



Feasibility Study on Utilizing Self-centering Structural System for Typical Highway Bridges in Iran

A. Vasseghi*, B. Mansouri, S. Rointan

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Recently, in developed countries, a variety of self-centering structural systems have been developed using precast concrete bents and the Accelerated Bridge Construction (ABC) method to reduce construction time, increase safety, reduce seismic damage, reduce repair and reconstruction costs, and increase seismic resiliency. In this system, bridge bents are constructed by precast elements tied together with post-tensioned tendons such that under the effect of lateral seismic forces, they are able to rock and self-center back to their original configuration. The use of this system greatly reduces the residual displacements and the seismic damage. Also, due to the use of prefabricated elements, the construction speed of the bridge is significantly increased. This paper compares the seismic performance of one type of self-centering structural system with the conventional structural system for three typical highway bridges constructed in Iran. An analytical model for simulating nonlinear behavior due to the rocking motion in the self-centering system is first developed and verified by comparing the analytical response with the experimental results. Then, the concrete bents of the three typical bridges in Iran are modeled and analyzed once as a conventional system and once as a self-centering system, and the seismic performance of these two systems is compared with each other. The results of this study indicate that despite the modest increase in maximum lateral drifts, the residual drifts are substantially reduced when the conventional system is replaced by the self-centering system.

Review History:

Received: Apr. 26, 2020
Revised: Jun. 11, 2020
Accepted: Jul. 03, 2020
Available Online: Jul. 13, 2020

Keywords:

Bridge
Earthquake
Self-centering System
Resilient Structure
Residual Displacement

1. INTRODUCTION

In seismic regions, highway bridges are usually designed using capacity design principles by enforcing the formation of plastic hinges in the columns. The columns are expected to undergo major inelastic deformations during severe earthquakes, leading to significant residual drift. The residual drift is one of the decisive seismic serviceability parameters, and it defines whether a bridge can be used after the earthquake or not. For example, after the Kobe earthquake in 1995, more than 100 bridges with residual drift of more than 1.75% had to be demolished, although most of these bridges were sufficiently stable [1]. The residual drift is also an important parameter for estimating the post-earthquake resistance and the stability of the bridge structure against aftershocks [2]. The effects of residual drift on post-earthquake performance have led the scientific communities to develop self-centering structural systems with low residual drift and limited potential damage. In this system, the bridge bents are constructed using precast cap-beams and columns. The precast members are connected to each other and to the foundation by unbounded tendons, as shown in Fig. 1. The tendons and the superstructure weight provide the self-centering forces for the bridge bent. Internal or external

energy dissipation devices are also commonly used at the joints to absorb seismic energy.

In this paper, the seismic performance of a self-centering system proposed by Guerrini et al. [3, 4] is compared with the conventional system for three typical bridges in Iran. An analytical model that simulates the rocking motion of a self-centering system is first developed and validated by test results. Then, typical bents of the three bridges are analyzed as a conventional system and a self-centering system, and the seismic performance of these two systems is compared with each other.

2. MODELING OF THE SELF-CENTERING SYSTEM

An analytical model is developed for simulation of rocking motion and the self-centering column tested by Guerrini et al. (Figure 2) is selected to verify the model. The rocking motion is simulated by using a combination of gap and nonlinear spring elements to model the mortar bed underneath the column (Figure 3). The hysteresis response of the test specimen is compared with the results of the analysis in Figure 4. This figure shows that the hysteresis curves of the analytical model are in good agreement with the test results.

*Corresponding author's email: vasseghi@iiees.ac.ir



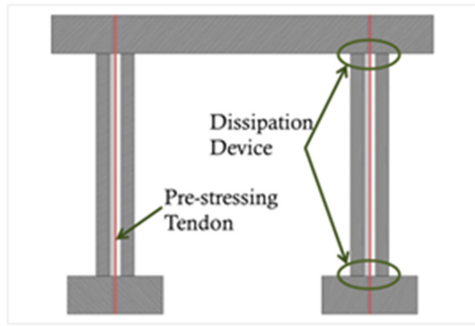


Fig. 1. Self-centering system for bridge bend

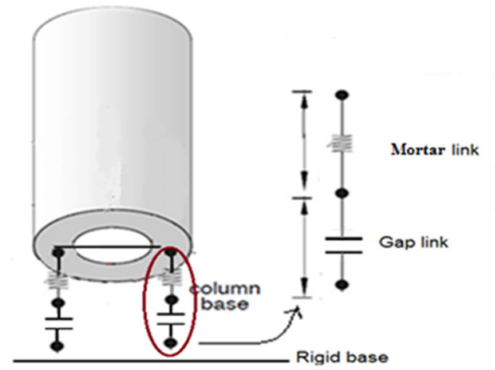
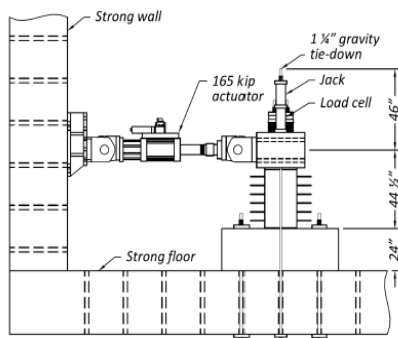
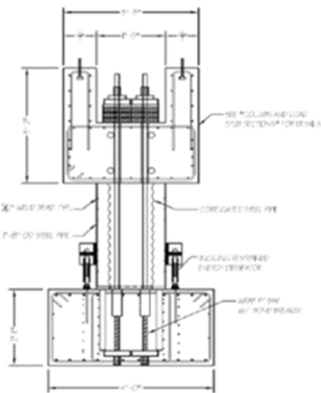


Fig. 3. Mortar bed modeling



a) Test setup



b) Test specimen

Fig. 2. Self-centering column tested by Guerrini et al. [4]

3. RESULTS AND DISCUSSION

Three different bridges with various span lengths constructed in Iran are selected for this study. Typical concrete bents of the three bridges are modeled and analyzed once as a conventional system and once as a self-centering system, and the seismic performance of these two systems is compared with each other. Nonlinear response history analyses are conducted for each bridge bend using seven earthquake records. Fig. 5 shows the typical displacement responses of the two systems. As shown in this figure, the residual displacement of the self-centering system is very small, but the peak displacement is higher compared to the

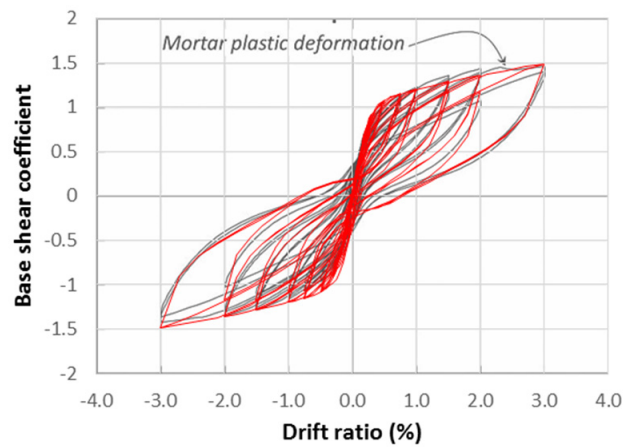
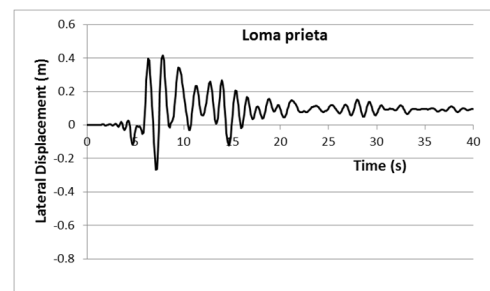
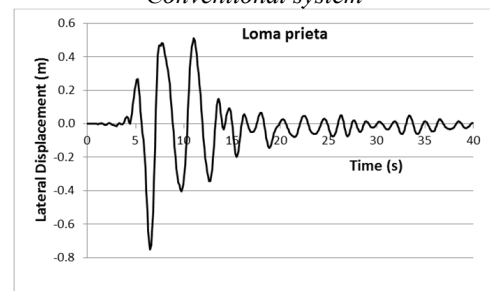


Fig. 4. Comparison of hysteresis curves



Conventional system



Self-centering system

Fig. 5. Lateral displacement response of a typical bridge bend

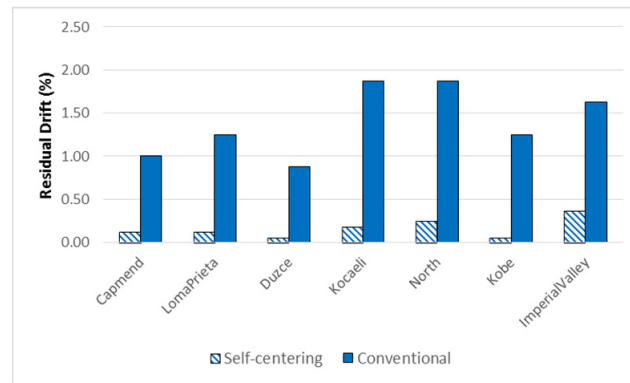


Fig. 6. Residual drift ratio

conventional system. The residual drift ratios in one of the bridges are shown in Fig. 6. In the conventional system, the residual drift ratio is between 0.9% and 1.9% and the potential seismic damage would be severe. The residual drift in the self-centering system is less than 0.4%, and thus the potential damage would be negligible.

4. CONCLUSION

In this paper, typical bends of three bridges in Iran were modeled with the conventional system and the self-centering system, and the seismic performance of these two systems was compared. The seismic response of each system was evaluated by nonlinear time history analyses using seven earthquake records. The results of this study show that the peak lateral drift in the self-centering system increases significantly. However, due to the lack of displacement-sensitive non-structural items on highway bridges, the increase in the peak drift is not expected to cause serious problems. In this system, despite the increase in the peak drift, the residual drift is greatly reduced. In some cases, the residual drift ratios of the conventional system are more than the critical level of 1.75%. In these cases, the potential damage will be severe and based on previous experience, the bridges need to be demolished. The residual displacement of the self-centering

system in all cases is less than 0.4 percent and the potential damage is negligible. The significant reduction of the residual displacement in the self-centering system drastically reduces the repair costs and allows for the operation of the bridge immediately after the earthquake.

REFERENCES

- [1] Kawashima, K. (2000). Seismic design and retrofit of bridges. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 265-285.
- [2] Mackie, K. and Stojadinovic, B. Residual Displacements and Post-Earthquake Capacity of Highway Bridges, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August, 2004. Paper No. 1550.
- [3] Guerrini, G., Restrepo, J. I., Massari, M., & Vervelidis, A. (2015). Seismic behavior of posttensioned self-centering precast concrete dual-shell steel columns. *Journal of structural engineering*, 141(4), 04014115.
- [4] Guerrini, G., Restrepo, J. I., Vervelidis, A., & Massari, M. (2015). Self-centering precast concrete dual-steel-shell columns for accelerated bridge construction: seismic performance, analysis, and design. *Report No. PEER 2015, 13*.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Vasseghi, B. Mansouri, S. Rointan, *Feasibility Study on Utilizing Self-centering Structural System for Typical Highway Bridges in Iran*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 959-962.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18323.6835](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18323.6835)





مطالعه امکان سنجی سیستم سازه‌ای مرکزگرا برای پایه‌ی متداول پل‌های بزرگراهی در کشور

اکبر واثقی*، بابک منصوری، صدف رویین‌تن

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:

پل

زلزله

سیستم مرکزگرا

سازه تاب‌آور

جابجایی پسماند

خلاصه: اخیراً در کشورهای پیشرفته انواع سیستم‌های سازه‌ای مرکزگرا با استفاده از پایه‌های پیش ساخته و روش ساخت پرسرعت ABC با هدف کاهش زمان ساخت، افزایش ایمنی، کاهش خسارت لرزه‌ای، کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی و کاهش زمان بازیابی سیستم به حالت اولیه توسعه داده شده‌اند. عملکرد لرزه‌ای این نوع سیستم مبتنی بر حرکت گهواره‌ای برگشت‌پذیر پایه پل می‌باشد. در این سیستم علاوه بر قطعات پیش ساخته از کابل‌های پیش تنیده جهت برگرداندن سیستم به حالت اولیه و تجهیزات مستهلک کننده انرژی برای جذب انرژی لرزه‌ای استفاده می‌گردد. استفاده از این سیستم خسارت ناشی از زلزله و جابجایی پسماند را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین به دلیل استفاده از قطعات پیش ساخته، سرعت ساخت پل نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در این مقاله عملکرد لرزه‌ای یک نوع سیستم مرکزگرا با سیستم متداول سازه‌ای برای سه پل موجود در کشور با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور، ابتدا مدل تحلیلی برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی ناشی از حرکت گهواره‌ای در سیستم مرکزگرا توسعه داده شده و با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی می‌شود. سپس پایه‌های بتنی سه پل موجود در کشور به صورت سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شده و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سیستم مرکزگرا با وجود افزایش بیشینه تغییر مکان نسبت به سیستم متداول، تغییر مکان پسماند به شدت کاهش می‌یابد. کاهش قابل توجه تغییر مکان پسماند باعث کاهش خسارات لرزه‌ای می‌شود و امکان بهره برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌کند.

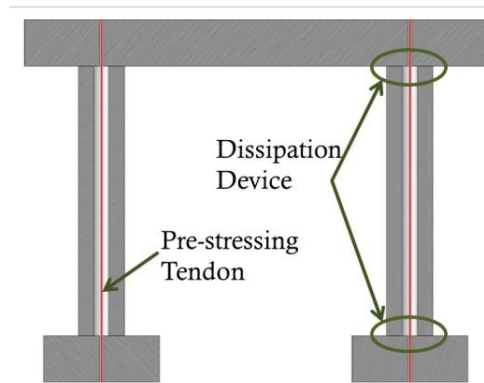
۱- مقدمه

لرزه‌خیز، پل‌های بزرگراهی معمولاً طوری طراحی می‌شوند که مفاصل پلاستیک در ستون‌ها تشکیل شوند و انتظار می‌رود که ستون‌ها در هنگام وقوع زمین‌لرزه شدید دچار تغییر شکل‌های غیرالاستیک بزرگی شوند که منجر به تغییر مکان دائمی یا پسماند در پایه پل می‌گردد. تغییر مکان پسماند پایه پل یکی از پارامترهای بسیار مهم و تعیین کننده برای احراز شرایط سرویس‌دهی پل بعد از زلزله است و مشخص می‌کند که آیا یک پل پس از زلزله قابل استفاده است یا خیر. به عنوان مثال، پس از زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ میلادی، بیش از صد پل با دریافت پسماند فراتر از ۱/۷۵٪ برای اجرای عملیات بازسازی

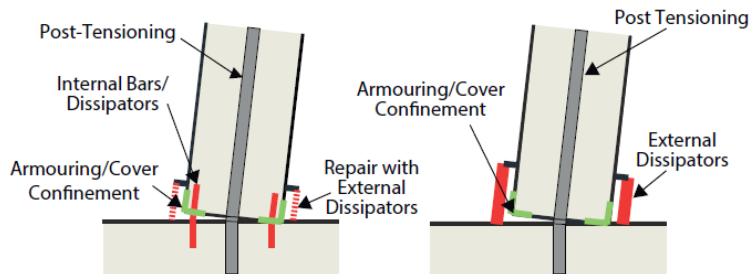
وضعیت ایمنی لرزه‌ای و تاب‌آوری شبکه راه‌ها با توجه به خطر نسبتاً زیاد زلزله در کشور و لزوم استفاده از این شبکه برای کمک رسانی پس از زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پل‌های بزرگراهی از عناصر حیاتی این شبکه محسوب می‌شوند و خسارت لرزه‌ای به هر یک از پل‌های درون این شبکه می‌تواند به شدت جریان ترافیک را مختل کند و این موضوع بر اقتصاد منطقه، پاسخهای اضطراری بعد از زلزله و عملیات تعمیر و بازسازی تاثیر زیادی می‌گذارد. در مناطق

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vasseghi@iiees.ac.ir





شکل ۱. سیستم سازه‌ای مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای
Fig. 1. Self-centering rocking system



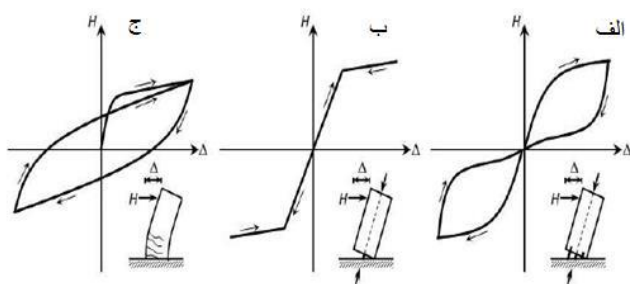
شکل ۲. میراگرهای داخلی و خارجی [۳]
Fig. 2. Internal and external dissipators

طول ستون به صورت غیرچسبیده^۳ و داخل غلاف قرار می‌گیرند و به همراه بارهای ثقلی (وزن عرشه پل) باعث برگشت پایه پل به حالت اولیه می‌شوند. استفاده از تاندون غیرچسبیده برای جلوگیری از افزایش بیش از حد تنش در هنگام زلزله و توزیع یکنواخت کرنش در طول تاندون می‌باشد. همچنین برای جذب انرژی لرزه‌ای معمولاً در محل اتصالات از میراگرهای داخلی و یا خارجی استفاده می‌شود (شکل ۲). برای میراگر خارجی معمولاً از عناصر کمانش تاب (BRB) و برای میراگر داخلی از میلگردهای نسبتاً قطور که با تزریق گروت درون غلاف محل استقرار آنها مهار می‌شوند، استفاده می‌گردد. به منظور کاهش تمرکز تنش و شکست زود هنگام میلگردهای داخلی، بخشی از طول میلگرد در مجاورت اتصال با استفاده از نوار مناسب دورپیچ می‌شود تا از چسبندگی میلگرد با گروت جلوگیری گردد [۳]. این عدم چسبندگی باعث توزیع یکنواخت کرنش و کاهش تمرکز

تخریب شدند، اگر چه اغلب این پل‌ها به لحاظ ایستایی از استحکام کافی برخوردار بودند [۱]. همچنین تغییر مکان پسماند پایه پل یک پارامتر مهم برای برآورد مقاومت پس از زلزله و اطمینان از ایستایی سازه پل در برابر پس‌لرزه‌ها محسوب می‌شود [۲].

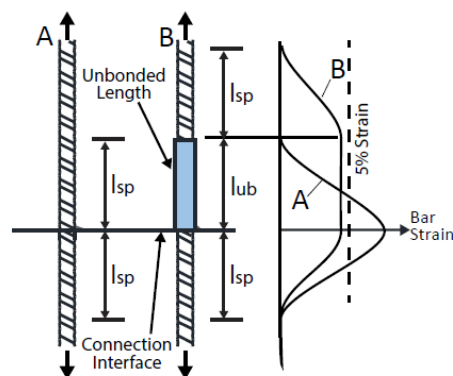
اثرات تغییر مکان پسماند بر عملکرد پس از زلزله پل، جوامع علمی را به سمت توسعه سیستم‌هایی با تغییر مکان پسماند کم و خسارت محدود، همراه با هدایت انرژی لرزه‌ای به سمت اعضای قابل تعویض سوق داده است. یکی از رویکردهای نوین برای طراحی و ساخت پایه پل‌ها، استفاده از سیستم‌های مرکزگرا^۱ مبتنی بر حرکت گهواره‌ای^۲ می‌باشد. در این نوع سیستم سازه‌ای، ستون‌ها و تیر سرستون پایه میانی به صورت پیش ساخته آماده می‌شوند و با استفاده از کابل‌های پیش تنیده به یکدیگر و به فونداسیون متصل می‌گردند (شکل ۱). در این سیستم، تاندون‌های پیش تنیدگی در

1 Self-centering
 2 Rocking



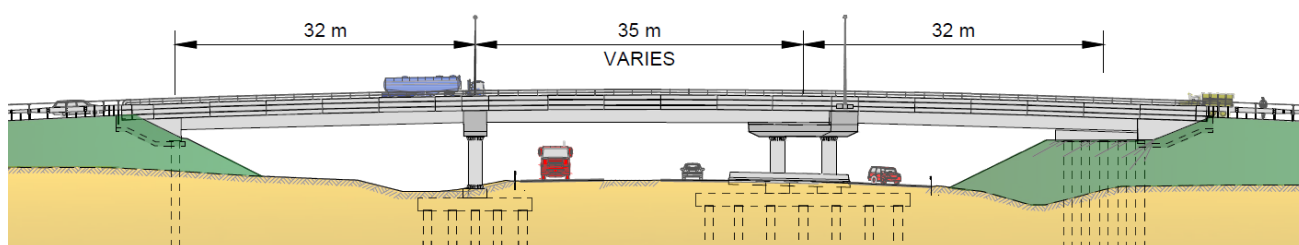
شکل ۴. مقایسه نمودارهای هیستریزس سیستم مرکزگرا با میراگر و بدون میراگر با سیستم متداول [۴]

Fig. 4. Hysteresis response of self-centering and conventional systems



شکل ۳. توزیع کرنش در میلگرد داخلی [۳]

Fig. 3. Rebar strain distributions at interface



شکل ۵. پل ارتباطی ویگدام-ماگدالا در کشور نیوزلند [۵]

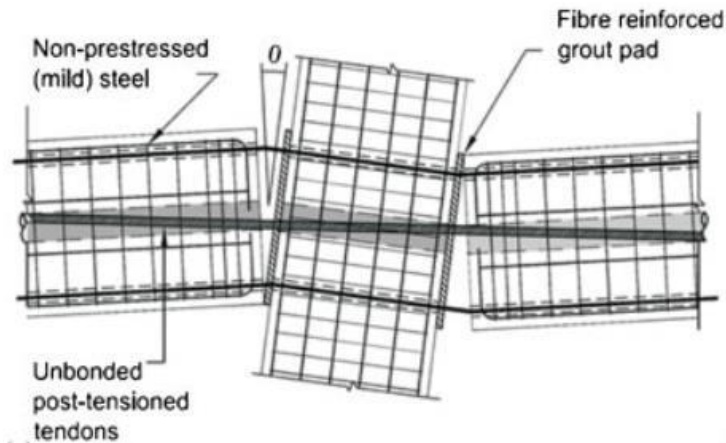
Fig. 5. Wigram-Magdala link bridge in New Zealand

نیوزیلند، ژاپن و آمریکا در مورد انواع سیستم‌های سازه‌ای مرکزگرا برای پل‌ها انجام شده است که نتایج آن‌ها نوید استفاده از این سیستم‌ها را در مناطق لرزه‌ای می‌دهد. همچنین در سال ۲۰۱۶ میلادی و بر اساس تحقیقاتی که در دانشگاه کنتابری انجام شد [۵]، برای اولین بار یک پل در نیوزیلند [۶] با استفاده از این نوع سیستم ساخته شد (شکل ۵). این پل زلزله ۱۴ نوامبر ۲۰۱۶ کیاکورا را بدون هیچگونه خسارتی تجربه کرده است [۵].

در این مقاله به منظور تسهیل پذیرش به موقع فناوری سیستم مرکزگرا توسط مهندسين پل در ایران، عملکرد لرزه‌ای این سیستم با سیستم متداول سازه‌ای برای سه پل موجود در کشور با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای این منظور، ابتدا یک مدل تحلیلی برای شبیه سازی حرکت گهواره‌ای توسعه داده شده و با نتایج آزمایشگاهی یک نمونه سیستم مرکزگرا صحت سنجی می‌شود. سپس پایه‌های بتنی سه پل موجود در کشور به صورت سیستم متداول و سیستم مرکزگرا

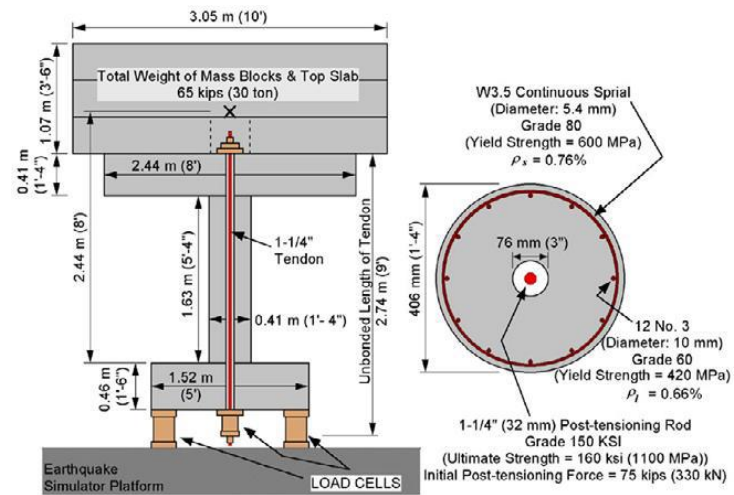
تنش در هنگام حرکت گهواره‌ای می‌شود (شکل ۳). استفاده از سیستم مرکزگرا خسارت ناشی از زلزله و جابجایی پسماند را به شدت کاهش می‌دهد. در شکل ۴ نمودار هیستریزس سیستم متداول سازه‌ای با نمودارهای سیستم مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای مقایسه شده‌اند. در سیستم متداول سازه‌ای جابجایی پسماند نسبتاً زیاد و خسارت به سازه اصلی می‌باشد در صورتی که در سیستم مرکزگرا جابجایی پسماند و احتمال خسارت به سازه اصلی بسیار ناچیز است. در حالتی که از میراگر در سیستم مرکزگرا استفاده شود، نمودار هیستریزس به صورت پرچمی است و علاوه بر برگشت پذیری، این سیستم قابلیت جذب انرژی لرزه‌ای را نیز دارا می‌باشد [۴]. همچنین به دلیل به کارگیری قطعات پیش ساخته، سرعت ساخت پل در سیستم مرکزگرا نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

اخیراً مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی گسترده‌ای در کشورهای



شکل ۶. سیستم مرکزگرا در ساختمان [۷]

Fig. 6. Self-centering system in buildings



شکل ۷. آزمایش پایه تک ستونه پل بر روی میز لرزان [۱۷]

Fig. 7. Shake table test of a bridge pier

مطالعه چندین سیستم لرزه‌ای جدید برای ساختمان‌های پیش ساخته بتنی در مقیاس بزرگ مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۶ یکی از این سیستم‌ها که در آن از تاندون‌های غیرچسبیده^۲ به عنوان تنها وسیله اتصال تیر و ستون پیش ساخته استفاده شده است را نشان می‌دهد. رفتار تیر و ستون در این سیستم کاملاً صلب است و رفتار غیرخطی تحت بارگذاری چرخه‌ای ناشی از باز و بسته شکاف در محل تلاقی این دو عضو متمرکز می‌باشد. چندین مطالعه تحلیلی در مورد مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای قاب‌هایی با این نوع اتصالات توسط تعدادی از محققان انجام شده است [۸-۱۱].

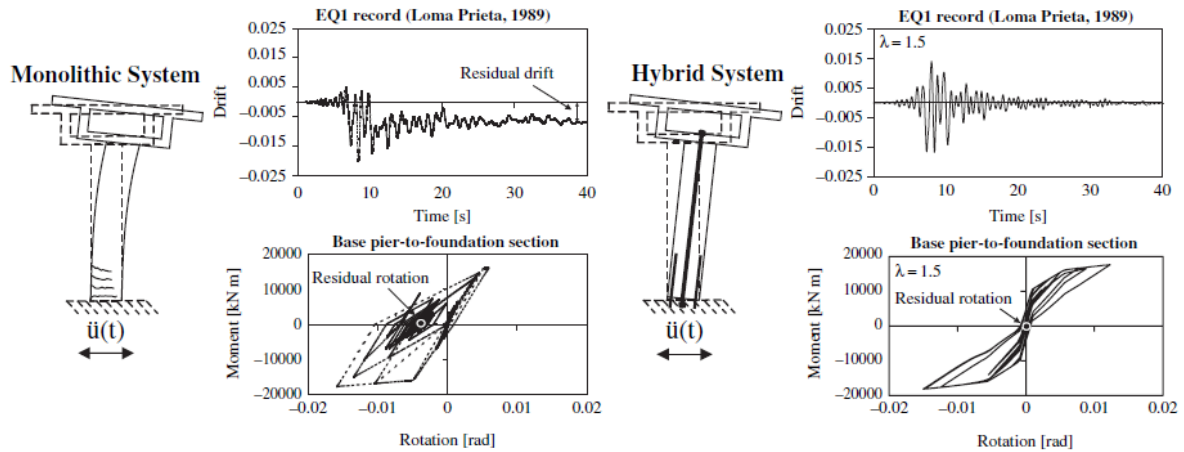
مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

۲- مروری بر ادبیات فنی

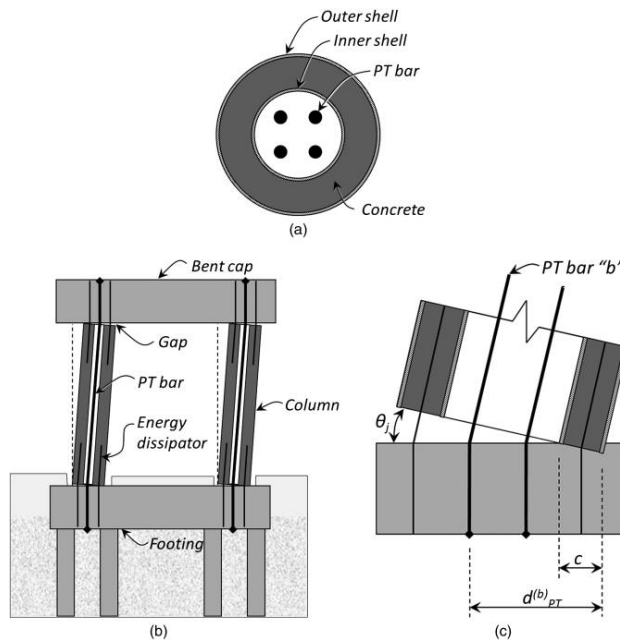
در سال‌های اخیر توسعه سیستم‌های مرکزگرا یا به عبارتی سیستم‌های برگشت‌پذیر با خسارت محدود به منظور کاهش جابجایی پسماند و خسارت سازه‌ای در کانون توجه پژوهشگران مهندسی زلزله بوده است. برنامه تحقیقاتی سیستم‌های پیش ساخته لرزه‌ای^۱ [۷]، اولین مطالعات کاربردی در مورد چنین سیستمی می‌باشد. در این

2 Unbonded

1 Precast Seismic Structural Systems (PRESS)



شکل ۸. مقایسه رفتار سیستم یکپارچه معمولی با سیستم مرکزگرا [۲۰]
 Fig. 8. Comparison of behavior of self-centering and conventional systems

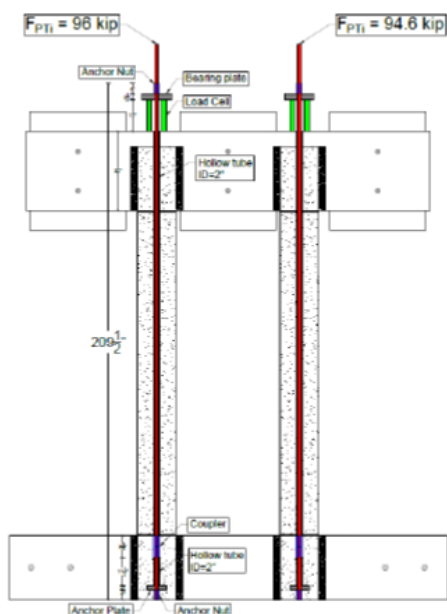


شکل ۹. سیستم مرکزگرا گیورینی و همکاران [۲۸]
 Fig. 9. Self-centering column proposed by Guerrini et al.

۲۰۰۴ میلادی تاکنون تعداد زیادی مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی [۱۷-۳۲] به منظور توسعه سیستم‌های ترکیبی برای طراحی و ساخت پل‌ها انجام شده است. در ادامه چند نمونه از این مطالعات تشریح می‌گردد.

ساکای و مهین [۱۷] در سال ۲۰۰۴ میلادی بر اساس مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیرامون رفتار دینامیکی ستون‌های پیش ساخته و پیش تنیده پایه پل، توصیه‌هایی برای طراحی این نوع ستون‌ها شامل جایگزین نمودن آرماتورهای طولی با یک تاندون در

سیستم‌های مرکزگرا مبتنی بر حرکت گهواره‌ای با استفاده از پیش تنیدگی عمودی در ستون پایه پل‌ها از سال ۱۹۹۷ میلادی در تحقیقات زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این تحقیقات ابتدا بر روی سیستم‌های مرکزگرا بدون میراگر متمرکز بوده است [۱۶-۱۲] و سپس از سال ۲۰۰۴ میلادی سیستم‌های ترکیبی (هیبرید) متشکل از سیستم مرکزگرا و سیستم مستهلک کننده انرژی با استفاده از میلگردهای داخلی یا میراگرهای خارجی توسعه داده شدند. از سال



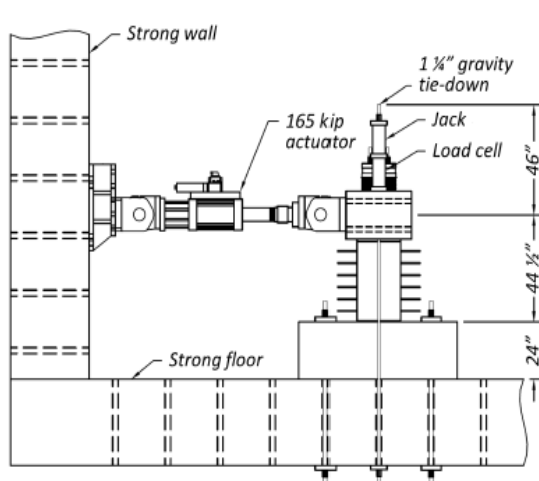
شکل ۱۰. نمونه آزمایشگاهی نما [۳۱]
Fig. 10. Specimen tested by Nema



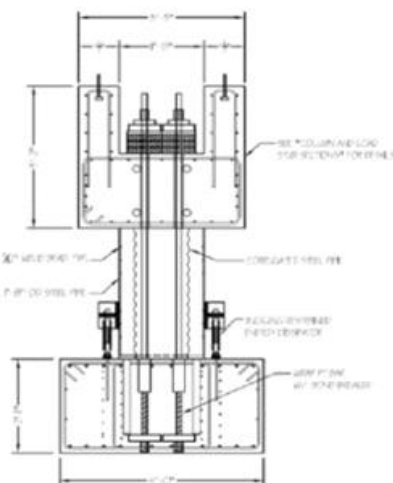
شکل ۱۱. نمونه آزمایشگاهی مشعل و پالرمو [۳۲]
Fig. 11. Specimen tested by Mashal and Palermo

بدون افزایش قابل ملاحظه بیشینه جابجایی را تأیید کردند. پالرمو و همکاران [۲۰-۱۸] سیستم‌های مرکزگرای هیبرید^۱ متشکل از تاندون غیرچسبیده در مرکز ستون و میلگردهای داخلی برای استهلاک انرژی را به عنوان یک راه حل مناسب و کارآمد برای عملکرد مناسب لرزه‌ای پایه پل در مقایسه با سیستم‌های یکپارچه معمولی گسترش دادند. پالرمو و پامپانین [۲۰] با مدل‌سازی عددی

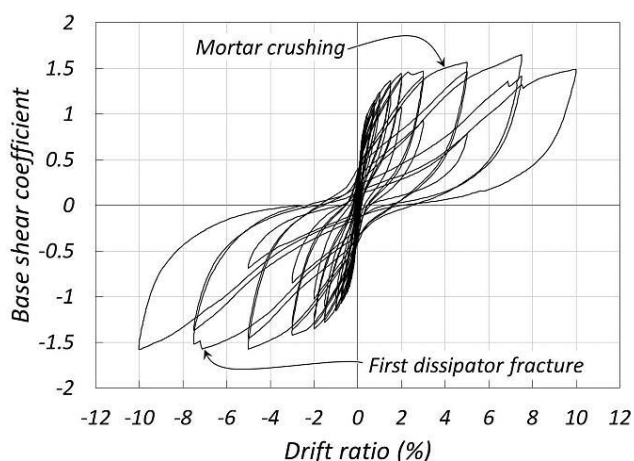
مرکز ستون ارائه نمودند. تحلیل‌های تاریخچه زمانی در این مطالعه نشان دادند که در مقایسه با ستون‌های معمولی، بیشینه جابجایی تقریباً یکسان ولی جابجایی پسماند به طور قابل توجهی کمتر است. نمونه‌های آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ بر اساس رهنمودهای به دست آمده از مطالعات تحلیلی طراحی شدند و بر روی یک میز لرزان و در سطوح مختلف شدت لرزه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۷). این آزمایش‌ها نتایج تحلیل‌ها مبنی بر کاهش جابجایی پسماند



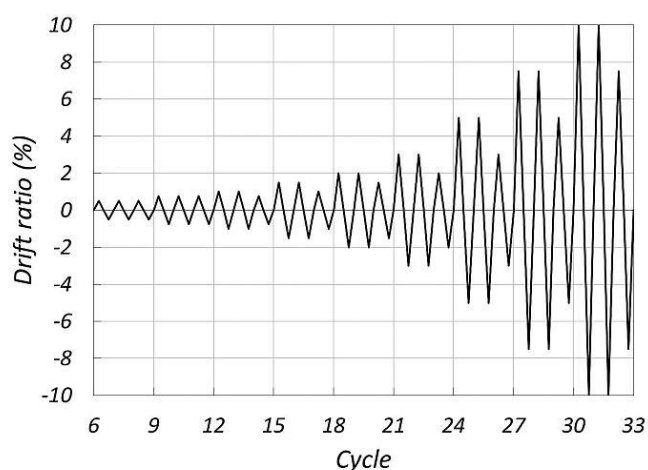
شکل ۱۲. نمای کلی نمونه آزمایشگاهی و ابزاربندی آزمایش [۴]
Fig. 12. Test setup and specimen



شکل ۱۳. پروتکل بارگذاری نمونه آزمایشگاهی [۴]
Fig. 13. Loading protocol



شکل ۱۴. منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی [۴]
Fig. 14. Hysteresis curves of test specimen



گزارش گردید.
گیورینی و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۵ میلادی یک سیستم مرکزگرا که از ستون دو جداره غلافدار فولادی و بتن محصور شده استفاده شده بود (شکل ۹) را تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار دادند. در این مطالعه از هر دو نوع مستهلک کننده انرژی (میلگردهای داخلی و میراگرهای خارجی) استفاده گردید. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که خسارت ایجاد شده در ستون بسیار

و تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، رفتار پل‌های تک ستونه چند دهانه با سیستم مرکزگرا و سیستم یکپارچه معمولی را مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی پارامترهای اصلی موثر بر رفتار این نوع پل پرداختند (شکل ۸). در این مطالعه تحلیل‌های پارامتریک با متغیرهای مختلف از قبیل توزیع ارتفاع پایه در پیکربندی نامنظم پل، سختی عرشه و کوله انجام شد. همچنین تأثیرات P-D و شدت زلزله بر پاسخ کلی پل بررسی شد و عملکرد بهتر سیستم مرکزگرا

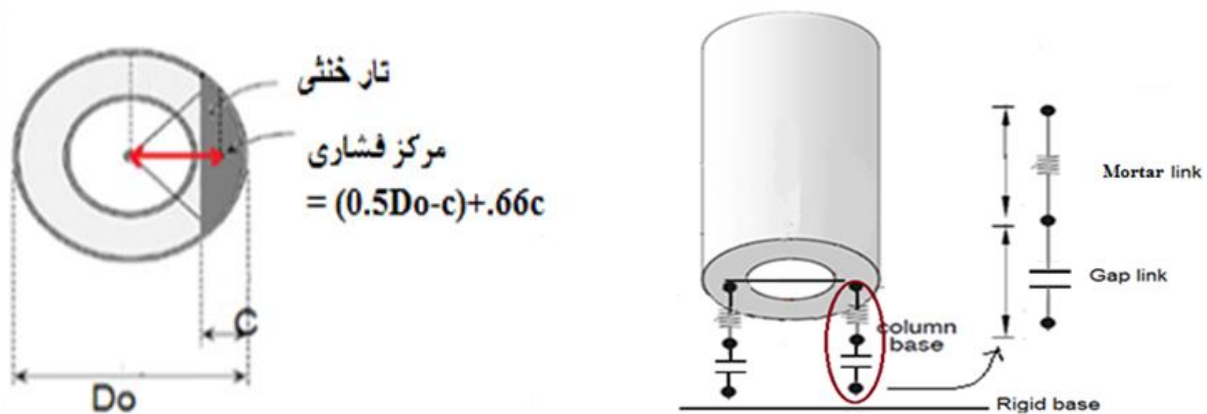


ب- میراگر



الف- ملات

شکل ۱۵. تصاویر خرابی در نمونه آزمایشگاهی [۴]
Fig. 15. Pictures of damages in test specimen



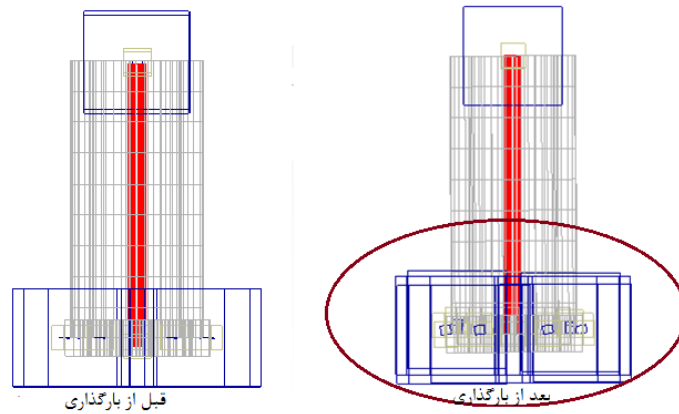
شکل ۱۶. نحوه مدل سازی لایه ملات زیر ستون
Fig. 16. Modeling of mortar bed

فونداسیون خیلی خوب ارزیابی شد. نتایج حاصل از این آزمایش برای توسعه یک مدل تحلیلی و سپس برای مطالعه ضوابط طراحی این ستون و فونداسیون رخ می‌دهد. در این مطالعه ضوابط طراحی این سیستم توسعه داده شده‌اند.

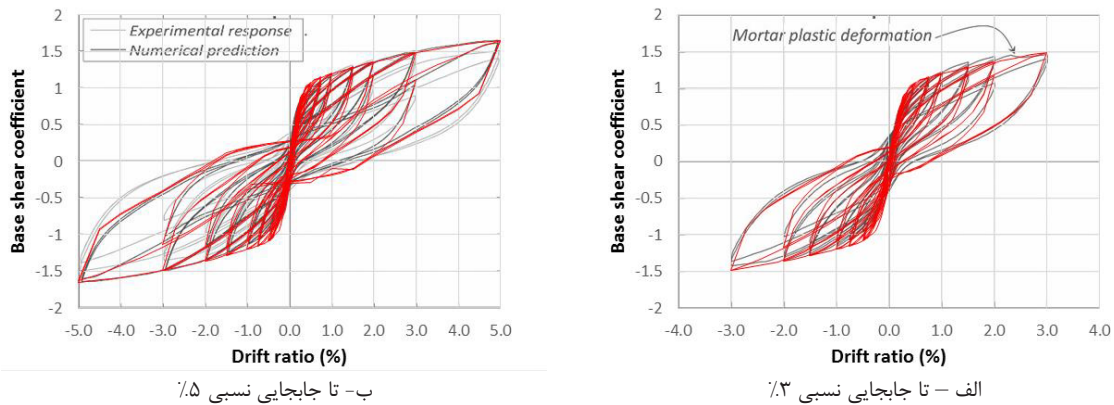
نما [۳۱] در سال ۲۰۱۸ میلادی پایه دو ستونه یک پل مرکزگرا را در مقیاس ۳۵٪ بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار داد (شکل ۱۰). نمونه آزمایشگاهی از دو ستون فولادی پر شده با بتن، تاندون‌های پیش تنیده، تیر سرستون و فونداسیون پیش ساخته تشکیل شده بود. همچنین از میلگردهای داخلی به عنوان میراگر استفاده شده و تاندون‌ها تا ۴۰٪ ظرفیت‌شان پیش تنیده شده بودند. در مجموع ۱۲ رکورد لرزه‌ای سه محوره شامل سه رکورد با شدت بیش از زلزله سطح طراحی به این نمونه وارد گردید. به طور کلی عملکرد این نمونه با خسارت بسیار محدود در نقاط تقاطع ستون‌ها با تیر سرستون و

محدود است و خسارت اصلی در میراگرها و لایه ملات حد فاصل بین ستون و فونداسیون رخ می‌دهد. در این مطالعه ضوابط طراحی این سیستم توسعه داده شده‌اند.

نما [۳۱] در سال ۲۰۱۸ میلادی پایه دو ستونه یک پل مرکزگرا را در مقیاس ۳۵٪ بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار داد (شکل ۱۰). نمونه آزمایشگاهی از دو ستون فولادی پر شده با بتن، تاندون‌های پیش تنیده، تیر سرستون و فونداسیون پیش ساخته تشکیل شده بود. همچنین از میلگردهای داخلی به عنوان میراگر استفاده شده و تاندون‌ها تا ۴۰٪ ظرفیت‌شان پیش تنیده شده بودند. در مجموع ۱۲ رکورد لرزه‌ای سه محوره شامل سه رکورد با شدت بیش از زلزله سطح طراحی به این نمونه وارد گردید. به طور کلی عملکرد این نمونه با خسارت بسیار محدود در نقاط تقاطع ستون‌ها با تیر سرستون و



شکل ۱۷. مدل تحلیلی نمونه آزمایشگاهی
Fig. 17. Analytical model of test specimen



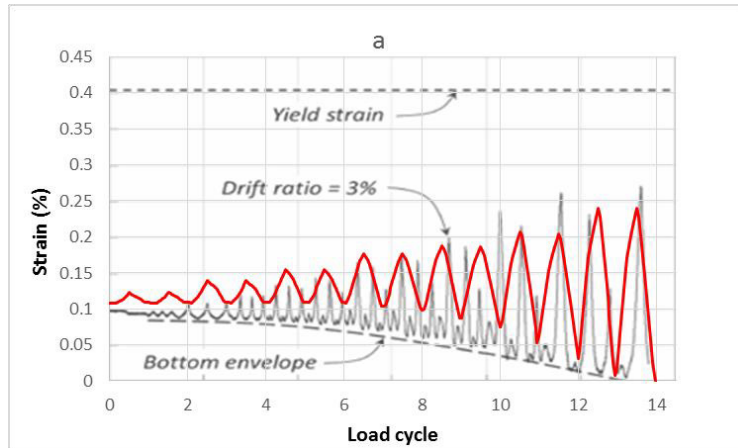
شکل ۱۸. مقایسه منحنی هیستریزیس مدل تحلیلی با نمونه آزمایشگاهی
Fig. 18. Comparison of analytical and experimental hysteretic curves

۳۶۰ میلی‌متر و ۴ عدد تاندون A722 به قطر ۳۵ میلیمتر و نیروی موثر پیش تنیدگی ۸۴۵ کیلونیوتن می باشد. در امتداد هر تاندون پنج حلقه الاستومر به صورت سری با سختی محوری ۱۴۶ مگانیوتن بر متر قرار داده شده است. همچنین از یک لایه ملات فیبردار در محل اتصال ستون به فونداسیون استفاده شده است. ضخامت این لایه ۱۲/۷ میلیمتر و مقاومت فشاری آن ۵۰ مگاپاسکال است. به منظور استهلاک انرژی از ۶ عدد میراگر خارجی BRB با هسته مرکزی به قطر ۱۴/۳ میلیمتر و ارتفاع ۱۶۵ میلیمتر و فولاد A576 با مقاومت تسلیم ۳۳۱ مگاپاسکال استفاده شده است. مقاومت تسلیم هر دو جداره ستون ۳۴۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری بتن محصور شده بین این دو جداره ۶۵ مگاپاسکال می‌باشند. بارگذاری جانبی این نمونه آزمایشگاهی به صورت چرخه‌ای و

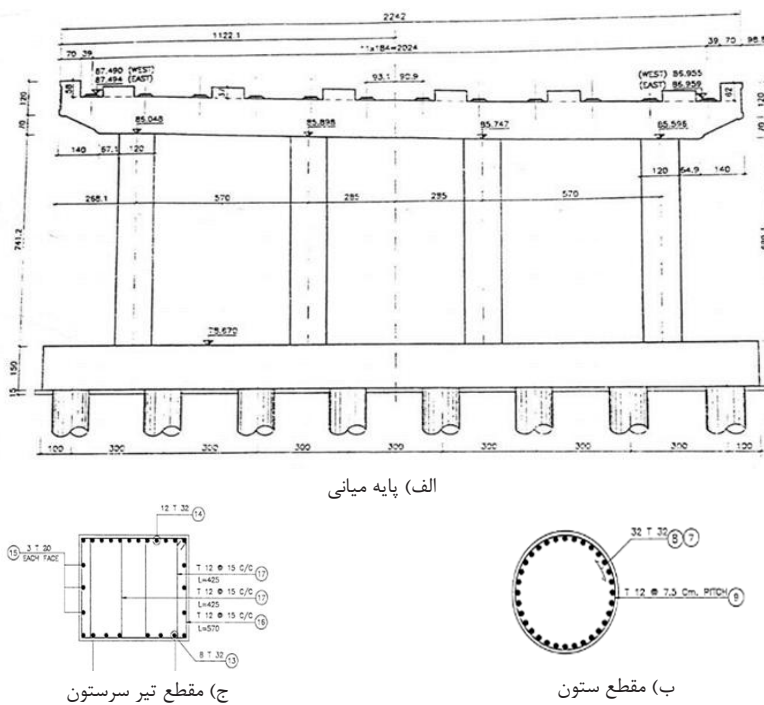
زیادی چرخه‌های بارگذاری در دریفت بالا، هیچ خسارت و جابجایی پسماندی در نمونه مشاهده نگردید.

۳- شبیه‌سازی حرکت گهواره‌ای سیستم مرکزگرا

برای توسعه مدل تحلیلی و شبیه‌سازی حرکت گهواره‌ای سیستم مرکزگرا، سیستم پیشنهادی گیورینی و همکاران [۲۸] و [۴] و نتایج آزمایشگاهی یک نمونه ستون مرکزگرا با میراگر خارجی جهت صحت‌سنجی مدل تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه آزمایشگاهی نیمه پایین یک ستون از پایه پل تحت بار جانبی چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. نمای کلی نمونه آزمایشگاهی و ابزاربندی آزمایش در شکل (۱۲) ارائه شده است. نمونه آزمایشگاهی شامل یک ستون دو جداره با قطر خارجی ۵۶۰ میلی‌متر و قطر داخلی



شکل ۱۹. مقایسه کرنش تاندون در مدل تحلیلی و نمونه آزمایشگاهی
Fig. 19. Comparison of analytical and experimental response of tendons



شکل ۲۰. پایه میانی پل شماره ۱
Fig. 20. Middle bend in bridge 1

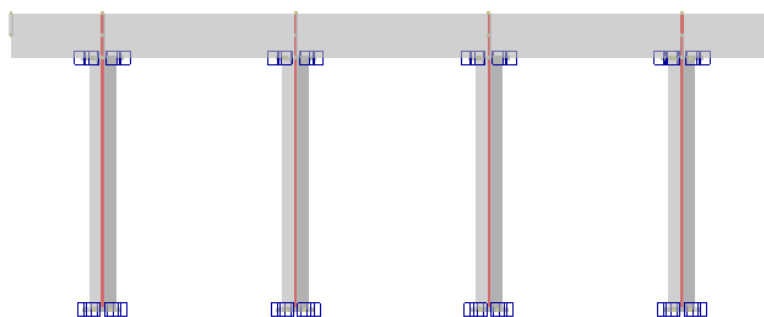
برای مدل سازی نمونه آزمایشگاهی از نرم افزار سائزمواستراکت^۱ [۳۳] استفاده گردید. در مدل تحلیلی، رفتار غیرخطی ناشی از حرکت گهواره‌ای، جاری شدن میراگرها، و خرد شدن مصالح در محل تلاقی ستون با فونداسیون در نظر گرفته شد. در این مدل، ستون غلاف دار با المان الاستیک، تاندون‌ها با المان محوری غیر خطی، الاستومرها با

مطابق با شکل ۱۳ انجام شده است. منحنی هیستریزیس این نمونه در شکل ۱۴ ارائه شده است. در این آزمایش خسارت ایجاد شده در ستون بسیار محدود بود و خسارت اصلی در لایه ملات و میراگرها رخ داد. شروع خردشدگی لایه ملات در دررفت ۴ درصد و اولین شکست در میراگر BRB در دررفت ۶/۵ درصد اتفاق افتاد. تصاویر خرابی در لایه ملات و میراگر در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات رکوردهای زلزله

Table 1. Earthquake records

فاصله (km)	PGVmax (cm/s)	PGAmax (g)	بزرگای لرزه‌ای (M)	ایستگاه	زلزله	شماره
۴/۵	۸۲/۱	۰/۶۳	۷/۰	Petrolia	Cape Mendocino	۱
۱/۶	۷۹/۳	۰/۵۲	۷/۱	Duzce,	Duzce, Turkey	۲
۲۷/۲	۵۵/۶	۰/۳۸	۶/۹	Saratoga - Aloha	Loma prieta	۳
۵/۳	۲۹/۸	۰/۲۲	۷/۵	Izmit	Kocaeli	۴
۱۶/۸	۱۲۲/۸	۰/۷۳	۶/۷	Sylmar - Olive View	northridge	۵
۸/۷	۳۷/۰	۰/۵۱	۶/۹	KJMA	kobe	۶
۲۷/۵	۱۱۱/۹	۰/۴۴	۶/۵	El Centro Array #6	Imperial valley	۷



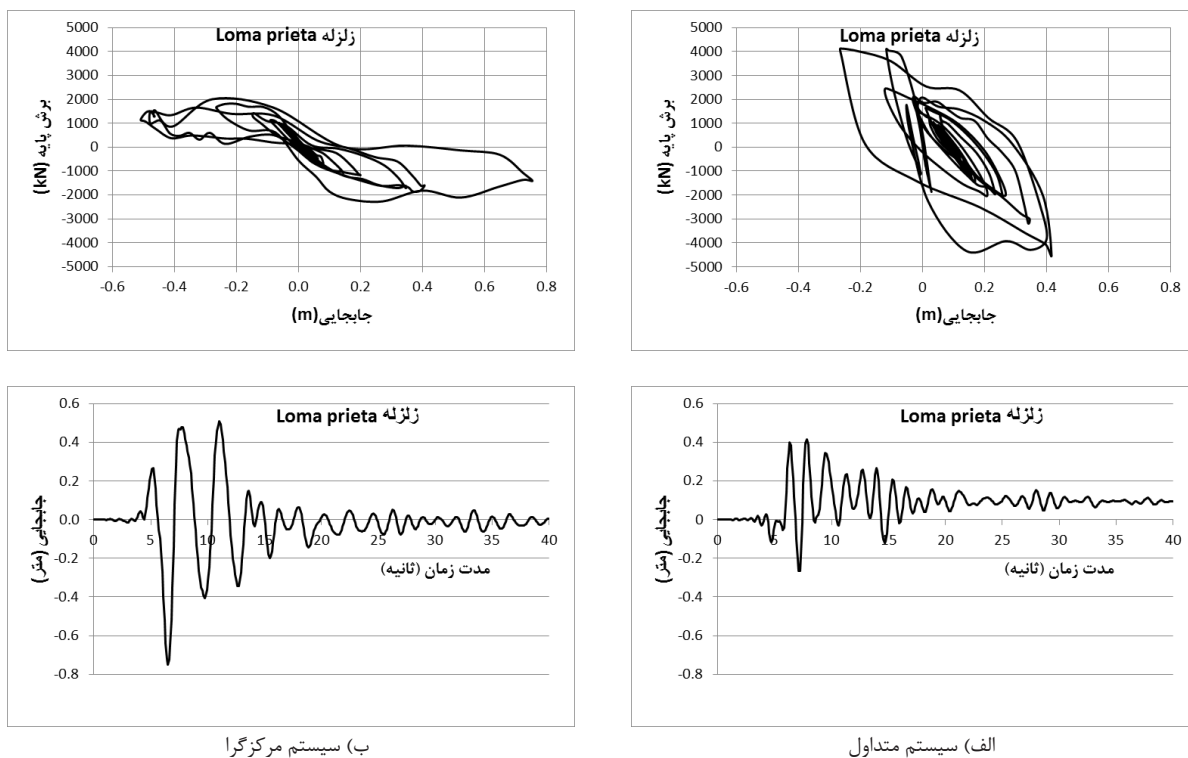
شکل ۲۱. مدل تحلیلی پایه میانی پل شماره ۱

Fig. 21. Analytical model of middle bend in bridge 1

می‌دهد. در این شکل آلمان‌های بدون بعد گپ و فنر با مربع آبی رنگ نشان داده شده‌اند و جابجایی ماندگار پس از بارگذاری چرخه‌ای در آلمان‌هایی که برای مدل‌سازی میراگرها و لایه ملات در پای ستون استفاده شده است کاملاً مشهود است.

اهم نتایج صحت سنجی مدل تحلیلی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده‌اند. در شکل ۱۸ منحنی هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی با نتایج تحلیل در محدوده جابجایی نسبی ۳٪ و ۵٪ مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که در محدوده جابجایی نسبی ۳٪، منحنی‌های هیستریزیس مدل تحلیلی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در این محدوده سختی اولیه، مقاومت، سختی باربرداری و سختی بارگذاری مجدد با خطای کمتر از ۱۰ درصد با نتایج آزمایشگاهی مطابقت می‌کند. در جابجایی نسبی ۵٪، میزان خطا در برآورد مقاومت ۱۲ درصد است ولی میزان خطا در برآورد سختی بارگذاری و باربرداری همچنان کمتر از ۱۰ درصد است. در شکل ۱۹ تغییرات کرنش تاندون

یک فنر معادل الاستیک، و میراگرها با فنرهای غیرخطی مدل‌سازی شدند. برای مدل‌سازی لایه ملات از دو آلمان گپ و فنر غیرخطی به صورت سری استفاده شد (شکل ۱۶). مدل‌سازی ستون با استفاده از آلمان میله‌ای و تعریف مقطع دو جداره فولادی-بتنی برای این آلمان انجام شد و برای لحاظ کردن خروج از مرکز آلمان‌های ملات و میراگر و اتصال آن‌ها به ستون از آلمان صلب استفاده گردید. مشخصات مصالح ستون و فنرهای خطی و غیرخطی (الاستومر و میراگر) مطابق مشخصات نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. برای شبیه‌سازی ۴ تاندون از یک تاندون معادل در مرکز ستون استفاده گردید و پیش‌تندگی اولیه با اعمال جابجایی به انتهای تحتانی آن صورت گرفت. هر دو گره آلمان‌های گپ و فنرهای غیرخطی و خطی که برای شبیه‌سازی ملات، میراگر و الاستومر مورد استفاده قرار گرفتند، بر روی یکدیگر قرار دارند و لذا این آلمان‌ها بدون بعد می‌باشند. شکل ۱۷ جانمایی آلمان‌های مدل تحلیلی را قبل و بعد از بارگذاری جانبی نشان



شکل ۲۲. نمونه منحنی هیستریزیس پایه پل و نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۱
Fig. 22. Hysteresis curves and displacement response of bend in bridge 1

تحلیل‌ها از شتاب‌نگاشت هر رکورد (بدون مقیاس طیفی) استفاده شد. پایه میانی پلها با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی شده و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شدند. در مدل مرکزگرا از سیستم پیشنهادی گیورینی و همکاران [۲۸] استفاده شده است. در این مدل ستون‌ها به صورت دو جداره با قطر خارجی ۸۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۴۴۰ میلی‌متر و ۴ عدد تاندون به قطر ۴۵ میلیمتر و نیروی موثر پیش تنیدگی ۱۶۰۰ کیلونیوتن در نظر گرفته شده‌اند. همانند نمونه آزمایشگاهی مقاومت تسلیم هر دو جداره ستون ۳۴۵ مگاپاسکال و مقاومت فشاری بتن محصور شده بین این دو جداره ۶۵ مگاپاسکال می‌باشند. همچنین از ملات فیبردار با ضخامت ۱۳ میلیمتر و مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال و ۶ عدد میراگر BRB با هسته مرکزی به قطر ۳۰ میلیمتر و ارتفاع ۴۵۰ میلیمتر در محل اتصالات ستون به تیر سرستون و فونداسیون استفاده شده است.

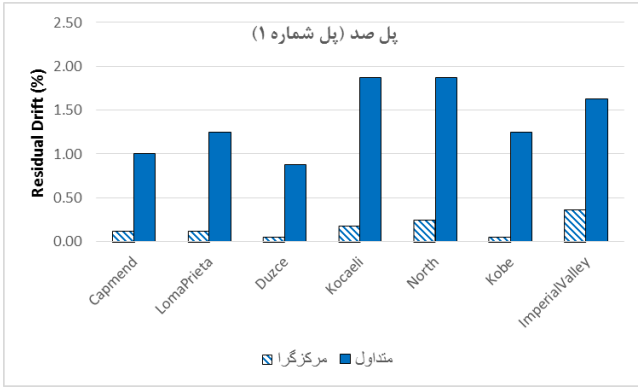
۴-۱- پل شماره ۱

پل شماره ۱ که در طرح ادامه بزرگراه رسالت تهران به بهره

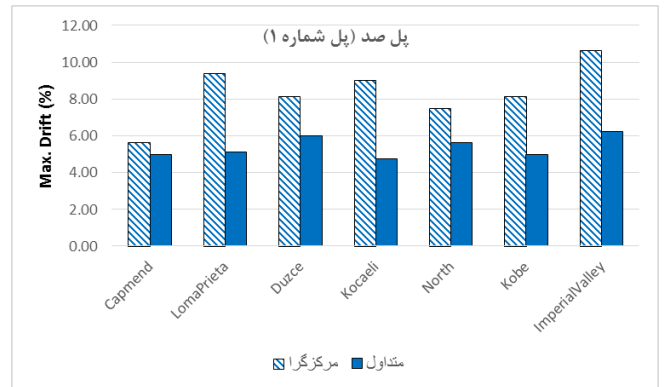
در طول آزمایش با نتایج مدل تحلیلی مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که نوسانات کرنش در هر سیکل بارگذاری قابل توجه می‌باشد و این نوسانات با افزایش جابجایی نسبی در سیکل‌های بالاتر بسیار زیاد است. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، کرنش کمینه و در نتیجه نیروی موثر تاندون به دلیل رفتار غیرخطی و نشست ملات کاهش می‌یابد. شکل ۱۹ نشان می‌دهد که مدل تحلیلی نوسانات کرنش تاندون را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند.

۴- مطالعه تحلیلی پل‌های بزرگراهی

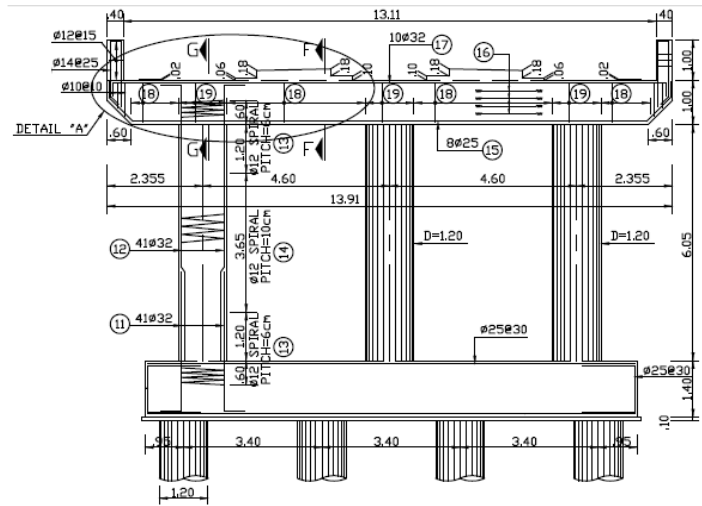
به منظور ارزیابی کاربرد و مزیت سیستم مرکزگرا برای پل‌های متداول در ایران، سه پل با تعداد دهانه‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفتند. این مطالعات با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و با اعمال ۷ رکورد زلزله به پلها و بررسی رفتار آنها صورت گرفت. مشخصات رکوردهای زلزله در جدول ۱ ارائه شده است. این رکوردها با بزرگای بیش از ۶/۵ و فاصله کانونی ۱/۶ تا ۲۷/۵ کیلومتر شامل زلزله‌های شدید در حوزه دور و حوزه نزدیک می‌باشند. برای انجام



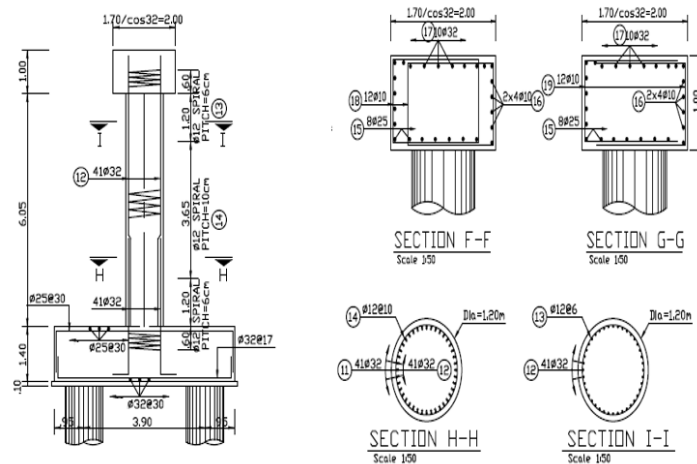
شکل ۲۴. جابجایی نسبی پسماند در پل شماره ۱
Fig. 24. Residual drift ratios in bridge 1



شکل ۲۳. بیشینه جابجایی نسبی در پل شماره ۱
Fig. 23. Peak drift ratios in bridge 1

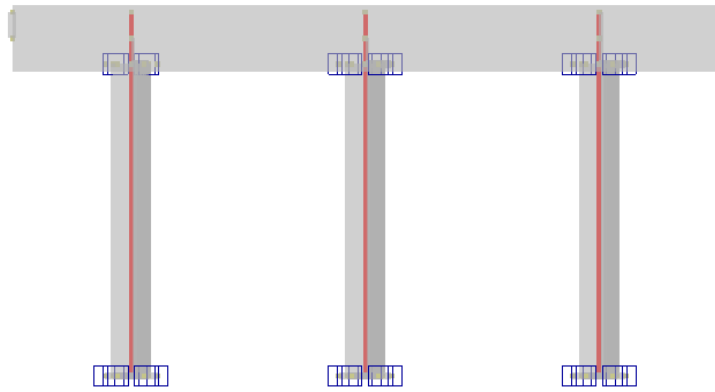


الف پایه میانی



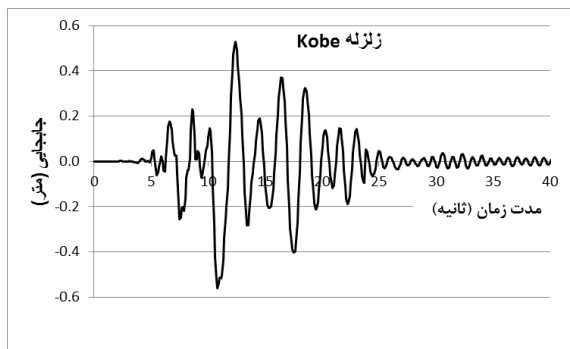
ب جزئیات آرماتور گذاری

شکل ۲۵. پایه میانی پل شماره ۲
Fig. 25. Typical bend in bridge 2

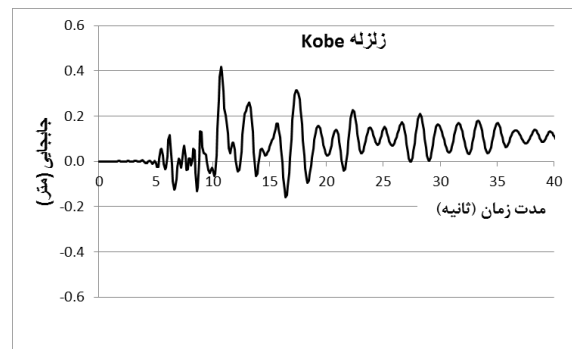


شکل ۲۶. مدل تحلیلی پایه میانی پل شماره ۲

Fig. 26. Analytical model of middle bend in bridge 2



ب) سیستم مرکزگرا



الف) سیستم متداول

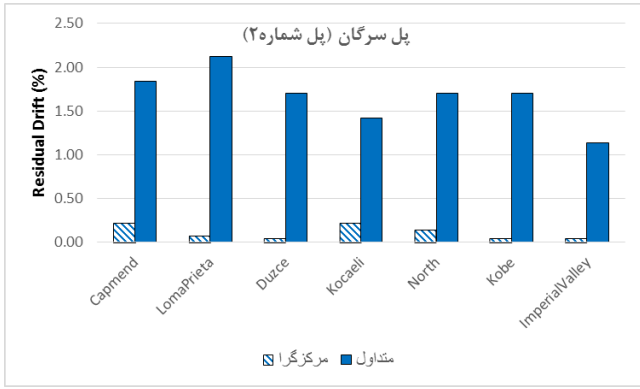
شکل ۲۷. نمونه نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۲

Fig. 27. Displacement response of bend in bridge 2

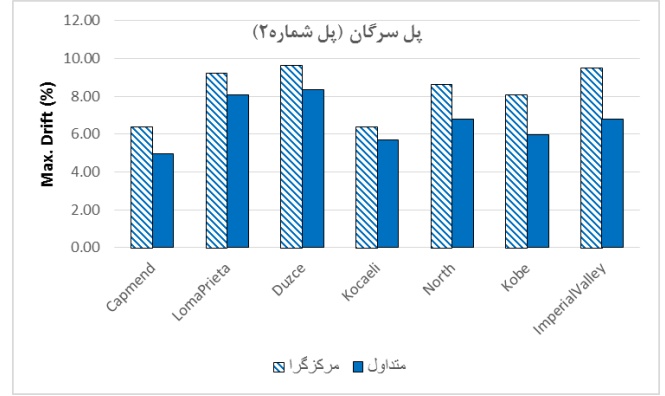
و التونتاش [۳۴] مدل‌سازی شدند. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن و میلگرد در ستون و تیر سرستون به ترتیب از مدل مندر و همکاران [۳۵] و مدل منگوتو و پینتو [۳۶] استفاده شده است. در مدل تحلیلی سیستم مرکزگرا، تیر سرستون با المان فایبر، ستون دو جداره با المان الاستیک، میراگرها با فنرهای غیرخطی و تاندون‌ها با المان محوری غیرخطی مدل‌سازی شدند. مدل‌سازی حرکت گهواره‌ای ستون‌ها و رفتار غیر خطی لایه ملات در بالا و پایین ستون نیز همانند آنچه در بند ۳ تشریح شده است انجام شد. برای شبیه‌سازی ۴ تاندون از یک تاندون معادل در مرکز ستون استفاده گردید و پیش‌تنیدگی اولیه با اعمال جابجایی به انتهای تحتانی آن صورت گرفت. مدل پایه پل مرکزگرا در شکل ۲۱ ارائه شده است. در هر دو مدل تحلیلی از بار

برداری رسیده است با طول کل ۸۸ متر و عرض ۲۲/۴ متر دارای دو دهانه میانی ۲۵ متری و دو دهانه کناری ۱۹ متری می‌باشد. تابلیه پل از نوع تیر و دال بتنی شامل ۱۲ عدد تیر پیش‌ساخته و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر است. پایه‌های میانی شامل ۴ عدد ستون بتن مسلح با قطر ۱/۲ متر و سرستون به ارتفاع ۱/۰ متر می‌باشد (شکل ۲۰). مقاومت مشخصه ی بتن پایه پل ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و آرماتور مصرفی از نوع آجدار A3 با مقاومت جاری شدن ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

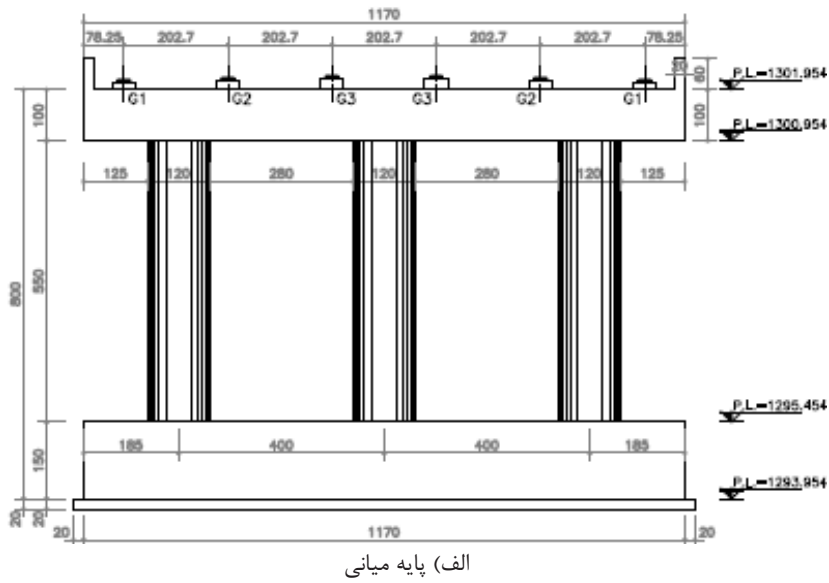
پایه میانی این پل با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شدند. در مدل تحلیلی سیستم متداول، ستون و تیر سرستون با استفاده از المان‌های فایبر و اتصالات با روش لوز



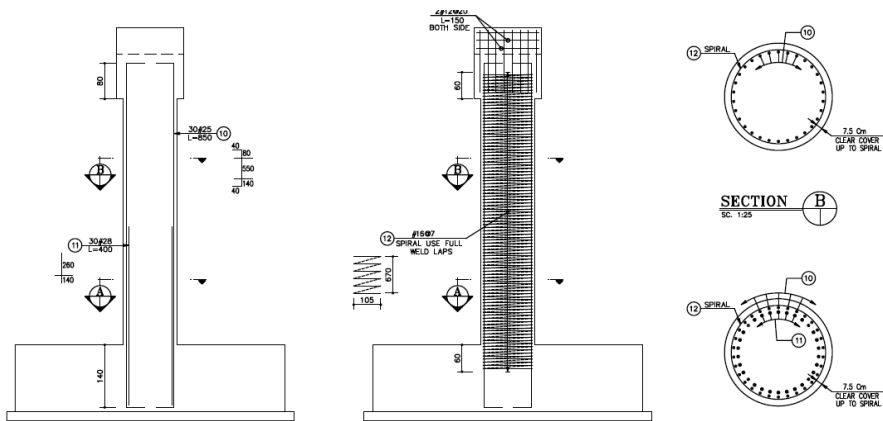
شکل ۲۹. جابجایی نسبی پسماند در پل شماره ۲
Fig. 29. Residual drift ratios in bridge 2



شکل ۲۸. بیشینه جابجایی نسبی در پل شماره ۲
Fig. 28. Peak drift ratios in bridge 2

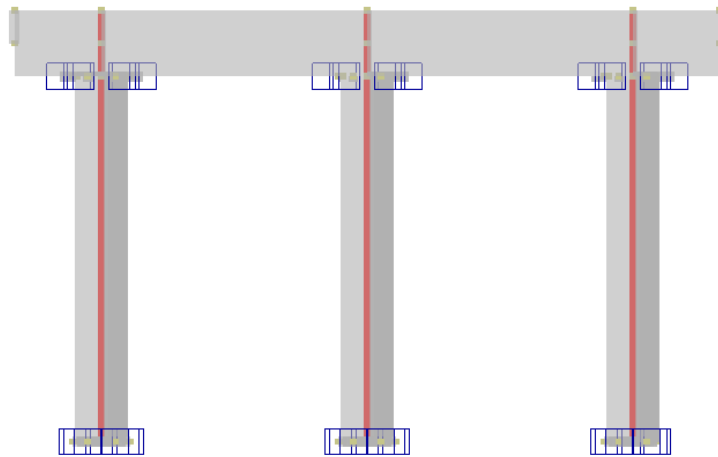


الف) پایه میانی



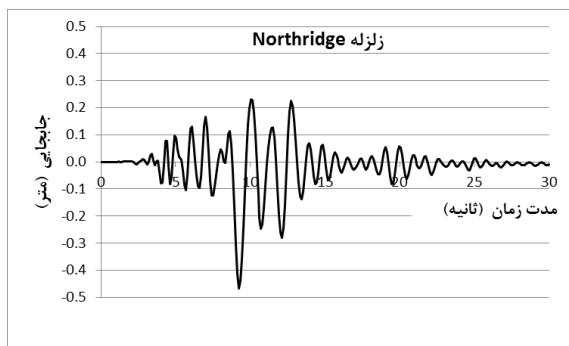
ب) جزئیات آرماتور گذاری

شکل ۳۰. پایه میانی پل شماره ۳
Fig. 30. Typical bend in bridge 3

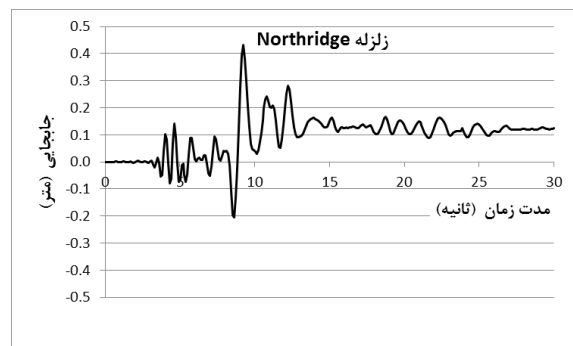


شکل ۳۱. مدل تحلیلی پایه میانی پل شماره ۳

Fig. 31. Analytical model of middle bend in bridge 3



ب) سیستم مرکزگرا



الف) سیستم متداول

شکل ۳۲. نمونه نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۳

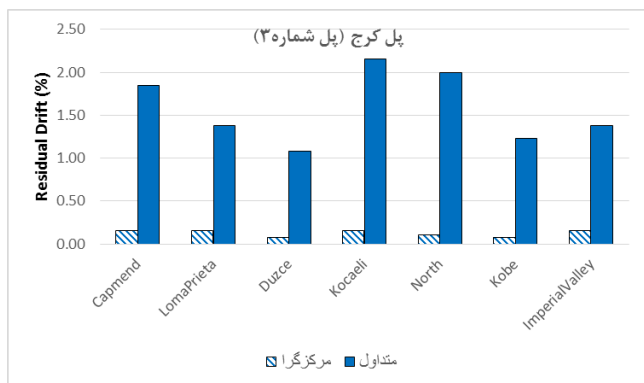
Fig. 32. Displacement response of bend in bridge 3

که در سیستم مرکزگرا سختی اولیه حدود ۸۰ درصد کمتر از سیستم متداول است. کاهش محسوس برش پایه و افزایش جابجایی در سیستم مرکزگرا را می‌توان به سختی جانبی نسبتاً کم این سیستم نسبت داد.

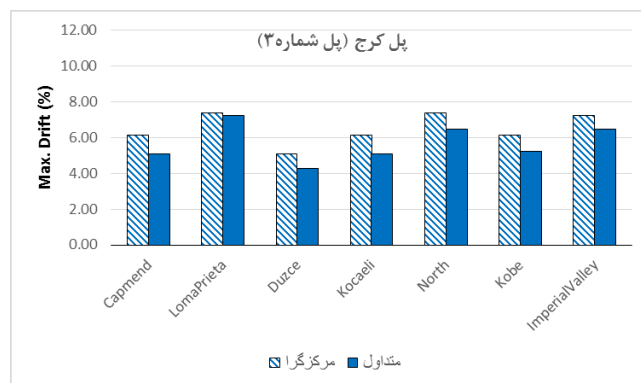
در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ بیشینه جابجایی نسبی و جابجایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول بین ۴/۷۵ تا ۶/۲۵ درصد و در سیستم مرکزگرا بین ۵/۶ تا ۱۰/۶ درصد است. در سیستم متداول، جابجایی نسبی پسماند بین ۰/۹ تا ۱/۹ درصد است و در دو مورد این جابجایی بیشتر از حد بحرانی ۱/۷۵ درصد می‌باشد. در این موارد خسارت احتمالی شدید خواهد بود و بر اساس

زنده صرف نظر شده و فقط وزن تابلیه (۸۹۶ تن) به همراه وزن پایه برای تحلیل لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین از اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده و شرایط تکیه گاهی فونداسیون به صورت کاملاً صلب در نظر گرفته شده است. پریود طبیعی این پایه با سیستم مرکزگرا ۱/۶ ثانیه و با سیستم متداول ۰/۷۲ ثانیه می‌باشد.

منحنی هیستریزس پایه پل و نمودار جابجایی بالای پایه برای یکی از رکوردهای زلزله در شکل ۲۲ ارائه شده است. مرکزگرایی و برگشت‌پذیری سیستم مرکزگرا در منحنی هیستریزس کاملاً مشهود است. نمودار جابجایی پایه پل نشان می‌دهد که جابجایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابجایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. منحنی‌های هیستریزس نشان می‌دهند



شکل ۳۴. جابجایی نسبی پسماند در پل شماره ۳
Fig. 34. Residual drift ratios in bridge 3



شکل ۳۳. بیشینه جابجایی نسبی در پل شماره ۳
Fig. 33. Peak drift ratios in bridge 3

نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۲ برای یکی از رکوردهای زلزله در شکل ۲۷ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که جابجایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابجایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. در شکل ۲۸ و شکل ۲۹ بیشینه جابجایی نسبی و جابجایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول بین ۵/۰ تا ۸/۴ درصد و در سیستم مرکزگرا بین ۶/۴ تا ۹/۶ درصد است. در سیستم متداول، جابجایی نسبی پسماند بین ۱/۱ تا ۲/۱ درصد است و در دو مورد این جابجایی بیشتر از حد بحرانی ۱/۷۵ درصد می‌باشد و در دو مورد دیگر این جابجایی ۱/۷ درصد است. در این موارد خسارت احتمالی شدید خواهد بود. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰/۲۲ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد.

۳-۳-۴ پل شماره ۳

پل شماره ۳ پل ارتباطی پایانه شهید کلاتری در کرج است. این پل با عرض ۱۱/۷ متر دارای ۲ دهانه ۱۶ متری است. تابلیه پل شامل ۶ عدد تیرورق فولادی به ارتفاع ۶۵ سانتیمتر و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. پایه‌های میانی شامل ۳ عدد ستون بتن مسلح با قطر ۱۲۰ سانتی‌متر و سرستون با عرض ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۳۰). مقاومت مشخصه بتن پایه پل ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و حد جاری شدن آرماتور مصرفی ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر (نوع آجدار A3) می‌باشد. پایه میانی این

تجربیات قبلی لازم است پل تخریب و بازسازی گردد. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از ۰/۴ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد. کاهش قابل توجه تغییر مکان پسماند در سیستم مرکزگرا، هزینه‌های بازسازی را به شدت کاهش می‌دهد و امکان بهره برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌سازد.

۲-۲-۴ پل شماره ۲

پل شماره ۲ بر روی رودخانه سرگان در مسیر جاسک - کنارک احداث شده است. این پل با عرض کل ۱۱/۸ متر دارای ۵ دهانه ۲۰ متری است. تابلیه پل شامل ۶ عدد تیر بتن مسلح پیش ساخته به ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتر و دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. پایه‌های میانی شامل ۳ عدد ستون بتن مسلح با قطر ۱/۲ متر و سرستون با عرض ۲/۰ متر و ارتفاع ۱/۰ متر می‌باشد (شکل ۲۵). مقاومت مشخصه بتن ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و حد جاری شدن آرماتور مصرفی از نوع آجدار A2 و A3 به ترتیب ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. پایه میانی این پل نیز همانند پل شماره ۱ با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل سازی و تحلیل شدند. در هر دو مدل تحلیلی از بار زنده صرف نظر شده و فقط وزن تابلیه (۳۷۸ تن) به همراه وزن پایه برای تحلیل لرزه ای در نظر گرفته شده است. پریود طبیعی این پایه با سیستم مرکزگرا ۰/۸۵ ثانیه و با سیستم متداول ۰/۶۲ ثانیه می‌باشد. مدل پایه مرکزگرا در شکل ۲۶ ارائه شده است.

اقدام غیرسازه‌ای حساس به جابجایی در پل‌های بزرگراهی، انتظار نمی‌رود که افزایش جابجایی جانبی در سیستم مرکزگرا منجر به خسارت جدی به پل شود. در این سیستم با وجود افزایش بیشینه جابجایی جانبی نسبت به سیستم متداول، جابجایی پسماند به شدت کاهش می‌یابد. جابجایی نسبی پسماند پایه هر سه پل با سیستم متداول در چند مورد بیشتر از حد بحرانی $1/75$ درصد می‌باشد. در این موارد خسارت احتمالی شدید خواهد بود و بر اساس تجربیات قبلی لازم است پل تخریب و بازسازی گردد. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از $0/4$ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد. کاهش قابل توجه تغییر مکان پسماند در سیستم مرکزگرا، هزینه‌های بازسازی را به شدت کاهش می‌دهد و امکان بهره برداری از پل را بلافاصله پس از زلزله فراهم می‌سازد.

مراجع

- [1] Kawashima, K. (2000). Seismic design and retrofit of bridges. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 33(3), 265-285.
- [2] Mackie, K. and Stojadinovic, B. Residual Displacements and Post-Earthquake Capacity of Highway Bridges, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August, 2004. Paper No. 1550.
- [3] White, S. L. (2014). Controlled damage rocking systems for accelerated bridge construction, Master's Thesis, University of Canterbury.
- [4] Guerrini, G., Restrepo, J. I., Vervelidis, A., & Massari, M. (2015). Self-centering precast concrete dual-steel-shell columns for accelerated bridge construction: seismic performance, analysis, and design. Report No. PEER 2015, 13.
- [5] Routledge, P., McHaffie, B., Cowan, M., & Palermo, A. (2019). Wigram-Magdala Link Bridge: Low-Damage Details for a More Efficient Seismic Design Philosophy. Structural Engineering International, 1-8.
- [6] Routledge, P. J., Cowan, M. J., & Palermo, A. (2016). Low-damage detailing for bridges—a case study of Wigram-Magdala Bridge. In Proceedings, New Zealand

پل نیز همانند پل شماره ۱ با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی و تحلیل شدند. در هر دو مدل تحلیلی از بار زنده صرف نظر شده و فقط وزن تابلیه (280 تن) به همراه وزن پایه برای تحلیل لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. پی‌رود طبیعی این پایه با سیستم مرکزگرا $0/70$ ثانیه و با سیستم متداول $0/45$ ثانیه می‌باشد. مدل پایه مرکزگرا در شکل ۳۱ ارائه شده است.

نمودار جابجایی بالای پایه پل شماره ۳ برای یکی از رکوردهای زلزله در شکل ۳۲ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که جابجایی پسماند در سیستم مرکزگرا بسیار ناچیز است ولی بیشینه جابجایی در مقایسه با سیستم متداول بیشتر است. بیشینه جابجایی نسبی و جابجایی نسبی پسماند دو سیستم سازه‌ای برای ۷ رکورد زلزله در شکل ۳۳ و شکل ۳۴ ارائه شده است. بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول بین $4/3$ تا $7/2$ درصد و در سیستم مرکزگرا بین $5/1$ تا $7/4$ درصد است. در سیستم متداول، جابجایی نسبی پسماند بین $1/1$ تا $2/2$ درصد است. در سه مورد این جابجایی بیشتر از حد بحرانی $1/75$ درصد می‌باشد و خسارت احتمالی شدید خواهد بود. در حالی که جابجایی نسبی پسماند سیستم مرکزگرا در تمام موارد کمتر از $0/15$ درصد است و خسارت احتمالی ناچیز می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله پایه‌های بتنی سه پل موجود در کشور با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا مدل‌سازی شده و عملکرد لرزه‌ای این دو سیستم با یکدیگر مقایسه شدند. در سیستم مرکزگرا، قطر ستون‌ها از 120 سانتی‌متر به 80 سانتی‌متر کاهش یافته و برای هر ستون از 4 عدد تاندون با نیروی موثر پیش تنیدگی 1600 کیلونیوتن جهت تامین مرکزگرایی سیستم و 12 عدد میراگر BRB جهت استهلاک انرژی زلزله استفاده شده است. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پایه میانی این پل‌ها با دو سیستم متداول و سیستم مرکزگرا، با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای هفت شتاب‌نگاشت دور و نزدیک گسل با بزرگای بیش از $6/5$ انجام شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در هر دو نوع زلزله دور و نزدیک، بیشینه جابجایی جانبی در سیستم مرکزگرا به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. حداکثر مقادیر بیشینه جابجایی نسبی در سیستم متداول و سیستم مرکزگرا به ترتیب $8/4$ درصد و $10/6$ درصد می‌باشند ولی به دلیل عدم وجود

- Regions, Greece, May, 2003.
- [17] Sakai, J., & Mahin, S. A. 2004. Mitigation of residual displacements of circular reinforced concrete bridge columns. In Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering (pp. 1-13).
- [18] Palermo, A., Pampanin, S., and Calvi, G. M. (2005). Concept and Development of Hybrid Solutions for Seismic Resistant Bridge Systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(6):899–921.
- [19] Palermo, A., Pampanin, S., and Marriott, D. (2007). Design, Modeling, and Experimental Response of Seismic Resistant Bridge Piers with Posttensioned Dissipating Connections. *Journal of Structural Engineering*, 133(11):1648–1661.
- [20] Palermo, A. and Pampanin, S. (2008). Enhanced Seismic Performance of Hybrid Bridge Systems: Comparison with Traditional Monolithic Solutions. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(8):1267–1295.
- [21] Kwan, W. and Billington, S. 2003. Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Piers. I: Monotonic and Cyclic Analyses, *Journal of Bridge Engineering*, 8(2): 92-101.
- [22] Kwan, W. and Billington, S. 2003. Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Piers. II: Seismic Analyses, *Journal of Bridge Engineering*, 8(2): 101-111.
- [23] Ou, Y. C. (2007). Precast segmental post-tensioned concrete bridge columns for seismic regions. PhD Thesis. University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.
- [24] Cohagen, L. S., Pang, J. B. K., Stanton, J. F., & Eberhard, M. O. (2008). A precast concrete bridge bent designed to re-center after an earthquake. Washington State Department of Transport, Seattle, WA.
- [25] Elgawady, M. A., & Sha’Lan, A. (2011). Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents. *Journal of Bridge Engineering*, 16(3), 328–339.
- [26] Sideris, P., Aref, A. J., & Filiatrault, A. (2014). Large-scale seismic testing of a hybrid sliding-rocking posttensioned segmental bridge system. *Journal of Structural Engineering*, 140(6), 1–12.
- society for earthquake engineering 2016 conference. Christchurch.
- [7] Priestley, M.J.N., Sritharan, S., Conley, J. and Pampanin, S. 1999. Preliminary Results and Conclusions form the PRESSS Five-Story Precast Concrete Test Building, *PCI Journal*, 44(6): 42-67.
- [8] Priestley, M.J.N., and Tao, J. 1993. Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames with Partially Debonded Tendons, *PCI Journal*, 38(1): 58-69.
- [9] El-Sheikh, M., Pessiki, S., Sause, R. and Lu, W. 2000. Moment Rotation Behavior of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Beam-Column Connections, *ACI Structural Journal*, 97(1): 122-131.
- [10] Cheokh, G., Stone, W. and Kunnath, S. 1998. Seismic Response of Precast Concrete Frames with Hybrid Connections, *ACI Structural Journal*, 95(5): 527-539.
- [11] El-Sheikh, M., Sause, R., Pessiki, S. and Lu, W. 1999. Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Frames, *PCI Journal*, 44(3): 54-71.
- [12] Mander, J. B., & Cheng, C.-T. (1997). Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design. Technical Report NCEER-97-0014. US National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- [13] Zatar, M. and Mutsuyoshi, H. 2000. Reduced Residual Displacements of Partially Prestressed Concrete Bridge Piers, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, January-February, 2000.
- [14] Hewes, J. T. (2003). Seismic design and performance of precast concrete segmental bridge columns. PhD Thesis, University of California at San Diego.
- [15] Billington, S. and Yoon, J. 2004. Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Bridge Engineering*, 9(4): 353-363.
- [16] Rouse, M. and Billington, S. 2003. Behavior of Bridge Piers with Ductile Fiber Reinforced Hinge Regions and Vertical, Unbonded Post-Tensioning, *Proceedings of the FIB Symposium on Concrete Structures in Seismic*

- Diego).
- [32] Mashal, M., & Palermo, A. (2019). Low-damage seismic design for accelerated bridge construction. *Journal of Bridge Engineering*, 24(7), 04019066.
- [33] SeismoStruct. (2018). Pavia: SeismoSoft Ltd.
- [34] Lowes, L. N., & Altoontash, A. (2003). Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, 129(12), 1686-1697.
- [35] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [36] Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1973). Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal forces and bending moment. *IASBE Proceedings*.
- [27] Trono, W., Jen, G., Panagiotou, M., Schoettler, M., & Ostertag, C. P. (2015). Seismic response of a damage-resistant recentering posttensioned-HYFRC bridge column. *Journal of Bridge Engineering*, 20(7), 04014096.
- [28] Guerrini, G., Restrepo, J. I., Massari, M., & Vervelidis, A. (2015). Seismic behavior of posttensioned self-centering precast concrete dual-shell steel columns. *Journal of structural engineering*, 141(4), 04014115.
- [29] Thonstad, T., Mantawy, I. M., Stanton, J. F., Eberhard, M. O., & Sanders, D. H. (2016). Shaking table performance of a new bridge system with pretensioned rocking columns. *Journal of Bridge Engineering*, 5(4), 4015079.
- [30] Varela, S., & Saiidi, M. (2017). Resilient deconstructible columns for accelerated bridge construction in seismically active areas. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(13), 1751-1774.
- [31] Nema, A. (2018). Development of Low Seismic Damage Structural Systems (Doctoral dissertation, UC San

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Vasseghi , B. Mansouri, S. Rointan, *Feasibility Study on Utilizing Self-centering Structural System for Typical Highway Bridges in Iran, Amirkabir J. Civil Eng., 53(10) (2022) 4359-4378.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.18323.6835](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18323.6835)

