

## ارزیابی پل‌های قطعه‌ای پس کشیده تحت اثر حرکات قائم زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی

حسین خرازی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
kharrazihosseini@ut.ac.ir

محمد خانمحمدی

استادیار، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
mkhan@ut.ac.ir

کلید واژه‌ها: پل‌های قطعه‌ای پس کشیده، تحلیل دینامیکی غیر خطی، تغییر مکان پسماند، مقیاس مولفه‌های زلزله

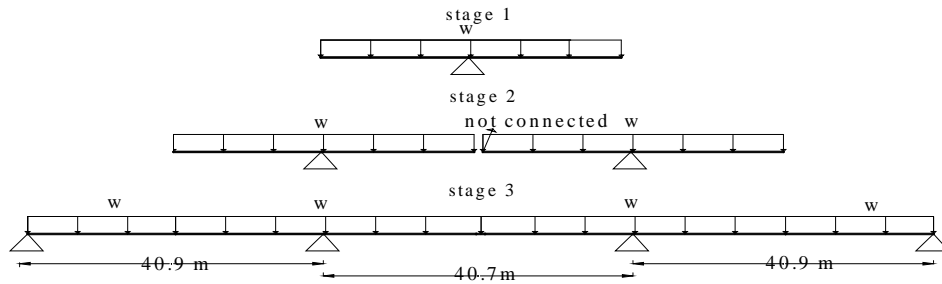
### چکیده

در این تحقیق رفتار لرزه‌ای عرشه‌ی پل‌های قطعه‌ای پس کشیده در حالت تاندون‌های چسبیده (bonded) تحت تاثیر مولفه‌ی قائم زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مدل ارائه شده براساس نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. اثرات لغزش بر روی رفتار کابل‌های پس کشیدگی در نظر گرفته شده است. بر اساس این مدل آزمایشگاهی، عرشه پیوسته سه دهانه یک پل ساخته شده به عنوان مطالعه‌ی موردی در نرم‌افزار opensees به صورت دو بعدی با در نظر گرفتن روش ساخت، مدل شده است. عرشه‌ی پل تحت تاثیر پانزده زلزله‌ی نزدیک گسل مقیاس شده در دو سطح زلزله‌ی مبنای طرح و بزرگترین زلزله‌ی قابل وقوع به صورت غیرخطی تحلیل شده است. در تحلیل نتایج تحلیل‌های دینامیکی مشخص شد که بیش‌ترین بازشدگی در وسط دهانه‌ی میانی و در قسمت فوقانی آن اتفاق می‌افتد. به منظور ارزیابی عمل‌کرد پل چهار سطح خسارت تعریف شده است. با مقایسه‌ی پاسخ درز بحرانی با سطوح خسارت تعریف شده به این نتیجه رسیده شد که خساراتی مانند پوسته و خرد شدگی بتن اتفاق نمی‌افتد اما امکان تسلیم کابل فوقانی در بزرگ‌ترین زلزله‌ی قابل وقوع وجود دارد. برای ارزیابی بعد از زلزله‌ی پل، تغییر مکان‌های قائم پسماند عرشه در زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که این مقادیر در هر دو سطح زلزله ناچیز می‌باشد.

### مقدمه

ساخت پل با استفاده از قطعات پیش‌ساخته موجب پایین آوردن هزینه‌های ساخت از طریق افزایش سرعت و کاهش زمان ساخت در عین حفظ کیفیت می‌شود. هم‌چنین عدم استفاده از داربست باعث کاهش انسداد ترافیک و اثرات زیست‌محیطی می‌شود که به مزیت‌های روش ذکر شده اضافه می‌کند. با وجود اینکه کاربرد پل‌های قطعه‌ای پیش‌ساخته افزایش یافته است، استفاده از آن‌ها در مناطق لرزه‌خیز دنیا به دلیل کمبود تحقیق روی پاسخ لرزه‌ای آن‌ها محدود شده است. با وجود رفتار مناسب پل‌های قطعه‌ای پس کشیده در اثر مولفه‌های طولی و عرضی زلزله در اثر مولفه‌ی قائم زلزله احتمال باز شدن اتصال قطعات پیش‌ساخته و کاهش ظرفیت باربری پل وجود دارد زیرا در محل اتصال قطعات پل هیچ آرماتوری وجود ندارد تا مانع گسترش ترک شود. در نتیجه این درزها مستعد انواع خسارت‌ها می‌باشند. در این تحقیق نیز به بررسی رفتار و ارزیابی این درزها در پل‌هایی که در آن‌ها از کابل‌های چسبیده استفاده شده است، پرداخته شده است. از طرف دیگر ارزیابی خسارت سازه‌های موجود حائز اهمیت زیادی می‌باشد زیرا سطح عملکرد و کیفیت طراحی آن‌ها را مشخص می‌کند. هم‌چنین بررسی سطح خسارت پل‌های قطعه‌ای پس کشیده به مهندسان کمک می‌کند تا قابلیت اطمینان لرزه‌ای را بعد از زلزله تعیین کنند. به همین منظور عرشه‌ی یک پل سه دهانه‌ی پیوسته با تاندون‌های چسبیده و با در نظر گرفتن روش ساخت (روش طره‌ی متعادل) مورد ارزیابی قرار گرفته است. (شکل ۱).





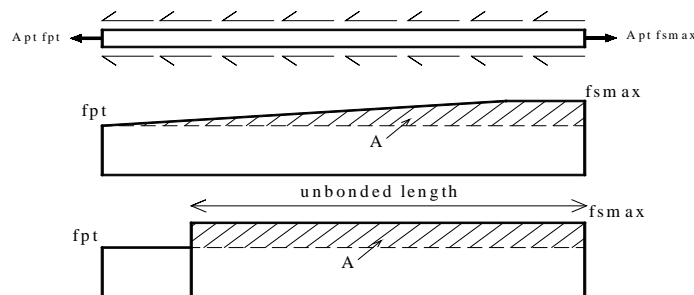
شکل ۱: مراحل ساخت پل براساس روش طره متعادل

## مدل آزمایشگاهی پل طول unbonded length

در اثر تنش‌های پیوستگی بین کابل و غلاف و همچنین تنش پیوستگی بین غلاف و بتن پیرامون، تنش کابل در محل بحرانی از مقدار حداکثر تا مقدار پس‌کشیدگی تغییر می‌کند. به دلیل مشکل بودن تعیین توزیع تنش پیوستگی و در نتیجه تغییرات تنش کابل، از مفهوم unbonded length استفاده شده است. در این طول می‌توان فرض کرد که به طور متوسط تنش در کابل ثابت و برابر تنش حداکثر است (شکل ۲). برای محاسبه این طول از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کنیم (Veletz, M.J., and Restrepo, J.I. 2014).

$$L_u = 10.3 \sqrt{A_{pt}} \quad (1)$$

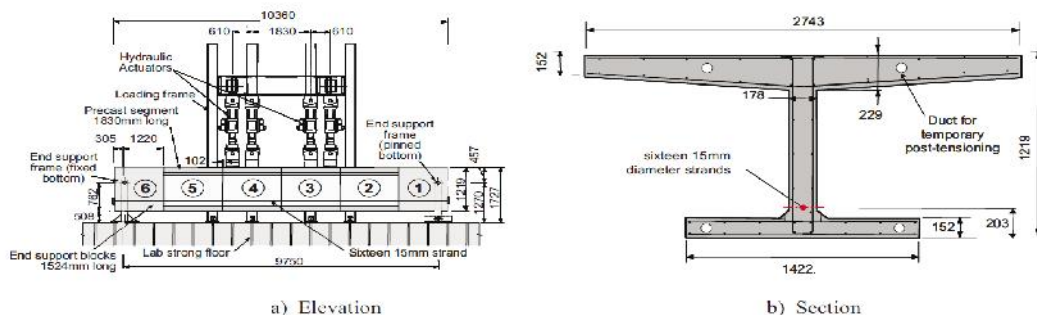
که در رابطه‌ی بالا  $L_u$  طول unbonded length بر حسب میلی‌متر و  $A_{pt}$  سطح مقطع کابل‌های چسبیده بر حسب میلی‌متر مربع می‌باشد. به دلیل تاثیر لغزش بر روی رفتار کابل‌های چسبیده، مدل مصالح جدیدی در نرم افزار opensees توسعه شده است. قوانین هیستریزس این مدل مصالح براساس نتایج آزمایش‌های کششی انجام شده روی کابل‌های چسبیده به دست آمده است (Veletz, M.J., and Restrepo, J.I. 2014).



شکل ۲: مفهوم unbonded length با استفاده از مکانیزم انتقال تنش پیوستگی در طول کابل

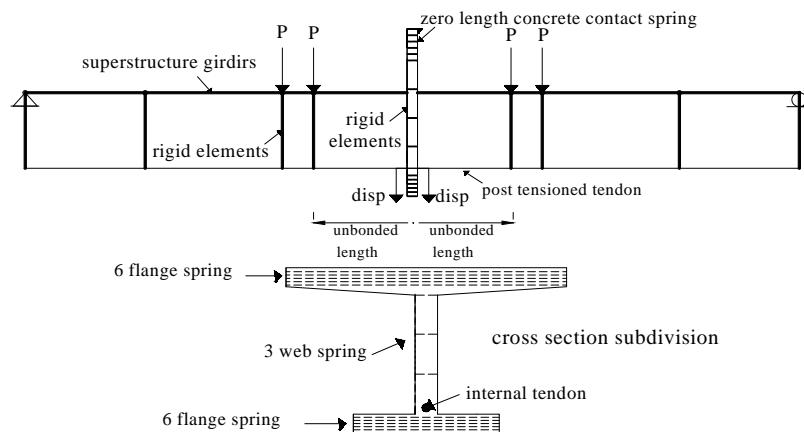
## کالیبره کردن مدل بر اساس آزمایش

به منظور صحت سنجی مدل ارائه شده، از نتایج آزمایش فاز اول (100 INT) مگالی و همکاران استفاده شده است (Megally et al., 2003a) (شکل ۳).



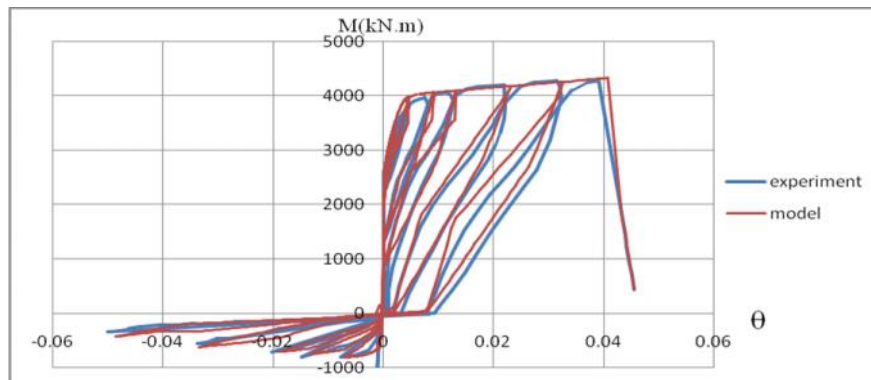
شکل ۳: تجهیزات آزمایشگاهی فاز اول (100INT) آزمایش خمشی انجام شده روی پل‌های قطعه‌ای پس‌کشیده (Megally et al., 2003a)

در شکل ۴ مدل تهیه شده در نرم افزار opensees برای شبیه سازی آزمایش فاز اول (100 INT) مگالی<sup>۱</sup> و همکاران نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این آزمایش محل بحرانی وسط دهانه می باشد، این قسمت به صورت غیرخطی و با استفاده از روش چند فنری مدل سازی شده است. در این مدل برای سادگی از ترک خوردگی قطعات در بین درزها صرف نظر شده است. برای شبیه سازی تماس قطعات پیش ساخته در محل درز، مقطع پل به چند قسمت تقسیم شده است که هر کدام از این قسمت ها با استفاده از فنرهای با طول صفر (zero length) بتنی (concrete02) مدل شده اند. طول معادل این قسمت ها برابر 150mm در نظر گرفته شده است. همچنین برای مدل سازی کابل های پس کشیدگی المان های خرپایی (truss) به کار گرفته شده است که مصالح آن مصالح توسعه داده شده براساس آزمایش های کششی انجام شده روی کابل های چسبیده می باشد. برای مدلسازی عرشه، المان های الاستیک به کار گرفته شده است. همچنین از اعضای صلب قائم برای انتقال نیروی پیش تنیدگی کابل ها به عرشه استفاده شده است. از تغییر شکل های برشی غیرخطی عرشه به دلیل ظرفیت برشی کافی صرف نظر شده است. آرماتورهای قطعات پیش ساخته به علت تاثیر کم در رفتار خمشی، در مدل سازی در نظر گرفته نشده است.



شکل ۴: مدل تهیه شده در نرم افزار opensees به منظور صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۵ منحنی لنگر خمشی و دوران مربوط به آزمایش و مدل نشان داده شده اند. همانطور که در شکل دیده می شود مدل ارائه شده به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد.



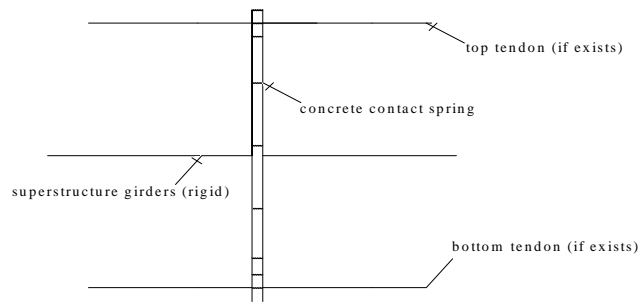
شکل ۵: نمودار لنگر خمشی- دوران آزمایش و مدل

## مدل سازی پل مورد مطالعه

مدل پل نشان داده شده در شکل ۱ به صورت دوبعدی و با توجه به مفاهیم ارائه شده در قسمت مدل آزمایشگاهی، در نرم افزار opensees ساخته شده است. محل درز قطعات پیش ساخته عرشه با استفاده از ده فنر تماسی مدل شده است (شکل ۶). که این فنرها براساس تقسیم بندی مقطع عرشه پل به دست آمده اند. مشابه مدل آزمایشگاهی، برای مدل سازی کابل های پس کشیدگی از المان های خرپایی استفاده شده است و برای محاسبه طول unbounded length کابل های عرشه از رابطه ی ۱ استفاده شده است. همچنین از المان های صلب برای مدل سازی قطعات پیش ساخته استفاده شده است.

<sup>1</sup> Megally





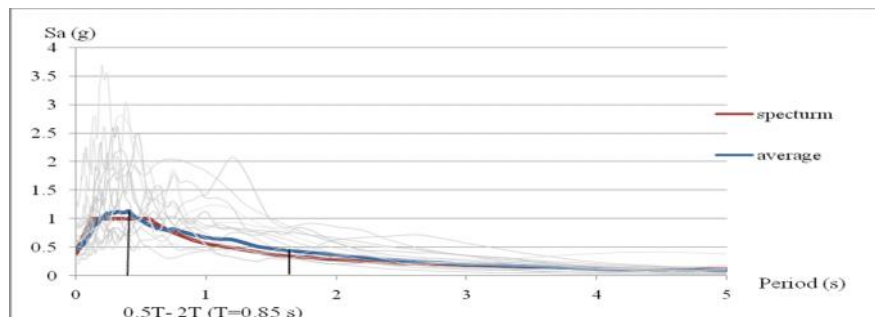
شکل ۶: مدل درز قطعات پیش ساخته

## زمین لرزه‌های انتخاب شده و مقیاس آن‌ها

برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، پانزده زلزله‌ی نزدیک گسل انتخاب شدند (<http://peer.berkeley.edu>). همه رکوردها از ایستگاه‌هایی که در فاصله‌ای کمتر از ۱۵ کیلومتری گسل قرار داشتند انتخاب شده‌اند. همچنین تعدادی از زلزله‌ها دارای اثرات قابل توجه نزدیک گسل مانند فلینگ<sup>۱</sup> بوده‌اند به منظور تحلیل دینامیکی، تمامی زلزله‌ها به گونه‌ای مقیاس شده‌اند تا میانگین طیف‌های مولفه‌ی عمود بر گسل زلزله‌ها، در بازه‌ی  $0.5T-2T$  (T پرپود اصلی پل در راستای طولی می‌باشد) با طیف آیین‌نامه AASHTO در دو تراز  $DBE^2$  و  $MCE^3$  حداقل اختلاف را داشته باشند (میرایی ۰/۵) (ASCE7-10). با توجه به اینکه در آیین‌نامه‌های رایج طراحی پل‌ها طیف طراحی قائم وجود ندارد، از ضرایب به دست آمده برای مولفه‌ی عمود بر گسل برای مقیاس مولفه‌ی قائم زلزله استفاده شده است. نوع خاک محل C بوده و برای تراز  $DBE$  مقدار  $PGA^4$  برابر 0.4g و برای تراز  $MCE$  مقدار  $PGA$  برابر 0.6g در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به رکوردهای انتخاب شده و در شکل ۷ طیف میانگین مولفه‌های مقیاس شده‌ی عمود بر گسل و طیف آیین‌نامه در تراز  $DBE$  نشان داده شده است.

جدول ۲: اطلاعات رکوردهای انتخابی زلزله

زلزله	ایستگاه	مدت زمان زلزله (s)	فاصله از گسل (km)	PGA (vertical)
Chichi	TCU065	90	0.98	0.27
Duzce	Duzce	25.9	8.2	0.36
Erzincan	Erzincan	19.9	2	0.25
Kobe	takarazuka	41	1.2	0.43
Kobe	takatori	41	0.3	0.27
Loma Prieta	Gilroy - Historic Bldg	39.95	12.7	0.15
Loma Prieta	Saratoga	39.95	13	0.39
Northridge	Rinaldi	15	7.1	0.85
Northridge	Newhall	40	7.1	0.55
Northridge	Olive View	40	6.4	0.53
Northridge	Converter	40	6.2	0.54
Northridge	W. Pico Canyon	25	7.1	0.29
San Fernando	Pacoima Dam	41.6	2.8	0.69
Superstitn Hills	Wildlife Liquef	44	14.4	0.41
Tabas	Tabas	32.8	3	0.69



شکل ۷: طیف میانگین و طیف طرح در تراز  $DBE$

<sup>1</sup> fling

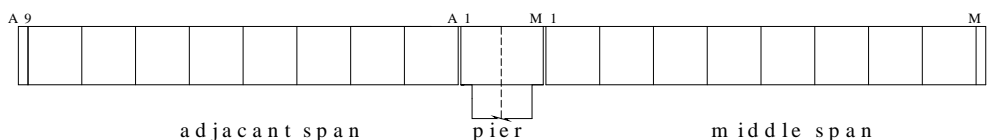
<sup>2</sup> Design Basis Earthquake

<sup>3</sup> Maximum Credible Earthquake

<sup>4</sup> Peak Ground Acceleration

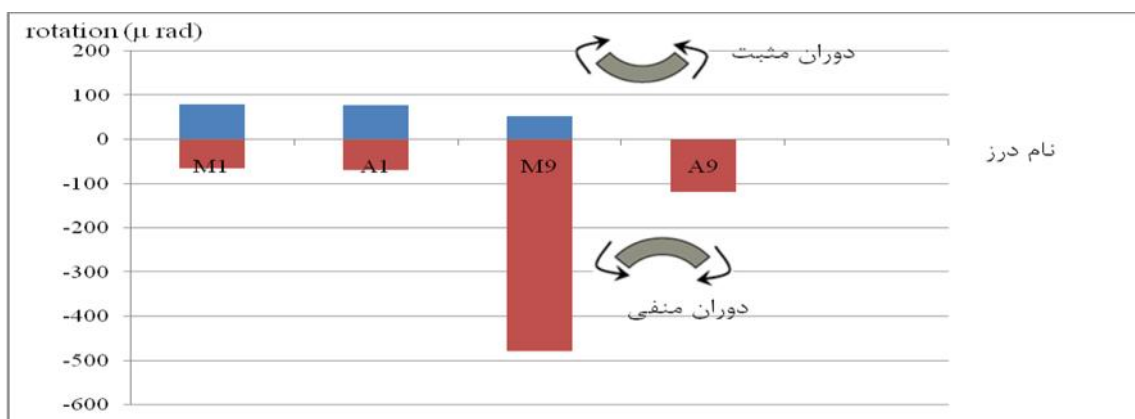


با توجه به تعداد زیاد درزها و همچنین بحرانی بودن وسط دهانه و تکیه‌گاه‌ها، نتایج مربوط به درزهای نشان داده شده در شکل ۸ ارائه شده‌اند.

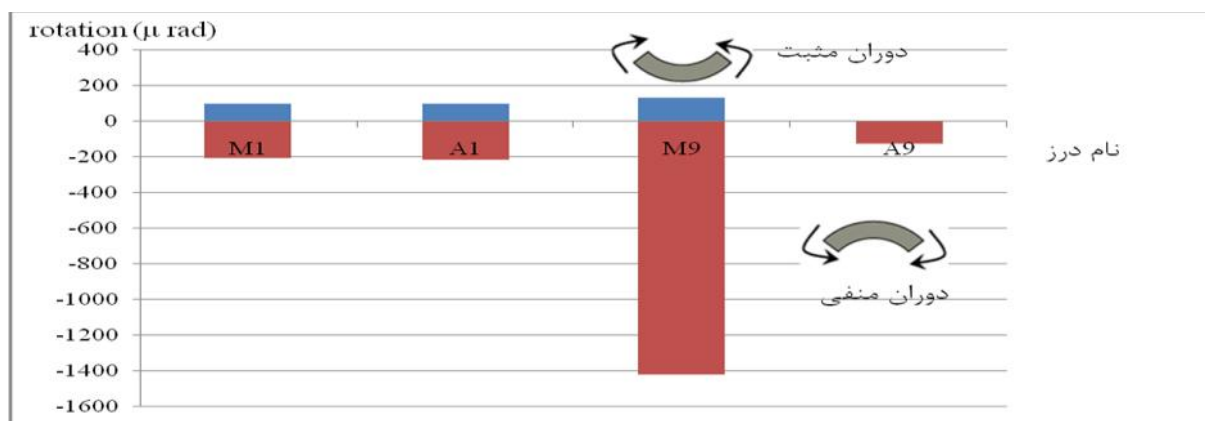


شکل ۸: شماره‌گذاری درزهای بحرانی

در شکل‌های ۹ و ۱۰ میانگین دوران‌های مثبت و منفی حداکثر درزهای بحرانی در دو سطح DBE و MCE نشان داده شده است.



شکل ۹: میانگین دوران‌های حداکثر مثبت و منفی درزهای بحرانی در سطح DBE



شکل ۱۰: میانگین دوران‌های حداکثر مثبت و منفی درزهای بحرانی در سطح MCE

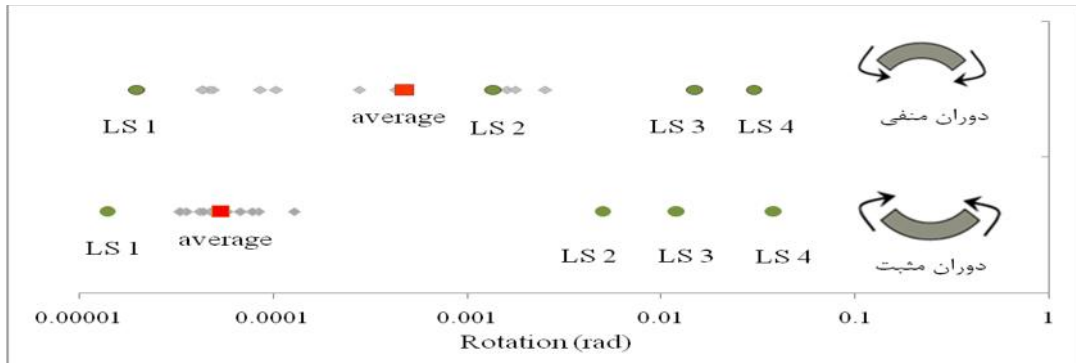
برای بررسی عمل کرد چهار سطح خسارت به همراه مقدار متناظر کمی آن تعریف شده است (جدول ۲).

جدول ۲: سطوح خسارت تعریف شده

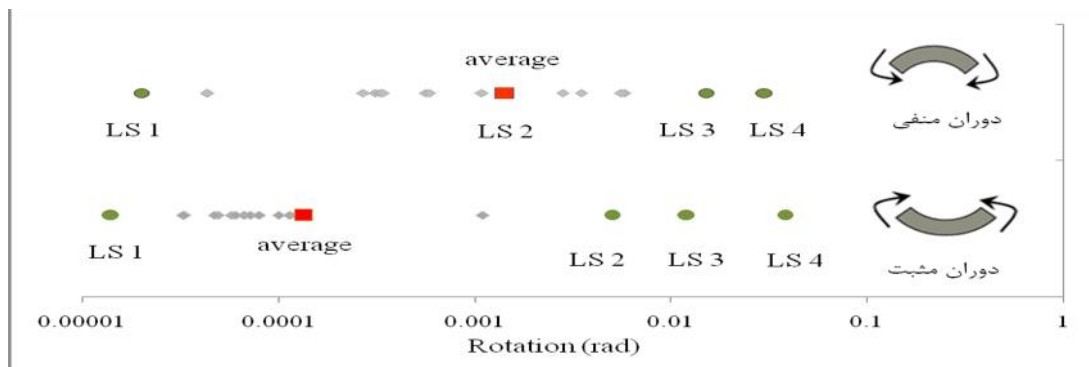
نام	سطح خسارت	مقدار کمی متناظر با خسارت
LS1	ترک خوردگی مقطع عرشه	$c = +1.6 \times 10^{-5}$
LS2	تسلیم کابل	$f_{cable} = F_y$
LS3	پوسته شدن بتن	$c = -0.003$
LS4	خرد شدگی بتن	$c = -0.007$



همانطور که در دو شکل ۹ و ۱۰ مشخص است، بیشترین دوران در درز M9 اتفاق می‌افتد به منظور بررسی این موضوع، میانگین دوران‌های حداکثر مثبت و منفی این درز با دوران‌های متناظر با سطوح خسارت تعریف شده مقایسه شده است. (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) همان‌گونه که دیده می‌شود دوران میانگین در هر دو سطح خطر از دوران متناظر با ترک‌خوردگی مقطع بزرگ‌تر می‌باشد که این موضوع به معنی بازشدگی درز و شروع غیرخطی شدن می‌باشد اما از نظر مقاومتی قاصه‌ی دوران میانگین با دوران متناظر با حالات حدی مانند خزش‌دگی بتن به خصوص در حالت DBE زیاد است. نکته‌ی مهم دیگر که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است این است که در دوران‌های منفی و در تراز MCE بیش‌ترین دوران اتفاق می‌افتد که متناظر با سطح خسارت تسلیم کابل و آغاز از دست رفتن نیروی پیش‌تنیدگی می‌باشد.

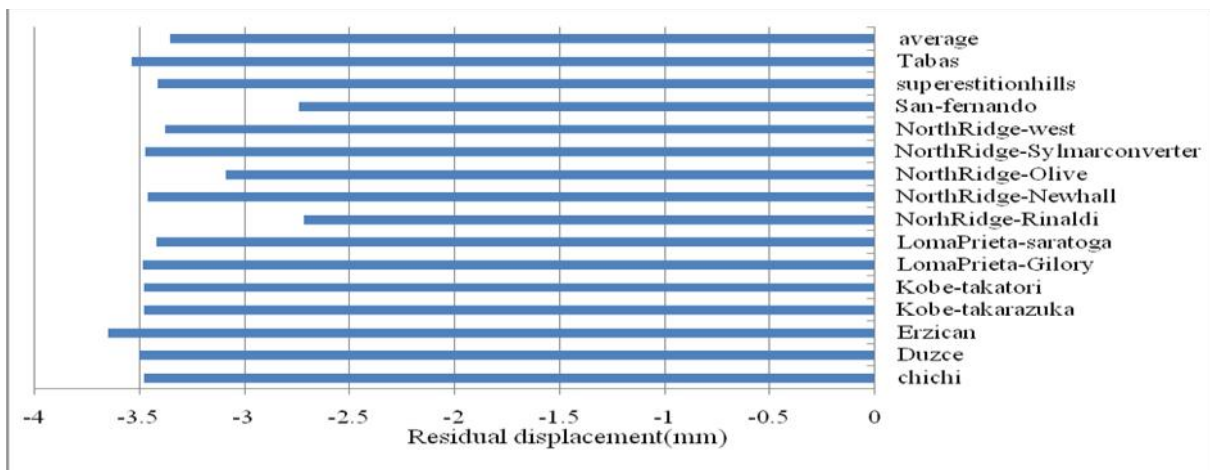


شکل ۱۱: مقایسه‌ی دوران حداکثر مثبت و منفی درز M9 با سطوح خسارت تعریف شده در تراز DBE



شکل ۱۲: مقایسه‌ی دوران حداکثر مثبت و منفی درز M9 با سطوح خسارت تعریف شده در تراز MCE

با توجه به این موضوع که تغییر مکان‌های پسماند در خدمت رسانی بعد از زلزله‌ی پل تاثیر زیادی دارد، تعیین آن دارای اهمیت زیادی می‌باشد. از این رو تعیین این پارامتر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌است. در این تحقیق نیز مقدار تغییر مکان باقیمانده‌ی قائم پل در زلزله‌های انتخابی مقیاس شده در سطح MCE در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر مکان‌های پسماند در همه‌ی زلزله‌ها از ۴ میلی‌متر کمتر بوده که این به معنای قابل صرف‌نظر بودن آن‌ها است.



شکل ۱۳: تغییر مکان‌های قائم باقیمانده در اثر زلزله‌های مختلف مقیاس شده در سطح MCE

## نتیجه گیری

در این مقاله نتایج مطالعه‌ی عددی پل‌های قطعه‌ای پس کشیده با کابل‌های چسبیده تحت مولفه‌ی قائم زلزله ارائه شد. با تحلیل دینامیکی غیر خطی مدل پل به این نتیجه رسیده شد که بیشترین دوران و در نتیجه بازشدگی در درزهای پل تحت مولفه‌ی قائم زلزله در وسط دهانه‌ی میانی اتفاق می‌افتد که این مقدار در دوران‌های منفی و در سطح MCE خیلی بیشتر است. همچنین با مقایسه‌ی دوران‌های حداکثر درز بحرانی با دوران‌های متناظر با سطوح خسارت تعریف شده نتیجه گرفته شد که حالات حدی مانند پوسته و خرد شدن بتن اتفاق نمی‌افتد اما در سطح MCE و در دوران‌های منفی کابل بالایی تسلیم می‌شود. دلیل دوران منفی زیاد درز بحرانی و در نتیجه تسلیم کابل فوقانی آن را می‌توان کم بودن کابل فوقانی در وسط دهانه دانست. در طراحی براساس بار ثقلی در وسط دهانه لنگر مثبت ایجاد می‌شود و برای این لنگر نیازی به کابل فوقانی نمی‌باشد اما همان‌طور که در نمودارها مشاهده شد در اثر مولفه‌ی قائم زلزله امکان ایجاد لنگر منفی در وسط دهانه وجود دارد لذا در طراحی این‌گونه پل‌ها باید در قسمت فوقانی دهانه‌های میانی نیز کابل مناسب تعبیه گردد تا از ایجاد این‌گونه نقاط ضعف جلوگیری شود. به منظور ارزیابی عمل کرد بعد از زلزله‌ی پل، تغییر مکان‌های باقیمانده‌ی قائم عرشه‌ی پل بعد از زلزله تعیین شد. در این قسمت مشاهده شد که در همه‌ی زلزله‌های انتخابی تغییر مکان‌های پسماند از مقدار ۴ میلی‌متر کمتر می‌باشد. از این رو می‌توان گفت که مقدار تغییر مکان پسماند ناشی از مولفه‌ی قائم زلزله ناچیز بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. دلیل این موضوع می‌تواند قابلیت خودمحموری بالا در سازه‌های پس کشیده باشد.

## مراجع

AASHTO (2007) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association off state Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., United States

Anagnostopoulou M, Filiatrault A and Aref A(2012) Vertical seismic response of a precast bridge superstructures, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No.1633, Lisboa, Portugal

ASCE/SEI (2010) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-010, American Society of Civil Engineers, United States

<http://peer.berkeley.edu>

Megally S, Seible F and Dowell RK (2003a) Seismic Performance of Precast Segmental Bridges: Segment-to-segment Joints subjected to High Flexural Moments and High Shears, *PCI Journal*, 48(3), 72-90

Megally S, Seible F and Dowell RK (2003b) Seismic Performance of Precast Segmental Bridges: Segment-to-Segment Joints Subjected to High Flexural Moments and Low Shears, *PCI Journal*, 48(2), 80-96

Megally S, Seible F, Garg M and Dowell RK (2002) Seismic Performance of Precast Segmental Bridge Superstructures with Internally Bonded Prestressing Tendons, *PCI Journal*, 47(2), 40-56

Veletzos MJ and Restrepo JI (2014) Equivalent Unbounded Length for Modeling of Multistrand Tendons in Precast Segmental Construction, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 19, No. 1, January 1, 2014. 101-109

Veletzos MJ and Restrepo JI (2010) Modeling of Jointed Connections in Segmental Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 16, No. 1, January 1, 2011. 139-147

Veletzos MJ and Restrepo JI (2008) The influence of vertical earthquake motion and Pre-Earthquake stress state on the seismic response of precast segmental bridge superstructures, *The Sixth National Seismic Conference on Bridges & Highways*, Paper 3B 1-5, Charleston, South Carolina, US

Zia P and Mostafa TD( 1977) development Length of Prestressing Strands, *PCI Journal*, Vol.22, No. 5, 1977