم شده، موضوع بسیاری از مطالعات بوده است [۷-۱۲]. اکبری و همکاران [۷] قاب های بتنی مقاوم شده با بادبندهای ضربداری و یا شورون را به کمک منحنی های شکنندگی ارزیابی نموده اند. نتایج نشان داد که عملکرد بادبندهای شورون در کاهش احتمال آسیب موثرتر است. میزایی فرد و میرطاهری [۸] ارزیابی لرزه ای و انتخاب جانمایی بهینه سازه های فولادی مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری را ارزیابی لرزه ای نمودند. نتایج نشان داد که عملکرد سازه مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری خصوصاً هنگامیکه دارای جانمایی قطری است، بهبود قابل توجهی یافته است. گرمی و همکاران [۹] نشان دادند که منحنی های شکنندگی ابزار مناسبی برای ارزیابی آسیب پذیری سازه های فولادی با دیوار برشی فولادی جدار نازک هستند. نتایج نشان داد که سازه های بلند مرتبه آسیب پذیری کمتری نسبت به سازه های کوتاه مرتبه دارند. همچنین منحنی های شکنندگی تولید شده حوزه نزدیک به گسل حدود ۱۵ درصد نسبت به حوزه دور از گسل دارای آسیب پذیری بیشتری است. مورلی و همکاران [۱۰] برای ارزیابی آسیب پذیری سازه های فولادی صنعتی مقاوم شده با میراگرهای خود مرکزگرا از تحلیل های دینامیکی فزاینده استفاده نموده اند. نتایج نشان داد که مقادیر حداکثر جابجایی و خصوصاً جابجایی پسماند کاهش چشمگیری داشته اند. ژانگ و همکاران [۱۱] قاب چند دهانه فولادی مقاوم سازی شده با میراگر بازویی را تحت مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آنها نشان دادند که مقادیر جابجایی های بام تا ۲۵ درصد کاهش را تجربه نموده اند. در مطالعه تفسیر و جامان و همکاران [۱۲] نیز برای ارزیابی قاب فولادی مقاوم شده با الیاف CFRP^۱ از شاخص جابجایی استفاده نموده اند. مورسان و همکاران [۱۳] رفتار سازه های مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم شده ای را که با میراگر ویسکوالاستیک مشتق کسری به سازه متصل شده اند، تحت تحریک زلزله بررسی نمودند. آنها نشان دادند که بدین ترتیب پاسخ سازه به مقدار زیادی کاهش می یابد.

جمع بندی مطالعات نشان می دهد که کنترل مقدار حداکثر جابجایی های کاسته شده و تغییرات منحنی شکنندگی ابزار مناسبی برای ارزیابی آسیب پذیری سازه های مقاوم شده هستند. تاکنون مطالعات اندکی برای محاسبه پاسخ سازه های مجهز به این نوع میراگرها انجام شده است، اما ارزیابی لرزه ای سازه های مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک مشتق کسری خصوصاً با لحاظ اثر تغییرات دما انجام نشده است. بدین منظور در این مطالعه پس از ارائه روابط مربوط به محاسبه جابجایی های سازه های کنترل شده تحت شتابنگاشت های

^۱ Carbon Fiber Reinforced Polymer

زلزله، آسیب پذیری سازه ۵ طبقه مجهز به این نوع میراگرها، ارزیابی شده است. برای ارزیابی از شاخص حداکثر جابجایی نسبی طبقه‌های و منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است.

۲- تحلیل دینامیکی سازه‌های مجهز میراگرهای مشتق کسری ویسکوالاستیک

به طور کلی معادله دینامیکی سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک را می‌توان به صورت روابط (۱) و (۲) است [۱۴]:

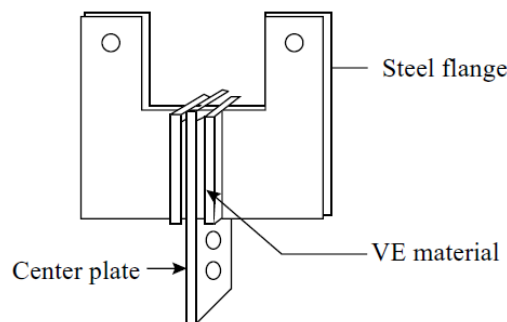
$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) + p(t) \quad (1)$$

$$f(t) = \sum_{r=1}^m f_r(t) \quad (2)$$

که M ، K و C به ترتیب ماتریس‌های $(n \times n)$ جرم، سختی و میرایی سازه بدون میراگر، $q(t)$ ، $p(t)$ و $f(t)$ به ترتیب بردارهای $(n \times 1)$ جابجایی، بار خارجی و نیروی اندرکنش سازه و میراگر، n تعداد درجات آزادی سازه و m تعداد میراگرها است. برای محاسبه پاسخ سازه، ابتدا معادلات دینامیکی میراگر مورد مطالعه در این پژوهش بیان می‌گردد.

۲-۱- میراگرهای مشتق کسری ویسکوالاستیک

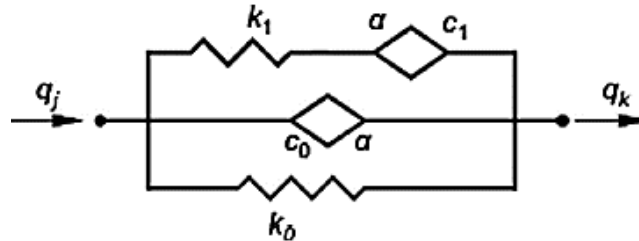
مواد ویسکوالاستیک از کopolymerها و مواد شیشه‌ای تولید و میراگرهای ویسکوالاستیک از قرار گرفتن مواد ویسکوالاستیک در بین صفحات فولادی ساخته می‌شوند (شکل ۱). این میراگرها علاوه بر میرایی به سختی سازه نیز اضافه می‌کنند و به همین دلیل نیروی کنترلی در آنها وابسته به جابجایی و سرعت است، همچنین پاسخ آنها بسیار به فرکانس تحریک و دمای محیط حساس است [۱۵].



شکل ۱: نمونه‌ای از یک میراگر ویسکوالاستیک [۱۵]

تاکنون برای انعکاس وابستگی عملکرد مواد ویسکوالاستیک به دما و فرکانس، از مدل‌های رئولوژیک کلاسیک و مشتق کسری استفاده شده است. مدل‌های کلاسیک شامل مدل‌های کلی کلونین و ماکسول هستند. لواندوسکی و همکاران [۱۶]، مدل‌های مختلف برای میراگرهای ویسکوالاستیک، از جمله مدل رئولوژیک کلاسیک، مدل مدول مختلط و مدل مشتق کسری را مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های ساده کلونین و ماکسول به تنهایی قادر به توضیح دقیق رفتار دینامیکی سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک در حوزه فرکانس نیستند، درحالی‌که مدل‌های مشتق کسری قادر به ارائه پاسخ با دقت مناسب با تعداد کمتری از پارامترها نیز هستند، هرچند که روند حل به مراتب پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به حل معادلات مقدار ویژه خطی دارد. در مدل‌های مشتق کسری، معادله دیفرانسیل با مرتبه کسری و معادله مقدار ویژه غیرخطی یا معادله مقدار ویژه خطی با ماتریس‌هایی با ابعاد بسیار بزرگ ایجاد می‌گردد [۱۴ و ۱۷]. در صورتی که از مدل مشتق کسری استفاده گردد، المان میراگر به صورت المان ویسکوالاستیک یا اسکات-بلر تغییر می‌کند. این المان با دو پارامتر c و α معرفی می‌شود که α نشان‌دهنده مرتبه مشتق کسری بوده و عددی بین صفر و یک است. درواقع المان ویسکوالاستیک شبیه یک درونیابی بین مشخصات فنر و میراگر است. شکل ۲ یک مدل ۵ پارامتری از المان مشتق کسری کلی را که در این مطالعه استفاده شده

است را نشان می‌دهد، که به نوعی تشکیل شده از المان مشتق کسری ساده کلونین ($c_1 = k_1 = 0$) و المان مشتق کسری ساده ماکسول ($c_0 = k_0 = 0$) است. در این شکل، المان ویسکوالاستیک با علامت لوزی نشان داده شده است. همچنین، k_0 و k_1 سختی میراگر، c_0 و c_1 میرایی میراگر، α مرتبه مشتق کسری و q نیروی میراگر هستند [۳].



شکل ۲: مدل مشتق کسری ۵ پارامتری [۳]

به طور کلی نیروی میراگر ویسکوالاستیک مدل کلونین از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$u_0(t) = k_0 \Delta q(t) + c_0 D_t^\alpha \Delta q(t) \quad (3)$$

که $k_0, c_0, u_0, \Delta q_0, t$ به ترتیب زمان، جابجایی نسبی میراگر، نیروی میراگر، میرایی در مدل کلونین و سختی در مدل کلونین هستند. همچنین $D_t^\alpha(\cdot)$ اپراتور مشتق کسری نسبت به زمان است که تعاریف متعددی برای آن ارائه شده است. این روابط در شرایط خاص، معادل یگدیگر هستند. روابط استفاده شده در این پژوهش بر اساس تعریف مشتق کسری ریمان-لیوویل مطابق با رابطه (۴) هستند [۱۸].

$$D_t^\alpha x(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{x(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau \quad (4)$$

که Γ نشان دهنده تابع گاما است. در صورتی که سازه تحت اثر یک تحریک هارمونیک باشد، پاسخ پایدار سازه را می‌توان مطابق با روابط (۵) و (۶) فرض کرد [۳]:

$$q(t) = q_0 \exp(i\omega t) \quad (5)$$

$$u(t) = u_0 \exp(i\omega t) \quad (6)$$

که ω ، فرکانس تحریک و i برابر با $\sqrt{-1}$ است. بنابراین مطابق با (۴) خواهیم داشت:

$$D_t^\alpha \exp(i\omega t) = (i\omega)^\alpha \exp(i\omega t) \quad (7)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس معادلات (۱) و (۲) با شرایط اولیه صفر، رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$(s^2 \mathbf{M} + s\mathbf{C} + \mathbf{K}) \bar{\mathbf{q}}(s) = \bar{\mathbf{f}}(s) + \bar{\mathbf{p}}(s) \quad (8)$$

که بردارهای $\bar{\mathbf{f}}(s)$ و $\bar{\mathbf{p}}(s)$ تبدیل لاپلاس بردارهای $\mathbf{f}(t)$ و $\mathbf{p}(t)$ بوده و $\bar{\mathbf{q}}(s)$ همان بردار مود شکل است. همچنین s ، متغیر تبدیل لاپلاس است. معادلات این پارامترها به صورت روابط (۹) تا (۱۱) است:

$$\bar{\mathbf{f}}(s) = \sum_{r=1}^m \bar{\mathbf{f}}_r(s) \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{f}}(s) = -(K_r + C_r(s)) \mathbf{L}_r \bar{\mathbf{q}}(s) \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_d = \sum_{r=1}^m K_r \mathbf{L}_r, \mathbf{C}_d = \sum_{r=1}^m C_r(s) \mathbf{L}_r, K_r = k_0, C_r(s) = s^\alpha c_0 \quad (11)$$

که ماتریس \mathbf{L}_r موقعیت کلی میراگر r ام است و از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد.

$$\mathbf{L}_r = \mathbf{e}_r \mathbf{e}_r^T \quad (12)$$

همچنین بردار \mathbf{e}_r از رابطه (۱۳) قابل محاسبه است.

$$\mathbf{e}_r = \text{col}(0, \dots, e_i = 1, e_{i+1} = -1, \dots, 0) \quad (13)$$

که بردار $(n \times 1)$ \mathbf{e}_r در حالتی نوشته شده است که میراگر r ام بین درجات آزادی i ام و $(i+1)$ ام قرار داشته باشد. بدین ترتیب رابطه (۵) در حوزه فرکانس به شکل رابطه (۱۴) می‌گردد:

$$\bar{u}_0(s) = k_0 \bar{q}(s) + s^\alpha c_0 \bar{q}(s) \quad (14)$$

در نهایت مسئله مقدار ویژه غیرخطی با صفر قرار دادن مقدار $\bar{\mathbf{p}}(s)$ به فرم رابطه (۱۵) نوشته می‌شود:

$$(s^2 \mathbf{M} + s \mathbf{C} + \mathbf{C}_d(s) + \mathbf{K} + \mathbf{K}_d) \bar{\mathbf{q}}(s) = 0 \quad (15)$$

حل مسئله مقدار ویژه یادشده در بسیاری از مطالعات با روش تداومی انجام شده است [۱۴، ۱۹، ۲۰]. در این مطالعه با استفاده از روش تداومی، پارامتر مصنوعی $0 \leq \kappa \leq 1$ وارد سیستم معادلات غیرخطی شده است و سپس رابطه (۱۵) به شکل رابطه (۱۶) شده است که در آن $\bar{\mathbf{q}}(s)$ به اختصار با $\bar{\mathbf{q}}$ نشان داده شده و معرف هر بردار مود شکل است:

$$\mathbf{h}_1(\bar{\mathbf{q}}, s) = \mathbf{D}(s) \bar{\mathbf{q}} = 0 \quad (16)$$

که در آن:

$$\mathbf{D}(s) = s^2 \mathbf{M} + \kappa s \mathbf{C} + \kappa \mathbf{C}_d(s) + \mathbf{K} + \mathbf{K}_d \quad (17)$$

سیستم معادلات (۱۶) دارای n معادله و $(n+1)$ مجهول است، به همین دلیل معادله (۱۸) نیز به دستگاه معادلات اضافه می‌گردد:

$$\mathbf{h}_2(\bar{\mathbf{q}}, s) = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{q}}^T \frac{\partial \mathbf{D}(s)}{\partial s} \bar{\mathbf{q}} - a = 0 \quad (18)$$

که a می‌تواند هر نقطه مفروض باشد. سپس $(n+1)$ مجهول را که شامل درایه‌های بردار مودشکل و فرکانس اصلی برای هر مود هستند، محاسبه می‌گردند. در صورتی که در رابطه (۱۶) κ برابر با صفر باشد، معادله تبدیل به یک مسئله مقدار ویژه معمولی خواهد شد که پاسخ آن می‌تواند به عنوان نقطه a استفاده شود. سپس در هر تکرار، مقدار a را می‌توان از رابطه (۱۹) محاسبه کرد:

$$a = s_0 \bar{\mathbf{q}}_0^T \mathbf{M} \bar{\mathbf{q}}_0 \quad (19)$$

با استفاده از یک روند گام به گام، مقادیر s_0 و $\bar{\mathbf{q}}_0$ برای هر κ محاسبه می‌گردد تا زمانی که شروط همگرایی در هر گام مطابق رابطه (۲۰) برآورده گردد. پارامتر i در رابطه مذکور شماره تکرار است.

$$|\delta s| \leq \varepsilon_1 |s_{r+1}^i|, \quad \|\delta \bar{\mathbf{q}}\| \leq \varepsilon_2 \|\bar{\mathbf{q}}_{r+1}^i\| \quad (20)$$

که $\delta \bar{\mathbf{q}}$ و δs از حل دستگاه معادلات (۱۶) و (۱۸) به روش نیوتون-رافسون و مطابق دستگاه معادلات (۲۱) بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial \mathbf{h}_1}{\partial \bar{\mathbf{q}}} \delta \bar{\mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{h}_1}{\partial s} \delta s = -\mathbf{h}_1 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}_2}{\partial \bar{\mathbf{q}}} \delta \bar{\mathbf{q}} + \frac{\partial \mathbf{h}_2}{\partial s} \delta s = -\mathbf{h}_2$$

سپس متغیر مصنوعی در هر گام افزایش می‌یابد و پاسخ هر گام مطابق رابطه (۲۲) به عنوان نقطه شروع گام بعد استفاده می‌شود.

$$\kappa_{r+1} = \kappa_r + \Delta \kappa, s_{r+1}^{(i)} = s_{r+1}^{(i)} + \delta s, \bar{\mathbf{q}}_{r+1}^{(i)} = \bar{\mathbf{q}}_{r+1}^{(i-1)} + \delta \bar{\mathbf{q}} \quad (22)$$

مقادیر $\Delta \kappa$, ε_1 , ε_2 می‌توانند هر مقدار دلخواه کوچکی باشند. در این مطالعه مقادیر $\Delta \kappa = 0.1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.001$ انتخاب شده‌اند. در نهایت مقادیر فرکانس‌های اصلی و نسبت میرایی سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک برای هر مود، به ترتیب از روابط (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌شوند که در آن‌ها اندیس i شماره هر مود است [۱۴].

$$\omega_i = \sqrt{(\operatorname{Re}(s_i))^2 + (\operatorname{Im}(s_i))^2} \quad (23)$$

$$\gamma_i = -\operatorname{Re}(s_i) / \omega_i \quad (24)$$

از آنجا که ویژگی‌های المان ویسکوالاستیک تحت تاثیر فرکانس تحریک تغییر می‌کند، باید تاثیر وجود بار خارجی در معادلات قسمت قبل نیز بررسی گردد. در این حالت دیگر با مسئله مقدار ویژه روبرو نخواهیم بود و تغییرات اندکی در روابط قسمت قبل با توجه به صفر نبودن مقدار $\bar{\mathbf{p}}(s)$ ایجاد شود. در این حالت روابط (۱۶) و (۱۸) به شکل روابط (۲۵) و (۲۶) درمی‌آیند:

$$\tilde{\mathbf{h}}_1(\bar{\mathbf{q}}, s) = \mathbf{D}(s) \bar{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{p}}(s) = 0 \quad (25)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_2(\bar{\mathbf{q}}, s) = \frac{1}{2} \bar{\mathbf{q}}^T \frac{\partial \mathbf{D}(s)}{\partial s} \bar{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{q}}^T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}(s)}{\partial s} - a = 0 \quad (26)$$

بررسی اثر تحریک بیرونی بر مودشکل‌ها و فرکانس‌های اصلی سازه مطالعاتی این تحقیق، نشان داد که تغییرات محسوس نبوده و قابل صرف نظر کردن هستند.

۲-۲- محاسبه پاسخ سازه کنترل شده تحت شتاب‌نگاشت زلزله

در صورتی که از مدل‌های مشتق کسری میراگر ویسکوالاستیک استفاده گردد، به دلیل تغییر مشخصات میراگر تحت فرکانس‌های مختلف تحریک، امکان تحلیل سازه در حوزه زمان، مانند مسائل متداول وجود ندارد. برای تحلیل دینامیکی سازه‌های تقویت شده با این میراگر روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است [۲، ۱۷، ۲۱، ۲۲]. از روش‌های معمول آنالیز چنین سازه‌ای، تعریف آن در فضای حالت است [۲۳] که در حوزه فرکانس صورت می‌گیرد و در نهایت به تجزیه مودال سازه منتهی می‌شود. لواندوسکی و پاولاک [۲۴]، پس از حل مسئله مقدار ویژه با استفاده از روش تداومی و محاسبه تابع پاسخ فرکانس با توسعه روش ارائه شده در [۲۵] برای مدل‌های مشتق کسری، تغییرشکل‌های سازه را در حوزه فرکانس محاسبه کرده‌اند، سپس با استفاده از تبدیل وارون لاپلاس، تغییرشکل سیستم را در حوزه زمان به دست آوردند. لواندوسکی و پاولاک [۲۴] همچنین برای محاسبه پاسخ سیستم تحت اثر تحریک زلزله، از توسعه روش طیف پاسخ برای سیستم‌هایی با میرایی غیرکلاسیک استفاده کردند. نتایج تحلیل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که این روش دارای دقت مناسبی است. در این پژوهش نیز، از تجزیه مودال سازه با استفاده از مودشکل‌های محاسبه شده و برهم نهی پاسخ سازه‌های یک درجه آزادی استفاده شده است. بدین ترتیب برای لحاظ تغییرات میرایی ایجاد شده به وسیله میراگر ویسکوالاستیک، ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه گسسته یا تبدیل فوریه سریع، بار اعمالی به سازه به حوزه فرکانس منتقل گردید و سپس محاسبات برای هر فرکانس تحریک در هر گام زمانی انجام شد. با توجه به تبدیل شدن شتاب‌نگاشت زلزله به مجموع توابع هارمونیکی با فرکانس‌های مختلف، برای هر فرکانس مشخصات

دینامیکی سازه با توجه به روابط یاد شده در قسمت قبل و مشخصات میراگر با کمک رابطه (۳۵) محاسبه می‌گردد و سپس پاسخ سازه تخمین زده می‌شود. با توجه به فرض رفتار خطی برای سازه در تمام گام‌های زمانی، استفاده از این روش و برهم نهی پاسخ‌ها بدون خطا خواهد بود.

برای لحاظ اثر دما بر ویژگی‌های دینامیکی مواد ویسکو الاستیک از اصل برهم‌نهی زمان-دما استفاده می‌شود [۲۶]. در این روش، تغییرات دما در روند محاسبات به صورت ضریب کاهش برای فرکانس که با استفاده از روابط مربوط به مدل آرنیوس یا مدل ویلیامز-لندل-فری [۲۷] قابل محاسبه است، لحاظ می‌گردد. سپس با استفاده از این ضریب، مدول مختلط میراگر به صورت روابط (۳۱) و (۳۲) در فرکانس کاهش یافته محاسبه می‌شود. در صورتی که رابطه (۵) با استفاده از مدول مختلط نوشته شود، رابطه (۲۷) حاصل می‌شود.

$$u_0 = (K' + iK'')q_0 = K'(1 + i\eta)q_0 \quad (27)$$

در رابطه (۲۷) پارامترهای K' ، K'' و η به ترتیب مدول ذخیره‌سازی، مدول اتلاف و ضریب اتلاف هستند و از روابط (۲۸) تا (۳۰)، با جایگذاری $i^\alpha = \cos(\alpha\pi/2) + i\sin(\alpha\pi/2)$ ، قابل محاسبه اند [۳].

$$K' = k_0 + c_0\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2) \quad (28)$$

$$K'' = c_0\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2) \quad (29)$$

$$\eta = \frac{K''}{K'} \quad (30)$$

برای محاسبه مشخصات دینامیکی میراگر در دماهای مختلف با استفاده از اصل برهم‌نهی زمان-دما می‌توان نوشت:

$$K'(\omega, T) = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} K'(\omega \alpha_T, T_0) \quad (31)$$

$$K''(\omega, T) = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} K''(\omega \alpha_T, T_0) \quad (32)$$

که α_T ضریب کاهش فرکانس است که برای دماهای مختلف از رابطه ویلیامز-لندل-فری مطابق رابطه (۳۳) محاسبه می‌گردد:

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (33)$$

که T_0 دمای معیاری بر حسب کلون است که مشخصات میراگر در آن معلوم است و ρ و ρ_0 به ترتیب چگالی ماده ویسکو الاستیک در دماهای مورد نظر و معیار هستند. مقادیر C_1 و C_2 در رابطه (۳۳) مربوط به مشخصات ماده بوده و از طریق آزمایش تخمین زده می‌شوند [۲۸]. تاثیر دما در روابط مربوط به تحلیل دینامیکی سازه مطابق با روابط (۲۸) تا (۳۲) به صورت رابطه (۳۴) لحاظ می‌گردد:

$$k_T = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} k_0, \quad c_T = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} c_0 \quad (34)$$

همچنین با اعمال تغییرات فرکانس، رابطه ضریب میرایی میراگر به شکل رابطه (۳۵) درمی‌آید:

$$c_d = \bar{\mathbf{q}}_1^T \left[\hat{\mathbf{C}} \alpha_T^\alpha (\omega_j \times \mathbf{i})^{\alpha-1} \right] \bar{\mathbf{q}}_1 \quad (35)$$

که $\hat{\mathbf{C}}$ ، ماتریس $(n \times n)$ مربوط به میرایی میراگر کلون است که مانند ماتریس سختی است اما با استفاده از پارامتر c_0 که در رابطه (۵) به آن اشاره شد، بیان می‌گردد.

۳- مدلسازی و صحت سنجی

در این بخش پس از صحت‌سنجی، مشخصات سازه کنترل شده و شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده بیان شده است. همچنین مقادیر عددی چگونگی لحاظ اثر دما نیز ارائه شده اند.

۳-۱- صحت‌سنجی

صحت‌سنجی روابط ارائه شده، باید در چند مرحله انجام شود. مرحله اول کنترل مشخصات دینامیکی محاسبه شده میراگرهای مشتق کسری با مقادیر دقیق و مرحله دوم کنترل محاسبات پاسخ سازه‌های مجهز به میراگر است. برای کنترل مقادیر مشخصات دینامیکی، از مراجعی که از همین روابط استفاده نموده‌اند، در مرجع [۳] مقادیر انرژی اتلاف شده در سیکل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی کنترل شده که نشان می‌دهد مقادیر خطا کمتر از ۱٪ بوده است. همچنین مقایسه مقادیر فرکانس‌های محاسبه شده برای سازه‌های ۱۰ طبقه در مرجع [۶] با مقادیر دقیق، نشان می‌دهد که مقادیر خطا کمتر از ۰/۱٪ بوده است.

به منظور صحت‌سنجی روابط استفاده شده در محاسبه پاسخ سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک با مدل مشتق کسری کلونین، از مطالعه [۲۴] استفاده شده است. سازه استفاده شده در این مرجع، یک قاب برشی ۵ طبقه است که در آن جرم و سختی طبقات، میرایی سازه و مشخصات میراگر ویسکوالاستیک در روابط (۳۶) تا (۳۹) ارائه شده اند.

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 566 \text{ kg} , m_5 = 584 \text{ kg} \quad (36)$$

$$k_1 = 5095 \frac{\text{kN}}{\text{m}} , k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 2278 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (37)$$

$$C = \beta.M + \kappa.K , \beta=0.0773 , \kappa=0.0000568 \quad (38)$$

$$c_0 = 16 \frac{\text{kN.s}^\alpha}{\text{m}} , k_0 = 800 \frac{\text{kN}}{\text{m}} , \alpha=0.7 \quad (39)$$

در جدول ۱، نتیجه مقایسه جابجایی طبقه پنجم ارائه شده، که نشان‌دهنده دقت قابل قبول روش پیشنهادی در پژوهش حاضر است.

جدول ۱: حداکثر تغییر مکان جانبی طبقه پنجم (cm)

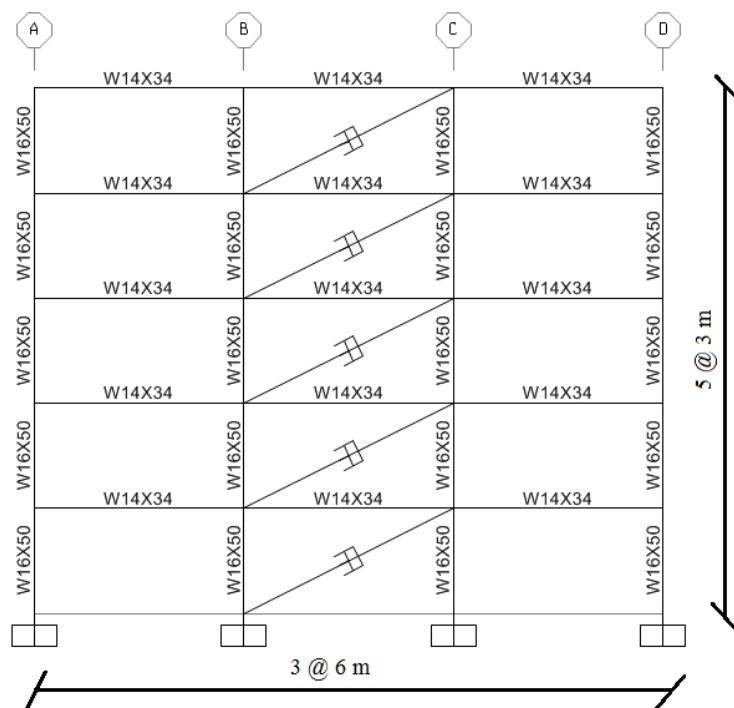
شماره طبقه	اختلاف (%)	مرجع [۲۴]	پژوهش حاضر
۵	۲/۵۵	۲/۲۳۵	۲/۱۷۸

لازم به ذکر است در مطالعه [۲۴] مقادیر پاسخ‌های بدست آمده با مقادیر آزمایشگاهی و یا مطالعات عددی دقیق، مقایسه شده‌اند، که پاسخ‌ها همگرایی مناسبی داشته‌اند و خطاهای محاسبه شده، کمتر از ۵٪ بوده است.

برای صحت سنجی روابط ارائه شده به منظور لحاظ اثر دما در رفتار میراگرهای ویسکوالاستیک، در مطالعه [۲۸]، پاسخ میراگر تحت اثر تحریک سینوسی در دماهای مختلف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده دقت روابط ارائه شده است.

۳-۲- مشخصات سازه کنترل شده

سازه فولادی مورد مطالعه، یک قاب ۵ طبقه سه دهانه واقع در شهر تهران است. ارتفاع هر طبقه ۳ متر و طول هر دهانه ۶ متر در نظر گرفته شده است. همچنین عرض دهانه برابر نیز ۶ متر و کاربری اداری است. مقادیر بار مرده و زنده تیرها به ترتیب برابر با ۲۰ kN/m و ۲۵ kN/m هستند. شکل ۳، قاب مورد بررسی را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: قاب مورد مطالعه

همچنین زمین از نوع C در استاندارد ASCE 7 [۲۹] است. سازه مورد نظر (بدون میراگر) به گونه‌ای است که تیرها و ستون‌ها در مقابل ترکیب بارهای ثقلی و ۷۵ درصد زلزله طرح با دوره بازگشت ۴۷۵ سال مقاوم باشند. شتاب این زلزله برای شهر تهران که جزو مناطق با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد دسته‌بندی می‌شود، برابر با $0.35g$ است. جرم موثر هر طبقه برابر با ۴۵ ton است. همچنین میرایی در هر مود ۵٪ در نظر گرفته شده است و اتصالات از نوع دیافراگم صلب هستند. سختی هر طبقه برابر با 5500 kN/m است. به منظور محاسبه ماتریس میرایی، از رابطه میرایی رایلی استفاده شده است.

برای طراحی اولیه میراگرها، از روش آیین نامه ASCE 7 [۲۹] برای میراگرهای ویسکوز خطی، با اعمال تغییرات اندکی برای مدل کلاسیک کلونین میراگر ویسکوالاستیک، استفاده شده است. به این منظور، سختی حاصل از میراگر به عنوان بخشی از سختی سازه در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از سازه‌ای نسبتاً کوتاه مرتبه در این مطالعه، محدودیت ارتفاع ۳۰ متر برای استفاده از روش آیین نامه ASCE 7 [۲۹] و همچنین احتراز از افزایش زمان تناوب سازه (برای موثرتر بودن اثر میراگر) است. همچنین سازه‌های قدیمی که نیاز به مقاوم‌سازی دارند و رفتار آن‌ها تقریباً خطی است، کوتاه مرتبه هستند. بدین ترتیب با فرض رفتار خطی (قاب با شکلپذیری معمولی) برای سازه مشخصات میراگر طبقات به نحوی بدست آمده است که سازه توان تحمل برش پایه سازه کنترل شده با میراگر را داشته باشد. با فرض توزیع یکنواخت مشخصات میراگر در ارتفاع سازه، مقدار سختی و میرایی میراگرها در هر طبقه به ترتیب برابر با 6000 kN/m و $1800 \text{ kN.s}^\alpha/\text{m}$ بدست آمده است.

۳-۳- تحریک زلزله

شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در پژوهش حاضر از سایت PEER [۳۰] انتخاب شده‌اند. به علت دوبردگی بودن مدل استفاده شده، تنها از مولفه اصلی هر شتاب‌نگاشت استفاده گردیده است. در این مطالعه به منظور انجام تحلیل دینامیکی افزایشی، اطلاعات مربوط به ۱۱ شتاب‌نگاشت استخراج شده که برای خاک نوع C، بزرگی زلزله بین 6 تا 7 و زلزله‌های بدون پالس هستند. مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی [۳۱]

RSN	Earthquake Name	Magnitude	Rjb (km)	Vs30 (m/sec)	PGA (g)	PGV (cm/s)	Horizontal Component	NO.
1021	Northridge	6.69	31.27	600.06	-0.086	6.01	L04000	1
934	Big Bear	6.46	34.43	659.09	-0.07	2.13	SIL090	2
814	Griva Greece	6.1	32.84	551.3	0.111	-11.00	NS	3
87	San Fernando	6.61	30.7	667.13	0.152	4.71	SAD003	4
471	Morgan Hill	6.19	31.88	543.63	-0.081	7.31	SJL270	5
3751	Cape Mendocino	7.01	33.23	459.04	0.196	27.00	SBH270	6
1619	Duzce	7.14	34.3	535.24	0.121	10.30	MDR000	7
358	Coalinga	6.36	30.3	492.43	-0.148	-7.85	SC4000	8
818	Georgia	6.2	31.38	437.42	-0.114	7.37	X	9
357	Coalinga	6.36	32.81	565.08	-0.138	-8.80	SC3000	10
787	Loma Prieta	6.93	30.62	425.3	0.277	3.13	SLC360	11

شتاب‌نگاشت‌ها مطابق با ضوابط آیین نامه ASCE07 [۳۰] در بازه $0.1/T_1$ تا $2T_1$ مقیاس شده اند. در این پژوهش دوره بازگشت زلزله‌هایی با PGA برابر $0.2g$ ، $0.35g$ و $0.52g$ به ترتیب برابر با 0.2 (۵۰٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال)، 0.35 (۴۷.۵٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال) و 0.52 (۲۵٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال) سال در نظر گرفته شده است، که به ترتیب معادل زلزله سطح بهره‌برداری، طراحی و حداکثر فرض شده‌اند.

۳-۴- اثر دما

برای محاسبه ضریب کاهش فرکانس، پارامترهای T_0 ، C_1 و C_2 در رابطه ویلیامز-لندل-فری به ترتیب برابر با 2.27 ، $0.152/9$ و $13/0.71$ انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب ضرایب α_T برای دماهای صفر تا ۴۰ درجه سانتیگراد محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. به علت تاثیر کم دما بر تغییرات چگالی مواد جامد، از ضریب $\frac{\rho_0 T_0}{\rho T}$ صرف نظر شده است [۲۷-۲۹].

جدول ۳: محاسبه ضرایب کاهش فرکانس در دماهای مختلف

دما (سانتیگراد)	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
α_T	۰/۵۸۲۰	۰/۲۳۲۰	۰/۰۹۷۸	۰/۰۴۳۴	۰/۰۲۰۱	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۴

۴- نتایج تحلیل‌ها

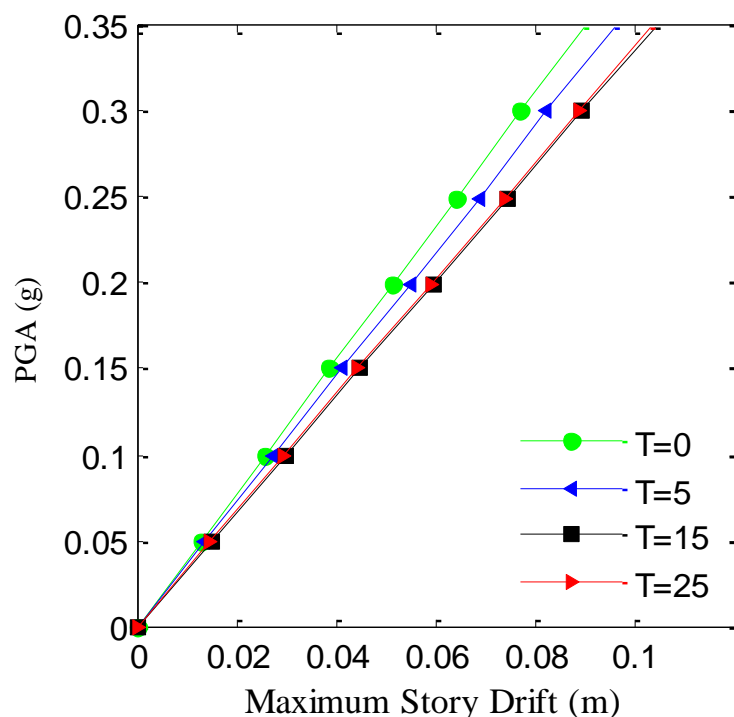
مقادیر میانگین حداکثر جابجایی‌های محاسبه شده برای سطوح مختلف خطر، با فرض دمای میراگر برابر با صفر درجه مطابق با جدول ۴ است:

جدول ۴: مقایسه مقادیر درصد میانگین حداکثر جابجایی نسبی طبقه‌ای در سطوح مختلف خطر

سطح خطر	سطح خطر طراحی PGA=0.35g	سطح خطر بهره‌برداری PGA=0.2g	مقایسه
سطح خطر حداکثر PGA=0.52g			
سازه کنترل نشده	۲/۲۲	۱/۲۴	۴/۱
سازه کنترل شده	۱/۴۹	۰/۸	۲/۲۵
درصد کاهش پاسخ	۳۳	۳۵	۴۵

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، جابجایی‌ها در تمامی سطوح خطر کاسته شده است. مقدار میانگین حداکثر جابجایی نسبی طبقه‌ای برای سطح خطر طراحی به مقدار ۱/۴۹٪ رسیده است، که این مقدار از حد مجاز سازه‌های فولادی در آیین‌نامه طراحی ASCE07 [۳۰] که برابر با ۱/۵٪ است، کمتر است. اگر مقادیر جابجایی نسبی طبقه‌ای متناظر با سطوح IO^۱، LS^۲ و CP^۳ مطابق FEMA356 [۳۲] به ترتیب برابر با ۰.۷٪، ۲.۵٪ و ۵٪ فرض گردد، حد عملکرد سازه کنترل نشده در سطوح خطر بهره‌برداری، طراحی و حداکثر به ترتیب از حدود عملکردی CP، LS و FAIL، برای سازه کنترل شده به صورت حدود تقریبی عملکردی IO، LS و CP بهبود یافته‌اند.

نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی سازه غیرشکل‌پذیر در چهار دما در شکل ۴ نشان می‌دهد که عملکرد سازه در دماهای پایین‌تر، بهتر است.



شکل ۴: تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبی و شتاب طبقه در اثر تغییرات دما

منحنی‌های شکنندگی سازه با استفاده از رابطه (۴۰) بدست آمده‌اند.

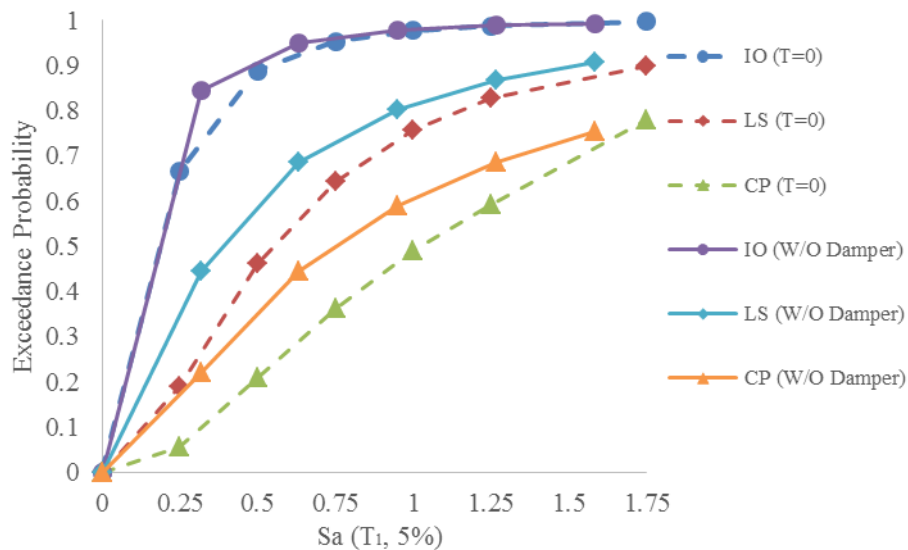
$$PF_{ij} = 1 - \Phi \left(\frac{\text{Ln}(DI_i) - \overline{\text{Ln}(DI)}}{\sigma_{\text{Ln}(DI)}} \right) \quad (40)$$

در شکل ۵، منحنی شکنندگی سازه کنترل نشده با سازه کنترل شده مقایسه شده است. همچنین در شکل ۶ منحنی‌های شکنندگی سازه کنترل شده در دو دمای صفر و ۳۰ درجه سانتیگراد مقایسه شده‌اند. با توجه به تغییر سختی سازه به علت اضافه شدن سختی میراگر به آن، به منظور مقایسه بهتر، نمودار شکنندگی بر حسب Sa (شتاب طیفی) ترسیم شده است.

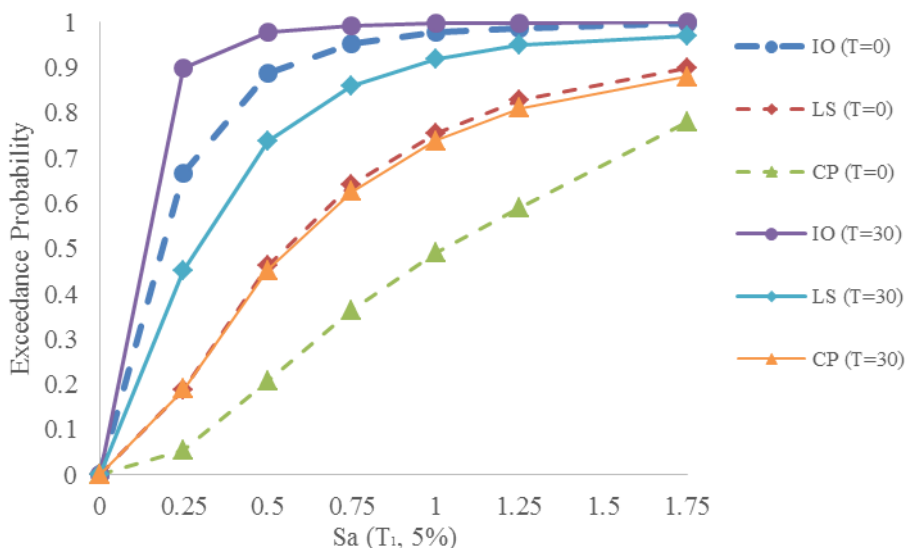
² Immediate Occupancy

³ Life Safety

⁴ Collapse Prevention



شکل ۷: مقایسه منحنی‌های شکنندگی در سازه بدون میراگر و سازه با میراگر در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد



شکل ۸: بررسی تاثیر دما در منحنی شکنندگی برای دو دمای صفر و ۳۰ درجه سانتیگراد

بدین ترتیب نشان داده شد که میراگرهای ویسکوالاستیک نقش موثری در کاهش احتمال آسیب سازه در اثر رخداد زلزله با شدت‌های مختلف داشته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش دمای محیط، احتمال رخداد خرابی‌ها کاهش بیشتری داشته‌است.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه مقاوم‌سازی شده با میراگرهای ویسکوالاستیک مشتق کسری جامد انجام قرار گرفته‌است. همچنین تاثیر متغیرهای تصادفی از جمله دمای محیط و تحریک‌های احتمالی زلزله از لحاظ شدت و محتوای فرکانسی، بر عملکرد سازه بررسی شده‌است. بدین منظور مودشکل‌ها و فرکانس‌های اصلی سازه با استفاده از روش تداومی محاسبه شده‌اند. تحلیل‌ها از نوع تاریخچه زمانی دینامیکی بوده و مطالعات بر روی یک نمونه سازه فولادی ۵ طبقه مقاوم‌سازی شده انجام شده‌است. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- روش تداومی مورد استفاده برای محاسبه مشخصات دینامیکی سازه، مطابق با صحت سنجی انجام شده توسط مطالعات [۶ و ۳] منتج به نتایج قابل قبولی شده است. بدین ترتیب با مشخصات مکانیکی محاسبه شده، با توجه به روابط ارائه شده در بخش ۲-۲، تحلیل دینامیکی به روش تاریخچه زمانی امکان پذیر شده است. صحت سنجی پاسخ های دینامیکی با استفاده از مطالعه [۲۴] انجام شده است.
 - میراگرهای ویسکوالاستیک مشتق کسری، مطابق با جدول ۴، تاثیر قابل توجهی در کاهش جابجایی سازه (۳۳ تا ۴۵ درصد) و حصول عملکرد بهتر داشته اند.
 - احتمال رخداد خرابی ها در سازه و فراگذشت از حدود عملکردی، در صورت رخداد زلزله، با کمک منحنی های شکنندگی ارزیابی شده است. نتایج مطابق با شکل ۷، نشان دهنده کاهش این مقادیر احتمالی در صورت استفاده از میراگر ویسکوالاستیک مشتق کسری بوده است. این کاهش ها در حد عملکرد IO کم بوده، اما در حدود عملکرد LS و CP به ترتیب در حدود ۱۵ و ۲۰ درصد بوده است.
 - با توجه به اشکال ۴ و ۸، به طور کلی عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک در دمای پایین تر بهتر است. خصوصاً مطابق با شکل ۸، نرخ کاهش احتمال رخداد خرابی ها در دمای پایین بسیار بیشتر شده است، به صورتیکه در حد عملکرد CP در حدود ۳۵ درصد بوده است.
- از این نتایج می توان برای طراحی بهینه این نوع میراگرها برای کنترل رفتار سازه ها استفاده نمود. از تئوری های ارائه شده برای تحلیل ها متوالی سازه کنترل شده استفاده می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که برای اینکه طراحی بهینه باشد، لازم است متغیرهایی عدم قطعی مانند تغییرات درجه حرارت و شدت و نوع تحریک زلزله نیز لحاظ گردد.

مراجع

- [1] Chopra A.K., (2007). Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. 4th edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [2] Chang T., Singh M.P., (2002). Seismic analysis of structures with a fractional derivative model of viscoelastic dampers. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1(2), 251-260.
- [3] Lewandowski R., Chorążyczewski B., (2010). Identification of the parameters of the Kelvin-Voigt and the Maxwell fractional models, used to modeling of viscoelastic dampers. Computers & Structures, 88, (1-2), 1-17.
- [4] Singh M.P., Chang T.S., Nandan H., (2011). Algorithms for seismic analysis of MDOF systems with fractional derivatives. Engineering Structures, 33, 2371-2381.
- [5] Xu Z. D., Xu C., Hu J., (2015). Equivalent fractional Kelvin model and experimental study on viscoelastic damper, Journal of Vibration and Control, 21(13), 2536-2552.
- [6] Lewandowski R., Plura, L.M. (2016). Design sensitivity analysis of structures with viscoelastic dampers. Computers & Structures, 164, 95-107.
- [7] Akbari R., Aboutalebi M.H., Maheri M.R., (2015). Seismic Fragility Assessment of Steel X-Braced and Chevron-Braced RC Frames. Asian Journal of Civil Engineering, 16 (1), 13-27.
- [8] Mirzaeefard H., Mirtaheri M., (2016), Evaluation of Seismic Behaviour and Select Optimal Situation of Cylindrical Frictional Dampers in Steel Structures. Journal of Structural and Construction Engineering, 4 (5), 18-30 (In Persian).
- [9] Gerami M., Ghaffari S., Tafreshi A.M.H., (2017), An investigation on vulnerability assessment of steel structures with thin steel shear wall through development of fragility curves. Journal of Structural and Construction Engineering, 4 (5), 5-20 (In Persian).
- [10] Morelli F., Piscini A., Salvatore W., (2017). Seismic behavior of an industrial steel structure retrofitted with self-centering hysteretic dampers. Journal of Constructional Steel Research, 139, 157-175.
- [11] Zhang L., Marzano G., Sasaki Y., Kurata M., Skalomeno K., (2018). Force redistribution of steel moment-resisting frame retrofitted with a minimal disturbance arm damper. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 114, 159-173.
- [12] Tafsirojjaman T., Fawzia S., Thambiratnam D., Zhao X.L., (2018). Seismic strengthening of rigid steel frame with CFRP. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 19, 334-347.
- [13] Muresan C.I., Dulf E.H., Prodan O., (2016). A fractional order controller for seismic mitigation of structures equipped with viscoelastic mass dampers. Journal of Vibration and Control, 22(8) 1980-1992.

- [14] Pawlak, Z., Lewandowski, R., (2013). The continuation method for the eigenvalue problem of structures with viscoelastic dampers. *Computers & Structures*, 125, 53-61.
- [15] Cheng F.Y., Jiang H., Lou K., (2008). *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC Press.
- [16] Lewandowski R., Bartkowiak A., Maciejewski H. (2012). Dynamic analysis of frames with viscoelastic dampers: a comparison of damper models. *Structural Engineering and Mechanics*, 41(1), 113-137.
- [17] Singh M., Chang T.-S., (2009). Seismic analysis of structures with viscoelastic dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 135 (6), 571-580.
- [18] Podlubny I., (1998). *Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*, Elsevier.
- [19] Yang Y.-B., Shieh M.-S., (1990). Solution method for nonlinear problems with multiple critical points, *AIAA journal*, 28 (12), 2110-2116.
- [20] Lewandowski R., (1997). Computational formulation for periodic vibration of geometrically nonlinear structures. *Int J Solids Structure*. 34, 1925-64.
- [21] Hu S., Chen W., Gou X., (2011). Modal Analysis of Fractional Derivative Damping Model of Frequency-Dependent Viscoelastic Soft Matter. *Advances in Vibration Engineering* 10(3), 187-196.
- [22] Singh, M.P., and Moreschi, L.M., (2002). Optimal placement of dampers for passive response control, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(4), 955-976.
- [23] Constantinou M.C., Soong, T.T., Dargus G.F., (1998). *Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit*. Multidiscipl. Center Earthquake Eng. Res., USA, Tech. Rep. 1.
- [24] Lewandowski R., Pawlak, Z., (2018). Response spectrum method for building structures with viscoelastic dampers described by fractional derivatives. *Engineering Structures*, 171, 1017-1026.
- [25] Adhikari, S., (2002). Dynamics of nonviscously damped linear systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 128, (3), 328-339.
- [26] De Lima, A., Rade, D., Neto, F.L., (2009). An efficient modelling methodology of structural systems containing viscoelastic dampers based on frequency response function substructuring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (4), 1272-1281.
- [27] Moreira R., Corte-Real J., Rodrigues J.D., (2010). A Generalized Frequency-Temperature Viscoelastic Model. *Shock and Vibration*, 17 (4-5), 407-418.
- [28] Ghaemmaghami A.R. Kwon O.S., (2018). Nonlinear modeling of MDOF structures equipped with viscoelastic dampers with strain, temperature and frequency-dependent properties. *Engineering Structures*, 168, 903-914.
- [29] Wei K., Yang Q., Dou Y., Wang F., Wang P., (2017). Experimental investigation into temperature-and frequency-dependent dynamic properties of high-speed rail pads. *Construction and Building Materials*, 151, 848-858.
- [30] ASCE/SEI 7-16, (2016), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- [31] www.ngawest2.berkeley.edu
- [32] FEMA-356, (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.