



Experimental and Numerical Study of Hybrid Friction Damper

E. Moaddab*, B. Shahbazi

Department of Engineering, Seraj Higher Education Institute, Tabriz, Iran

ABSTRACT: In this study, a new hybrid energy dissipation device was developed by combining two friction dampers (auxiliary and main fuse) in series to be used for seismic control of two different earthquake intensities. Compared with the conventional friction dampers, the new hybrid damper has an advantage in which only auxiliary fuse (with low sliding force) is activated for moderate earthquakes and both fuses work simultaneously for strong earthquakes. Cyclic loading tests of the combined hybrid dampers were carried out in order to evaluate their seismic energy dissipation capability. The obtained experimental force-displacement indicated proper details of the new damper to create two performance level. Finite element analyses of the test specimens were also carried out for comparison, which had good agreement with the test results. Force displacement characteristics, Energy dissipation and equivalent viscous damping were also derived and good agreement has been found with code requirement for displacement dependent dampers. Also, it was demonstrated that engaging the main fuse with non-loaded pretention bolts, strength losses of the hybrid damper in subsequent cycles were limited compared to the common friction dampers which can be called “resurrection-type” behavior of the main fuse in the main shocks.

Review History:

Received: 6/18/2018

Revised: 9/10/2018

Accepted: 9/11/2018

Available Online: 9/15/2018

Keywords:

Friction damper

Hybrid damper

Moderate earthquake

Energy dissipation

Experimental sample

1. INTRODUCTION

Response control of structures is one of the reliable approaches to increase the safety and stability of structures against wind and earthquake excitation. Passive, active and semi-active controls are the main classification of structural control systems. The passive systems are also known as passive energy dissipation devices, do not require an external source of power so they have been considered an effective and common way to decrease earthquake effect on structures. In passive control systems, input energy supplied by wind and/or earthquake can be dissipated within energy dissipative devices by yielding or friction [1,2].

Some researchers investigated the simultaneous application of multiple devices to maximize the energy dissipation mechanism of dampers during severe and moderate excitations. The combined dampers mitigated the seismic effect by means of minimizing the shortcomings of individual dampers [3-5]. Combination of friction and yielding dampers [6] buckling resistant braces with viscoelastic dampers [7] multiple steel pipes [8] and dual TADAS plates [9] improved some aspects of structural response providing benefits for multiple damage measures.

The purpose of this study is the development of a hybrid friction damper which works for both major and minor earthquakes numerically and experimentally. It seems that the proposed damper despite its simplicity, applicability and relatively low cost, demonstrates good performance and is

acceptable in reducing the seismic vibrations of structures.

The hybrid damper developed in this study consists of two friction damper named hereby main and auxiliary fuse to resist strong earthquakes and small earthquakes respectively. Auxiliary and main fuse are connected through a displacement gap (horizontal holes) in series as shown in Figure 1. The auxiliary friction part consists of friction damper with low pretention force on bolts and the main one is provided by high pretention force which it is designed base on severe earthquakes.

The introduced hybrid friction damper is basically a displacement-dependent device which dissipates seismic energy by a slip of friction pads in two stages (friction dampers). The slip of friction pads in an auxiliary part occurs at small displacement, which makes it effective in resisting small earthquakes. The main part in dampers remain elastic during small earthquakes and are activated at only major earthquakes after reaching the predefined displacement gap. As the imposed displacement increases, high tension bolts attach on the end of horizontal slotted holes and transfer the force to the main part of the damper with large pretention

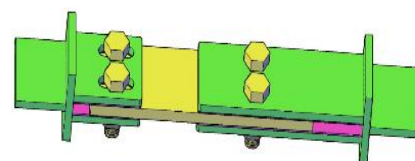


Fig. 1. Hybrid friction damper

*Corresponding author's email: e.moaddab@seraj.ac.ir



Fig. 2. The test set up in universal actuator

specimen	P_{S1} (kN)	P_{S2} (kN)	P_{s2}/P_{s1}	δ_{max} (mm)
A	15	28	1.9	50
B	36	104	2.9	40
C	60	180	3	60
D	87.5	237.8	2.7	60

Table 1. Clamping forces in the experimented specimen

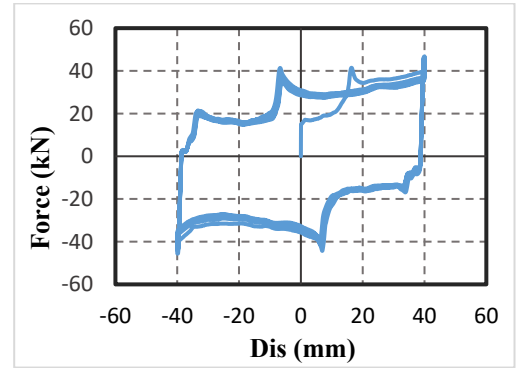


Fig. 3. Load-displacement results for sample A

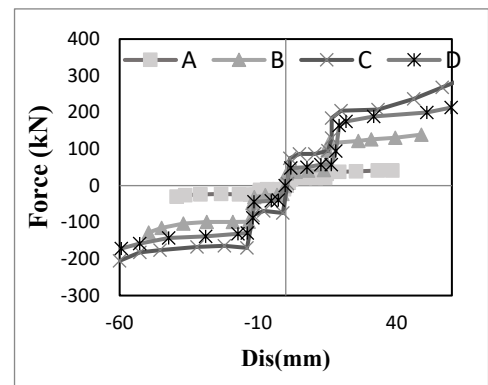


Fig. 4. Backbone curves of experimented samples

force on bolts in the main part.

2. METHODOLOGY

For evaluating the seismic performance of the hybrid damper, displacement-controlled cyclic tests of the specimens were carried out using a 300 kN universal electronic servo actuator. Figure 2 shows the photographs of the hybrid damper test set up.

In the experimental program of the hybrid friction damper, 20 cycles of harmonic displacement loading were applied with constant amplitude in such a way that the maximum displacement of 60 mm is reached at each loading cycle. This amplitude of imposed displacement corresponds to 2% of the story height in structures.

According to Table 1, four samples were experimented by changing their clamping forces in both parts of hybrid damper. The friction coefficient of the friction pads used in the hybrid damper was determined to be 0.3 based on a series of preliminary tests measuring slip force of the friction pad subjected to various clamping forces induced by a torque ranch.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The relevant test results were used to plot hysteresis curves for the hybrid friction damper; one of the results is shown in Figures 3 for sample A. The increase in forces associated with gap displacement was evident in the hysteresis loops. Also, the maximum applied displacement amplitude was chosen

greater than the displacement gap in order to show the effects of adding the main fuse to the energy absorption system.

Force-displacement multi liner curve has been extracted from all test results and they are depicted in Figure 4. These simplified curves are derived from average slip force at corresponding displacement amplitudes. As can be seen, slip forces of specimens were increased due to the increase of clamping forces in A to D samples.

Base on the requirement of ASCE/SEI41-06 [10], slip force reduction in each cycle should not be greater than %15 compared with average slip load in all cycles. Slip force of all experiment samples has shown that the value of recorded force is not fluctuating diversely and confirmed with the code requirements. Equivalent damping ratio and dissipated energy of tested sampled have been determined by using the area under the force-displacement curve in each cycle. Results demonstrated that dissipated energy grow quickly after gap displacement and equivalent damping ratios vary approximately about 0.55.

In order to describe the multi-phase hysteretic behavior of the hybrid damper, numerical analysis was performed with Open Sees software [11]. In formulating an analytical model, elastoplastic material is considered to idealize a rectangular loop of friction damper in each part of damper and gap-hook material are used to model the displacement gap between two fuses. Defined materials are combined in series and have been

Table 2. Numerical model properties

model	P_{S1} (kN)	P_{S2} (kN)	P_{s2}/P_{s1}
a	93	172	1.85
b	74	165	2.23
c	70	200	2.86
d	55	230	4.18
e	45	268	5.6
f	35	297	8.5
g	93	345	3.7
h	70	270	3.86
i	50	185	3.7
j	35	143	4.1

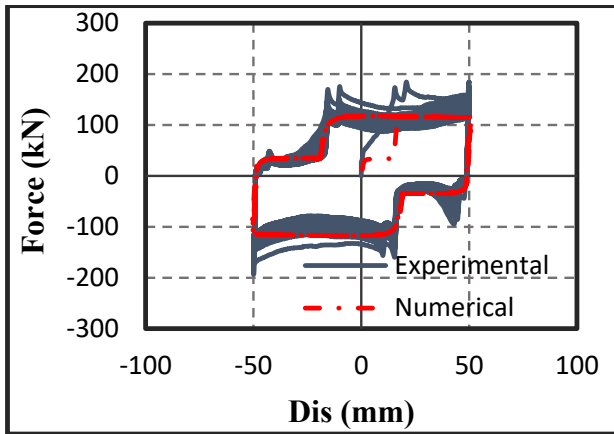


Fig. 5. Verification of numerical model with the experimental result

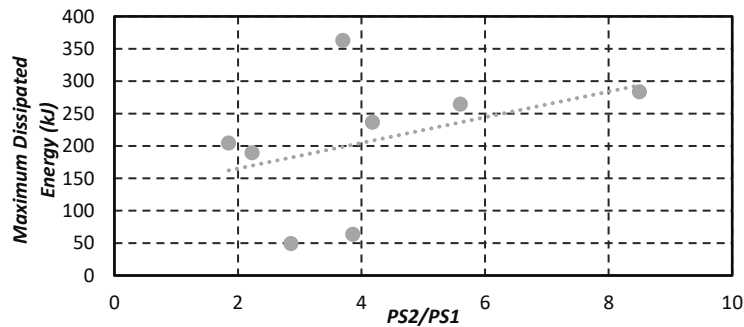


Fig. 6. Effect of P_{s2}/P_{s1} on maximum cumulative energy

modeled as a zero-length element in Open Sees software. Good agreement was observed between numerical analysis and experimental results for sample A (as illustrated in Figure 5).

Numerical models were developed in order to define the effect of the ratio of different slip force values in both fuses according to Table 2. Dissipated energy of all models was calculated and the relation of P_{s2}/P_{s1} and amount of cumulative energy dissipation have been investigated. As shown in Figure 6, increases in P_{s2}/P_{s1} led to ascending energy dissipation while it seems the advanced analysis of structures equipped by hybrid friction damper is necessary to determine the optimum ratio of slip forces.

4. CONCLUSIONS

The obtained experimental force-displacement indicated proper details of the new damper to create two performance level. Finite element analyses of the test specimens were also carried out for comparison, which had good agreement with the test results. Force displacement characteristics, Energy dissipation and equivalent viscous damping were also determined and compared to code requirements. It was found that results are in the allowable range of code requirements.

Also, it was demonstrated that engaging the main fuse with non-loaded pretention bolts, strength losses of the hybrid damper in subsequent cycles were limited compared to the common friction dampers which can be called “resurrection-type” behavior of the main fuse in the main shocks.

REFERENCES

- [1] ASCE, 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia (2010).
- [2] T. Soong, B. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, Engineering structures, 24(3) (2002) 243-259.
- [3] C. Christopoulos, M. Montgomery, Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(15) (2013) 2217-2233.
- [4] T.L. Karavasilis, T. Blakeborough, M.S. Williams, Development of nonlinear analytical model and seismic analyses of a steel frame with self-centering devices and viscoelastic dampers, Computers & Structures, 89(11-12) (2011) 1232-1240.
- [5] J.D. Marshall, F.A. Charney, A hybrid passive control device

- for steel structures, I: Development and analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(10) (2010) 1278-1286
- [6] C.-H. Lee, J. Kim, D.-H. Kim, J. Ryu, Y.K. Ju, Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection, *Engineering Structures*, 114 (2016) 75-92.
- [7] D.H. Kim, Experimental Study on the Seismic Performance of Hybrid Buckling-Restrained Braces, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4) (2013) 23-29.
- [8] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 127 (2016) 120-135.
- [9] B. Hosseini Hashemi, E. Moaddab, Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 170(10) (2017) 722-734.
- [10] ASCE 41-06, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, Virginia(USA), (2007).
- [11] S. Mazzoni, F. McKenna, G.L. Fenves, *Open Sees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2005)

HOW TO CITE THIS ARTICLE

E. Moaddab, B. Shahbazi, Experimental and Numerical Study of Hybrid Friction Damper, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 15-18.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14589.5700](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14589.5700)





بررسی آزمایشگاهی و عددی میراگر اصطکاکی ترکیبی

الهام مودب*، بابک شهبازی

مؤسسه ی آموزش عالی غیردولتی و غیرانتفاعی سراج، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۲۸
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۱۹
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۲۴

کلمات کلیدی:

میراگر اصطکاکی
میراگر دوسطحی
زمین لرزه ی متوسط
جذب انرژی
آزمایشگاهی

خلاصه: در این مقاله به معرفی و بررسی عددی و آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی ترکیبی جدید موسوم به HFD پرداخته شده است. این میراگر ترکیب سری دو میراگر اصطکاکی با دو سطح نیروی لغزش (فیوز اصلی و کمکی) متفاوت است که قادر به اتلاف انرژی متناسب با دو سطح زمین لرزه ی متوسط و شدید می باشد. چهار نمونه ی آزمایشگاهی مطابق با ساختار پیشنهادی، تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته است. نتایج منحنی های نیرو تغییر مکان نشان می دهد هندسه ی پیشنهاد شده می تواند به خوبی عملکرد دوسطحی را فراهم کند، به نحوی که تا قبل از تغییر مکان گپ تنها میراگر کمکی و بعد از آن ترکیب هر دو میراگر باعث اتلاف انرژی می شوند. سپس ویژگی های نیرو-جابجایی، انرژی اتلاfi و میرایی ویسکوز معادل برای چرخه های متوالی بارگذاری محاسبه شد و مشخص گردید که این مقادیر به لحاظ مطابقت با الزامات 06-41/SEI/ASCI برای دستگاه های وابسته به جابه جایی، واجد شرایط می باشد. مقایسه انرژی جذب شده در نمونه ها نشان داد در بازه های تغییر مکانی بزرگ تر از تغییر مکان گپ، فرآیند جذب انرژی در چرخه های بارگذاری متناظر با این تغییر مکان ها بهبود یافته است. در ادامه با استفاده از ابزار مدل سازی Open Sees تعداد ۱۰ مدل ساخته شدند و تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی به دست آمد.

۱- مقدمه

سرعت و وابسته به تغییر مکان تقسیم بندی شود. وسایل اتلاف انرژی وابسته به حرکت اساساً برای افزایش حس ایمنی ساکنین در سازه ها و کاهش لرزش های ناشی از باد استفاده می شود و معمولاً در بالاترین تراز سازه قرار می گیرد. میراگرهای جرمی^۲ (TMD) و جرمی مایع^۳ (TLD) نمونه های از این نوع می باشند. از طرفی میراگرهای وابسته به سرعت و تغییر مکان در سازه به منظور جذب انرژی ارتعاش ایجاد شده در سازه به دلیل زمین لرزه یا باد کاربرد دارد و عمدتاً بین طبقه های سازه استفاده می شود. نمونه هایی از میراگرهای وابسته به تغییر مکان شامل میراگرهای اصطکاکی^۴ (FD) انواع میراگرهای فلزی تسلیمی^۵ (MD) مهاربندهای کمانش تاب^۶ (BRB) می باشد. وسایل

کنترل پاسخ سازه یکی از مهم ترین راهکارهایی است که به منظور افزایش عمر مفید و ایمنی ساختمان در دهه های اخیر مورد توجه عموم محققین در زمینه مهندسی زلزله قرار گرفته است. به این منظور، تجهیزاتی به سازه الحاق می گردد تا انرژی ورودی ناشی از تحریک های جانبی نظیر زلزله و باد را مستهلک کرده و مقدار تقاضا برای اعضای سازه ای را به حداقل برسانند. میراگرهای غیرفعال از جمله تجهیزاتی هستند که به دلیل عدم نیاز به منبع انرژی خارجی از مزیت های عمده ای نظیر هزینه ی کم تولید، نصب و نگهداری پایین نسبت به سایر روش های کنترل سازه برخوردار هستند. این نوع میراگرها می توانند به سه دسته ی وابسته به حرکت^۱، وابسته به

- 2 Tuned Mass Damper
- 3 Tuned Liquid Damper
- 4 Friction Damper
- 5 Yielding Damper
- 6 Buckling Resisting Brace

1 Motion dependent

* نویسنده عهده دار مکاتبات: e.moaddab@seraj.ac.ir



اتلاف انرژی که مقدار میرایی آن ها تابعی از سرعت نسبی ایجاد شده در وسیله تبعیت می کند وابسته به سرعت نام دارند که میراگرهای ویسکوز مایع، ویسکو الاستیک جامد از این نوع می باشند [۱].

تاکنون استفاده از انواع میراگرهای ذکر شده در سازه‌ها رواج زیادی یافته است [۲، ۳]. الزامات طراحی این میراگرها در آیین نامه‌ها نشان می‌دهد سطح زمین لرزه‌ی طراحی میراگرها و آغاز اتلاف انرژی توسط این وسایل بر اساس زمین لرزه‌های شدید و یا زمین لرزه‌های طرح انتخاب شده است. روند در پیش گرفته شده برای تعیین نیرو یا تغییر مکان تسلیم میراگرهای وابسته به تغییر مکان این سوال را ایجاد می‌کند که در هنگام وقوع زمین لرزه‌های با شدت کمتر که احتمال وقوع بیشتری نسبت به زمین لرزه‌های شدید دارند عملکرد این نوع میراگرها آیا همچنان الاستیک خواهد بود؟ و اگر در زمین لرزه‌های متوسط میراگرهای وابسته به تغییر مکان بدون جذب انرژی، الاستیک باقی بمانند، افزایش سختی در سازه به دلیل عملکرد الاستیک این فیوزها چه تأثیری بر افزایش برش پایه یا نیروی ایجاد شده در سازه خواهد داشت؟

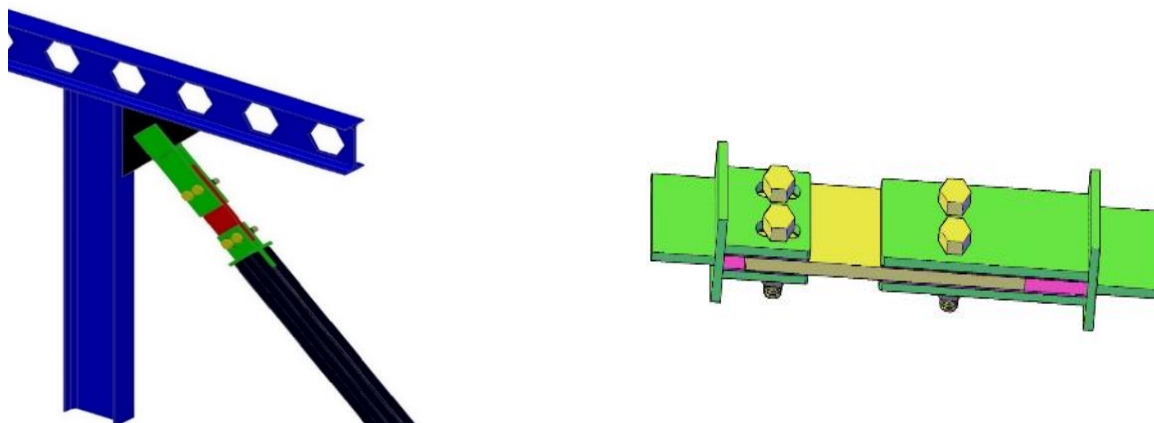
با اشاره به مطالب ذکر شده می‌توان دریافت که میراگرهای غیرفعال با هدف کنترل پاسخ سازه در برابر یک سطح ارتعاش طراحی می‌گردند، در نتیجه قادر نخواهند بود در سطوح پایین تر لرزه‌ای انرژی ورودی را اتلاف کنند. برای افزایش بازه‌ی عملکردی میراگرهای غیرفعال به صورت متناسب با نیروی ورودی زلزله، اخیراً مطالعه‌هایی بر روی میراگرهای ترکیبی که از یک دستگاه واحد برای کنترل سطوح مختلف ارتعاش انجام گرفته است. سیستم‌های کنترل ترکیبی در واقع باعث کاهش برخی محدودیت‌های موجود در هر یک از سیستم‌های کنترل معمول می‌شوند و در نتیجه این سیستم‌ها قادر به اتلاف انرژی در سطوح مختلفی از شدت‌های ارتعاش هستند و یا قادر هستند برخی ضعف‌های میراگرهای وابسته به سرعت و تغییر مکان را جبران کنند. جهت کنترل ارتعاش ناشی از زمین لرزه و باد، اسمیت و همکاران [۴] سیستمی ترکیبی از میراگر ویسکو الاستیک را پیشنهاد دادند. کیم و همکاران ترکیب میراگر ویسکو الاستیک و نوع خاصی از مهاربندهای کمانش تاب را پیشنهاد دادند. این ترکیب قادر بود انرژی ورودی را در بازه‌های تغییر مکانی کم و زمانی که سرعت نسبی در طبقه‌ها زیاد است با عملکرد میراگر وابسته به سرعت و در بازه‌های تغییر مکانی زیاد از طریق مهاربندهای کمانش تاب انجام دهد

[۵]. کریستوپولوس ایده‌ی استفاده از میراگرهای ویسکو الاستیک در ارتعاش‌های ناشی از باد و میراگر تسلیمی دیگری را برای ارتعاش‌های ناشی از زمین لرزه معرفی کرد [۶] وی در مطالعه‌ای دیگر به بررسی عملکرد این ترکیب در مطالعات عددی پرداخت. با استفاده از تغییر مشخصات مصالح در بازه‌های تغییر مکانی متفاوت میراگر ترکیبی توسط کارواسیلیس بر روی مواد الاستومر فشرده انجام شد [۷].

جهت کنترل سطوح مختلف ارتعاشات ناشی از زلزله، ایبراهیم و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۷ ترکیبی از میراگرهای تسلیمی و ویسکو الاستیک را پیشنهاد دادند. مطالعه‌های انجام شده نشان داد که تحت سطوح پایین ارتعاش، مانند ارتعاش ناشی از باد، دستگاه ترکیبی از طریق کرنش‌های فشاری و کششی ایجاد شده در مواد ویسکو الاستیک انرژی را اتلاف می‌کند. با این حال برای سطوح بالای ارتعاش مانند تحریک‌های لرزه‌ای شدید، یک منبع قابل توجهی از اتلاف انرژی از طریق تسلیم المان‌های فلزی فراهم شد. مارشال و چارنی [۹] یک میراگر ترکیبی متشکل از مواد لاستیکی با میرایی بالا، به صورت سری با مهاربند کمانش تاب در دو فاز مختلف پاسخ را با هم ترکیب کردند که مطالعه‌های آزمایشگاهی نتایج مناسبی را برای ایجاد دو فاز مختلف اتلاف انرژی نتیجه داد.

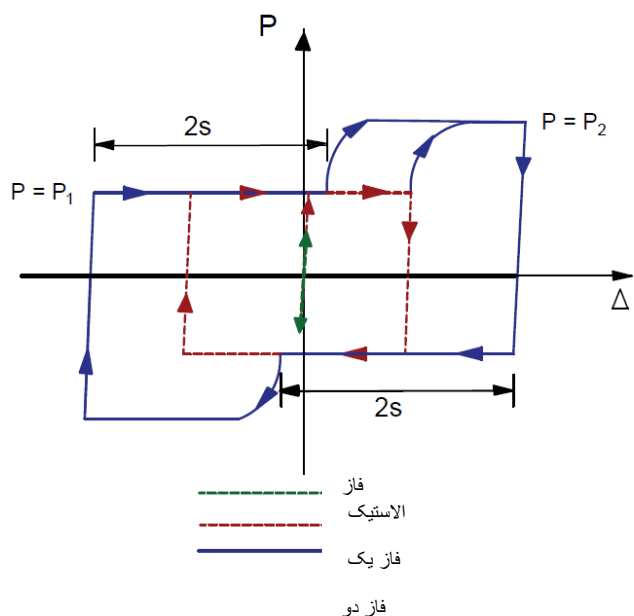
کیم و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ ترکیب میراگر ویسکوز با بادبندهای کمانش تاب را برای کنترل پاسخ سازه‌های بلند مرتبه پیشنهاد دادند. دو سیستم سازه‌های مجهز به میراگر ترکیبی و بادبندهای کمانش تاب به تنهایی مقایسه شد و نتایج نشان داد که سیستم ترکیبی در بهبود سختی جانبی و قابلیت بهره‌برداری یک ساختمان مؤثر می‌باشد. در پژوهشی دیگر لی و همکاران [۱۱] ترکیبی از میراگرهای اصطکاکی و تسلیمی را مورد آزمایش قرار دادند. با به کارگیری میراگرهای اصطکاکی، عمر خستگی در قسمت تسلیمی این میراگرها افزایش یافت. نمونه‌های ترکیب میراگرهای حلقوی تسلیمی [۱۲] ورق‌های مثلثی [۱۳] به همین منظور در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفتند.

در ترکیب میراگرهای وابسته به سرعت با میراگرهای وابسته به تغییر مکان کاهش اثر بخشی میراگرهای جاری شونده گزارش شده است [۱۴] همچنین در برخی از ترکیبات میراگرهای تسلیمی با فاصله‌ی تغییر مکانی، عدم مونتاز دقیق این میراگرها سبب شده است افزایش سختی در بازه‌ی تغییر مکان پیش بینی شده اتفاق نیفتد. در



شکل ۱. ساختار میراگر اصطکاکی ترکیبی (HFD)

Fig. 1. Overall properties of developed the hybrid friction damper



شکل ۲. منحنی رفتاری ایده آل برای یک سیستم دوسطحی

Fig. 2. Idealized force - displacement curve for the dual-level function

میراگر اصطکاکی باهم تشکیل یافته، مورد بررسی قرار گرفته است. این میراگر از دو فنر که به صورت سری با فاصله‌ی تغییر مکانی به هم ارتباط دارند و شامل دو فیوز اصلی و کمکی می‌باشند. شکل ۱ به صورت شماتیک میراگر اصطکاکی ترکیبی HFD و نحوه اتصال میراگر در سیستم مهاربندی را نشان می‌دهد. در این میراگر با استفاده از دو سری نیروی پیش‌تندیگی تقدم و تأخر عملکرد هر یک از بخش‌های میراگر تعیین می‌شود. مطابق شکل ۲ جدار سوراخ لوبیایی کوچک در فاز اول میراگر اصطکاکی پس از پیمودن مسیر لغزش در محدوده‌ی در نظر گرفته شده برای فاز اول به پیچ‌های سری دوم در فیوز اصلی

این مطالعه نوع جدیدی از میراگر ترکیبی معرفی می‌شود که علاوه بر اتلاف انرژی در زمین لرزه‌های شدید قادر است تحت لرزش‌های با شدت کمتر نیز انرژی ورودی به سازه را جذب کرده و سختی سازه را متناسب با شدت زمین لرزه اصلاح کند. میراگر ترکیبی اصطکاکی با استفاده از دو سطح نیروی پیش‌تندیگی متفاوت در یک دستگاه واحد، این قابلیت را فراهم می‌کند. ترکیب پیشنهاد شده به دلیل استفاده از یک نوع میراگر اصطکاکی در یک دستگاه واحد، رفتار قابل اطمینان‌تری نسبت به سایر ترکیب‌ها می‌تواند داشته باشد. ساخت این میراگر به دلیل معمول بودن تکنولوژی میراگرهای اصطکاکی با هزینه اندک و مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.

در این تحقیق رفتار هیستریزیس یک نوع میراگر اصطکاکی ترکیبی موسوم به (Hybrid Friction Damper) HFD به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. میراگر اصطکاکی پیشنهادی متشکل از دو سطح نیروی لغزش مختلف برای کنترل پاسخ سازه در دو سطح متفاوت لرزه‌ای اعم از متوسط و شدید معرفی شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی میراگر تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفت و منحنی‌های هیستریزیس حاصل شده به خوبی عملکرد دوسطحی میراگر را در مطالعات عددی و آزمایشگاهی به نمایش گذاشت. مقدار میرایی معادل، اتلاف انرژی و سختی مؤثر نمونه‌های با نیروی پیش‌تندیگی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین این پارامترها در مدل‌های عددی با تعداد بیشتر نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- هندسه میراگر دوسطحی

در این مطالعه میراگر ترکیبی پیشنهادی که از ترکیب سری دو

جدول ۱. نیروی پیش تنیدگی در نمونه‌های مورد آزمایش

Table 1. sliding force of hybrid damper

نام نمونه	P_{S1} (kN)	P_{S2} (kN)	P_{S2}/P_{S1}	δ_{max} (mm)
A	۱۵	۲۸	۱/۹	۵۰
B	۳۶	۱۰۴	۲/۹	۴۰
C	۶۰	۱۸۰	۳	۶۰
D	۸۷/۵	۲۳۷/۵۸	۲/۷	۶۰

برای طراحی و تعیین ابعاد اولیه از جابه جایی‌های متناظر در هر طرح بهره گرفته شد. بر اساس جدول (۳-۱) FEMA356 مقدار نسبت تغییر مکان طبقه برای ساختمان‌های مهاربندی شده در شرایط تأمین ایمنی جانبی سازه برابر با ۱٪ گذرا و در آستانه فروریزش CP معادل با ۵٪ گذرا یا ماندگار می‌باشد. بدین منظور جابه جایی متناظر با عملکرد فیوز اول برابر با ۱٪ و جابه جایی نسبی متناظر با عملکرد فیوز دوم برابر با ۴٪ در نظر گرفته شد [۱۴].

۳- آزمایش میراگرها

۳-۱- نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت بررسی عملکرد پیکربندی پیشنهاد شده، چهار نمونه آزمایشگاهی با نیروهای پیش تنیدگی متفاوت تنظیم گردید. جدول ۱ نیروی پیش تنیدگی را در هر دو فیوز اصلی و کمکی برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد.

مطابق جزئیات ارائه شده در شکل ۳ در گام‌های تغییر مکانی کمتر از ۱۵ میلی متر ابتدا صفحات مستطیلی در نظر گرفته شده برای فیوز اول درگیر می‌شوند. پس از افزایش تغییر مکان وارد شده، با برخورد جداره‌ی سوراخ‌های لوبیایی افقی با پیچ‌ها، مشارکت فیوز اصلی آغاز می‌شود. همانطوری که در بخش سوم اشاره شد سوراخ‌های لوبیایی افقی کوتاه در صفحات انتهایی برای تأمین تأخیر فاز تغییر مکانی برای فیوز دوم می‌باشد. دامنه‌ی سوراخ‌های لوبیایی در فیوز کمکی متناسب با دریافت مجاز برای زمین لرزه‌ی متوسط و برابر یک درصد ارتفاع طبقه در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقیاس ۰/۵ برای ساخت میراگرها، فاصله تغییر مکانی برابر ۳۰ میلی‌متر و با در

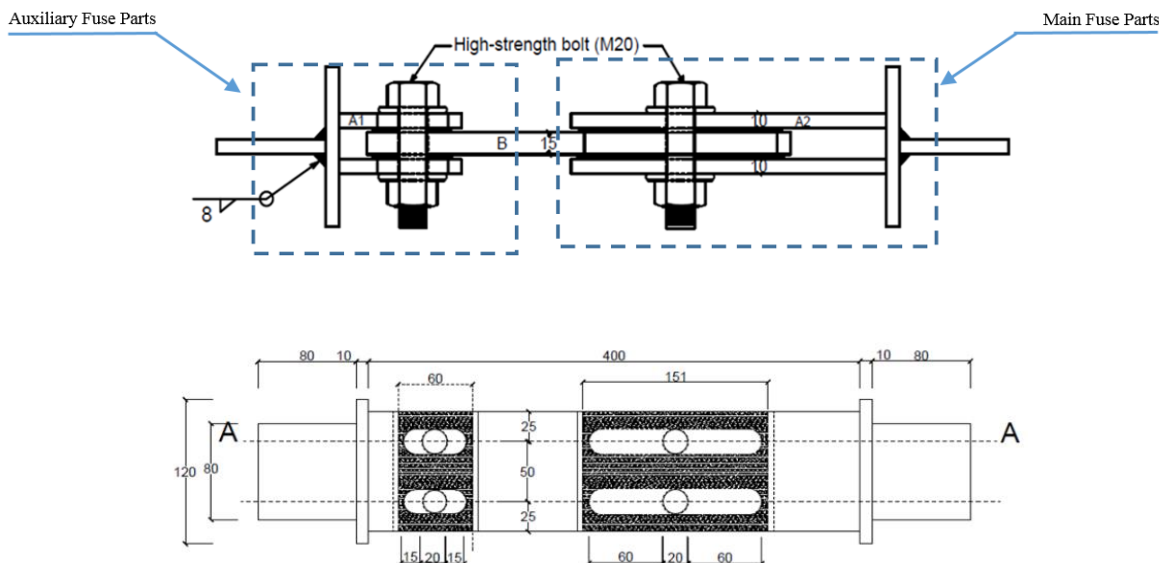
برخورد می‌کند. در این مرحله نیرو افزایش یافته و توسط انتقال از طریق پیچ‌ها به صفحه میانی، اتلاف انرژی در فاز دوم میراگر ترکیبی با حرکت صفحه میانی در محدوده سوراخ لوبیایی بزرگ آغاز می‌شود. میراگر اصطکاکی ترکیبی را می‌توان به راحتی برای بارهای لغزش مختلف با انتخاب پارامترهای هندسی مناسب و نیروی پیش تنیدگی تنظیم کرد. همه پارامترها به غیر از نیروی پیش تنیدگی را می‌توان ثابت فرض کرد و بار لغزش مورد نظر را می‌توان با تغییر مقدار N تنظیم کرد. این کار به ساخت و ساز معمولی و اقتصادی تر از میراگرها منجر می‌شود بدان معنی که همه میراگرها یکسان تولید می‌شوند، سپس برای طراحی نیروی پیش تنیدگی لازم برای ایجاد نیروی اصطکاک (نیروی لغزش) مورد نیاز تنظیم می‌شوند.

نیروی لغزش میراگرها را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$P_s = 4\mu N \quad (1)$$

در این رابطه μ ضریب اصطکاک و N نیروی پیش تنیدگی می‌باشد.

شکل ۲ منحنی هیستریزس ایده آل میراگر ترکیبی را تحت بارگذاری رفت و برگشتی نشان می‌دهد. در این نمودار در هر دو فاز اتلاف انرژی، از سیستم اتلاف انرژی وابسته به تغییر مکان استفاده شده است. زمانی که نیروی p افزایش می‌یابد و به مقدار نیروی لغزش در فیوز کمکی می‌رسد، حرکت لغزشی ما بین صفحات در فاز یک آغاز می‌شود. در محدوده‌ی تغییر مکانی فاز اول حرکت لغزشی بدون تغییر در مقدار بار همچنان ادامه خواهد داشت. از سوی دیگر اگر جهت حرکت معکوس شود، لغزش به همان اندازه‌ی بار در جهت مخالف رخ می‌دهد. چنین رفتاری بارها در همان محدوده‌ی تکرار که در آن جابه جایی انجام گرفته، روی می‌دهد و حلقه‌های هیستریزس ناشی از عملکرد میراگر اصطکاکی که تقریباً مستطیل شکل است ایجاد می‌شود. برای کنترل سازه در زلزله کم تا متوسط، این گونه برنامه ریزی شده است که انرژی تنها توسط فاز اول میراگر اصطکاکی تلف شود. بر این اساس با توجه به نیاز کم سازه به سختی در زمین لرزه‌ی متوسط، در فاز یک نیروی لغزش مورد نیاز در میراگر اصطکاکی تأمین می‌شود [۱۳]. تحت یک زمین لرزه قوی، سیستم میرایی ممکن است جابه‌جایی زیادی را تجربه کند. در این وضعیت، رفتار ترکیبی از طریق فعال سازی میراگرهای فاز یک (فیوز کمکی) و دو (فیوز اصلی) در طی چند مرحله رخ می‌دهد.



شکل ۳. جزئیات میراگر HFD
Fig. 3. Detail of experimented HFD

HFD در L.S در جابه‌جایی معادل دریافت‌های مجاز سطح عملکردی HFD براساس الزامات دستگاه‌های وابسته به HFD انجام شد. پروتکل تست می‌باشد. بر این اساس آزمایش [۱۵] ASCE/SEI41-06 جابه‌جایی شبه استاتیکی رفت و برگشتی با بیست چرخه‌ی جابه‌جایی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و رفتار هیستریزیس میراگر اصطکاکی ترکیبی تحت دو نیروی پیش‌تندگی متفاوت برای فازهای مختلف HFD لغزشی با سرعت ۱/۰ هرتز مورد مطالعه قرار گرفته است. بازه‌های تغییر مکان اعمال شده در آزمون چرخه‌ای، به نحوی انتخاب شدند تا هر دو فیوز کمکی و اصلی در نیروی کل ثبت شده دخالت داشته باشند. بنابراین همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است، مقادیر تغییر مکان‌های اعمالی بزرگتر از ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، برای مطالعه‌های مطابق با جدول ۱ بر δ_{max} آزمایشگاهی ۲۰ چرخه با دامنه‌ی ثابت اعمال شد. D تا A نمونه‌های

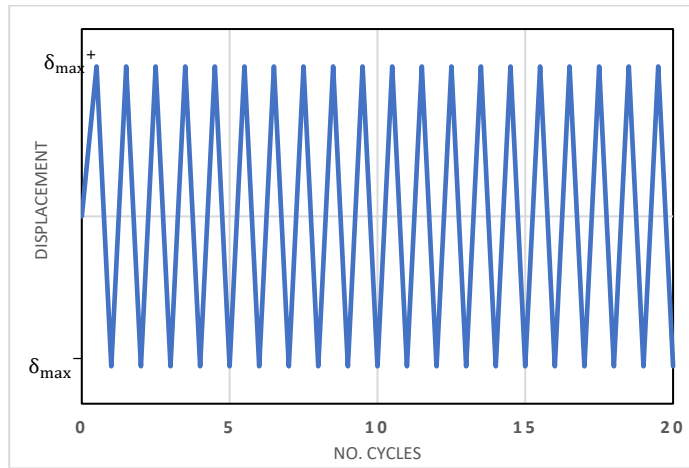
۴- برپایی آزمایش

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نمونه HFD در دستگاه یونیورسال که ظرفیتی حدود ± 300 کیلو نیوتن، بازه‌ی جابه‌جایی ۵۰۰ میلی‌متر و سرعت حداکثر برابر ۱۰۰ میلی‌متر بر ثانیه دارد، بین دو فک دستگاه در جهت عمودی قرار گرفت. دستگاه

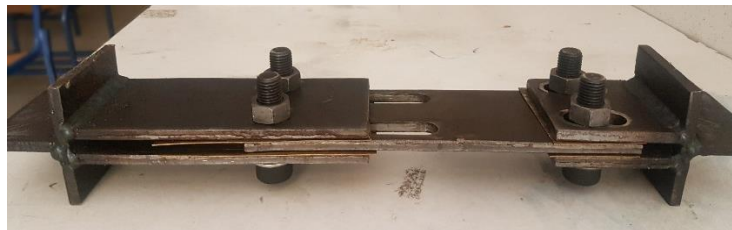
نظر گرفتن قطر پیچ‌ها برابر ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است. فیوز اصلی متشکل از یک صفحه افقی با سوراخ‌های لوبیایی بزرگی است که آزادی حرکتی مناسبی را برای زمین لرزه‌های شدید در سازه فراهم می‌کند. جهت تأمین اصطکاک بین صفحات فولادی از صفحات برنجی نوع (UNS-۲۶۰) Half cartridge با ضخامت یک میلی‌متر استفاده شد، همچنین برای اعمال نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها در فازهای لغزشی مختلف از دستگاه اندازه‌گیری ترکمتر استفاده شده است که رابطه‌ی بین لنگر ایجاد شده توسط ترکمتر و نیروی اصطکاک حاصله اندازه‌گیری شده است. پیچ‌های استفاده شده در سوراخ‌های لوبیایی افقی به عنوان المان‌های رابط عمل می‌کنند. این المان‌ها باید قادر به انتقال نیرو بین دو فیوز اصطکاکی متفاوت باشند به نحوی که اثر تسلیم برشی در آن‌ها ایجاد نشود. این پیچ‌ها از نوع M۱۲.۹ و با قطر ۲۰ میلی‌متر انتخاب شده است. جدول ۱ مقادیر نیروی پیش‌تندگی مورد نظر را در دو فاز مختلف برای ۴ نمونه‌ی A تا D نشان می‌دهد. نمونه‌ها با بازه‌ی نیروهای پیش‌تندگی مختلف انتخاب شده اند تا بتوان تأثیر شدت این نیروها را در مقادیر میرایی و انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها را مقایسه نمود.

۲-۳ پروتکل بارگذاری

آزمون‌های محوری برای تعیین منحنی نیرو-جابه‌جایی محوری



شکل ۴. پروتکل بارگذاری با دامنه ی ثابت در پژوهش های آزمایشگاهی
Fig. 4. Loading protocol applied in the tests with constant amplitudes



(الف)



(ب)

شکل ۵. جزییات آزمایشگاهی (الف) نمونه ی آزمایشگاهی HFD (ب) نحوه ی آزمایش در دستگاه یونیورسال
Fig. 5. Details of experiment sample (a) Experimented sample (b) set up of hybrid friction damper



(ب)



(الف)

شکل ۶. تغییر مکان ایجاد شده بین صفحات در دو دامنه ی (الف) ۳۰ میلی‌متر کششی (ب) ۳۰ میلی‌متر فشاری
Fig. 6. The induced displacement between plates (a) 30 mm in tension (b) 30 mm in compression

بیش از دامنه تغییر مکان گپ، پیچ‌های فیوز کمکی به کناره‌ی سوراخ های لویبایی برخورد می‌کند و با این برخورد تغییر مکان به فیوز اصلی با نیروی پیش‌تنیدگی بالاتر منتقل می‌شود.

برای چهار نمونه‌ی آزمایشگاهی با نیروی لغزش متفاوت در فیوزها، نتایج نیرو-تغییر مکان ثبت شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

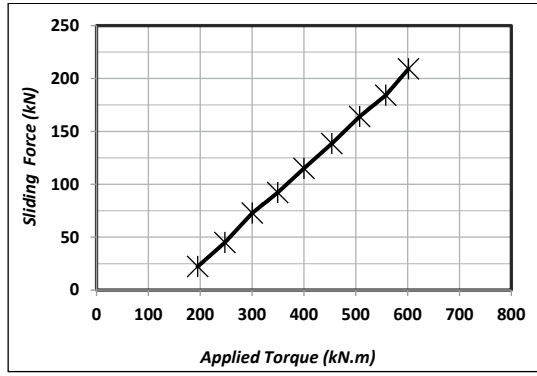
نیروی پیش‌تنیدگی اولیه برای میراگر دوسطحی HFD-A به مقادیر ۱۵ و ۲۸ کیلونیوتن به ترتیب برای فیوز کمکی و اصلی تنظیم شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد این نیرو از طریق پیش‌تنیدگی دو ردیف پیچ در فازهای مختلف لغزشی توسط ترکمتر انجام پذیرفت. جهت کالیبراسیون دقیق ترکمتر و رسیدن به نیروی لغزش دلخواه، ابتدا در ترکهای مختلفی میراگر اصطکاکی به صورت غیر ترکیبی در دستگاه یونیورسال مورد آزمایش چرخه‌ای قرار گرفت. هر بار این آزمایش با تغییر مقدار ترک وارد شده تکرار شد و نتایج به صورت نقطه‌ای مطابق شکل ۷ به دست آمد. از به هم متصل کردن این نقاط یک نمودار خطی مطابق شکل ۷-ب به دست می‌آید که ضریب کالیبراسیون ترکمتر و ضریب اصطکاک صفحات برنجی قابل محاسبه است. با فرض مقدار مناسب ضریب اصطکاک برابر 0.3 مقدار ضریب کالیبراسیون ترکمتر مورد استفاده قابل محاسبه است.

تست همچنین مجهز به لودسل ۹۰۰ KW و مبدل خطی متغیر جابه‌جایی (LVDT) می‌باشد که رابطه نیرو-جابه‌جایی را برای هر مرحله از هر آزمون با استفاده از سیستم جمع‌آوری داده‌ها ثبت می‌کند. این دستگاه مستقر در آزمایشگاه مقاومت مصالح مؤسسه‌ی آموزش عالی سراج می‌باشد و تمام آزمایش‌ها در این مؤسسه انجام شده است.

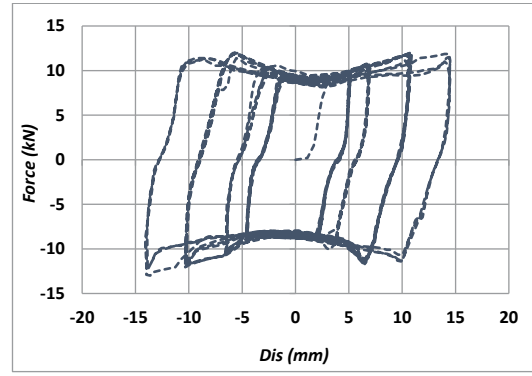
جک یونیورسال با بارگذاری چرخه‌ای کنترل‌شونده توسط تغییر مکان با دامنه‌ی ثابت برای هر کدام از نمونه‌ها، مطابق جدول ۱، تغییر مکان‌های محوری را در راستای عمودی اعمال می‌کند و نیروی تحمل‌شده توسط میراگر با استفاده از لود سل متصل به فک دستگاه اندازه‌گیری می‌شود.

۵- نتایج و مشاهدات تجربی

نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه‌ی ثابت قرار گرفتند. در چهار مرحله نیروهای پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها در دو فیوز اصلی و کمکی تغییر داه شدند. شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی لغزش ایجاد شده در دو حالت کششی و فشاری می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش دامنه‌ی تغییر مکان اعمالی به

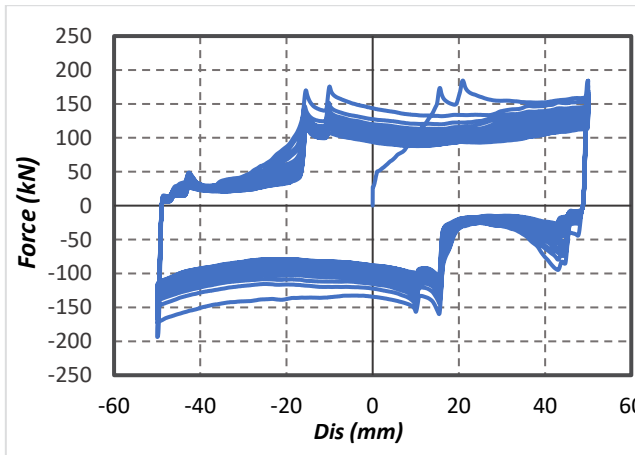


(ب)

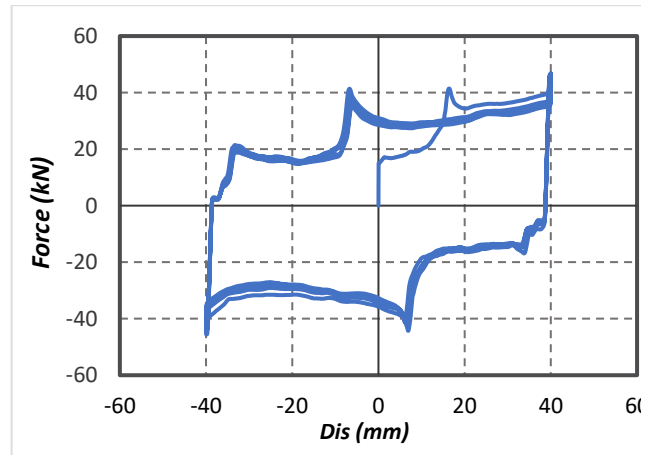


(الف)

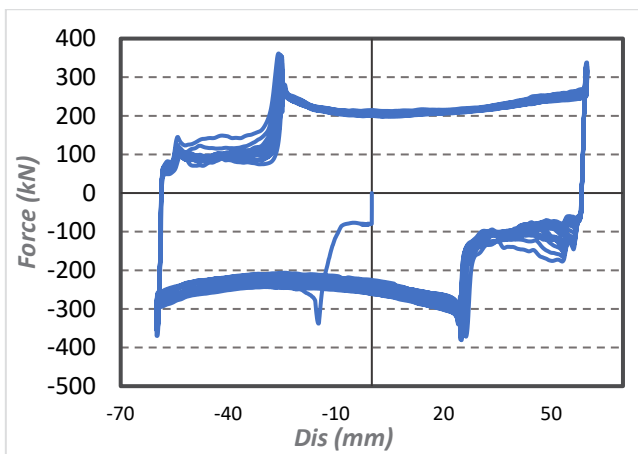
شکل ۷. (الف) منحنی نیرو-تغییر مکان بخش اصطکاکی (ب) رابطه نیروی پیش تنیدگی و ترک اعمالی
 Fig. 7. (a) Force –displacement of friction part (b) relation between applied torque and slippage force



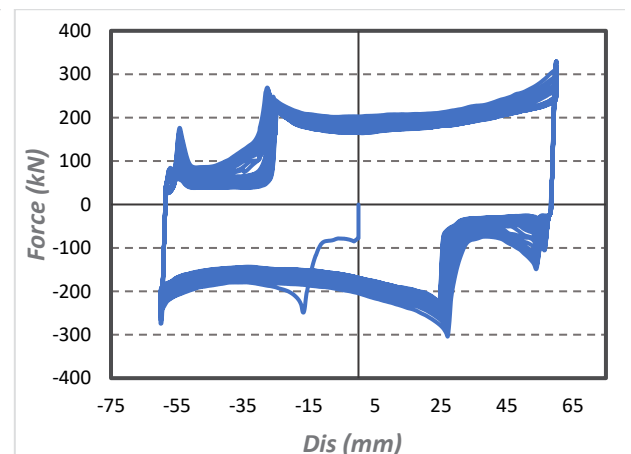
(B)



(A)



(D)



(C)

شکل ۸. تغییر نمودار نیرو - تغییر مکان نمونه های آزمایشگاهی (A,B,C,D) میراگر اصطکاکی HFD

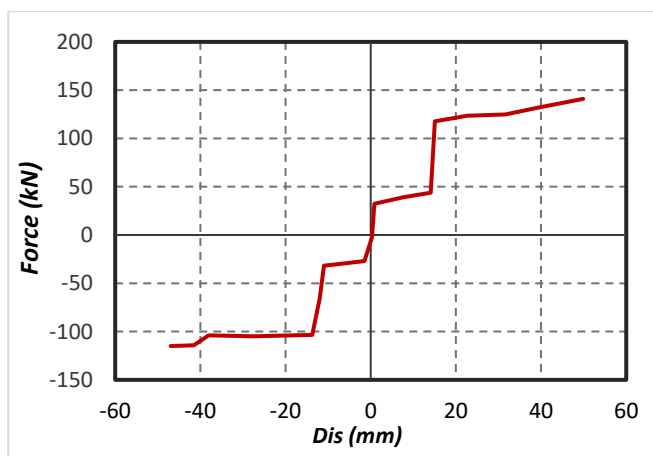
Fig. 8. Detail of tested hybrid friction damper

سطح نیرو در منحنی‌های به دست آمده شده است. مقدار کاهش در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد اما با اضافه شدن فیوز اصلی به فیوز کمکی در تغییر مکان‌های بالاتر، افت نیرو در چرخه‌های متوالی کاهش می‌یابد. دلیل اصلی اصلاح افت سطح نیروی پیش‌تندگی در تغییر مکان‌های بزرگتر از تغییر مکان گپ، اضافه شدن قسمت دوم میراگر است که تحت بار چرخه‌ای قرار نگرفته و به عنوان منبع اتلاف انرژی جدیدی است که از ظرفیت آن استفاده نشده است.

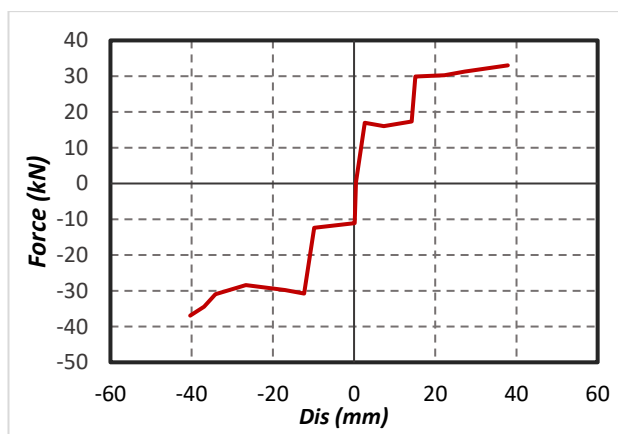
برای هر نمودار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان، منحنی چند خطی [۱۴] استخراج شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. منحنی‌های چند خطی به منظور نشان دادن دو سطح متفاوت نیروهای لغزش در میراگر ترکیبی ارائه شده اند. مقادیر نیرو در دو سطح مختلف بر اساس متوسط نیروهای لغزش در تغییر مکان‌های متناظر برآورد

تحت بارگذاری وابسته به تغییر مکان با دامنه ثابت ۴۰ میلی‌متر، نمودار نیرو-تغییر مکان برای میراگر دوسطحی اصطکاکی شکل ۸ به دست آمد. در این نمودار اتلاف انرژی تا مقدار تغییر مکان ۱۵ میلی‌متر توسط فیوز کمکی میراگر HFD انجام می‌شود و در ادامه پاسخ فاز دوم تا تغییر مکان‌های بیشتر ادامه می‌یابد. در آزمایش‌های بعدی برای دست یابی به اتلاف انرژی بیشتر توسط میراگر دوسطحی HFD، مقدار نیروی پیش‌تندگی در هر دو فاز کمکی و اصلی افزایش یافت. شکل ۸ نمودار چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان را برای نمونه‌های آزمایشی A تا D نشان می‌دهد. بازه‌ی تغییر مکان ایجاد شده بر نمونه‌ها حداقل دو برابر مقدار تغییر مکان گپ انتخاب شد تا تأثیر اتلاف انرژی توسط فاز دوم در نمونه‌ها مشاهده شود. تغییر مکان‌های حداکثر وارده بر نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

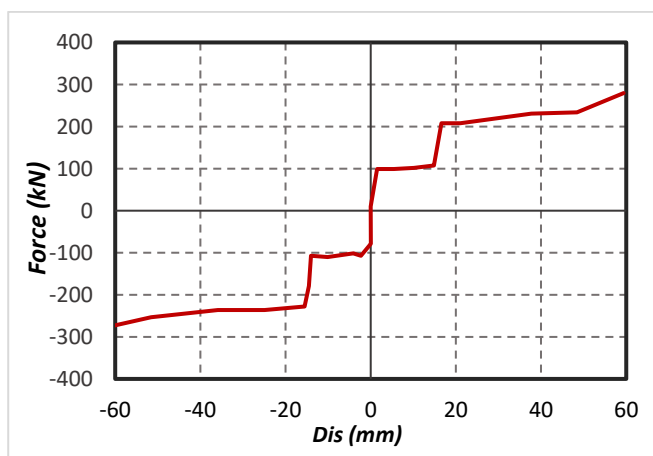
در چرخه‌های بالاتر افت نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها باعث کاهش



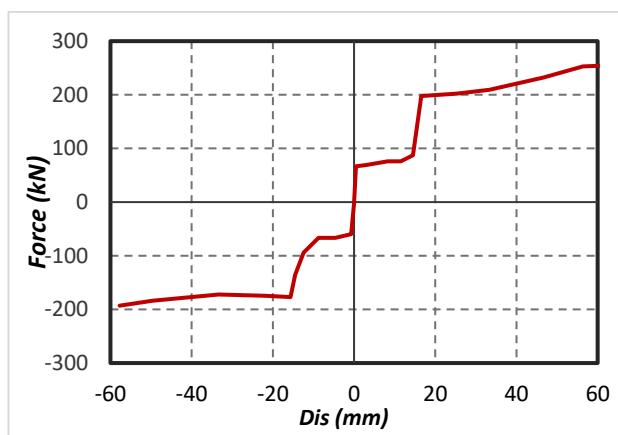
(B)



(A)



(D)



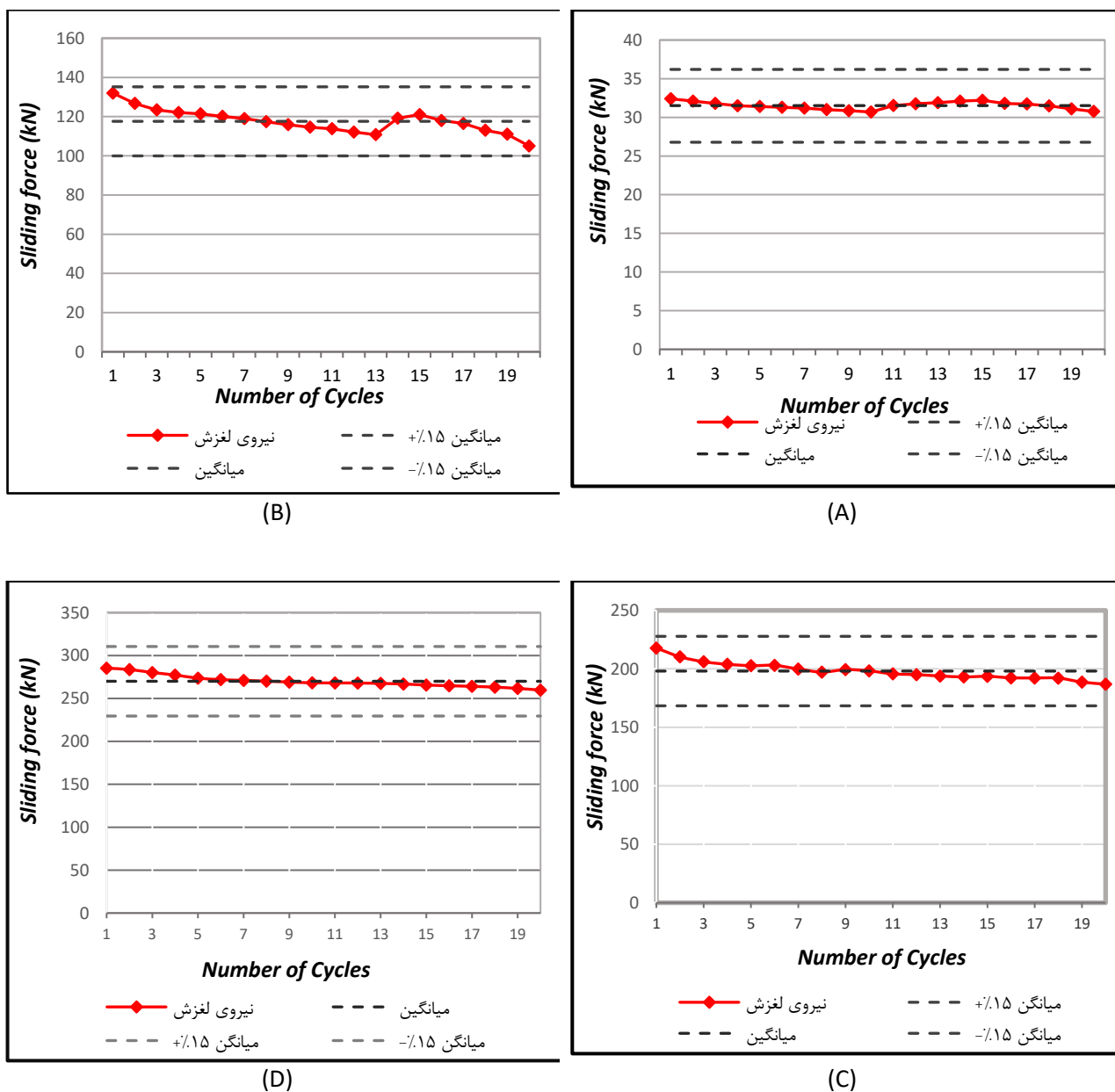
(C)

شکل ۹. منحنی چند خطی نمودار نیرو-تغییر مکان
Fig. 9. Multilinear curves of experimented samples

جدول ۲. خلاصه نتایج به دست آمده از مطالعه های آزمایشگاهی بر اساس منحنی های چندخطی

Table 2. Results of experimental study of samples based on multi linear force –displacement curves

		A	B	C	D
فیوز کمکی	نیروی لغزش P_{S1} ،	۱۸	۴۳	۷۲	۱۰۵
فیوز اصلی	نیروی لغزش P_{S2} ،	۳۴	۱۲۵	۲۱۷	۲۸۵



شکل ۱۰. انحراف از میانگین بار لغزش فیوز اصلی (P_{S2}) برای نمونه های آزمایشگاهی A تا D

Fig. 10. Slippage force standard deviation for the main fuse

شده است. مقادیر نیروهای گزارش شده با اندکی تفاوت نسبت به مقادیر پیشینه ی نیروهای ثبت شده در نتایج آزمایشگاهی به دست

شده است. بر اساس این منحنی ها پارامترهای تأثیرگذار از جمله نیروی لغزش برای هر دو قسمت فشاری و کششی در جدول ۲ ارائه

در مقایسه با آزمون‌های دیگر، میزان سختی مؤثر متناسب با نیروی پیش‌تنیدگی تغییرات فاحشی پیدا می‌کند. میراگر مورد آزمون A و D به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار سختی مؤثر را دارند.

۳-۶- اتلاف انرژی و میرایی لزج معادل

انرژی اتلافی در هر چرخه، W_D ، باید به عنوان محدوده‌ی محصور شده توسط یک چرخه‌ی کامل پاسخ نیرو-جاب‌جایی در نظر گرفته شود. مطابق آیین‌نامه ASCE/SEI41-06 مساحت داخل چرخه هیستریزیس (W_D) یک دستگاه اتلاف انرژی به میزانی بیش از $\pm 15\%$ نسبت به میانگین مساحت زیر منحنی چرخه‌ی محاسبه شده بین کلیه چرخه‌های آن آزمایش نباید تفاوت داشته باشد که با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده حداکثر انحراف از میانگین، مربوط به چرخه‌ی اول از آزمون B و برابر با 10% به دست آمد.

در شکل ۱۰ نمودار اتلاف انرژی تجمعی در مقابل چرخه‌ی بارگذاری برای آزمون‌های A تا D ارائه شده است. مشهود است با افزایش نیروی لغزش، شیب نمودار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. از آنجا که دستگاه یونیورسال قابلیت ثبت بارگذاری فزاینده ندارد، روند افزایش اتلاف انرژی تجمعی به صورت صعودی تقریباً یکنواخت به دست آمده است.

شاخص میرایی ویسکوز معادل توسط آیین‌نامه FEMA356 [۱۶] برای تعیین میرایی لزج معادل برای اعضای سازه‌ای تعریف شده است. این ضریب از طریق معادله‌ی زیر بیان می‌شود.

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{k_{\text{eff}}} \times \frac{W_D}{\Delta_{\text{avr}}^2} \quad (3)$$

Δ_{avr} برابر با میانگین مقادیر مطلق جابه‌جایی $+\Delta$ و $-\Delta$ است. k_{eff} سختی مؤثر و W_D مقدار انرژی جذب شده است. لازم به ذکر است که این شاخص میرایی معادل ایده‌آل شده و کاملاً تقریبی برای سیستم‌های غیر خطی است [۱۷].

با محاسبه این شاخص نسبت میرایی برای تمام چرخه‌ها، یک شاخص میرایی میانگین می‌تواند برای هر یک از نمونه‌های A تا D محاسبه شود. این مقدار به طور تقریبی در حدود $0/55$ برای همه نمونه‌ها محاسبه شده است (شکل ۱۱).

آمده‌اند که علت اصلی تفاوت به وجود آمده افت سطح نیروی لغزش در چرخه‌های متوالی می‌باشد.

۶- ویژگی‌های نیرو - جابه‌جایی

۶-۱- نیروی لغزش

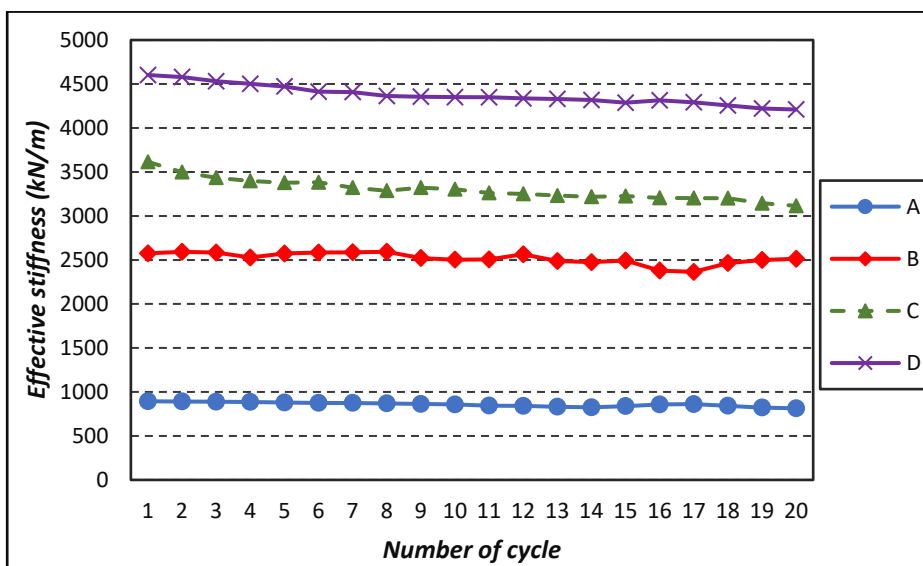
برای بررسی افت نیروهای اصطکاکی در طول چرخه‌های بارگذاری، بارهای لغزش برای هر چرخه به عنوان بیشینه‌ی نیرو در هر مرحله از جابه‌جایی (فاز یک و دو) محاسبه می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات بار لغزش در چرخه‌های متوالی بارگذاری برای آزمون‌های A تا D نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بار لغزش در طول چرخه‌ها کاهش می‌یابد؛ با این حال این کاهش در محدوده‌ی قابل قبول مطابق با الزامات ASCE/SEI41-06 [۱۵] است. این مشخصات نیازمند آن است که در هر آزمون، نیروی لغزش به دست آمده در هر چرخه‌ی کامل بارگذاری، بیش از 15% از میانگین بار لغزش محاسبه شده برای تمامی چرخه‌های آن آزمون اختلاف نداشته باشد. بر اساس شکل ۸ بیشترین مقدار انحراف از معیار بار لغزش مربوط به چرخه اول از آزمون B و برابر با 11% به دست آمد.

۶-۲- سختی مؤثر

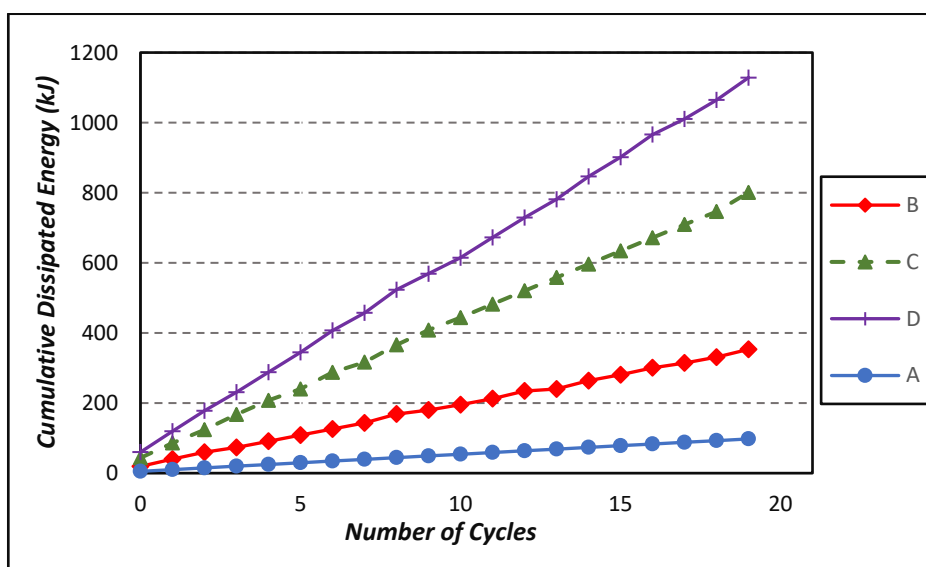
برای موارد عملی ترجیح بر این است تا مشخصات میراگرها با میرایی ویسکوز معادل بیان شود. بر این اساس، برای یک سیستم یک درجه آزاد سختی مؤثر به شکل زیر بیان می‌شود [۱۶].

$$K_{\text{eff}} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (2)$$

نیروهای $+F$ و $-F$ به ترتیب در حداکثر جابه‌جایی $+\Delta$ و $-\Delta$ به دست می‌آیند. مشابه نیروی لغزش، ASCE/SEI41-06 [۱۵] الزام می‌دارد که در هر آزمون، سختی مؤثر یک دستگاه اتلاف انرژی در هر چرخه به میرایی بیش از 15% نسبت به سختی میانگین محاسبه شده بین کلیه چرخه‌های آن آزمایش تفاوت ننماید. در میزان تغییرات سختی مؤثر در چرخه‌های متوالی برای هر آزمون و در قیاس با آزمون‌های نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات سختی در هر آزمون در محدوده‌ی آیین‌نامه‌ی فوق‌الذکر قرار دارد، اما



شکل ۱۱. مقایسه میزان سختی مؤثر در نمونه های آزمایشگاهی
 Fig. 11. Calculated Effective stiffness for experimental samples

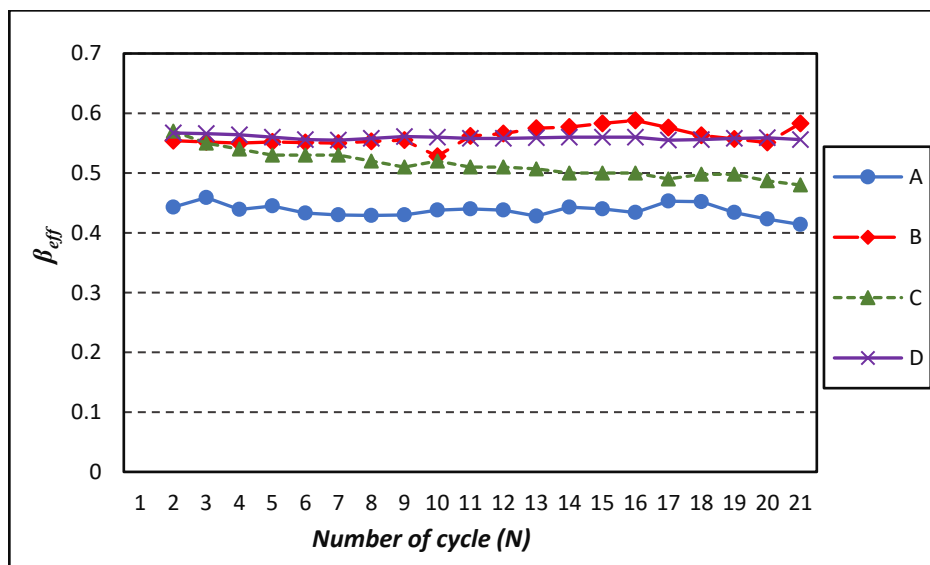


شکل ۱۲. اتلاف انرژی تجمعی در مقابل چرخه ی تجمعی
 Fig. 12. Cumulative Dissipated Energy for tested samples of hybrid friction damper

جذب انرژی اضافی از طریق منبع دیگری مانند پیچ‌های انتقال نیرو (که انتظار می رود الاستیک و صلب باقی بمانند) انجام شود که بایستی اثرات آن در مدل سازی اعمال شود. با توجه به مشاهدات انجام یافته هیچ تغییر شکل ماندگار مشهودی در پیچ‌های نگهدارنده مشاهده نشد، بنابراین المان‌های انتقال نیرو به صورت صلب و با

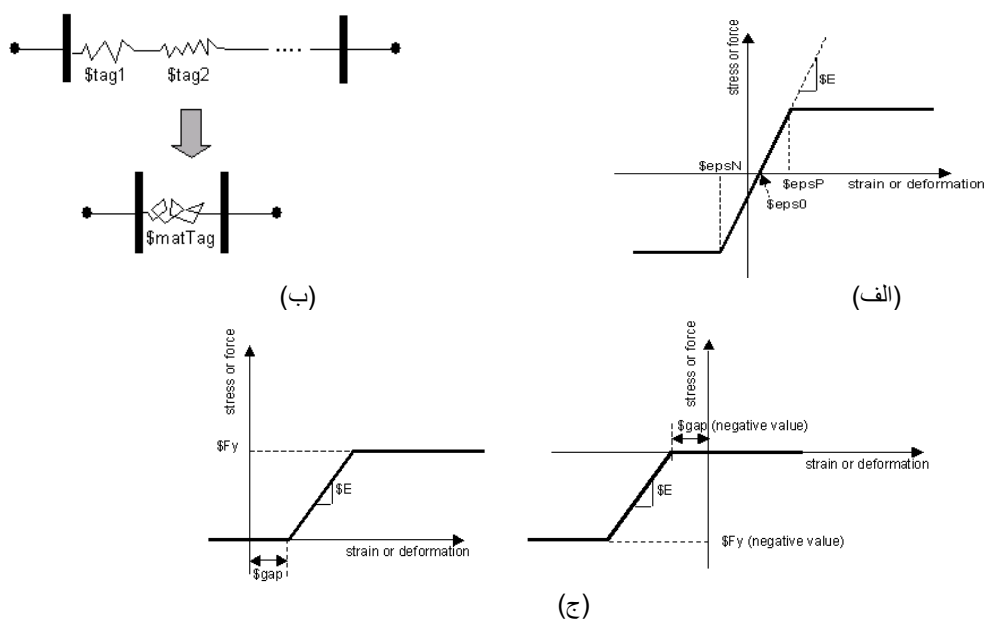
۷ - مدل سازی عددی

جهت بیان عددی رفتار چرخه ای میراگر اصطکاکی ترکیبی، تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم افزار Open Sees انجام شد [۱۸]. رفتار هر بخش از میراگر با استفاده از المان لینک به صورت ترکیبی و رفتار الاستوپلاستیک کامل می‌تواند مدل سازی شود. ممکن است



شکل ۱۳. مقایسه میرایی ویسکوز معادل در نمونه های آزمایشگاهی

Fig. 13. Equivalent viscous damping for tested samples of hybrid friction damper



شکل ۱۴. المان های مورد استفاده در مدل عددی میراگر ترکیبی [۱۸] (الف) مصالح با مشخصات پلاستیک کامل (ب) ترکیب مصالح سری و (ج) مصالح با مشخصات Gap-Hook

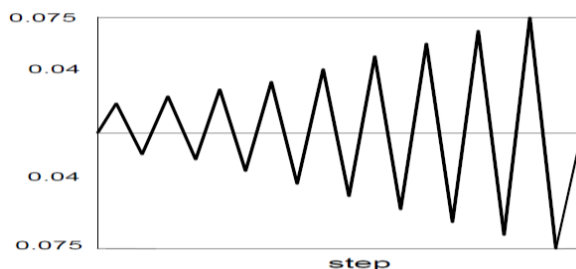
Fig. 14. Used element for modelling the hybrid damper (a) perfectly plastic material (b) series combination of materials (c) Gap-Hook material properties

شده است. رفتار نیرو جابه جایی المان، یک نمودار دو خطی است که با سه پارامتر سختی اولیه، سختی پس از جاری شدن (با تعریف نسبت سختی پس از جاری شدن به سختی اولیه) و بار لغزشی گردد. این پارامترها باید به گونه ای تنظیم گردند که شکل تعیین می های هیستریزس میراگر اصطکاکی را ایجاد کنند. مستطیلی حلقه

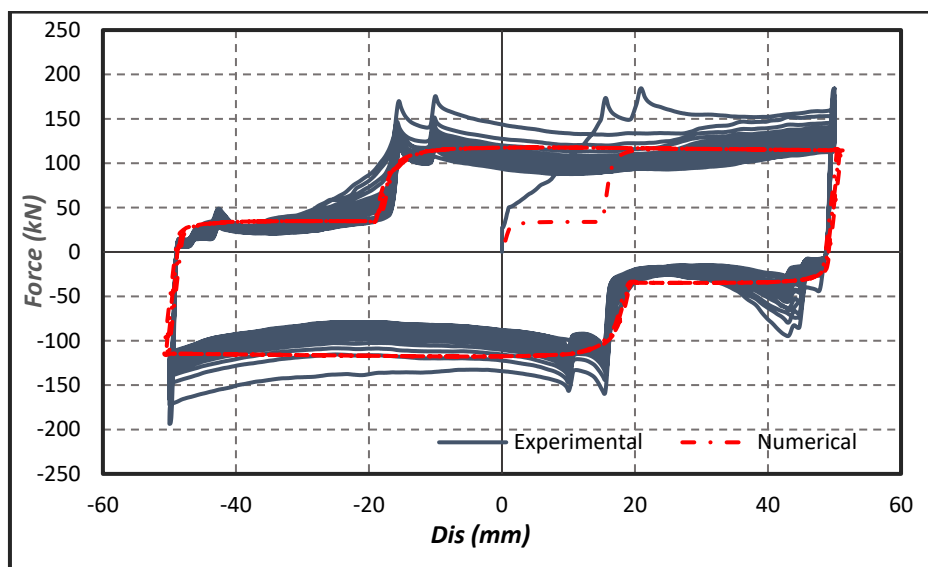
خاصیت مصالح الاستیک در نظر گرفته می شود.

آل میراگر شکل ۱۴ المان های مورد استفاده در مدل عددی ایده ترکیبی را نشان می دهد [۱۸]. هر قسمت از میراگر هیبریدی با المان مدل سازی (EPP) به طول صفر^۱ با مشخصات مصالح پلاستیک کامل

1 Zero length element



شکل ۱۵. پروتکل بارگذاری اعمال شده در مدل های عددی
 Fig. 15. The Loading protocols used in numerical study



شکل ۱۶. مطابقت نتایج آزمایشگاهی و عددی
 Fig. 16. verification of numerical model

فزاینده تغییر مکان‌ها در مطالعه های عددی با دلیل نشان داده اثرات فیوز اول به تنهایی انتخاب شده است.

صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی با مدل ترکیبی توضیح داده شده برای نمونه ی B در نرم افزار Open sees انجام شد. سختی اولیه از شیب مماسی در شاخه ی بار برداری برابر 10000 N/m و 20000 N/m به ترتیب برای فیوز کمکی و اصلی در نظر گرفته شد.

شکل ۱۶ نتایج نیرو-تغییر مکان به دست آمده از مدل ترکیبی را در نرم افزار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نمونه ی B نشان می‌دهد. منحنی چرخه‌ای پله‌ای به دست آمده حاکی از این مطلب است که ترکیب المان های انتخاب شده در شکل ۱۱ می‌تواند به خوبی رفتار دوسطحی میراگر ترکیبی اصطکاکی را مدل سازی کرده باشد. مقایسه

برای در نظر گرفتن عملکرد تأخیر تغییر مکانی Gap-Hook المان به صورت فشاری و کششی در دو جهت بارگذاری به کار رفته است. طول این المان ها به اندازه ی ۳۰ میلی متر در هر دو جهت فشاری باشند. المان های موردهای لوبیایی می‌ی سوراخ و کششی مدل کننده استفاده با استفاده از ترکیب سری که در شکل ۱۴ (ب) نشان داده شده است ترکیب شده‌اند. نیروهای لغزش متفاوت فیوزهای اصلی و متفاوت برای دو مصالح با PP کمکی با در نظر گرفتن نیروی تسلیم ایجاد شده است. EPP مشخصات

در بررسی پارامتری از بارگذاری با الگوی متفاوتی نسبت به مطالعه های آزمایشگاهی استفاده شده است. شکل ۱۵ دامنه ی تغییر شکل های اعمالی را بر مدل های عددی نشان می‌دهد. دامنه ی

جدول ۳. مشخصات مدل های میراگر اصطکاکی ترکیبی

Table 3. Properties of Numerical models of hybrid damper

مدل	P_{S1} (kN)	P_{S2} (kN)	δ_{gap} (mm)	δ_{max}^+ (mm)	δ_{max}^- (mm)	P_{S1}/P_{S2}	P_{S2}/P_{S1}
a	۹۳	۱۷۲	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۵۴	۱/۸۵
b	۷۴	۱۶۵	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۴۵	۲/۲۳
c	۷۰	۲۰۰	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۳۵	۲/۸۶
d	۵۵	۲۳۰	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۴	۴/۱۸
e	۴۵	۲۶۸	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۱۷	۵/۶
f	۳۵	۲۹۷	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۱۲	۸/۵
g	۹۳	۳۴۵	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۷	۳/۷
h	۷۰	۲۷۰	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۶	۳/۸۶
i	۵۰	۱۸۵	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۴۳	۳/۷
j	۳۵	۱۴۳	۱۵	+۷۵	-۷۵	۰/۲۴	۴/۱

معادل ایجاد شود.

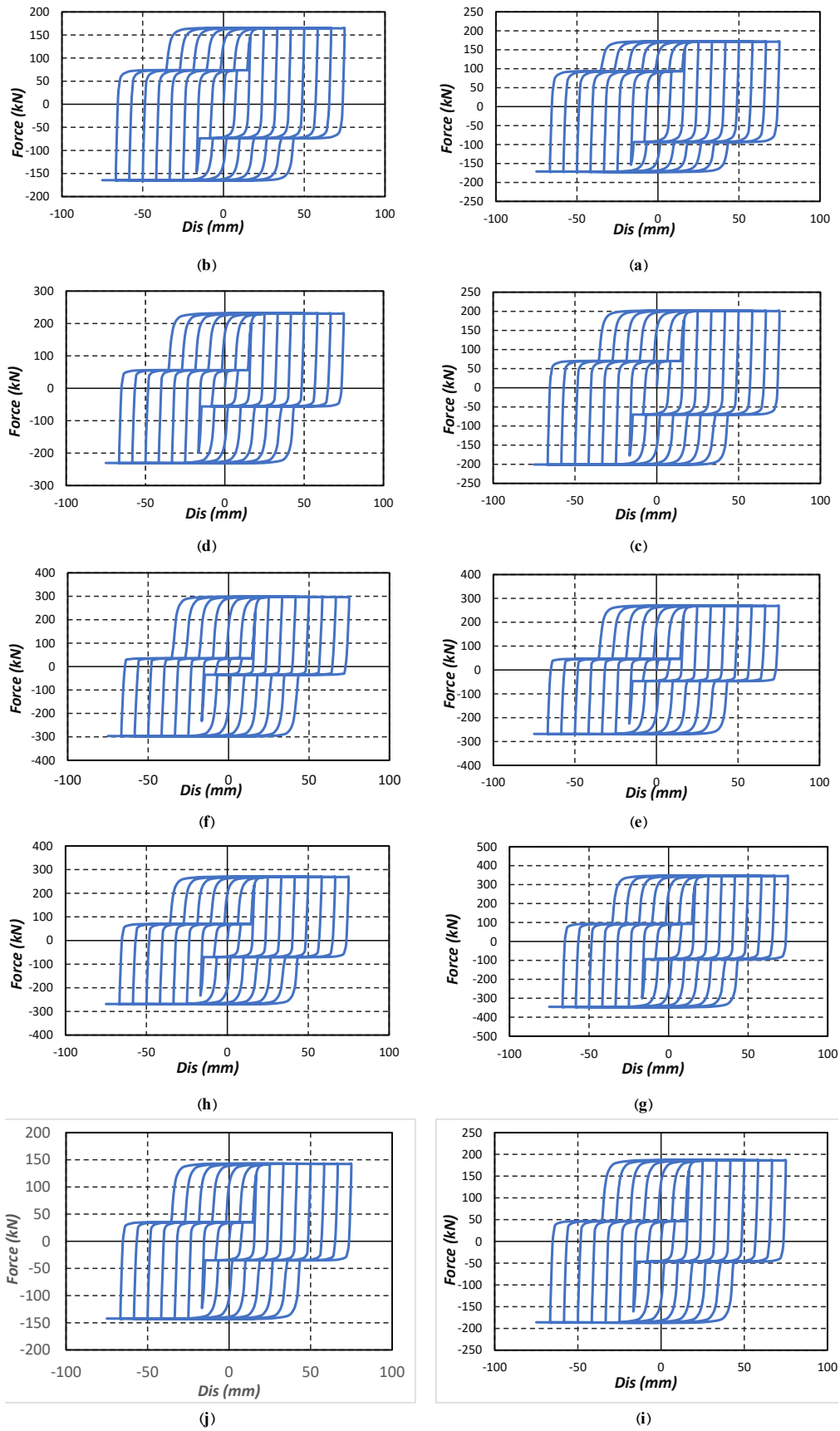
شکل ۱۷ نتایج به دست آمده از مدل سازی های عددی با بارهای لغزش متفاوت برای مدل های a-i را تحت بارگذاری چرخه‌ای با دامنه ی فرآینده را ارائه می‌کند. در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ مقادیر اتلاف انرژی تجمعی، سختی مؤثر و میرایی ویسکوز معادل برای مدل‌های عددی بالا مقایسه شده است. از آنجا که روند افزایش دامنه‌ی تغییر مکانی برای همه آزمون‌ها یکسان می‌باشد، میزان اتلاف انرژی تجمعی بسته به نیروی لغزش در هر آزمون تغییر کرده است. در چرخه‌های اول به دلیل کم بودن دامنه‌ی تغییر مکان، اتلاف انرژی در همه مدل‌ها نزدیک هم می‌باشد. ولی با افزایش دامنه در چرخه‌های بالاتر، مقدار اتلاف انرژی (نرخ افزایش اتلاف انرژی) با افزایش نیروی لغزش بیشتر می‌شود. مدل (g) با نیروی لغزش بیشتر، بیشینه ی اتلاف انرژی را برای چرخه‌های متوالی دارد (شکل ۱۸).

روند تغییرات سختی مؤثر در تمامی مدل‌ها نشان می‌دهد که در ابتدای ورود به فاز دوم به دلیل افزایش نیروی لغزش و تغییرات ناچیز دامنه‌ی جابه جایی، میزان سختی افزایش پیدا می‌کند اما در چرخه‌های بعدی با افزایش دامنه‌ی جابه جایی، کاهش در میزان سختی را در پی خواهد داشت. این تغییرات بیانگر این است که سختی القایی میراگر به سازه با شروع لغزش و با افزایش دامنه‌ی

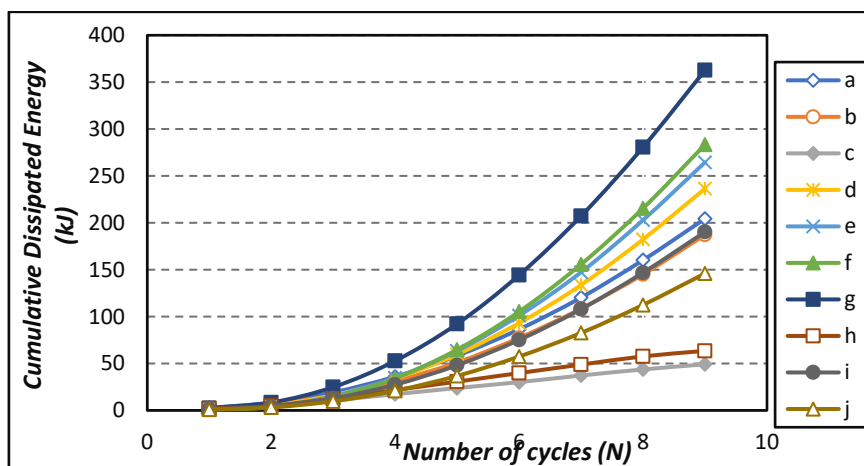
نتایج به دست آمده برای مدل B با مقادیر نیروی لغزش ۴۳ و ۱۲۵ کیلونیوتن با نتایج به دست آمده از مدل عددی در Open Sees انطباق مناسبی نشان می‌دهد. هر چند که افت سطح نیروی پیش‌تنیدگی در مدل‌های عددی دیده نمی‌شود. مشخصاً سختی‌های اختصاص داده شده به فیوز اول برابر ۱۰ و فیوز دوم برابر ۲۰ کیلونیوتن بر متر است که باعث شده است که شیب شاخه‌های بار برداری در هر دو فیوز با مدل آزمایشگاهی منطبق شود.

۱-۷- مطالعه های پارامتری مدل المان محدود

برای مدل سازی رفتار چرخه‌ای میراگرهای دوسطحی اصطکاکی، مدل المان محدود میراگر با استفاده از نرم افزار Open sees ارائه شده است. نمونه مدل المان محدودی ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای فرآینده منطبق بر پروتکل بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱۵ تا دامنه ۷۵ میلی متر بارگذاری شده است. در جدول ۳ مشخصات پارامتری از جمله Δ_{gap} (تأخیر تغییر مکانی فیوز اصلی)، P_S نیروهای لغزش، نسبت آن‌ها و δ_{max} تغییر مکان نهایی اعمال شده به میراگر نشان داده شده است. نیروهای لغزش به نحوی انتخاب شده است تا بازه های متنوعی از نسبت های نیرو لغزش در دو فاز برای بررسی تأثیر این پارامتر بر روند جذب انرژی یا مقدار میرایی

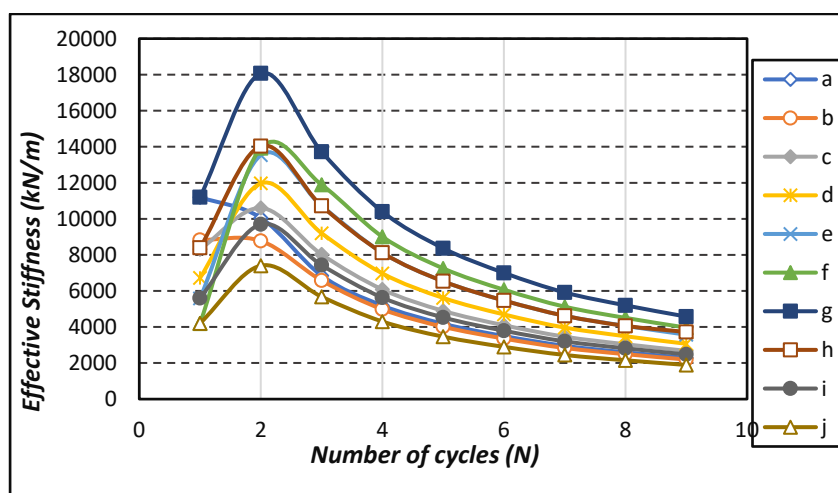


شکل ۱۷. نمودار نیرو-تغییر مکان مدل های عددی
Fig. 17. Force displacement cyclic curve of numerical component models a to j



شکل ۱۸. تغییرات اتلاف انرژی تجمعی در مقابل چرخه تجمعی

Fig. 18. Cumulative dissipated energy versus number of cycles in component numerical models



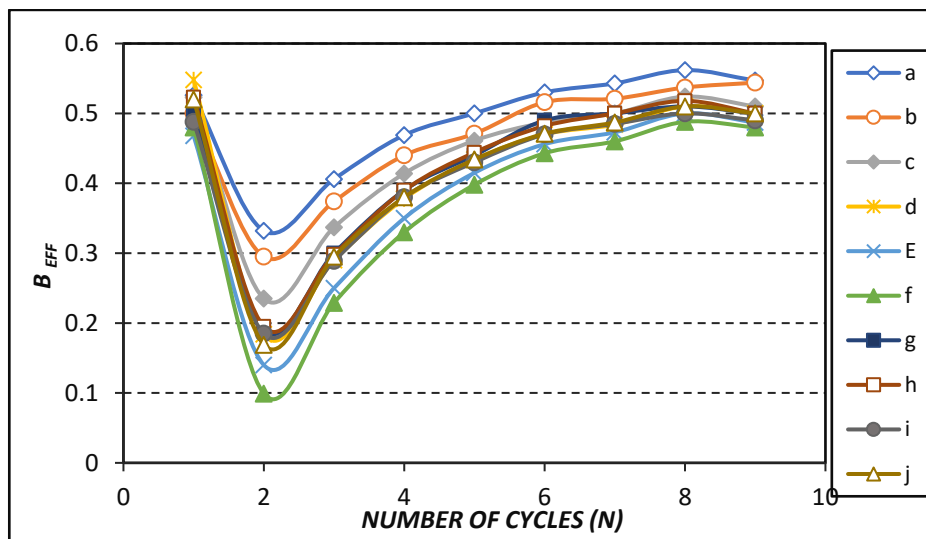
شکل ۱۹. تغییرات سختی مؤثر در نمونه های مدل سازی شده

Fig. 19. Effective stiffness variation versus number of cycles in cycles in component numerical models

در فیوز اصلی، مقدار میرایی معادل به خصوص در تغییر مکان‌های بزرگ تر از ۱۵ میلی متر افزایش مناسبی نشان می‌دهد. مقدار میرایی در چرخه‌های آخر بارگذاری به مقدار ۰/۵۱ رسیده است. تأثیرات افزایش نیروی لغزش در هر دو فیوز بر روی مقادیر انرژی جذب شده در شکل ۲۱ نشان داده شده است. دو نمودار جداگانه مقدار ماکزیمم انرژی جذب شده بر اساس نیروی لغزش در فیوز اصلی و کمکی را نشان می‌دهد. روند به دست آمده نشان می‌دهد به دلیل تعداد چرخه‌های بالای اعمال شده در فیوز اصلی با دامنه‌ی تغییر مکان زیاد، مقدار نیروی لغزش در فیوز اصلی تأثیر بیشتری در انرژی جذب شده دارد. بر این اساس، تغییرات انرژی جذب شده در برابر تغییرات نسبت نیروهای پیش‌تنیدگی در شکل

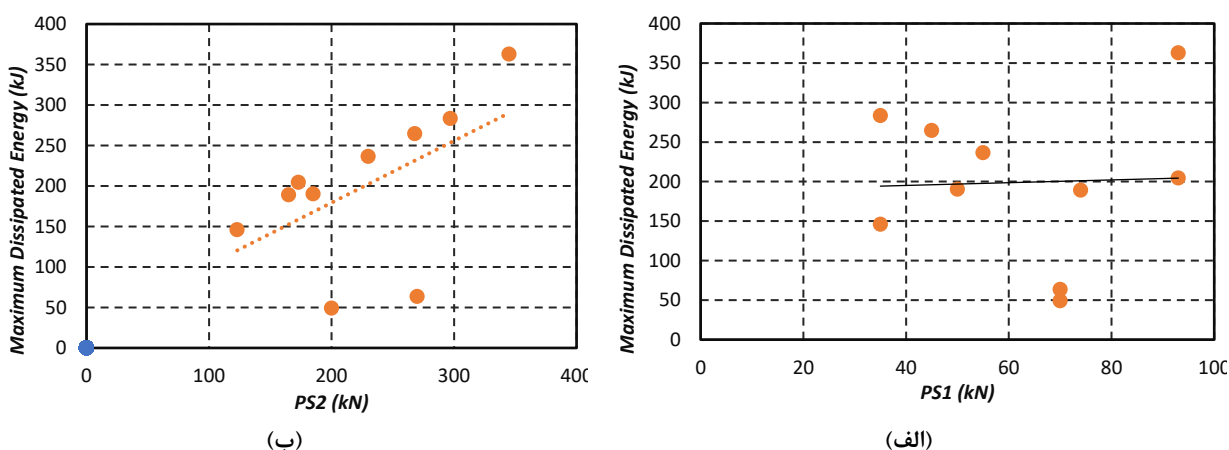
جابه‌جایی‌های تجربه شده توسط میراگر، کاهش پیدا می‌کند (شکل ۱۹). همچنین افزایش میرایی در چرخه‌های اول بارگذاری مشهود است. پس از چرخه ی ۶ تقریباً تمام نمونه‌ها با نیروهای لغزش متفاوت، به یک مقدار میرایی در حدود ۰/۵۱ می‌رسند.

میرایی معادل برای هر چرخه در مدل‌های عددی با توجه به مساحت نیرو-تغییر مکان محاسبه شده است. شکل ۲۰ نشان دهنده‌ی تغییرات میرایی معادل در مدل‌های مختلف عددی و با نیروی‌های پیش‌تنیدگی متفاوت در مقابل چرخه‌های بارگذاری می‌باشد. در چرخه‌های اولیه به دلیل کم بودن بازه‌های تغییر مکان وارد شده، مساحت نیرو - تغییر مکان محاسبه شده قابل ملاحظه نیست ولی با افزایش دامنه در چرخه‌های بالاتر و اضافه شدن نیروی پیش‌تنیدگی



شکل ۲۰. تغییرات میرایی ویسکوز معادل در نمونه های مدل سازی شده

Fig. 20. Effective equivalent damping versus number of cycles in cycles in component numerical models



شکل ۲۱. تغییرات انرژی جذب شده بر اساس تغییرات نیروی لغزش در (الف) فیوز کمکی (ب) فیوز اصلی

Fig. 21. Dissipated energy versus variation of fuse forces (a) Ps1 (b) Ps2

لغزش مربوط به هر یک از سطوح لغزشی با تنظیم نیروی پیش تنیدگی در فازهای متفاوت میسر گردید. برخورداری از مزیت‌های عمده‌ای نظیر هزینه ساخت و ساز، تعمیر و نگهداری پایین نسبت به سایر میراگرها از وجوه تمایز میراگر اصطکاکی پیشنهادی به شمار می‌رود. همچنین این میراگرها به آسانی می‌توانند در سامانه‌ی مهاربندی قاب خمشی نصب گردند. از مهم‌ترین نتایج حاصله از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی هدف آزمایش یعنی عملکرد دوسطحی میراگرها حاصل شده است. فیوز اول برای بازه‌هایی با دامنه‌ی کمتر از تأخیر تغییر مکانی بدون درگیر کردن فیوز دوم وارد

۲۲ ارائه شده است. روند کلی مشاهده شده در این نمودار بیانگر این نکته است که با افزایش نسبت نیروی پیش تنیدگی فیوز اصلی به کمکی، مقدار جذب انرژی افزایش می‌یابد. قضاوت در این مورد با در نظر گرفتن میراگر به تنهایی امکان پذیر نیست و باید مقدار جذب انرژی جذب شده توسط میراگر در سازه‌های مجهز به میراگر دوسطحی با میراگرهای معمول به خصوص در زمین لرزه‌های متوسط مقایسه شود.

۸- نتیجه گیری

یک میراگر اصطکاکی دوسطحی معرفی گردید. در این میراگر بار

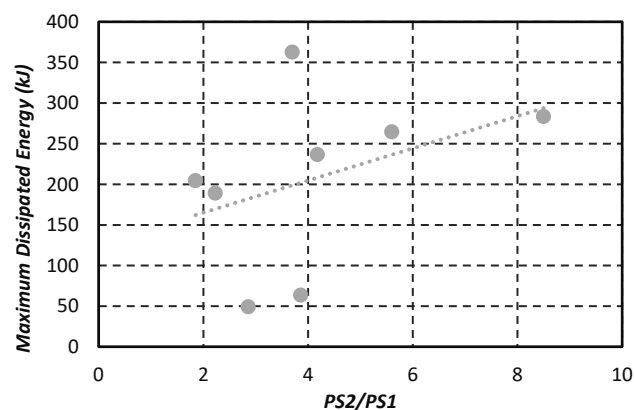
انرژی، مقادیر میرایی و اتلاف انرژی افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند که مقدار افزایش متناسب با نیاز سازه در زمین‌لرزه‌های با شدت بالا می‌باشد.

فهرست علائم

نیروی بیشینه	F^+
نیروی کمینه	F^-
سختی مؤثر	k_{eff}
نیروی لغزش در فیوز اول	P_{s1}
نیروی لغزش در فیوز دوم	P_{s2}
انرژی هیستریزیس	w_D
میرایی معادل ویسکوز	β_{eff}
میانگین تغییر مکان	Δ_{avr}
تغییر مکان بیشینه	Δ^+
تغییر مکان کمینه	Δ^-
تغییر مکان گپ	δ_{gap}

مراجع

- [1] ASCE. 2010. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia.
- [2] T. Soong, B. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice, Engineering structures, 24(3) (2002) 243-259.
- [3] M. Symans, F. Charney, A. Whittaker, M. Constantinou, C. Kircher, M. Johnson, R. McNamara, Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments, Journal of structural engineering, 134(1) (2008) 3-21.
- [4] R.J. Smith, M.R. Willford, The damped outrigger concept for tall buildings, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 16(4) (2007) 501-517.
- [5] D.H. Kim, Y.K. Ju, M.H. Kim, S.D. Kim, Wind-induced vibration control of tall buildings using



شکل ۲۲. تغییرات انرژی جذب شده بر اساس نسبت نیروهای لغزش
 Fig. 22. Effect of first and second fuse slip force ratio on maximum dissipated energy

مرحله‌ی غیرخطی شده‌اند. پس از افزایش تغییر مکان اعمالی، انتقال نیرو از طریق رابطها (پیچ‌ها) به فیوز دوم امکان پذیر شده است. • مطالعات تجربی میراگر دوسطحی نشان می‌دهد که عملکرد دستگاه قابل پیش‌بینی است، از آنجایی که نیروی نرمال در پیچ‌ها به آسانی قابل اندازه‌گیری است. همچنین قابل اعتماد است به جهت اینکه زوال بار لغزشی در طول چرخه در محدوده‌ی قابل قبولی از آیین نامه ASCE/SEI41-06 می‌باشد. خصوصیات نیرو-جابه‌جایی HFD مانند بار لغزش، انرژی مستهلک شده، سختی مؤثر و میرایی ویسکوز معادل برای چرخه‌های متوالی بارگذاری بر اساس الزامات ASCE/SEI41-06 محاسبه گردید. نتایج نشان داد که این مقادیر در چرخه‌های متوالی بارگذاری در محدوده‌ی ۱۵٪ انحراف از معیار قرار دارند و در بحرانی‌ترین حالت که مربوط به چرخه‌ی اول از نمونه B می‌باشد، مقادیر بار لغزش و انرژی اتلافی به ترتیب ۱۰ و ۱۱ درصد از مقدار میانگین انحراف داشتند.

• اضافه شدن فیوز اصلی در بازه تغییر مکان‌های بیشتر از گپ باعث می‌شود افت نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها به دلیل وارد شدن منبع جدید اتلاف انرژی بدون بارگذاری اولیه (فیوز اصلی) کاهش یابد. نتایج مطالعه‌های عددی نشان می‌دهد مدل ساخته شده با استفاده از ترکیب المان‌های لینک در نرم افزار Open Sees به خوبی قادر است رفتار دوسطحی نیرو-تغییر مکان به دست آمده از آزمایش را مدل سازی کند. همچنین بررسی انرژی تلف شده در طول بارگذاری نشان می‌دهد با اضافه شدن فیوز اصلی به سیستم اتلاف

- [11] C.-H. Lee, J. Kim, D.-H. Kim, J. Ryu, Y.K. Ju, Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection, *Engineering Structures*, 114 (2016) 75-92.
- [12] A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 127 (2016) 120-135
- [13] B. Hosseini Hashemi, E. Moaddab, Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 170(10) (2017) 722-734.
- [14] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7 (2000).
- [15] ASCE 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Virginia(USA), (2007).
- [16] S.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).
- hybrid buckling-restrained braces, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(7) (2014) 549-562.
- [6] C. Christopoulos, M. Montgomery, Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(15) (2013) 2217-2233.
- [7] C. Christopoulos, M. Montgomery, Viscoelastic coupling dampers (VCDs) for enhanced wind and seismic performance of high-rise buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(15) (2013) 2217-2233.
- [8] Y.E. Ibrahim, J. Marshall, F.A. Charney, A viscoplastic device for seismic protection of structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11) (2007) 1515-1528
- [9] J.D. Marshall, F.A. Charney, A hybrid passive control device for steel structures, I: Development and analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, 66(10) (2010) 1278-1286.
- [10] D.H. Kim, Experimental Study on the Seismic Performance of Hybrid Buckling-Restrained Braces, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4) (2013) 23-29

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Moaddab, B. Shahbazi, *Experimental and Numerical Study of Hybrid Friction Damper*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(1) (2020) 53-72.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14589.5700](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14589.5700)

