



Investigating the Effective Parameters on the Performance of Hybrid Lead Rubber Bearing with Shape Memory Alloy

R. Mahmoodi, H. Tajmir Riahi* , M.R. Zare

Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

ABSTRACT: In this paper, numerical analysis of the hybrid lead rubber bearing system with shape memory alloy was investigated by the finite element method using ABAQUS software and the effectiveness of various parameters on its performance was examined. The studied parameters were the bearing dimensions, type of shape memory alloy and its cross-sectional area, the lead core diameter, the thickness of rubber layers and the compressive stress applied on the bearing. In this hybrid bearing, shape memory alloy wires were used as a recovery unit and lead core was used as a unit for energy dissipation. For this purpose, a finite element model of the bearing was modeled using the Abaqus software and the effect of the various parameters mentioned on the bearing performance has been investigated. The results showed that this hybrid bearing has better seismic performance than lead rubber bearing. Finally, depending on what kind of performance is required from the bearing, its specifications can be obtained optimally.

Review History:

Received: 7/24/2018
Revised: 10/26/2018
Accepted: 10/28/2018
Available Online: 12/15/2018

Keywords:

Base isolation
Lead rubber bearing
Shape memory alloy
Passive control
Seismic performance

1. INTRODUCTION

Design methods and technologies for the implementation of earthquake resistant buildings have progressed dramatically in recent years. In the meantime, energy control and energy control systems, such as seismic isolation in buildings and bridges, have shown good performance against seismic hazards. Seismic isolation is one of the best ways to reduce the impact of earthquakes on structures by separating the horizontal motion of the structure from the ground motion. This separation is accomplished by adding horizontal flexibility and damping at the base of the structure [1].

Robinson et al. introduced a lead rubber bearing (LRB) in 1981. This bearing consists of rubber and steel layers as well as the lead core [2-4]. The lead core produces damping for LRB while rubber layers help LRB to restore its deformation. To decrease residual deformation of bearing, Dezfuli and Alam [5] examined two types of rubber bearings consisting of two different layouts of shape memory alloy (SMA) wires. They used SMA wires as additional elements that improve the performance of the bearing by increasing energy dissipation capacity and reducing residual displacements in large strains. They studied the effects of shear strain amplitude parameters, SMA type, bearing size ratio, wire diameter, and pre-strain level of wires. The results indicate that when rubber bearing with is subjected to a large shear strain range, the SMA wire with a super elastic strain of 13.5% is the best choice. The results show that the cross-sectional area of the wires is

most effective parameter in reducing residual deformation. Dezfuli and Alam [6] also presented a theoretical model of LRB equipped with SMA wires. The results show that SMA restoration property decreases the residual deformation in the bearing.

Shape memory alloys are capable of returning to their original shape even in large deformations. These alloys have two austenite and martensite phases of performance. The austenite phase has a cubic structure and it is tight because of its high symmetry. The martensite phase can be twisted more easily. Its shape is monoclinic and less symmetrical than austenite. The martensitic phase is a thermostatic phase that has two characteristics of slippery and low energy, which changes with a small change in temperature and stress. Unless the alloy is cooled, in the absence of loading, the phase shift from austenite to martensite occurs, which is not the result of this phase change, which is macroscopic. As the material is heated in the martensite phase, the phase reversal occurs [7].

In this study, the lead rubber bearing with SMA wires has been studied. These wires are arranged in crosswise shape in two opposite directions, as shown in Figure 1.

2. METHODOLOGY

2.1 Verification

In order to carry out numerical analyses on the seismic performance of LRB equipped with SMA wires, it is necessary to first verify the accuracy of the numerical model. For this purpose, numerical models are verified using laboratory results. Since this type of bearing has not been investigated,

*Corresponding author's email: tajmir@eng.ui.ac.ir



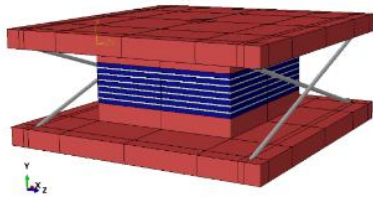


Figure 1. Hybrid LRB with SMA wires modeled in this study

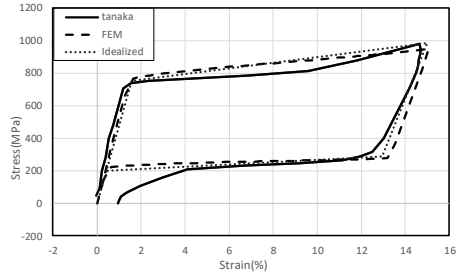


Figure 4. Stress-strain diagram of the shape memory alloy

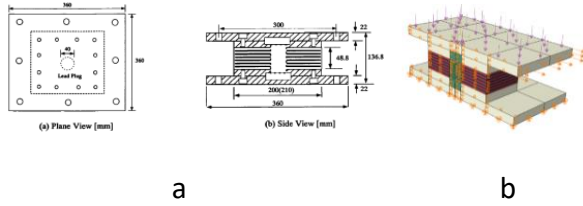


Figure 2. a) The size of the rubber and steel plates used in the tested bearing sample [8], b) LRB modeled in Abaqus

Table 1. Specifications of LRB

Bearing type	LRB
Sectional dimensions (mm)	200×200
Shear modulus (MPa)	0.78
Number of rubber layers	7
Thickness of rubber layers (mm)	5
Number of layers of steel	6
Thickness of a steel layer (mm)	2.3
Lead core diameter (mm)	40

Table 2. Specifications of the models

Bearing Specifications	How to change			
	200×200	250×250	30×300	-
Dimensions (mm×mm)	0	0	0	-
Core diameter (mm)	40	70	100	-
Wire diameter (mm)	2.5	5	8	-
Number of rubber layers	7	8	9	11
Number of steel layers	6	7	8	10
Rubber Thickness (mm)	5	4.087	3.337	-
Thickness of steel (mm)	2.3	2.3	2.3	-
SMA type	1	2	3	
Vertical pressure (MPa)	7.84	3.456	4.97	11

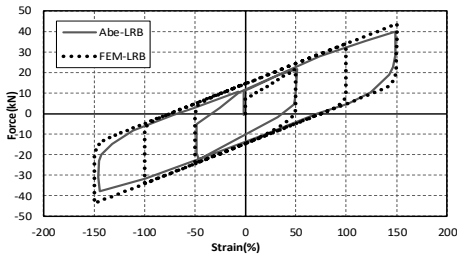


Figure 3. Comparison of hysteresis diagram for the bearing in this study with the Abe laboratory model

the verification for LRB and shape memory alloy is done individually.

2.1.1. LRB

Abe et al. [8] have conducted studies on a laboratory sample of LRB. Figure 2 and Table 1 show the bearing and the dimensions of its different parts, respectively.

Figure 2b illustrates the bearing modeled in Abaqus software. The rubber used in this bearing has low damping in the range of 2-3 percent. The Neo hook model [9] has

been used for modeling. The Young modulus and yield stress of the lead core are 16 MPa and 10 MPa. This core is modeled as a bilinear model with kinematic plastic behavior. Steel plates are assumed to be isotropic material with a Young modulus of 210 MPa and a Poisson ratio of 0.3. A comparison of the hysteresis behavior of the numerical model with the laboratory sample in Figure 3 indicates the accuracy of numerical results.

2.1.2. Shape memory alloy

In this validation study, three types of shape memory alloy have been used. This sample is verified according to the research presented by Tanaka [7]. Figure 4 shows the results of the ideal stress-strain curve, Tanaka laboratory test results, and results of the Abaqus model [10]. The results show the proper fitting of numerical models with Tanaka experiment results.

3. MODEL SPECIFICATIONS

SMA wires are added to the LRB introduced in the

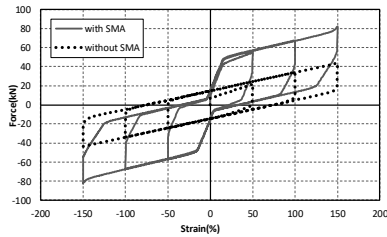


Figure 5. Hysteresis diagrams of the LRB and LRB-SMA

Table 3. Results of the LRB and LRB-SMA models

γ (%)	With SMA			Without SMA		
	50	100	150	50	100	150
Horizontal stiffness (kN/mm)	3.1	1.92	1.55	1.2	0.97	0.83
Residual deformation (mm)	8.79	11.5	12.3	17.38	26.3	26.3
Dissipated energy (J)	1503	3308	5080	993	2037	3054
Viscous damping (%)	25.1	22.4	18.9	41.4	27.1	21.2

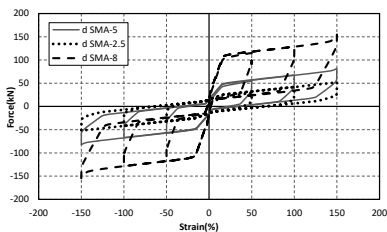


Figure 6. Hysteresis diagrams by changing the diameter of the wires

previous section and the effects of different parameters on the performance of this hybrid bearing have been investigated. In this study, 25 samples of LRB-SMA hybrid isolation systems have been analyzed using the static analysis method.

In this finite element model, the shear modulus of rubber is 0.7 MPa and its density is 1200 kg/m³. The boundary conditions are such that the lower steel plate is restrained in all directions. Because of bearing symmetry, half of the isolator is modeled and in the symmetry region, the model is restrained in the vertical direction.

Specifications of the parameters of the 25 models are presented in Table 2. Dimensional changes applied in this research are in accordance with the changes that Alam and Ahmadipour have done in their research [11]. Assuming that the wires are attached to the upper and lower steel plates of the bearing at the end, the ends of the wires and plates are tied together.

4. DISCUSSION AND RESULTS

4.1 Effect of adding SMA on LRB bearing behavior

In this section, the effect of adding SMA wires on the stiffness, dissipated energy capacity, residual deformation, and equivalent viscous damping of the bearing is discussed. Figure 5 shows the hysteresis diagram of the LRB model and the hybrid bearing of this study. As can be seen from this Figure, with the addition of SMA wires to LRB, the stiffness has increased. In Table 3, the values of the parameters presented before for the two LRB and LRB-SMA isolators are compared. The effects of increasing SMA wires diameter can be seen in Figure 6.

CONCLUSIONS

Results showed that hybrid bearing has better seismic performance than LRB. Depending on what kind of performance was required from the bearing, its specification can be obtained optimally. A summary of the results is as follows:

- With the addition of SMA wires to LRB, stiffness, yield force and dissipated energy capacity increase, and residual deformation decreases. By increasing the dimensions of the bearing, stiffness and yielding force increase, and residual deformation and equivalent viscous damping decrease. By increasing the cross-section of SMA wires, stiffness, yielding force and dissipated energy capacity increase and residual deformation decreases. By increasing the diameter of the lead core, stiffness, dissipated energy capacity, residual deformation, and equivalent viscous damping increase. In other words, by increasing the diameter of the lead core, hybrid bearing hysteresis behavior approaches LRB bearing behavior.

- In order to achieve a combination of behavior, both the appropriate absorption capacity of lead core and the SMA restoration property, it is necessary to establish an appropriate balance between the stiffness of the lead core and SMA wires.

- By increasing the height of the hybrid bearing, the bearing behavior varies for low to high shear strain. In other words, in high shear strains due to the large length variation of SMA wires, austenite phase changes to martensitic, which increases the stiffness, but in the lower shear strains, this is vice-versa.

- The change in the thickness of the rubber layers by keeping the height of the entire isolator constant and the change in the compressive stress applied to the isolator do not significantly change the behavior of the isolator.

REFERENCES

- [1] F. Naeim and J. M. Kelly, Design of seismic isolated structures: from theory to practice. John Wiley & Sons, 1999.
- [2] W. R. a. L. Greenbank, "An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 4, pp. 251-259, 1976.
- [3] T. Kelly, "Base Isolation of Structures," Design guidelines. Auckland: Holmes Consulting Group Ltd, 2001.
- [4] W. H. Robinson, "Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 10, pp. 593-604, 1982.
- [5] F. H. Dezfouli and M. S. Alam, "Shape memory alloy wire-based

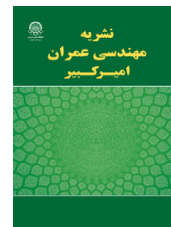
- smart natural rubber bearing,” *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 4, p. 045013, 2013.
- [6] F. H. Dezfuli and M. S. Alam, “Hysteresis model of shape memory alloy wire-based laminated rubber bearing under compression and unidirectional shear loadings,” *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 6, p. 065022, 2015.
- [7] Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma, Y. Sutou, T. Omori, and K. Ishida, “Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity,” *Science*, vol. 327, no. 5972, pp. 1488-1490, 2010.
- [8] M. Abe, Junji Yoshida, and Yozo Fujino, “Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. I: experimental study,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, pp. 1119-1132, 2004.
- [9] M. J. Asl, M. Rahman, and A. Karbakhsh, “Numerical Analysis of Seismic Elastomeric Isolation Bearing in the Base-Isolated Buildings,” *Open Journal of Earthquake Research*, vol. 3, no. 01, p. 1, 2014.
- [10] M. Conti et al., “Nitinol embolic protection filters: design investigation by finite element analysis,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 18, no. 5-6, pp. 787-792, 2009.
- [11] M. Ahmadipour and M. S. Alam, “Sensitivity analysis on mechanical characteristics of lead-core steel-reinforced elastomeric bearings under cyclic loading,” *Engineering Structures*, vol. 140, pp. 39-50, 2017.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Mahmoodi, H. Tajmir Riahi, M.R. Zare, *Investigating the Effective Parameters on the Performance of Hybrid Lead Rubber Bearing with Shape Memory Alloy*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 153-156.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14747.5731](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14747.5731)





بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد جداساز لرزه‌ای هسته سربی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار

راحله محمودی، حسین تاجمیر ریاحی*، محمدرضا زارع

دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۰۲

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۰۴

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

کلمات کلیدی:

جداساز پایه

تکیه‌گاه لاستیکی هسته سربی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

عملکرد لرزه‌ای

سیستم کنترل غیرفعال

خلاصه: در این پژوهش به بررسی تحلیلی و عددی سیستم جداساز ترکیبی هسته سربی با آلیاژ حافظه دار و بررسی پارامترهای مختلف مؤثر بر آن پرداخته شده است. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از ابعاد جداساز، نوع آلیاژ حافظه‌دار و سطح مقطع سیم‌های آن، قطر هسته سربی، ضخامت لایه لاستیک و تنش فشاری. در این جداساز از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان واحد بازگرداننده و از هسته سربی به عنوان واحد اتلاف‌کننده انرژی استفاده شده است. بدین منظور یک مدل اجزای محدود از جداساز با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل سازی شده و تأثیر پارامترهای مختلف ذکر شده بر عملکرد جداساز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد لرزه‌ای این جداساز، نسبت به سایر جداسازها بهتر بوده و در نهایت با توجه به اینکه چه نوع عملکردی از جداساز مدنظر است، می‌توان پارامترهای مورد مطالعه را به صورت بهینه به دست آورد. به عنوان مثال اگر اتلاف انرژی بیشتر مد نظر باشد به ۴ طریق می‌توان عمل کرد: افزایش ابعاد جداساز، افزایش شعاع سیم‌های SMA، افزایش قطر هسته سربی و یا افزایش ارتفاع جداساز. از بین موارد ذکر شده، افزایش شعاع سیم SMA و افزایش قطر هسته بیشترین اثرگذاری را دارا هستند. به طور مثال، در کرنش برشی ۱۵٪ اتلاف انرژی در شعاع ۲/۵ mm و ۴ mm به ترتیب از J ۵۰۸/۲ به J ۸۳۷۶ افزایش پیدا می‌کند.

۱- مقدمه

روش‌های طراحی و فن‌آوری‌های اجرای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله در سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته است. در این میان سیستم‌های کنترلی و مستهلک‌کننده انرژی مانند جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها و پل‌ها، عملکرد مناسبی را در برابر خطرات لرزه‌ای از خود نشان داده و از این رو مورد توجه محققان و مهندسان واقع شده‌اند. جداسازی پایه، یکی از برترین روش‌ها در مهندسی زلزله است که مربوط به فناوری‌های کنترل لرزه‌ای غیرفعال است. جداساز لرزه‌ای یکی از راه‌های کاهش اثر زلزله بر سازه‌هاست که از طریق غیر درگیر کردن حرکت افقی سازه از زمین انجام می‌شود. این جداسازی از طریق اضافه کردن دو عامل انعطاف‌پذیری افقی و میرایی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tajmir@eng.ui.ac.ir

در پایه‌ی سازه صورت می‌گیرد. برای مقاوم‌سازی سازه، چگونگی به حداقل رساندن تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب طبقات مهم است. تغییر مکان بین طبقه‌ای سبب خسارت دیدن اجزای غیر سازه‌ای و تجهیزات متصل‌کننده طبقات می‌شود. با افزایش سختی سازه می‌توان تغییر مکان بین طبقه‌ای را کاهش داد، اما این عمل سبب تشدید حرکت زمین می‌شود که به نوبه‌ی خود سبب افزایش شتاب طبقات شده و منجر به خسارت دیدن تجهیزات حساس داخلی می‌شود. شتاب طبقات را می‌توان با نرم‌تر کردن سیستم کاهش داد که این عمل موجب افزایش تغییر مکان می‌شود. تنها راه عملی کاهش هم‌زمان تغییر مکان طبقه‌ای و شتاب طبقات استفاده از جداساز لرزه‌ای است که با متمرکز کردن تغییر مکان‌های حاصله در تراز جداساز، شکل‌پذیری مورد نیاز سازه



جداسازها نسبت به جداساز لاستیکی، ارتعاشات سازه ناشی از زلزله را به مقدار بیشتری، کاهش می‌دهند و محافظت بیشتری از سازه و ملحقات آن می‌کنند. همچنین آن‌ها جابه‌جایی پایه و برش پایه را بیشتر کاهش می‌دهند و عملکرد بسیار بهتری از خود نشان می‌دهند. چوی^۵ و همکاران [۸] برای حفاظت لرزه‌ای از پل، یک سیستم جداساز ترکیبی لاستیکی و SMA ارائه دادند. آن‌ها در این پژوهش بر روی یک پل فولادی چند دهانه مطالعات تحلیلی انجام دادند و نشان دادند که جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار در مقایسه با جداساز هسته سربی، به طور مؤثر جابه‌جایی نسبی بین عرشه و پایه را کاهش می‌دهد. کاسکیاتی^۶ و همکاران [۹] یک دستگاه جداساز شامل یک سیستم کشویی به همراه میله‌های SMA از جنس مس، آلومینیوم و بریلیوم (برای اتلاف انرژی و اهداف بازگرداندگی) مطرح کردند که باعث اتلاف انرژی بیشتر و بازیابی تغییرشکل ایجادشده ی جداساز شد. این میله‌ها وظیفه فراهم کردن سختی در برابر تحریکات با شدت کم، جلوگیری از جابه‌جایی‌های بسیار بزرگ، خاصیت بازگرداندگی و اتلاف انرژی را بر عهده دارند. ازبالت^۷ و هرلی‌باس^۸ [۱۰-۱۲] عملکرد یک سیستم جداساز سوپر الاستیک- اصطکاکی را که ترکیبی از یک جداساز کشویی و یک دستگاه سوپر الاستیک SMA است، مورد مطالعه قرار دادند. سپس اثرات تغییر حرارت را بر روی این سیستم مورد بررسی قرار دادند و این سیستم را با یک جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار مقایسه کردند. سیستم پیشنهادی آن‌ها مقدار جذب انرژی ورودی کمتری دارد و اتلاف انرژی در آن از طریق اصطکاک است، اما در جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار، اتلاف انرژی از طریق SMA است. پاسخ حداکثر جابه‌جایی نسبی در هر دو تقریباً برابر است، اما شتاب حداکثر عرشه و برش پایه حداکثر در جداساز پیشنهادی کمتر است.

دزفولی و آلام^۹ [۱۳] دو نوع جداساز لاستیکی با لایه‌های فولادی را به همراه دو آرایش متفاوت سیم‌های SMA، صاف و متقاطع (ضربدری) مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از سیم SMA به عنوان المان مکملی که عملکرد جداساز لاستیکی با لایه‌های فولاد را در اتلاف انرژی و جابه‌جایی‌های باقی مانده در کرنش‌های بزرگ بهبود

را فراهم می‌کند [۱]. در کشور ما نیز با توجه به روند رو به رشد ساخت و ساز از یک سو و لرزه خیزی زیاد و احتمال وقوع خسارات فراوان از سوی دیگر، لزوم به کارگیری این فناوری احساس می‌شود.

رابینسون^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۱ جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB^۲) را معرفی کردند. این جداساز از لایه‌های لاستیک و فولاد و همچنین هسته سربی تشکیل شده است [۴-۲]. جداساز لاستیکی هسته سربی به عنوان یکی از متداول ترین انواع جداساز، انعطاف پذیری را به وسیله‌ی لاستیک‌هایش و میرایی را به وسیله‌ی هسته‌ی سربی افزایش می‌دهد. اما مشکلاتی از جمله طول عمر، پیچیدگی نصب، تعمیر و نگهداری و ایجاد تغییر شکل دائمی بعد از وقوع زلزله دارد که موجب می‌شود بعد از مدتی جداساز نیاز به تعویض پیدا کند.

آلیاژهای حافظه‌دار (SMA^۳) موادی هستند که امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند و دارای خصوصیتاتی از جمله ظرفیت میرایی بالا، مقاومت بالا در برابر خستگی و تحت کرنش‌های چرخه‌ای بزرگ، دوام بالا، مقاومت در برابر خوردگی و بازگرداندگی هستند. استفاده از این آلیاژ در جداساز به دلیل خاصیت بازگرداندگی آن، باعث می‌شود که جداساز بعد از اتمام زلزله به شکل اولیه‌ی خود بازگردد و طول عمر بیشتری داشته باشد و حتی بعد از زلزله‌های قوی نیاز به تعویض نداشته باشد. علاوه بر این، این مواد باعث افزایش میرایی و اتلاف انرژی می‌شوند [۵]. در بین آلیاژهای حافظه دار شکلی، نیتینول که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم است و آلیاژهای بر پایه‌ی آهن و مس، بیشترین کاربرد را دارا هستند. این آلیاژها به علت ویژگی فوق‌الاستیک، قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند [۶].

محققین بسیاری کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار را در سیستم‌های جداساز پایه، مورد بررسی قرار داده‌اند. دولچه^۴ و همکاران [۷] عملکرد یک دستگاه جداساز پایه مجهز به آلیاژ حافظه دار را برای حفاظت لرزه‌ای از سازه‌های بتن آرمه با انجام آزمایش میز لرزان بررسی کردند. سپس عملکرد سیستم‌های جداساز مجهز به آلیاژ حافظه دار را با جداساز لاستیکی، مقایسه کردند که نتایج حاصل نشان داد این

5 Choi
6 Casciati
7 Ozbulut
8 Hurllebaus
9 Alam

1 Rabinson et al.
2 Lead Rubber Bearing
3 Shape Memory Alloy
4 Dolce

می‌توانند با اعمال بارگذاری های حرارتی و یا مکانیکی به یکدیگر تبدیل شوند. نکته مهم این است که آلیاژهای حافظه دار شکلی در فاز آستنیت قابلیت بازگشت کامل به شکل اول خود را دارند (فوق الاستیک)، در حالی که در فاز مارتنزیت این قابلیت تا حدود زیادی کاهش می‌یابد (حافظه دار شکلی) [۶]. با حرکت از سمت فاز آستنیت به سمت فاز مارتنزیت، ظرفیت اتلاف انرژی افزایش خواهد یافت، ولی با افزایش درصد مارتنزیت از یک حد مشخص، قابلیت بازگرداندگی از بین خواهد رفت.

اعمال تنش به یک ماده حافظه دار شکلی که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از دمایی پایانی آستنیت است، موجب می‌شود که آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود، چرا که آستنیت در تنش های بالا پایدار نیست. این تبدیل منحنی تنش - کرنش، ماده را به صورت غیر خطی در می‌آورد. در انتها تمام آستنیت ها به مارتنزیت تبدیل خواهد شد و تبدیل پایان خواهد پذیرفت. لذا ماده دچار سخت شدگی می‌شود. در هنگام باربرداری، مارتنزیت ناپایدار می‌شود و تبدیل معکوس رخ می‌دهد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت، ماده را به مکان اولیه می‌رساند، چرا که هیچ کرنش پسماندی بر روی ماده باقی نمی‌ماند. این آلیاژها، قادر به بازگشت به شکل اولیه خود در تغییرشکل های بزرگ هستند. آلیاژهای حافظه دار دارای دو فاز ثابت آستنیت و مارتنزیت هستند. فاز آستنیت ساختمانش مکعبی بوده و به علت دارا بودن تقارن بالا محکم تر است. فاز مارتنزیت می‌تواند به حالت دوقلویی و غیر دوقلویی وجود داشته باشد. شکل آن منوکلینیک بوده و نسبت به آستنیت تقارن کمتری دارد. فاز مارتنزیت از نوع فاز ترموالاستیک بوده که دو خصوصیت لغزنده بودن و انرژی کم را دارا است که با تغییر کوچک دما و تنش، تغییر می‌کند. به محض سرد کردن آلیاژ در نبود بارگذاری، تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت صورت می‌پذیرد که نتیجه این تغییر فاز، قابل مشاهده میکروسکوپی نیست. به محض گرم کردن ماده در فاز مارتنزیت، برگشت فاز اتفاق می‌افتد. این تغییر فاز در شکل ۱ رفتار فوق الاستیک و حافظه دار شکلی نشان داده شده است.

در این پژوهش جداساز هسته سربی به همراه آلیاژ حافظه دار مورد مطالعه قرار گرفته است که آلیاژهای حافظه دار به صورت سیم های ضربدری در دو سمت مقابل هم، مطابق شکل ۲ قرار گرفته اند. در

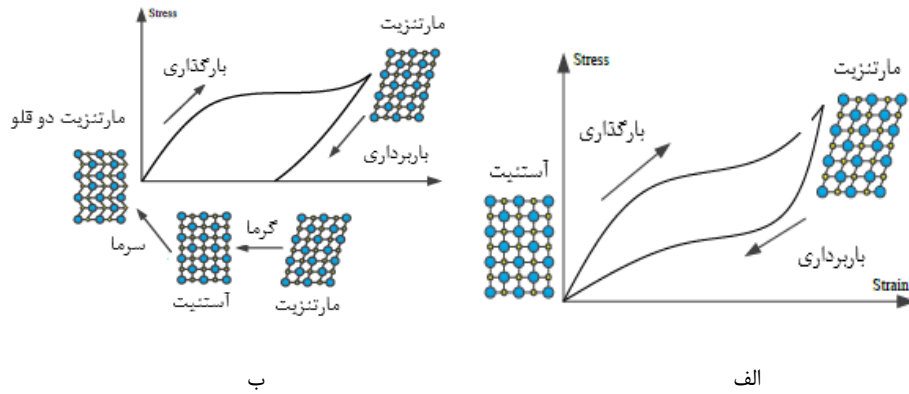
می‌دهد، استفاده کردند. آن‌ها اثر پارامترهای دامنه کرنش برشی، نوع SMA، نسبت ابعاد جداساز، قطر سیم‌ها و سطح پیش‌کرنش برشی سیم‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که وقتی جداساز لاستیکی مجهز به آلیاژ حافظه دار تحت دامنه کرنش‌های برشی بزرگ قرار می‌گیرد، سیم SMA از نوع FeNiCuAlTaB با کرنش سوپرالاستیک ۱۳/۵ درصد و دمای آستنیت بسیار پایین ۶۲- درجه سانتی‌گراد بهترین انتخاب است. نتایج نشان می‌دهد که شکل متقاطع سیم‌ها مؤثرتر است و با پیش‌کرنش برشی ۲ درصد، اتلاف انرژی تا ۷۴ درصد افزایش و تغییرشکل باقی‌مانده تا ۱۵ درصد کاهش خواهد یافت. دزفولی و آلام [۱۴] یک مدل ساختاری از جداساز الاستومری LRB-SMA را با توجه به آرایش سیم‌ها به صورت تئوری ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد که خاصیت بازگرداندگی SMA، تغییرشکل باقی‌مانده در LRB را کاهش می‌دهد.

در این مقاله سعی بر آن است که ابتدا بررسی تحلیلی سیستم جداساز هسته سربی همراه با آلیاژ حافظه دار به کمک نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام شود و سپس تأثیر پارامترهایی از جمله اضافه شدن SMA به جداساز LRB، ابعاد جداساز، قطر سیم‌های SMA، قطر هسته سربی، نوع سیم‌های SMA، ارتفاع جداساز، ضخامت لاستیک و تنش فشاری بر رفتار سیستم جداساز ترکیبی LRB-SMA بررسی گردد. در نهایت پارامترهایی مانند سختی افقی، جابه جایی باقی مانده، اتلاف انرژی، میرایی ویسکوز حاصل از تمامی تحلیل‌ها محاسبه شده و عملکرد جداساز ترکیبی مذکور و LRB مورد مقایسه قرار گرفته است. در پژوهش های مشابه نظیر پژوهش دزفولی و آلام [۱۴] تنها برخی از پارامترهای ذکر شده مد نظر قرار گرفته است و آرایش سیم ارائه شده در این پژوهش متفاوت از آرایش قرارگیری سیم در پژوهش های مشابه است.

۲- آلیاژ حافظه دار شکلی

آلیاژهای حافظه دار دارای دو فاز ثابت آستنیت^۲ و مارتنزیت^۳ هستند. فاز آستنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و در دماهای بالا و تنش های پایین پایدار است و فاز مارتنزیت حالت محصول با تقارن کمتر و در دماهای پایین و تنش های بالا پایدار است. این دو فاز

- 1 Abaqus
- 2 Austenite
- 3 Martensite



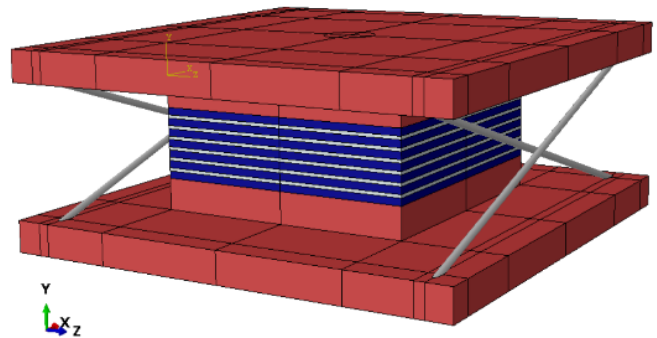
شکل ۱. الف) رفتار سوپرا الاستیک ب) رفتار حافظه دار شکلی [۱۷]
Fig. 1. a) Superelastic behavior b) Shape memory-behavior

انجام شده است.

۳-۱- جداساز LRB

آبه^۱ و همکاران [۱۵] مطالعاتی پیرامون نمونه‌ی آزمایشگاهی جداساز LRB انجام داده اند. شکل ۳ نمایی از جداساز و جدول ۱ ابعاد اجزای تشکیل دهنده را نشان می‌دهد.

شکل ۳-ب جداساز مدل شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. لاستیک‌های به کار رفته در این جداساز دارای میرایی کم ۲ تا ۳ درصد بوده که از مدل Neo hook [۱۶] جهت مدل‌سازی در نرم افزار استفاده شده است. لاستیک‌ها به صورت المان هایبرید C3D8RH مدل شده اند. سرب به کار رفته در جداساز دارای مدول یانگ ۱۶ مگاپاسکال و تنش تسلیم ۱۰ مگاپاسکال بوده که به صورت یک مدل دو خطی با رفتار پلاستیک کینماتیک در نظر گرفته شده است. صفحات فولادی به صورت یک ماده ایزوتروپیک با مدول یانگ ۲۱۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ فرض شده است. المان حجمی C3D8R برای صفحات فولادی لحاظ شده است. در ادامه با فرض اعمال فشار قائم ۷ مگاپاسکال بر جداساز، رفتار نیرو-جابجایی جداساز برای کرنش‌های برشی ۵۰ و ۱۵۰ درصد لاستیک به دست آمده است. مقایسه رفتار نیرو-جابجایی مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی در شکل ۴ بیانگر صحت نتایج عددی است.

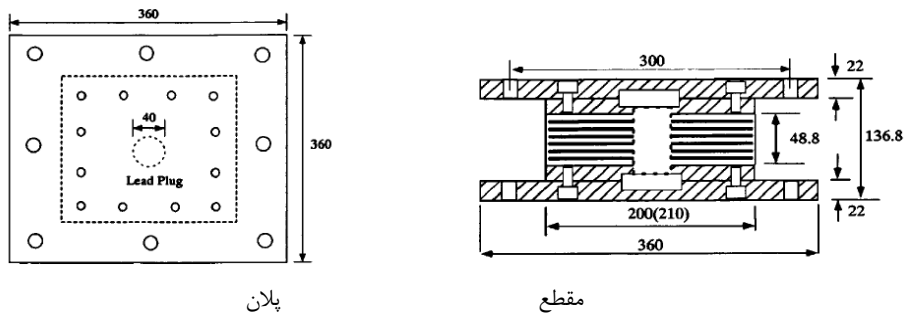


شکل ۲. جداساز ترکیبی مدل شده در پژوهش حاضر
Fig. 2. Hybrid base isolation in this study

بخش بعد نحوه مدل سازی این جداساز آورده شده است.

۳- صحت سنجی

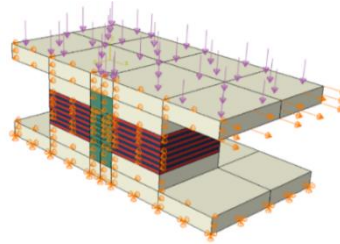
به منظور انجام تحلیل‌های عددی بر روی جداساز لرزه‌ای هسته سربی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار، لازم است ابتدا از صحت مدل عددی اطمینان یافت. بدین منظور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مدل‌های عددی صحت سنجی می‌شوند. اما تاکنون جداساز این مطالعه به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا با توجه به عملکرد ترکیبی این جداساز، صحت سنجی برای جداساز لاستیکی با هسته سربی و میله آلیاژ حافظه دار به صورت جداگانه



پلان

مقطع

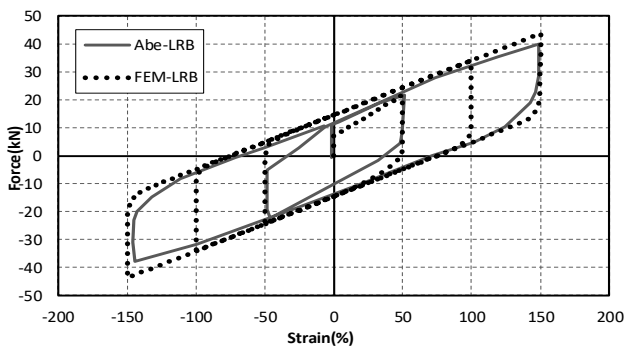
الف



ب

شکل ۳. الف) اندازه صفحات لاستیکی و فولادی به کار رفته در نمونه جداساز آزمایش شده بر حسب میلی متر [۱۵] ب) جداساز هسته سربی مدل شده در آباکوس

Fig. 3. a) Dimensions of rubber and steel plates in the experimental study in millimeters [15] b) Abaqus lead rubber bearing model



شکل ۴. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای جداساز در این تحقیق با مدل آزمایشگاهی Abe و همکاران

Fig. 4. Comparison of the force-displacement curve of the numerical model and experimental results of Abe et al.

جدول ۱. مشخصات اجزای تشکیل دهنده جداساز LRB
Table 1. Specifications of the lead rubber bearing

نوع جداساز	جداساز لاستیکی هسته سربی
ابعاد مقطع (mm)	200×200
مدول برشی (MPa)	0.78
تعداد لایه لاستیک	7
ضخامت لایه های لاستیک (mm)	5
تعداد لایه های فولاد	6
ضخامت یک لایه فولاد (mm)	2.3
قطر هسته سربی (mm)	40

۳-۲- آلیاژ حافظه دار

در این پژوهش جهت صحت سنجی، از سه نوع آلیاژ حافظه دار استفاده شده است که بهترین عملکرد را نوع FeNiCuAlTaB از خود نشان می دهد. این نمونه با توجه به مقاله ارائه شده توسط تاناکا [۱۷] صحت سنجی شده است. مشخصات آلیاژ حافظه دار مورد ارزیابی در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۵ نتایج منحنی تنش- کرنش

ایده آل، آزمایشگاهی تاناکا و مدل شده در آباکوس را نشان می دهد. نتایج، تطابق مناسب مدل های عددی با آزمایشات تاناکا را نشان می دهد. مدل سازی آلیاژ حافظه دار به کمک مواد تعریف شده توسط کاربر در آباکوس مشابه پژوهش کانتی و همکاران [۱۸]، انجام شده است. برای تعریف آلیاژهای حافظه دار در آباکوس نیاز به ۱۴ پارامتر

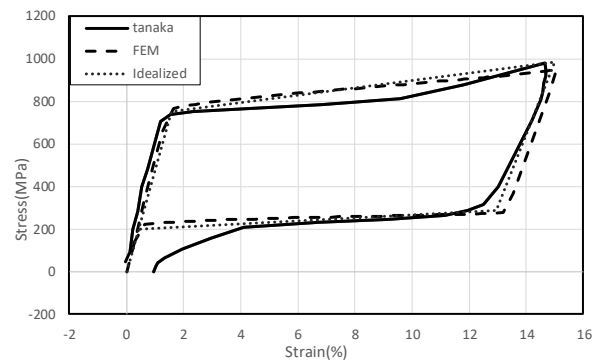
اول با مودهای ناسازگار^۱ برای جلوگیری از پدیده قفل شدگی برشی^۲ در مود خمش خالص استفاده شده است. این المان سیزده درجه آزادی اضافی به عنوان گرادیان میدان جابه جایی دارد. از این نوع المان برای مدل سازی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار استفاده گردیده است.

۴- مشخصات مدل

جداساز LRB معرفی شده در قسمت قبل مبنای مطالعات عددی این پژوهش قرار گرفته است. به عبارت دیگر اثر افزودن SMA بر روی جداساز LRB ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق ۲۵ نمونه جداساز ترکیبی LRB-SMA به کمک نرم افزار آباکوس با روش تحلیل استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته اند. در مدل اجزاء محدود، سرب استفاده شده دارای جرم حجمی 11340 kg/m^3 و مدول یانگ 16 GPa و تنش تسلیم 10 MPa است. لاستیک‌های به کار رفته در مدل دارای میرایی کم ۲ تا ۳ درصد است. در میان انواع مدل‌های غیرخطی موجود در نرم افزار از یک مدل غیرخطی متداول جهت مدل نمودن رفتار لاستیک تحت اثر هم زمان بار فشاری قائم و جابه جایی‌های رفت و برگشتی استفاده شده است. در این مدل اجزاء محدود، مدول برشی لاستیک 0.7 MPa و چگالی آن kg/m^3 Neo Hooke انتخاب شده است. لاستیک‌ها به کمک مدل $D_1=10^{-9} \text{ 1/MPa}$ و ضرایب $c_{10}=250000 \text{ MPa}$ و صفحات فولادی به عنوان ماده ایزوتروپی با چگالی kg/m^3 7850 مدول الاستیسیته 210 GPa و نسبت پواسون 0.3 در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم فولاد 240 MPa و نسبت سخت شوندگی پس از تسلیم آن 5% است. شرایط مرزی بدین گونه است که صفحه فولادی پایین در تمام جهات بسته شده است. به دلیل تقارن جداساز، نصف جداساز مدل شده و در قسمت تقارن، مدل در جهت قائم بسته شده است. شرایط بارگذاری به این صورت است که بار فشاری در وجه بالایی صفحه بالا برای اعمال بار قائم و جابه جایی افقی به همان صفحه برای ایجاد تغییر مکان جانبی، اعمال می‌گردد (شکل ۶). مشخصات نوع المان در جدول ۳ نمایش داده شده است. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف کردن آلیاژ SMA در نرم افزار آباکوس، مطابق جدول ۴ است. در این جدول مشخصات سه نوع آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است. مشخصات پارامترهای

جدول ۲. مشخصات آلیاژ حافظه‌دار
Table 2. Specifications of shape-memory alloy

مدول کشسانی فاز آستنیت (MPa)	۴۶۹۰۰
ضریب پواسون آستنیت	۰/۳۳
مدول کشسانی فاز مارتنزیت (MPa)	۳۵۰۰۰
ضریب پواسون مارتنزیت	۰/۳۳
کرنش برشی حاصل از تبدیل فاز	۰/۱۳۵
نسبت تنش به دما در حالت بارگذاری (MPa/T)	۶
تنش آغاز تبدیل فاز مستقیم (MPa)	۷۵۰
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم (MPa)	۹۸۳/۵
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۲۰
نسبت تنش به دما در حالت باربرداری (MPa/T)	۶
تنش آغاز تبدیل فاز معکوس (MPa)	۲۸۲
تنش پایان تبدیل فاز معکوس (MPa)	۲۱۰
تنش فشاری بحرانی برای آغاز تحول فازی (MPa)	۰
کرنش برشی حجمی ایجاد شده در اثر تبدیل فاز	۰/۱۳۵



شکل ۵. نمودار تنش-کرنش برشی آلیاژ حافظه‌دار واقعی و ایده‌آل و مدل شده در آباکوس

Fig. 5. Shear stress-strain curve of actual and idealized shape memory alloy compared with numerical results

است که این پارامترها در جدول ۲ ذکر شده است.

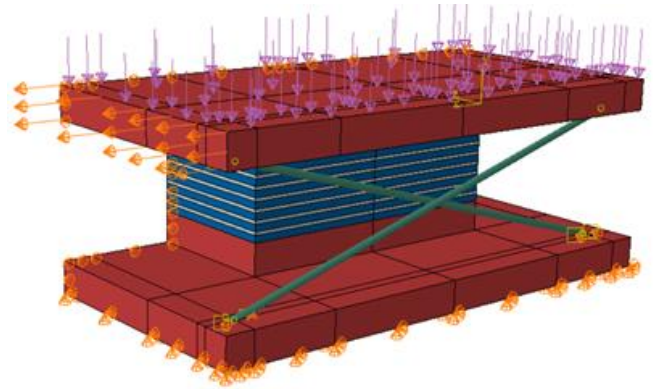
المان‌های مورد استفاده در مدل سازی، المان‌های C3D8R، C3D8RH و C3D8I هستند. المان C3D8R (المان شش وجهی هشت گره‌ای با انتگرال کاهش یافته) برای مدل سازی صفحات فولادی و هسته سربی استفاده شده است. المان C3D8RH (۸ گرهی با سه درجه آزادی با فرض المان تراکم ناپذیر) که نرم افزار پیشنهاد می‌کند که از این المان برای مصالح تراکم ناپذیر و یا تقریباً تراکم ناپذیر استفاده گردد. لذا برای مدل کردن لاستیک از این نوع المان استفاده شده است. از المان C3D8I (المان ۸ گره‌ای مرتبه

1 Incompatible
2 Shear Locking

جدول ۵. مشخصات مدل‌های جداساز ترکیبی LRB-SMA

Table 5. Specifications of numerical models of hybrid base isolation

مشخصات جداساز	نحوه تغییرات			
	ابعاد (D)(mm×mm)	۲۵۰×۲۵۰	۲۵۰×۲۵۰	۳۰۰×۳۰۰
قطر هسته (r lead)(mm)	۴۰	۷۰	۱۰۰	-
قطر سیم (r SMA)(mm)	۲/۵	۵	۸	-
تعداد لایه لاستیک (Nr)	۷	۸	۹	۱۱
تعداد لایه فولاد	۶	۷	۸	۱۰
ضخامت لاستیک (hr)(mm)	۵	۴/۸۷	۳/۳۷۷	-
ضخامت فولاد (mm)	۲/۳	۲/۳	۲/۳	-
نوع SMA	۱	۲	۳	-
فشار عمودی (P) (MPa)	۷/۸۴	۳/۴۵۶	۴/۹۷	۱۱



شکل ۶. نحوه اعمال بار و تغییر مکان بر جداساز LRB-SMA
Fig. 6. Applying force and displacement to the hybrid base isolation

جدول ۳. مشخصات نوع المان

Table 3. Specifications of the elements

SMA	سرب	فولاد	لاستیک
C3D8I	C3D8R	C3D8R	C3D8RH

تمامی این صفحات با یکدیگر ادغام شده اند. با فرض اینکه سیم‌ها در انتها به صفحات فولادی بالا و پایین جداساز متصل هستند، انتهای سیم‌ها و صفحات به یکدیگر مقید شده اند.

۴-۱- محاسبه پارامترهای رفتاری جداساز با استفاده از منحنی هیستریزس

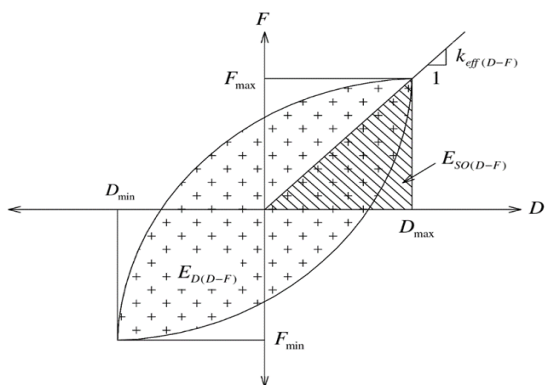
منحنی‌های هیستریزس، اطلاعات کاملی از رفتار چرخه‌ای مصالح، قطعات، اتصالات و موارد دیگر را در اختیار محققین قرار می‌دهند. رفتار سیستم پیش از تسلیم، پس از تسلیم، رفتار در چرخه‌های متناوب و میزان استهلاک انرژی از جمله مواردی است که از این منحنی‌ها حاصل می‌شود. پارامترهای مختلف رفتاری را نیز می‌توان به کمک این منحنی‌ها به دست آورد. در این بخش، نحوه محاسبه این پارامترها بیان شده است. در شکل ۷ یک حلقه هیستریزس و پارامترهای معمولی که از روی آن محاسبه می‌شود، نشان داده شده است. انرژی تلف شده در چرخه‌های بارگذاری، سختی معادل k_{eff} و نسبت میرایی ویسکوز معادل از جمله پارامترهایی است که معمولاً مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در این شکل F_{max} نیروی حداکثر، $|F_{min}|$ نیروی حداقل، D_{max} جابه‌جایی حداکثر، D_{min} جابه‌جایی حداقل و $E_{D(F-D)}$ انرژی مستهلک شده در هر چرخه که در شکل معادل سطح داخل حلقه هیستریزس است. همچنین $E_{SO(F-D)}$ انرژی ذخیره شده در یک فنر الاستیک تحت شرایط استاتیکی و با سختی k_{eff} و جابه‌جایی D_{max} است.

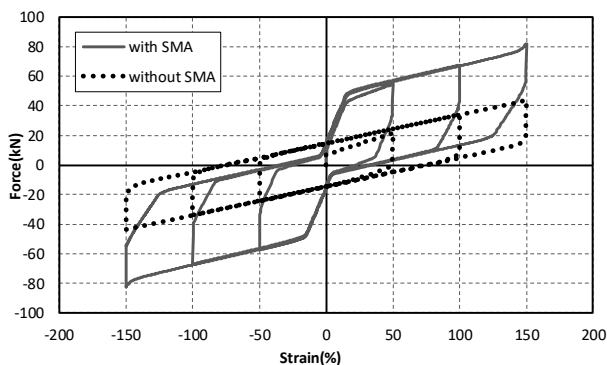
جدول ۴. مشخصات سه نوع SMA مورد استفاده در پژوهش
Table 4. Specifications of three shape-memory alloys used in this study

پارامتر	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
مدول کشسانی فاز آستنیت (MPa)	۴۶۹۰۰	۳۵۸۷۷	۴۵۰۰۰
ضریب پواسون آستنیت	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
مدول کشسانی فاز مارتنزیت (MPa)	۳۵۰۰۰	۲۴۴۶۲	۳۸۰۰۰
ضریب پواسون مارتنزیت	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
کرنش برشی حاصل از تبدیل فاز	۰/۱۳۵	۰/۰۵۵۵	۰/۰۵۵
نسبت تنش به دما در حالت بارگذاری (MPa/T)	۶	۷/۶	۷/۶
تنش آغاز تبدیل فاز مستقیم (MPa)	۷۵۰	۴۸۹	۵۹۰
تنش پایان تبدیل فاز مستقیم (MPa)	۹۸۳/۵	۵۷۲	۶۴۰
دما (°C)	۲۰	۲۲	۳۷
نسبت تنش به دما در حالت باربرداری (MPa/T)	۶	۷/۶	۷/۶
تنش آغاز تبدیل فاز معکوس (MPa)	۲۸۲	۲۳۰	۳۰۰
تنش پایان تبدیل فاز معکوس (MPa)	۲۱۰	۱۴۷	۲۷۰
تنش فشاری بحرانی برای آغاز تحول فازی (MPa)	۰	۰	۰
کرنش برشی حجمی ایجاد شده در اثر تبدیل فاز	۰/۱۳۵	۰/۰۵۵۵	۰/۰۵۵

۲۵ مدل در جدول ۵ آورده شده است. تغییرات ابعادی اعمال شده در این پژوهش مطابق با تغییراتی است که آلام و احمدی پور در پژوهش خود انجام داده اند [۱۸]. به دلیل به هم چسبیده شدن صفحات فولادی و لاستیکی جداساز و فرض جدا نشدن آن‌ها از یکدیگر،



شکل ۷. پارامترهای موجود در یک حلقه هیستریزیس
Fig. 7. Different parameters in a hysteresis loop



شکل ۸. نمودار هیستریزیس مدل LRB-SMA و LRB
Fig. 8. Hysteresis curves of LRB and LRB-SMA

است و همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است مدل هسته سربی دارای دو فاز رفتاری قبل از تسلیم و بعد از تسلیم است. اما در مدل ترکیبی چون دو ماده SMA و سرب هر دو تسلیم می‌شوند، مدل دارای سه فاز رفتاری است و سطح تسلیم نهایی بالاتر از مدل هسته سربی است. این موضوع باعث افزایش اتلاف انرژی (مساحت نمودار هیستریزیس) می‌گردد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪ اتلاف انرژی در LRB، $J = 3054/9$ و در LRB-SMA، $J = 5080/2$ است. در صورتی که سختی مؤثر هر دو جداساز برابر فرض شود، به دلیل خاصیت برگشت پذیر بودن، میزان اتلاف انرژی تغییر چندانی نخواهد کرد. با توجه به نتایج جمع آوری شده در جدول ۶، میرایی ویسکوز معادل با اضافه شدن SMA، اندکی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، میرایی ویسکوز از ۲۱٪ به ۱۹٪ تغییر می‌کند.

سختی مؤثر و نسبت میرایی برای سیستم معادل مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند:

$$k_{eff(F-D)} = \frac{F_m}{D_m} \quad (1)$$

$$\xi_{eq(F-D)} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{D(F-D)}}{E_{SO(F-D)}} \quad (2)$$

که در آن F_m میانگین نیروهای حداکثر و حداقل، D_m میانگین جابه جایی های حداکثر و حداقل و E_{SO} طبق روابط (۳)، (۴) و (۵) به دست می‌آیند.

$$F_m = \frac{|F_{max}| + |F_{min}|}{2} \quad (3)$$

$$D_m = \frac{|D_{max}| + |D_{min}|}{2} \quad (4)$$

$$E_{SO(F-D)} = \frac{1}{2} k_{eff(F-D)} \cdot D_m^2 = \frac{F_m \cdot D_m}{2} \quad (5)$$

۵- بررسی اثر افزودن SMA بر رفتار جداساز LRB

در این بخش تأثیر اضافه شدن SMA به عنوان آلیاژی جدید بر تغییر پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل مورد بحث قرار می‌گیرد. شکل ۸ نمودار هیستریزیس مدل جداساز LRB و جداساز ترکیبی این پژوهش را در کنار هم نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل می‌توان فهمید با اضافه شدن SMA به جداساز هسته سربی، به‌عنوان یک المان جدید، سختی افزایش پیدا کرده است. در جدول ۶ مقادیر پارامترهای معرفی شده در بخش قبل برای دو جداساز LRB و LRB-SMA با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به عنوان مثال، سختی در کرنش برشی ۵۰٪ در LRB، $1/24$ کیلو نیوتن بر میلی متر و در LRB-SMA، $3/1$ کیلو نیوتن بر میلی متر است. به دلیل خاصیت برگشت پذیری SMA، جابه جایی باقی مانده یعنی میزان جابه جایی که در انتهای هر کرنش برشی با نیروی صفر باقی می‌ماند، کاهش پیدا می‌کند. با توجه به جدول ۶ در کرنش برشی ۱۵۰٪ میزان جابه جایی باقی مانده در مدل LRB، $26/3$ mm و در مدل LRB-SMA، $12/$ mm^۳ است و این به معنی کاهش به میزان ۴۷٪ است.

نیروی تسلیم مدل ترکیبی نسبت به مدل هسته سربی بیشتر

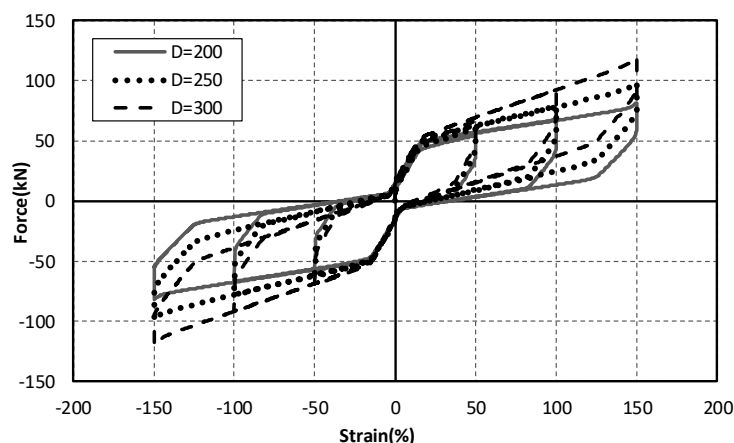
ماندن قطر سیم‌های SMA (5 mm)، به ترتیب در کرنش‌های برشی، ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۱۵۰٪، با توجه به افزایش ابعاد لاستیک، نقطه تسلیم بالاتر می‌رود و سختی افقی مؤثر جداساز، افزایش می‌یابد. تغییر پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش، در جدول ۷ نمایش داده شده است. به طور مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، سختی با افزایش ابعاد از ۵۵ kN/mm به ۲۷ kN/mm / افزایش می‌یابد و جابه‌جایی باقی‌مانده کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۰۰٪، مقدار جابه‌جایی باقی‌مانده D-200، ۱۱/۵ mm، D-250، ۱۱/۵ mm و D-300 به مقدار ۵/۲ mm تغییر پیدا کرده است. میرایی ویسکوز معادل نیز کاهش پیدا کرده است. به عنوان مثال، در کرنش ۱۵۰٪، میرایی ویسکوز در D-200، ۱۹٪ و در D-300، ۱۳٪ است.

۶- بررسی اثر ابعاد جداساز ترکیبی

با بزرگ کردن ابعاد جداساز از ۲۰۰ mm تا ۳۰۰ mm مطابق قبل، تغییر پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه‌جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل به دست آورده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به ثابت بودن طول سیم‌های SMA و مکان آنها و همچنین با توجه به اینکه ورق‌های بالا و پایین تقریباً صلب هستند و در نتایج مدل تأثیری ندارند، ابعاد آن‌ها بدون تغییر باقی‌مانده و تنها لایه‌های لاستیکی و فولادی قسمت وسط تغییر اندازه داده شده‌اند. شکل ۹ نمودار هیستریزس مدل‌های ذکر شده در بالا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد جداساز ترکیبی LRB-SMA، از ۲۰۰ mm تا ۳۰۰ mm و ثابت

جدول ۶. مقایسه نتایج مدل LRB و مدل LRB با اضافه کردن سیم‌های SMA
Table 6. Comparison of LRB models with and without SMA wires

γ (%) Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
With SMA	3.1	1.92	1.55	8.79	11.5	12.3	1503.2	3308.1	5080.2	25.1	22.4	18.9
Without SMA	1.2	0.97	0.83	17.38	26.3	26.3	993.5	2037.1	3054.9	41.4	27.1	21.2



شکل ۹. نمودار هیستریزس با تغییر ابعاد جداساز
Fig. 9. Hysteresis curves for different base isolation dimensions

۷- بررسی اثر قطر سیم‌های SMA بر جداساز ترکیبی

با افزایش قطر سیم‌های SMA از ۲/۵ mm تا ۸ mm همانند قبل پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل به دست آورده شده است. شکل ۱۰ نمودار هیستریزیس با تغییر قطر سیم‌ها را نشان می‌دهد. با ثابت ماندن ابعاد جداساز و تغییر قطر سیم‌های SMA، با توجه به زیاد شدن سطح مقطع سیم‌های SMA، که موجب افزایش سختی و بالا رفتن نقطه تسلیم می‌گردد، اتلاف انرژی و سختی افقی مؤثر افزایش پیدا کرده است. به طور مثال، با توجه به جدول ۸، در کرنش برشی ۱۵٪ اتلاف انرژی در قطر ۵ mm و ۸ mm به ترتیب از J ۵۰۸۰/۲ به J ۸۳۷۶/۰ و سختی افقی مؤثر به ترتیب از ۱/۵۵ kN/mm به ۲/۹۶ kN/mm افزایش پیدا کرده است. جابه جایی باقی‌مانده کاهش چشمگیری پیدا

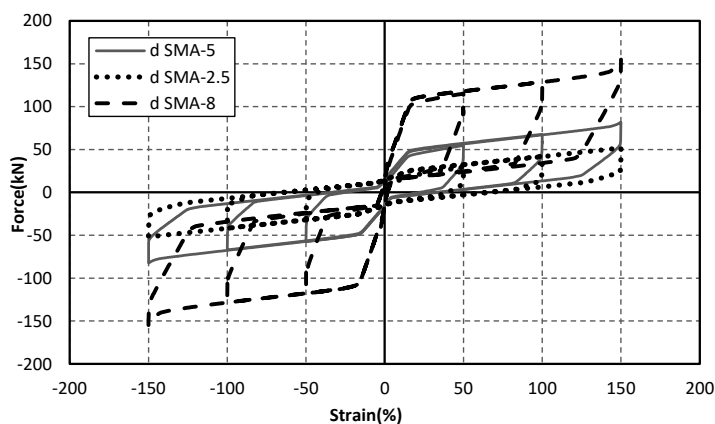
کرده است. به طور مثال، جابه جایی باقیمانده در کرنش برشی ۱۵٪ در قطر ۵ mm و ۸ mm به ترتیب ۱۲/۳۲ mm و ۰/۵۴ mm است. میرایی ویسکوز معادل نیز با افزایش قطر، کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در کرنش برشی ۱۵٪، مقدار میرایی ویسکوز در قطر ۵ mm، ۱۸/۹٪ و در قطر ۸ mm به ۱۶/۳٪ کاهش یافته است.

۸- بررسی اثر قطر هسته سربی بر جداساز ترکیبی

با بزرگ کردن قطر هسته سربی جداساز از ۴۰ mm تا ۱۰۰ mm تغییر پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل به دست آورده شده است. شکل ۱۱ نمودار هیستریزیس ناشی از تغییر قطر هسته سربی را نشان می‌دهد. با افزایش قطر هسته سربی، سختی افقی مؤثر، اتلاف انرژی و

جدول ۷. تأثیر تغییر ابعاد جداساز بر مشخصات رفتاری آن
Table 7. Effect of base isolation dimensions on its performance

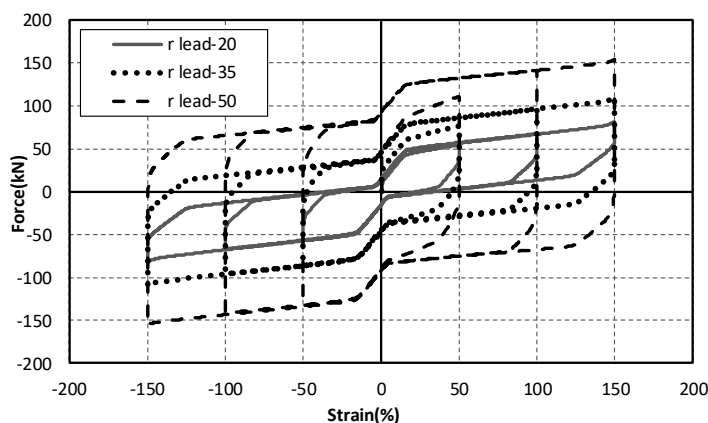
γ (%)	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
D-200	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.3	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
D-250	3.42	2.24	1.87	6.41	7.4	7.7	1513.9	3312.6	5057.4	23.1	19.2	15.5
D-300	3.81	2.63	2.27	4.30	5.2	5.5	1529.5	3300.3	5033.9	20.9	16.3	12.8



شکل ۱۰. نمودار هیستریزیس با تغییر قطر سیمها
Fig. 10. Hysteresis curves for different SMA wire diameters

جدول ۸. تأثیر تغییر قطر سیمهای SMA بر مشخصات رفتاری جداساز
Table 8. Effect of SMA wire diameters on the performance of base isolation

Case \ γ (%)	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
dSMA-2.5	1.68	1.20	0.98	14.93	22.6	22.49	1104.9	2314.8	3513.7	34.1	24.9	20.5
dSMA-5	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
dSMA-8	6.58	3.67	2.96	0.74	0.5	0.54	2315.2	5426.5	8376	18.3	19.2	16.3



شکل ۱۱. نمودار هیستریزس با تغییر قطر هسته سربی
Fig. 11. Hysteresis curves for different lead core diameters

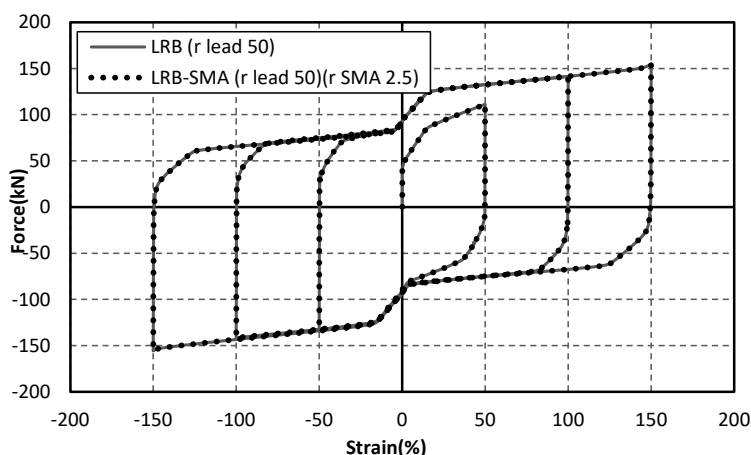
را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱۲ و جدول ۱۰ پیداست با افزایش قطر هسته سربی، نقش سیم‌های SMA کمرنگ‌تر می‌شود تا جایی که رفتار این دو جداساز هیچ‌گونه تفاوتی با یکدیگر نداشته و سیم‌های SMA با قطر ۵ mm کاملاً بی‌اثر شده‌اند. به عبارت دیگر در صورتی که سختی جانبی سیم‌های SMA در مقابل سختی جانبی هسته سربی بسیار پایین باشد، رفتار هسته سربی حاکم شده و سیم‌های SMA بی‌اثر می‌شوند. اما با افزایش قطر سیم‌های SMA از ۵ mm به ۸ mm مطابق شکل ۱۲، حضور سیم‌های SMA احساس می‌گردد.

شکل ۱۳ و جدول ۱۱ گویای نتایج به دست آمده از تحلیل مدل جداساز ترکیبی با قطر هسته ۱۰۰ mm و قطر سیم SMA، ۵ mm و مدل جداساز ترکیبی با قطر هسته ۱۰۰ mm و قطر سیم SMA، ۸ mm است. همان‌طور که در جدول ۱۱ مشخص است با افزایش

جابه‌جایی باقی مانده به دلیل افزایش نقطه تسلیم سرب، افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، میزان اتلاف انرژی در کرنش برشی ۱۵۰٪ در مدل با قطر هسته سربی ۴۰ میلی‌متر، $J = 5080.2/22.49$ و در مدل با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی‌متر $J = 8376/18.3$ است. با توجه به جدول ۹، میرایی ویسکوز معادل نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، میرایی ویسکوز از $18/91$ ٪ در کمترین قطر هسته سربی به $41/40$ ٪ در بیشترین قطر هسته سربی افزایش پیدا می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشخص است با افزایش قطر هسته سربی، رفتار هیستریزس جداساز ترکیبی به رفتار جداساز LRB نزدیک شده و خاصیت بازگرداندگی SMA کمتر مشاهده می‌شود. برای بررسی این موضوع به صورت دقیق‌تر، رفتار دو مدل جداساز LRB و جداساز ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی‌متر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل ۱۲ نمودار هیستریزس این دو مدل

جدول ۹. تأثیر تغییر قطر هسته سربی بر مشخصات رفتاری جداساز
Table 9. Effect of lead core diameters on the performance of base isolation

Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
r-20	3.10	1.92	1.55	8.8	11.5	12.32	1503.22	3308.14	5080.22	25.16	22.36	18.91
r-35	4.39	2.74	2.09	16.7	33.4	47.13	3323.1	7525.23	11419.8	39.31	35.64	31.41
r-50	6.35	4.04	2.95	17.4	34.9	52.37	6084.7	14015.04	21140.5	49.75	45.09	41.40



شکل ۱۲. نمودار هیستریزیس جداساز LRB و جداساز ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلیمتر و قطر SMA ۵ میلیمتر
Fig. 12. Hysteresis curves for LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameter of 5 mm

نکته اول کرنش سختی است که با افزایش تغییر شکل در جداساز اتفاق می افتد و دوم هم زمان با این اتفاق، تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت است که علاوه بر افزایش دما، باعث ایجاد تنش (تنش ناشی از فاز مارتنزیت) نیز می شود. به عبارت دیگر مشابه اتفاقی که در حالت حافظه دار شکلی اتفاق می افتد این بار تحت تأثیر تنش رفتار ماده تغییر می کند.

در جدول ۱۲ تغییرات سختی افقی، جابه جایی باقی مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل برای انواع سیم های SMA نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد که در کرنش های برشی بالا نوع SMA مدل اول، با کرنش سوپر الاستیک ۱۳/۵٪ و دمای پایانی آستنیت ۶۲- درجه، بهترین عملکرد را از خود نشان می دهد. میزان اتلاف انرژی و سختی افقی مؤثر جداساز ترکیبی با SMA نوع اول از دو جداساز ترکیبی دیگر بیشتر است. به عنوان مثال اتلاف انرژی

قطر سیم های SMA، سختی افقی و اتلاف انرژی افزایش پیدا می کند و در نتیجه جابه جایی باقی مانده و میرایی ویسکوز معادل کاهش می یابد. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪، میزان جابه جایی باقی مانده از ۵۲/۴ mm به ۴۷/۳ mm کاهش پیدا می کند.

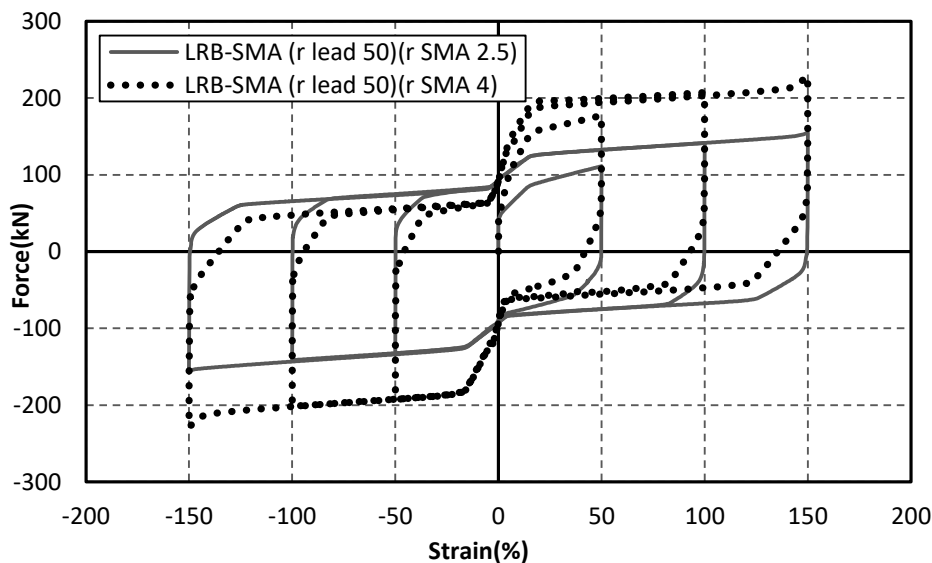
۹- بررسی تغییر نوع سیم های SMA در جداساز ترکیبی

شکل ۱۴ نمودار هیستریزیس ناشی از تغییر نوع SMA (مطابق جدول ۴) را نشان می دهد. با تغییر نوع سیم های SMA، همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود مدل شماره ۱ با توجه به کرنش سوپر الاستیک ۱۳/۵٪ هنوز در محدوده سوپر الاستیک باقی مانده است، اما در دو مدل دیگر با کرنش سوپر الاستیک ۵/۵٪، بعد از کرنش برشی ۵۰٪ سختی نمودار به صورت ناگهانی افزایش پیدا می کند. با توجه به رفتار SMA دو نکته را در مورد این آلیاژ می توان مورد توجه قرار داد:

جدول ۱۰. مقایسه مشخصات رفتاری جداساز LRB و جداساز ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی‌متر و قطر SMA ۵ میلی‌متر

Table 10. Comparison of the performance of LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameter of 5 mm

Case \ γ (%)	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
LRB (r lead 50)	6.36	4.04	2.95	17.4	34.9	52.4	6084.7	14015.1	21140.5	49.7	45.1	41.4
LRB-SMA (r lead 50) (r SMA 2.5)	6.36	4.04	2.95	17.4	34.9	52.4	6084.7	14015.1	21140.5	49.7	45.1	41.4



شکل ۱۳. نمودار هیستریزیس جداسازهای ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی‌متر و قطر SMA ۵ و ۸ میلی‌متر

Fig. 13. Hysteresis curves for LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameters of 5 and 8 mm

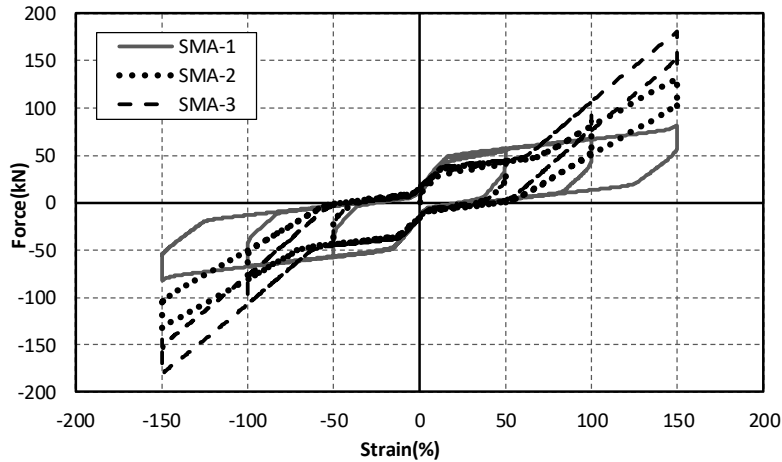
جدول ۱۱. مقایسه مشخصات رفتاری جداسازهای ترکیبی با قطر هسته سربی ۱۰۰ میلی‌متر و قطر SMA ۵ و ۸ میلی‌متر

Table 11. Comparison of the performance of LRB and LRB-SMA with lead core diameter of 100 mm and SMA wire diameters of 5 and 8 mm

Case \ γ (%)	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
LRB-SMA (r lead 50) (r SMA 2.5)	6.36	4.04	2.95	17.4	34.9	52.4	6084.7	14015.1	21140.5	49.7	45.1	41.4
LRB-SMA (r lead 50) (r SMA 4)	10.12	5.92	4.36	16.23	33.3	47.3	6938.4	16260.9	24455.5	35.6	35.7	32.4

عنوان مثال، جابه‌جایی باقی‌مانده مدل با SMA نوع اول در کرنش ۵۰٪ معادل ۹ mm است در حالی که در مدل با SMA نوع دوم به ۱۳ mm افزایش پیدا کرده است.

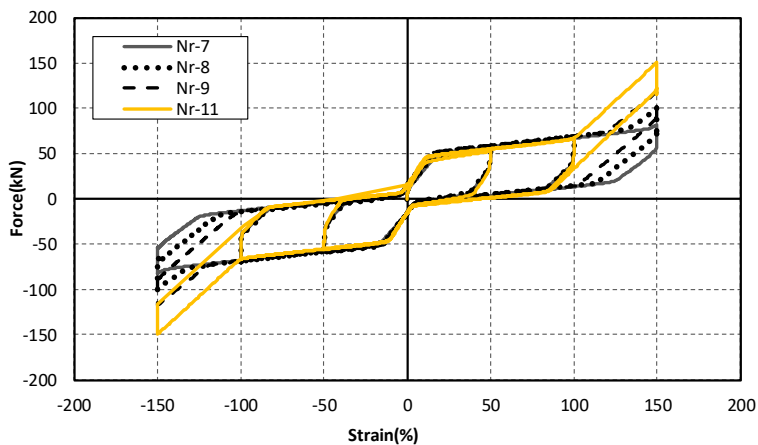
جداساز با SMA نوع اول در کرنش ۱۵٪، $50.80/2$ J است اما در جداساز با SMA نوع سوم به $3520/6$ J کاهش پیدا می‌کند. میزان جابه‌جایی باقی‌مانده نیز افزایش پیدا می‌کند که مطلوب نیست. به



شکل ۱۴. نمودار هیستریزیس با تغییر نوع سیمهای SMA
Fig. 14. Hysteresis curves for different SMA types

جدول ۱۲. تأثیر تغییر نوع سیم SMA بر مشخصات رفتاری جداساز
Table 12. Effect of SMA types on the performance of base isolation

γ (%)	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)			
	Case	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
SMA-1		3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
SMA-2		2.36	2.30	2.51	13.03	16	16.37	1306.4	2492	3525.1	28.6	14	8.1
SMA-3		2.45	3.05	3.44	12	13.4	13.94	1335.5	2486.5	3520.6	28.3	10.6	5.9



شکل ۱۵. نمودار هیستریزیس جداساز ترکیبی با تعداد لایه‌های لاستیک ۷، ۸، ۹ و ۱۱
Fig. 15. Hysteresis curves of hybrid base isolation with 7, 8, 9 and 11 rubber layers

مؤثر، جابه جایی باقی مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل مورد بررسی قرار گرفته است. محل اتصال سیمها ثابت است و با توجه به افزایش ارتفاع، طول سیمهای SMA تغییر پیدا کرده است. شکل

۱۰- بررسی اثر افزایش ارتفاع جداساز ترکیبی

با تغییر تعداد لایه‌های لاستیک با ضخامت لاستیک برابر (به ترتیب دارای تعداد لایه‌های لاستیک ۷، ۸، ۹ و ۱۱)، پارامترهای سختی افقی

جدول ۱۳. تأثیر تغییر تعداد لایه‌های لاستیک بر مشخصات رفتاری جداساز ترکیبی
Table 13. Effect of number of rubber layers on the performance of hybrid base isolation

Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
Nr-7	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
Nr-8	2.82	1.71	1.66	6.57	8.9	9.75	1737.3	3787.3	5577.4	24.5	21.2	14.8
Nr-9	2.48	1.53	1.75	7.96	10.4	11.65	1960.7	4300.4	6077.6	24.8	22	12.1
Nr-11	1.90	1.21	1.82	17.9	20.6	20.7	2375.8	5427.4	7412.3	26.2	23.5	9.5

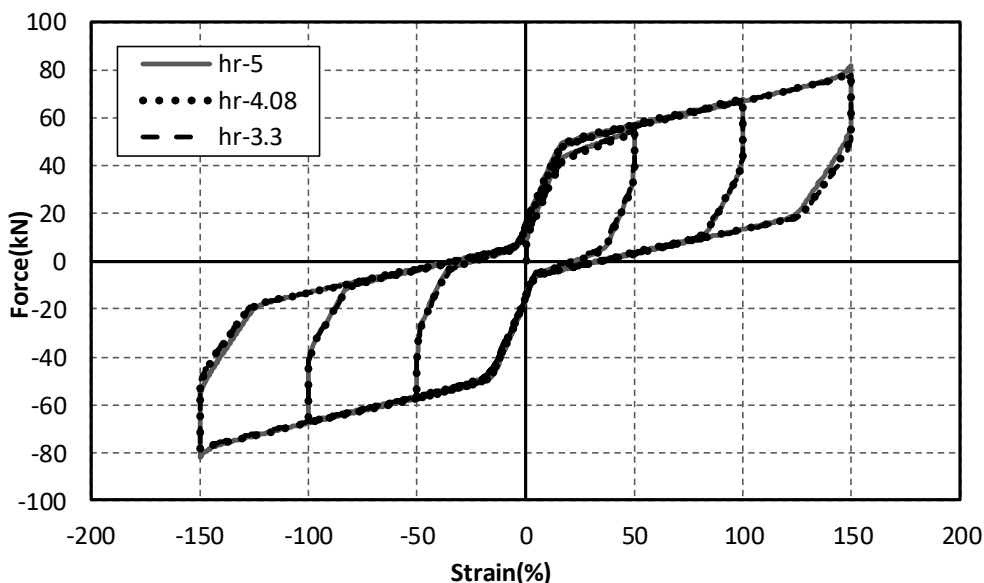
پارامترهای سختی افقی مؤثر، جابه‌جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل مورد بررسی قرار گرفته است. مجدداً محل اتصال سیم‌ها ثابت است و با توجه به عدم افزایش ارتفاع، طول سیم‌های SMA تغییر پیدا نکرده است. شکل ۱۶ نمودار هیستریزس جداساز با ضخامت‌های مختلف لاستیک را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد با ثابت گرفتن ارتفاع جداساز ((تعداد لایه لاستیک × ضخامت یک لایه لاستیک) + (تعداد لایه فولاد × ضخامت یک لایه فولاد)) و تغییر تعداد و ضخامت لایه‌های لاستیک با ضخامت ثابت فولاد ۲/۳ mm، پارامترهای مطالعه مطابق با نتایجی که آلام و احمدی پور [۱۷] در پژوهش خود به دست آوردند، تغییرات کمی می‌کنند.

مطابق جدول ۱۴، سختی افقی مؤثر با کاهش ضخامت لایه‌های لاستیک (افزایش تعداد لایه لاستیک) افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال در کرنش ۵۰٪ میزان سختی افقی در مدل با ضخامت لاستیک ۵ میلی‌متر، ۳/۱۰ kN/mm و در مدل با ضخامت لاستیک ۳/۳ میلی‌متر، ۳/۵۸ kN/mm است. جابه‌جایی باقی‌مانده، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل نیز با کاهش ضخامت لاستیک، کاهش می‌یابند. به عنوان مثال، جابه‌جایی باقی‌مانده در کرنش ۵۰٪ در مدل با بیشترین ضخامت لاستیک، ۳/۱۰ mm و در مدل با کمترین ضخامت لاستیک، ۳/۵۸ mm است. اتلاف انرژی نیز در کرنش ۵۰٪ در این دو مدل به ترتیب، J ۱۵۰۳/۲ و J ۱۲۳۵ است. در نهایت تغییر ضخامت لاستیک با ارتفاع کل ثابت، در تغییر نتایج تأثیر ناچیزی دارد.

۱۵ نمودار هیستریزس این مدل‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵ در کرنش برشی بیشتر از ۱۰۰٪ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع جداساز، سختی افقی به‌صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به جدول ۱۳، در کرنش برشی ۱۵۰٪ سختی افقی در مدل با تعداد لایه‌های لاستیک برابر ۷، ۱/۵۵ kN/mm و مدل با تعداد لایه‌های لاستیک برابر ۱۱، ۱/۸۲ kN/mm است. این در حالی است که در کرنش‌های برشی پایین‌تر، سختی افقی با افزایش تعداد لایه‌های لاستیک کاهش می‌یابد. این افزایش و کاهش سختی، به دو دلیل قابل توجه است. دلیل اول این است که زیاد شدن لایه‌های لاستیک و ارتفاع جداساز باعث کاهش سختی افقی می‌شود، اما با توجه به اینکه با زیاد شدن ارتفاع جداساز، جابه‌جایی اعمال شده به جداساز افزایش پیدا می‌کند (به عنوان مثال، جابه‌جایی در کرنش برشی ۱۵۰٪ از ۵۲/۵ mm تا ۸۲/۵ mm تغییر می‌کند)، تنش و کرنش محوری به وجود آمده در سیم‌ها افزایش می‌یابد و این باعث کرنش سختی و ایجاد تنش ناشی از فاز مارتنزیت می‌شود. میزان اتلاف انرژی نیز با افزایش ارتفاع جداساز افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، در کرنش برشی ۱۵۰٪ میزان اتلاف انرژی در مدل با کمترین تعداد لایه، J ۵۰۸۰/۲ و در مدل با بیشترین تعداد لایه J ۷۴۱۲/۳ است. لازم به ذکر است که میزان میرایی ویسکوز معادل و جابه‌جایی باقی‌مانده به صورت نامنظم تغییر پیدا کرده است.

۱۱- بررسی اثر ضخامت لاستیک در جداساز ترکیبی

با تغییر ضخامت لایه‌های لاستیک با ارتفاع ثابت جداساز



شکل ۱۶. نمودار هیستریزیس جداساز ترکیبی با ضخامت‌های مختلف لاستیک و ارتفاع ثابت جداساز
 Fig. 16. Hysteresis curves of hybrid base isolation for different rubber layer thicknesses with a constant base isolation height

جدول ۱۴. تأثیر تغییر ضخامت لاستیک بر مشخصات رفتاری جداساز ترکیبی
 Table 14. Effect of rubber layer thickness on the performance of hybrid base isolation

γ (%) Case	Horizontal stiffness (kN/mm)			Residual deformation (mm)			Dissipated energy (J)			Viscous damping (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
hr-5	3.10	1.92	1.55	8.79	11.5	12.32	1503.2	3308.1	5080.2	25.2	22.4	18.9
hr-4.08	3.29	2.07	1.59	7.77	10.5	11.17	1362.3	3097.8	4797.2	24.6	22.2	19.9
hr-3.3	3.58	2.21	1.70	7.17	10	10.52	1235	2839.7	4415.4	23.7	22.1	19.8

شکل ۱۷ تأثیر تنش فشاری را بر رفتار جداساز با ابعاد ۲۰۰ mm نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل حاکی از تغییرات ناچیز در رفتار چرخه‌ای تحت تنش‌های فشاری مختلف است. همین رفتار برای جداسازهای با ابعاد دیگر نیز مشاهده می‌شود.

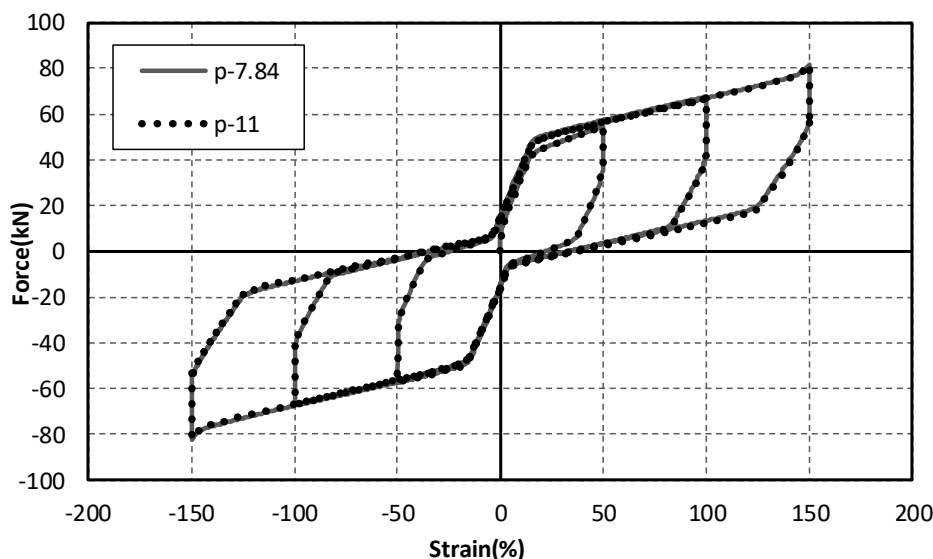
۱۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مطالعه پارامتری کامل بر روی رفتار جداساز ترکیبی LRB-SMA انجام شده و رفتار این جداساز با جداساز LRB مقایسه شده و تأثیر عوامل مؤثر بر رفتار این جداساز ترکیبی مورد بحث قرار گرفته است. این کار با ساخت ۲۵ مدل المان محدود در نرم

۱۲- بررسی تنش فشاری بر رفتار جداساز ترکیبی

در این قسمت تأثیر تنش فشاری روی جداساز مورد ارزیابی قرار گرفته است. جداساز با طول و عرض مساوی به اندازه ۲۰۰ mm و ۲۵۰ mm و ۳۰۰ mm تحت بارهای فشاری مختلف که تنش‌های حداکثر را طبق آیین‌نامه‌های ۵۲۳ [۱۹] و آشتو [۲۰] اعمال کنند، قرار داده شده است. تنش فشاری مجاز طبق آیین‌نامه ۵۲۳، ۸۴ MPa/۷ و طبق آیین‌نامه آشتو (رابطه (۶)) ۱۱ MPa به دست می‌آید.

$$\sigma \leq 1.6GS \leq 1.6ksi \quad (6)$$



شکل ۱۷. نمودار هیستریزیس جداساز با تنش های فشاری مختلف
 Fig. 17. Hysteresis curves of base isolation for different axial stress

ترکیبی که هم بتوان از ظرفیت جذب انرژی مناسب سرب و هم از خاصیت بازگرداندگی SMA استفاده نمود لازم است تعادل مناسب بین سختی هسته سربی و سیم های SMA برقرار شود.

- در سیم های SMA که کرنش سوپرالاستیک آن ها بالاتر باشد خاصیت بازگرداندگی بهتری در رفتار جداساز ترکیبی مجهز به آن ها به چشم می خورد. ولی در سیم های SMA که کرنش سوپرالاستیک پایین تری دارند، در کرنش های برشی نسبتاً پایین، سختی نمودار چرخه ای جداساز ترکیبی به صورت ناگهانی افزایش پیدا می کند. دلیل این امر خاصیت کرنش سختی و تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت سیم های SMA است.

- با افزایش ارتفاع جداساز ترکیبی، رفتار جداساز در کرنش های برشی کم و زیاد متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر در کرنش های برشی زیاد به علت تغییر طول زیاد سیم های SMA، رفتار کرنش سختی و تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت در آن ها مشاهده می شود که باعث افزایش سختی می شود، ولی در کرنش های برشی پایین این قضیه برعکس است.

- تغییر در ضخامت لایه های لاستیکی با ثابت نگه داشتن ارتفاع کل جداساز و تغییر در تنش فشاری اعمالی به جداساز، تغییر چندانی در رفتار چرخه ای جداساز به وجود نمی آورد.

- در نهایت با توجه به اینکه چه نوع عملکردی از جداساز مورد

افزار آباکوس انجام شده است. تغییرات پارامترهای اضافه شدن SMA به جداساز LRB، ابعاد جداساز ترکیبی، قطر سیم های SMA، قطر هسته سربی، نوع سیم های SMA، ارتفاع جداساز، ضخامت لاستیک و تنش فشاری بر رفتار جداساز ترکیبی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. خلاصه ای از نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- با اضافه شدن SMA به جداساز هسته سربی سختی، نیروی تسلیم و میزان اتلاف انرژی افزایش و جابه جایی باقی مانده کاهش می یابد. رفتار جداساز ترکیبی نیز بر خلاف جداساز هسته سربی که به صورت دو خطی است، فرمی سه خطی داشته و هسته سربی و سیم های SMA هر دو در رفتار چرخه ای سیستم نقش آفرینی می کنند.

- با افزایش ابعاد جداساز ترکیبی سختی و نیروی تسلیم افزایش و جابه جایی باقی مانده و میرایی ویسکوز معادل کاهش پیدا می کند.

- با افزایش سطح مقطع سیم های SMA سختی، نیروی تسلیم و میزان اتلاف انرژی افزایش و جابه جایی باقی مانده کاهش می یابد.

- با افزایش قطر هسته سربی سختی، میزان اتلاف انرژی، جابه جایی باقی مانده و میرایی ویسکوز معادل افزایش پیدا می کند.

به تعبیر دیگر با افزایش قطر هسته سربی، رفتار هیستریزیس جداساز ترکیبی به رفتار جداساز LRB نزدیک شده و خاصیت بازگرداندگی SMA کمتر مشاهده می شود. در نتیجه برای رسیدن به رفتاری

توجه است، می‌توان پارامترهای مورد مطالعه را به صورت بهینه به دست آورد. به عنوان مثال، اگر سختی مؤثر کمتر مورد نظر باشد، با زیاد کردن ارتفاع جداساز می‌توان به آن هدف رسید و اگر جابه جایی باقی‌مانده کمتر به عنوان هدف قرار گیرد، می‌توان از طریق افزایش ابعاد و یا افزایش قطر سیم‌های SMA اقدام کرد؛ از بین این دو گزینه، افزایش قطر سیم‌های SMA مؤثرتر است. به عنوان مثال در کرنش برشی ۱۵۰٪ با افزایش قطر سیم‌ها، جابه جایی باقی‌مانده ۹۸٪ کاهش می‌یابد. اگر اتلاف انرژی بیشتر مدنظر باشد به ۴ طریق می‌توان عمل کرد: افزایش ابعاد جداساز یا افزایش شعاع سیم‌های SMA یا افزایش قطر هسته سربی و یا افزایش ارتفاع جداساز. از بین موارد ذکر شده، افزایش شعاع سیم SMA و افزایش قطر هسته بیشترین اثر گذاری را دارا هستند. مثلاً با افزایش شعاع سیم از ۱/۲۵ mm به ۴ mm در کرنش ۱۵۰٪، اتلاف انرژی ۱۳۸٪ افزایش می‌یابد.

۱۴- فهرست علائم

Af	دمای پایانی آستنیت، °C
BI	جداساز لرزه‌ای
SMA	آلیاژ حافظه‌دار
LRB	جداساز لاستیکی هسته سربی
NRB	جداساز لاستیکی طبیعی
RB	جداساز لاستیکی
S-FBI	جداساز اصطکاکی
E _A	مدول کشسانی فاز آستنیت، MPa
V _A	ضریب پواسون آستنیت
E _M	مدول کشسانی فاز مارتنزیت، MPa
V _M	ضریب پواسون مارتنزیت
ε ^L	کرنش حاصل از تبدیل فاز
$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})_L$	نسبت تنش به دما در حالت بارگذاری، MPa/T
σ _L ^S	تنش آغاز تبدیل فاز مستقیم، MPa
σ _L ^E	تنش پایان تبدیل فاز مستقیم، MPa
T ₀	دما، °C

$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})_U$	نسبت تنش به دما در حالت باربرداری، MPa/T
σ _U ^S	تنش آغاز تبدیل فاز معکوس، MPa
σ _U ^E	تنش پایان تبدیل فاز معکوس، MPa
σ _{CL} ^S	تنش فشاری بحرانی برای آغاز تحول فازی، MPa
ε _V ^L	کرنش حجمی ایجاد شده در اثر تبدیل فاز
σ	تنش فشاری، MPa
G	مدول برشی لاستیک، MPa
S	ضریب شکل

مراجع

- [1] F. Naeim and J. M. Kelly, *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons, 1999.
- [2] W. R. a. L. Greenbank, "n extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an earthquake," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 4, pp. 251-259, 1976.
- [3] T. Kelly, "Base Isolation of Structures," *Design guidelines*. Auckland: Holmes Consulting Group Ltd, 2001.
- [4] W. H. Robinson, "Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 10, pp. 593-604, 1982.
- [5] M. Shinozuka, S. R. Chaudhuri, and S. K. Mishra, "Shape-memory-alloy supplemented lead rubber bearing (SMA-LRB) for seismic isolation," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 41, pp. 34-45, 2015.
- [6] R. DesRoches and M. Delemont, "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys," *Engineering Structures*, vol. 24, no. 3, pp. 325-332, 2002.
- [7] M. Dolce, D. Cardone, and F. C. Ponzo, "Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, no. 5, pp. 573-596, 2007.
- [8] E. Choi, T. Nam, J. Oh, and B. Cho, "An isolation bearing

- [15] M. Abe, J. Yoshida, and Y. Fujino, "Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling. I: experimental study," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, pp. 1119-1132, 2004.
- [16] M. J. Asl, M. Rahman, and A. Karbakhsh, "Numerical Analysis of Seismic Elastomeric Isolation Bearing in the Base-Isolated Buildings," *Open Journal of Earthquake Research*, vol. 3, no. 01, p. 1, 2014.
- [17] Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma, Y. Sutou, T. Omori, and K. Ishida, "Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity," *Science*, vol. 327, no. 5972, pp. 1488-1490, 2010.
- [18] M. Conti, M. De Beule, P. Mortier, D. Van Loo, P. Verdonck, F. Vermassen, P. Segers, F. Auricchio and B. Verhegghe, "Nitinol embolic protection filters: design investigation by finite element analysis," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 18, no. 5-6, pp. 787-792, 2009.
- [19] M. Ahmadipour and M. S. Alam, "Sensitivity analysis on mechanical characteristics of lead-core steel-reinforced elastomeric bearings under cyclic loading," *Engineering Structures*, vol. 140, pp. 39-50, 2017.
- [20] Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System, "Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings", 2010.
- [21] A. A. o. State and W. Highway and Transportation Officials, DC., "AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design, First Edition." 1991.
- for highway bridges using shape memory alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 438, pp. 1081-1084, 2006.
- [9] F. Casciati, L. Faravelli, and K. Hamdaoui, "Performance of a base isolator with shape memory alloy bars," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 6, no. 4, pp. 401-408, 2007.
- [10] O. E. O. a. S. Hurlebaus, "Performance evaluation of shape memory alloy/rubber-based isolation systems for seismic response mitigation of bridges," in *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, pp. 76473X-76473X-12, 2010.
- [11] O. E. O. a. S. Hurlebaus, "Evaluation of the performance of a sliding-type base isolation system with a NiTi shape memory alloy device considering temperature effects," *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 238-249, 2010.
- [12] O. E. O. a. S. Hurlebaus, "Seismic assessment of bridge structures isolated by a shape memory alloy/rubber-based isolation system," *Smart Materials and Structures*, vol. 20, pp. 15-30, 2010.
- [13] F. H. Dezfuli and M. S. Alam, "Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing," *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 4, p. 045013, 2013.
- [14] F. H. Dezfuli and M. S. Alam, "Hysteresis model of shape memory alloy wire-based laminated rubber bearing under compression and unidirectional shear loadings," *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 6, p. 065022, 2015.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Mahmoodi, H. Tajmir Riahi, M.R. Zare, Investigating the Effective Parameters on the Performance of Hybrid Lead Rubber Bearing with Shape Memory Alloy, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 581-600.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14747.5731](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14747.5731)



