



شناسایی جداگرهای لاستیکی با هسته سربی (LRB) با استفاده از مدل اصلاح شده بوک-ون-نرمال شده

آرش بهار^{۱*} و مهدی رشیدی میبدی^۲

^۱ استادیار گروه عمران، دانشگاه گیلان، رشت

^۲ دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشگاه گیلان، رشت

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۳

چکیده

به دلیل مشخصات دینامیکی موجود در نیروی بازگرداننده جداگرهای لاستیکی با هسته سربی (LRB)، رفتار لرزه‌ای سازه‌های کف جدا به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به کار بردن مدل صحیح بر اساس نقش غیرخطی که این جداگرها دارند اهمیت بسیاری دارد. در این مقاله یک شکل ترکیبی برای نمایش رفتار جداگرهای LRB ارائه می‌شود که بر اساس مدل اصلاح شده و نرمال شده بوک-ون قرار دارد. این مدل امکان شناسایی جداگرهای LRB را با تعریف دو فاز خطی و غیرخطی آن‌ها فراهم می‌کند که به نوبه خود باعث افزایش دقت در روند شناسایی آن‌ها می‌شود. با استفاده از یک تحریک سینوسی با دامنه‌ای که به اندازه کافی بزرگ است، پارامترهای اصلی مدل با استفاده از فقط یک آزمایش معلوم می‌شوند. روند شناسایی و اعتبارسنجی، با استفاده از یک مدل جعبه سیاه از جداگر LRB در برنامه ساختمان‌های معیار کف جدا وجود دارد به عنوان مثال عددی انجام می‌گیرد. این مدل به عنوان یک آزمایشگاه مجازی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که دقت مدل شناسایی شده خوب بوده و مدل پیشنهادی برای نمایش رفتار جداگرهای LRB می‌تواند گزینه مناسبی باشد.

کلمات کلیدی: جداگر LRB؛ روش شناسایی گام به گام؛ مدل بوک-ون نرمال شده؛ ساختمان معیار.

Identification of LRB Isolators Using a Modified Normalized Bouc-Wen Model

A. Bahar^{1,*}, M. Rashidi²

¹ Assist. Prof., Faculty of Engineering, University of guilan, Rasht, Iran

² Ph.D. Student, Faculty of Engineering, University of guilan, Rasht, Iran

Abstract

Due to the inherent dynamic characteristics of the restoring force of the lead- rubber bearings (LRBs), seismic behavior of the base-isolated structures are highly affected. Applying the right model based on the non-linear role of the isolator is of utmost importance. This paper presents a compound form, based on the modified normalized Bouc-Wen model, to show the LRB isolator's behavior. This model allows to identify the LRB isolators more accurately by define its phenomenon in two linear and nonlinear phases. Based on a sinusoidal excitation with large enough amplitude, the essential parameters of the model can be realized with a unique test. The identification process and the validation of the model have been carried out using a black box model of an LRB isolator in a smart base-isolated benchmark building scheme as a virtual laboratory experiments. The results show a good level of accuracy for the identified model and make it a proper candidate for LRB isolators representation.

Keywords: LRB Isolator; Stepwise identification Method; Normalized Bouc-Wen Model; Benchmark Building

۱- مقدمه

جداسازی لرزه‌ای ایده‌ای قدیمی است که پیشنهاد می‌کند سازه یا قسمتی از آن از اثرات زمین‌لرزه جدا شود. هدف اصلی جداسازی لرزه‌ای تغییر فرکانس اصلی سازه و دور نگه‌داشتن آن از فرکانس غالب زمین‌لرزه است. ابزارهای جداسازی متنوعی وجود دارند، شامل جداگرهای لاستیکی (با و یا بدون هسته سربی)، جداگرهای اصطکاکی و جداگرهای غلتکی، که همچنان در حال توسعه‌اند و به‌صورت عملی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در دهه‌های اخیر به‌کاررفته‌اند [۱-۵]. در میان سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای، جداگرهای لاستیکی با هسته سربی یا به‌اختصار LRB^۱ به‌صورت گسترده‌ای در سرتاسر جهان استفاده می‌شوند. LRB شامل لایه‌های متناوبی است که از لاستیک و صفحات فولادی با یک یا چند هسته سربی در داخل آن تشکیل شده است. هسته سربی که در برش تغییر شکل می‌دهد، پاسخ هیستریزیس^۲ را فراهم می‌کند و علاوه بر آن در برابر بادهای قوی و زلزله‌های خفیف صلبیت و پایداری اولیه را به وجود می‌آورد تا جداگرها منهدم نشوند و پایداری اولیه سازه تأمین شود [۳ و ۶]. رابطه نیرو-تغییرمکان جداگر LRB غیرخطی است و پیش‌بینی صحیح رفتار لرزه‌ای سازه‌های کف جدا^۳ به‌شدت به مدل ریاضی که برای این سیستم انتخاب می‌شود بستگی دارد. چندین مدل هیستریزیس برای توصیف رفتار دینامیکی جداگر LRB پیشنهاد شده است [۷-۹] که مدل هیستریزیس خطی قطعه‌قطعه‌ای^۴، مدل هیستریزیس چندجمله‌ای^۵ و مدل‌های هیستریزیس منحنی شکل^۶ از آن جمله‌اند. یک مدل مناسب برای یک سیستم دینامیکی معمولاً بر اساس مشخصات نیرو-تغییرمکان به‌دست‌آمده از آزمایش‌های دینامیکی یا استاتیکی شکل می‌گیرد. در دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی برای توسعه روش‌های شناسایی برای سیستم‌های هیستریزیس غیرخطی انجام شده است. این روش‌ها شامل تخمین حداقل مربعات^۷ در حوزه زمان [۱۰-۱۰۰]

[۱۲]، فیلتر کالمن بسط داده‌شده^۸ در حوزه زمان [۱۳ و ۱۴] و تکنیک‌های گام‌به‌گام [۱۵-۱۷] می‌شوند. نی^۹ و همکاران [۱۸]، روش شناسایی پارامترهای جداگرهای هیستریزیس از نوع اصطکاکی را بر اساس مدل بوک-ون بیان کردند که روشی در حوزه زمان به‌منظور شناسایی پارامترهای مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تست‌های ارتعاشی متناوب است. تان^{۱۰} و هوانگ^{۱۱} [۱۹]، روش شناسایی پارامترها را بر اساس تخمین حداقل مربعات^{۱۲} در حوزه فرکانس برای مدل بوک-ون^{۱۳} با استفاده از آزمایش‌های ارتعاشی متناوب توسعه داده‌اند و در آن یک مدل هیستریزیس دوخطی نیز به‌عنوان مدل جایگزین برای جداگرهای هیستریزیس LRB معرفی کردند. فوروکاو^{۱۴} و همکاران [۲۰]، روشی مبتنی بر پیش‌بینی خطا با یک مدل فضای حالت غیرخطی برای شناسایی سازه‌های کف جدا پیشنهاد کردند. چندین مدل نیروی بازگرداننده غیرخطی برای سیستم‌های کف جدا به‌کار برده شده که نمونه‌ای از آن مدل فنر برشی ترکیبی (MSS)^{۱۵} است. در میان همه مدل‌های استفاده‌شده، نتایج نشان می‌دهند که مدل MSS هیستریزیس سه خطی به نیروی بازگرداننده هیستریزیس واقعی بسیار نزدیک است و با آن مطابقت دارد. ژیانگ^{۱۶} و همکاران [۲۱]، روش تخمین حداقل مربعات غیرخطی متوالی (SNLSE)^{۱۷} را به‌منظور شناسایی پارامترهای مدل بکار برده‌اند. این مدل رفتار جداگرهای لاستیکی که بر اساس مدل بوک-ون ساده‌شده است، را توصیف می‌کند. این روش در شناسایی پارامترهای مدل بسیار مؤثر عمل کرده است. دی وی^{۱۸} و همکاران [۲۲]، مدلی ریاضی برای توصیف مشخصات هیستریزیس جداگرهای لاستیکی پیشنهاد دادند. در این مدل، دامنه و فرکانس وابسته به مدل‌های فنر و میراگر که ضرایب آن با دامنه و

⁸ Extended Kalman Filter

⁹ Ni

¹⁰ Tan

¹¹ Huang

¹² Least-Square

¹³ Bouc-Wen

¹⁴ Furukawa

¹⁵ Multiple Shear Spring

¹⁶ Qiang

¹⁷ Sequential Nonlinear Leastsquare Estimation

¹⁸ De-Wei

¹ Lead Rubber Bearing

² Hysteretic

³ Base-Isolated Structure

⁴ Piecewise-Linear Hysteretic Models

⁵ Polynomial Hysteretic Models

⁶ Curvilinear Hysteretic Models

⁷ Least-Square Estimation

مطلوب و سرعت بالاتری است بلکه قابلیت وارون پذیری نیز دارد. رضانی و زهرائی [۲۸]، برای شناسایی فرکانس و میرایی بهینه میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) از شیوه شبکه عصبی بهره گرفتند. با استفاده از شبکه عصبی، بدون اینکه نیاز به درک کامل از پارامترهای مؤثر بر رفتار میراگر وجود داشته باشد، این عوامل به طور غیرمستقیم در پیش‌بینی رفتار آن در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به میزان خطای به دست آمده، می‌توان گفت شبکه عصبی در شناسایی پارامترهای میرایی و فرکانس این میراگر قابل اعتماد است. معافی و معصوم نژاد [۲۹] از فیلتر کالمن برای شناسایی مدل و پالایش داده‌های مخدوش جرتقلیل سقفی استفاده کردند. با توجه به غیرخطی بودن مدل دینامیکی جرتقلیل سقفی، فیلتر کالمن نامتقارن بهبودیافته با الگوریتم ژنتیک برای تخمین پارامترهای سیستم به کار گرفته شد. هدف طراحی در این مقاله دستیابی به نقطه هدف در کمینه زمانی با کمترین میزان خطا بود. نتایج شبیه‌سازی عملکرد بهینه الگوریتم کالمن بهبودیافته نامتقارن را در تعیین زمان سوئیچینگ نشان می‌دهند.

مقاله حاضر، یک مدل ترکیبی برای جداگرهای LRB را پیشنهاد می‌دهد که از مدل بوک-ون اصلاح شده و بسط یافته، برای بیان نیروی بازگرداننده هیستریزس جداگر LRB استفاده می‌کند. به منظور اصلاح روند شناسایی که در ابتدا برای میراگرهای MR معرفی شده بود [۳۱]، جداگر تحت تحریکات با دامنه‌های مختلف قرار داده می‌شود. اعتبارسنجی نتایج به دست آمده برای مدل، با استفاده از برنامه جعبه سیاه^{۱۰} یک جداگر LRB که در ساختمان معیار کف جدا [۳۳] قرار دارد حاصل شده و از این برنامه به عنوان یک آزمایشگاه مجازی استفاده شده است.

این مقاله بر اساس بخش‌های زیر سازمان دهی شده: در بخش ۲، مدل بوک-ون اصلاح شده به صورت مختصر توضیح داده می‌شود. در بخش ۳، روش شناسایی گام به گام توضیح داده شده و کاربرد این روش برای شناسایی جداگر LRB در برنامه ساختمان معیار به صورت کامل بیان خواهد شد.

فرکانسی که برای بیان رابطه بین نیروی غیرخطی و تغییر- مکان آن استفاده شده است، تغییر می‌کند. یینگ^۱ و مینگ^۲ مینگ^۳ [۲۳]، دو نوع الگوریتم را برای شناسایی خصوصیات غیرخطی جداگرهای لاستیکی در ساختمان‌های کف جدا پیشنهاد دادند که در آن تنها از اندازه‌گیری‌های محلی پاسخ‌های دینامیکی سازه استفاده شده است. اولین الگوریتم بر اساس فیلتر کالمن بسط داده شده برای شناسایی پارامتریک مدل‌های غیرخطی جداگر لاستیکی قرار داشت و الگوریتم دوم به منظور شناسایی خواص غیرخطی آزاد از مدل سیستم کف جدا، با جداگر لاستیکی پیشنهاد شده بود. علاوه بر مدل‌های شناسایی ذکر شده، روش‌های شناسایی بر مبنای الگوریتم ژنتیک (GA)^۴ [۲۴ و ۲۵] نیز برای شناسایی پارامترهای مجهول پیشنهاد شده‌اند. با این وجود، به دلیل پیچیدگی مدل‌های شناسایی شده، این الگوریتم‌ها در پیدا نمودن راه‌حل‌های بهینه دچار نقص هستند. همچنین، به دانش اولیه درباره هدف پارامترها نیز نیاز است تا سرعت همگرایی افزایش یابد. یو^۴ و همکاران [۲۶] از الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه (IFFOA)^۵ که از تکنیک بهینه‌سازی استفاده می‌کند به منظور شناسایی پارامترهای مدل اصطکاکی لوگره^۶ برای نمایش رفتار جداگرهای لاستیکی با مایع مغناطیسی (MRE)^۷ استفاده کردند. با استفاده از این الگوریتم، سرعت همگرایی افزایش داده شد و نتایج دقیق‌تری به دست آمد. مهرکیان و همکارانش [۲۷]، به بررسی مدل‌های موجود برای میراگر MR^۸ پرداختند و پارامترهای آن‌ها را با استفاده از روش بهینه‌سازی ژنتیکی تحت شرایط برابر شناسایی نمودند. آن‌ها در این پژوهش، یک مدل شبه استاتیکی نیز برای میراگر معرفی کردند که بدون معادله دیفرانسیل بوده و وارون پذیر است. با توجه به مقایسه‌های انجام شده به این نتیجه دست یافتند که مدل ارائه شده مؤثرتر از مدل‌های دینامیکی عمل می‌کند زیرا نه تنها دارای دقت

¹ Ying

² Ming

³ Genetic Algorithm

⁴ Yu

⁵ Fruit Fly Optimization Algorithm

⁶ Lugre

⁷ Magnetorheological Elastomer

⁸ Magnetorheological

⁹ Tuned Mass Damper

¹⁰ Black-Box

$$\dot{\omega}(t) = \rho[\dot{x}(t) - \sigma|\dot{x}| \|\omega(t)\|^{n-1} \omega(t) + (\sigma-1)\dot{x}(t) \|\omega(t)\|^n] \quad (5)$$

که در آن‌ها،

$$\rho = \frac{A}{Dz_0} > 0, \sigma = \frac{\beta}{\beta + \gamma} \geq 0, k_x = \alpha x > 0, k_\omega = (1 - \alpha)Dkz > 0$$

معادلات ۴ و ۵ فرم نرمال شده معادله بوک-ون نامیده می‌شوند. یکی از امتیازات این فرم این است که بجای ۷ پارامتر، ۵ پارامتر در آن باید شناسایی شود. توجه شود که فرم نرمال شده مدل بوک-ون دقیقاً هم‌ارز با فرم استاندارد آن است.

۲-۳- مدل بوک-ون نرمال شده و بسط یافته

بهار و همکاران [۳۱]، به این نتیجه رسیدند که مدل استفاده شده در معادلات ۴ و ۵ فقط برای ابزارهایی که دارای رفتارهای از نوع برشی هستند، مناسباند. بنابراین مدلی اصلاح شده را به منظور بهبود دقت روندهای شناسایی برای کلیه ابزارها بر اساس مدل بوک-ون نرمال شده پیشنهاد دادند که به صورت معادلات زیر بیان می‌شود.

$$f(t) = k_x x(t) + k_{\dot{x}} \dot{x}(t) + k_\omega \omega(t) \quad (6)$$

$$\dot{\omega}(t) = \rho[\dot{x}(t) - \sigma|\dot{x}| \|\omega(t)\|^{n-1} \omega(t) + (\sigma-1)\dot{x}(t) \|\omega(t)\|^n] \quad (7)$$

و در آن‌ها:

$$k_x > 0, k_{\dot{x}} > 0, k_\omega > 0,$$

$$\rho > 0, \sigma > \frac{1}{2}, n \geq 1$$

این مقاله بر آن است تا با استفاده از این رابطه، مدل سازی جداگرهای LRB را انجام دهد. یعنی فرض می‌شود که نیروی بازگرداننده‌ای که در اثر تغییر شکل‌های جانبی در این جداگرها ایجاد می‌شود، ترکیبی است از ترم‌های الاستیک، ویسکوز و هیستریزیس. در بخش بعدی برای اولین بار مدل بوک-ون نرمال شده و اصلاح شده، برای شناسایی رفتار جداگرهای LRB مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۳- روش شناسایی

۳-۱- الگوریتم شناسایی

در مدل بوک-ون نرمال شده بسط یافته، مطابق معادلات ۶ و ۷، مجموعه $\{k_x, k_{\dot{x}}, k_\omega, \rho, \sigma, n\}$ پارامترهای مدل هستند که باید از طریق روند شناسایی گام به گام تعیین شوند. این روند بر اساس سه گام اصلی زیر [۳۱] استوار است.

- تخمین پارامتر k_x .

بخش ۴، درباره بهبود عملکرد روند شناسایی است و در انتها نتیجه‌گیری قرار دارد که در بخش ۵ ارائه شده است.

۲- مدل بوک-ون و مدل اصلاح شده آن

۲-۱- مدل بوک-ون

بر اساس مدل بوک-ون می‌توان رابطه بین نیرو و تغییر مکان را در ابزارهای هیستریزیس به صورت معادله دیفرانسیل غیرخطی زبر بیان داشت.

$$f(t) = \alpha kx(t) + (1 - \alpha)Dkz(t) \quad (1)$$

$$\dot{z}(t) = D^{-1}(\alpha \dot{x}(t) - \beta|\dot{x}| \|z(t)\|^{n-1} z(t) - \gamma \dot{x}(t) \|z(t)\|^n) \quad (2)$$

که در آن \dot{z} بیانگر مشتق زمانی نسبت به z بوده و z ترم هیستریزیس موجود در معادله است. $n > 1$ می‌باشد که شرایط انتقال از ناحیه الاستیک به پلاستیک را بیان می‌کند. $D > 0$ و $k > 0$ به ترتیب تغییر مکان تسلیم و سختی پیش از تسلیم جداگر می‌باشند. β ، A و γ پارامترهای بدون بعدی هستند که شکل چرخه هیستریزیس را کنترل می‌کنند و به همراه α ، n ، D از طریق شناسایی تعیین می‌شوند.

۲-۲- مدل بوک-ون اصلاح شده

ایرادی که به مدل استاندارد وارد شده این است که روندهای شناسایی نمی‌توانند پارامترهای مدل بوک-ون را به صورت کامل تعیین کنند. بنابراین، کاربران این مدل اغلب، بعضی از این پارامترها را ثابت و از پیش تعریف شده در نظر می‌گیرند و این خود باعث می‌شود که مقایسه نتایج شناسایی شده که از روش‌های شناسایی متفاوت حاصل شده‌اند، مشکل شود. لازم است که مدلی نرمال شده و همسنگ برای مقایسه نتایج برای روش‌های شناسایی متفاوت معرفی شود. به منظور دستیابی به این اهداف، اخوان^۱ و رودیار^۲ در [۳۰] پارامتر زیر را معرفی معرفی کرده‌اند.

$$\omega(t) = \frac{z(t)}{z_0} \quad (3)$$

بنابراین، معادلات ۱ و ۲ به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$f(t) = k_x x(t) + k_\omega \omega(t) \quad (4)$$

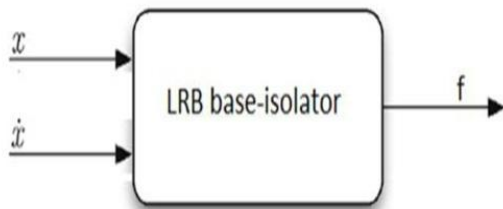
¹ Ikhouane

² Rodellar

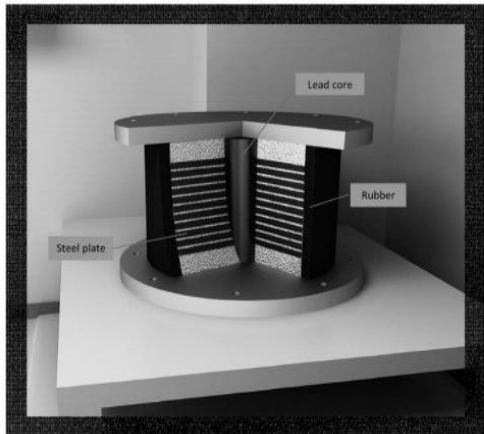
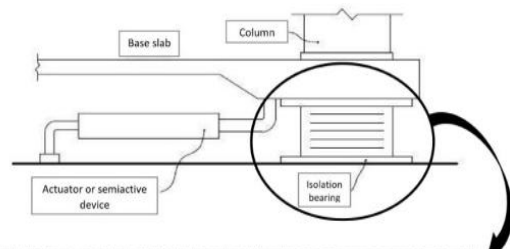
جداسازی، شامل ۹۲ جداگر است (۳۱ جداگر لاستیکی بدون هسته و ۶۱ جداگر لاستیکی با هسته سربی). جداگرها بین عرشه بالایی و پی زیرین مطابق شکل ۲ متصل شده‌اند.

۲-۲-۳- نتایج شناسایی

به‌منظور استفاده از روند شناسایی توضیح داده‌شده، لازم است تا تحریک سینوسی با دامنه مناسب به نمونه اعمال شود. تغییرمکان بوجودآمده در جداگر در شکل ۳ نمایش داده شده است و شکل ۴ دیاگرام نیرو-تغییر مکان جداگر را



شکل ۱- متغیرهای ورودی - خروجی جداگر LRB



شکل ۲- نمایی از ابزار کنترلی در کف سازه معیار (در خلال شناسایی، میراگر خاموش است)

- تخمین پارامترهای k_x و k_ω .
- تخمین باقی پارامترها بر اساس الگوریتم شناسایی موجود در [۳۲].

محاسبه پارامتر k_x می‌تواند به‌صورت گرافیکی با ملاحظه دیاگرام نیرو-تغییرمکان جداگر LRB انجام شود. وقتی جداگر به‌وسیله موج سینوسی با دامنه‌ای که به‌اندازه کافی بزرگ است تحریک شود، شیب متوسط منحنی، تخمینی از این پارامتر خواهد بود. به‌منظور تخمین باقی پارامترها، با معلوم بودن مقدار k_x سهم عملکرد ارتجاعی از نتایج حذف می‌شود.

$$f_n(t) = f(t) - k_x x(t) = k_x \dot{x}(t) + k_\omega \dot{\omega}(t) \quad (8)$$

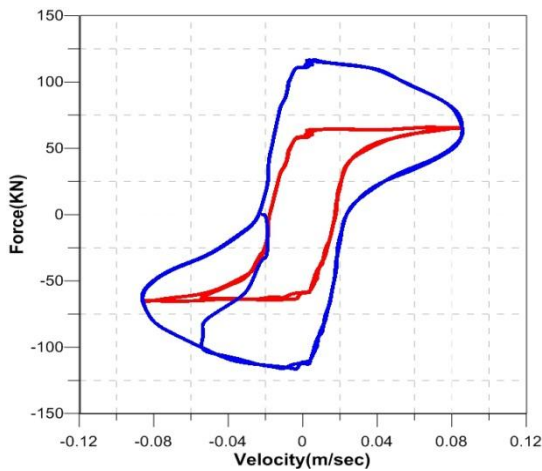
پارامترهای k_x و k_ω به‌وسیله دیاگرام نیرو-سرعت برای نیروی خروجی جداگر LRB منهای نیروی الاستیک خطی $k_x x(t)$ به دست می‌آیند. این دو پارامتر از طریق رگرسیون خطی شاخه پلاستیک دیاگرام، شناسایی می‌شوند. تخمین پارامترهای باقیمانده نیز بر اساس الگوریتم شناسایی که در [۳۲] وجود دارد و در پیوست بیان شده، انجام می‌گیرد.

۲-۳- کاربرد در ساختمان معیار

به‌عنوان نمونه، جداگر LRB که به‌عنوان یک مدل جعبه سیاه در ساختمان معیار کف‌جدا [۳۳] وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود. از این برنامه عددی به‌عنوان یک آزمایشگاه مجازی مطابق شکل ۱ به‌منظور انجام تست‌های مختلف استفاده می‌شود.

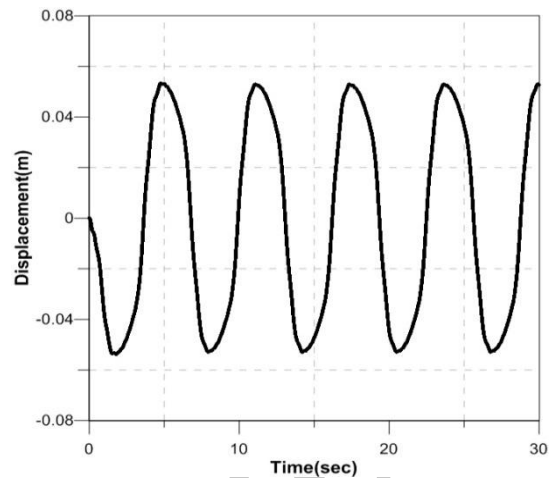
۲-۳-۱- ساختمان معیار کف‌جدا

ساختمان معیار کف‌جدا [۳۳] به‌وسیله کمیته کنترل سازه‌ای مهندسان عمران آمریکا (ASCE) تهیه‌شده و به‌عنوان یک مدل مرجع شناخته می‌شود که یک برنامه محاسباتی را برای آزمایش‌های عددی کنترل سازه‌ای فراهم می‌کند. سازه معیار، یک ساختمان هشت طبقه با قاب‌های مهاربندی فولادی است که دارای طول ۸۲/۴ متر و عرض ۵۴/۳ متر مشابه سازه موجود در لس‌آنجلس کالیفرنیا است. سیستم کف تقریباً صلب سازه از ترکیب بتن و تیرهای سخت فولادی تشکیل شده‌است. سازه فولادی فوقانی بر روی یک کف بتن مسلح قرار دارد که با تیرهای فولادی یکپارچه شده‌است و به‌وسیله یک‌لایه جداگر از زمین جدا شده‌است. در زیر سازه، لایه

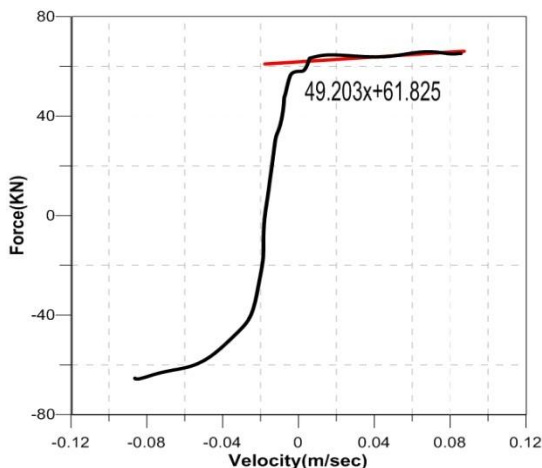


شکل ۵- دیاگرام نیرو- سرعت برای نیروی بازگرداننده جداگر LRB (آبی) و "نیروی به روز شده"

$$f_n(t) = f(t) - k_x x(t)$$

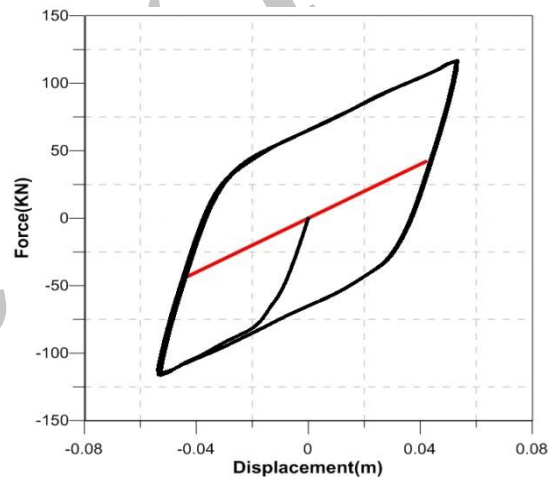


شکل ۳- تغییر مکان جداگر تحت تحریک سینوسی



شکل ۶- مرحله بارگذاری دیاگرام "نیروی به روز شده-"

سرعت" به منظور محاسبه k_x و k_ω



شکل ۴- شیب متوسط دیاگرام نیرو- تغییر مکان وقتی که سازه به وسیله یک موج سینوسی تحریک شده است و تخمین پارامتر k_x

بارگذاری و باربرداری در دیاگرام نیرو-سرعت مطابق شکل ۵ باید تقریباً برهم منطبق باشند.

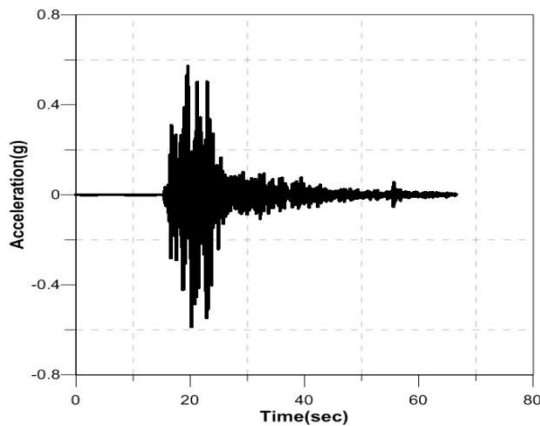
پارامترهای k_x و k_ω از رگرسیون خطی شاخه‌های پلاستیک که در شکل ۶ نشان داده شده است، به دست می‌آید. معادلات ۱۱ تا ۱۸ در پیوست ۱ ادامه روند شناسایی پارامترهای باقی‌مانده مدل بوک-ون نرمال شده را تکمیل می‌کند [۳۲]. بنابراین، پارامترهای مجهول مطابق زیر شناسایی می‌شوند:

$$n = 1.451, \rho = 89.4, \sigma = 0.976$$

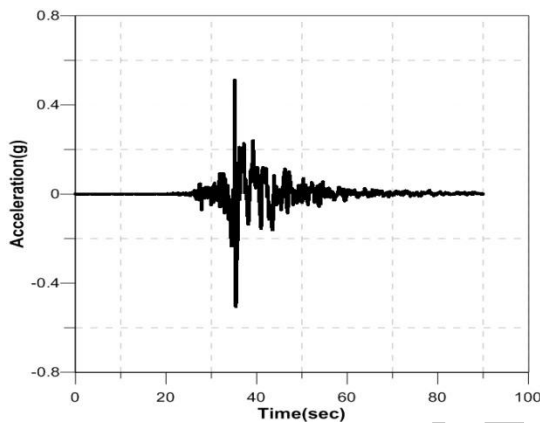
نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ پیداست، دیاگرام نیرو-تغییر مکان شیب متوسطی دارد که تقریباً برابر با شیب شاخه پلاستیک منحنی است. خط قرمز در شکل، این شیب را نشان می‌دهد که ضریب الاستیک k_x از آن قابل محاسبه است.

$$k_x = 20/0.02 = 1000 \text{ KN/m}$$

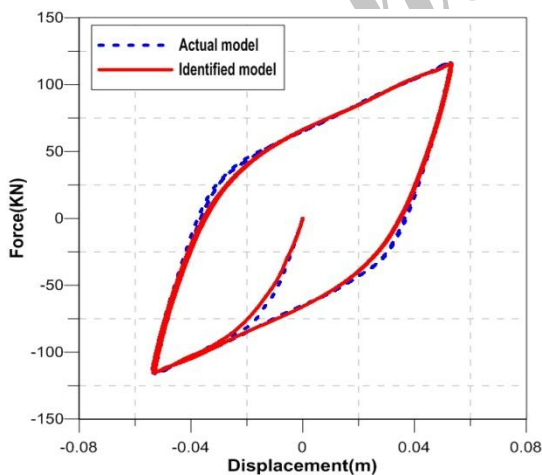
کنترل شاخه‌های پلاستیک دیاگرام نیرو-سرعت در حضور و در غیاب ترم الاستیک کمک می‌کند تا از درستی مقدار k_x اطمینان حاصل شود. پس از حذف ترم الاستیک، شاخه‌های



شکل ۷- مؤلفه ۰۲-۳۱۶۸ در جهت افقی زلزله بم



شکل ۸- مؤلفه عمود بر گسل زلزله چی چی



شکل ۹- دیاگرام نیرو-تغییر مکان جداگر برای نیروی مرجع (آبی) و نیروی شناسایی شده (قرمز) وقتی که سازه به وسیله یک تحریک سینوسی تحریک شده است

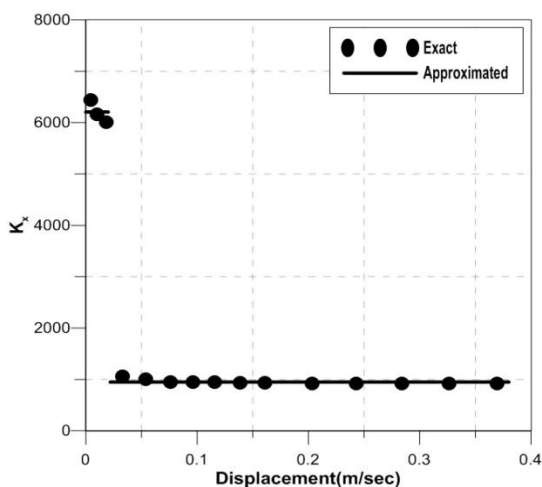
۳-۲-۳- تکمیل روند شناسایی جداگر

در این قسمت ابتدا مدل شناسایی شده با مدل مرجع جداگر LRB که در ساختمان معیار وجود دارد تحت تحریک سینوسی استفاده شده در روند اولیه شناسایی، مقایسه می‌شود. سپس، این مقایسه تحت دو تحریک لرزه‌ای زلزله بم، مؤلفه ۰۲-۳۱۶۸ در جهت افقی (ایران ۲۰۰۳) و زلزله چی چی^۱، مؤلفه عمود بر گسل (تایوان ۱۹۹۹) انجام می‌گیرد. شتاب این زلزله‌ها به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. دیاگرام نیرو-تغییر مکان منتج شده تحت تحریک سینوسی در شکل ۹ نشان داده شده است. دقت خوبی بین مدل شناسایی شده و مدل مرجع که از مدل جعبه سیاه به دست آمده است، وجود دارد.

اما همان گونه که اشاره شد انتظار می‌رود که این نوع از جداگرها را نتوان فقط با یک رابطه بیان داشت. برای کنترل این فرض از یک تحریک زلزله استفاده می‌شود. در دیاگرام‌های مقایسه شده تحت تحریکات زلزله بم و چی چی مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ناسازگاری بین مدل شناسایی شده و مدل مرجع وجود دارد که در برخی نواحی دیده می‌شود. این طور به نظر می‌رسد که پارامترهای شناسایی شده فقط برای تحریکات قوی است که به خوبی کار می‌کنند. اما برای تحریکات متوسط یا کوچک که در آن جداگر در بازه‌های تغییرشکلی محدود کار می‌کند، مدل شناسایی شده دقیق نیست و مقادیر به دست آمده کمتر از مقادیر اصلی تخمین زده شده‌اند. به این ترتیب تأیید می‌شود که تخمین رفتار جداگر در طی روند شناسایی و به دست آوردن پارامترها بسیار مهم است به طوری که شناسایی باید نسبت به محدوده تسلیم جداگر حساس باشد. بنابراین یک قدم اصلاحی به روش شناسایی قبلی اضافه خواهد شد تا مدلی که برای جداگر ارائه می‌شود نسبت به تغییر مکان تسلیم جداگر واکنش مناسب نشان داده و برای تغییرشکل‌های محدود جوابگو باشد.

مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مدل توصیف شده (معادلات ۶ و ۷) رفتار جداگر LRB را در بازه‌های ارتعاشی کوچک نمی‌تواند نشان دهد.

^۱ Chichi



شکل ۱۲- مقادیر پارامتر k_x برای تحریکات مختلف با دامنه‌های متفاوت

برای تکمیل مدل، مقادیر متوسط ضریب k_x در هر کدام از این گروه‌ها به‌عنوان سختی پیش از تسلیم جداگر LRB و سختی پس از آن انتخاب می‌شود. در واقع و در عمل برای یافتن سختی الاستیک متناظر با فاز خطی رفتار جداگر، نیازی به بکار بردن تحریک جدید نیست. این مقدار را می‌توان به راحتی از دیاگرام شکل ۴ در قسمت قبلی به دست آورد. به این ترتیب، مدل اصلاح شده و ترکیبی جداگر LRB به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

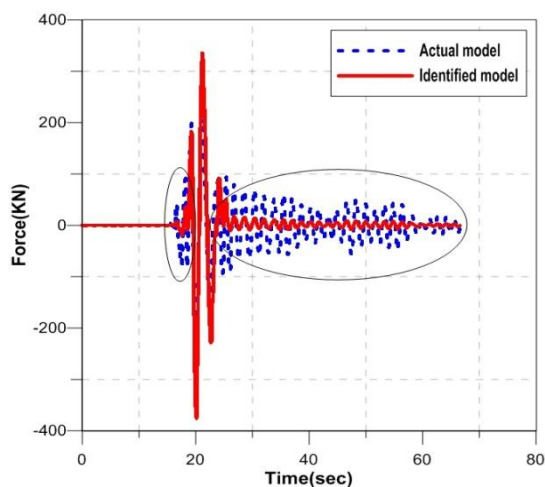
$$f_{LRB} = \begin{cases} k_{x1}x(t), & |x_b| < x_y \\ k_{x2}x(t) + k_x\dot{x}(t) + k_\omega\omega(t), & |x_b| \geq x_y \end{cases} \quad (9)$$

$$\dot{\omega}(t) = \rho[\dot{x}(t) - \sigma|\dot{x}(t)|^{n-1}\omega(t) + (\sigma-1)\dot{x}(t)|\dot{x}(t)|^n] \quad (10)$$

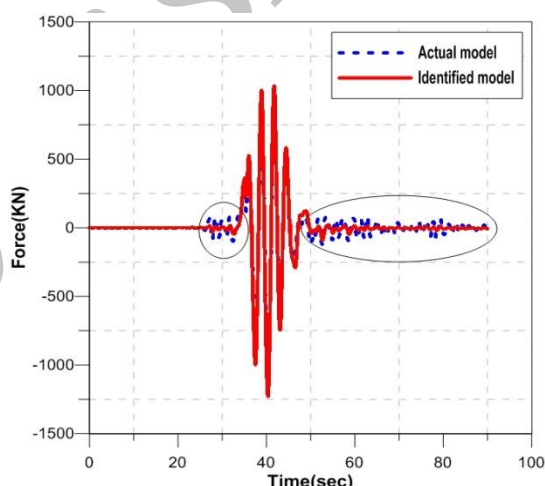
که در آن x_y تغییر مکان متناظر با تسلیم جداگر است. این مقدار برای این جداگر برابر با ۰/۰۲ متر تعیین شده است. مقادیر نهایی به دست آمده برای این پارامترها در جدول ۱ لیست شده‌اند.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای شناسایی شده به وسیله روش شناسایی گام به گام اصلاح شده

	$k_{x1,2}$	k_x	k_ω	n	ρ	σ
$ x_b < x_y$	6206.5	-	-	-	-	-
$ x_b \geq x_y$	1000	49.203	61.825	1.451	89.4	0.976



شکل ۱۰- مقایسه نیروی بازگرداننده جداگر LRB برای مدل شناسایی شده و مدل مرجع تحت تحریک زلزله بم

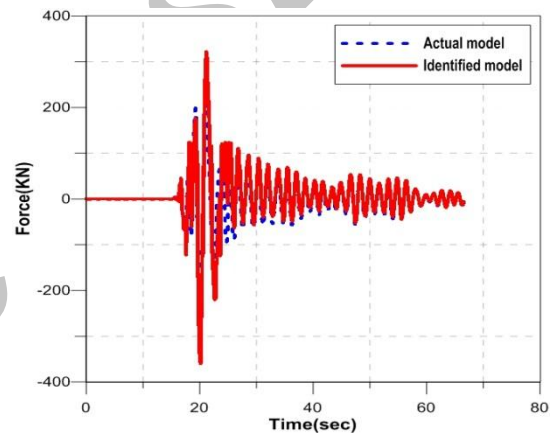


شکل ۱۱- مقایسه نیروی بازگرداننده جداگر LRB برای مدل شناسایی شده و مدل مرجع تحت تحریک زلزله چی چی

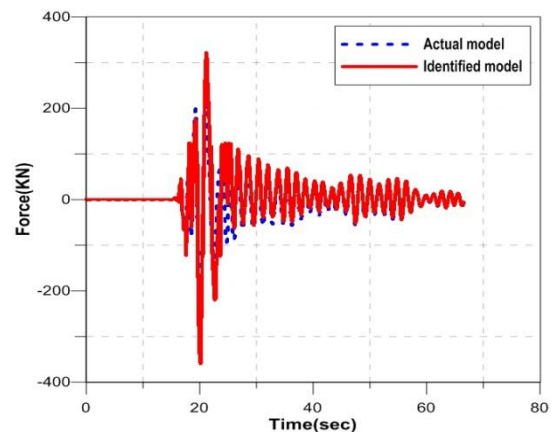
قبل از تغییر شکل تسلیم، رفتار جداگر خطی است و بنابراین باید تنها ترم الاستیک برای نمایش رفتار جداگر کافی باشد. واضح است که مقدار تغییر مکان تسلیم جداگر را می‌توان از دیاگرام نیرو-تغییر مکان مطابق شکل ۴ به دست آورد. به منظور مشاهده تأثیر تغییر مکان تسلیم بر روی مقادیر ترم الاستیک، با انجام آزمایشی مطابق شکل ۱۲، جداگر LRB تحت تحریکات مختلفی با دامنه‌های متفاوت قرار داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، تقریباً دو گروه مختلف از مقادیر به دست آمده‌اند.

۴- اعتبارسنجی مدل

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ پاسخ مدل شناسایی شده را بر مبنای معادله ۹ و پاسخ مدل مرجع نشان می‌دهد. این شکل‌ها نشان می‌دهند که مدل پیشنهاد شده بهتر رفتار می‌کند و پارامترهای شناسایی شده دقیق می‌باشند. بنابراین سازگاری مناسب‌تری بین مدل‌های مرجع و مدل شناسایی شده برقرار می‌شود. به منظور اندازه‌گیری اختلاف بین نیروی به دست آمده از مدل شناسایی پیشنهادی و نیروی واقعی، از نمودارهای اختلاف بین این دو نیرو استفاده می‌شود. شکل ۱۵ اختلاف دو نیروی حاصل از شناسایی و نیروی واقعی را نشان می‌دهد. با توجه به نتیجه حاصل شده، کیفیت شناسایی مطلوب ارزیابی می‌شود.



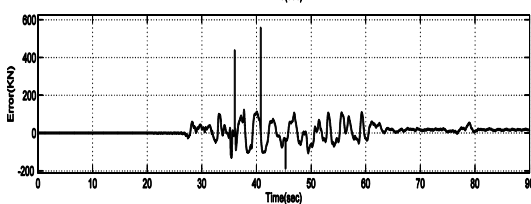
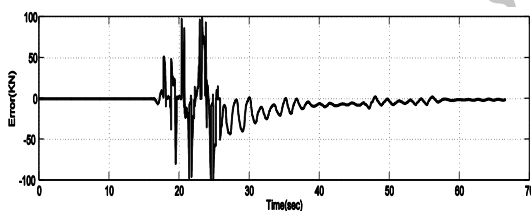
شکل ۱۳- مقایسه نیروی بازگرداننده جداگر LRB از روش شناسایی شده پیشنهادی و نیروی مرجع تحت زلزله بم



شکل ۱۴- مقایسه نیروی بازگرداننده جداگر LRB از روش شناسایی شده پیشنهادی و نیروی مرجع تحت زلزله چی چی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل ترکیبی بر اساس مدل بوک-ون نرمال شده برای جداگرهای LRB پیشنهاد شده است. پارامترهای این مدل با افزودن یک مرحله جدید و اصلاح روش شناسایی گام به گامی که دارای سازمان‌دهی خوبی است و برای میراگرهای MR ارائه شده، تعیین می‌شوند. نشان داده شد که با تعریف دو فاز خطی و غیرخطی برای جداگرهای LRB، شناسایی با دقت بسیار بالاتری انجام می‌گیرد. پارامترهای اصلی مدل به کمک فقط یک تحریک سینوسی که دامنه حرکتی نسبتاً بزرگی دارند، به دست می‌آیند. سختی الاستیک با محاسبه شیب فاز خطی دیاگرام نیرو- تغییرمکان حاصل می‌شود و ضرایب ترم ویسکوز و هیستریزس نیز از رگرسیون خطی شاخه پلاستیک محاسبه شده‌اند. در ادامه پارامترهای ρ, n و σ با انجام یک آزمایش حاصل شدند. اعتبارسنجی روش شناسایی با استفاده از یک مدل جعبه سیاه جداگر LRB در ساختمان معیار کف جدا انجام شد و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه مجازی، سطحی خوب از دقت را بین نیروی شناسایی شده و نیروی مرجع برای این ابزار نشان می‌دهند.



شکل ۱۵- خطای به وجود آمده بین نیروی واقعی و نیروی شناسایی شده جداگر LRB تحت زلزله بم (بالا) و زلزله چی چی (پایین)

۶- پیوست ۱

به منظور ادامه تخمین پارامترها مطابق [۲۶]، تابع θ مطابق زیر پیشنهاد شده است.

۷- مراجع

- [1] Buckle IG, Mayes RL (1990) Seismic isolation history, application and performance-a world view. *Earthq Spectra* 6: 161-201.
- [2] Naeim F, Kelly JM (1999) Design of seismic isolated structures: From theory to practice. 1st edn. Hoboken. John Wiley & Sons.
- [3] Jangid RS (2007) Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions. *Eng Struct* 29: 2503-2513.
- [4] Kelly JM (1986) A seismic base isolation: Review and bibliography. *Soil Dyn Earthq Eng* 110: 186-203.
- [5] Jangid RS, Datta TK (1995) Seismic behaviour of base isolated building-A state-of-the-art-review. *P I Civil Eng-Str B* 110(2): 186-203.
- [6] Tyler RG, Robinson WH (1984) High-strain tests on lead-rubber bearings for earthquake loadings. *B New Zealand Nat Soc Earthq Eng* 17: 90-105.
- [7] Wen YK (1976) Method for random vibration of hysteretic systems. *J Eng Mech Div* 102(2): 249-263.
- [8] Wen YK (1980) Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitations. *J Appl Mech-T ASME* 47(1): 150-154.
- [9] Zhou L, Wu SY, Yang JN (2008) Experimental study of an adaptive extended kalman filter for structural damage identification. *J Infrastruct Syst* 14(1): 42-51.
- [10] Lin JW, Betti R, Smyth WA, Longman RW (2001) On-line Identification of nonlinear hysteretic structural system using a variable trace approach. *Earthquake Eng Struct* 30: 1279-1303.
- [11] Loh CH, Lin CY, Huang CC (2000) Time domain identification of frames under earthquake loadings. *J Eng Mech-ASCE* 126(7): 693-703.
- [12] Yang JN, Lin S (2004) On-line identification of nonlinear hysteretic structures using an adaptive tracking technique. *Int J Nonlinear Mech* 39: 1481-1491.
- [13] Hoshiya M, Maruyama O (1987) Kalman filtering of versatile restoring systems. 1st edn. *Stochastic Approaches in Earthquake Engineering Lecture Notes in Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Florida.
- [14] Lin L-S, Zhang Y (1994) Nonlinear structural identification using extended Kalman filter. *Comput Struct* 52: 757-764.
- [15] Loh CH, Chung ST (1998). A three-stage identification approach for hysteretic systems. *Earthquake Eng Struct* 22: 1435-1459.
- [16] Ramallo JC, Yoshioka H, Spencer BF (2004) A two-step identification technique for semiactive control system. *Struct Control Hlth* 11: 273-289.

$$\theta(\tau) = f_n(\tau) - k_x \frac{dx(\tau)}{d\tau}, \quad \tau \in [0, T^+] \quad (11)$$

که یک صفر یکتایی در آن وجود دارد. با توجه به ثابت زمانی که در آن وجود دارد $\tau_* \in [0, T^+]$ و مقدار متناظر با آن $x_* = x(\tau_*) \in [X_{\min}, X_{\max}]$ تابع θ مقداری صفر خواهد داشت. از آنجایی که تابع θ معلوم است، x_* به دست می‌آید. مقدار a نیز به صورت زیر تعریف می‌شود که شیب تابع θ در نقطه x_* است.

$$a = \left(\frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=x_*} \quad (12)$$

سپس پارامتر n از فرمول زیر تعیین می‌شود.

$$n = \frac{\log \left[\frac{\left(\frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=x_{*2}} - a}{\left(\frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=x_{*1}} - a} \right]}{\log \left(\frac{\theta_{x=x_{*2}}}{\theta_{x=x_{*1}}} \right)} \quad (13)$$

در جاییکه $x_{*2} > x_{*1} > x_*$ ، پارامترهای بعدی به دست می‌آیند.

$$b = \frac{a - \left(\frac{d\theta(x)}{dx} \right)_{x=x_{*2}}}{\theta(x_{*2})^n} \quad (14)$$

که پارامترهای k_ω و ρ از روابط زیر حاصل می‌شوند.

$$k_\omega = n \sqrt{\frac{a}{b}}, \quad (15)$$

$$\rho = \frac{a}{k_\omega} \quad (16)$$

تابع $\bar{\omega}(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{\omega}(x) = \frac{\theta(x)}{k_\omega} \quad (17)$$

در انتها پارامتر σ از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{\left(\frac{d\bar{\omega}(x)}{dx} \right)_{x=x_{*3}} - 1}{\frac{\rho}{(-\bar{\omega}(x_{*3}))^n}} \right) + 1 \quad (18)$$

که x_{*3} درجایی از نمودار است که $x_{*3} < x_*$ باشد.

- [26] Yu Y, Li Y, Li J (2015) Parameter identification and sensitivity analysis of an improved LuGre friction model for magnetorheological elastomer base isolator. *Meccanica* 50: 2691-2707.
- [۲۷] مهرکیان ب، بهار آ، چائی بخش ع (۱۳۹۴) بهینه‌سازی ژنتیکی محاسبات سخت در مقابل محاسبات نرم برای مدل‌سازی میراگر MR و ارائه یک مدل شبه استاتیکی وارون-پذیر. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر-عمران و محیط‌زیست. ۴۷(۲): ۳۳-۵۰.
- [۲۸] رضانی م، زهرائی س م (۱۳۹۵) پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شده برای سازه‌های بلند به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله علمی پژوهشی عمران مدرس. ۱۶(۴): ۱۰۹-۱۲۱.
- [۲۹] معافی س ع، معصوم نژاد م (۱۳۹۵) تعیین بهینه زمان سوئیچینگ کنترلر بنگ-بنگ برای سیستم نامعین جرتقیل سقفی. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۱۸۶-۱۷۸: ۱۶(۵).
- [30] Ikhouane F, Rodellar J (2007) System with hysteresis: Analysis, identification and control using the Bouc-Wen model. John Wiley & Sons, Ltd.
- [31] Bahar A, Pozzo F, Acho L, rodellar J, Barbat A (2010) Parameter identification of large-scale magnetorheological dampers in a benchmark building. *Comput Struct* 88: 198-206.
- [32] Rodriguez A, Iwata N, Ikhouane F, Rodellar J (2009) Model identification of a large-scale magnetorheological fluid damper. *Smart Mater Struct* 18(1): 015010 .
- [33] Narasimhan S, Nagarajaiah S, Johnson EA, Gavin HP (2000) Smart base-isolated benchmark building. Part 1: problem definition. *Struct Control Health* 13: 573-588.
- [17] Lil SJ, Suzuki Y, Noori M (2004) Identification of hysteretic system with slip using bootstrap filter. *Mech Syst Signal Pr* 18: 781-795.
- [18] Ni YQ, Ko JM, Wong CW (1998) Identification of nonlinear hysteretic isolators from periodic vibration tests. *J Sound Vib* 217(4): 737-756.
- [19] Tan RY, Huang MC (2000) System identification of a bridge with lead-rubber bearings. *Comput Struct* 74: 267-280.
- [20] Furukawa T, Ito M, Izawa K, Noori MN, ASCE M (2005) System Identification of base-isolated building using seismic response data. *J Eng Mech-ASCE* 131: 268-275.
- [21] Qiang Y, Li Z, Xinming W, ASCE M (2010) Parameter identification of hysteretic model of rubber-bearing based on sequential nonlinear least-square estimation. *Earthq Eng Eng Vib* 9(3): 375-383.
- [22] De-wei S, Zhi-gang C, Guang-yu Z, Berhard P (2011) Modeling and parameter identification of amplitude- and frequency-dependent rubber isolator. *J Cent South Univ Technol* 18: 672-678.
- [23] Ying L, Ming H (2013) Identification of the nonlinear properties of rubber-bearings in base-isolated buildings with limited seismic response data. *Technol Sci* 5:1224-1231.
- [24] Yu Y, Li Y, Li J (2014) Parameter identification of an improved Dahl model for magnetorheological elastomer base isolator based on enhanced genetic algorithm. In: Proceedings of 23rd Australasian conference on the mechanics of structures and materials, Byron Bay, Australia.
- [25] Yu Y, Li Y, Li J (2014) Parameter identification of a novel strain stiffening model for magnetorheological elastomer base isolator utilizing enhanced particle swarm optimization. *J Intel Mat Syst Str*, in press.