



کنترل ارتعاشات افقی و قائم کابل دکل‌های انتقال قدرت با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده بهینه

اکبر بطهای^۱، میثم رضائی^۲، سید مهدی زهرائی^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۲ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۲۹

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۹-۱۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸

کلمات کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم‌شونده

بهینه‌یابی

ارتعاش کابل

دکل انتقال قدرت

نیروی زلزله

خلاصه: یکی از شیوه‌های معمول کنترل غیرفعال سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه بهره‌گیری از سیستم میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده است. میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده غالباً با اثرگذاری روی یک مود، که معمولاً مود اول سازه است، سبب کاهش دامنه پاسخ‌ها می‌گردند. ساختار این میراگرها متشکل از سه پارامتر اصلی یعنی جرم، میرایی و سختی می‌باشند. از آنجا که پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در زمان ارتعاش ثابت می‌باشند، تنظیم صحیح و بهینه آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. یافتن مقادیر بهینه پارامترهای میراگر جرمی برای سازه‌های غیرخطی با استفاده از روش‌های عددی مستلزم انجام آنالیزهای دینامیکی غیرخطی متعددی می‌باشد؛ در نتیجه حجم محاسبات لازم بسیار زیاد می‌باشد. مطالعات اخیر انجام گرفته با تمرکز بر روی کاربرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده برای سازه‌های ساختمانی می‌باشد که به طور عمده به تغییر مکان‌های جانبی در سازه‌ها توجه شده است؛ در این تحقیق کاربرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده و اثربخشی آن‌ها بر روی کابل‌های انتقال قدرت در هر دو جهت عرضی و قائم به طور همزمان مورد نظر بوده که به منظور بررسی رفتار دکل به روش عددی و تحلیلی، سازه دکل تلسکوپی فلزی در نرم‌افزار اجزاء محدود OpenSees مدل‌سازی شده است و برای کاهش حجم محاسبات به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده، از روش جستجوی عددی با هدف کمینه کردن تغییر مکان افقی وسط دهانه کابل استفاده شده است. نسبت جرمی بهینه میراگرهای تنظیم‌شونده به منظور کنترل ارتعاشات دکل به همراه کابل‌های انتقال قدرت برابر ۰/۵ درصد جرم سازه دکل انتخاب شده است. بر اساس تحلیل‌های عددی انجام گرفته برای این نسبت جرمی، میزان کاهش بیشینه تغییر مکان افقی وسط دهانه کابل بین دکل‌ها توسط میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده برای زلزله‌های اعمال شده در بیشینه شتاب‌های کمتر از ۰/۵ g تا حد ۵۰ درصد کاهش یافته است.

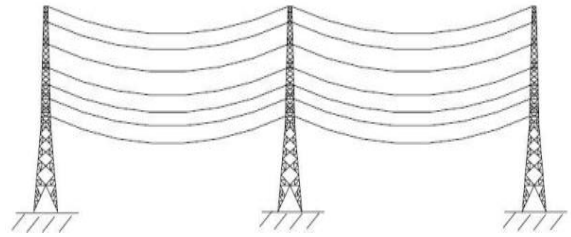
۱- مقدمه

تبادل اصلی و اساسی انرژی در شبکه‌های سراسری توسط خطوط انتقال انرژی با ظرفیت بالا صورت می‌گیرد. بدون تردید هادی‌ها مهمترین اجزای هر شبکه انتقال انرژی محسوب شده و مسیر جریان از طریق آن‌ها برقرار می‌گردد. در سال‌های اولیه، هادی‌های خط انتقال فشار قوی از جنس مس انتخاب می‌شد و بعدها آلومینیوم نیز برای این کار مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل وزن سبک، قیمت کمتر و رسانایی خوب امروزه هادی‌های آلومینیومی کاملاً جایگزین هادی‌های مسی شده‌اند.

کنترل ارتعاشات سازه امروزه به یک زمینه چالش‌برانگیز در بین محققین و مهندسين تبدیل گشته است. خسارات وارده به سازه‌ها در برابر زلزله‌های اخیر که باعث تلفات جانی و مالی در کشورهای مختلف گشته است، اهمیت کنترل ارتعاشات سازه در برابر زلزله را بیش از پیش آشکار می‌سازد. به دلیل افزایش روز افزون مصرف انرژی الکتریکی، خطوط انتقال نیروی دائمی در حال گسترش هستند زیرا

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir





شکل ۱. سیستم دو دهانه انتقال برق فشار قوی [۲]
Fig. 1. Two-span high voltage transmission line [2]

از دیگر تحقیقات انجام شده در زمینه دینامیک کابل‌ها می‌توان به مطالعه پارامتری ارتعاش آزاد کابل‌های آویزان^۴ توسط گمبیر^۵ در سال ۱۹۷۸ اشاره کرد [۶]. از نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به استفاده از المان‌های منحنی و در نظر گرفتن مشخصات انبساطی کابل‌ها اشاره کرد. المان‌های منحنی مورد استفاده برای تحلیل کابل‌های زنجیری در تحقیق جایارامان^۶ و ناسون^۷ در سال ۱۹۸۱ ارتقا پیدا کرده و دقت و کارایی بهتری نسبت به المان‌های قبلی برای مدل‌سازی وزن کابل، پیش‌تنیدگی و استفاده در تحلیل‌های غیرخطی دارد [۷].

اما باید به این نکته اشاره کرد که بیشترین دهانه استفاده شده بین دو دکل که در نظر گرفته شده است، ۳۰۰ متر بوده که در عمل دهانه‌های تا ۱۰۰۰ متر و حتی بیشتر هم استفاده می‌شود. پاسخ لرزه‌ای یک کابل با دهانه بزرگ به زلزله در حال حرکت در سال ۱۹۹۱ توسط رائو^۸ و اینگار^۹ مورد بررسی قرار گرفته و زمان طی مسافت بین دو تکیه‌گاه توسط حرکت زلزله و تأخیر پیش آمده بین دو تکیه‌گاه و اثر آن روی کشش دینامیکی به وجود آمده در کابل مطالعه گردیده و برای به دست آوردن حداکثر پاسخ کابل، از روشی برای ترکیب مدها بر اساس طیف پاسخ استفاده شده است [۸].

سوزوکی^{۱۰} و همکارانش در سال ۱۹۹۲ اثرات هادی‌ها و دکل‌ها در همسایگی یک دکل کشش مورد مطالعه را، با استفاده از روش پاسخ فرکانسی به عنوان تحلیل پاسخ لرزه‌ای وارد بررسی لرزه‌ای خود کردند [۹].

خطوط انتقال نیرو و سازه‌هایی از قبیل خطوط لوله، پل‌های بزرگ و سدها در معرض تغییر حرکت زمین در زلزله با تغییر فاصله^{۱۱} (SVEGM) هستند. طبق مشاهداتی که از بررسی شبکه شتاب‌نگارهای نزدیک به اواخر دهه ۱۹۷۰ صورت گرفته است شتاب‌نگاشت‌هایی که در ایستگاه‌های دور از هم در محل ساخت سازه‌های مذکور اندازه‌گیری شده‌اند، به طور قابل توجهی با هم متفاوتند [۱۰].

در خطوط انتقال نیرو، فاصله دکل‌ها (داخل خط انتقال) به طور معمول می‌تواند مقادیری بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر داشته باشد، البته

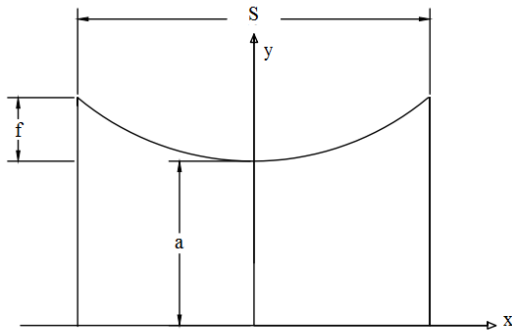
یک سیستم خط انتقال نیرو شامل خط انتقال برق، سیم‌های صاعقه‌گیر (در بالاترین قسمت دکل‌ها) و دکل‌های نگه‌دارنده آن‌ها است. خطوط انتقال نیرو معمولاً منتقل‌کننده برق سه فاز هستند که حداقل توسط سه هادی و معمولاً با شش هادی انتقال می‌یابند. از آنجایی که کابل‌های هادی سیستم‌های انتقال برق ولتاژ بالا سنگین‌تر از کابل‌های توزیع برق عادی هستند، انتظار می‌رود که کابل‌های هادی، روی رفتار دینامیکی دکل‌ها اثر بگذارند. در واقع، اندازه‌گیری‌های انجام شده روی مشخصه‌های پاسخ فرکانسی دکل‌های واقعی فشارقوی، نشان داده‌اند که پاسخ دکل‌هایی که به وسیله هادی‌ها به هم متصل هستند، تفاوت زیادی با دکل‌های تنها دارد؛ بنابراین سیستم خط انتقال برق فشار قوی باید به عنوان یک سیستم مرکب از دکل‌ها و هادی‌ها در نظر گرفته شود [۱]. تصویر ساده‌شده از نمای یک خط انتقال فشار قوی در شکل ۱ قابل مشاهده است.

در سال ۱۹۶۶، رفتار دینامیکی کابل برق زنجیری^۱ الاستیک توسط سیمپسون^۲ مورد بررسی قرار گرفت. هدف سیمپسون تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش داخل صفحه خطوط انتقال نیروی چند دهانه بود [۳].

ارتعاش آزاد سه بعدی کابل، توسط هنگهولد^۳ و همکارانش در سال ۱۹۷۷ به انجام رسید. همچنین آن‌ها فرمولی تجربی نیز برای محاسبه کمترین فرکانس طبیعی ارائه دادند [۴]. در سال ۱۹۹۹ تحلیل استاتیکی غیرخطی سه بعدی کابل‌ها با استفاده از حداقل‌سازی انرژی پتانسیل کل با در نظر گرفتن اثرات ناپایداری توسط دانشجو مورد بررسی قرار گرفت [۵].

4 Sagged Cables
5 Gambhir
6 Jayaraman
7 Knudson
8 Rao
9 Iyengar
10 Suzuki
11 Spatially Variation of Earthquake Ground Motion(SVEGM)

1 Catenary
2 Simpson
3 Henghold



شکل ۲. مشخصات کابل بین دو دکل
Fig. 2. Cable specifications between two towers

تغییرات اثر لرزه بر فواصل مختلف در تحلیل خطوط انتقال نیرو و راهکارهایی برای کاهش و مقابله با خرابی های ناشی از زلزله در خطوط انتقال نیرو در سال ۲۰۱۷ در تحقیقی توسط لیو و تنگ^۸ مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۷].

تحقیقی در مورد تحلیل خرابی پیش‌رونده دکل مشبک انتقال نیرو تحت زمین لرزه در سال ۲۰۱۳ توسط تیان و همکاران^۹ صورت گرفت [۱۸]. در زمینه مستهلک نمودن انرژی محققینی همچون زهرائی و امیرزاده [۱۹]، محبی و شعبانی [۲۰] و کردی و علامتیان [۲۱] مطالعات ارزنده‌ای ارائه نمودند.

استفاده از میراگرها به ندرت در خطوط انتقال نیرو مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از این معدود تحقیقات انجام شده توسط تیان و همکارانش در سال ۲۰۱۳ می‌باشد که میراگر جرمی در تاج دکل نصب شده بود و رفتار دکل مورد بررسی لرزه‌ای قرار گرفته بود. در این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌های جست‌وجوی عددی مقادیر فرکانس و میرایی میراگر جرمی متصل شده به کابل انتقال قدرت در سه جهت ارتعاشی تعیین می‌گردد و سپس کنترل ارتعاشات کابل‌های انتقال قدرت بررسی شده و تأثیر میراگرهای نصب شده در نقاط مختلف کابل از جمله وسط دهانه و وسط دهانه به همراه یک سوم دهانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روابط مربوط به منحنی کابل انتقال قدرت

منحنی کابل انتقال قدرت یک منحنی ریسمانی است که کاملاً

دهانه خطوط انتقال نیرو در مواقع خاص مانند عبور از رودخانه عریض یا مناطق کوهستانی می‌تواند بزرگتر باشد که بزرگترین دهانه بین دو دکل خط انتقال در جهان به ۵۳۷۶ متر می‌رسد. تغییر حرکت زمین در زلزله با تغییر فاصله در این سازه‌ها اهمیت داشته و به تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته می‌توان به تحقیق زروا^۱ در سال ۱۹۹۴ اشاره کرد [۱۱]. تحقیق مهم دیگر درباره SVEGM توسط هریچندران^۲ در سال ۱۹۹۹ انجام گرفته و به کلیات SVEGM، علل آن، اندازه‌گیری و تحلیل رکوردهای ضبط شده، مدل‌سازی SVEGM و استفاده از آن برای تحلیل سازه‌هایی از قبیل پل‌های با دهانه بزرگ، سدهای خاکی و سازه‌های احداث‌شده روی پی‌های گسترده پرداخته است [۱۰].

اما تحقیقی که اثرات SVEGM را در پاسخ لرزه‌ای سیستم دکل-خط انتقال نیرو مورد بررسی قرار داده است، توسط تیان و همکارانش^۳ در سال ۲۰۱۰ انجام گرفته است [۱۲]. تحقیقی از عزیز و همکاران^۴ در سال ۱۹۹۶ نشان می‌دهد که تغییر مکان کابل وقتی در اثر زلزله‌ای با مؤلفه‌های افقی و قائم قرار می‌گیرد می‌تواند قابل توجه باشد، مخصوصاً برای زلزله‌هایی که نسبت شتاب به سرعت کمتری دارند [۱۳].

دینامیک غیرخطی و پاسخ لرزه‌ای خطوط انتقال نیرو، توسط العطار^۵ در سال ۱۹۹۷ بررسی شده است [۱۴]. یکی از مهم‌ترین تحقیقاتی که در زمینه تحلیل لرزه‌ای خطوط انتقال نیرو و در نظر گرفتن ارتعاش هادی‌ها و ساده‌سازی آن‌ها انجام گرفته و از نتایج آن برای مدل‌سازی اثرات کابل روی سیستم در مقاله لی^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ است [۱۵].

بر اهمیت و لزوم در نظر گرفتن اثرات زلزله در بسیاری از تحقیقات اخیر تأکید شده است در تحقیق آدالا و همکاران^۷ که در سال ۲۰۱۰ منتشر شد، بر لزوم طراحی خطوط انتقال نیرو در برابر زلزله تأکید شده است [۱۶].

اهمیت اثر زلزله روی خط انتقال نیرو، اهمیت لحاظ کردن وارد شدن زلزله به چندین دکل در خط انتقال، اهمیت لحاظ کردن

- 1 Zerva
- 2 Harichandran
- 3 Tian, et. al.
- 4 Aziz, et. al.
- 5 El-Attar
- 6 Li et al.
- 7 Addala, et. al.

8 Liu and Tang

9 Tian, et. al.

معرفی شده در رابطه (۱) را مشاهده نمود.

که در این مطالعه از رابطه (۱) به عنوان منحنی کابل انتقال قدرت استفاده شده است.

۳- مدل سازی عددی دکل انتقال قدرت، کابل و میراگر جرمی متصل شده

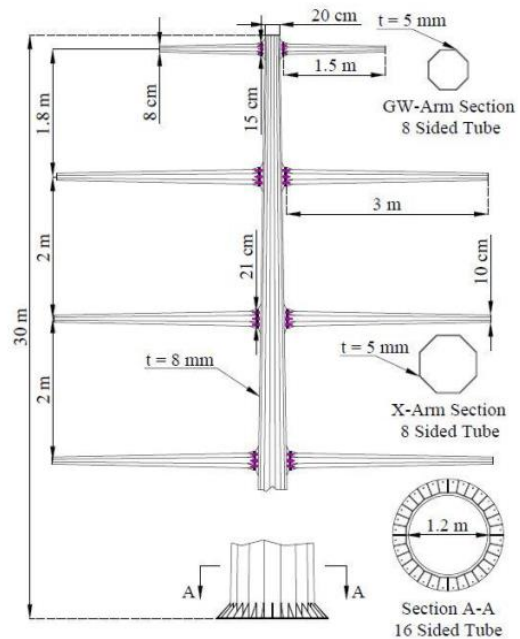
در این تحقیق، به منظور بررسی رفتار دکل، از مدل دکل مدل سازی شده در نرم افزار PLS-POLE استفاده شده است که برای طراحی آن از ضوابط آیین نامه ASCE 48-05 بهره گرفته شده است. مشخصات هندسی دکل طراحی شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.

ضوابط طراحی در آیین نامه ASCE 48-05 مشابه روش تنش مجاز طراحی سازه های فولادی ساختمانی می باشد. با این تفاوت که به علت الزام تست یک نمونه از دکل های ساخته شده برای خط انتقال برای بارهای طراحی، تنش مجاز برابر تنش تسلیم فولاد در نظر گرفته می شود. مقاطع مورد استفاده برای ساخت دکل های تک پایه از ورق و به صورت سرد نورد شده می شود و اثر کمانش موضعی در برابر اضلاع این مقاطع با محدود کردن تنش مجاز وارد محاسبات طراحی می شود. روابط (۱) و (۲) مقدار تنش مجاز فشاری طراحی را که توسط لاغری اضلاع مقاطع به دست می دهد، برای اتصال دکل های تک پایه به فونداسیون از پیچ های مهاری استفاده می شود. اجزای این اتصال شامل پیچ ها، صفحه اتصال و سخت کننده ها هستند.

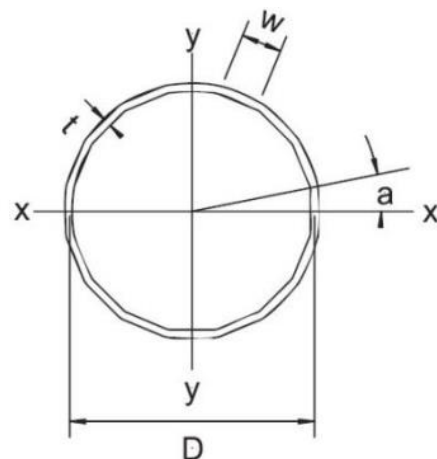
$$F_a = F_y \quad , \quad \text{when} \quad \frac{w}{t} \leq \frac{215\Omega}{\sqrt{F_y}} \quad (2)$$

$$F_a = 1.42F_y \left(1 - 0.00137 \frac{1}{\Omega} \sqrt{F_y} \frac{w}{t}\right) \quad , \quad \text{when} \quad \frac{215\Omega}{\sqrt{F_y}} < \frac{w}{t} < \frac{412\Omega}{\sqrt{F_y}} \quad (3)$$

شکل ۴ نشان دهنده مقطع ۱۶ ضلعی پایه دکل می باشد. همچنین در شکل ۵ نحوه اتصال دکل به پی نشان داده شده است. مدل دکل به همراه کابل های انتقال قدرت و میراگر جرمی تنظیم شونده در نرم افزار OpenSees مدل سازی شده است. که فاصله پایه های دکل از یکدیگر ۹۰ متر بوده و طول کابل بین آنها ۱۰۰ متر می باشد. که برای دو دهانه که شامل سه دکل تلسکوپی و



شکل ۳. نمای مدل دکل مورد بررسی [۲۲]
Fig. 3. View of the case study power tower [22]



شکل ۴. مقطع ۱۶ ضلعی دکل مورد بررسی [۲۲]
Fig. 4. 16-sided cross section of the studied tower [22]

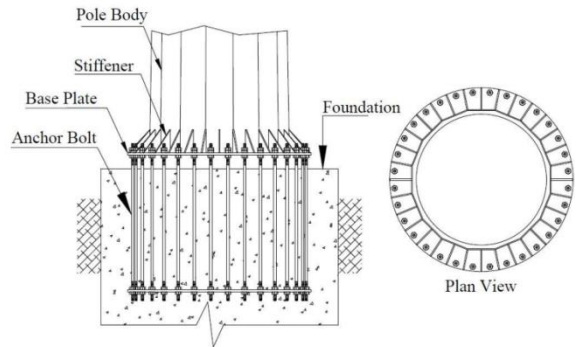
انعطاف پذیر بوده و از دو نقطه نگهدارنده آویزان شده و تحت بار گسترده و یکنواختی نظیر وزنش قرار گرفته است. می توان نشان داد منحنی سیم (کابل) از رابطه (۱) به دست می آید.

$$y = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (1)$$

که a پارامتر سیم می باشد. در شکل ۲ می توان پارامترهای



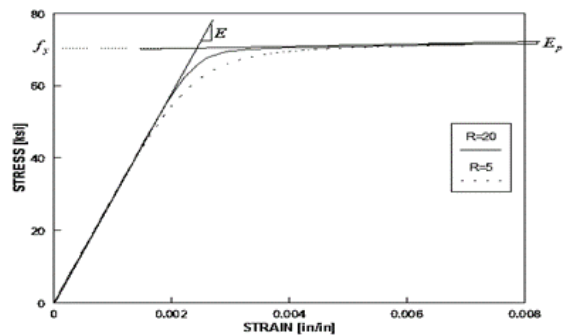
شکل ۸. شمای میراگرهای مورد استفاده در مطالعه حاضر [۲۴]
Fig. 8. Schematic of the dampers used in this study [24]



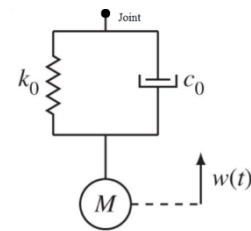
شکل ۵. اتصال پای دکل مورد بررسی به پی [۲۲]
Fig. 5. Base connection of the tower to foundation [22]

می‌رود. منحنی رفتار ماده در شکل ۶ نشان داده شده است. المان‌های پایه و بازو از نوع `element nonlinearBeamColumn` با المان تیر ستون غیرخطی^۱ تعریف شده است. المان تیر ستون غیرخطی توزیع گسترده‌ی پلاستیسیته در طول المان را در نظر می‌گیرد. مقطع پایه دکل با استفاده از دستور `section fiber` ایجاد شده است. این مقطع یک شکل هندسی عمومی دارد؛ که از نواحی با اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایروی و مثلثی تشکیل شده است. نواحی نام برده اصطلاحاً پیچ^۲ نامیده می‌شود. همچنین برای در نظر گرفتن نیروی برشی و لنگر خمشی به صورت ترکیبی از دستور `section Aggregator` استفاده شده است.

یکی از شیوه‌های معمول کنترل غیرفعال سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه بهره‌گیری از سیستم میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده است. ساختار این میراگرها متشکل از سه پارامتر اصلی یعنی جرم، میرایی و سختی می‌باشند. میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده غالباً با اثرگذاری روی یک مود، که معمولاً مود اول سازه است، سبب کاهش دامنه پاسخ‌ها می‌گردند. از آنجا که پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در زمان ارتعاش ثابت می‌باشند، تنظیم صحیح و بهینه آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. به منظور مدل‌سازی میراگر جرمی در کابل‌ها در هر سه جهت ارتعاشی از یک فنر و یک میراگر ویسکوز بهره گرفته شده است؛ که برای بدست آوردن مقادیر بهینه میرایی و فرکانس میراگرها از روش جست و جوی عددی استفاده شده است (شکل ۷). این میراگرها در هر سه جهت ارتعاشی توانایی کاهش ارتعاشات نامطلوب کابل‌ها را دارند؛ به همین دلیل در هر سه جهت مدل‌سازی شده‌اند. مقادیر میرایی و فرکانس این میراگرهای جرمی به ترتیب برابر ۴/۹ درصد و ۰/۰۸ رادیان بر ثانیه می‌باشد. جرم



شکل ۶. منحنی رفتار ماده Steel02 [۲۳]
Fig. 6. Behavior curve for Steel02 [23]



شکل ۷. شمای میراگرهای مدل‌سازی شده در مطالعه حاضر
Fig. 7. View of the dampers modeled in this study

کابل‌های انتقال قدرت بین آن‌ها می‌باشد.

رفتار فولاد در نرم‌افزار با استفاده از `unialMaterial Steel02` تعریف شده است. این دستور برای ساخت ماده فولاد `Giuffre-Menegotto-Pinto` با سخت‌شوندگی کرنش ایزوتروپیک به کار

1 `element nonlinearBeamColumn`
2 Patch

جدول ۱. مشخصات کابل مدل‌سازی شده در خط دکل
Table 1. Specifications of modeled cable in transmission line

	کابل	سیم محافظ
نام	CONDOR	CDG12C
نوع	ACSR	Galvanized steel stranded cable
قطر (mm)	27/8	12/6
مساحت (mm ²)	455/1	96/5
مدول الاستیسیته (GPa)	64/5	178
وزن واحد طول (N/m)	14/93	7/44
جرم واحد طول (kg/m)	1/522	0/758

جدول ۲. فرکانس دکل تلسکوپی تک پایه و خطای مدل‌سازی
Table 2. Frequency of telescopic monopole tower and modeling error

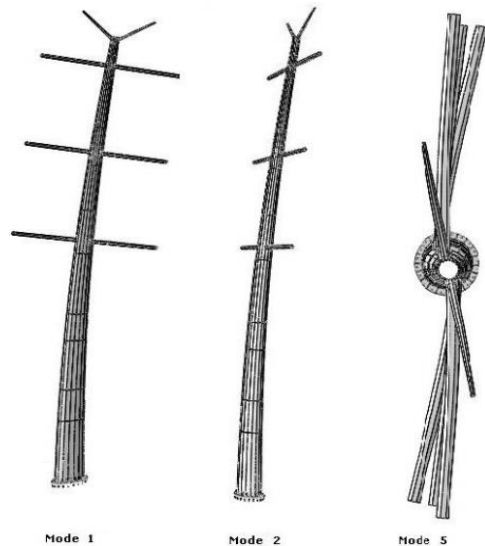
نرم افزار	PLS-POLE	OpenSees	درصد خطای مدل‌سازی
فرکانس مد اول (Hz)	0/98	1/02	4/08
فرکانس مد دوم (Hz)	0/98	1/02	4/08

ارتعاش کابل در هر دو راستای ذکر شده نسبت به راستای طولی کابل بیشتر است. مشخصات کابل مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

فرکانس مدل دکل ساخته شده در نرم‌افزار OpenSees و نرم‌افزار PLS-POLE برای مدهای اول و دوم در جدول ۲ ارائه شده است. میزان خطای مدل‌سازی به کمتر از ۵ درصد رسیده است که از نظر مهندسی خطای قابل قبولی می‌باشد. خطای ایجاد شده به علت متمرکز در نظر گرفتن جرم پایه دکل تلسکوپی در ترازهای مختلف ارتفاعی می‌باشد.

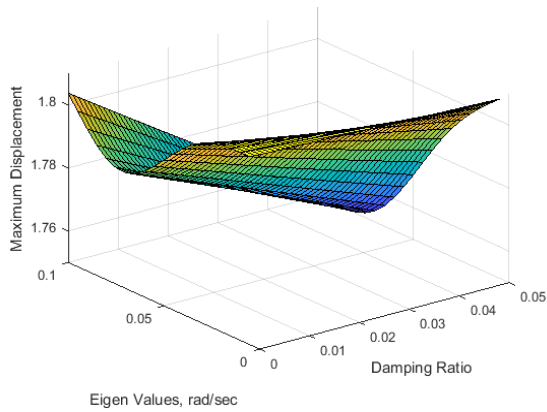
مدل‌سازی میراگرها همچون شکل ۷ در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر دکل‌ها بر روی ارتعاش کابل‌ها از دو دکل به همراه کابل‌های بین آن‌ها استفاده شده است. دوره تناوب سیستم دو دکل به همراه کابل‌های آن برابر ۱/۷۸ ثانیه می‌باشد.

در شکل ۹ مدهای ارتعاشی مختلف و مهم تک دکل نمایش داده شده است.

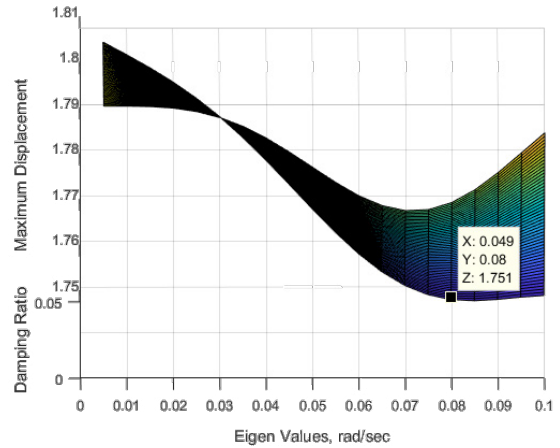


شکل ۹. مدهای ارتعاشی تک دکل مدل‌سازی شده [۲۲]
Fig. 9. Vibration modes of the modeled tower [22]

میراگرهای جرمی نیز ۰/۵ درصد جرم دکل می‌باشد. بیشترین تأثیر این میراگرها در ارتعاش عرضی و قائم کابل‌ها مؤثر می‌باشد؛ چراکه



شکل ۱۱. رویه سه بعدی مقادیر فرکانس و میرایی میراگرها
Fig. 11. Three-dimensional surface of frequency and damping of dampers



شکل ۱۰. رویه دو بعدی مقادیر فرکانس و میرایی میراگرها
Fig. 10. Two-dimensional surface of frequency and damping of dampers

جدول ۳. زلزله‌های اعمال شده به سازه دکل
Table 3. Applied earthquakes to the tower structure

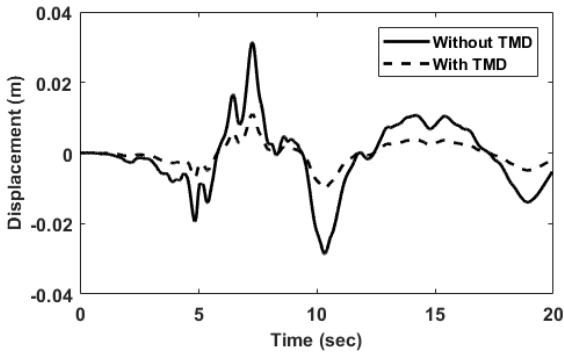
شماره	نام زلزله	نام ایستگاه	PGA(g)
1	Northridge	Beverly Hill	0/52
2	Northridge	Canyon Country-WLC	0/48
3	Duzce, Turkey	Bolu	0/82
4	Hector Mine	Hector	0/34
5	Imperial Valley	Delta	0/35
6	Imperial Valley	El Centro Array #11	0/38
7	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0/51

شکل گرفته از کابل‌ها ایجاد شده و مقادیر فرکانس و میرایی در داخل حلقه‌های برنامه MATLAB تغییر می‌نمایند تا تمامی حالات بررسی شده و در نهایت حالت بهینه تعیین گردد. این تحلیل‌ها برای مدل مورد نظر انجام شده است که نتایج آن در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ و ۱۱ برای مقادیر بهینه میرایی و فرکانس، محور X نمایانگر مقادیر میرایی و محور Y نمایانگر مقادیر فرکانس بهینه میراگرها می‌باشد. با توجه به اینکه ارتعاش کابل با طول ۱۰۰ متر بین دو پایه دکل با دوره تناوب بالا اتفاق می‌افتد مقادیر فرکانس میراگرها

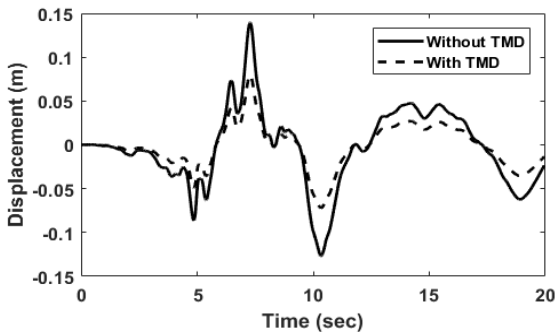
۴- تعیین مقادیر بهینه فرکانس و میرایی میراگرها

میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده غالباً با اثرگذاری روی یک مد، که معمولاً مد اول سازه است، سبب کاهش دامنه پاسخ‌ها می‌گردند. از آنجا که پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده در زمان ارتعاش ثابت می‌باشند، تنظیم صحیح و بهینه آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. برای تعیین مقادیر بهینه فرکانس و میرایی میراگرها از روش جستجوی عددی استفاده شده است که به منظور نیل به این هدف بین دو نرم‌افزار MATLAB و OpenSees ارتباط ایجاد شده است که با فراخوانی OpenSees از طریق نرم‌افزار MATLAB مدل



شکل ۱۴. نمودار پاسخ عرضی وسط دهانه کابل خط انتقال قدرت برای زلزله نرثریج (PGA=0.1g)

Fig. 14. Maximum lateral response at the mid-span of the power line under the Northridge earthquake (PGA=0.1g)



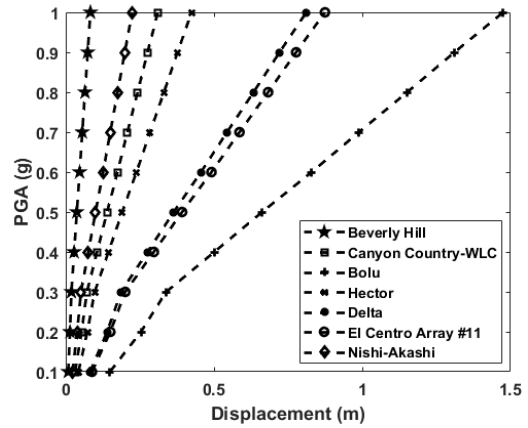
شکل ۱۵. نمودار پاسخ عرضی وسط دهانه کابل خط انتقال قدرت برای زلزله نرثریج (PGA=0.5g)

Fig. 15. Maximum lateral response at the mid-span of the power line under the Northridge earthquake (PGA=0.5g)

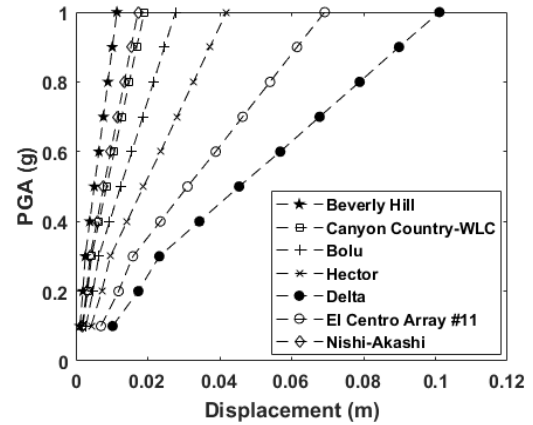
برای انجام تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی آیین‌نامه‌ها لازم می‌دانند که شتاب‌نگاشت‌ها به مقیاس درآیند، در مطالعه حاضر مقیاس‌سازی روی بیشینه شتاب زلزله انجام شده است و تحلیل دینامیکی افزایشی انجام گرفته است. که مقادیر بیشینه شتاب زلزله‌ها از 0.1 g تا 1.0 g انجام گرفته است.

۶- ارائه و تفسیر نتایج

با انتخاب زلزله‌ها و مقیاس نمودن آن‌ها تحلیل سازه‌ها انجام گرفته است؛ که مقادیر حداکثر پاسخ‌های عرضی و قائم خط انتقال قدرت جهت بررسی حداکثر پاسخ سازه‌ها برای زلزله‌های مختلف در



شکل ۱۲. نمودار حداکثر پاسخ عرضی وسط دهانه خط انتقال قدرت Fig. 12. Maximum lateral response at the mid-span of the power line

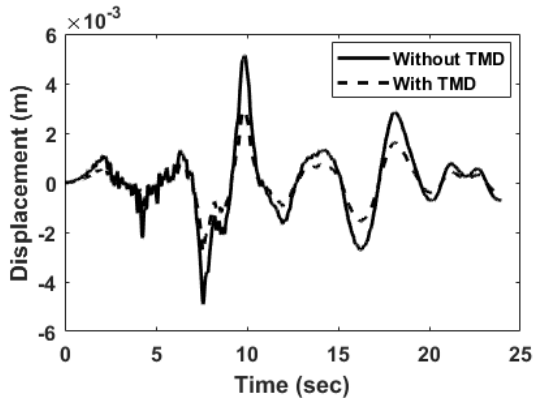


شکل ۱۳. نمودار حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت Fig. 13. Maximum vertical response at the mid-span of the power line

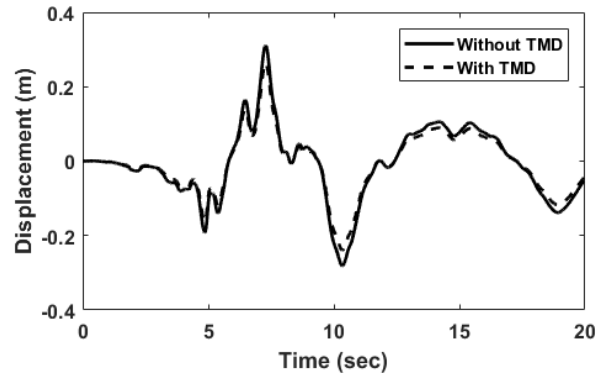
کمتر می‌باشد.

۵- رکوردهای زلزله اعمال شده به سازه

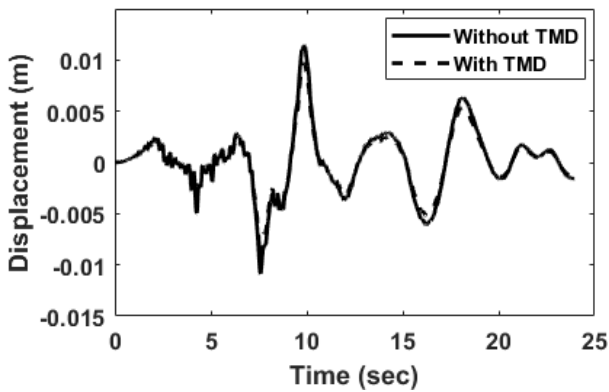
شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر برای تحلیل تاریخیچه زمانی باید تا حد امکان ویژگی‌هایی مشابه با زلزله محتمل در ساختگاه (محل احداث بنا) داشته باشند؛ به این منظور توصیه می‌شود تا ویژگی‌های شتاب‌نگاشت‌های انتخابی مانند بزرگ، فاصله از گسل و چشمه لرزه‌زا تا جای ممکن نظیر محل احداث بنا باشند. در این پژوهش سازه دکل و کابل‌های بین آن‌ها تحت اثر هفت زلزله، قرار گرفته است که مشخصات زلزله‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.



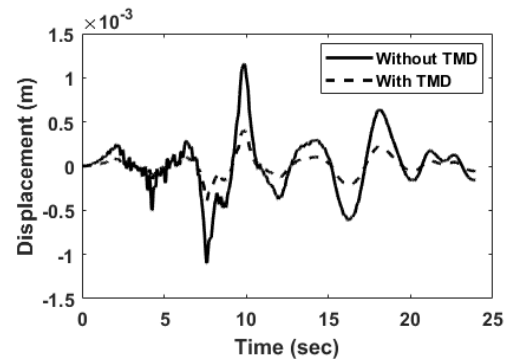
شکل ۱۸. تاریخچه زمانی پاسخ قائم وسط دهانه کابل خط انتقال قدرت برای زلزله نرثریج (PGA=0.5g)
 Fig. 18. Maximum vertical response at the mid-span of the power line under the Northridge earthquake (PGA=0.5g)



شکل ۱۶. نمودار پاسخ عرضی وسط دهانه کابل خط انتقال قدرت برای زلزله نرثریج (PGA=1.0g)
 Fig. 16. Maximum lateral response at the mid-span of the power line under the Northridge earthquake (PGA=1.0g)



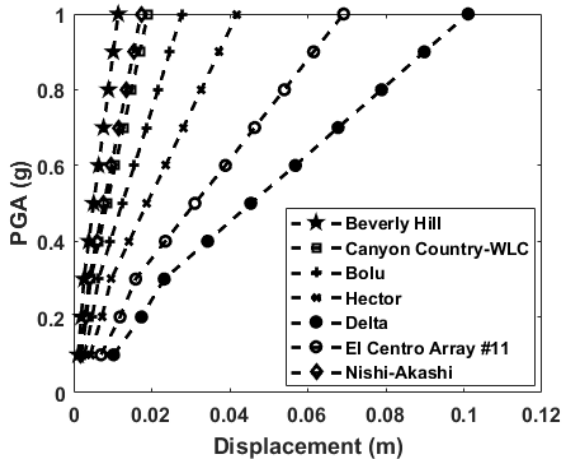
شکل ۱۹. تاریخچه زمانی پاسخ قائم وسط دهانه کابل خط انتقال قدرت برای زلزله نرثریج (PGA=1.0g)
 Fig. 19. Maximum vertical response at the mid-span of the power line under the Northridge earthquake (PGA=1.0g)



شکل ۱۷. تاریخچه زمانی پاسخ قائم وسط دهانه کابل خط انتقال قدرت برای زلزله نرثریج (PGA=0.1g)
 Fig. 17. Maximum vertical response at the mid-span of the power line under the Northridge earthquake (PGA=0.1g)

است، کاهش بازدهی مؤثر میراگرهای جرمی قابل ذکر است. با افزایش یافتن بیشینه شتاب زلزله‌های اعمالی میراگرها تحت تغییرمکان‌های بزرگتری قرار می‌گیرند و در واقع از حالت تنظیم خود خارج شده و توانایی آن‌ها در بهبود پاسخ‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ می‌توان پاسخ قائم وسط دهانه کابل دکل همراه با میراگر و بدون میراگر مشاهده نمود. رفتار ذکر شده از جانب میراگرها و عملکرد آن‌ها برای ارتعاش قائم کابل‌ها مشابه حالت عرضی می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۱۷ که تغییرمکان قائم کابل تحت اثر زلزله نرثریج با بیشینه شتاب $0.1g$ را بیان می‌کند، می‌توان بازدهی مناسب و مؤثر میراگرهای جرمی را ذکر نمود. این عملکرد همزمان با کاهش تغییرمکان عرضی کابل‌ها نیز همراه است که در نمودارهای

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. این مقادیر برای حالت خط انتقال بدون میراگر می‌باشد که به منظور مشاهده یک نمونه از میزان کاهش پاسخ‌ها در کابل‌های انتقال قدرت، نمودار تاریخچه زمانی تغییرمکان عرضی وسط دهانه خط انتقال برای کابل ارائه می‌گردد. در شکل ۱۴ تغییرمکان عرضی کابل به همراه میراگر جرمی و بدون میراگر جرمی برای بیشینه شتاب معادل $0.1g$ برای زلزله نرثریج نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که میراگر جرمی برای کاهش جابه‌جایی عرضی کابل بسیار مؤثر واقع شده است. در ادامه با افزایش بیشینه شتاب زلزله تا حد $0.5g$ که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، می‌توان بهبود رفتار و کاهش پاسخ کابل را نیز مشاهده نمود. در شکل ۱۶ که بیشینه شتاب زلزله به حد $1.0g$ افزایش یافته



شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

Fig. 22. Maximum vertical response of mid-span of the power line equipped with dampers subjected to different earthquakes

شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

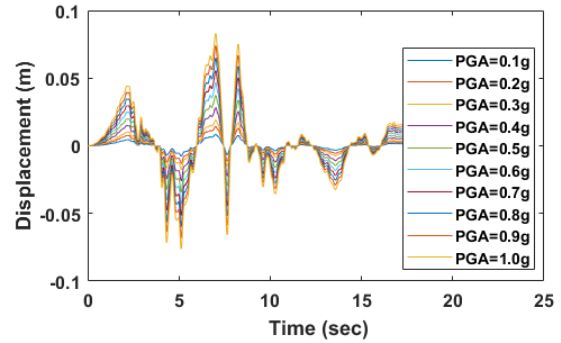
شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

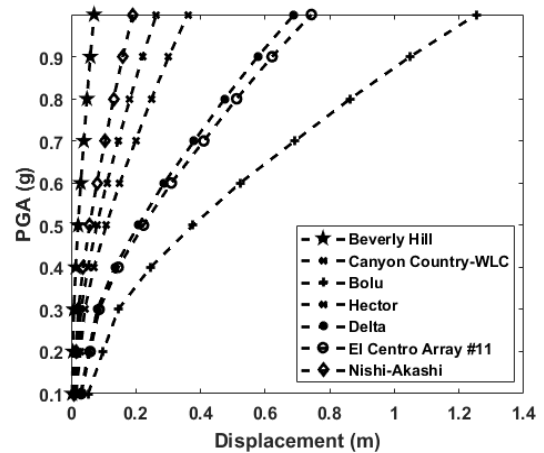
شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

شکل ۲۲: حداکثر پاسخ قائم وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب



شکل ۲۰: تاریخچه زمانی تغییرمکان عرضی وسط دهانه خط انتقال قدرت تحت بیشینه شتابهای مختلف زلزله نرثریج

Fig. 20. Lateral displacement time-history at mid-span of the power line subjected to different accelerations of the Northridge earthquake



شکل ۲۱: حداکثر پاسخ عرضی وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

Fig. 21. Maximum lateral response at mid-span of the power line equipped with dampers subjected to different earthquakes

شکل ۲۱: حداکثر پاسخ عرضی وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

شکل ۲۱: حداکثر پاسخ عرضی وسط دهانه خط انتقال قدرت مجهز به میراگر تحت زلزله های مختلف با تغییر بیشینه شتاب

- frequencies of multispan transmission lines by a transfer-matrix method, in: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, IET, 1966, pp. 870-878.
- [4] W.M. Henghold, J.J. Russell, J. Morgan III, Free vibrations of cable in three dimensions, Journal of the Structural Division, 103(ASCE 12954 Proceeding) (1977).
- [5] F. Daneshjoo, Nonlinear Static Analysis of Cable Structures by Minimization of Total Potential Energy Including Instability Effects, scientia Iranica, 6(3) 0-0.
- [6] M. Gambhir, B.d. Batchelor, Parametric study of free vibration of sagged cables, Computers & Structures, 8(5) (1978) 641-648.
- [7] H. Jayaraman, W. Knudson, A curved element for the analysis of cable structures, Computers & Structures, 14(3-4) (1981) 325-333.
- [8] G.V. Rao, R. Iyengar, Seismic response of a long span cable, Earthquake engineering & structural dynamics, 20(3) (1991) 243-258.
- [9] T. Suzuki, K. Tamamatsu, T. Fukasawa, Seismic response characteristics of transmissions towers, in: Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, 1992, pp. 4961-4967.
- [10] R.S. Harichandran, Spatial variation of earthquake ground motion, what is it, how do we model it, and what are its engineering implications, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Michigan State Univ., East Lansing, Mich, (1999).
- [11] A. Zerva, On the spatial variation of seismic ground motions and its effects on lifelines, Engineering Structures, 16(7) (1994) 534-546.
- [12] L. Tian, H. Li, G. Liu, Seismic response of power transmission tower-line system subjected to spatially varying ground motions, Mathematical Problems in Engineering, 2010 (2010).
- [13] T. Aziz, A. Ghobarah, M. El-Attar, Non-linear dynamics of transmission lines, in: 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996, pp. 1616-1620.
- [14] M.M. El-Attar, Nonlinear dynamics and seismic response of power transmission lines, 1997.
- [15] H.-N. Li, W.-L. Shi, G.-X. Wang, L.-G. Jia, Simplified

می‌توان با استفاده از میراگرها ارتعاشات نامطلوب کابل‌ها را کنترل نمود. همچنین با توجه به وزن کم کابل‌ها نسبت به دکل، ارتعاش کابل‌ها به صورت دامنه بلند بوده و اثر بخشی میراگرها در بیشینه شتاب‌های کم بسیار بالا خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جهت کنترل ارتعاشات نامطلوب ارتعاشات کابل‌های دکل‌های انتقال قدرت از میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده استفاده شده است؛ که برای افزایش کارایی آن بر روی حالات بهینه خود از روش جستجوی عددی بهره گرفته شده است. سپس خط انتقال قدرت تحت اثر هفت زلزله قرار گرفته تا پاسخ سیستم سازه‌ای با و بدون میراگرها بررسی شده و تأثیر میراگرها در کاهش جابه‌جایی عرضی و قائم وسط دهانه کابل‌ها ارزیابی گردد.

بر اساس نتایج، تأثیر میراگرهای جرمی برای بیشینه شتاب‌های پایین زلزله عملکرد مناسبی داشته و توان کاهش پاسخ‌ها تا حد ۶۰ درصد نیز داشته است. با توجه به اینکه در بیشینه شتاب‌های پایین سازه در ناحیه خطی می‌باشد، لذا فرکانس مد اول سازه تغییری نمی‌کند. چون میراگرها برای فرکانس مد اول سازه دکل و کابل‌های انتقال تنظیم شده‌اند، لذا عملکرد بهتری دارند و با ورود به ناحیه غیرخطی فرکانس سازه تغییر کرده و میراگرها از حالت تنظیم بهینه خود فاصله می‌گیرند و بازدهی آن‌ها ضعیف تر می‌شود. همچنین زلزله دوزسو ترکیه در زمان تناوب معادل سیستم دکل‌ها به همراه کابل‌های آن، طیف پاسخ شتاب مقادیر بزرگتری نسبت به سایر زلزله‌ها دارد، تأثیر بیشتری در ارتعاش کابل‌ها نسبت به سایر زلزله‌ها داشته است که متوسط بهبود رفتار با استفاده از میراگرها تحت این زلزله برابر ۵۹/۶ درصد می‌باشد.

مراجع

- [1] S. Ozono, J. Maeda, M. Makino, Characteristics of in-plane free vibration of transmission line systems, Engineering Structures, 10(4) (1988) 272-280.
- [2] L. Tian, X. Gai, Nonlinear seismic behavior of different boundary conditions of transmission line systems under earthquake loading, Shock and Vibration, (2016).
- [3] A. Simpson, Determination of the inplane natural

- 1(15) (2007).
- [20] M. Mohebbi, H. Shabani, Optimal Design of Active Multiple Tuned Mass Dampers (AMTMDs) For Nonlinear Hysteretic Structures, *Journal of Modeling in Engineering*, 15(48) (2017) 151-163.
- [21] F. Kordi, J. Alamatian, The TMD design based on complex stiffness theory, *Journal of Modeling in Engineering*, 15(51) (2017) 10-10.
- [22] H. Valizade, Determination of Effective Geometric Parameters in Seismic Analysis of Steel Tapered Hollow Transmission Poles, Master of Science Thesis, Tarbiat Modares University, (2016).
- [23] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006).
- [24] M. Markiewicz, Optimum dynamic characteristics of stockbridge dampers for dead-end spans, *Journal of sound and vibration*, 188(2) (1995) 243-256.
- models and experimental verification for coupled transmission tower–line system to seismic excitations, *Journal of Sound and Vibration*, 286(3) (2005) 569-585.
- [16] G. Addala, D.N. Satyam, R.P. Kumar, Dynamic analysis of transmission towers under strong ground motion, in: 3rd International Earthquake Symposium, Bangladesh, Dhaka, 2010.
- [17] Y. Liu, A.P. Tang, The present research situation and earthquake damage defensive measures of the transmission lines, in: Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering, 2012, pp. 24-28.
- [18] L. Tian, W. Wang, R. Ma, L. Wang, Progressive Collapse Analysis of Power Transmission Tower Under Earthquake Excitation, *The Open Civil Engineering Journal*, 7(1) (2013).
- [19] S.M. Zahrai, S. Amirzadeh, Numerical Study of Using Diamond Metallic Damper for Seismic Retrofit of Medium-rise Steel Frames, *Journal of Modeling in Engineering*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Bathaei, M. Ramezani, S.M. Zahrai, Horizontal and Vertical Vibration Control of The Power Transmission Tower Cable Using Optimally Tuned Mass Dampers, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 769-780.

DOI: [10.22060/ceej.2019.14862.5765](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14862.5765)

