

تعیین مشخصات بهینه‌ی میراگر جرمی با ترکیب پاسخ‌های پایدار و گذرا در نوسان‌های میرا

جواد علامتیان* (استادیار)

پیمان اشرفی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

سجاد واحدی‌گرده (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۳۳-۲، شماره ۲، ص ۳۵-۴۹)
دوری ۲-۳۳، شماره ۲/۲، ص ۳۵-۴۹

در پژوهش حاضر، روش نوینی برای تنظیم میراگر جرمی با در نظر گرفتن هم‌زمان پاسخ‌های پایدار و گذرا و میرایی سازه ارائه شده است. برای انجام این کار، تابع اولیه‌ی زمانی نیومارک اصلاح شده و فرایند بهینه‌سازی با کمیته‌سازی میانگین قدرمطلق نسبت جابه‌جایی سازه انجام شده است. در نتیجه، مقادیر مختلف نسبت جرم و بسامد سازه و نسبت‌های بهینه‌ی بسامد میراگر جرمی به صورت عددی به دست آمده است. سنجش عملکرد میراگر جرمی پیشنهادی با دو میراگر جرمی دیگر نشان می‌دهد که برای نسبت‌های جرمی کاربردی، احتمال کوچک بودن پاسخ سازه‌ی کنترل شده با شیوه‌ی پیشنهادی بیش از دیگر روش‌هاست. نتایج عددی نیز آشکار می‌سازد که برای حالت نزدیک به تشدید، اگرچه تمام میراگرها با خارج ساختن سازه از حالت ذکر شده سبب کاهش جابه‌جایی آن می‌شوند، ولی میراگر پیشنهادی، اثر کاهنده‌تری در پاسخ سازه دارد.

alamatian@mshdiau.ac.ir
peyman.ashrafi@gmail.com
sajjad.vahedi@gmail.com

واژگان کلیدی: میراگر جرمی، سختی بهینه، پاسخ‌های پایدار و گذرا، روش نیومارک.

۱. مقدمه

میراگر جرمی یکی از مطمئن‌ترین ابزارهای کنترل سازه است، که معمولاً از یک جرم که به وسیله‌ی یک فنر و میراگر ویسکوز به سازه‌ی اصلی متصل شده است، تشکیل می‌شود. عملکرد میراگر جرمی به چگونگی تنظیم آن بستگی دارد. برای افزایش کارایی میراگر جرمی، تعیین ویژگی‌های آن، حائز اهمیت بسیاری است. لذا، ویژگی‌های بهینه مشخصاتی هستند که به ازاء آن‌ها، میراگر جرمی بهترین عملکرد را داشته باشد. پژوهشگران راهکارهای مختلفی را برای تعیین ویژگی‌های ذکر شده پیشنهاد کرده‌اند.

در سال ۲۰۰۳، سامانه‌ی دو درجه آزادی نامیرا، که از سازه‌ی اصلی و میراگر جرمی تشکیل شده است، تحت حرکت هارمونیک زمین بررسی شده و با صفرکردن پاسخ پایدار سازه، سختی بهینه‌ی میراگر جرمی به دست آمده و سامانه‌ی دارای میرایی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱]

از آنجا که عامل‌های بهینه‌ی میراگر جرمی به ویژگی‌های سازه و نیروی وارد بر آن بستگی دارد، تعیین منحصر به فرد آنها کار دشواری خواهد بود. با وجود این، می‌توان مشخصات بهینه را به صورت مستقل از بارگذاری نیز جستجو کرد و آنها را با توجه به ویژگی‌های دینامیکی سازه به دست آورد. بر این اساس، به صورت عددی به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۸/۷، پذیرش ۱۳۹۴/۹/۱۴.

جستجوی مقادیر بهینه‌ی میراگر جرمی پرداخته شده و با برآزش داده‌های به دست آمده روابطی برای میرایی و تنظیم بهینه‌ی میراگر جرمی ارائه شده است.^[۲] همچنین میراگرهای جرمی با تحلیل مودی سامانه‌ی کلاسیک دو درجه آزادی بررسی شده و رابطه‌سازی‌ها براساس انرژی نسبی جنبشی و کرنشی سامانه انجام شده است.^[۳] از آنجا که افزایش میرایی از پاسخ سازه‌ها می‌کاهد، میراگرهای جرمی با میرایی بیشینه توصیف و در آن بیشینه‌ی میرایی قابل دست‌یابی به منزله‌ی مقدار بهینه پیشنهاد شده است.^[۴] همچنین در سال ۲۰۱۲، با بیشینه‌سازی انرژی جذب شده به وسیله‌ی میراگر جرمی و کمیته‌سازی انرژی جنبشی سازه، کمیت‌های بهینه‌ی میراگر جرمی به دست آمده است.^[۵] استفاده از میراگر جرمی در کاهش احتمال خرابی سازه در زمین لرزه‌های نزدیک گسل نیز مؤثر است. پژوهش‌های انجام شده درباره‌ی چنین زلزله‌هایی نشان می‌دهند که اگر بسامد غالب زلزله و بسامد اصلی سازه نزدیک یکدیگر باشند، استفاده از این وسیله مفید خواهد بود؛ ولی در صورتی که دو بسامد مذکور با هم تفاوت داشته باشند، میراگر جرمی تأثیر چندانی نخواهد داشت.^[۶] میراگر جرمی با تمام ویژگی‌های مناسب، یک کاستی اساسی دارد؛ به طوری که ممکن است عملکرد سازه با تنظیم نادرست بسامد و یا میرایی غیربهینه‌ی میراگر بدتر شود. یک راهکار برای رفع این کاستی، استفاده از چند میراگر جرمی با ویژگی‌های دینامیکی مختلف است. میراگر جرمی چندگانه از چند میراگر جرمی تشکیل می‌شود.

همچنین در پژوهش دیگری رفتار سازه‌یی که با یک میراگر جرمی غیرخطی و یک میراگر جرمی نیمه‌فعال کنترل می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که وقتی میراگر جرمی نیمه‌فعال به صورت سری به سازه‌ی اصلی و میراگر جرمی غیرخطی متصل می‌شود، رفتار سامانه بهبود پیدا می‌کند. لذا میراگر مذکور با جلوگیری از ورود میراگر جرمی غیرخطی به محدوده‌ی غیرخطی، دامنه‌ی پاسخ آن را کم می‌کند؛ در نتیجه جابه‌جایی سازه‌ی اصلی نیز به شدت کاهش می‌یابد.^[۱۹] اگرچه پژوهش‌های بسیاری درباره‌ی یافتن ویژگی‌های بهینه‌ی میراگر جرمی انجام شده است، ولی کمتر به تأثیر پاسخ‌گذاری سازه در این ویژگی‌ها توجه شده است. از محدود مطالعاتی که در آن، این بخش از پاسخ‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است، می‌توان به پژوهش بیسنا و کاروسو اشاره کرد، که در آن مشخصات بهینه‌ی میراگر جرمی فقط با در نظر گرفتن قسمت‌گذاری پاسخ به دست آمده‌اند.^[۲۰] و نیز در سال ۲۰۱۵، مشخصات میراگر جرمی برای سازه‌ی نامیرا با ترکیب پاسخ‌های پایدار و گذرا به دست آمده است.^[۲۱]

در نوشتار حاضر، به ترکیب اثر پاسخ‌های پایدار و گذرا برای طراحی میراگرهای جرمی در سازه‌ی میرا پرداخته شده است. به سخن دیگر، کمیت‌های جرم و سختی میراگر جرمی به گونه‌یی تعیین شده‌اند که اثر پاسخ‌های پایدار و گذرا در نوسان یک سازه‌ی میرا به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند.

۲. معادله‌ی حرکت

سامانه‌ی دو درجه آزادی، که از سازه‌ی اصلی و میراگر جرمی تشکیل می‌شود، در شکل ۱ نشان داده شده است، که در آن m ، k و c به ترتیب جرم، سختی و ضریب میرایی سازه و m_d و k_d جرم و سختی میراگر جرمی هستند. جابه‌جایی زمین با u_g و جابه‌جایی سازه و جرم میراگر نسبت به زمین به ترتیب با u و u_d نشان داده شده‌اند. این سامانه تحت حرکت هارمونیک زمین به صورت رابطه‌ی ۱ قرار دارد:

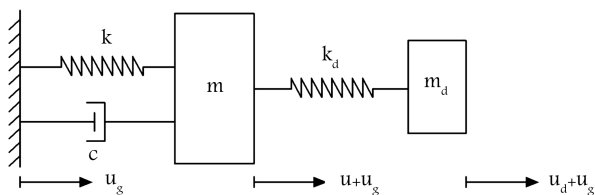
$$\ddot{u}_g = a \sin(\Omega t) \quad (1)$$

که در آن، a و Ω به ترتیب دامنه‌ی شتاب زمین و بسامد حرکت آن هستند. همچنین، زمان با t نشان داده شده است. ماتریس‌های جرم، سختی، و میرایی سامانه‌ی دو درجه آزادی به صورت روابط ۲ الی ۴ هستند:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K = \begin{bmatrix} k + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$



شکل ۱. سامانه‌ی دو درجه‌ی آزادی شامل سازه و میراگر جرمی.

در این حالت، می‌توان یک یا چند مود نوسان مختلف را کنترل کرد. این وسیله نسبت به یک میراگر جرمی، پهنای باند بسامد وسیع‌تری را به وجود می‌آورد؛ به گونه‌یی که دامنه‌ی بسامد سازه به شکل مناسب‌تری پوشش داده خواهد شد. از سوی دیگر، در میراگرهای چندگانه به دلیل استفاده از چند میراگر جرمی جداگانه، احتمال خروج از تنظیم نیز کمتر می‌شود. همچنین، در میراگرهای جرمی چندگانه، به ازاء نسبت جرمی مشخص، افزایش تعداد میراگرهای جرمی سبب بهبود عملکرد آن می‌شود؛ هر چند، به میرایی کوچک‌تری برای هر میراگر نیاز خواهد بود.^[۷] از این رو، در پاره‌یی موارد، میرایی اندک سبب حرکت زیاد جرم این قبیل میراگرها می‌شود. بنابراین، مطالعاتی برای بهینه‌سازی دو مرحله‌یی یک میراگر جرمی با در نظر گرفتن حرکت آن آغاز و ضریبی برای نشان دادن اهمیت کاهش حرکت میراگر در نظر گرفته شده و این نتیجه به دست آمده است که با اندکی کاهش در تأثیر کنترلی میراگر در پاسخ سازه، می‌توان حرکت آن را به طور چشم‌گیری کاهش داد.^[۸] در پژوهش دیگری نیز همین روش بهینه‌سازی دو مرحله‌یی ذکر شده برای طراحی میراگر جرمی چندگانه گسترش یافته است.^[۹] برای بررسی تأثیر میراگر جرمی چندگانه نیز در سازه‌های بلند به صورت آزمایشی و عددی از دو میراگر جرمی آونکی برای کنترل سازه استفاده شده است، که کاهش قابل توجهی در دامنه‌ی ارتعاش خمشی و پیچشی سازه‌ی کنترل شده نشان داده شده است.^[۱۰] همچنین در بفت طبقات و شتاب سازه برای سنجش عملکرد سازه‌ی کنترل شده با میراگر جرمی چندگانه انتخاب شده و رابطه‌سازی پیشنهادی پژوهشگران، جرم کل میراگر را به همراه محدود ساختن جذر میانگین مربعات پاسخ سازه، کمیته ساخته است.^[۱۱]

با وجود این، زمانی که ساختمان بلندتر و سنگین‌تر می‌شود، برای دست‌یابی به سطح کاهش پاسخ مورد نیاز در هنگام وقوع زلزله یا باد شدید، به یک جرم اضافی سنگین‌تر در میراگر جرمی نیاز است، که انتظار می‌رود حرکت بزرگ‌تری نیز داشته باشد. این جرم سنگین به فضای بسیار بزرگی نیاز دارد. در نتیجه، استفاده از آن از نظر اقتصادی و اجرایی ممکن نیست. یک راهکار برای رفع مشکل مذکور، استفاده از کنترل فعال است. سازه‌های فعال، سازه‌هایی هستند که توسط حسگر و محرک، پاسخ سازه را کاهش می‌دهند. میراگر جرمی فعال نخستین سازوکاری است که برای کنترل فعال سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه استفاده شده‌اند.^[۱۲] چون میراگر جرمی فعال، اجزاء فعال و غیرفعال دارد، حتی اگر محرک هم از کار بیفتد، همچنان به کنترل سازه کمک شایانی خواهد کرد.^[۱۳]

اگر سامانه‌ی کنترل فعال، برای کاهش حرکت سازه مورد استفاده قرار گیرد، باید نیروی بزرگی تولید شود. محدودیت توان محرک، از اجرایی شدن سامانه‌ی مذکور در ساختمان‌های واقعی جلوگیری می‌کند. از این رو، میراگرهای جرمی چندگانه‌ی فعال معرفی^[۱۴] و عملکرد میراگرهای جرمی چندگانه‌ی فعال برای سازه‌های نامتقارن بررسی شده است.^[۱۵] همچنین مطالعاتی بر روی میراگرهای جرمی چندگانه‌ی فعال، برای سازه‌های نامتقارن و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه انجام شده است.^[۱۶] با وجود این، سامانه‌های فعال نیازمند منابع قدرت بزرگی هستند و مشکلات اجرایی دارند. در نتیجه، کنترل نیمه‌فعال به عنوان روشی مؤثر برای کاهش خسارت‌های وارد به سازه به وجود آمده است. میراگر جرمی نیمه‌فعال، یک جذب‌کننده‌ی ارتعاش است، که با ویژگی‌های خود و بدون وارد کردن نیروی مستقیم می‌تواند نوسان‌های سازه را کاهش دهد. از نظر برخی پژوهشگران، میراگر جرمی نیمه‌فعال می‌تواند با مصرف توان کمتر، عملکردی مشابه میراگر جرمی فعال داشته باشد، لذا میراگر جرمی نیمه‌فعال با سختی متغیر مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۷] نمونه‌ی دیگری از میراگرهای جرمی نیمه‌فعال در سال ۲۰۱۰ معرفی شده است، که در آن از یک فنر با تکیه‌گاه متحرک به عنوان وسیله‌ی اتلاف انرژی سازه استفاده شده است.^[۱۸]

معادله‌ی حرکت را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۵ نوشت:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -MI\ddot{u}_g \quad (5)$$

که در آن، I بردار ستونی با درایه‌های واحد و $U = \{u \ u_d\}^T$ بردار جابه‌جایی است.

بر اساس رابطه‌ی ۴، سامانه‌ی مذکور میرایی غیرکلاسیک دارد. بنابراین، معادلات مودی به وسیله‌ی میرایی با یکدیگر درگیر شده و جداسازی آنها امکان‌پذیر نخواهد بود. پس نمی‌توان جابه‌جایی سازه را با تحلیل مودی به دست آورد و باید از روش‌های حل عددی استفاده کرد. در نوشتار حاضر، با استفاده از فرایندهای عددی، ویژگی‌های بهینه‌ی میراگر جرمی برای سازه‌ی میرا به دست آمده‌اند. این راهکار، فرایندی نوین در طراحی میراگر جرمی سازه‌های واقعی، که میرایی دارند، خواهد بود.

۳. روش نیومارک اصلاح شده

همان گونه که پیش‌تر اشاره شده، به دلیل غیرکلاسیک بودن میرایی سامانه‌ی دو درجه آزادی، استفاده از تحلیل مودی ممکن نیست و باید از روش‌های حل عددی استفاده شود. برای به دست آوردن پاسخ سازه‌ها به صورت عددی روش‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا از روش نیومارک استفاده شده است، که در آن فرض می‌شود جابه‌جایی، سرعت، و شتاب سازه در لحظه‌ی t_i معلوم باشند، ولی در لحظه‌ی t_{i+1} هیچ کدام از پاسخ‌ها مشخص نیستند. پس، باید جابه‌جایی سازه را از لحظه‌ی نخست تا زمان مورد نظر به دست آورد. برای این کار، گام زمانی به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (6)$$

در جدول ۱، روش نیومارک به صورت خلاصه و برای حل مستقیم معادلات حرکت ارائه شده و در آن، زیرنویس ۰ برای نشان دادن مقدار کمیت‌های مختلف در لحظه‌ی

جدول ۱. روش نیومارک. [۲۳]

۱. محاسبات اولیه:	
۱.۱. حل کردن	$M\ddot{U}_0 = P_0 - C\dot{U}_0 - KU_0 \Rightarrow \ddot{U}_0$
۲.۱. انتخاب	Δt
۳.۱	$\hat{K} = K + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}M$
۴.۱	$a = \frac{1}{\beta\Delta t}M + \frac{\gamma}{\beta}C$ $b = \frac{1}{\gamma\beta}M + \Delta t(\frac{\gamma}{\gamma\beta} - 1)C$
۲. محاسبات برای هر گام زمانی i :	
۱.۲	$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i + a\dot{U}_i + b\ddot{U}_i$
۲.۲	حل کردن $\hat{K}\Delta U_i = \Delta\hat{P}_i \Rightarrow \Delta U_i$
۳.۲	$\Delta\dot{U}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta U_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_i + \Delta t(1 - \frac{\gamma}{\gamma\beta})\ddot{U}_i$
۴.۲	$\Delta\ddot{U}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_i - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{U}_i - \frac{1}{\gamma\beta}\ddot{U}_i$
۵.۲	$U_{i+1} = U_i + \Delta U_i, \dot{U}_{i+1} = \dot{U}_i + \Delta\dot{U}_i,$ $\ddot{U}_{i+1} = \ddot{U}_i + \Delta\ddot{U}_i$
۳. تکرار برای گام زمانی بعدی: جای‌گذاری i با $i+1$ و به کار بردن مراحل ۱-۲ تا ۵-۲ زمانی بعدی.	

نخست استفاده شده است. اگر سازه تحت حرکت زمین باشد، می‌توان بردار نیرو را از رابطه‌ی ۷ جایگزین کرد:

$$P_i = -MI\ddot{u}_{g_i} \quad (7)$$

کمیت ΔP_i از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\Delta P_i = P_{i+1} - P_i \quad (8)$$

همچنین، \ddot{U} و \dot{U} به ترتیب برای نشان دادن بردار سرعت و شتاب استفاده می‌شوند. دو ضریب β و γ ضرایب نیومارک هستند. در روش نیومارک، فقط در صورتی میرایی ساختگی در سازه به وجود نمی‌آید که $\frac{1}{\beta} = \gamma$ باشد؛ همچنین، معمولاً ضریب β را برابر $\frac{1}{6}$ یا $\frac{1}{4}$ در نظر می‌گیرند، که به ترتیب معادل روش شتاب میانگین و شتاب خطی هستند. [۲۲] در اینجا، از روش شتاب خطی، که دقیق‌تر از روش دیگر است، استفاده شده است. [۲۳] روش نیومارک به ازاء رابطه‌ی ۹ پایدار است: [۲۲]

$$\Delta t \leq \frac{T_J}{\pi\sqrt{1-4\beta}} \quad (9)$$

یعنی گام زمانی باید به اندازه‌ی کافی کوچک‌تر از این مقدار باشد، تا حل عددی پایدار شود. کمیت T_J ، دوره‌ی تناوب آخرین مود سامانه‌ی مورد نظر یا به عبارت دیگر کوتاه‌ترین دوره‌ی تناوب آن است. با توجه به رابطه‌ی ۹، اگر $\beta = \frac{1}{6}$ در نظر گرفته شود، شرط پایداری به شکل رابطه‌ی ۱۰ خواهد بود:

$$\beta = \frac{1}{6} \Rightarrow \Delta t \leq 0.551 T_J \quad (10)$$

همچنین، شرط هم‌گرایی روش نیومارک در رابطه‌ی ۱۱ نشان داده شده است: [۲۲]

$$\Delta t \leq \frac{T_J}{2\pi\sqrt{\beta}} \quad (11)$$

که برای $\beta = \frac{1}{6}$ به شکل رابطه‌ی ۱۲ خواهد بود:

$$\beta = \frac{1}{6} \Rightarrow \Delta t \leq 0.389 T_J \quad (12)$$

در روش نیومارک، جابه‌جایی سازه برای مقادیر مختلف a, k_d, m_d, c, k, m و Ω نسبت به زمان به دست می‌آید. چنان‌که مشاهده می‌شود با توجه به اینکه تعداد متغیرهای تأثیرگذار در جابه‌جایی سازه زیاد است، باید راهکاری برای کاهش کمیت‌های ذکر شده اندیشید. بنابراین، برای اینکه بتوان مقادیر بهینه را برای تنظیم میراگر جرمی یافت، لازم است تا کمیت‌های جدیدی تعریف و اصلاحاتی در روش نیومارک ایجاد شود. این کار با تعریف کمیت‌های ترکیبی مطابق روابط ۱۳ الی ۱۵ انجام می‌شود:

$$\mu = \frac{m_d}{m} \quad (13)$$

$$f = \frac{\Omega}{\omega_s} \quad (14)$$

$$f_d = \frac{\Omega}{\omega_d} \quad (15)$$

که در آن‌ها، کمیت‌های μ ، f و f_d به ترتیب نسبت جرم، نسبت بسامد سازه، و نسبت بسامد میراگر جرمی را نشان می‌دهند. بسامد طبیعی سازه و میراگر جرمی، در حالتی

جدول ۲. روش نیومارک اصلاح شده.

۱-۱. محاسبات اولیه:	$M' \ddot{D}_0 = P'_0 - \gamma \xi C' \dot{D}_0 - K' D_0 \Rightarrow \ddot{D}_0$
۱-۲. انتخاب	Δt_{ω}
۳-۱.	$\tilde{K} = K' + \frac{\gamma \xi \gamma}{\beta \Delta t_{\omega}} C' + \frac{1}{\beta (\Delta t_{\omega})^2} M'$
۴-۱.	$a = \frac{1}{\gamma \beta \xi \Delta t_{\omega}} M' + \frac{\gamma}{\beta} C'$
	$b = \frac{1}{\gamma \beta} M' + \gamma \xi \Delta t_{\omega} (\frac{\gamma}{\beta} - 1) C'$
۲. محاسبات برای هر گام زمانی i :	
۱-۲.	$\Delta \tilde{P}_i = \Delta P'_i + a \dot{D}_i + b \ddot{D}_i$
۲-۲. حل کردن	$\tilde{K} \Delta D_i = \Delta \tilde{P}_i \Rightarrow \Delta D_i$
۳-۲.	$\Delta \dot{D}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t_{\omega}} \Delta D_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{D}_i + \Delta t_{\omega} (1 - \frac{\gamma}{\beta}) \ddot{D}_i$
۴-۲.	$\Delta \ddot{D}_i = \frac{1}{\beta (\Delta t_{\omega})^2} \Delta D_i - \frac{1}{\beta \Delta t_{\omega}} \dot{D}_i - \frac{1}{\gamma \beta} \ddot{D}_i$
۵-۲.	$D_{i+1} = D_i + \Delta D_i, \dot{D}_{i+1} = \dot{D}_i + \Delta \dot{D}_i,$ $\ddot{D}_{i+1} = \ddot{D}_i + \Delta \ddot{D}_i$
۳. تکرار برای گام زمانی بعدی: جای‌گذاری i با $i + 1$ و به‌کار بردن مراحل ۱-۲ تا ۵-۲ زمانی بعدی.	

۴. به‌دست آوردن مقادیر بهینه

در بخش ۳، نسبت جابه‌جایی سازه (D) برای مقادیر مشخص f, f_d, μ و ξ برحسب t_{ω} به‌دست آمده است. برای تعیین مقدار بهینه f_d ، کمینه‌سازی میانگین قدرمطلق نسبت جابه‌جایی سازه به‌عنوان معیار بهینه‌سازی میراگر جرمی برگزیده می‌شود. بنابراین، از میان مقادیر مختلف f_d ، مقداری که کمترین میانگین را برای تابع $|D|$ ، در یک بازه‌ی زمانی معین ارائه کند، به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌شود. برای اینکه رفتار سازه در اثر تحریک هارمونیک موردنظر کاملاً بررسی شود، نمودار تابع به‌دست آمده در بازه‌ی $0 \leq t_{\omega} \leq t_{\omega_c}$ رسم می‌شود. عامل t_{ω_c} را می‌توان با جای‌گذاری ۵ برابر بیشینه‌ی دوره‌ی تناوب سازه یا زمین به جای t در رابطه‌ی ۱۹ مطابق رابطه‌ی ۲۷ به‌دست آورد:

$$t_{\omega_c} = \max \left\{ 5 \omega_s T_s = 10^\circ \pi, 5 \omega_s T = \frac{10^\circ \pi}{f} \right\} \quad (27)$$

که در آن، T دوره‌ی تناوب حرکت زمین را نشان می‌دهد. برای اطمینان از کوچک بودن گام زمانی در هر مرحله و با توجه به روابط ۱۰ و ۱۲، Δt_{ω} به شکل رابطه‌ی ۲۸ در نظر گرفته می‌شود:

$$\Delta t_{\omega} = \min \left\{ \frac{1}{5} (0.389 \omega_s T_J) = 0.0778 \omega_s T_J, 0.01 \right\} \quad (28)$$

رابطه‌ی ۱۵ نشان می‌دهد که با افزایش f_d ، سختی میراگر جرمی کاهش می‌یابد؛ پس برای مقدارهای بسیار بزرگ آن، سختی میراگر تقریباً صفر خواهد شد. به همین دلیل، رفتار سازه فقط به‌ازاء $0 < f_d \leq 5$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه‌ی رفتار سازه برای مقدارهای مختلف f_d به‌صورت عددی انجام می‌شود. براین اساس، نخست برای مقدار مشخص f, μ و ξ ، نمودار $|D|$ برای مقدارهای مختلف f_d در بازه‌ی $0 \leq t_{\omega} \leq t_{\omega_c}$ رسم می‌شود. سپس، مقداری که کمترین میانگین را داشته باشد، به‌عنوان نسبت بسامد بهینه برگزیده می‌شود. روشن است که تابع قدرمطلق نسبت جابه‌جایی سازه ($|D|$) به‌ازاء مقادیر بهینه، کمترین حجم زیر منحنی را نیز در بازه‌ی در نظر گرفته‌شده برای t_{ω} خواهد داشت.

که جدا از یکدیگر فرض شوند، به ترتیب $\omega_s = \sqrt{k/m}$ و $\omega_d = \sqrt{kd/md}$ خواهند بود. سپس، ماتریس‌های جرم، سختی، و میرایی سامانه به‌ترتیب بر m, k و c تقسیم می‌شوند (روابط ۱۶ الی ۱۸):

$$M' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$K' = \begin{bmatrix} 1 + \frac{f^2}{f_d^2} \mu & -\frac{f^2}{f_d^2} \mu \\ -\frac{f^2}{f_d^2} \mu & \frac{f^2}{f_d^2} \mu \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

کمیت t_{ω} به‌صورت رابطه‌ی ۱۹ تعریف می‌شود:

$$t_{\omega} = \omega_s t = 2\pi \frac{t}{T_s} \quad (19)$$

که در آن، T_s دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی را نشان می‌دهد. همچنین، دامنه‌ی پاسخ استاتیکی سازه به‌صورت رابطه‌ی ۲۰ در نظر گرفته می‌شود:

$$u_{st} = \frac{ma}{k} \quad (20)$$

همان‌گونه که پیش از این اشاره شده است، در روش نیومارک جابه‌جایی سازه نسبت به زمان به‌دست می‌آید. در این بخش، نسبت جابه‌جایی سازه به دامنه‌ی جابه‌جایی استاتیکی آن برحسب t_{ω} به‌دست آمده است. این کار با تعریف این کمیت‌ها (مطابق روابط ۲۱ الی ۲۳) آغاز می‌شود:

$$D = \begin{Bmatrix} D \\ D_d \end{Bmatrix} = \frac{1}{u_{st}} U \quad (21)$$

$$\dot{D} = \frac{\omega_s}{a} \dot{U} \quad (22)$$

$$\ddot{D} = \frac{1}{a} \ddot{U} \quad (23)$$

کمیت‌های معرفی‌شده در جدول ۱ باید به‌صورت بی‌بعد به‌دست آیند. برای این‌کار، گام ۱-۱ از جدول ۱ بر ma تقسیم می‌شود. سپس، کمیت‌های \tilde{K} ، a و b به‌ترتیب بر k, c و m تقسیم می‌شوند. همچنین، بردار نیرو که در رابطه‌ی ۷ نشان داده شده است، با تقسیم بر ma ، به شکل رابطه‌ی ۲۴ اصلاح می‌شود:

$$P'_i = -\frac{M' I}{a} \ddot{u}_{g_i} \quad (24)$$

که در آن، \ddot{u}_{g_i} شتاب زمین را با توجه به رابطه‌ی ۱ می‌توان مطابق رابطه‌ی ۲۵ نوشت:

$$\ddot{u}_{g_i} = a \sin(\Omega t_i) = a \sin(f t_{\omega_i}) \quad (25)$$

جدول ۲، روش نیومارک اصلاح‌شده را نشان می‌دهد، که در آن کمیت Δt با Δt_{ω} جایگزین شده است. همچنین، ξ نسبت میرایی سازه را نشان می‌دهد که از رابطه‌ی ۲۶ به‌دست می‌آید:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_s} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (26)$$

جدول ۳. مقادیر f_d برای $\theta = 0$ و $\xi = 0$.

μ	f	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۵
۰٫۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۶
۰٫۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۶
۰٫۴	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۵	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۶	۱٫۱۶
۰٫۶	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۴
۰٫۷	۱٫۰۷	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳
۰٫۸	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲
۰٫۹	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۷	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰
۱٫۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۸
۱٫۱	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۵
۱٫۲	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳
۱٫۳	۱٫۳۴	۱٫۳۶	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷
۱٫۴	۱٫۳۳	۱٫۳۴	۱٫۳۶	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷	۱٫۳۷
۱٫۵	۱٫۵۴	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶
۱٫۶	۱٫۵۵	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶	۱٫۵۶
۱٫۷	۱٫۷۴	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵	۱٫۷۵
۱٫۸	۱٫۷۷	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۸
۱٫۹	۱٫۹۴	۱٫۹۳	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲
۲٫۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰	۲٫۰۰
۲٫۱	۲٫۱۳	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۴
۲٫۲	۲٫۱۹	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱	۲٫۲۱
۲٫۳	۲٫۲۳	۲٫۲۴	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳
۲٫۴	۲٫۳۹	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳
۲٫۵	۲٫۵۴	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۲٫۵۳

۵. سنجش مقادیر پیشنهادی با رابطه‌های زلزلی و بیسنا

در ادامه، برای ارزیابی کارایی مقادیر پیشنهادی در نوشتار حاضر، مقایسه‌ی بین میراگر پیشنهادی و میراگرهای جرمی دیگر انجام شده است. زلزلی و همکارانش^[۵] معیار کمیته‌سازی انرژی جنبشی سازه‌ی اصلی و بیشینه کردن انرژی جذب شده توسط میراگر جرمی را به‌عنوان معیار بهینه‌سازی انتخاب و رابطه‌های ۲۹ و ۳۰ را

جدول‌های ۳ الی ۱۰، مقادیر بهینه‌ی f_d را برای $\xi = 0$ تا $\xi = 7$ و به ازاء نسبت جرم‌ها و نسبت بسامدهای مختلف سازه نشان می‌دهند. باید توجه داشت که برای $\xi = 0$ ، می‌توان از تحلیل مودی نیز مقادیر بهینه را یافت^[۲۱] که نتایج به‌دست آمده با روش مذکور نیز با مقادیر جدول ۳ یکسان خواهند بود.

جدول ۴. مقادیر f_d برای $\omega = 1$.

μ	f	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۵
۰/۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۵	۱/۱۵
۰/۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۵	۱/۱۵
۰/۳	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۱۵	۱/۱۶
۰/۴	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۵
۰/۵	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۵
۰/۶	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۵
۰/۷	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۵
۰/۸	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۱۴
۰/۹	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۱	۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۳
۱/۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰
۱/۱	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰
۱/۲	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰
۱/۳	۱/۳۵	۱/۳۷	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰
۱/۴	۱/۳۲	۱/۳۴	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵
۱/۵	۱/۵۵	۱/۵۷	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰	۱/۶۰
۱/۶	۱/۵۵	۱/۵۶	۱/۵۵	۱/۵۴	۱/۵۳	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲	۱/۵۲
۱/۷	۱/۷۵	۱/۷۷	۱/۸۴	۱/۸۷	۱/۸۹	۱/۹۲	۱/۹۸	۲/۰۰	۱/۵۸	۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۶۱	۱/۶۴	۱/۶۸	۱/۷۱	۱/۷۳
۱/۸	۱/۷۶	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸	۱/۷۸
۱/۹	۱/۹۵	۱/۹۵	۱/۹۲	۲/۱۰	۲/۱۲	۲/۱۳	۲/۱۴	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۵
۲/۰	۱/۹۸	۲/۰۰	۲/۰۲	۲/۰۲	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳	۲/۰۳
۲/۱	۲/۱۵	۲/۱۵	۲/۱۴	۲/۱۷	۲/۱۸	۲/۱۹	۲/۲۶	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷
۲/۲	۲/۱۸	۲/۲۱	۲/۲۵	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۲۳	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۲۱
۲/۳	۲/۳۵	۲/۳۵	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳	۲/۳۳
۲/۴	۲/۳۹	۲/۴۳	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶	۲/۴۶
۲/۵	۲/۵۵	۲/۵۴	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳	۲/۵۳

برای سختی و میرایی میراگر جرمی پیشنهاد کرده‌اند:

$$k_{dZ} = \frac{m_d k}{m + m_d} \quad (29)$$

$$\xi_{dZ} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m_d}{m}} \quad (30)$$

از سوی دیگر، بیسنا و کاروسو،^[۲۰] روشی را برای طراحی میراگر جرمی ارائه کرده‌اند که در آن پاسخ گذرای سازه را در نظر گرفته و با بیشینه‌سازی سرعت کاهش پاسخ گذرا نسبت به زمان، ویژگی‌های بهینه‌ی میراگر جرمی را برای مقادیر کاربردی نسبت جرم به صورت روابط ۳۱ و ۳۲ به دست آورده‌اند:

$$k_{dB} = \frac{mm_d k}{(m + m_d)^2} \quad (31)$$

$$\xi_{dB} = \sqrt{\frac{m_d}{m + m_d}} \quad (32)$$

همچنین پیش‌تر، میراندا (۲۰۱۱) رابطه‌ی ۳۱ را پیشنهاد کرده است.^[۲۱] با توجه به روابط ۲۹ و ۳۱، نسبت بسامد حرکت زمین به بسامد میراگر جرمی زیلتی و بیسنا

به ترتیب به صورت روابط ۳۳ و ۳۴ خواهند بود:

$$f_{dZ} = f \sqrt{1 + \mu} \quad (33)$$

$$f_{dB} = f(1 + \mu) \quad (34)$$

قدرمطلق نسبت جابه‌جایی سازه به دامنه‌ی جابه‌جایی استاتیکی آن، برای ۳ حالت موردنظر، یعنی برای سازه‌ی متصل به میراگر جرمی پیشنهادشده در نوشتار حاضر، زیلتی، و بیسنا به ترتیب با R_p ، R_Z و R_B نشان داده شده‌اند (روابط ۳۵ الی ۳۷):

$$R_p = |D| f_d = f_{d_p} \quad (35)$$

$$R_Z = |D| f_d = f_{d_Z}, \xi_d = \xi_{d_Z} \quad (36)$$

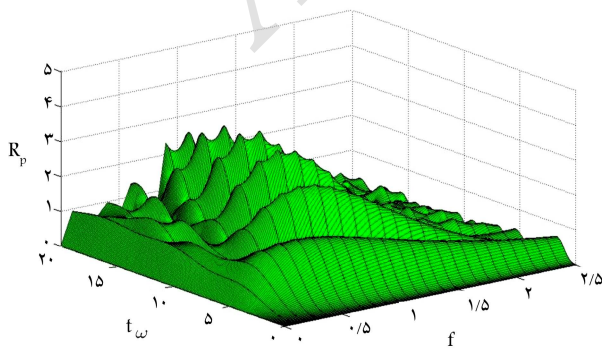
$$R_B = |D| f_d = f_{d_B}, \xi_d = \xi_{d_B} \quad (37)$$

در رابطه‌ی ۳۵، کمیت f_{d_p} نشان‌دهنده‌ی مقادیر بهینه‌ی میراگر جرمی پیشنهادی است که در جدول‌های ۳ الی ۱۰ ارائه شده‌اند. بدین ترتیب، می‌توان عامل‌های R_p ، R_Z و R_B را برحسب f ، μ و ξ و t_w به دست آورد.

برای بررسی عملکرد میراگرهای موردنظر، نخست نمودار ۳ کمیت مذکور برای مقدار

جدول ۵. مقادیر f_d برای $\xi = 0.02$.

μ	f	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱
۰٫۱	۰٫۱	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲
۰٫۲	۰٫۲	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲
۰٫۳	۰٫۳	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱
۰٫۴	۰٫۴	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۵	۰٫۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۶	۰٫۶	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰
۰٫۷	۰٫۷	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹
۰٫۸	۰٫۸	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۸
۰٫۹	۰٫۹	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱
۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱
۱٫۱	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳
۱٫۲	۱٫۲	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۹	۰٫۹۹
۱٫۳	۱٫۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۱٫۳۸	۱٫۳۶
۱٫۴	۱٫۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۱٫۳۳	۱٫۳۲
۱٫۵	۱٫۵	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۵۸	۱٫۵۶
۱٫۶	۱٫۶	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۱٫۵۵	۱٫۵۵	۱٫۵۴
۱٫۷	۱٫۷	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳
۱٫۸	۱٫۸	۲٫۰۸	۱٫۹۴	۱٫۹۳	۱٫۹۳	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۶۸	۱٫۶۸	۱٫۷۷	۱٫۷۸	۱٫۷۸	۱٫۷۷	۱٫۷۶
۱٫۹	۱٫۹	۲٫۸۰	۲٫۷۷	۱٫۸۲	۱٫۸۲	۱٫۸۲	۱٫۸۳	۲٫۱۵	۲٫۱۴	۲٫۱۴	۲٫۱۳	۲٫۱۲	۲٫۱۱	۲٫۰۸	۱٫۹۶	۱٫۹۶
۲٫۰	۲٫۰	۲٫۴۱	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۴	۲٫۴۳	۲٫۴۱	۲٫۴۰	۲٫۳۸	۲٫۰۴	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۱٫۹۹	۱٫۹۷
۲٫۱	۲٫۱	۲٫۵۱	۲٫۷۱	۲٫۷۱	۲٫۳۰	۲٫۸۵	۲٫۸۳	۲٫۸۱	۲٫۷۸	۲٫۵۸	۲٫۵۳	۲٫۱۹	۲٫۱۸	۲٫۱۴	۲٫۱۶	۲٫۱۶
۲٫۲	۲٫۲	۲٫۵۹	۲٫۵۳	۲٫۴۹	۲٫۴۶	۲٫۴۵	۲٫۶۴	۲٫۶۲	۲٫۶۱	۲٫۲۲	۲٫۲۶	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۵	۲٫۲۱	۲٫۱۸
۲٫۳	۲٫۳	۲٫۸۷	۲٫۸۵	۲٫۸۴	۲٫۸۳	۲٫۸۲	۲٫۸۲	۲٫۵۳	۲٫۵۱	۲٫۵۱	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۴۷	۲٫۴۲	۲٫۳۶	۲٫۳۶
۲٫۴	۲٫۴	۲٫۸۱	۲٫۷۶	۲٫۶۹	۲٫۶۹	۲٫۶۸	۲٫۶۸	۲٫۸۳	۲٫۸۵	۲٫۸۲	۲٫۵۳	۲٫۵۲	۲٫۵۱	۲٫۴۸	۲٫۴۳	۲٫۳۹
۲٫۵	۲٫۵	۳٫۲۱	۳٫۲۱	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۱	۳٫۲۰	۳٫۲۰	۲٫۷۱	۲٫۸۱	۲٫۸۰	۲٫۷۸	۲٫۷۵	۲٫۵۴	۲٫۵۵	۲٫۵۶



شکل ۲. نمودار R_p برای $\mu = 0.05$ و $\xi = 0.05$.

مشخص μ و ξ رسم شده است؛ سپس، برای ارزیابی آنها به ازاء تمام مقادیر نسبت جرم، کمیت‌های جدیدی معرفی شده است.

در شکل‌های ۲ الی ۴، به ترتیب نمودارهای R_p ، R_Z و R_B به ازاء $\mu = 0.05$ و $\xi = 0.05$ در محدوده‌ی $0 < f \leq 2/5$ و $0 \leq t_w \leq 2.0$ نشان داده شده‌اند، که با توجه به آنها به نظر می‌رسد که میراگر جرمی پیشنهادی در حالت تشدید ($f = 1$) و به ویژه با گذشت زمان، توانایی بیشتری در کاهش پاسخ سازه از خود نشان دهد. اکنون، برای نسبت جرم‌های معین و محدوده‌ی $0 < f < 2/5$ و $0 \leq t_w \leq t_{w_e}$ مقادیرهای پیشنهادی با رابطه‌های زیلتی و بیسنا مقایسه شده است. کمیت t_{w_e} در رابطه‌ی ۲۷ تعریف شده است. برای انجام این کار، کمیت A_z به‌عنوان نسبت مساحت قسمت‌هایی که در آنها R_p بزرگ‌تر از R_Z باشد، به

جدول ۶. مقادیر f_d برای $\xi = 0.3$.

μ	f	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۵
۰٫۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۲	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۶
۰٫۳	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۴	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۵	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۶	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵
۰٫۷	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۴
۰٫۸	۱٫۰۷	۱٫۰۸	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳
۰٫۹	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۱
۱٫۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۸	۱٫۰۸
۱٫۱	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۵
۱٫۲	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۶
۱٫۳	۱٫۳۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳
۱٫۴	۱٫۳۱	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۴
۱٫۵	۱٫۵۷	۱٫۵۹	۱٫۶۱	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴
۱٫۶	۱٫۵۳	۱٫۵۴	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۱	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴
۱٫۷	۱٫۷۷	۱٫۸۰	۱٫۸۴	۱٫۸۴	۱٫۸۶	۱٫۸۹	۱٫۹۴	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴
۱٫۸	۱٫۷۵	۱٫۷۷	۱٫۷۷	۱٫۷۷	۱٫۷۷	۱٫۷۷	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴
۱٫۹	۱٫۹۷	۱٫۹۹	۲٫۰۷	۲٫۱۰	۲٫۱۱	۲٫۱۳	۲٫۱۳	۲٫۱۴	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۶	۲٫۱۶
۲٫۰	۱٫۹۷	۱٫۹۹	۲٫۰۱	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳	۲٫۰۳
۲٫۱	۲٫۱۷	۲٫۱۸	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵
۲٫۲	۲٫۱۷	۲٫۲۰	۲٫۲۵	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷	۲٫۲۷
۲٫۳	۲٫۳۷	۲٫۳۸	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵	۲٫۴۵
۲٫۴	۲٫۳۸	۲٫۴۳	۲٫۴۸	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰	۲٫۵۰
۲٫۵	۲٫۵۷	۲٫۵۷	۲٫۷۲	۲٫۷۵	۲٫۷۹	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰	۲٫۸۰

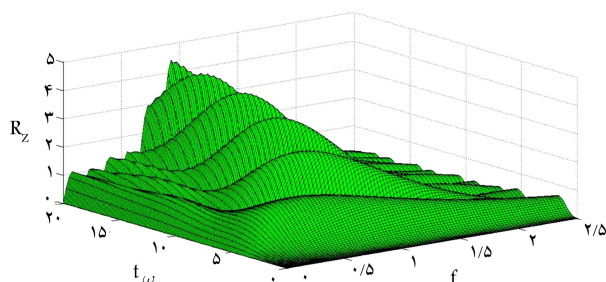
بخش‌هایی که در آن‌ها R_Z بزرگ‌تر از R_p است، معرفی شده است. همچنین، نسبت مساحت بخش‌هایی که در آنها R_p بزرگ‌تر از R_B باشد، به مساحت قسمت‌هایی که در آنها R_B بزرگ‌تر از R_p است، با نماد AB نشان داده می‌شود:

$$A_Z = \frac{\{0 < f \leq 2.5, 0 \leq t_w \leq t_{we} | R_Z < R_p\}}{\{0 < f \leq 2.5, 0 \leq t_w \leq t_{we} | R_Z > R_p\}} \quad (38)$$

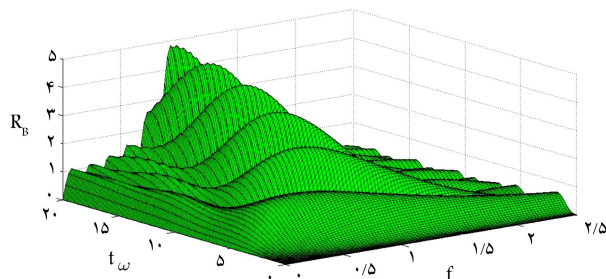
$$A_B = \frac{\{0 < f \leq 2.5, 0 \leq t_w \leq t_{we} | R_B < R_p\}}{\{0 < f \leq 2.5, 0 \leq t_w \leq t_{we} | R_B > R_p\}} \quad (39)$$

کمیت‌های A_Z و A_B برای ارزیابی محدوده‌هایی از f و t_w که در آن‌ها مقادیر پیشنهادی بر رابطه‌های زیلتی و بیستا برتری دارد، به کار می‌روند. روشن است، چنانچه کمیت‌های A_Z و A_B کمتر از ۱ شوند، عملکرد میراگر جرمی پیشنهادی (جدول‌های ۱ تا ۱۰) از میراگر زیلتی (رابطه‌های ۲۹ و ۳۰) و میراگر بیستا (رابطه‌های ۳۱ و ۳۲) بهتر است. عکس این نکته نیز برقرار است.

در شکل ۵، نمودار کمیت‌های A_Z و A_B نسبت به μ برای $\xi = 0.5$ رسم شده‌اند. این دو کمیت به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد سختی پیشنهادی در مقابل میراگرهای زیلتی و بیستا هستند. چنان‌که در شکل ۵ مشخص است، هر دو کمیت A_Z و A_B به ازاء تمام نسبت‌های جرمی کوچک‌تر از ۱ هستند. این نشان می‌دهد که احتمال بهینه‌بودن مقادیر پیشنهادی در تمامی بازه‌ی موردنظر بیش از روابط



شکل ۳. نمودار R_Z برای $\mu = 0.5$ و $\xi = 0.5$.



شکل ۴. نمودار R_B برای $\mu = 0.5$ و $\xi = 0.5$.

جدول ۷. مقادیر f_d برای $\xi = 0/04$.

μ	f	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱
۰٫۱	۰٫۱	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲
۰٫۲	۰٫۲	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱
۰٫۳	۰٫۳	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱
۰٫۴	۰٫۴	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۵	۰٫۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۶	۰٫۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰
۰٫۷	۰٫۷	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹
۰٫۸	۰٫۸	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷
۰٫۹	۰٫۹	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲
۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱
۱٫۱	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳
۱٫۲	۱٫۲	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹
۱٫۳	۱٫۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۷
۱٫۴	۱٫۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷
۱٫۵	۱٫۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۰	۱٫۰۵
۱٫۶	۱٫۶	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۵
۱٫۷	۱٫۷	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۸۶	۱٫۰۸۴	۱٫۰۸۱	۱٫۰۷۸
۱٫۸	۱٫۸	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۷۷	۱٫۰۷۶	۱٫۰۷۶	۱٫۰۷۴
۱٫۹	۱٫۹	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۲٫۰۷۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۲٫۱۱	۲٫۱۰	۲٫۰۷	۲٫۰۱	۱٫۹۸
۲٫۰	۲٫۰	۲٫۴۴	۲٫۴۶	۲٫۴۷	۲٫۴۵	۲٫۴۳	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۲٫۰۱	۲٫۰۰	۱٫۹۸	۱٫۹۶
۲٫۱	۲٫۱	۳٫۱۰	۳٫۰۹	۳٫۰۶	۳٫۰۰	۲٫۹۰	۲٫۸۹	۲٫۸۷	۲٫۸۶	۲٫۸۵	۲٫۸۴	۲٫۴۳	۲٫۳۷	۲٫۳۱	۲٫۲۱	۲٫۱۹
۲٫۲	۲٫۲	۲٫۶۸	۲٫۶۸	۲٫۶۹	۲٫۷۰	۲٫۷۰	۲٫۷۰	۲٫۷۰	۱٫۰۱	۲٫۸۱	۲٫۸۰	۲٫۷۷	۲٫۲۷	۲٫۲۳	۲٫۱۹	۲٫۱۷
۲٫۳	۲٫۳	۳٫۴۱	۳٫۴۰	۳٫۳۹	۳٫۳۸	۳٫۳۷	۳٫۳۵	۳٫۳۱	۳٫۲۶	۳٫۲۱	۲٫۶۸	۲٫۶۱	۲٫۵۵	۲٫۵۳	۲٫۴۰	۲٫۳۹
۲٫۴	۲٫۴	۳٫۲۶	۲٫۷۱	۲٫۶۹	۲٫۶۹	۲٫۷۰	۲٫۷۲	۳٫۲۰	۲٫۸۴	۲٫۸۳	۲٫۸۳	۲٫۸۳	۲٫۴۸	۲٫۴۷	۲٫۴۲	۲٫۳۸
۲٫۵	۲٫۵	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۳	۳٫۲۳	۳٫۲۳	۳٫۲۳	۳٫۲۳	۳٫۲۳	۳٫۲۲	۳٫۲۱	۲٫۷۹	۲٫۷۸	۲٫۷۷	۲٫۶۰	۲٫۵۹

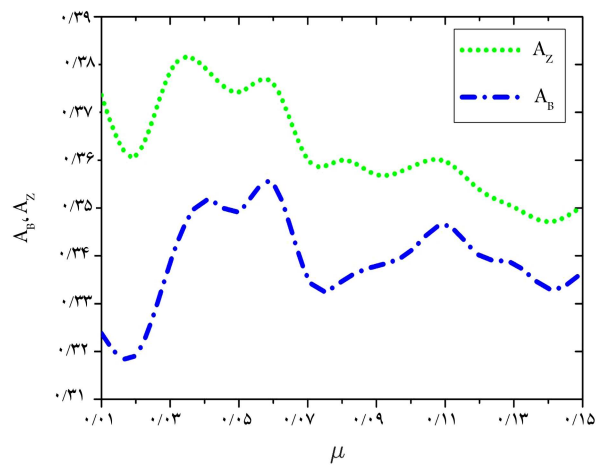
زیلتی و بیسنا است. همچنین، نسبت جرم تأثیر چندانی در عملکرد میراگر جرمی پیشنهادی در مقایسه با سایر میراگرهای مورد بررسی ندارد؛ چون تغییر این دو کمیت به ازاء نسبت جرم‌های مختلف کمتر از $0/04$ است.

۶. نتایج عددی

برای بررسی کارایی میراگر جرمی پیشنهادی در سازه‌های مختلف، یک سازه‌ی ۲ درجه آزادی و یک ساختمان برشی ۵ طبقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. علاوه بر سنجیدن میراگر جرمی پیشنهادی، عملکرد میراگرهای پیشنهادی زیلتی و بیسنا نیز بررسی شده‌اند.

۱.۶. سامانه‌ی دو درجه آزادی

شکل ۶، مشخصات سامانه‌ی دو درجه آزادی را نشان می‌دهد. [۲۴] جرم مؤثر مودی،



شکل ۵. نمودار کمیت‌های A_Z و A_B نسبت به μ .

جدول ۸. مقادیر f_d برای $\xi = 0.05$.

μ	f	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱		
۰٫۱	۱٫۱۲	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲		
۰٫۲	۱٫۱۱	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱		
۰٫۳	۱٫۱۱	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱		
۰٫۴	۱٫۱۱	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱		
۰٫۵	۱٫۱۱	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱		
۰٫۶	۱٫۱۰	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰		
۰٫۷	۱٫۰۹	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹		
۰٫۸	۱٫۰۷	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷		
۰٫۹	۱٫۰۲	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲		
۱٫۰	۱٫۰۲	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲		
۱٫۱	۱٫۰۲	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲		
۱٫۲	۰٫۹۹	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹		
۱٫۳	۰٫۹۷	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷		
۱٫۴	۰٫۹۷	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷		
۱٫۵	۱٫۵۹	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۱٫۵۹		
۱٫۶	۱٫۵۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۵۲		
۱٫۷	۱٫۸۰	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۱٫۸۲	۱٫۸۰		
۱٫۸	۱٫۷۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۱٫۷۵	۱٫۷۴	۱٫۸		
۱٫۹	۲٫۰۰	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۲٫۰۷	۲٫۰۳	۲٫۰۰	۱٫۹		
۲٫۰	۱٫۹۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۹۷	۱٫۹۵	۱٫۹۵	۲٫۰		
۲٫۱	۲٫۲۰	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۲٫۹۳	۲٫۹۱	۲٫۹۰	۲٫۹۰	۲٫۹۰	۲٫۹۰	۲٫۴۰	۲٫۳۵	۲٫۳۰	۲٫۲۴	۲٫۲۰	۲٫۱	
۲٫۲	۲٫۱۶	۲٫۶۷	۲٫۶۸	۲٫۶۹	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۲٫۲۲	۲٫۱۸	۲٫۱۶	۲٫۲	۲٫۲	
۲٫۳	۲٫۴۰	۳٫۳۸	۳٫۳۷	۳٫۳۶	۳٫۳۴	۳٫۳۳	۳٫۳۱	۳٫۳۰	۳٫۳۰	۳٫۲۹	۳٫۲۸	۲٫۵۵	۲٫۵۴	۲٫۵۲	۲٫۴۴	۲٫۴۰	۲٫۳	۲٫۳
۲٫۴	۲٫۳۸	۳٫۲۶	۳٫۲۵	۳٫۲۵	۳٫۲۵	۳٫۲۵	۳٫۲۴	۳٫۲۳	۳٫۲۱	۳٫۲۰	۳٫۱۹	۳٫۱۸	۲٫۸۲	۲٫۴۶	۲٫۴۱	۲٫۳۸	۲٫۴	۲٫۴
۲٫۵	۲٫۶۱	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۳٫۲۲	۲٫۷۶	۲٫۷۷	۲٫۷۶	۲٫۶۷	۲٫۶۱	۲٫۵	۲٫۵

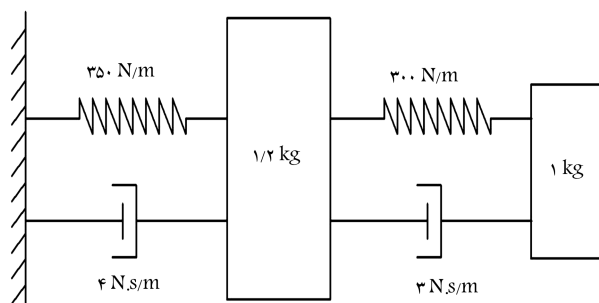
بسامه طبیعی، و نسبت میرایی مود اول سامانه‌ی مذکور به ترتیب برابر با این مقادیر هستند:

$$m_1 = 2.062 \text{ kg}$$

$$\omega_1 = 11.02 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

$$\xi_1 = 0.06$$

سامانه‌ی دو درجه آزادی تحت حرکت هارمونیک زمین با شتابی که در رابطه‌ی ۱ نشان داده شده است، قرار می‌گیرد. به دلیل اینکه در تحلیل خطی، دامنه‌ی شتاب زمین تأثیری در نوع رفتار سازه ندارد و فقط در کل جابه‌جایی آن ضرب می‌شود، این



شکل ۶. سازه‌ی دو درجه آزادی.

جدول ۹. مقادیر f_d برای $\xi = 0.06$.

μ	f	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۱
۰٫۱	۰٫۱	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲
۰٫۲	۰٫۲	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱
۰٫۳	۰٫۳	۱٫۱۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۴	۰٫۴	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۵	۰٫۵	۱٫۱۵	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱
۰٫۶	۰٫۶	۱٫۱۵	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰
۰٫۷	۰٫۷	۱٫۱۴	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹
۰٫۸	۰٫۸	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷
۰٫۹	۰٫۹	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳
۱٫۰	۱٫۰	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲
۱٫۱	۱٫۱	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲
۱٫۲	۱٫۲	۱٫۰۶	۱٫۰۶	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹
۱٫۳	۱٫۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷
۱٫۴	۱٫۴	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷
۱٫۵	۱٫۵	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷
۱٫۶	۱٫۶	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷
۱٫۷	۱٫۷	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۰
۱٫۸	۱٫۸	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۳
۱٫۹	۱٫۹	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۲٫۰۴	۲٫۰۱
۲٫۰	۲٫۰	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۹۵
۲٫۱	۲٫۱	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۲٫۳۴	۲٫۳۰	۲٫۲۶	۲٫۲۲
۲٫۲	۲٫۲	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۲٫۱۷	۲٫۱۶
۲٫۳	۲٫۳	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۲٫۵۵	۲٫۵۲	۲٫۴۷	۲٫۴۲
۲٫۴	۲٫۴	۱٫۰۵	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۰٫۹۹	۲٫۴۳	۲٫۳۹	۲٫۳۷
۲٫۵	۲٫۵	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۴	۳٫۲۳	۲٫۷۶	۲٫۷۷	۲٫۷۶	۲٫۶۹	۲٫۶۲

با توجه به رابطه‌های ۲۹، ۳۱، و ۴۰، میراگرهای جرمی زبلیتی، بیسنا، و میراگر پیشنهادی که برای کنترل مود اول سامانه‌ی مذکور طراحی شده‌اند، به ترتیب این ضرایب سختی را خواهند داشت:

$$k_{dZ} = 7,31 \text{ N/m}$$

$$k_{dB} = 7,1 \text{ N/m}$$

$$k_{dP} = 8,58 \text{ N/m}$$

برای محاسبه‌ی سختی میراگرهای زبلیتی و بیسنا، کمیت k از رابطه‌ی ۴۱ به دست آمده است:

$$k = \omega_1^2 m_1 \quad (41)$$

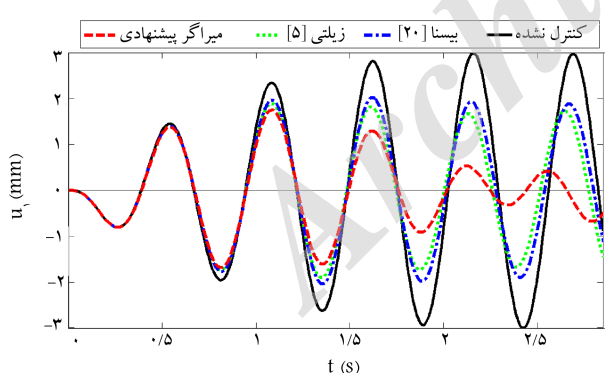
همچنین، از رابطه‌های ۳۰ و ۳۲ می‌توان ضریب میرایی را برای میراگرهای زبلیتی و

کمیت برابر واحد فرض شده است. برای بررسی کارایی میراگر جرمی در حالت‌های نزدیک تشدید، می‌توان بسامد حرکت زمین را به میزان $\Omega = 12 \frac{rad}{sec}$ در نظر گرفت. میراگرهای جرمی مختلف برای کنترل مود اول این سازه تنظیم و به درجه آزادی دوم آن متصل می‌شوند. همچنین فرض شده است که $\mu = 0.03$ باشد. با توجه به نسبت جرم در نظر گرفته شده، جرم میراگر به میزان $m_d = \mu m_1 = 0.062 \text{ kg}$ به دست آمده است. نسبت بسامد حرکت زمین به بسامد طبیعی مود اول سازه‌ی مذکور به شکل $f = \frac{\Omega}{\omega_1} \approx 1.1$ خواهد بود. با استفاده از جدول ۹، برای $f = 1.1$ و $\mu = 0.03$ ، نسبت بسامد حرکت زمین به بسامد میراگر جرمی پیشنهادی به صورت $f_{dP} = 1.02$ تعیین می‌شود. با معلوم بودن، f_{dP} می‌توان سختی میراگر مورد نظر را از رابطه‌ی ۴۰ به دست آورد:

$$k_{dP} = \frac{\Omega^2}{f_{dP}^2} m_d \quad (40)$$

جدول ۱۰. مقادیر f_d برای $\xi = 0.07$.

μ	f	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۹	۱٫۰	۱٫۱	۱٫۲	۱٫۳	۱٫۴	۱٫۵
۰٫۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵
۰٫۲	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵
۰٫۳	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵
۰٫۴	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۴	۱٫۱۵
۰٫۵	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۵
۰٫۶	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۱٫۱۵
۰٫۷	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۲	۱٫۱۵
۰٫۸	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۷	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۸	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۰۹	۱٫۱۰	۱٫۱۱	۱٫۱۴
۰٫۹	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۷	۱٫۱۱
۱٫۰	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۸
۱٫۱	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۴	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۱٫۰۵
۱٫۲	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۲	۱٫۰۳	۱٫۰۴	۱٫۰۶
۱٫۳	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۴
۱٫۴	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۵
۱٫۵	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۴
۱٫۶	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۴
۱٫۷	۰٫۹۷	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۱	۱٫۰۲	۱٫۰۵
۱٫۸	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲	۱٫۷۲
۱٫۹	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲	۲٫۰۲
۲٫۰	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴	۱٫۹۴
۲٫۱	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳	۲٫۲۳
۲٫۲	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵	۲٫۱۵
۲٫۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳	۲٫۴۳
۲٫۴	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶	۲٫۳۶
۲٫۵	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴	۲٫۶۴



شکل ۷. نمودار جابه‌جایی درجه آزادی اول سامانه‌ی دو درجه آزادی.

برای تشکیل ماتریس میرایی رایلی، نسبت میرایی مودهای اول و دوم برابر ۰٫۵ فرض شده‌اند. این سازه نیز تحت حرکت هارمونیک زمین با بسامدی به صورت $\Omega = 23 \frac{rad}{sec}$ است. فرض می‌شود که $\mu = 0.1$ باشد؛ بدین ترتیب جرم میراگر به‌دست می‌آید: $m_a = \mu m_1 = 0.1 \text{ kg}$. میراگرهای جرمی مختلف که برای کنترل مود اول این سازه طراحی شده‌اند، به طبقه‌ی

بیستا به‌دست آورد:

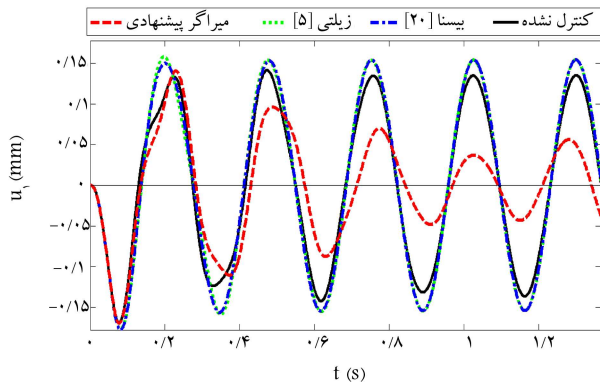
$$c_{d_z} = 0.117 \text{ N.sec/m}$$

$$c_{d_B} = 0.227 \text{ N.sec/m}$$

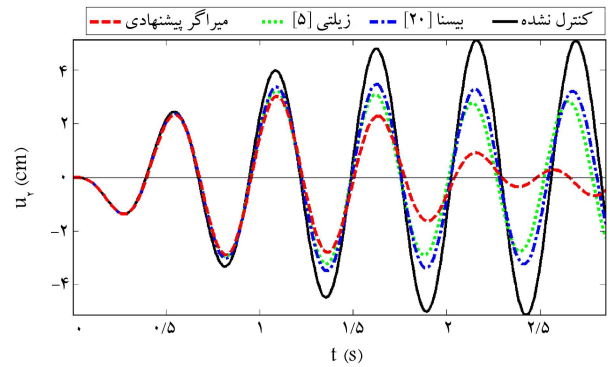
نمودار جابه‌جایی درجه‌های آزادی اول و دوم این سازه نسبت به زمین در شکل‌های ۷ و ۸ رسم شده‌اند. چنان‌که شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند، هر ۳ میراگر جرمی با خارج‌کردن سامانه‌ی دو درجه آزادی از حالت تشدید، سبب بهبود پاسخ آن می‌شوند. با وجود این، میراگر جرمی پیشنهادی در نوشتار حاضر تأثیر مناسب‌تری در جابه‌جایی سازه‌ی مذکور دارد و تغییر مکان‌های بیشینه و میانگین قدرمطلق آن را به ترتیب بیش از ۴۰٪ و ۵۰٪ کاهش می‌دهد. میراگرهای زیلنی و بیستا نیز جابه‌جایی بیشینه‌ی درجه‌های آزادی مختلف سامانه‌ی ذکر شده را به ترتیب حدود ۳۶٪ و ۳۱٪ و میانگین قدرمطلق جابه‌جایی آنها را ۳۱٪ و ۲۵٪ کاهش می‌دهند.

۲.۶. ساختمان برشی ۵ طبقه

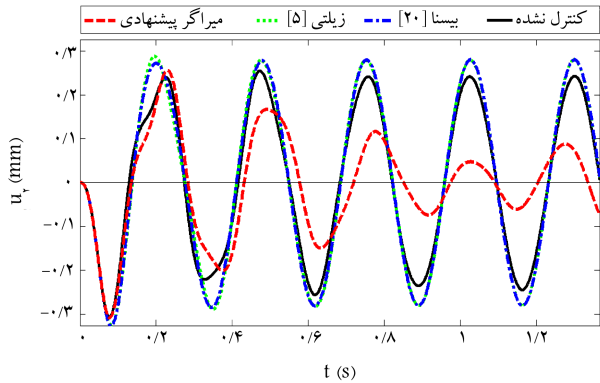
در شکل ۹، ساختمان ۵ طبقه‌ی برشی نشان داده شده است. [۲۴] ویژگی‌های مود اول سازه‌ی مذکور بدین صورت هستند: $m_1 = 1 \text{ kg}$ و $\omega_1 = 58/4 \frac{rad}{sec}$.



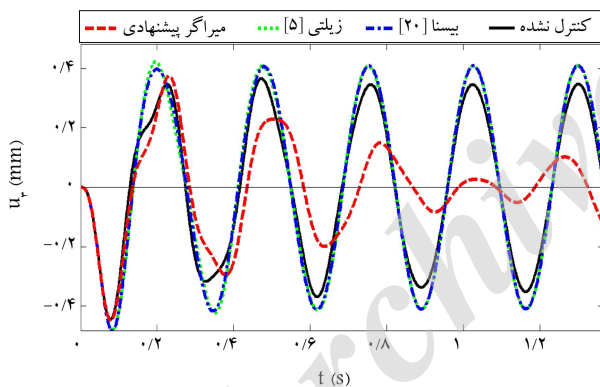
شکل ۱۰. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی اول ساختمان ۵ طبقه.



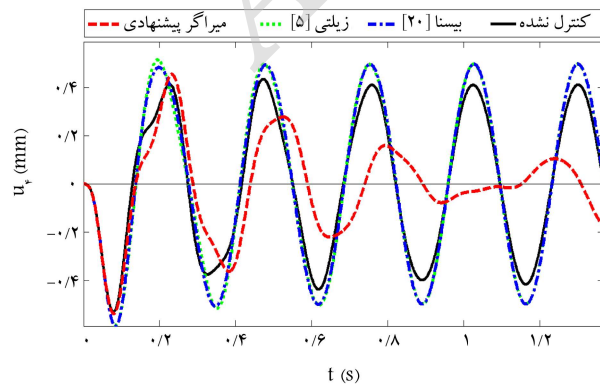
شکل ۸. نمودار جابه‌جایی درجه آزادی دوم سامانه‌ی دو درجه آزادی.



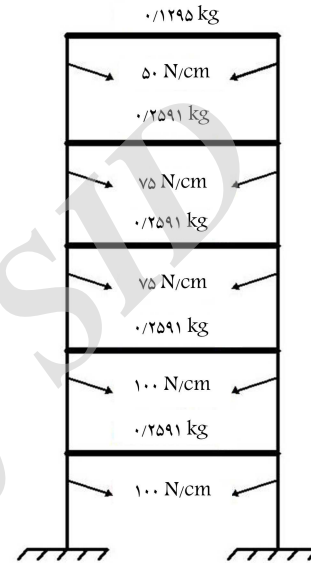
شکل ۱۱. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی دوم ساختمان ۵ طبقه.



شکل ۱۲. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی سوم ساختمان ۵ طبقه.



شکل ۱۳. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی چهارم ساختمان ۵ طبقه.



شکل ۹. ساختمان برشی ۵ طبقه.

پنجم آن متصل می‌شوند. نسبت بسامد حرکت زمین به بسامد طبیعی مود اول این سازه به صورت $f = \frac{\Omega}{\omega_1} \approx 0.4$ است. با استفاده از جدول ۸، برای $f = 0.8$ و $\mu = 0.1$ می‌توان نسبت بسامد حرکت زمین به بسامد میراگر جرمی پیشنهادی را به دست آورد: $f_{dp} = 1/13$. با معلوم بودن f_{dp} ، می‌توان سختی میراگر موردنظر را از رابطه‌ی ۴۰ به دست آورد. همانند بخش پیش، سختی میراگرهای جرمی زیلنی، بیسنا، و پیشنهادی پژوهش حاضر بدین صورت محاسبه می‌شوند:

$$k_{dZ} = 310/1 \text{ N/m}$$

$$k_{dB} = 281/9 \text{ N/m}$$

$$k_{dp} = 41/4 \text{ N/m}$$

همچنین، ضرایب میرایی برای میراگرهای زیلنی و بیسنا به این شکل خواهد بود:

$$c_{dZ} = 1/8 \text{ N.sec/m}$$

$$c_{dB} = 3/2 \text{ N.sec/m}$$

شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ جابه‌جایی طبقات مختلف این ساختمان را نسبت به زمین نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میراگرهای زیلنی و بیسنا عملکرد تقریباً یکسانی دارند. به جز میراگر جرمی پیشنهادی، سایر میراگرها تأثیر مناسبی در

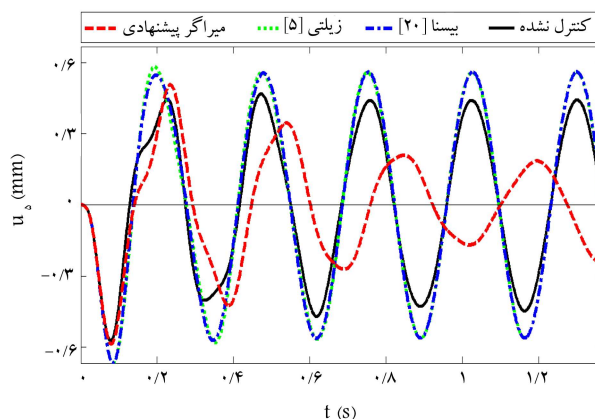
است. سپس، برای مقادیر مختلف نسبت جرم، نسبت میرایی، و نسبت بسامد سازه، مقادیر بهینه‌ی نسبت بسامد حرکت زمین به بسامد میراگر جرمی به صورت عددی به دست آمده‌اند. این فرآیند با اصلاح روش نیومارک انجام شده است.

مقایسه‌ی کارایی میراگر جرمی پیشنهادی با چند میراگر که پژوهشگران دیگر معرفی کرده بودند، نشان می‌دهد که احتمال بهینه‌بودن میراگر جرمی پیشنهادی برای تمام نسبت‌های جرمی کاربردی، بیش از سایر میراگرهاست. علاوه بر این، تأثیر تغییر نسبت جرمی در عملکرد میراگر پیشنهادی نوشتار حاضر در مقایسه با میراگرهای بررسی‌شده‌ی دیگر، ناچیز است. همچنین، بررسی تأثیر میراگرهای جرمی مختلف در حالت تشدید نشان می‌دهد که اگرچه استفاده از میراگرهای جرمی مختلف با خارج‌ساختن سازه از این حالت، موجب کاهش جابه‌جایی آن می‌شود، ولی میراگر جرمی پیشنهادی تأثیر مناسب‌تری در تغییر مکان بیشینه و میانگین آن خواهد داشت. در سایر موارد، هر چند میراگر جرمی پیشنهادی تأثیر چندانی در پاسخ بیشینه‌ی سازه ندارد، ولی اثرگذاری میراگر پیشنهادی در پاسخ میانگین سازه غیرقابل چشم‌پوشی است. به طور کلی، در نظر گرفتن اثر پاسخ گذرا و نیز میرایی سازه در تنظیم میراگر جرمی، سبب افزایش چشم‌گیر کارایی آن در کنترل نوسان‌های سازه می‌شود.

از کاستی‌های روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر می‌توان به عددی بودن آن اشاره کرد، که استفاده از روش مذکور را دشوار می‌سازد؛ به طوری که برای به دست آوردن سختی بهینه باید با توجه به نسبت بسامد سازه، نسبت میرایی آن و نسبت جرمی مقدار بهینه را از جدول مورد نظر یافت. با وجود این، عملکرد مناسب میراگر جرمی پیشنهادی در مقایسه با میراگرهای دیگر، این کمبود را تا حدودی جبران کرده است. همچنین در روش پیشنهادی، مقدارهای بهینه‌ی میراگر جرمی علاوه بر مشخصات سازه به بسامد تحریک هم وابسته‌اند. این ویژگی سبب می‌شود که استفاده از آن فقط به بسامد ویژه محدود شود. در حالی که بعضی از روابط ارائه شده توسط دیگر پژوهشگران فقط به مشخصات سازه بستگی دارند و می‌توان آن‌ها را برای تحریک‌های مختلفی به کار برد.

منابع (References)

1. Connor, J.J., *Introduction to Structural Motion Control*, Prentice Hall (2003).
2. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. and Chung, R. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(6), pp. 617-635 (1997).
3. Miranda, J.C. "On tuned mass dampers for reducing the seismic response of structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**(7), pp. 847-865 (2005).
4. Miranda, J.C. "System intrinsic, damping maximized, tuned mass dampers for seismic applications", *Structural Control and Health Monitoring*, **19**(3), pp. 405-416 (2011).
5. Zilletti, M., Elliott, S.J. and Rustighi, E. "Optimisation of dynamic vibration absorbers to minimise kinetic energy and maximise internal power dissipation", *Journal of Sound and Vibration*, **331**(18), pp. 4093-4100 (2012).



شکل ۱۴. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی پنجم ساختمان ۵ طبقه.

پاسخ سازه‌ی مذکور ندارند و جابه‌جایی بیشینه و میانگین تمام طبقات را افزایش می‌دهند؛ به طوری که این افزایش در طبقه‌ی پنجم به ترتیب به ۱۶٪ و ۲۶٪ می‌رسد. از سوی دیگر، هر چند میراگر پیشنهادی تأثیر چندانی در جابه‌جایی بیشینه‌ی طبقات مختلف این سازه ندارد، ولی میانگین قدرمطلق جابه‌جایی همه‌ی طبقات را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد، که این مقدار برای طبقه‌ی پنجم ۳۳٪ است.

۷. نتیجه‌گیری

از آنجا که در پژوهش‌های پیشین کمتر به نقش پاسخ گذرا در جابه‌جایی سازه پرداخته شده است، در پژوهش حاضر راهکاری برای تعیین سختی بهینه‌ی میراگر جرمی با در نظر گرفتن پاسخ‌های پایدار و گذرای سازه‌ی میرا ارائه شده است. برای این کار، کمیته‌سازی میانگین قدرمطلق نسبت جابه‌جایی دینامیکی سازه به دامنه‌ی جابه‌جایی استاتیکی آن در یک بازه‌ی زمانی مشخص به‌عنوان معیار طراحی انتخاب شده

6. Domizio, M., Ambrosini, D. and Curadelli, O. "Performance of tuned mass damper against structural collapse due to near fault earthquakes", *Journal of Sound and Vibration*, **336**, pp. 32-45 (2015).
7. Li, C. "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(9), pp. 1405-1421 (2000).
8. Wang, J.F., Lin, C.C. and Lien, C.H. "Two-stage optimum design of tuned mass dampers with consideration of stroke", *Structural Control and Health Monitoring*, **16**(1), pp. 55-72 (2009).
9. Lin, C.C., Wang, J.F., Lien, C.H., Chiang, H.W. and Lin, C.S. "Optimum design and experimental study of multiple tuned mass dampers with limited stroke", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(14), pp. 1631-1651 (2010).
10. Majcher, K. "Shaking table tests of a model-scale building with 2DOF pendulum mass damper", *Proceeding in*

- Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)*, **12**(1), pp. 231-232 (2012).
11. Daniel, Y. and Lavan, O. "Gradient based optimal seismic retrofitting of 3D irregular buildings using multiple tuned mass dampers", *Computers & Structures*, **139**, pp. 84-97 (2014).
 12. Korkmaz, S. "A review of active structural control: challenges for engineering informatics", *Computers & Structures*, **89**(23-24), pp. 2113-2132 (2011).
 13. Sugumar, R., Kumar, C. and Datta, T.K. "Application of stochastic control system in structural control", *Procedia Engineering*, **38**, pp. 2356-2363 (2012).
 14. Li, C., Liu, Y. and Wang, Z. "Active multiple tuned mass dampers: a new control strategy", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **129**(7), pp. 972-977 (2003).
 15. Li, C. and Xiong, X. "Estimation of active multiple tuned mass dampers for asymmetric structures", *Structural Engineering and Mechanics*, **29**(5), pp. 505-530 (2008).
 16. Li, C., Yu, Z., Xiong, X. and Wang, C. "Active multiple tuned mass dampers for asymmetric structures considering soil-structure interaction", *Structural Control and Health Monitoring*, **17**(4), pp. 452-472 (2010).
 17. Nagarajaiah, S. and Varadarajan, N. "Short time fourier transform algorithm for wind response control of buildings with variable stiffness TMD", *Engineering Structures*, **27**(3), pp. 431-441 (2005).
 18. Chey, M.H., Chase, J.G., Mander, J.B. and Carr, A.J. "Semi-active tuned mass damper building systems: Design", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(2), pp. 119-139 (2010).
 19. Eason, R.P., Sun, C., Dick, A.J. and Nagarajaiah, S. "Attenuation of a linear oscillator using a nonlinear and a semi-active tuned mass damper in series", *Journal of Sound and Vibration*, **332**(1), pp. 154-166 (2013).
 20. Bisegna, P. and Caruso, G. "Closed-form formulas for the optimal pole-based design of tuned mass dampers", *Journal of Sound and Vibration*, **331**(10), pp. 2291-2314 (2012).
 21. Ashrafi, P. and Alamatian, J. "Optimum stiffness of tuned mass damper with combining transient and steady state responses for undamped structures", *Journal of Civil Engineering*, **26**(2), pp. 85-98 (2015).
 22. Newmark, N.M. "A method of computation for structural dynamics", *Journal of the Engineering Mechanics Division (ASCE)*, **85**(3), pp. 67-94 (1959).
 23. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall (1995).
 24. Alamatian, J. and Rezaeepazhand, J. "A simple approach for determination of actuator and sensor locations in smart structures subjected to the dynamic loads", *International Journal of Engineering (IJE)*, **24**(4), pp. 341-349 (2011).