



## بررسی قابلیت بازگرداندگی واحدهای جداگر لغزشی فوق ارتجاعی مجهز به آلیاژهای حافظه‌ی شکل به کمک روابط انرژی و مطالعات پارامتریک

پیمان نرج آبادی<sup>1</sup>، داود ستاریان کرج آباد<sup>2</sup>

1- استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، ایران

narjabadi@tabrizu.ac.ir

2- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران

d.sattarian@yahoo.com

### چکیده

قابلیت بازگرداندگی یکی از مهمترین مسائل مورد توجه آئین‌نامه‌ها در زمینه‌ی جداسازی لرزه‌ای است. در این مقاله، قابلیت بازگرداندگی جداگرهای لغزشی فوق ارتجاعی مجهز به آلیاژهای حافظه‌ی شکل مطالعه می‌گردد. بدین منظور، ابتدا ملاحظات تئوریک رفتار سیستم با استفاده از روابط انرژی بررسی و ضمن ایجاد درک کلی از مسئله پارامترهای مؤثر مشخص می‌شوند. سپس قابلیت بازگرداندگی بر اساس مطالعات پارامتریک گسترده برای تعداد زیادی از انواع تحریکات لرزه‌ای ارزیابی می‌گردد. پردازش آماری نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد مقدار جابجایی ماندگار پس از تأثیر زمین لرزه به هر دوی پارامترهای سازه و زلزله وابسته بوده و خصوصیات متضمن کفایت بازگرداندگی قابل تعیین می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** جداگرهای لرزه‌ای، سیستم‌های لغزشی، آلیاژهای حافظه‌ی شکل، خاصیت فوق ارتجاعی، قابلیت بازگرداندگی، جابجایی ماندگار

### 1. مقدمه

قابلیت بازگرداندگی در آئین‌نامه‌های معتبر طراحی سازه‌ها به عنوان یکی از اساسی‌ترین نیازهای فنی جداسازی لرزه‌ای معرفی می‌شود [1-3]. سیستم‌های جداساز دارای قابلیت بازگرداندگی کافی، حین زلزله تمایل به بازگشت به وضعیت اولیه را خواهند داشت. عدم کفایت قابلیت بازگرداندگی نیز به صورت وجود جابجایی‌های ماندگار قابل توجه پس از هر زلزله، تجمع جابجایی‌ها طی یک سری از رخدادها لرزه‌ای و افزایش جابجایی‌های حداکثر و ماندگار در یک سمت تحت اثر اعمال زلزله‌های تک جهت نمود می‌یابد [4].

قابلیت بازگرداندگی جداگرها توسط نیروهایی که جهت اثر آنها به سمت مرکز می‌باشند افزایش می‌یابد. نیروی بازگرداننده‌ی ناشی از هندسه‌ی خاص سطح مقعر کروی لغزشی در سیستم پاندولی اصطکاکی مشهور به FPS (Friction Pendulum System) یک نمونه از این نیروها می‌باشد. نیروهایی که در خلاف جهت مبدأ اثر

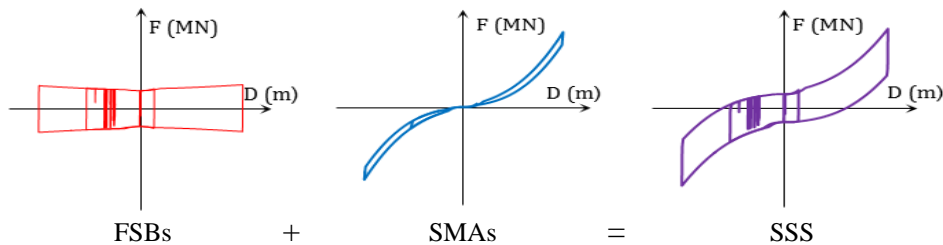


می کنند نیز باعث کاهش قدرت بازگرداندگی می گردند. نیروهای هیسترتیک میراگرهای هیسترتیک یا هسته های سری و نیروی اصطکاک از جمله ی این نوع نیروها می باشند. در مجموع، تعادل میان این دو دسته نیرو است که قابلیت بازگرداندگی سیستم را مشخص می نماید.

اغلب تحقیقات علمی پیشین انجام گرفته در مورد قابلیت بازگرداندگی سیستم های سازه ای به سیستم های دارای سختی بالا مربوط می شوند که البته برای جداگرها مناسب نیستند. Riddell و Newmark، به نقل از Katsaras و همکارانش [4] در سال 1979 میلادی نشان دادند که مقدار جابجایی ماندگار به شدت از شکل حلقه های هیسترتیس تاثیر می پذیرد. Mahin و Bertero، به نقل از Katsaras و همکارانش [4] در سال 1981 میلادی مشخص نمودند که برای برخی از سیستم های الاستوپلاستیک سازه ای متوسط جابجایی ماندگار علی رغم پراکندگی نسبتاً زیاد تقریباً برابر با 40٪ جابجایی حداکثر می باشد. Macrae و Kawashima، به نقل از Cardone [5] با انجام مطالعاتی در سال 1997 میلادی متوجه شدند نسبت سختی پلاستیک سیستم بر سختی الاستیک اولیه ی آن در بازگرداندگی مؤثر است و به این ترتیب می توان قابلیت بازگرداندگی را پیش بینی نمود. Kawashima و همکارانش، به نقل از Cardone [5] در سال 1998 میلادی استفاده از طیف پاسخ جابجایی ماندگار را پیشنهاد دادند. Medeot [6] در سال 2004 میلادی ارزیابی میزان قابلیت بازگرداندگی را بر اساس معیار انرژی  $E_S \geq 0.25E_H$  انجام داد که  $E_S$  مقدار انرژی ذخیره شده ی قابل بازگشت و  $E_H$  انرژی مستهلک شده در چرخه های هیسترتیک می باشند. مطالعات Dicleli و Buddaram [7] به سال 2006 میلادی و همچنین Berton و همکارانش [8] به سال 2007 میلادی نشان داده اند که مقاومت مشخصه ی سیستم در قابلیت بازگرداندگی مؤثر است. Katsaras و همکارانش [4] در سال 2008 میلادی با تحقیق بر روی قابلیت بازگرداندگی سیستم های جداگر هیسترتیک دوخطی متوجه شدند که مهم ترین پارامتر مؤثر بر قابلیت بازگرداندگی نسبت  $d_{max}/d_r$  می باشد که  $d_{max}$  جابجایی حداکثر سیستم و  $d_r$  جابجایی ماندگار استاتیکی می باشد. Attanasi و همکارانش [9] در سال 2008 میلادی نشان دادند که استفاده از آلیاژهای حافظه ی شکل در سیستم های جداساز، به علت خاصیت فوق ارتجاعی منحصربفرد مصالح، قابلیت بازگرداندگی مناسبی را برای سیستم ایجاد خواهد نمود. نرج آبادی فام [10] در سال 1389 نیز سیستم جداسازی را مورد مطالعه قرار داد که فرم کاربردی سیستم Dolce و همکارانش [11] بوده و توسط Jalali و همکارانش [12] معرفی گردید. ایده ی این سیستم با توجه به ساختار ساده ی آن برای کنترل لرزه ای سازه ها مورد توجه بوده و بررسی قابلیت بازگرداندگی از مسائل مهم جهت کاربرد عملی آن به نظر می آید. در این مقاله، این مسئله برای الگوی جدید سیستم مورد بحث تحت عنوان SSS (Shape memory alloy (SMA)-based Superelasticity-assisted Slider) که توسط Narjabadifam و Eradat [13] معرفی شده است مورد بررسی قرار می گیرد.

## 2. ملاحظات تئوریک

در مطالعات پیشین قابلیت بازگرداندگی سیستم‌های جداساز عموماً از مدل‌های خطی و دوخطی آنها جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای استفاده شده است. در این مطالعه، رفتار واقعی جداگرهای SSS مدنظر قرار می‌گیرد. شکل (1) رفتار جداگرهای لغزشی فوق‌ارتجاعی مجهز به آلیاژهای حافظه‌ی شکل را بر اساس شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که از ترکیب ساده‌ی تکیه‌گاه‌های لغزشی مسطح (Flat Sliding Bearings: FSBs) با اعضای آلیاژ حافظه‌ی شکل (Shape memory alloys: SMAs) سیمی در آرایش قائم مابین فنداسیون و دال پایه شکل یافته است.

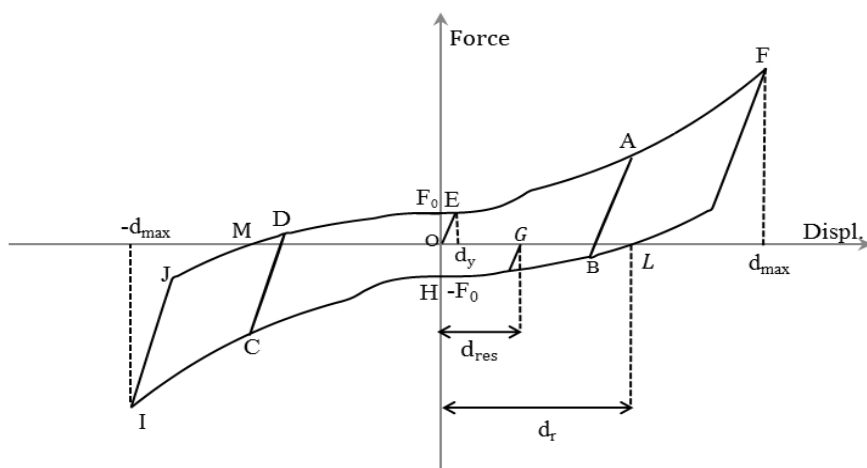


شکل (1): رفتار مکانیکی SSS و اجزای تشکیل دهنده‌ی آن

رفتار SSS به طور تقریبی طبق رابطه‌ی (1) به کمک سه پارامتر مستقل که عبارتند از نیروی  $F$ ، سختی موثر  $K_{eff}$  و جابجایی  $d$  قابل تعریف است:

$$F = K_{eff} d \quad (1)$$

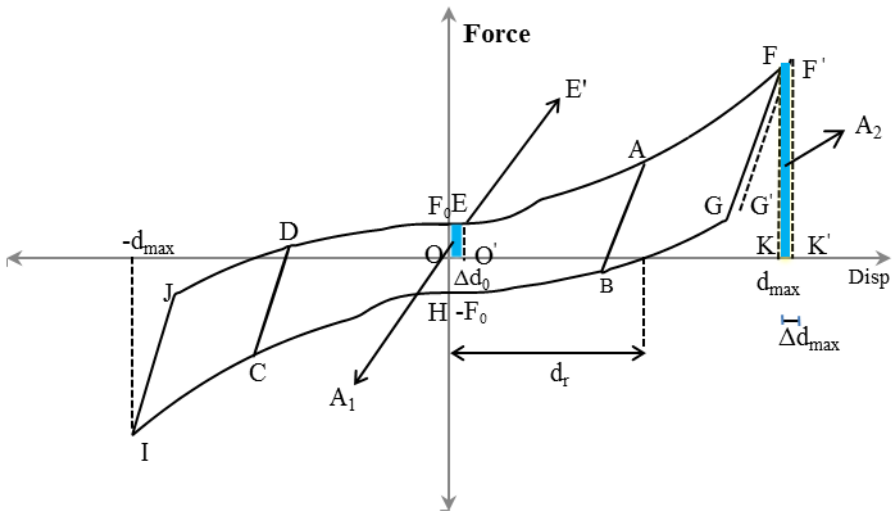
عملاً SSS می‌تواند تحت یک جابجایی ماندگار غیر صفر  $d_{res}$  در تعادل باشد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که برآیند نیروهای مؤلفه‌های SMA و FSB برابر صفر باشد (نقطه‌ی G در شکل 2). به عبارتی دیگر، می‌بایست جابجایی ماندگار  $d_{res}$  در محدوده‌ی جابجایی ماندگار استاتیکی  $d_r$  باشد (بخش MOL در شکل 2).



شکل (2): نمودار نیرو - تغییر مکان SSS و پارامترهای مؤثر در قابلیت بازگرداندگی

البته رفتار سیستم جداگر از لحاظ قابلیت بازگرداندگی با تعریف دو بخش متفاوت در حرکات لرزه ای قابل فهم تر خواهد بود. اولین بخش عبارت است از مرحله ای گذرا که در طی این مرحله انرژی حرکت مستقیماً از حرکات ناشی از لرزش زمین ایجاد می گردد. بخش دوم مرحله پایانی یا ارتعاشی است که تحریک سیستم در نتیجه تغییرات انرژی های پتانسیل و جنبشی آن بدون حضور و تأثیر قابل توجه حرکات زلزله حاصل می شود. مرحله پایانی اساساً از خصوصیات سیستم تأثیر می پذیرد و بررسی تحلیلی نیز امکان پذیر می باشد، در حالی که مرحله گذرا به میزان قابل توجهی از جزئیات لرزش زمین تأثیر می گیرد و تنها با روش های آماری قابل بررسی است.

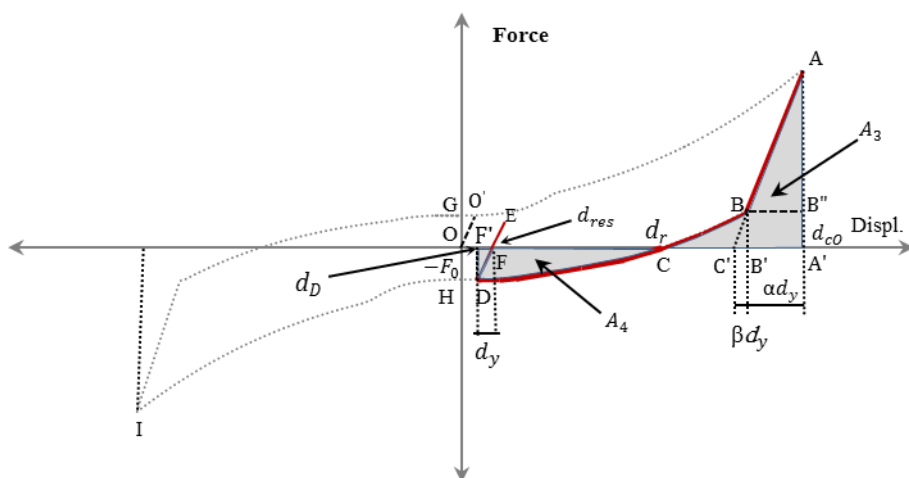
در مرحله گذرا معمولاً نیروهای لرزه ای وارده موجب جابجایی های بزرگتر از جابجایی تسلیم  $d_y$  می گردند و دیگرام های نیرو - جابجایی سیستم ممکن است به صورت حلقه های هیسترتیک کاملی در آیند (مانند  $ABCD$  در شکل 3) که نسبت به مبدأ متقارن نیستند. این حلقه ها داخل حلقه ی پوش  $FGHI$  قرار دارند. اساسی ترین پارامترهایی که بر حرکت سیستم در طی این مرحله تأثیر می گذارند  $F_0$  (نیروی جاری شدن اسمی) و  $K_p$  (سختی پس از جاری شدن اسمی) می باشند و اثر  $d_y$  (جابجایی جاری شدن اسمی) خیلی ناچیز است. در شکل (3) اثر یک جابجایی اولیه  $\Delta d_0$  با استفاده از مفاهیم انرژی بر روی حداکثر جابجایی یک حلقه (همانند حلقه ی مربوط به حداکثر جابجایی  $d_{max}$ ) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (3): نمودار نیرو-جابجایی سیستم SSS در مرحله‌ی حرکت گذرا

با فرض یکسان بودن انرژی جنبشی اولیه و انرژی اعمالی برای شاخه‌های EF و E'F' از قانون پایستگی انرژی نتیجه می‌شود که سطوح OEFK و O'E'F'K' برابرند و این یعنی کمیت‌های  $\Delta d_0$  و  $\Delta d_{max}$  دارای اثر مشابهی هستند و رابطه‌ی بین آنها می‌تواند به وسیله‌ی ایجاد تساوی بین مساحت‌های هاشور زده‌ی  $A_1$  و  $A_2$  به دست آید. با توجه به این تساوی مشخص می‌گردد که با افزایش  $d_{max}$  در نهایت  $\Delta d_{max}$  به صفر میل خواهد کرد و به عبارتی دیگر با افزایش جابجایی اثر جابجایی اولیه‌ی موجود در سیستم از بین خواهد رفت. در نتیجه، اثر جابجایی اولیه‌ی موجود ناشی از زمین لرزه‌های قبلی یا سایر عوامل با افزایش جابجایی و نیروی اعمالی از بین می‌رود.

آن گونه که در شکل (4) نمایش داده شده است بهتر است نقطه‌ی شروع مرحله‌ی پایانی حرکت، نقطه‌ی برگشت حرکت در شاخه‌های بارگذاری اصلی GA یا HI در نظر گرفته شود. جابجایی مربوط به این نقطه با  $d_{CO}$  نمایش داده شده است و در حالت معمولی هر جابجایی کمتر یا برابر با  $d_{max}$  را شامل می‌شود. البته مقدار جابجایی  $d_{CO}$  تابعی از مرحله‌ی حرکت گذرا می‌باشد.



شکل (4): نمودار نیرو-جابجایی سیستم SSS در مرحله‌ی حرکت پایانی

بر این اساس، رابطه‌ی بین جابجایی‌ها از پایداری انرژی قابل حصول است. این رابطه به آسانی و با ایجاد تساوی بین نواحی سایه زده شده‌ی  $A_3$  و  $A_4$  به دست می‌آید:

$$d_D = d_r - \frac{[F_{d_B}(d_B - d_r) + \frac{m+1}{2}\alpha d_y(F_{d_{CO}} + F_{d_B})]}{mF_{d_B}} \quad (2)$$

علاوه بر این، جابجایی  $d_{res}$  به صورت هندسی از جابجایی  $d_D$  قابل دستیابی است. این نتیجه با توجه به نسبت تشابه بین مثلث‌های  $DFE'$  و  $ABB''$  به دست می‌آید:

$$d_{res} = \frac{F_{d_D}}{F_{d_{CO}} - F_{d_B}} \alpha d_y + d_D \quad (3)$$

برای دست‌یابی به جابجایی ماندگار  $d_{res}$ ، برای حالتی که سیستم پس از نقطه‌ی  $D$  جاری نمی‌شود با جایگذاری نیروها بر حسب جابجایی‌های مربوطه و حل دو معادله‌ی (2) و (3) خواهیم داشت:

$$d_{res} = d_r \left[ 1 + \left( \gamma - \frac{(m+1)(\alpha + 2\beta)\alpha}{2m\gamma} + \frac{\alpha\beta}{m\gamma} \right) \frac{d_y}{d_r} - \frac{b}{m\gamma} \left( \frac{d_{CO}}{d_r} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

رابطه‌ی فوق ارتباط بین جابجایی‌ها را با توجه به مقادیر پارامترها نمایش می‌دهد. در رابطه‌ی فوق  $m$  درجه‌ی معادله‌ی حلقه‌ی هیسترتیک،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  ضرایب عددی ثابت در هر چرخه،  $d_{co}$  جابجایی حداکثر در هر چرخه،  $d_r$  جابجایی ماندگار ایستایی،  $d_{res}$  جابجایی ماندگار و  $d_y$  جابجایی اسمی جاری شدن می‌باشد.

با توجه به این که مقدار  $d_y$  خیلی ناچیز است  $d_y/d_r$  خیلی کوچکتر از یک خواهد بود و با توجه به این که  $d_r > d_y$  است با افزایش  $d_y$ ، نسبت  $d_{res}/d_r$  کاهش خواهد یافت. به عبارت دیگر با افزایش  $d_y$ ، جابجایی ماندگار کاهش خواهد یافت. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که برای مطالعه قابلیت بازگرداندگی بایستی  $d_r$ ،  $d_{res}$  و  $d_{max}$  سیستم مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به اشکال (3) و (4)،  $d_{co} \leq d_{max}$  و در نتیجه  $d_{co}/d_r \leq d_{max}/d_r$  مشهود می‌باشند و از اینرو  $d_{max}/d_r$  نسبتی است که می‌تواند قابلیت بازگرداندگی را مشخص نماید و هر چقدر این نسبت به یک نزدیک باشد سیستم بازگرداندگی ناکافی داشته و هر چه از یک بزرگتر باشد به علت تحمل نیروی بیشتر توسط عوامل بازگرداننده (آلیاژهای حافظه‌ی شکل) قابلیت بازگرداندگی سیستم افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (4)  $d_{res} \leq d_r \leq d_{max}$  بنابراین نسبت دیگری که می‌تواند در تعیین قابلیت بازگرداندگی سیستم مؤثر باشد  $0 \leq d_{res}/d_{max} \leq 1$  می‌باشد و هر چه این نسبت به یک نزدیکتر باشد سیستم دارای بازگرداندگی ناکافی و هر اندازه به صفر نزدیکتر باشد دارای بازگرداندگی مناسبی خواهد بود.

با مشخص شدن ارتباط بین جابجایی‌ها و با مطالعه در مورد رفتار جداگر در طی مراحل حرکت، در ادامه تحلیل‌های پارامتریک جهت شناخت و مطالعه‌ی هر چه بهتر قابلیت بازگرداندگی سیستم انجام خواهد گرفت.

### 3. مطالعات پارامتریک

با توجه به مطالعات پیشین انجام یافته توسط Katsaras و همکارانش [4] نتایج تعداد محدودی از تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی نمی‌توانند برای سنجش قابلیت بازگرداندگی کافی باشند. همچنین مقدار جابجایی ماندگار به میزان زیادی به جزئیات زمین لرزه و رفتار پیچیده‌ی سیستم طی مراحل حرکت وابسته است. بنابراین برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان می‌بایست تعداد زیادی تحلیل برای زمین‌لرزه‌های مختلف انجام گیرند تا استفاده از روش‌های آماری میسر گردند. از این‌رو، تعداد 222 شتاب‌نگاشت مربوط به 24 زلزله مختلف در نظر گرفته شدند که اطلاعات مربوط به آن‌ها به طور خلاصه در جدول (1) ارائه شده است:

جدول (1): زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی

Number	Country	Location	Date	Stations	Magnitude
1	USA	Borrogo Mtn	21/05/1905	2	6.5
2	USA	San Fernando	24/05/1905	3	6.6
3	USA	Imperial Valley-02	19/05/1940	1	7.2
4	USA	Kern County	21/07/1952	1	7.7
5	USA	Parkfield	28/06/1966	5	6.1

6	Iran	Tabas	16/09/1978	1	7.4
7	USA	Whittier Narrows	01/10/1978	41	5.7
8	USA	Coyote Lake	15/10/1979	1	5.6
9	USA	Imperial Valley-06	15/10/1979	15	6.9
10	USA	Livermore	24/01/1980	3	5.5
11	USA	Morgan Hill	24/04/1984	6	6.1
12	USA	N. Palm Springs	08/07/1986	16	6
13	USA	Chalfant Valley	21/07/1986	2	6
14	USA	Superstitt Hills(B)	24/11/1987	8	6.6
15	Armenia	Spitak	07/12/1988	1	7
16	USA	Loma Prieta	18/10/1989	22	7.1
17	Turkey	Erzican	13/03/1992	1	6.69
18	USA	Cape Mendocino	25/04/1992	6	7.1
19	USA	Landers	28/06/1992	10	7.4
20	USA	Northridge	17/01/1994	57	6.7
21	Japan	Kobe	16/01/1995	5	6.9
22	Turkey	Kocaeli	17/08/1999	5	7.8
23	Taiwan	Chi-Chi	20/09/1999	6	7.6
24	Turkey	Duzce	12/11/1999	4	7.3

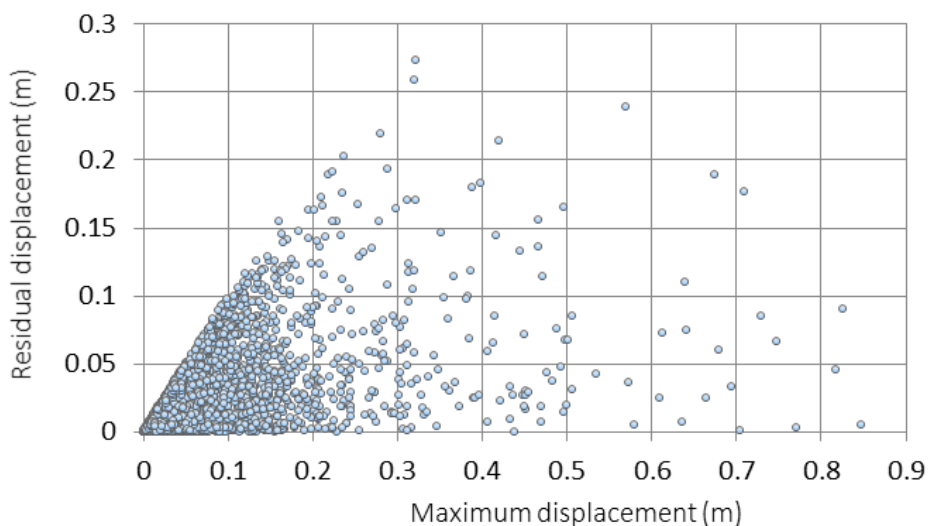
جدول (2) نیز کل حالت های در نظر گرفته شده برای مطالعات پارامتریک را نشان می دهد:

جدول (2): حالت های مختلف در نظر گرفته شده برای مطالعات پارامتریک

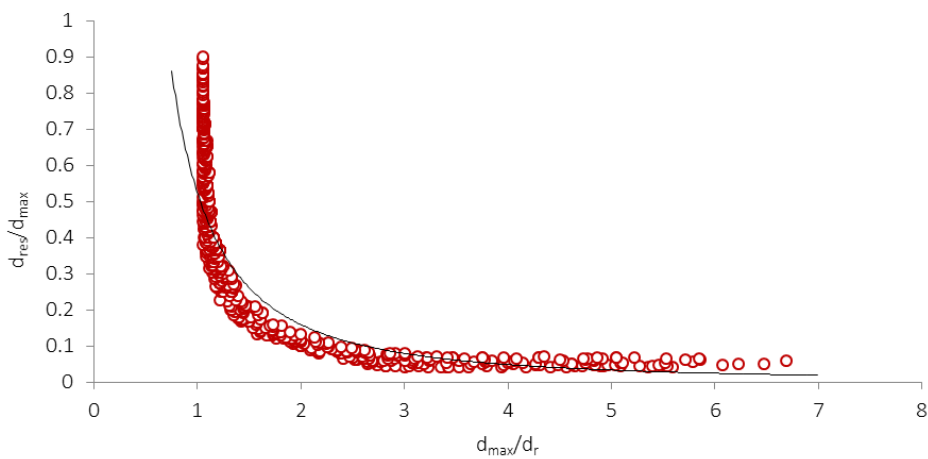
Parameter	Values considered	Number of cases
$\Delta$ (m)	0.1, 0.3, 0.5	3
$\mu$	0.02, 0.05	2
W (MN)	8	1
$\gamma$	1.2	1
Earthquake ground motion	See table 1	222
Number of consecutive ground motion	1, 2, 3, 4, 5	5

در جدول (2)  $\Delta$  مقادیر جابجایی طرح،  $\mu$  ضرایب اصطکاک، W وزن روسازه و  $\gamma$  ضریب اهمیت انتخابی می باشد. شکل (5) نتایج تحلیل را به صورت توزیع جابجایی های ماندگار در مقابل جابجایی های حداکثر نشان می دهد. اگر چه بیشتر جابجایی ها در نزدیکی مبدا تجمع یافته اند و با افزایش جابجایی حداکثر جابجایی ماندگار نیز به طور نسبی افزایش می یابد، اما نسبت جابجایی ماندگار به جابجایی حداکثر افزایش کمتری می یابد یعنی  $d_{res}/d_{max}$  کوچکتر می شود و این بیانگر افزایش قابلیت بازگرداندگی سیستم با افزایش جابجایی حداکثر می باشد.





شکل (5): جابجایی‌های ماندگار حاصل از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به صورت تابعی از جابجایی‌های حداکثر



شکل (6): توزیع نسبت  $d_{res}/d_{max}$  به صورت تابعی از نسبت  $d_{max}/d_r$  برای حالت‌های متفاوت طراحی

در شکل (6) نیز نتایج آماری نسبت  $d_{res}/d_{max}$  در مقابل نسبت  $d_{max}/d_r$  پس از اعمال رگرسیون نمایش داده شده است که نشان می‌دهد با افزایش نسبت  $d_{max}/d_r$ ، نسبت  $d_{res}/d_{max}$  کاهش می‌یابد.

#### 4. خلاصه و نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل‌های انجام یافته، نسبت‌های  $d_y/d_r$ ،  $d_{res}/d_{max}$ ،  $d_{max}/d_r$  از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر قابلیت بازگرداندگی جداگرهای لغزشی فوق‌ارتجاعی مجهز به آلیاژهای حافظه‌ی شکل می‌باشند که  $d_{max}$  جابجایی حداکثر،  $d_r$  جابجایی ماندگار ایستایی،  $d_{res}$  جابجایی ماندگار و  $d_y$  جابجایی اسمی جاری شدن تعریف شده‌اند.

جابجایی اسمی تسلیم  $d_y$  و جابجایی ماندگار ایستایی  $d_r$  به خصوصیات سیستم جداگر وابسته می‌باشند، در حالیکه جابجایی حداکثر  $d_{max}$  از تحریکات ناشی از زلزله‌ها تاثیر می‌پذیرد.

با افزایش میزان جابجایی حداکثر از تاثیرپذیری جابجایی ماندگار از زلزله‌ها کاسته می‌شود.

با اعمال معیار 0/1 برای نسبت  $d_{res}/d_{max}$  قابلیت بازگرداندگی برای سیستم‌های با نسبت  $d_{max}/d_r$  بزرگتر از 1/5 وضعیت مطلوبی خواهد داشت.

## 5. تقدیر و تشکر

مؤلف اول بدینوسیله از دانشگاه بناب تشکر می‌نماید که بدون فراهم آمدن امکانات پژوهشی لازم و علی‌الخصوص قرارداد 92-3-1 تحقیقات مربوط به این مقاله میسر نمی‌گردید. مؤلف دوم نیز از مسئولین محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه قدردانی می‌نماید.

## 6. مراجع

- [1] International Code Council (ICC). *International Building Code (IBC 2006)*, Falls Church, VA, 2006.
- [2] American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design-Interim 2000*, Washington, DC, 2000.
- [3] European Committee for Standardization (CEN). *EN1998:2005- Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance*, Bruxelles, Belgium, 2005.
- [4] Katsaras CP, Panagiotakos TB, Kolia B. Restoring capability of bilinear hysteretic seismic isolation systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**(4), 557-575, 2008.
- [5] Cardone D. Re-centring capability of flag-shaped seismic isolation systems, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**(4), 1267-1284, 2012. DOI 10.1007/s10518-012-9343-1.
- [6] Medeot R. Re-centering capability evaluation of seismic isolation systems based on energy concepts, *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, Paper 3106, 2004.
- [7] Dicleli M, Buddaram S. Effect of isolator and ground motion characteristics on the performance of seismic-isolated bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **35**(2), 223-250. 2006. DOI 10.1002/eqe.522.

- [8] Berton S, Infanti S, Castellano MG, Hikosaka H. Self-centring capacity of seismic isolation systems, *Structural Control and Health Monitoring*, **14**(6), 895–914, 2006. DOI 10.1002/stc.188.
- [9] Attanasi G, Auricchio F, Crosti C, Fenves GL. An innovative isolation bearing with shape memory alloys, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China, 2008.
- [10] نرج آبادی فام پیمان. کنترل سازه ها در مقابل زلزله با استفاده از جداگرهای پایه لغزشی و مصالح هوشمند حافظه شکل، رساله دکتری دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، 1389.
- [11] Dolce M, Cardone D, Marnetto R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(7), 945-968, 2000.
- [12] Jalali A, Cardone D, Narjabadifam P. Smart restorable sliding base isolation system, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**(2):657-673, 2010. DOI 10.1007/s10518-010-9213-7.
- [13] Narjabadifam P, Eradat R. On the Practicality of Shape Memory Alloy (SMA)-based Superelasticity-assisted Sliding Isolation, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures commemorating JSSI 20th Anniversary*, September 24-27, Sendai Japan, 2013.