



کنترل ارتعاش توربین بادی به کمک میراگر جرمی فعال مجهز به سیال مغناطیسی

پدرام قادری^{*}، امیرحسین محمدی زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

کلمات کلیدی:

توربین بادی
کنترل ارتعاش
میراگر جرمی فعال
میراگر MR
انرژی تجدیدپذیر

خلاصه: امروزه به دلیل اهمیت محیط‌زیست استفاده از سازه‌های مولد انرژی‌های پاک بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل تحلیل دینامیکی این گونه سازه‌ها تحت مخاطرات طبیعی به ویژه زلزله حائز اهمیت است. یکی از این سازه‌ها، توربین بادی است که باید علاوه بر کنترل ارتعاش ناشی از باد به کنترل ناشی از زلزله نیز در آن پرداخته شود و تمرکز این مقاله بر روی کنترل ارتعاش توربین بادی، توسط میراگر جرمی فعال مجهز به سیال مغناطیسی است. جرم‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ تن برای جرم این میراگر در نظر گرفته می‌شود و برای میراگر سیال مغناطیسی از دو میراگر متفاوت استفاده خواهد شد و عملکرد میراگرهای جرمی فعال با توجه به شاخص‌های ارزیابی ارائه شده با یکدیگر مقایسه و میراگر فعال بهینه معرفی می‌گردد. جهت مدل‌سازی توربین بادی، از توربین بادی با توان ۵ MW ارائه شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود و طراحی این توربین بادی به صورت خطی بوده که از سیستم چند درجه آزاد جهت مدل‌سازی استفاده می‌گردد؛ این توربین بادی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک قرار می‌گیرد که نیروی زلزله در جهت خارج از صفحه به توربین بادی وارد می‌شود که در ادامه با استفاده از این میراگرهای فعال معرفی شده به کنترل ارتعاش این توربین بادی پرداخته می‌شود و در انتها با استفاده از میراگر بهینه که در بالای برج توربین بادی و کنار ناسل قرار دارد کاهش محسوسی در جابه‌جایی و سرعت برج مشاهده می‌گردد.

۱- مقدمه

بسیاری برای کنترل ارتعاش توربین بادی تحقیقات گوناگونی انجام داده‌اند و به طور کلی ابزارهای کنترل سازه به کار رفته را به سه دسته کلی کنترل‌های فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال تقسیم‌بندی کرد [۳ و ۴].

در کنترل فعال از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود و به عنوان نمونه می‌توان از روش‌های کنترل تطبیقی و فازی نام برد که در کنترل تطبیقی سیستم‌هایی که جرم، سختی و میرایی مشخصی ندارند، با توجه به جابه‌جایی و سرعت سیستم، نیروهای کنترلی را می‌توان تولید نمود [۶ و ۵]. کنترل کننده‌های فازی، کنترل کننده‌های غیرخطی با ساختاری خاص هستند که از تئوری فازی استفاده می‌کنند که به دلیل عدم نیاز به مدل ریاضی، ساده بودن و مقاوم بودن به عدم قطعیت‌ها مورد توجه محققین واقع شده‌اند، اما به دلیل عدم یادگیری کنترل فازی، از ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک بهره برده می‌شود [۷].

برخی از محققین به بهینه کردن پارامترهای میراگر جرمی غیرفعال^۳ همانند جرم، سختی و میرایی در توربین بادی پرداخته‌اند [۸]، برخی نیز

یکی از ابزارهایی که می‌توان از آن جهت تولید انرژی پاک استفاده نمود، سازه‌های توربین بادی هستند؛ که در ایران در دهه‌های اخیر مورد توجه واقع شده است و در دنیا به دو دسته توربین‌های ساحلی^۱ و فراساحلی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند، اما از آنجا که در ایران، توربین‌های ساحلی بیشتر استفاده شده‌اند به تحلیل این مدل توربین پرداخته می‌شود. توربین‌های بادی ساحلی خود به دو دسته توربین‌های با محور افقی و محور قائم تقسیم‌بندی می‌شوند [۱] و از آنجایی که توربین‌های با محور افقی توان بیشتری در تولید برق دارند، تعداد بیشتری از آن‌ها ساخته شده است و از قسمت‌های اصلی ناسل و هاب، برج، پره و پی تشکیل شده است. تاریخچه استفاده از انرژی باد به سال‌های دور حدود ۵۰۰۰ سال پیش برمی‌گردد که در آن از انرژی باد جهت استفاده در آسیاب بادی استفاده شده است [۲]، در طول این چند دهه اخیر محققین

- 1 Onshore wind turbine
- 2 Offshore wind turbine



نویین است و نکات اجرایی متعددی نیز خواهد داشت و مباحث کنترل سازه‌ای در توربین بادی پیچیده‌تر از سازه‌های متعارف دیگر است و برخی از موارد مانند حساسیت در برابر نویز، تأخیر زمانی و ... تاکنون به صورت جدی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. همچنین تمرکز این مقاله صرفاً بر روی کنترل ارتعاش توربین بادی ناشی از زلزله است و در این مطالعه از میراگرهای جرمی فعال استفاده می‌گردد که میراگر جرمی فعال از یک میراگر جرمی غیرفعال به همراه یک میراگر سیال مغناطیسی ساخته شده است که تاکنون از این نوع میراگر جرمی فعال پیشنهادی، جهت کنترل ارتعاش سازه توربین بادی استفاده نگردیده است بنابراین جهت پر کردن این خلأ پژوهشی به مدل سازی یک توربین بادی ۵ MW مجهز به میراگر سیال مغناطیسی^۵ و میراگر جرمی که در جهت خارج از صفحه تعبیه شده است، پرداخته می‌شود.

۲- بیان مسئله و مدل سازی توربین بادی

در این بخش به کنترل ارتعاش توربین بادی به همراه میراگر جرمی فعال، غیرفعال و بدون میراگر پرداخته می‌شود و مطالعه جاری صرفاً مربوط به توربین بادی ۵ MW بوده است و نتایج این مطالعه را نمی‌توان به توربین‌های بادی با ساختار و ابعاد متفاوت دیگر تعمیم داد و در ادامه عملکرد این میراگرها با توجه به شاخص‌های ارائه شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مدل سازی توربین بادی به کمک مرجع [۱۶] انجام می‌شود که در آن از مدل چند درجه آزاد استفاده گردیده است در این حالت برای توربین بادی ۸ درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود که درجات آزادی ۱ الی ۳ مربوط به درجات آزادی داخل صفحه پره‌ها، ۴ الی ۶ برای حرکت خارج صفحه پره‌ها و درجه آزادی ۷ برای حرکت خارج از صفحه برج^۶ و درجه آزادی ۸ برای حرکت داخل صفحه برج^۷ است که این درجات آزادی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در میان این درجات آزادی، درجه آزادی ۷ که درجه آزادی برج در جهت خارج از صفحه است به علت آن که سختی پره‌ها در جهت خارج از صفحه بسیار کمتر از داخل صفحه است و ارتعاش پره بر روی ارتعاش برج و همچنین ارتعاش برج بر روی پره تأثیرگذار است به نحوی که با کم شدن ارتعاش برج، ارتعاش پره نیز کم می‌گردد، از درجات آزادی دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است و به همین دلیل به کنترل ارتعاش برج توربین در جهت خارج از صفحه پرداخته می‌شود و معادله حرکت توربین بادی در دو حالت بدون میراگر جرمی در رابطه (۱) و مجهز به میراگر جرمی در رابطه

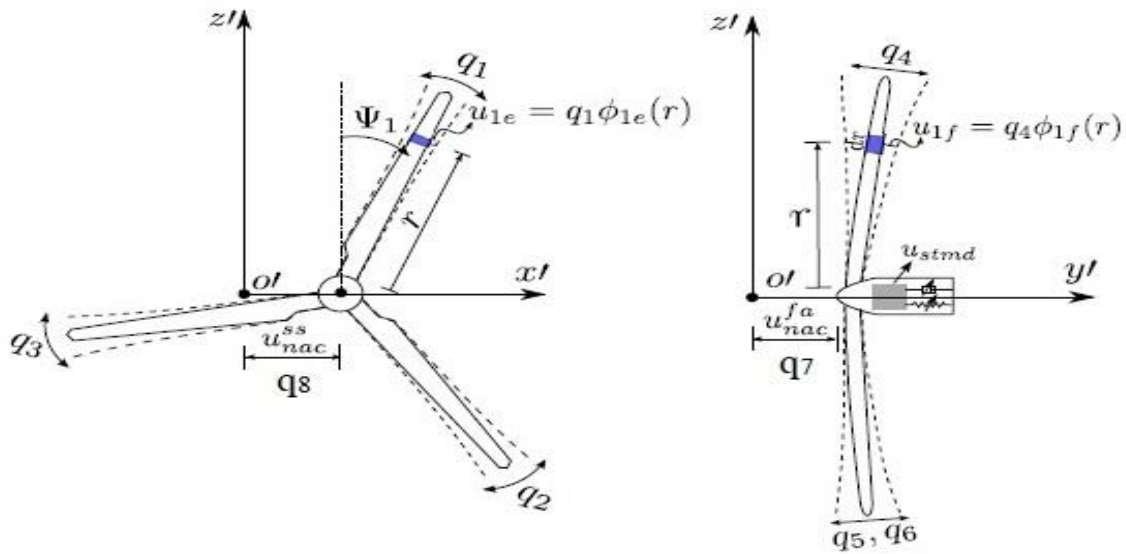
عملکرد ۲ عدد میراگر جرمی در کنار ناسل، یکی برای جهت درون صفحه‌ای و دیگری برای حرکت برون صفحه‌ای را بررسی کرده‌اند که باعث کاهش چشمگیری در ارتعاش توربین بادی می‌شود [۹]. همچنین از این میراگر در توربین‌های بادی فراساحلی نیز استفاده شده است که تغییر مکان برج به اندازه تقریبی ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است [۱۰]. در تحقیقات صورت گرفته برای توربین‌های بادی مجهز به میراگر جرمی غیرفعال، فعال و بدون میراگر جرمی نتایج نشان داده است توربین با میراگر جرمی فعال^۱ از ۲ حالت دیگر عملکرد بهتری داشته است [۱۱]. نوعی دیگر از میراگرهای جرمی، میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده^۲ می‌باشند، که نسبت به میراگرهای جرمی معمولی کاربرد کمتری در توربین‌های بادی دارند، و نتایج نشان داده است که استفاده از این میراگر می‌تواند عمر خستگی سازه را افزایش دهد [۱۲]. در یک نمونه توربین بادی آزمایشگاهی، که در مقیاس ۱/۲۰ انجام شده است از یک میراگر ستونی مایع تنظیم شونده کروی شکل جهت کنترل ارتعاش توربین بادی استفاده شده است که پاسخ سازه را به میزان ۴۰٪ کاهش داده است [۱۳].

مدل سازی توربین بادی به روش‌های گوناگونی ممکن است، ساده‌ترین راه، مدل سازی به روش تک درجه آزاد است که با روش مختصات تعمیم یافته انجام می‌پذیرد [۱۳-۱۵]. روش دیگر استفاده از مدل چند درجه آزاد است [۱۶ و ۱۱] که از دقت بالاتری نسبت به مدل تک درجه آزاد برخوردار است. در بیشتر تحقیقات انجام شده اثر خاک در نظر گرفته نشده است و در صورتی که خاک نسبتاً نرم باشد می‌تواند خطرآفرین باشد در تحقیقاتی که اثر خاک در آن‌ها در نظر گرفته شده است میرایی سازه، افزایش و فرکانس طبیعی سازه کم می‌گردد [۱۷] و به علت آن که سختی پره‌ها در جهت خارج از صفحه^۳ بسیار کمتر از داخل صفحه^۴ است، امکان وقوع آسیب در جهت خارج از صفحه بیشتر است، در نتیجه ارتعاش توربین در جهت خارج از صفحه بیشتر توجه محققین را به خود جلب کرده است [۱۸-۲۲].

طراحی توربین بادی در برابر بارهای متعارف صورت می‌پذیرد و دامنه ارتعاشات باید در محدوده خطی باقی بماند و هدف این مقاله از افزودن میراگر جرمی کاهش دامنه ارتعاشات و تضمین رفتار خطی است. توجه به این نکته نیز ضروری است که غیرخطی شدن این سازه باعث ایجاد آسیب سازه‌ای و گسترش آن می‌شود. بحث مدل سازی توربین بادی یک بحث

- 1 ATMD
- 2 TLD
- 3 Flapwise
- 4 Edgewise

- 5 MR damper
- 6 Fore-aft
- 7 Side-side displacement



شکل ۱. درجات آزادی برج توربین [۱۶]

Fig. 1. Degrees of freedom for turbine tower [16]

$$\psi_j = \Omega t + \frac{2\pi}{3}(j-1) \quad j=1,2,3 \quad (3)$$

در رابطه (۳) ψ_j زاویه پره از محور قائم، Ω سرعت زاویه‌ای پره، t زمان و j نیز شماره‌ی پره است.

۲-۱- مشخصات مکانیکی توربین بادی بدون میراگر جرمی

در این بخش ساختار ماتریس جرم، سختی، میرایی و نیروی زلزله در صورتی که از میراگر استفاده نشده باشد، معرفی می‌گردد. با توجه به اینکه استخراج روابط ارتعاش دینامیکی سازه توربین بادی مفصل بوده و این کار قبلاً در مقالات دیگر با صحت‌سنجی کامل صورت گرفته است [۲۳ و ۲۴] و موضوع فعلی راجع به کنترل این سازه است و در این مقاله صرفاً به صورت مختصر و در حد نیاز این روابط آورده می‌شوند. ماتریس جرم در رابطه (۴) آورده شده است و پارامترهای به کار رفته در این ماتریس در روابط (۵) الی (۱۱) نوشته شده‌اند [۱۶].

(۲) نوشته می‌شود، این معادله خطی و به صورت معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است [۱۶ و ۱۱].

$$M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = \mathbf{Q}_{seismic} \quad (1)$$

$$M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\mathbf{q} = \mathbf{Q}_{seismic} + \mathbf{P} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲) \mathbf{M} ، \mathbf{K} ، \mathbf{C} ، \mathbf{q} و $\dot{\mathbf{q}}$ به ترتیب ماتریس جرم، سختی، میرایی، جابه‌جایی، سرعت، شتاب توربین بادی است و $\mathbf{Q}_{seismic}$ و \mathbf{P} نیز به ترتیب نیروی زلزله و نیروی تولید شده توسط میراگر است که در بخش‌های بعدی به طور کامل توضیح داده می‌شوند.

با توجه به مرجع [۱۶]، ماتریس سختی و جرم تابع زمان هستند و با تغییر زاویه پره از محور قائم تغییر می‌کنند و از رابطه زیر برای تعیین زاویه پره از محور قائم استفاده می‌شود که این زاویه در شکل ۱ نشان داده شده است.

$$K = \begin{bmatrix} k_{b1,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{b2,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{b,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{b1,fp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{b2,fp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{b3,fp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_7 & 0 \\ -\Omega^2 m_{18} & -\Omega^2 m_{18} & -\Omega^2 m_{18} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_8 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$$k_7 = k_8 = \int_0^h EI_t \phi_{1t}''^2 dz \quad (۱۳)$$

$$k_{eg} = \int_0^R EI_{eg}(r) (\phi_{1e}'')^2 dr \quad (۱۴)$$

$$k_{fp} = \int_0^R EI_{fp}(r) (\phi_{1f}'')^2 dr \quad (۱۵)$$

$$k_{gr,eg} = g \int_0^R \int_r^R [\bar{m}(\zeta) d\zeta] (\phi_{1e}')^2 \quad (۱۶)$$

$$k_{ge,eg} = \Omega^2 \int_0^R \int_r^R [\bar{m}(\zeta) d\zeta] (\phi_{1e}')^2 dr \quad (۱۷)$$

$$k_{bj,fp} = k_{fp} + k_{ge,fp} - k_{gr,fp} \cos \psi_j \quad (۱۸)$$

$$k_{bj,eg} = k_{eg} + k_{ge,eg} - k_{gr,eg} \cos \psi_j - \Omega^2 m_1 \quad (۱۹)$$

$$k_{ge,fp} = \Omega^2 \int_0^R \int_r^R [\bar{m}(\zeta) d\zeta] (\phi_{1f}')^2 dr \quad (۲۰)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{18} \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{28} \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{38} \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & m_{47} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & m_{47} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & m_{47} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{47} & m_{47} & m_{47} & m_7 & 0 \\ m_{18} & m_{18} & m_{18} & 0 & 0 & 0 & 0 & m_8 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$m_1 = \int_0^R \bar{m}(r) \phi_{1e}^2 dr \quad (۵)$$

$$m_2 = \int_0^R \bar{m}(r) \phi_{1f}^2 dr \quad (۶)$$

$$m_{47} = \int_0^R \bar{m}(r) \phi_{1f} dr \quad (۷)$$

$$M_t = \int_0^h \bar{M}(z) dz \quad (۸)$$

$$M_{1t} = \int_0^h \bar{M}(z) \phi_{1t}^2 dz \quad (۹)$$

$$m_{j8} = \int_0^R \bar{m}(r) \phi_{1e} dr \cos \psi_j \quad j=1,2,3 \quad (۱۰)$$

$$m_8 = m_7 = 3m_0 + M_{nac} + M_{hub} + M_{1t} \quad (۱۱)$$

در روابط (۱۳) الی (۲۰)، I_t ، I_{eg} و I_{fp} به ترتیب ممان اینرسی برج در جهت خارج از صفحه، ممان اینرسی پره در جهت داخل صفحه و ممان اینرسی پره در جهت خارج از صفحه و ϕ_{1e}'' ، ϕ_{1f}'' ، ϕ_{1t}'' ، ϕ_{1e}' ، ϕ_{1f}' ، ϕ_{1t}' نیز به ترتیب مشتق اول تابع شکل پره در جهت داخل صفحه، مشتق اول تابع شکل پره در جهت خارج از صفحه، مشتق دوم تابع شکل برج در جهت خارج از صفحه، مشتق دوم پره در جهت خارج از صفحه و مشتق دوم پره در جهت داخل صفحه است.

در خصوص محاسبه ماتریس میرایی، مرجع [۱۶] اطلاعات کافی را

در روابط (۴) الی (۱۱) \bar{m} ، \bar{M} ، m_0 ، M_{nac} ، M_{hub} ، M و R و h به ترتیب برابر جرم در واحد طول پره، جرم در واحد طول برج، جرم پره، جرم ناسل، جرم هاب، ارتفاع برج و طول پره است و ϕ_{1e} ، ϕ_{1f} و ϕ_{1t} نیز به ترتیب برابر با تابع شکل مود اول خارج از صفحه پره، تابع شکل مود اول داخل صفحه پره و تابع شکل مود اول برج در خارج از صفحه است. ماتریس سختی نیز از رابطه (۱۲) به دست می‌آید و پارامترهای به کار رفته در آن در روابط (۱۳) الی (۲۰) ذکر شده‌اند [۱۶].

$$Q_{j+3, seismic} = -m_{1j} \ddot{u}_{gx} \quad j=1,2,3 \quad (27)$$

$$Q_{8, seismic} = -(3m_0 + M_{nac} + M_{ltow}) \ddot{u}_{gy} = 0 \quad (28)$$

$$Q_{7, seismic} = -(3m_0 + M_{nac} + M_{ltow}) \ddot{u}_{gx} \quad (29)$$

$$m_{1e} = \int_0^R \bar{m}(r) \phi_{1e} dr \quad (30)$$

$$M_{ltow} = \int_0^h \bar{M} \phi_{1t} dl \quad (31)$$

$$m_{1f} = \int_0^R \bar{m} \phi_{1f} dr \quad (32)$$

۲-۲- مشخصات مکانیکی توربین بادی مجهز به میراگر جرمی

در این حالت یک درجه آزادی دیگر به توربین بادی اضافه می‌گردد. ماتریس جرم، سختی و میرایی در روابط (۳۳) الی (۳۵) نوشته می‌شود [۱۶] که m_s ، k_s و c_s به ترتیب برابر با جرم میراگر، سختی میراگر و میرایی میراگر است.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{18} & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{28} & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{38} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & m_{47} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & m_{47} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & m_{47} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{47} & m_{47} & m_{47} & m_7 & 0 & m_s \\ m_{18} & m_{28} & m_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 & m_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_s & 0 & m_s \end{bmatrix} \quad (33)$$

دارا نیست و پارامترهای به کار رفته در این ماتریس از مرجع [۲۵] استفاده می‌شود که در روابط (۲۲) الی (۲۴) آمده است.

$$C = \begin{bmatrix} c_{b, eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{b, eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{b, eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{b, fp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{b, fp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{b, fp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_7 & 0 & 0 \\ -2\Omega m_{18} & -2\Omega m_{28} & -2\Omega m_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_8 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$C_{b, eg} = 2\omega_{eg} \xi_{bl} m_1 \quad (22)$$

$$C_{b, fp} = 2\omega_{fp} \xi_{bl} m_2 \quad (23)$$

$$C_8 = C_7 = 2\omega_t \xi_t m_7 \quad (24)$$

در روابط (۲۲) الی (۲۴) ω_t ، ω_{fp} ، ω_{eg} و ξ_t و ξ_{bl} به ترتیب برابر با بسامد زاویه‌ای پره در جهت داخل صفحه، بسامد زاویه‌ای در جهت خارج از صفحه، بسامد زاویه‌ای برج، میرایی پره و میرایی برج است.

نیروی زلزله وارد بر توربین در جهت خارج از صفحه در نظر گرفته می‌شود بنابراین نیروهای وارد بر درجات آزادی داخل صفحه صفر هستند و در صورتی که شتاب زلزله در جهت خارج از صفحه با \ddot{u}_{gx} و در جهت داخل صفحه را با \ddot{u}_{gy} نشان داده شود بردار نیروی زلزله به صورت رابطه (۲۵) نوشته می‌شود:

$$\vec{Q} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad Q_4 \quad Q_5 \quad Q_6 \quad Q_7 \quad 0]^T \quad (25)$$

$$Q_{j, seismic} = -m_{1e} \cos(\psi_j) \ddot{u}_{gy} = 0 \quad (26)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{b1,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{b2,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{b3,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{b1,fp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{b2,fp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{b3,fp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_7 & 0 & 0 \\ -\Omega^2 m_{18} & -\Omega^2 m_{28} & -\Omega^2 m_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{b,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{b,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{b,eg} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{b,fp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{b,fp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{b,fp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_7 & 0 & -c_s \\ -2\Omega m_{18} & -2\Omega m_{28} & -2\Omega m_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 & c_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_s \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$Q_{7, seismic} = -(3m_0 + M_{nac} + M_{1tow} + m_s)\ddot{u}_{gx} \quad (37)$$

$$Q_{9, seismic} = -m_s \ddot{u}_{gx} \quad (38)$$

$$\tilde{P} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -F \ 0 \ F]^T \quad (39)$$

F نیروی تولید شده توسط میراگر فعال است و روابط (۸)، (۹) و (۱۰) عیناً تکرار می‌شوند.

۲-۳- مدل سازی توربین بادی در حالت خاموش

به دلیل سهولت در مدل سازی، توربین بادی خاموش فرض می‌گردد و به مشخصات توربین بادی مانند جرم، سختی پره‌ها و برج نیاز است، این مدل سازی در نرم افزار متلب و سیمولینک انجام می‌شود بنابراین با استفاده از

در صورتی که از میراگر جرمی به همراه میراگر مغناطیسی استفاده شود، یک میراگر فعال ساخته می‌شود بنابراین c_s و k_s صفر فرض می‌گردند و m_s مساوی مقادیر ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ تن در نظر گرفته می‌شود که به ترتیب معادل ۱/۵٪، ۳٪، ۶٪ و ۹٪ وزن سازه‌اند؛ و در صورتی که از میراگر جرمی غیرفعال به صورت تنها استفاده شود مقادیر c_s و k_s به ترتیب برابر مقادیر ۱۰۰۰ N.S/m و 2×10^6 N/m فرض می‌شوند. از آنجایی که جرم نسبی میراگر برای توربین‌های بادی در محدوده تقریبی ۱ الی ۵ درصد وزن سازه‌اند، اما با کمی اغماض از میراگر جرمی ۴۰ تنی نیز استفاده می‌شود، ولی میراگر جرمی ۶۰ تنی تنها جهت بررسی اثر افزایش جرم میراگر در بهبود رفتار دینامیکی توربین در این مقاله استفاده می‌شود و برای کارهای اجرایی توصیه نمی‌گردد. مقادیر ماتریس نیروی زلزله و نیروی تولید شده توسط میراگر فعال نیز در این حالت برابر می‌شوند با:

$$\tilde{Q}_{seismic} = [0 \ 0 \ 0 \ Q_4 \ Q_5 \ Q_6 \ Q_7 \ 0 \ Q_9]^T \quad (36)$$

$$\phi_{1r} = -2.2555\bar{r}^6 + 4.7131\bar{r}^5 - 3.2452\bar{r}^4 + 1.7254\bar{r}^3 + 0.0622\bar{r}^2 \quad (41)$$

$$\phi_{1r} = -2.5040\bar{h}^6 + 6.2275\bar{h}^5 - 5.6202\bar{h}^4 + 2.1963\bar{h}^3 + 0.7004\bar{h}^2 \quad (42)$$

در صورتی که از میراگر جرمی استفاده نشده باشد، ماتریس جرم، سختی و میرایی برابر می‌شوند با:

مرجع [۲۶] که خلاصه‌ای از آن در جدول ۱ و در روابط (۴۰) الی (۴۲) آمده است به تشکیل ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی پرداخته می‌شود.

توابع شکل به کار رفته برای مدل‌سازی شکل ارتعاش توربین در روابط (۴۰) الی (۴۲) آورده شده‌اند که در آن‌ها $\bar{r} = r / 61.5$ و $\bar{h} = h / 87.6$ است که r و h نیز به ترتیب برابر فاصله یک جزء پره از هاب و فاصله یک جزء برج توربین از پایه برج است.

$$\phi_{1e} = -0.6952\bar{r}^6 + 2.376\bar{r}^5 - 3.5772\bar{r}^4 + 2.5337\bar{r}^3 + 0.3627\bar{r}^2 \quad (40)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1.5028e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.1557e3 \\ 0 & 1.5028e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.5779e3 \\ 0 & 0 & 1.5028e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.5779e3 \\ 0 & 0 & 0 & 984.73 & 0 & 0 & 2.235e3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 984.73 & 0 & 2.235e3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 984.73 & 2.235e3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.235e3 & 2.235e3 & 2.235e3 & 4.039e5 & 0 \\ 3.1557e3 & -1.5779e3 & -1.5779e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.039e5 \end{bmatrix} \text{ kg} \quad (43)$$

$$K = \begin{bmatrix} 7.127e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.627e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.627e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.54e4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.2080e4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.2080e4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.9097e6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.9097e6 \end{bmatrix} \text{ N/m} \quad (44)$$

$$C = \begin{bmatrix} 97.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 97.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 97.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40.39 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40.39 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40.39 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.756e4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.756e4 \end{bmatrix} \text{ N.S/m} \quad (45)$$

جدول ۱. مشخصات کلی توربین بادی [۲۴]

Table 1. General properties of wind turbines [24]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قدرت	5 MW	جرم ناسل	240000 kg	نسبت میرایی سازه‌ای برای پره	0.48%
قطر چرخش پره	126 m	جرم برج	347460 kg	فرکانس مود اول پره در جهت داخل صفحه	1.089
قطر هاب	3 m	جرم پره	17740 kg	فرکانس مود اول پره در جهت خارج صفحه	0.666
ارتفاع هاب	90 m	طول پره	61.5 m	نسبت میرایی سازه‌ای برای برج	1%
ارتفاع برج	87.6 m	جرم هاب	56780 kg	فرکانس مود اول برج	0.324

در صورتی که از میراگر جرمی استفاده شود، ماتریس‌های ذکر شده به

صورت روابط (۴۶) الی (۴۸) خواهند بود:

$$M = \begin{bmatrix} 1.5028e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.1557e3 & 0 \\ 0 & 1.5028e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.5779e3 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5028e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.5779e3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 984.73 & 0 & 0 & 2.235e3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 984.73 & 0 & 2.235e3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 984.73 & 2.235e3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.235e3 & 2.235e3 & 2.235e3 & 4.039e5 + m_s & 0 & m_s \\ 3.1557e3 & -1.5779e3 & -1.5779e3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.039e5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_s & 0 & m_s \end{bmatrix} \text{ kg} \quad (46)$$

$$K = \begin{bmatrix} 7.127e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.627e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.627e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.54e4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.2080e4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.2080e4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.9097e6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.9097e6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \text{ N/m} \quad (47)$$

$$C = \begin{bmatrix} 97.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 97.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 97.89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40.39 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40.39 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40.39 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.756e4 & 0 & -c_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.756e4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_s \end{bmatrix} N.S / m \quad (48)$$

$$\alpha_{(i)} = 16566i^3 - 87071i^2 + 168326i + 15114 \quad (52)$$

$$c_0(i) = 447097i^3 - 1545407i^2 + 1641376i + 457741 \quad (53)$$

$$c_1(i) = -9363108i^3 - 5334183i^2 + 48788640i - 2791630 \quad (54)$$

باقی پارامترها نیز از جدول ۲ حاصل می‌شود:

۲-۴-۲- میراگر مغناطیسی نوع دوم

این میراگر نیز قابلیت تولید نیرویی به مقدار ۲۰۰ kN را دارد و در سال ۲۰۱۰ ساخته شده است [۲۸] و روابط (۴۹) الی (۵۱) عیناً برای این میراگر نیز به کار برده می‌شود ولی باقی پارامترها که در روابط (۵۵) الی (۵۷) و جدول ۳ آمده‌اند کاملاً با میراگر مغناطیسی نوع اول متفاوت است.

$$\alpha = \alpha_A e^{(\alpha_{Bi})} + \alpha_C e^{(\alpha_{Di})} \quad (55)$$

$$C_0 = C_{0A} e^{(C_{0Bi})} + C_{0C} e^{(C_{0Di})} \quad (56)$$

$$C_1 = C_{1A} \sqrt{i} + C_{1B} \quad (57)$$

۲-۴-۲- طراحی میراگر مغناطیسی

در این توربین بادی ۲ میراگر مغناطیسی ۲۰۰ kN که یکی برای سال ۲۰۰۲ و دیگری برای سال ۲۰۱۱ است، در ساخت میراگرهای جرمی فعال به کار برده می‌شوند و هر کدام با یک میراگر جرمی که دارای جرم‌های متفاوت ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ تنی هستند، مورد استفاده واقع می‌گردند.

۲-۴-۱- میراگر مغناطیسی نوع اول

این میراگر قابلیت تولید نیرویی به مقدار ۲۰۰ kN را دارد و در سال ۲۰۰۲ ساخته شده است [۲۷]. پارامترهای این میراگر در روابط (۴۹) الی (۵۴) آورده شده‌اند.

$$F = \alpha Z + C_0(\dot{x} - \dot{y}) + K_0(x - y) + K_1(x - x_0) = C_1 \dot{y} + K_1(x - x_0) \quad (49)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (50)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \} \quad (51)$$

پارامترهایی که تابع شدت جریان هستند، در روابط (۵۲)، (۵۳) و (۵۴) آورده شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای میراگر نوع اول [۲۷]

Table 2. First Damper parameters [27]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
A	2679.0 m ⁻¹	K ₀	137810 N/m
β, γ	647.46 m ⁻¹	N	10
X ₀	0.18 m	K ₁	617.31 N/m

جدول ۳. مشخصات میراگر مغناطیسی نوع دوم [۲۶]

Table 3. Properties of the second magnetic damper [26]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
α_A	950.4 kN	C _{0A}	277.4 kN.S/m	C _{1A}	100 kN.S/m	X ₀	0.01m
α_B	-0.0098 kN	C _{0B}	-0.0012 kN.S/m	C _{1B}	28470 kN.S/m	β, γ	4430m⁻¹
α_C	-934.3 kN	C _{0C}	-184.4 kN.S/m	K ₀	0.0559 kN/m	A	336.56
α_D	0.9376 kN	C _{0D}	-1.13 kN.S/m	K ₁	0.0641 kN/m	n	2

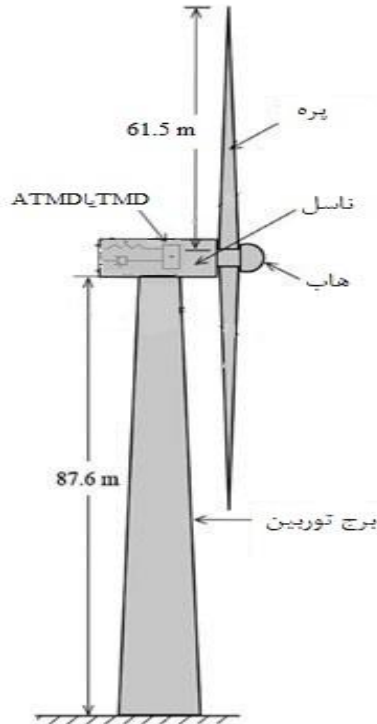
۳- شاخص‌های ارزیابی عملکرد توربین بادی و نتایج

جهت استفاده از این دو میراگر مغناطیسی و مقایسه عملکرد این دو، شدت جریان برق عبوری بر روی ۲ آمپر قرار داده می‌شود و بر بالای برج توربین بادی نصب می‌گردند که در شکل ۲ نمایش داده شده است و شاخص‌هایی جهت ارزیابی عملکرد میراگرها بر روی ارتعاش توربین بادی تحت زلزله مطرح می‌شوند. شاخص اول، شاخص نسبت بیشینه جابه‌جایی توربین بادی مجهز به میراگر به بیشینه جابه‌جایی توربین بادی بدون میراگر است که مهم‌ترین شاخص نیز هست، زیرا برش پایه وارده بر توربین بادی توسط این شاخص تعیین می‌گردد شاخص دوم و سوم نیز به ترتیب نسبت بیشینه سرعت و نسبت بیشینه شتاب توربین مجهز به میراگر به بیشینه سرعت و شتاب توربین بدون میراگر است که جزو پارامترهای اساسی توربین هستند.

برای زلزله از شتاب‌نگاشت زلزله السنترو ۱۹۴۰ استفاده می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است و در ادامه طبق شاخص‌های ذکر شده عملکرد میراگرها با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

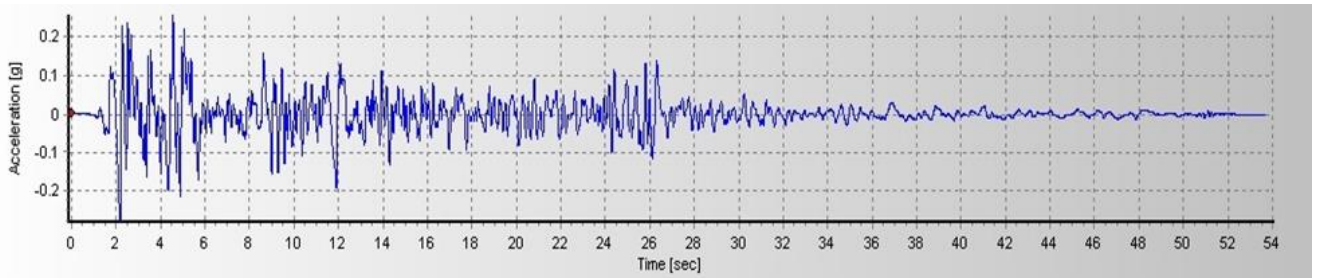
۳-۱- شاخص جابه‌جایی

شاخص نسبت بیشینه جابه‌جایی برج توربین بادی مجهز به میراگر به بیشینه جابه‌جایی توربین بادی بدون میراگر یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد میراگرهای فعال و غیرفعال است که با نماد I در شکل ۴ نشان داده شده است، در حالت کلی با افزایش جرم میراگرها جابه‌جایی برج کمتر می‌گردد و مشاهده می‌شود میراگرهای فعال عملکرد بهتری نسبت به میراگر غیرفعال داشته‌اند به طور مثال مقدار این شاخص برای میراگر جرمی فعال ۱۰ تنی نوع اول ۰.۷۶٪، میراگر جرمی فعال ۱۰ تنی نوع دوم ۰.۶۲٪ و برای میراگر جرمی غیرفعال ۱۰ تنی ۰.۸۷٪ به دست آمده است و هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد عملکرد میراگر بهتر خواهد بود. از میان دو میراگر جرمی فعال، میراگر جرمی فعال نوع دوم عملکرد بهتری نسبت به میراگر جرمی فعال نوع اول داشته است و هنگامی که جرم میراگر فعال نوع دوم از ۱۰ تن به ۲۰ تن افزایش می‌یابد شاخص جابه‌جایی از ۰.۶۲٪ به ۰.۵۳٪ می‌رسد که کاهش چشمگیری دارد، اما با افزایش جرم میراگر در میراگر فعال نوع دوم از ۲۰ تن به ۴۰ تن و حتی ۶۰ تن اختلاف چندانی دیده نمی‌شود و با



شکل ۲. مکان قرارگیری میراگر جرمی [۴]

Fig. 2. Location of mass damper [4]



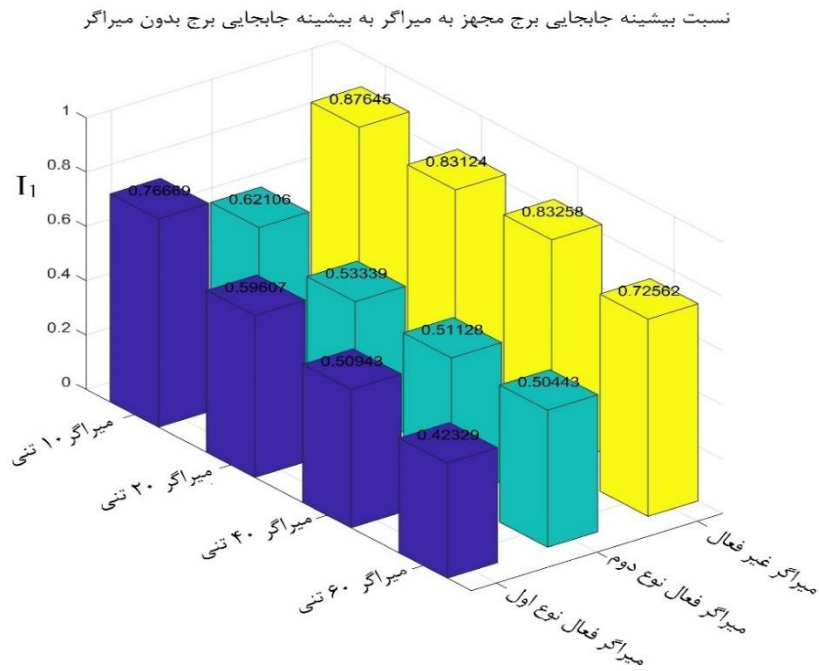
شکل ۳. شتاب نگاشت زلزله السنترو

Fig. 3. Acceleration spectra of el-Centro earthquake

۳-۲- شاخص سرعت

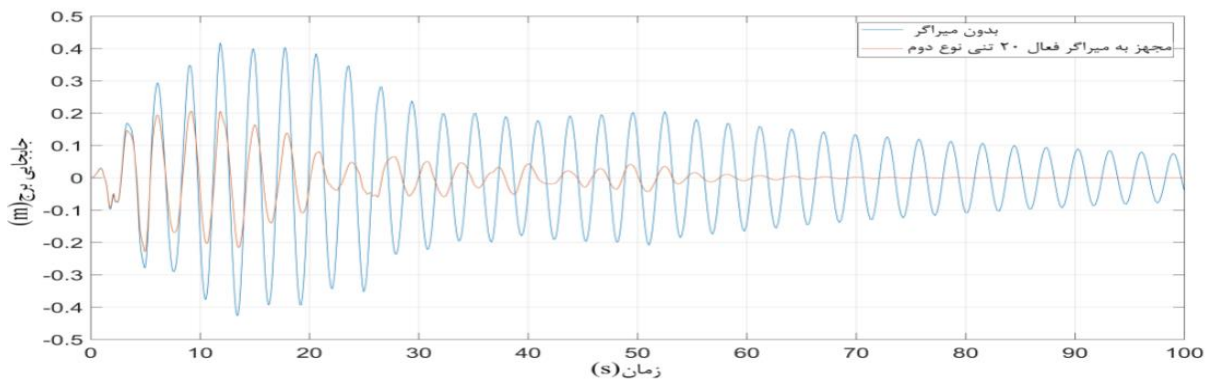
شاخص دوم، نسبت بیشینه سرعت برج توربین بادی مجهز به میراگر به بیشینه جابه‌جایی برج بدون میراگر است و در شکل ۶ با نماد I_p نشان داده شده است که میراگرهای فعال عملکرد بهتری نسبت به میراگرهای غیرفعال

وجود جرم ۶۰ تنی این شاخص به مقدار ۵۰٪ می‌رسد؛ بنابراین از دیدگاه شاخص اول میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم از نظر عملکرد بهینه‌تر از باقی میراگرها است؛ و می‌توان بهبود رفتار دینامیکی در جابه‌جایی برج توربین توسط این میراگر را در شکل ۵ مشاهده نمود.



شکل ۴. شاخص مرتبط با جابه‌جایی تحت زلزله السنترو

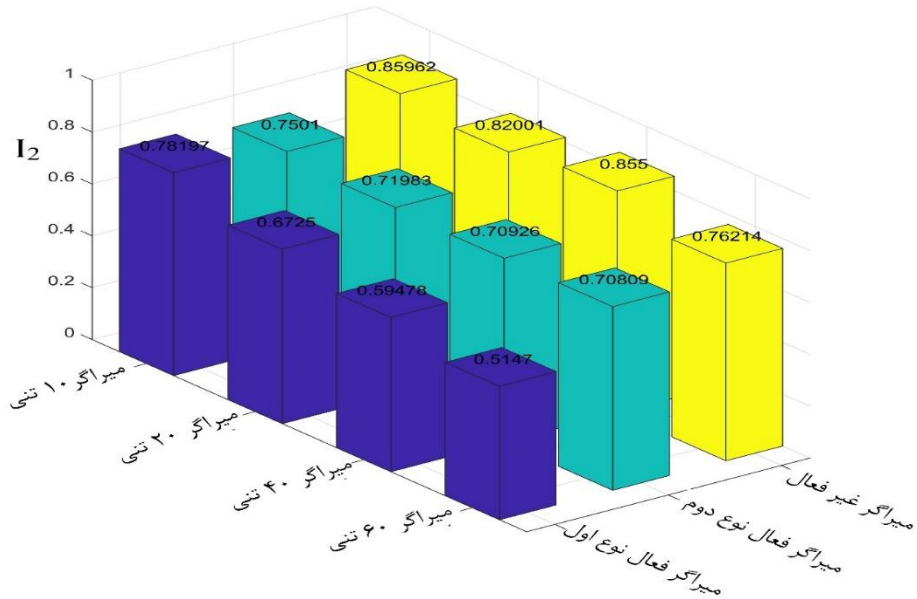
Fig. 4. Displacement index related to the el-Centro earthquake



شکل ۵. مقایسه جابه‌جایی برج توربین بادی مجهز به میراگر فعال ۲۰ تنی نوع دوم و جابه‌جایی برج توربین بادی بدون میراگر تحت زلزله السنترو

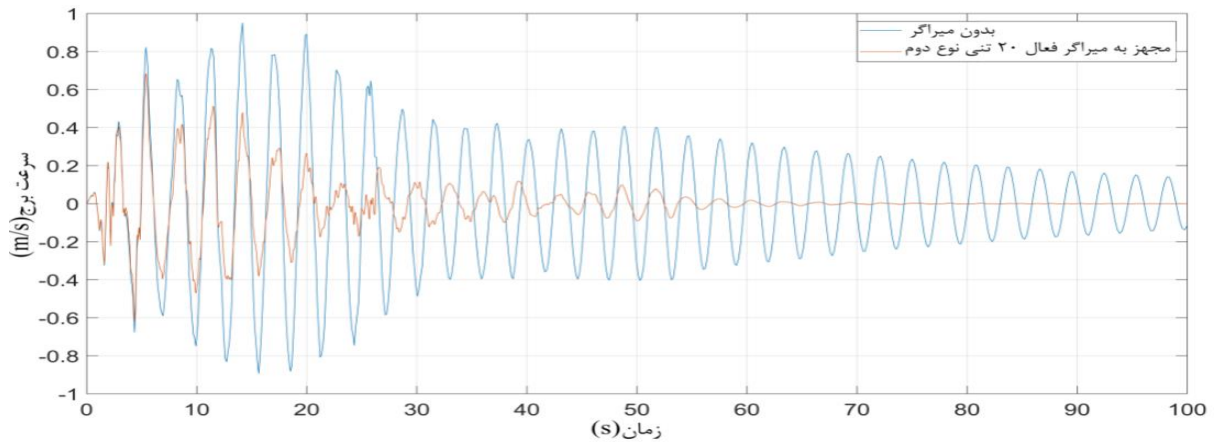
Fig. 5. Comparison between displacement of wind turbine tower equipped with active 20-ton second damper and displacement of wind turbine tower without damper under Centro earthquake

نسبت بیشینه سرعت برج مجهز به میراگر به بیشینه سرعت برج بدون میراگر



شکل ۶. شاخص مرتبط با سرعت برج توربین تحت زلزله السنترو

Fig. 6. velocity index of tower under the el-Centro earthquake

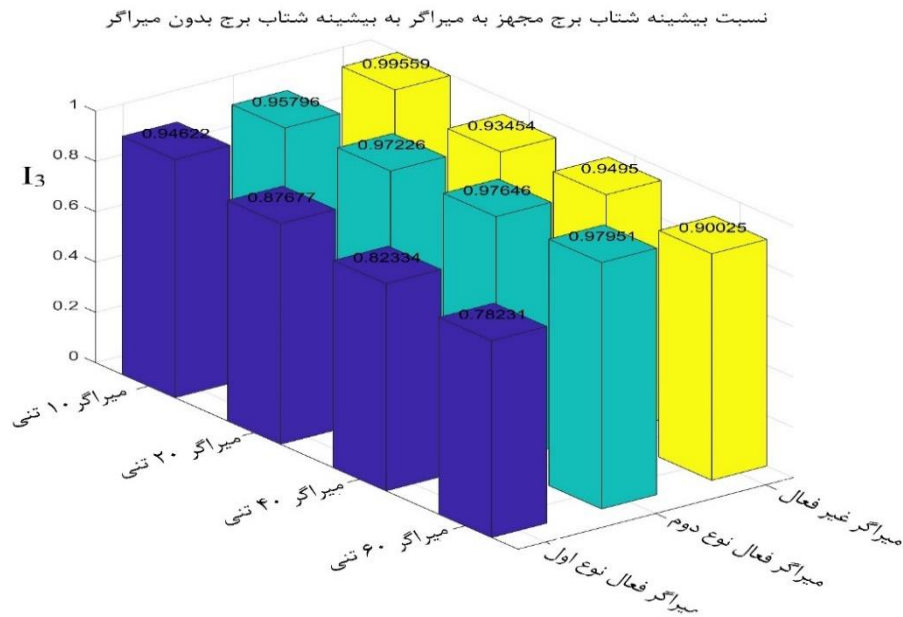


شکل ۷. مقایسه سرعت برج توربین مجهز به میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم و سرعت برج توربین بدون میراگر تحت زلزله السنترو

Fig. 7. Comparison between velocity of wind turbine tower equipped with active 20-ton second damper and velocity of wind turbine tower without damper under el-Centro earthquake

برابر ۷۵٪ و برای میراگر جرمی غیرفعال برابر ۸۵٪ است؛ بنابراین از دیدگاه شاخص دوم هم می‌توان میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم که مقدار شاخص در آن برابر ۷۱٪ است را انتخاب نمود و بهبود رفتار دینامیکی توسط این میراگر در سرعت توربین را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود.

دارند و در میان میراگرهای فعال در حالتی که جرم میراگر ۱۰ یا ۲۰ تن باشد عملکرد هر دو میراگر فعال تقریباً یکسان بوده اما با افزایش جرم میراگر به ۴۰ و ۶۰ تن عملکرد میراگر جرمی فعال نوع اول بهتر از نوع دوم است، به طور مثال مقدار شاخص برای میراگر جرمی فعال ۱۰ تنی نوع اول برابر ۷۸٪، برای میراگر جرمی فعال ۱۰ تنی نوع دوم



شکل ۸. شاخص مرتبط با شتاب برج توربین تحت زلزله السنترو

Fig. 8. Acceleration index of tower under the el-Centro earthquake

۳-۳- شاخص شتاب

شاخص سوم، نسبت بیشینه شتاب برج توربین بادی مجهز به میراگر به بیشینه جابه‌جایی برج بدون میراگر است و در شکل ۸ با نماد I_3 نشان داده شده است، برای این شاخص تقریباً میراگرهای جرمی فعال و میراگر غیرفعال تحت زلزله السنترو عملکرد مشابهی دارند به‌طور مثال برای میراگر جرمی فعال ۱۰ تنی نوع اول مقدار این شاخص برابر ۰.۹۴٪، برای میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم برابر ۰.۹۵٪ و برای میراگر جرمی غیرفعال برابر ۰.۹۹٪ است. ولی در میراگر فعال نوع اول با افزایش جرم میراگر کاهش تدریجی در شتاب برج می‌گردد؛ بنابراین از دیدگاه شاخص سوم عملکرد میراگر فعال نوع اول بهتر از باقی میراگرها بوده است ولی در جرم‌های کم بیشینه شتاب تغییر چندانی نداشته است و بهبود رفتار دینامیکی شتاب تحت میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم را می‌توان در شکل ۹ مشاهده نمود.

۳-۴- جابه‌جایی نسبی میراگر

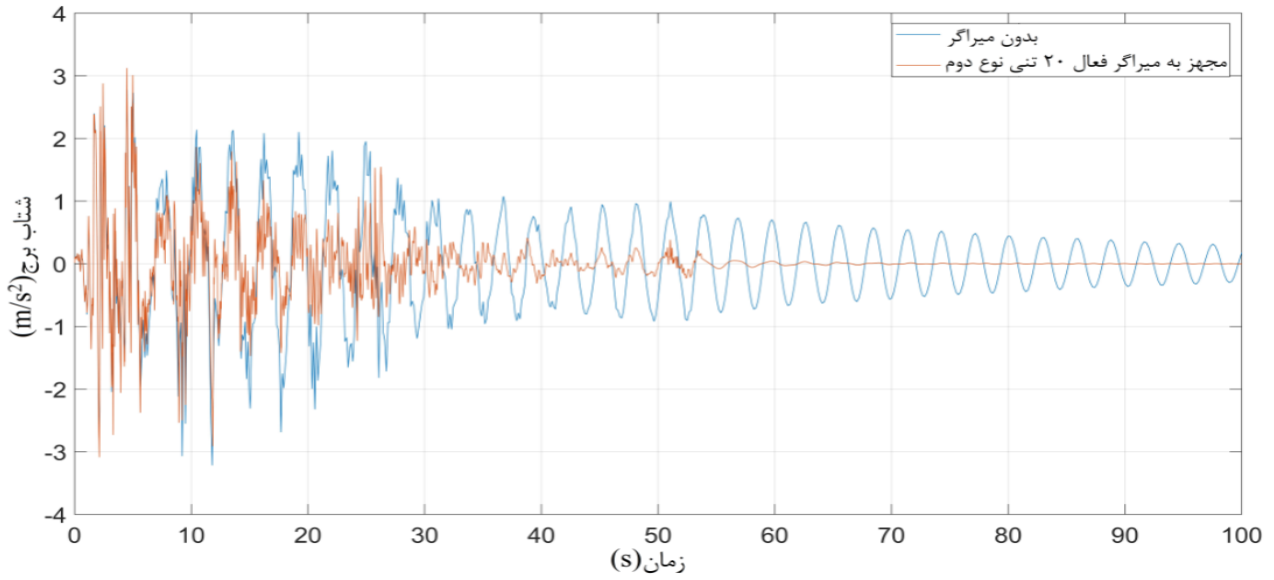
با توجه به شاخص‌های ذکر شده میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم به عنوان میراگر بهینه تحت زلزله السنترو انتخاب می‌گردد و جابه‌جایی نسبی بین این میراگر و برج توربین که باعث تولید نیروی کنترلی شده است در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است:

۳-۵- برش پایه

بیشینه برش پایه نیز برابر است با بیشینه جابه‌جایی برج در سختی برج که وابسته به شاخص اول است که در این توربین بادی در صورت عدم وجود میراگر ۸۱/۵۴ تن به دست آمده است و با وجود میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم ۴۳/۵ تن به دست آمده است که برش پایه به میزان ۰.۴۷٪ کاهش یافته است. شکل ۱۲ برش پایه برج توربین بادی تحت زلزله السنترو در حالات وجود انواع میراگر و عدم وجود میراگر را نشان می‌دهد.

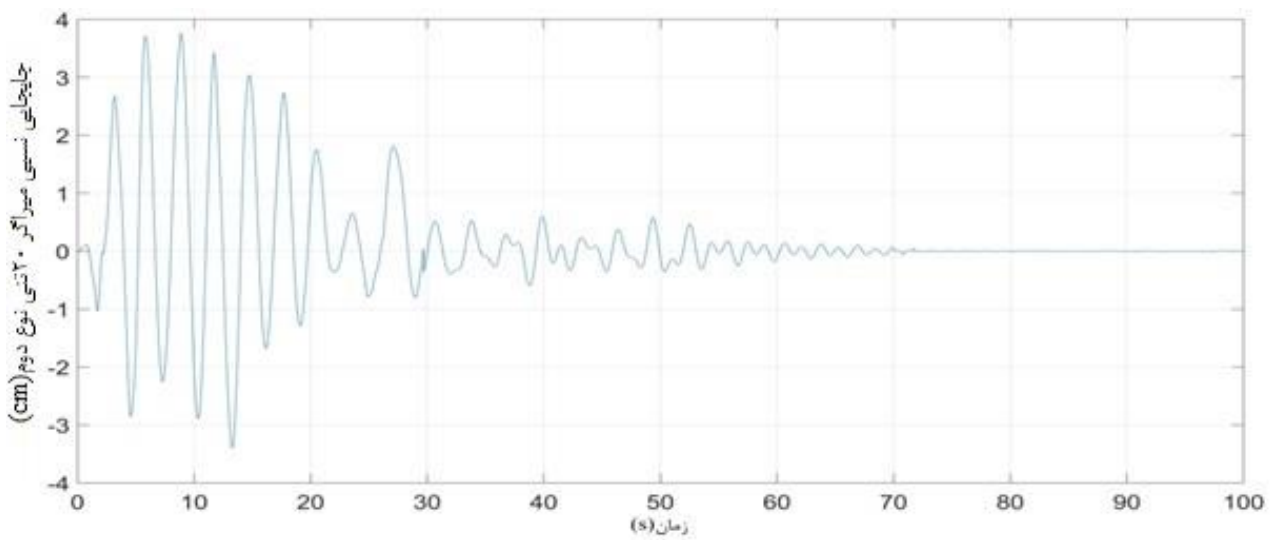
۴- کنترل ارتعاش توربین بادی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

به منظور کنترل ارتعاش این توربین بادی تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، ابتدا معیارهای شناسایی زلزله‌های حوزه دور و نزدیک معرفی می‌گردد و در ادامه با استفاده از شاخص‌های ارزیابی ذکر شده در بخش‌های قبل به بررسی عملکرد این میراگرها پرداخته می‌شود. با توجه به مراجع [۳۰ و ۲۹] در صورتی که رکورد زلزله حداقل مقادیر پارامترهای ارائه شده در جدول ۴ را دارا باشند، آن رکورد زلزله را می‌توان جزء زلزله‌های حوزه نزدیک به حساب آورد.



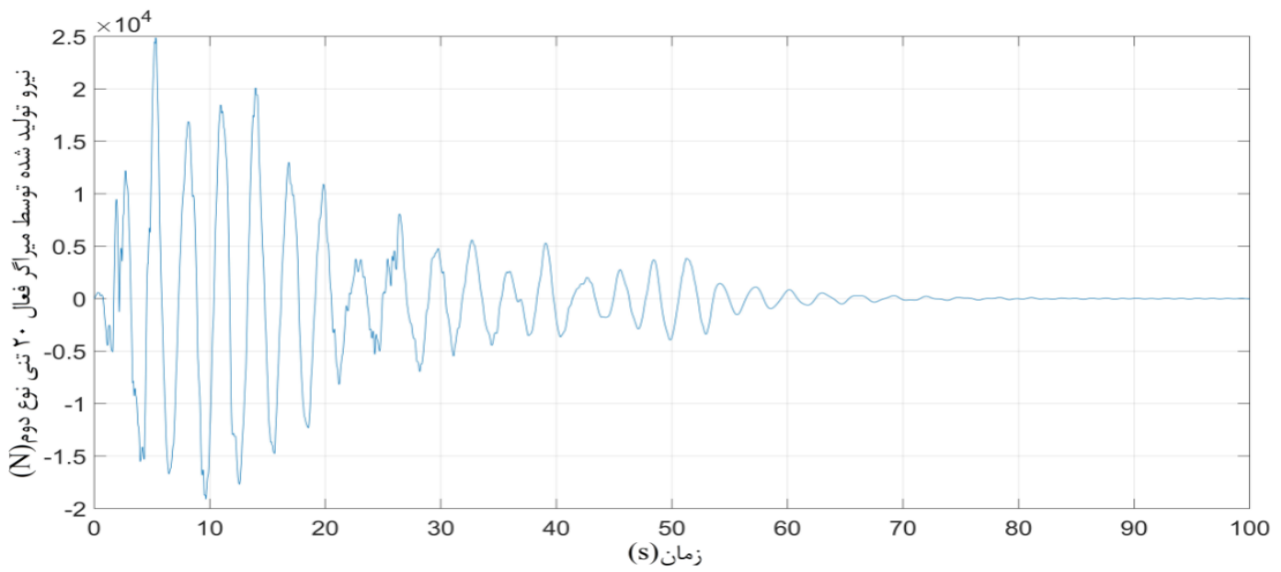
شکل ۹. مقایسه شتاب برج توربین بادی مجهز به میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم و شتاب برج توربین بادی بدون میراگر تحت زلزله السنترو

Fig. 9. Comparison between acceleration of wind turbine tower equipped with active 20-ton second damper and acceleration of wind turbine tower without damper under el-Centro earthquake



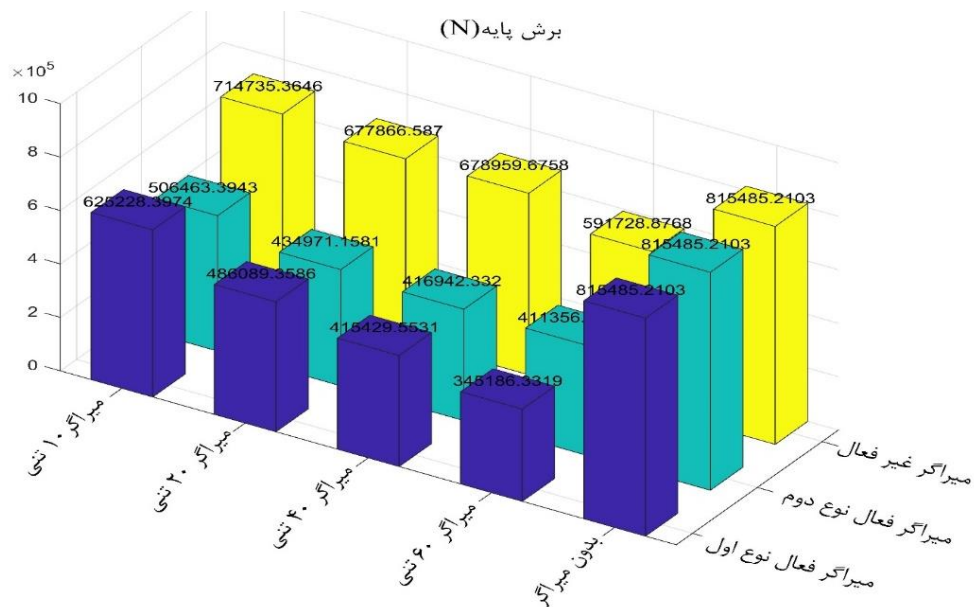
شکل ۱۰. جابه‌جایی نسبی میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم تحت زلزله السنترو

Fig. 10. Relative displacement of the active 20-ton second mass damper under el-Centro earthquake



شکل ۱۱. نیرو تولید شده توسط میراگر جرمی فعال ۲۰ تنی نوع دوم تحت زلزله السنترو

Fig. 11. The force generated by the active 20-ton second mass damper under el-Centro earthquake



شکل ۱۲. برش پایه تحت زلزله السنترو

Fig. 12. Base shear caused by el-Centro earthquake

جدول ۴. حداقل مقادیر پارامترهای زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 4. Minimum values of near-field earthquake parameters

Ground motion parameters	Amplitude	Frequency content	Duration	Energy	Lower Bound
PGA (ماکسیمم شتاب افقی زمین)	✓				0.2g
CA (تجمعی مطلق سرعت)	✓			✓	0.3 g.sec
PGV (ماکسیمم سرعت افقی زمین)	✓			✓	20 cm/sec
I _A (آریاس شدت)	✓		✓	✓	0.4 m/sec
I (پارامتر پتانسیل آسیب)	✓		✓		30 cm.sec ^{-0.75}
a _(rms) (ریشه دوم مجذور شتاب)	✓	✓	✓		0.5 m/sec ²

جدول ۵. مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک

Table 5. Characteristics of near-field earthquakes

نام زلزله	ایستگاه	مؤلفه	تاریخ وقوع	فاصله (KM)	بزرگا	PGA (g)	PGV (cm/s)	CAV (cm/s)	I _A (m/s)	a _{rms} (g)	I (cm.s ^{-0.75})
بم	بم	L	2003	0.05	6.6	0.8	124.12	2217.11	8	0.088	208.7
طبس	طبس	T	1978	1.79	7.35	0.86	123.4	3096.66	11.8	0.15	248.1
ناغان	ناغان	L	1997	5	6.1	0.75	51.41	750.42	2.63	0.09	68.65
نورتریچ	Rinaldi	L	1994	0	6.69	0.87	147.99	1789.42	7.51	0.156	242.6
سن سالوادور	Geo. Inv	L	1986	2.14	5.8	0.7	79.92	720.47	2.48	0.13	114.95

و با استفاده از شاخص‌های ارزیابی جابه‌جایی، سرعت و شتاب به مقایسه عملکرد این دو میراگر تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در شکل‌های ۱۳ الی ۲۴ پرداخته می‌شود.

در شکل ۱۳، شاخص جابه‌جایی با افزایش جرم میراگر در اکثر زلزله‌های حوزه نزدیک به جز زلزله طبس در ایستگاه طبس کاهش یافته است که بدان معناست با افزایش جرم میراگر فعال نوع اول، کاهش بیشتری در مقدار جابه‌جایی برج دیده می‌شود، اما در یک زلزله خاص طبس با افزایش جرم این میراگر افزایش بیشتری در جابه‌جایی برج مشاهده می‌شود؛ بنابراین در

با توجه به جدول ۴ برای زلزله‌های حوزه نزدیک، زلزله‌هایی انتخاب می‌شوند که حداقل مقادیر پارامترهای زلزله حوزه نزدیک را دارا باشند؛ و می‌توان مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک را در جدول ۵ مشاهده نمود [۳۰] و همچنین برای زلزله‌های حوزه دور زلزله‌هایی انتخاب می‌شوند که حداقل مقادیر پارامترهای زلزله حوزه نزدیک را نداشته باشند و می‌توان مشخصات زلزله‌های حوزه دور را نیز در جدول ۶ مشاهده نمود.

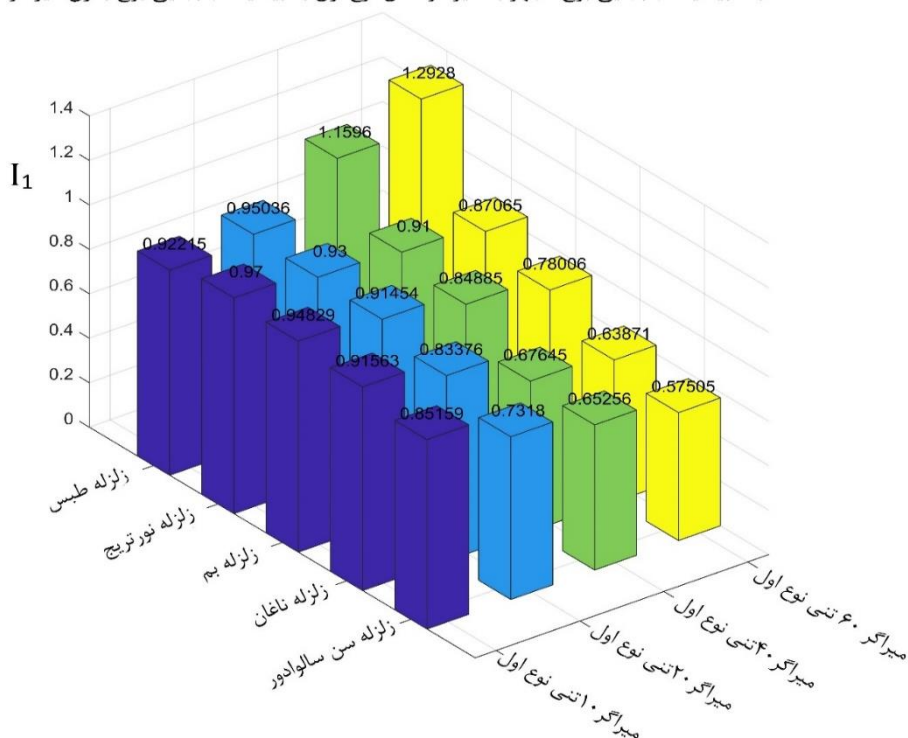
جهت کنترل ارتعاش توربین بادی تجهیز شده با میراگرهای جرمی فعال نوع اول و دوم، هر دو میراگر بر روی شدت جریان ۲ آمپر قرار داده می‌شوند

جدول ۶. مشخصات زلزله‌های حوزه دور

Table 6. Characteristics of far-field earthquakes

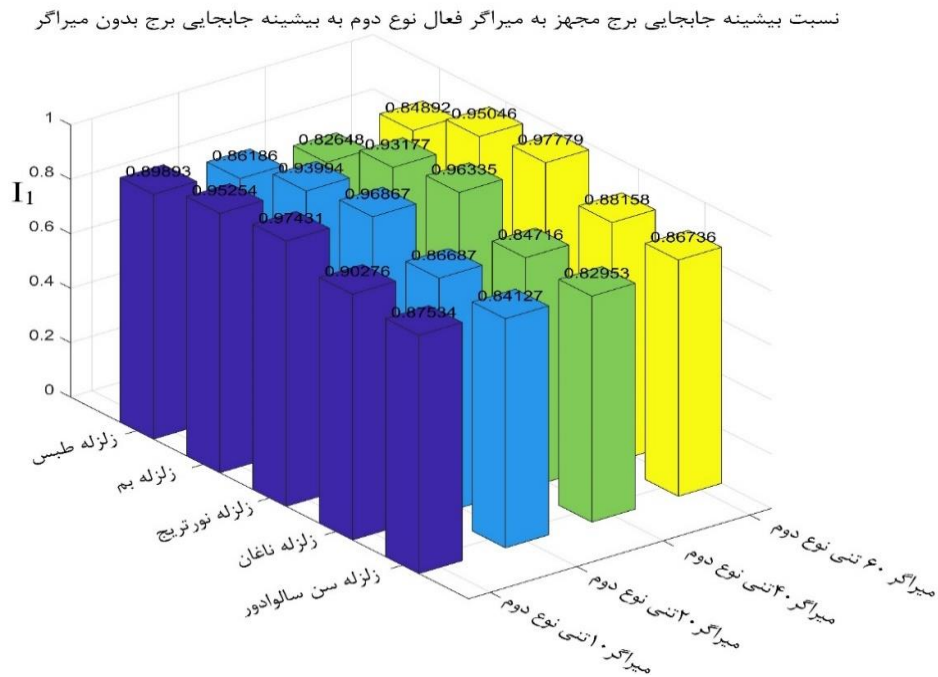
نام زلزله	ایستگاه	مؤلفه	تاریخ وقوع	فاصله	بزرگا	PGA (g)	PGV (cm/s)	CAV (cm/s)	I _A (m/s)	a _{rms} (g)	I
بم	جوشان	L	2003	133.3	6.6	0.025	1.45	112.71	0.012	0.0045	3.0
منجیل	تنکابن	L	1990	93.3	7.37	0.088	8.93	557.2	0.24	0.02	20.1
طیس	سده	L	1978	150.33	7.35	0.26	3.49	157.77	0.017	0.0054	8.1
نورتریج	Anacapa Island	L	1994	65.84	6.69	0.067	3.21	250.53	0.07	0.01	6.0
کوبه	MZH	L	1995	69.04	6.9	0.068	5.01	327.53	0.069	0.005	11.1

نسبت بیشینه جابجایی برج مجهز به میراگر فعال نوع اول به بیشینه جابجایی برج بدون میراگر



شکل ۱۳. شاخص جابه‌جایی برج مجهز به میراگر فعال نوع اول تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 13. Tower displacement index equipped with first active dampers under near-field earthquakes



شکل ۱۴. شاخص جابه‌جایی برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 14. Tower displacement index equipped with second active dampers under near-field earthquakes

ایستگاه طبس و زلزله بم ایستگاه بم، شاخص شتاب بیشتر از باقی حالات شده است با این حال مقدار شاخص در هر دو میراگرهای جرمی فعال ۱۰ و ۲۰ تنی نوع اول و دوم تفاوت زیادی دیده نمی‌شود ولی در جرم‌های بالاتر عملکرد میراگر نوع اول بهتر از نوع دوم بوده است.

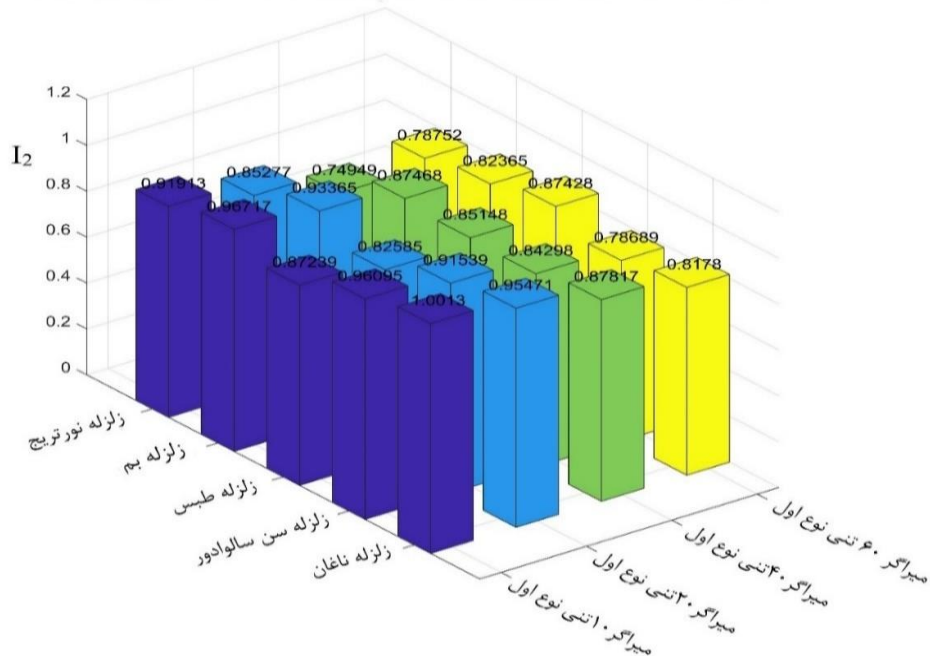
در شکل ۱۹ با افزایش جرم میراگر فعال نوع اول در زلزله‌های طبس در ایستگاه سده و منجیل در ایستگاه تنکابن، افزایش بیشینه جابه‌جایی برج و شاخص جابه‌جایی مشاهده می‌گردد، اما در باقی زلزله‌ها این اتفاق نمی‌افتد و با توجه به شکل ۲۰ با افزایش جرم میراگر فعال نوع دوم مقدار شاخص کم می‌گردد؛ بنابراین در زلزله‌های حوزه دور میراگر فعال نوع دوم عملکرد بهتری دارد و به جز در زلزله طبس ایستگاه سده، میراگر ۲۰ تنی نوع دوم عملکرد مشابهی مانند میراگر ۴۰ تنی از خود نشان داده است؛ بنابراین در زلزله‌های حوزه دور با کمی اغماض، میراگر ۲۰ و ۴۰ تنی نوع دوم به عنوان میراگر بهینه معرفی می‌گردد.

این مورد خاص بهتر است در صورت تمایل به استفاده از میراگر نوع اول، از میراگر با جرم کمتر استفاده شود، اما در شکل ۱۴ شاخص جابه‌جایی برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم در تمامی زلزله‌ها کاهش یافته است؛ و در هر دو حالت مجهز به میراگر نوع اول و دوم در اکثر حالات میراگر ۲۰ تنی عملکردی مشابه میراگر ۴۰ تنی داشته است بنابراین از دیدگاه این شاخص استفاده از میراگر ۲۰ تنی نوع دوم بهینه‌تر از باقی میراگرها است.

با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مقدار شاخص سرعت در اکثر زلزله‌های حوزه نزدیک در میراگر فعال نوع اول کمتر از میراگر فعال نوع دوم است در نتیجه از دیدگاه این شاخص عملکرد میراگر فعال نوع اول بهتر از نوع دوم بوده و در هر دو حالت تجهیز شده با میراگر نوع اول و دوم، میراگر ۲۰ تنی عملکردی مشابه میراگر ۴۰ تنی داشته است بنابراین با توجه به این شاخص، توصیه می‌گردد از میراگر ۲۰ تنی استفاده شود.

با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌گردد در دو زلزله طبس

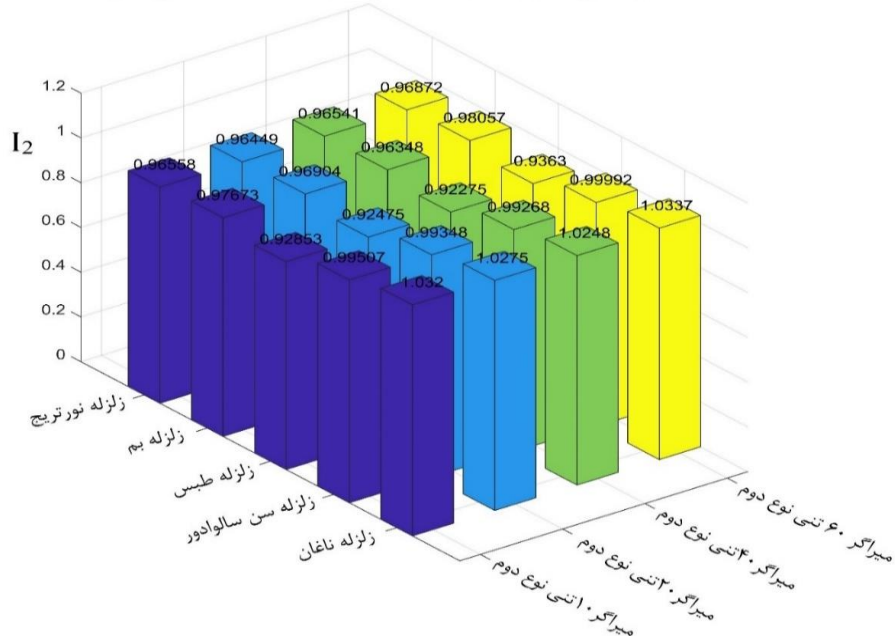
نسبت بیشینه سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع اول به بیشینه سرعت برج بدون میراگر



شکل ۱۵. شاخص سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع اول تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 15. Tower velocity index equipped with first active dampers under near-field earthquakes

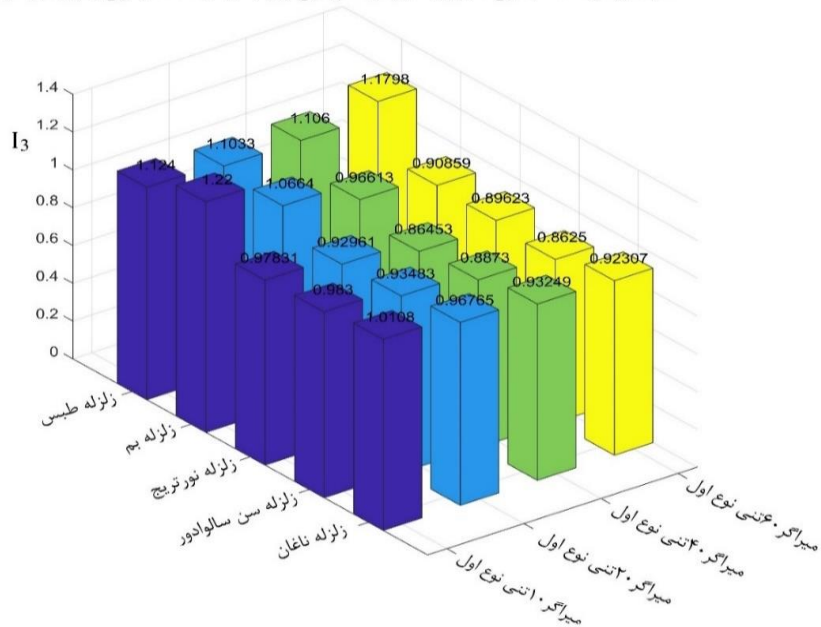
نسبت بیشینه سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم به بیشینه سرعت برج بدون میراگر



شکل ۱۶. شاخص سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 16. Tower velocity index equipped with second active dampers under near-field earthquakes

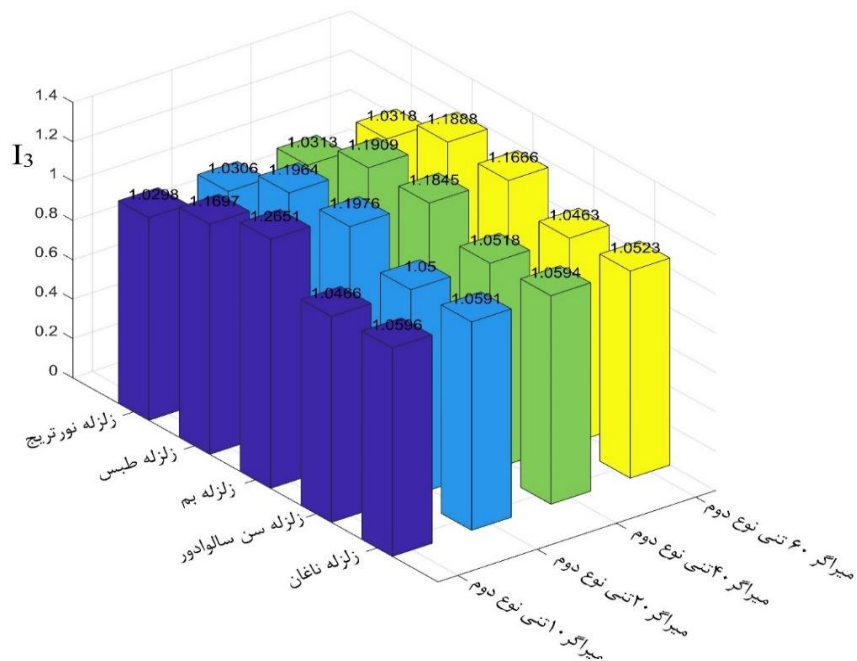
نسبت بیشینه شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع اول به بیشینه شتاب برج بدون میراگر



شکل ۱۷. شاخص شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع اول تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 17. Tower acceleration index equipped with first active dampers under near-field earthquakes

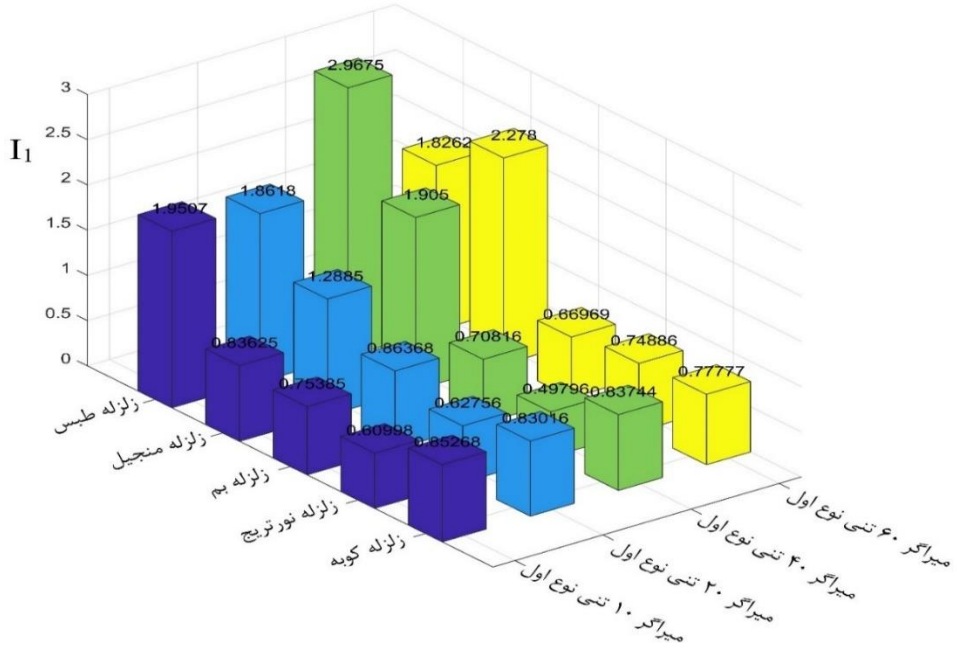
نسبت بیشینه شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم به بیشینه شتاب برج بدون میراگر



شکل ۱۸. شاخص شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

Fig. 18. Tower acceleration index equipped with second active dampers under near-field earthquakes

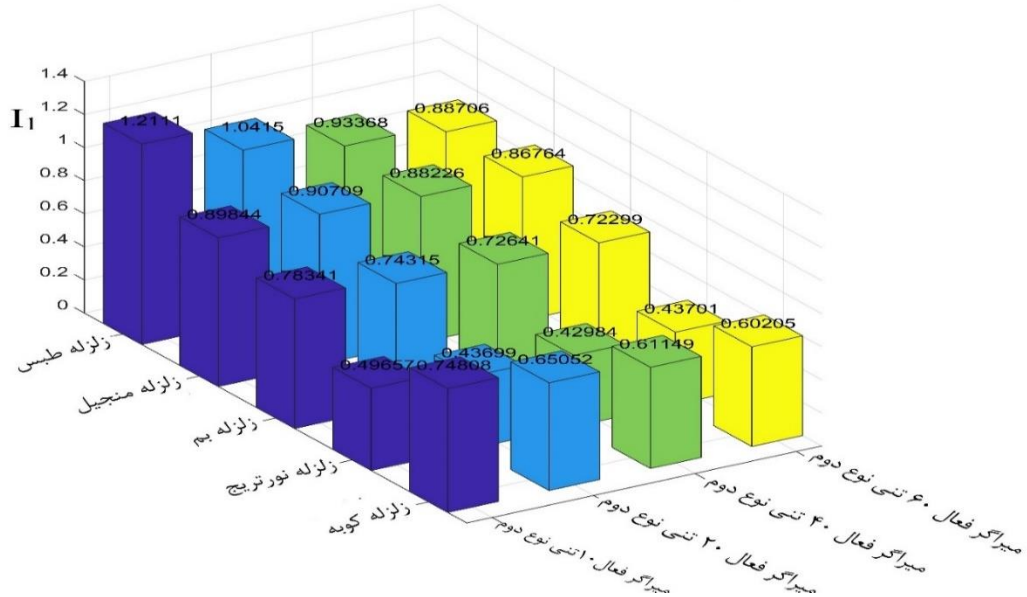
نسبت بیشینه جابجایی برج مجهز به میراگر فعال نوع اول به بیشینه جابجایی برج بدون میراگر



شکل ۱۹. شاخص جابه‌جایی برج مجهز به میراگر فعال نوع اول تحت زلزله حوزه دور

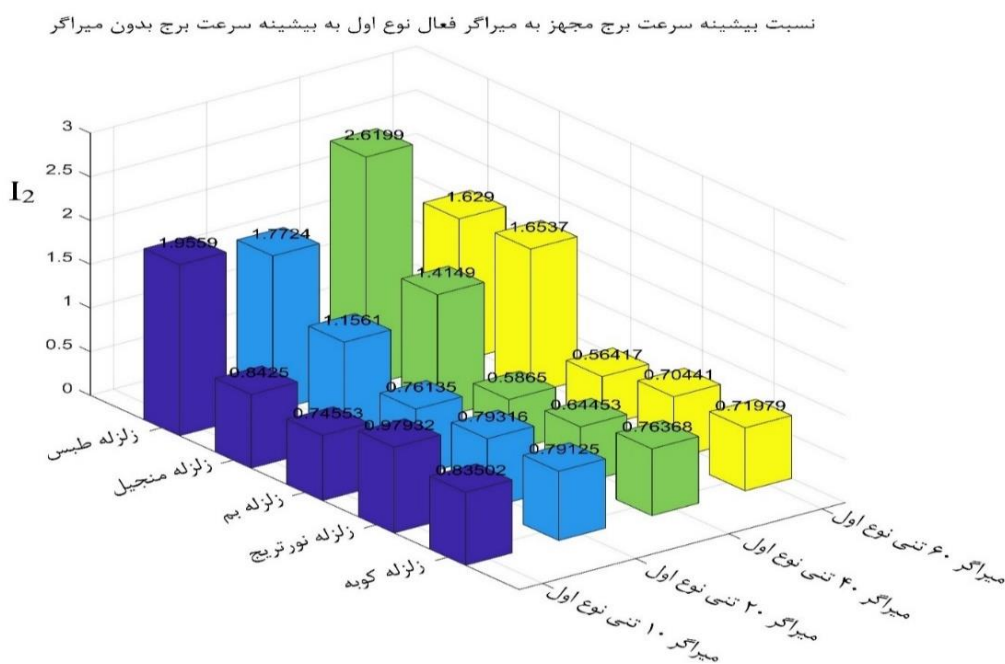
Fig. 19. Tower displacement index equipped with first active dampers under far-field earthquakes

نسبت بیشینه جابجایی برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم به بیشینه جابجایی برج بدون میراگر



شکل ۲۰. شاخص جابه‌جایی برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم تحت زلزله حوزه دور

Fig. 20. Tower displacement index equipped with second active dampers under far-field earthquakes



شکل ۲۱. شاخص سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع اول تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig. 21. Tower velocity index equipped with first active dampers under far-field earthquakes

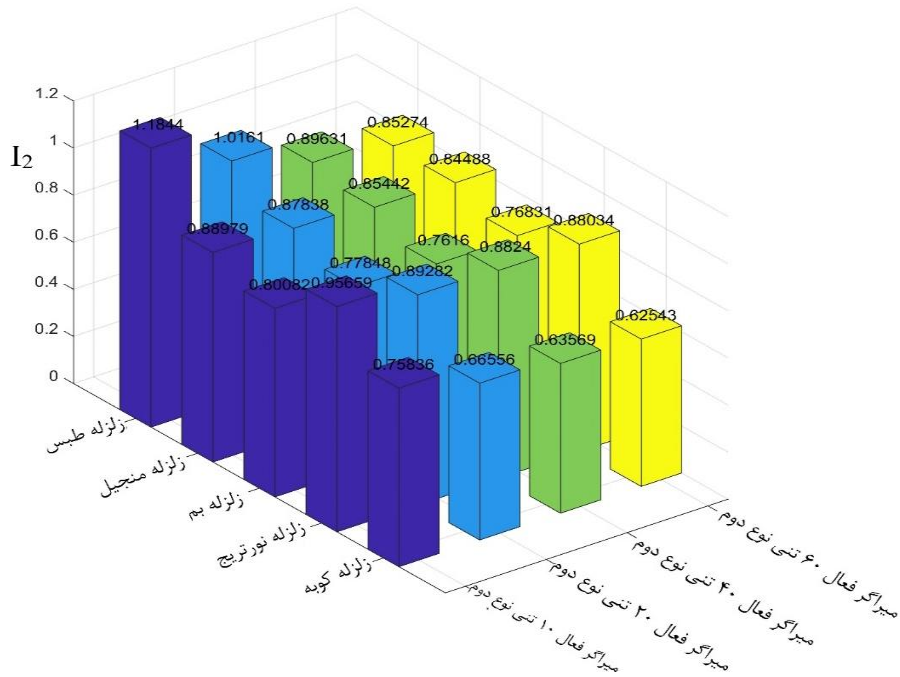
۵- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعه انجام گرفته از میان میراگرهای جرمی، میراگرهای فعال عملکرد بهتری نسبت به میراگرهای غیرفعال داشته‌اند. میراگرهای به کار رفته جرم‌هایی معادل ۱/۵٪، ۳٪، ۶٪ و ۹٪ جرم سازه را دارند و میراگری که جرمی معادل ۳٪ جرم سازه را دارد بهینه‌تر از باقی میراگرها بوده که در این مطالعه جرمی برابر با ۲۰ تن داشته است و در میان میراگرهای فعال، میراگر فعال نوع دوم عملکرد بهتری در زلزله‌های حوزه دور از خود نشان داده است اما عملکرد این دو میراگر نوع اول و دوم در زلزله‌های حوزه نزدیک بسیار به یکدیگر نزدیک بوده است به طوری که در شاخص اول که مهم‌ترین شاخص نیز بوده است میراگر فعال نوع دوم عملکرد بهتری داشته و در دو شاخص سرعت و شتاب میراگر فعال نوع اول عملکرد بهتری داشته است بنابراین در مجموع میراگر جرمی ۲۰ تنی فعال نوع دوم به عنوان میراگر بهینه معرفی می‌گردد و با استفاده از این میراگر، نتایج زیر حاصل شده است:

در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود در زلزله طیس، ایستگاه سده و زلزله منجیل، ایستگاه تنکابن، میراگر فعال نوع اول عملکرد مناسبی در شاخص سرعت نداشته است و با افزایش جرم میراگر در این دو زلزله مقدار شاخص افزایش می‌یابد؛ اما با توجه به شکل ۲۲ با افزایش جرم میراگر نوع دوم در تمامی زلزله‌های حوزه دور باعث کاهش مقدار این شاخص می‌شود، بنابراین از دیدگاه این شاخص نیز میراگر فعال نوع دوم عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

در شکل ۲۳، افزایش جرم میراگر نوع اول در اکثر زلزله‌ها به جز زلزله طیس در ایستگاه سده، کاهش میزان شاخص را به دنبال دارد اما در محدوده وزنی ۱۰ و ۲۰ تن تفاوت چندانی در کاهش شتاب دیده نمی‌شود همچنین در شکل ۲۴ مقدار شاخص با افزایش جرم میراگر تغییر چندانی ندارد؛ بنابراین از دیدگاه این شاخص نیز هر دو میراگر فعال نوع اول و دوم عملکرد تقریباً یکسانی از خود نشان داده‌اند.

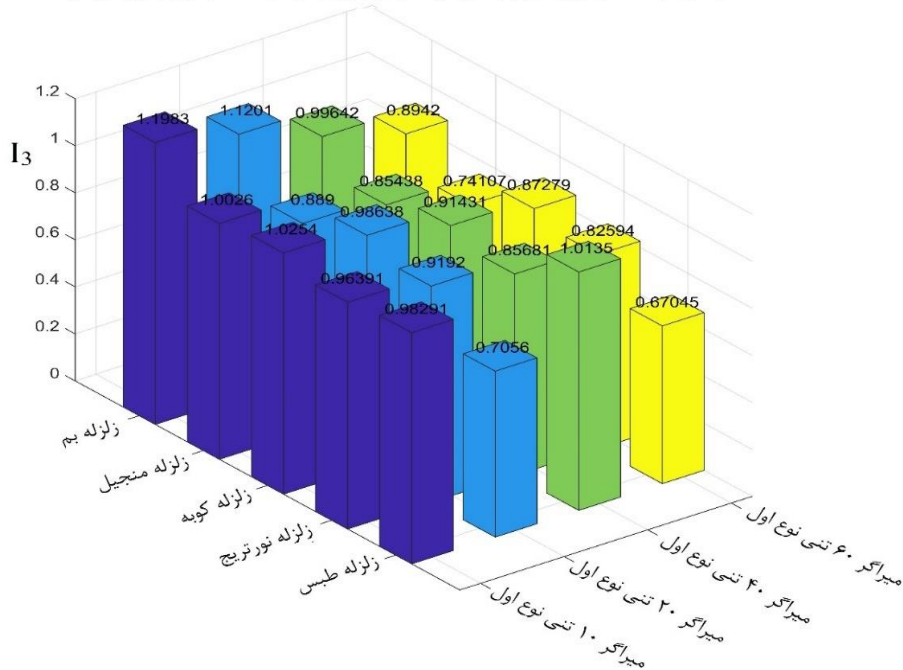
نسبت بیشینه سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم به بیشینه سرعت برج بدون میراگر



شکل ۲۲. شاخص سرعت برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم تحت زلزله‌های حوزه دور

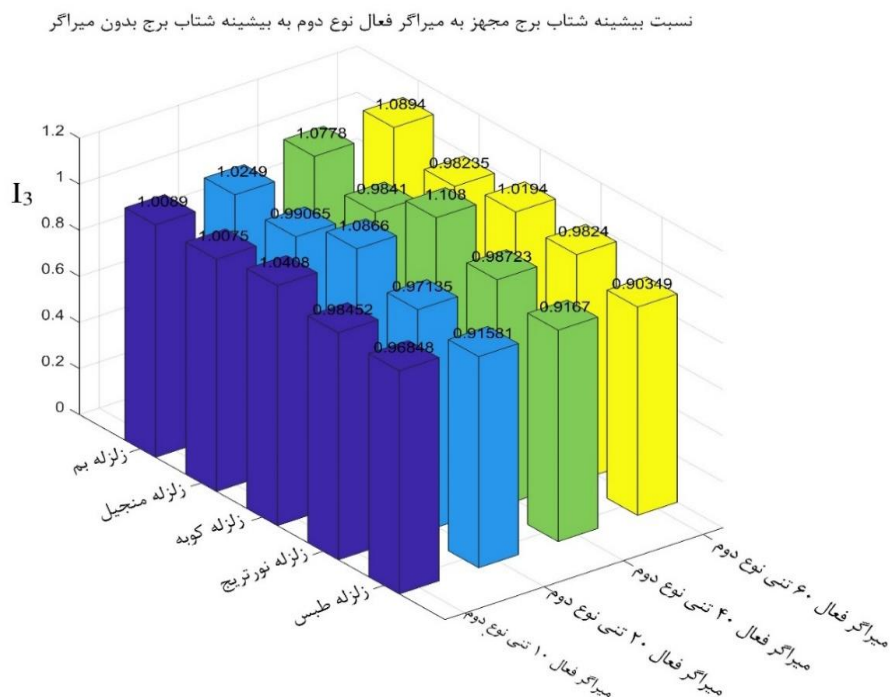
Fig. 22. Tower velocity index equipped with second active dampers under far-field earthquakes

نسبت بیشینه شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع اول به بیشینه شتاب برج بدون میراگر



شکل ۲۳. شاخص شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع اول تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig. 23. Tower acceleration index equipped with first active dampers under far-field earthquakes



شکل ۲۴. شاخص شتاب برج مجهز به میراگر فعال نوع دوم تحت زلزله‌های حوزه دور

Fig. 24. Tower acceleration index equipped with second active dampers under far-field earthquakes

995-1008, (In Persian).

- [4] M. Rahman, Z.C. Ong, W.T. Chong, S. Julai, S.Y. Khoo, Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51 (2015) 43-54.
- [5] P. Ghaderi, F. Amini, Adaptive block backstepping control for civil structures with unknown parameters subjected to seismic excitation, *Structural Control and Health Monitoring*, 24(2) (2017) e1875.
- [6] F. Amini, P. Ghaderi, Seismic motion control of structures: A developed adaptive backstepping approach, *Computers & Structures*, 114 (2013) 18-25.
- [7] H. Akramizadeh, S.M. Zahrai, M.S. Bozorgvar, Cooperative Coevolution Fuzzy Control of MR Damper for Damage Reduction of Structures, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4) (2018) 769-778, (In Persian).
- [8] M.A. Lackner, M.A. Rotea, Structural control of floating wind turbines, *Mechatronics*, 21(4) (2011) 704-719.

(۱) در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور با استفاده از این میراگر مقدار شاخص جابه‌جایی و شاخص سرعت کم می‌گردد.

(۲) بیشینه شتاب برج توربین بادی در برخی زلزله‌ها مانند زلزله السنترو تغییر محسوسی نداشته و در کل باعث بهبود رفتار دینامیکی شده است؛ اما در برخی دیگر افزایش مقدار این شاخص مشاهده می‌شود.

منابع

- [1] T. Dang, Introduction, history, and theory of wind power, in: *41st North American Power Symposium, IEEE*, 2009, pp. 1-6.
- [2] J.K. Kaldellis, D. Zafirakis, The wind energy (τ) evolution: A short review of a long history, *Renewable energy*, 36(7) (2011) 1887-1901.
- [3] M. Bahmani, S.M. Zahrai, Developing a Procedure for Simultaneous Vibration Control and Health Monitoring of Structures using Semi-Active Viscous Dampers, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(3) (2021)

- modeling and free vibration analysis of horizontal axis wind turbine blades in the flap-wise direction, *Renewable Energy*, 146 (2020) 1818-1832.
- [22] J. Arrigan, V. Pakrashi, B. Basu, S. Nagarajaiah, Control of flapwise vibrations in wind turbine blades using semi-active tuned mass dampers, *Structural Control and Health Monitoring*, 18(8) (2011) 840-851.
- [23] C. Sun, Mitigation of offshore wind turbine responses under wind and wave loading: Considering soil effects and damage, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(3) (2018) e2117.
- [24] C. Sun, V. Jahangiri, Fatigue damage mitigation of offshore wind turbines under real wind and wave conditions, *Engineering Structures*, 178 (2019) 472-483.
- [25] C. Huang, J. Arrigan, S. Nagarajaiah, B. Basu, Semi-active algorithm for edgewise vibration control in floating wind turbine blades, in: *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 2010, pp. 2097-2110.
- [26] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- [27] G. Yang, B. Spencer Jr, J. Carlson, M. Sain, Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, *Engineering structures*, 24(3) (2002) 309-323.
- [28] A.J. Friedman, J. Zhang, B. Phillips, Z. Jiang, A. Agrawal, S. Dyke, J. Ricles, B. Spencer, R. Sause, R. Christenson, Accommodating MR damper dynamics for control of large scale structural systems, (2010).
- [29] C.A. Maniatakis, I. Taflampas, C. Spyarakos, Identification of near-fault earthquake record characteristics, in: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Citeseer, 2008.
- [30] M. rafiee, A. Mahdavian, N. Hassani, Evaluation of near-fault records and identifications of pulses in it, in: *8th National Conference of Civil Engineering*, <https://civilica.com/doc/296599>, 1393, (In Persian).
- [9] M.A. Lackner, M.A. Rotea, Passive structural control of offshore wind turbines, *Wind energy*, 14(3) (2011) 373-388.
- [10] E.M. He, Y.Q. Hu, Y. Zhang, G.L. Yin, Vibration and load suppression of offshore floating wind turbine, in: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2014, pp. 891-896.
- [11] B. Fitzgerald, B. Basu, S.R. Nielsen, Active tuned mass dampers for control of in-plane vibrations of wind turbine blades, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(12) (2013) 1377-1396.
- [12] S. Colwell, B. Basu, Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control, *Engineering structures*, 31(2) (2009) 358-368.
- [13] J.-L. Chen, C.T. Georgakis, Spherical tuned liquid damper for vibration control in wind turbines, *Journal of Vibration and Control*, 21(10) (2015) 1875-1885.
- [14] E. Gücüyen, Analysis of offshore wind turbine tower under environmental loads, *Ships and Offshore Structures*, 12(4) (2017) 513-520.
- [15] B.Y. Dagli, Y. Tuskan, Ü. Gökkuş, Evaluation of offshore wind turbine tower dynamics with numerical analysis, *Advances in Civil Engineering*, 2018 (2018).
- [16] C. Sun, Semi-active control of monopile offshore wind turbines under multi-hazards, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99 (2018) 285-305.
- [17] A.S. Veletsos, B. Verbič, Vibration of viscoelastic foundations, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2(1) (1973) 87-102.
- [18] A.-Y. Tang, X.-F. Li, J.-X. Wu, K. Lee, Flapwise bending vibration of rotating tapered Rayleigh cantilever beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 112 (2015) 1-9.
- [19] L. Li, Y. Li, H. Lv, Q. Liu, Flapwise dynamic response of a wind turbine blade in super-harmonic resonance, *Journal of Sound and Vibration*, 331(17) (2012) 4025-4044.
- [20] D. Ju, Q. Sun, Modeling of a wind turbine rotor blade system, *Journal of Vibration and Acoustics*, 139(5) (2017).
- [21] H. Jokar, M. Mahzoon, R. Vatankhah, Dynamic

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Ghaderi, A. H. Mohammadzade, Vibration control of wind turbine by using active mass damper equipped with a magnetic fluid, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4483-4510.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20342.7401](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20342.7401)



