

## Proposed Damage Index for Seismic Evaluation of RC Bridge Shear keys

S. Mahboubi, M.R. Shiravand\*

Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Shear keys are bridge components that support the superstructure in transverse direction and may experience large displacements and extensive damages during earthquakes. Shear keys are designed to limit damage to abutment walls and piles by restraining the transverse movements. The shear force transferred to the abutments is controlled by design and detailing of the shear keys. Damage to shear keys during earthquakes may affect significantly on seismic behavior of the abutments and consequently, the bridge system. In this paper, a damage index is proposed for damage assessment of the bridge shear keys. The proposed damage index is defined based on the friction behavior and the ratio of the energy dissipation capacity to input energy. To evaluate the reliability of the damage index in damage assessment of the shear keys, finite element models of shear keys units, previously tested under cyclic loadings, are developed and the proposed damage index is calculated. Also, seismic response of shear key specimens are obtained under seven earthquake records using incremental dynamic analysis and the damage index is calculated for the shear keys in different PGA values of earthquakes. The results indicate that the proposed damage index can predict the damage progression in shear keys throughout loading histories and can provide reliable values for damage levels of shear keys with respect to the experimental observations.

### Review History:

Received: 2018-12-11  
Revised: 2019-02-02  
Accepted: 2019-02-06  
Available Online: 2019-02-16

### Keywords:

Shear key  
Friction behavior  
Dissipated energy  
Input energy  
Damage index

## 1. INTRODUCTION

Shear keys are bridge components that support the superstructure in transverse direction and may experience large displacements and damage during earthquakes. Shear keys are designed to limit damage to abutment walls and piles by restraining the transverse movement. The shear force transferred to the abutments is controlled by design and detailing of the shear keys [1]. Shear keys are regarded as secondary components of bridge but damage to shear keys may cause large relative displacement between the shear keys and girder in transverse direction that result in pounding between these components and affect the seismic response of the overall bridge [2]. Damage to shear keys during past earthquakes lead to change their design philosophy. In accordance with current design criteria, the ultimate capacity of shear keys is restricted to 75% of the total shear capacity of the adjacent bent [3]. There is little research available in damage assessment of shear keys [1-5]. The existing works have focused on the qualitative damage levels of shear keys in terms of cracking mechanisms, spalling of concrete and yielding of steel bars. However, none of the above-mentioned studies investigated the quantitative damage to bearings in their main failure modes and there is a lack of studies on quantification of seismic damage to bridge shear keys concerning their behavior under earthquake excitations.

\*Corresponding author's email: username@EmailServer.com

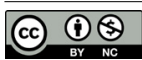
Therefore, it is required to propose a damage index to predict the intensity of damage during the earthquake to assess the seismic performance of bridge shear keys. In this paper, a damage index is proposed for damage assessment of the bridge shear keys. The proposed damage index is defined based on the friction behavior and the ratio of the energy dissipation capacity to input energy. To evaluate the reliability of the damage index in damage assessment of the shear keys, finite element models of shear keys units, previously tested under cyclic loadings, are developed and the proposed damage index is calculated. In addition, seismic response of shear key specimens are obtained under seven earthquake records using incremental dynamic analysis and the damage index is calculated for the shear keys in different PGA values of earthquakes.

## 2. DAMAGE INDEX

The proposed damage index is defined as:

$$DI = \frac{E_{hd}}{E_i} \quad (1)$$

where,  $E_{hd}$  is the energy dissipated by inherent damping ( $E_d$ ) and the hysteretic behavior ( $E_h$ ) of the system.  $E_i$  is the input energy.  $E_{hd}$  is calculated using the difference among the input energy and kinetic energy ( $E_k$ ) and strain



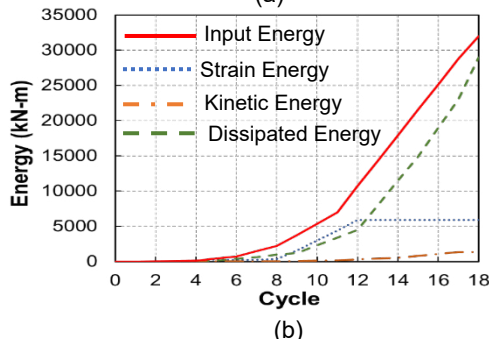
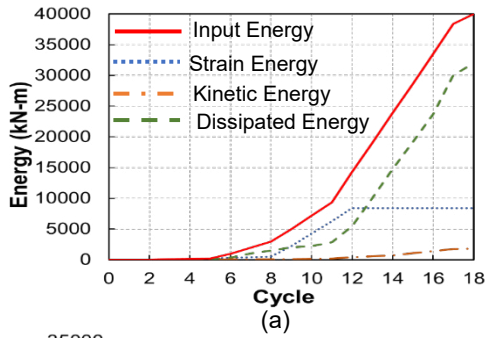


Fig. 1. Cumulative energy plots a) Unit 3A b) Unit 3B

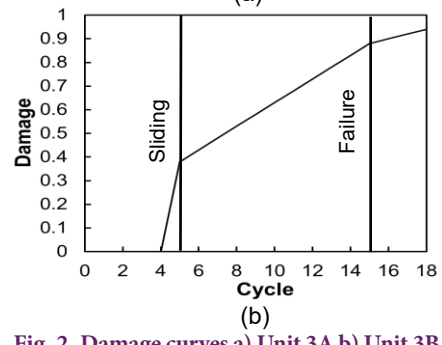
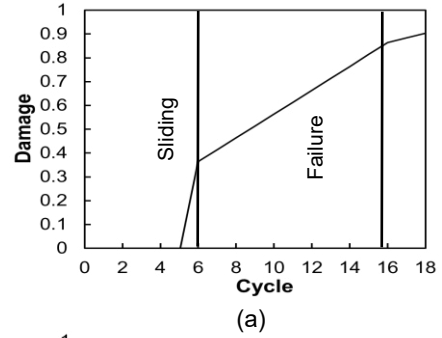


Fig. 2. Damage curves a) Unit 3A b) Unit 3B

energy ( $E_s$ ) as presented below:

$$E_{hd} = E_i - E_k - E_s \quad (2)$$

The energy components used for damage analysis can be estimated with different methods. In this paper, the energy components are calculated with the direct integration method. The bearing is considered a single degree of freedom (SDOF) system.

The force-displacement behavior of shear keys are commonly defined with respect to the model presented by Borgzadeh et al. [2], Megally et al. [3] and Silva et al. [4, 5]. The model can be described by a combination of two spring representing the steel and concrete components, connected in parallel, and a gap element, connected in series.

### 3. DISCUSSION AND RESULTS

Finite element models of two shear key units tested by Megally et al. [3] are developed in OpenSees using a zero-length element characterized by the nonlinear force-displacement response of shear keys. The cumulative energy plots used for calculating the damage index are presented in Fig. 1. The proposed damage index is calculated for shear key units, as shown in Fig. 2.

To estimate the proposed damage index for the shear key units subjected to seismic loading, ground motion records of seven earthquakes are scaled and increased from 0.1g to 1g with increment of 0.05g and nonlinear time-history analysis is performed at each step. Damage index versus PGA for San Fernando record is shown in Fig.3.

### 4. CONCLUSIONS

The results are summarized below:

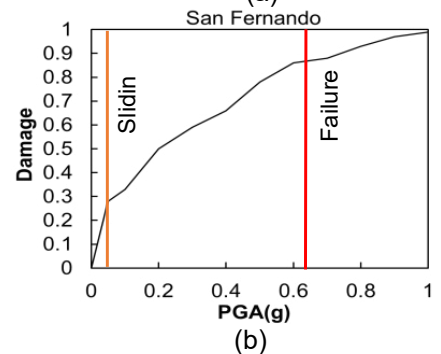
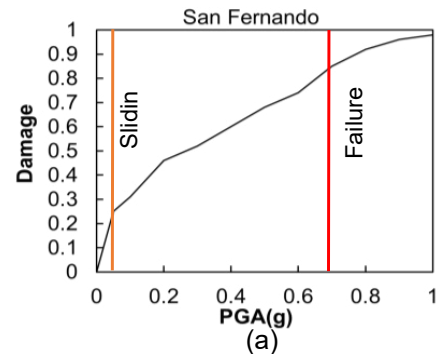


Fig. 3. Damage curves a) Unit 3A b) Unit 3B

- The damage index uses the cumulative energy components during the loading cycles and can consider the cumulative effects of loading cycles and strength degradation, and inelastic behavior.

- The damage model utilizes the earthquake input energy. The earthquake input energy can reflect the characteristics of the earthquake-like amplitude, duration and frequency at each time throughout the earthquake.

- The damage index provides a simple and practical approach for damage assessment of the shear keys. Calculating the dissipated energy using the difference among the earthquake input energy and other energy components ensures that no parts of energy is lost.

#### REFERENCES

- [1]. Caltrans, S., *Caltrans seismic design criteria*. California Department of Transportation, Sacramento, (2010).
- [2]. Bozorgzadeh, A., Megally, S., Restrepo, J., and Ashford, A.S., Capacity Evaluation of Exterior Sacrificial Shear Keys of Bridge sAbutments, *Journal of Bridge Engineering*, 11 (2004) 555-565.
- [3]. Megally, S. H., Silva, P. F., and Seible, F., Seismic response of external sacrificial shear keys. Report No. SSRP-2001/23, Department of Structural Engineering, University of California San Diego, (2002).
- [4]. Silva, P. F., Megally, S., and Seible, F., Seismic performance of sacrificial interior shear keys, *ACI journal*, 100 (2003) 177-187.
- [5]. Silva, P. F., Megally, S., and Seible, F., Seismic performance of sacrificial interior shear keys, *Earthquake Spectra*, 25 (2003) 643-664.

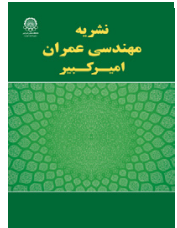
#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Mahboubi, M.R. Shiravand, *Proposed Damage Index for Seismic Evaluation of RC Bridge Shear keys*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(6) (2020) 379-382.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15421.5920](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15421.5920)







## ارائه شاخص خرابی به منظور ارزیابی لرزه ای کلیدهای برشی در پل های بتنی

شیمای محبوبی، محمودرضا شیراوند\*

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۲۰  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۱۳  
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۲۷

### کلمات کلیدی:

کلید برشی  
مدل رفتار اصطکاک  
انرژی مستهلک شده  
انرژی ورودی  
شاخص خرابی

**خلاصه:** کلیدهای برشی المان هایی در کوله های پل می باشند که با کنترل حرکات عرضی پل، خسارت وارد بر دیواره ی کوله و پایه ها را محدود می کنند. کلیدهای برشی معمولاً به صورت فیوز عمل می کنند و وظیفه ی انتقال نیروی عکس العمل روسازه به کوله را برعهده دارند. بنابراین، خرابی کلیدهای برشی پل، ممکن است تاثیر بسزایی در رفتار لرزه ای کوله ها و در نتیجه کل سیستم سازه ی پل داشته باشد. یکی از روش های متداول در تعیین سطوح خرابی لرزه ای المان ها، استفاده از شاخص های خرابی می باشد. در این مقاله، به منظور ارزیابی خرابی لرزه ای کلیدهای برشی کوله های پل، یک شاخص خرابی ارائه می گردد. این شاخص، براساس رفتار اصطکاک و با استفاده از نسبت انرژی مستهلک شده به انرژی ورودی تعریف می شود. سپس به منظور ارزیابی قابلیت پیش بینی خرابی وارد بر کلیدهای برشی توسط شاخص ارائه شده، مدل رفتاری کلیدهای برشی تشریح شده و مدل اجزای محدود نمونه های کلید برشی که در مطالعات گذشته تحت بارگذاری چرخه ای آزمایش شده، تشکیل می شود و شاخص خرابی هر یک از نمونه ها محاسبه می گردد. همچنین با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده، تحت رکورد زلزله های مختلف، مقدار شاخص خرابی کلیدهای برشی در مقادیر مختلف حداکثر شتاب زلزله محاسبه شده و نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه می گردد. نتایج تحلیل ها نشان می دهد که شاخص خرابی ارائه شده، روند خرابی وارد بر کلیدهای برشی در طول بارگذاری و سطوح خرابی مشاهده شده در آزمایش، شامل شروع لغزش و گسیختگی کلید برشی را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند و مقادیر مناسبی برای این سطوح در بارگذاری چرخه ای و لرزه ای ارائه می دهد.

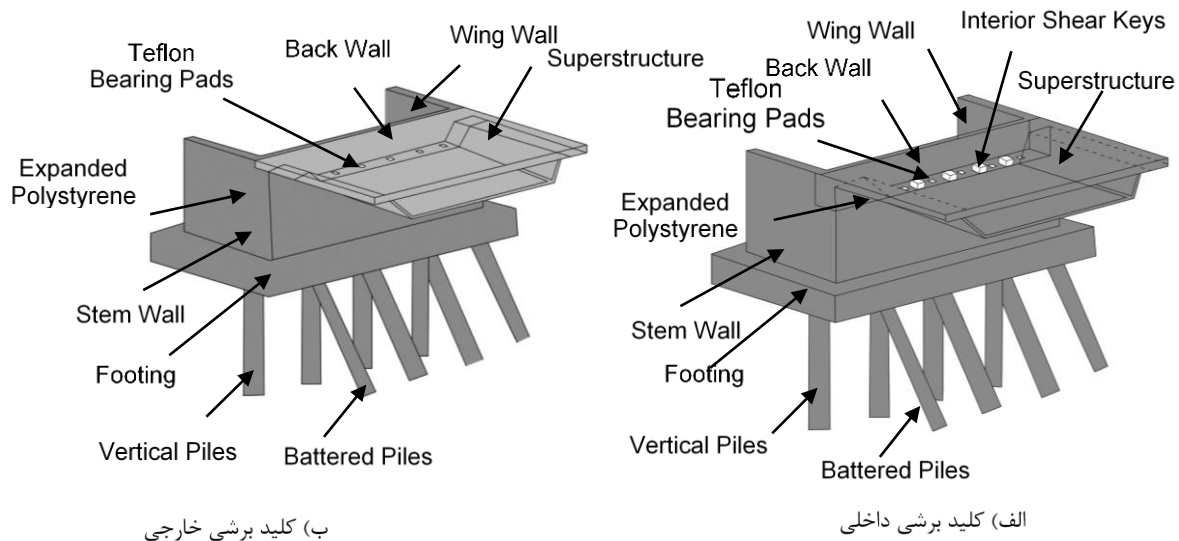
### ۱- مقدمه

نمی گردد. از این رو، انتقال نیروهای لرزه ای به کوله به کمک طراحی کلیدهای برشی صورت می گیرد. کلیدهای برشی معمولاً برای تحمل بارهای ثقلی طراحی نمی شوند، اما در هنگام زلزله عکس العمل های جانبی روسازه را به کوله منتقل می نمایند. سپس این نیروها از کوله به صورت برش، به شمع ها و دیوار کوله و در نهایت زمین منتقل می شوند. براساس آیین نامه طراحی لرزه ای کالترینز [۱]، حداکثر ظرفیت کلیدهای برشی باید برابر با کوچکترین مقدار بین ۷۵٪ ظرفیت برشی پایه های کناری پل و ۳۰٪ عکس العمل محوری بار مرده در کوله باشد. در کوله ها دو نوع کلید برشی شامل کلیدهای

کلیدهای برشی، المان هایی هستند که در کوله های پل به منظور جلوگیری از حرکت عرضی روسازه و ایجاد تکیه گاه در جهت عرضی طراحی می گردند. کلیدهای برشی در واقع فیوزهای سازه ای هستند که با کنترل حرکات عرضی پل، خسارت وارد بر دیواره ی کوله و پایه ها را محدود می کند. با توجه به اینکه امکان تعمیر و ترمیم کوله ها پس از زلزله وجود دارد، مبنای اصلی آیین نامه های طراحی پل، براین اساس استوار است که در یک زلزله ی شدید، اجازه آسب به کوله ها داده می شود، اما به شمع ها و پایه ها خسارتی وارد

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: m\_shiravand@sbu.ac.ir





شکل ۱. شکل شماتیک کلید برشی (الف داخلی ب) خارجی [۳]  
 Fig. 1. Schematic of interior and exterior shear keys

زلزله محدود می باشد. از جمله این تحقیقات، مطالعه ی آزمایشگاهی مگالی و همکارانش<sup>۴</sup> می باشد که به منظور تعیین سطوح مختلف خرابی کلیدهای برشی داخلی و خارجی صورت گرفت. آن ها رفتار لرزه ای کلیدهای برشی در کوله ها با درصد آرماتورهای مختلف را، تحت بارهای مونوتونیک<sup>۵</sup>، شبه استاتیکی چرخه ای<sup>۶</sup> و دینامیکی چرخه ای، مورد بررسی قرار دادند و از نتایج آزمایش های انجام شده، برای توسعه ی مدل های رفتاری کلیدهای برشی در مطالعات عددی استفاده نمودند. بزرگ زاده و همکارانش [۲] در مطالعه ای به ارزیابی ظرفیت کلیدهای برشی خارجی پرداختند. بدین منظور، چند تحقیق عددی و آزمایشگاهی بر روی ۱۰ نمونه کلید برشی طراحی شده براساس کالترنز [۱]، انجام شد و حالت های مختلف خرابی شامل ترک بتن، تسلیم و کمانش آرماتورها و مودهای گسیختگی کلید برشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات آن ها نشان داد که لازم است در سطح تماس بین کلید برشی و دیوار کوله، یک مفصل سازه ای در نظر گرفته شود تا امکان لغزش و گسیختگی لغزشی کلید برشی را فراهم نماید. آن ها بر همین اساس، یک مدل رفتاری برای ارزیابی ظرفیت کلیدهای برشی با گسیختگی لغزشی ارائه نمودند. سیلوا و همکارانش<sup>۷</sup> [۴ و ۵] در سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ در ادامه ی مطالعات گذشته، آزمایش هایی بر روی کلیدهای برشی داخلی و

برشی داخلی<sup>۱</sup> و خارجی<sup>۲</sup> ساخته می شود. کلیدهای برشی داخلی، داخل کوله، در امتداد عرض روسازه ساخته شده و در دو جهت عمل می کنند. کلیدهای برشی خارجی در کناره های روسازه ساخته می شوند. با توجه به اینکه کلیدهای برشی داخلی به آسانی کلیدهای برشی خارجی، قابل دسترس نیستند، توصیه شده است که در ساخت پل های جدید از کلیدهای برشی داخلی استفاده نگردد [۲]. کلیدهای برشی داخلی و خارجی و اجزای آن ها به صورت شماتیک، در شکل ۱ نشان داده شده است.

کلیدهای برشی، معمولاً المان های ثانویه در پل به شمار می روند و خرابی آن ها در زلزله، در مقایسه با سایر المان های اصلی مانند پایه، نادیده گرفته می شود. اما در حقیقت، تجربه زلزله های گذشته نشان می دهد که خسارت وارد بر کلیدهای برشی موجب ایجاد جابجایی های نسبی بزرگی بین کوله و عرشه در جهت عرضی و برخورد آن ها به هم می گردد، که بر عملکرد لرزه ای کل سازه ی پل تاثیرگذار است. از طرفی خسارت وارد بر کوله ها در زلزله های گذشته مانند زلزله ی نورتریج<sup>۳</sup>، نشان می دهد که کلیدهای برشی به درستی و به صورت فیوزهای برشی عمل نکرده اند. همین امر موجب تغییر و اصلاح آیین نامه های طراحی کلیدهای برشی گردید. تحقیقات انجام گرفته در زمینه ی خرابی وارد بر کلیدهای برشی در

4 .Megally et al.  
 5 .Monotonic  
 6 .Quasi-static  
 7 .Silva et al.

1 .Interior  
 2 .Exterior  
 3 .Northridge

بنابراین اثر خستگی ناشی از سیکل های مختلف بارگذاری تاثیر قابل توجهی در خرابی دارد. از این رو، شاخص های خرابی تجمعی، به منظور لحاظ نمودن اثرات سیکل های مختلف بارگذاری توسعه یافته اند. شاخص های خرابی معمولا به شاخص های تغییرمکانی، نیرویی، سختی، خستگی و انرژی دسته بندی می گردند [۱۰]. از جمله شاخص های خرابی که براساس کاهش سختی سازه تعریف شده، می توان به شاخص خرابی کونات و همکارانش<sup>۴</sup> [۱۱] اشاره نمود که به صورت زیر تعریف شده است:

$$D = \frac{k_m - k_0}{k_f - k_0} \quad (1)$$

در رابطه ی ۱،  $k_m$  سختی سکانت عضو بتنی در تغییرمکان حداکثر،  $k_f$  سختی متناظر با گسیختگی عضو در بارگذاری مونوتونیک و  $k_0$  سختی اولیه عضو می باشد. یکی از شاخص های خرابی تجمعی که براساس خستگی مقطع بتن مسلح در طول بارگذاری تعریف شده، شاخص مندر و چنگ<sup>۵</sup> [۱۲] می باشد:

$$2\varphi_p R = \frac{0.113}{1-d/R} N_f^{-0.5} \quad (2)$$

در رابطه ی (۲)،  $\varphi_p$  انحنای پلاستیک،  $R$  شعاع ستون،  $d$  عمق موثر،  $N_f$  تعداد سیکل هایی است که موجب ایجاد اولین ترک ها در مقطع می گردد. با توجه به این که زلزله دارای ماهیت انرژی می باشد، شاخص های انرژی بیش از سایر شاخص ها، مورد توجه محققان قرار گرفته است. در بین شاخص های خرابی موجود، شاخص خرابی پارک و آنگ<sup>۶</sup> [۱۳] که برای اعضای بتنی تعریف شده، بیش از همه مورد استفاده قرار می گیرد. شاخص خرابی پارک و آنگ [۱۳] مطابق رابطه ۱ تعریف می شود:

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} ] dE \quad (3)$$

در این رابطه  $\delta_m$ ، ماکزیمم تغییرشکل،  $\delta_u$  ظرفیت تغییرشکل نهایی تحت بار مونوتونیک،  $Q_y$  مقاومت تسلیم،  $E$  انرژی هیسترتیک

خارجی انجام داده و از نتایج این آزمایش ها برای توسعه ی یک مدل هیسترتیک با دو فنر به منظور شبیه سازی رفتار لرزه ای کلیدهای برشی استفاده نمودند. جوئل و چوپرا<sup>۱</sup> [۶] نقش کلیدهای برشی را در عملکرد لرزه ای پل های در تقاطع با گسل، با مقایسه سه حالت پل با کلید برشی خطی، کلید برشی غیرخطی و بدون کلید برشی بررسی نمودند. براساس نتایج این مطالعه در پل هایی که در نواحی نزدیک گسل قرار دارند، تقاضای لرزه ای پل باید در شرایط بدون کلید برشی و یا با کلید برشی الاستیک مورد تحلیل قرار گیرد. جیانگ و لی<sup>۲</sup> [۷] اثر کلیدهای برشی بتنی در رفتار لرزه ای پل های دهانه ساده را با میراگرهای فلزی و اصطکاکی مقایسه نمودند و براساس نتایج به دست آمده، استفاده از این میراگرها را به عنوان جایگزینی برای کلیدهای برشی بتنی توصیه نمودند. جیانگ و لی [۸] در مطالعه ی دیگری به بررسی اثر همزمان کلیدهای برشی و جداساز در رفتار لرزه ای پل های جداسازی شده پرداختند. نتایج مطالعه ی آن ها نشان داد که کلید برشی و جداساز به صورت موازی عمل کرده و باید طوری طراحی شوند که با رسیدن همزمان به حداکثر ظرفیت خود، مقاومت کافی برای روسازه فراهم نمایند.

همان طور که اشاره شد، اغلب مطالعات پیشین بر روی کلیدهای برشی به بررسی خرابی های مشاهده شده در نمونه های آزمایشگاهی پرداخته اند. از طرفی تعیین مقدار کمی حالت های مختلف خرابی المان های سازه ای و غیرسازه ای در یک سیستم سازه ای مانند پل، و تعریف سطوح عملکرد لرزه ای نظیر آن ها، از اهداف اصلی روش طراحی براساس عملکرد می باشد. از این رو، ارائه و توسعه ی شاخص های خرابی<sup>۳</sup> به منظور کمی سازی سطوح مختلف خرابی در زلزله، در روش طراحی براساس عملکرد مورد توجه قرار گرفته است. شاخص های خرابی نقش مهمی در تصمیم های طراحی و مقاوم سازی در برابر زلزله ایفا می کنند و به دو گروه شاخص های خرابی غیرتجمعی و تجمعی طبقه بندی می شوند. شاخص های غیرتجمعی معمولا براساس یکی از پارامترهای سازه ای مانند: تغییرمکان، شکل پذیری، سختی و مقاومت تعریف می شوند [۹]. از طرفی معمولا سازه و المان های سازه ای در زلزله، تحت بارهای چرخه ای رفت و برگشتی با تغییرمکان های بزرگ قرار می گیرند،

4 .Kunnath et al.  
5 .Mander and Cheng  
6 Park and Ang

1 Goel and Chopra  
2 Xiang and Li  
3 .Damage Index

محبوبی و شیراوند [۱۰] یک شاخص خرابی برای پایه ی پل های بتنی براساس رابطه ی انرژی جذب شده و انرژی ورودی زلزله به صورت رابطه ی ۶ ارائه کردند.

$$DI = \frac{E_h}{E_i} = 1 - \frac{E_k + E_d + E_s}{E_i} \quad (۶)$$

در رابطه ی ۶،  $E_h$  انرژی هیسترتیک،  $E_i$  انرژی ورودی،  $E_k$  انرژی جنبشی،  $E_d$  انرژی میرایی و  $E_s$  انرژی پتانسیل کرنشی می باشد.

همان طور که اشاره شد، اغلب مطالعات گذشته در زمینه ی ارائه و کاربرد شاخص های خرابی پل، به ارائه و توسعه ی شاخص های خرابی برای پایه ها می پردازد. درحالیکه اگرچه پایه ی پل نقش مهمی در عملکرد لرزه ای پل ها در زلزله دارد، اما خرابی سایر المان های پل مانند کلیدهای برشی نیز ممکن است منجر به برخورد بین عرشه و کوله و خرابی عرشه شده و تاثیر بسزایی بر رفتار پل در زلزله بگذارد. در سال های اخیر، مطالعات گسترده ای در زمینه ی شرایط انتهایی پل، کوله و اثرات خاک در جهت طولی صورت گرفته است. اما مطالعات انجام گرفته در زمینه ی رفتار عرضی پل محدود می باشد. از طرفی پاسخ دو انتهای پل در زلزله در جهت عرضی به آرماتورگذاری و اصطکاک برشی کلیدهای برشی وابسته است، درحالیکه در جهت طولی رفتار خاک و کوله ها تعیین کننده ی رفتار لرزه ای پل می باشند. بنابراین تعریف و توسعه ی شاخص خرابی به منظور کمی سازی خرابی وارده و تعیین سطوح مختلف خرابی در کلیدهای برشی نیز ضروری به نظر می رسد. در اغلب مطالعات ارزیابی لرزه ای پل، خرابی کلیدهای برشی تنها بر مبنای حداکثر تغییرمکان تعیین شده است، در حالیکه اثرات تجمعی سیکل های بارگذاری و کاهش سختی و مقاومت این المان ها با افزایش تعداد سیکل ها، عامل مهمی در خرابی این المان ها می باشد و باید در تعیین مقدار خرابی لرزه ای لحاظ شود. همچنین با توجه به مطالعات قبلی، شاخص های خرابی در پل تنها برای المان های اصلی پل مانند ستون ارائه شده و تاکنون شاخصی برای کلیدهای برشی پل ارائه نشده است. از این رو، در این مقاله یک شاخص خرابی بر مبنای نسبت انرژی مستهلک شده به انرژی ورودی به منظور ارزیابی لرزه ای کلیدهای برشی ارائه می گردد. سپس چند نمونه کلید برشی که در مطالعات گذشته تحت آزمایش بارگذاری چرخه ای قرار گرفته، به

جذب شده و  $\beta$  پارامتریست که به خصوصیات سازه ای عضو بتنی بستگی دارد و برای در نظر گرفتن اثرات سیکل های مختلف بارگذاری ارائه شده و معمولا با آزمایش تعیین می شود. همان طور مشاهده می شود، شاخص پارک و آنگ [۱۳] براساس ترکیب شکل پذیری و انرژی جذب شده در زلزله تعریف می شود. اگرچه شاخص پارک و آنگ [۱۳] برای تعیین خرابی اعضای بتنی مانند تیر و ستون تعریف شده است، اما گاهی در سایر المان های سازه های بتنی و همچنین سازه های فولادی نیز استفاده می گردد. با وجود گستردگی استفاده از شاخص پارک و آنگ [۱۳] در ارزیابی لرزه ای، اما این شاخص دارای ضعف ها و محدودیت هایی می باشد که استفاده از آن در سازه را دچار مشکل می سازد. مهمترین آن ها محاسبه ی پارامتر  $\beta$  در مدل می باشد. این پارامتر باید براساس نتایج آزمایش و یا محاسبات ریاضی پیچیده تعیین گردد و در بسیاری از موارد بدون وجود اطلاعات و داده های آزمایشگاهی، محاسبه ی آن امکان پذیر نمی باشد.

شاخص خرابی ارائه شده توسط گیلومر و همکارانش [۱۴] نیز از جمله شاخص های خرابی است که بر مبنای انرژی هیسترتیک و تغییرمکان به صورت زیر تعریف شده است:

$$DI = \frac{\alpha E_h}{r(u_u - u_y) F_y} \quad (۴)$$

شاخص های خرابی اغلب برای تعیین سطوح خرابی اعضا و المان های ساختمان تعریف شده اند، اما فلسفه ی کلی، قابل استفاده برای سایر سازه ها نظیر پل می باشد. به طور مثال، بصام و همکارانش [۱۵] یک شاخص خرابی برای پایه های پل براساس شاخص خرابی معروف پارک و آنگ [۱۳] ارائه نمود:

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\delta_m}{\delta_u} \left( \frac{1}{FD} - 1 \right) \quad (۵)$$

در رابطه ۵، FD ضریبی کاهشی است که براساس تعداد سیکل های بارگذاری تعیین می شود.

جارا و همکارانش [۱۶] مدل خرابی پاول و الله آبادی [۱۷] را برای انجام تحلیل های تاریخچه ی زمانی غیرخطی براساس دوران پایه پل های بتنی در مکزیک استفاده نمودند.

1 . Teran-Gilmore et al.  
2 . Jara et al.  
3 . Powell and Allahabadi



استفاده قرار می گیرد. محاسبه ی ظرفیت برشی کلید برشی معمولاً براساس کالترنز [۱] صورت می گیرد. بنابراین ظرفیت کلیدهای برشی تابعی از اصطکاک بین کلید برشی و کوله می باشد و رفتار کلیدهای برشی را می توان براساس اصطکاک بین سطوح پس از شروع ترک تشریح نمود. براساس این مدل، پس از ایجاد ترک در کلیدهای برشی، خرابی این المان ها به مقدار لغزش بستگی دارد [۱۹]. از طرفی، سایش بین سطوح موجب استهلاک انرژی شده که با افزایش تعداد سیکل های بارگذاری و تغییر مکان، این مقدار افزایش می یابد. بنابراین در این مقاله، یک شاخص خرابی لرزه ای بر مبنای نسبت انرژی جذب شده به انرژی ورودی و زلزله به منظور ارزیابی خرابی لرزه ای کلیدهای برشی ارائه می گردد. شاخص خرابی کلیدهای برشی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$DI = \frac{E_{hd}}{E_i} \quad (7)$$

در رابطه ی بالا،  $E_{hd}$  انرژی مستهلک شده توسط کلید برشی شامل انرژی ناشی از میرایی ذاتی و انرژی حاصل از رفتار هیسترتیک و  $E_i$  انرژی ورودی می باشد.

با توجه به اینکه انرژی ورودی زلزله دربرگیرنده ی ویژگی های اصلی هر زلزله نظیر دامنه و فرکانس می باشد، در شاخص خرابی ارائه شده به جای پارامترهای سازه ای از انرژی ورودی زلزله استفاده می گردد.

در رابطه ی ۷،  $E_{hd}$ ، انرژی جذب شده، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_{hd} = E_i - E_k - E_s \quad (8)$$

در رابطه ی ۸،  $E_i$  انرژی ورودی،  $E_k$  انرژی جنبشی و  $E_s$  انرژی پتانسیل کرنشی می باشد. روش های مختلفی برای محاسبه ی مولفه های انرژی رابطه ی ۸ وجود دارد. در این مقاله از روش انتگرال گیری مستقیم برای محاسبه این انرژی ها استفاده می شود. با توجه به اینکه در مطالعات عددی معمولاً کلید برشی به صورت سیستم یک درجه آزادی (فکر) در نظر گرفته می شود، بنابراین روابط روش انتگرال گیری مستقیم برای سازه ی یک درجه آزادی<sup>۳</sup> (SDOF) در ادامه ارائه می شود.

کمک نرم افزار اجزای محدود OpenSees، مدل سازی شده و شاخص خرابی ارائه شده برای نمونه ها محاسبه می گردد. سپس خرابی های پیش بینی شده توسط شاخص خرابی با خرابی های مشاهده شده در آزمایش مقایسه می گردد. همچنین با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده تحت ۷ رکورد زلزله، پاسخ لرزه ای کلیدهای برشی به دست آمده و شاخص خرابی آن ها تحت بارهای لرزه ای نیز محاسبه می شود. در نهایت منحنی های خرابی نمونه ها در مقادیر PGA<sup>۱</sup> مختلف برای هر زلزله رسم می گردد.

## ۲- تعریف شاخص خرابی

براساس آیین نامه طراحی لرزه ای کالترنز [۱]، در مدل سازی عددی، کلیدهای برشی به صورت الاستیک و با سختی برابر با نصف سختی عرضی پایه ی کناری مدل می شوند. از طرفی کالترنز [۱] تاکید می کند که این سختی به سختی پسماند ایجاد شده به وسیله ی کلیدهای برشی ارتباطی ندارد و سختی اسمی می باشد. از طرفی مطالعات آزمایشگاهی مانند تحقیقات صورت گرفته توسط مگالی و همکارانش [۳] و همچنین مطالعات عددی نظیر تحقیقات انجام شده توسط بالی<sup>۲</sup> [۱۸] نشان می دهد که مدل سازی رفتار کلیدهای برشی به صورت غیرالاستیک، به رفتار واقعی کوله و کلید برشی نزدیکتر بوده و تقاضای تغییر مکانی ستون ها را کاهش می دهد. همچنین مطالعات محدودی در زمینه ی بررسی رفتار لرزه ای کلیدهای برشی صورت گرفته که اغلب به بررسی گسیختگی برشی کلیدهای برشی در محل اتصال می پردازند. براساس این مطالعات [۲ و ۴] مکانیزم خرابی کلیدهای برشی معمولاً به دو صورت می باشد: (۱) ترک افقی که در سطح تماس با کوله گسترش می یابد، (۲) ترک های قطری در جهت تنش های فشاری اصلی. مکانیزم خرابی اول در اغلب مطالعات به عنوان مکانیزم خرابی کلید برشی در نظر گرفته می شود و مبنای آن، انتقال مقاومت برشی در صفحه ی ترک با کمک اصطکاک بین سطوح ترک خورده می باشد که به اصطکاک برشی موسوم است. اصطکاک بین سطوح، از قفل و بست بین دانه های بتن در سطوح ترک، و نیروی نرمال غیرفعال، از آرماتورها تامین می گردد. این مدل معمولاً در طراحی به منظور مدل سازی غیرخطی و تخمین حداکثر نیروی برشی منتقل شده در صفحه ی ترک در اعضای بتنی، مورد

1 .Peak Ground Acceleration

2 .Bali

3 .Single Degree of Freedom

فولاد تعریف شده است. مدل رفتاری بتن به صورت الاستوپلاستیک، همراه با افت مقاومت ناشی از کاهش اصطکاک بین قفل و بست دانه ها پس از رسیدن به حداکثر نیرو و همچنین مدل فولاد به صورت الاستوپلاستیک ایده آل با کاهش مقاومت حاصل از شکست آرماتورهای اصلی در محل ترک تعریف می شود. بدین ترتیب رفتار کلید برشی را می توان به صورت دو المان فنر موازی که نشانگر رفتار المان بتن و فولاد بوده و به صورت سری به یک المان گپ<sup>۲</sup> متصل شده اند، نشان داد (شکل ۲-ب). منحنی رفتاری هر فنر به تفکیک در شکل ۲-ج نشان داده شده است. با توجه به مدل شکل ۲، نیروی آستانه ی لغزش در این مدل برابر با  $V_y$  می باشد که متناظر با تغییرمکان تسلیم بوده و به صورت مجموع ظرفیت برشی بتن ( $V_c$ ) و فولاد ( $V_s$ ) تعیین می گردد.

#### ۴- محاسبه شاخص خرابی

##### ۴-۱- مدلسازی عددی

به منظور ارزیابی قابلیت شاخص خرابی ارائه شده در پیش بینی خرابی کلیدهای برشی کوله های پل، از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط مگالی و همکارانش [۳] استفاده می گردد. مگالی و همکارانش [۳] آزمایش هایی بر روی مقاومت برشی و مودهای خرابی کلیدهای برشی در کوله های پل های طراحی شده براساس کالترینز [۱] انجام دادند. واحدهای کلید برشی با مقیاس ۱:۲/۵ ساخته شده و تحت بارهای شبه چرخه ای قرار گرفتند. آن ها روی ۵ واحد کلید برشی خارجی آزمایش انجام دادند، اما در برخی آزمایش ها، خرابی کوله پیش از کلید برشی اتفاق افتاده و کلید برشی به درستی عمل نکرده است. بنابراین در این مطالعه دو نمونه کلید برشی خارجی شامل واحدهای ۳A و ۳B، که گسیختگی آن ها، در اثر لغزش و شکست برشی اتفاق افتاده، انتخاب شده و در نرم افزار OpenSees مدلسازی می شوند. مشخصات نمونه های مورد بررسی در جدول ۱ آمده است. مدلسازی کلید برشی با استفاده از فنر و المان گپ صورت می گیرد. المان فنر مورد استفاده یک المان دو گرهی با طول صفر می باشد که قابلیت انتقال اثر  $P-\Delta$  را دارد. منحنی رفتاری کلید برشی براساس منحنی نیرو-تغییرمکان ارائه شده در شکل ۲-الف در نرم افزار تعریف می شود. مشخصات مدل رفتاری در نرم افزار شامل

$E_k$  در رابطه ی ۸، انرژی جنبشی سیستم بوده که کار نیروهای اینرسی تعریف می شود و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_k = \int_0^{\Delta} m \ddot{\Delta} d\Delta = \int_0^t m \ddot{\Delta} \dot{\Delta} dt = \frac{1}{2} m \dot{\Delta}^2 \quad (9)$$

در رابطه ی ۹،  $m$  جرم سیستم،  $\dot{\Delta}$  و  $\ddot{\Delta}$  به ترتیب سرعت و شتاب سیستم یک درجه آزادی می باشند.

$E_s$  انرژی پتانسیل کرنشی سیستم را می توان با توجه به سختی مماسی منحنی رفتاری در هر لحظه، به صورت زیر تعیین نمود:

$$E_s = \int_0^{\Delta} k_f \Delta d\Delta \quad (10)$$

بنابراین با توجه به رابطه ی ۱۰، می توان انرژی پتانسیل کرنشی سیستم در هر لحظه از بارگذاری را، با استفاده از سختی مماسی منحنی رفتاری به دست آورد.

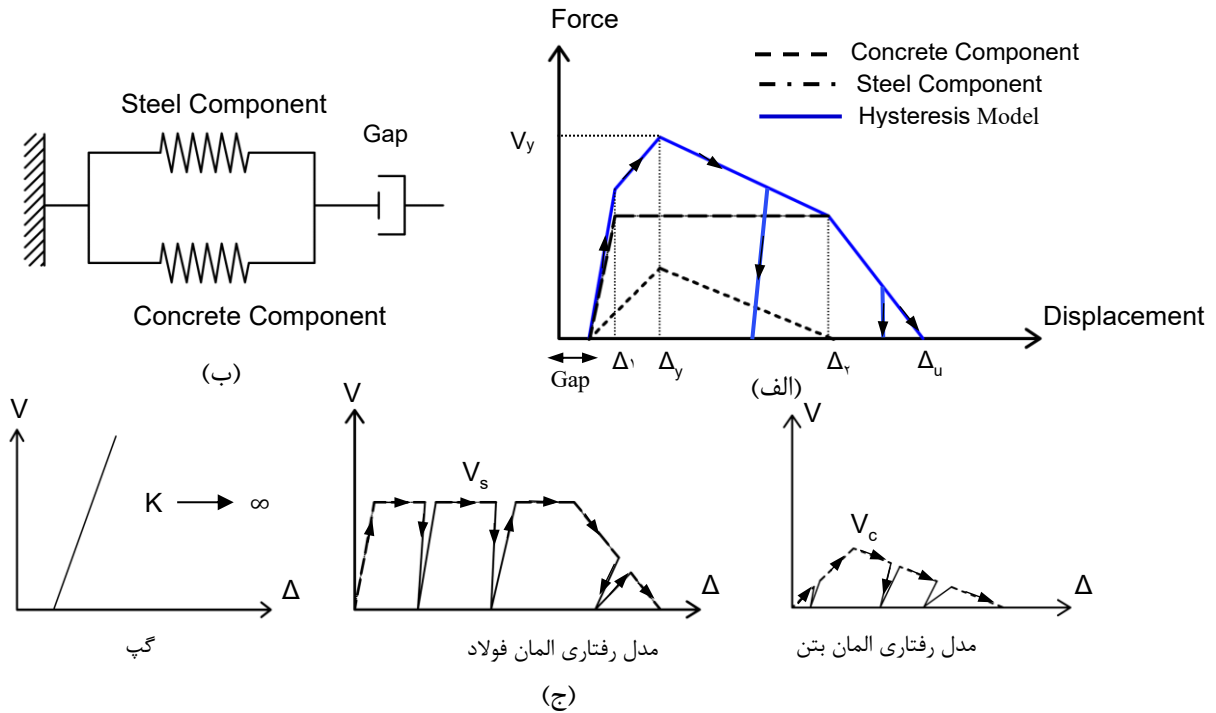
انرژی ورودی زلزله  $E_i$ ، برای سیستم یک درجه آزادی به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$E_i = - \int_0^{\Delta} m \ddot{\Delta} g d\Delta \quad (11)$$

در رابطه ی ۱۱،  $\ddot{\Delta}$  شتاب زمین می باشد [۷]. لازم به ذکر است محاسبه ی انرژی ورودی در سازه ی چند درجه آزادی با توجه به دقت موردنظر تحلیل، می تواند با استفاده از روش های ساده نظیر استفاده از جرم معادل و شبه سرعت و یا روش های دقیق تر که عدم قطعیت های زلزله را در نظر می گیرند، مانند استفاده از روش ویولت<sup>۱</sup> که توسط محققان بسیاری ارائه و توسعه داده شده است [۲۰-۲۲]، صورت گیرد.

#### ۳- مدل رفتاری کلید برشی بتنی

مدل هیستریتیک رفتار نیرو-تغییرمکان کلیدهای برشی بتنی، معمولاً براساس مدل رفتاری حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بزرگ زاده [۲]، مگالی [۳] و سیلوا [۴ و ۵] و به صورت شکل ۲-الف تعریف می شود. این مدل براساس حداکثر ظرفیت برشی که برابر با نیروی آستانه ی لغزش می باشد، تعریف شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، این مدل به صورت ترکیبی از مدل رفتاری بتن و



شکل ۲. الف) مدل رفتار هیسترتیک ب) مدل رئولوژیکی و ج) مدل های مجزای رفتاری المان های فنری کلید برشی خارجی [۵-۲]  
 Fig. 2.a) Hysteretic behavior b) rheological model c) steel and concrete component behavior model in exterior shear keys

جدول ۱. مشخصات واحدهای کلید برشی در آزمایش مگالی و همکارانش [3]  
 Table 1. Properties of shear key units in the experiments by Megally et al. [3]

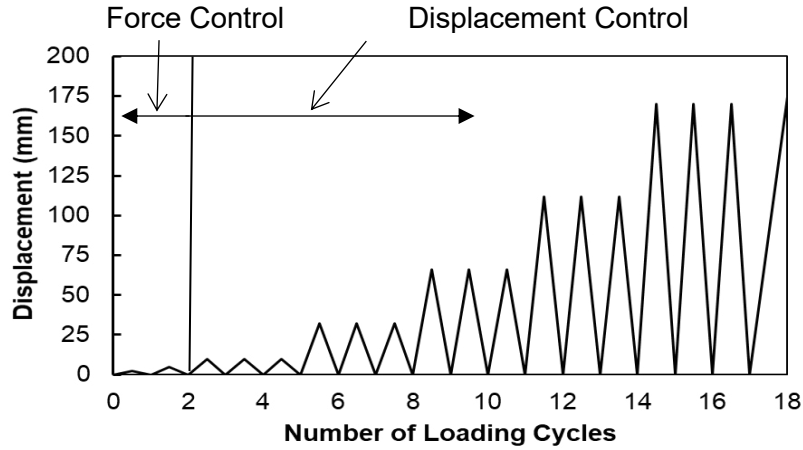
ظرفیت برشی	مقاومت فشاری بتن ( $N/mm^2$ )	مشخصات سطح تماسی			نمونه
		Number of bars	$f_{yf}$ ( $N/mm^2$ )	$A_{vf}$ ( $mm^2$ )	
۲۰۲۰	۳۸/۸	۸#۵	۴۹۷	۱۶۰۰	۳A
۱۸۴۶	۳۸/۸	۸#۵	۴۹۷	۱۶۰۰	۳B

اعمال می گردد تا نشانه های اولیه از تسلیم در نمونه مشاهده شود. بدین ترتیب در نیرویی برابر با ۶۰۱ کیلونیوتن و تغییرمکان ۱۰ میلی متر نیروی افقی ثابت شده و سپس بارگذاری به تغییرمکان- کنترل تغییر داده می شود. در این مرحله نمونه کلید برشی تحت بارهای تغییرمکان-کنترل با دامنه های مختلف شامل، سه سیکل با دامنه ی تغییرمکانی برابر با ۱۰ میلی متر، سه سیکل با تغییرمکان ۳۲ میلی متر، سه سیکل با تغییرمکان ۶۶ میلی متر، سه سیکل با تغییرمکان ۱۱۲ میلی متر و سه سیکل با تغییرمکان ۱۷۱ میلی متر قرار می گیرند. سیکل های بارگذاری نمونه ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

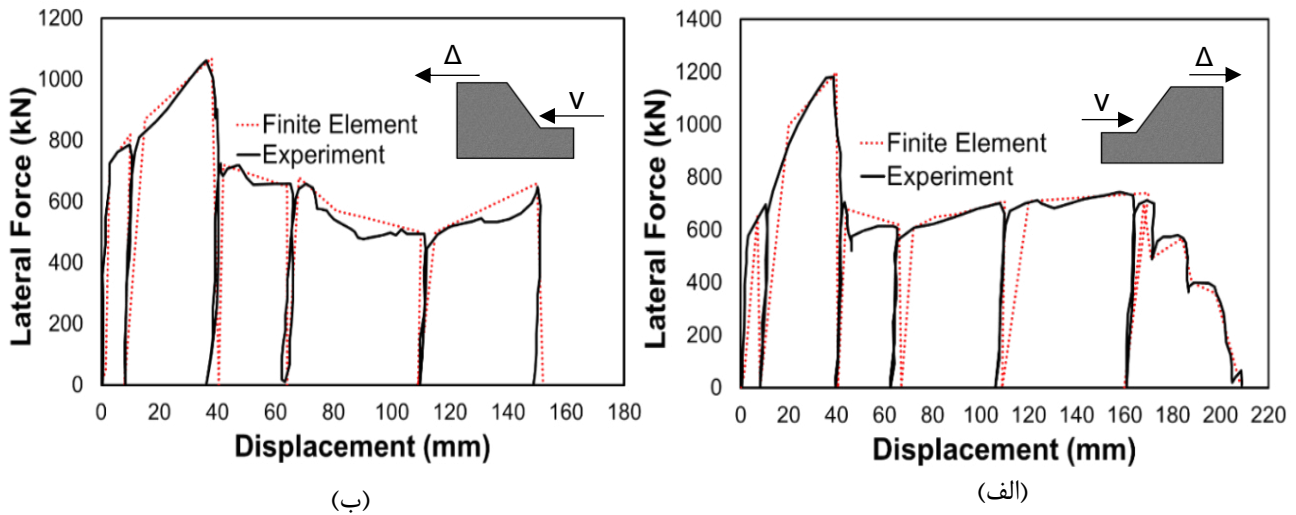
نیروی آستانه ی لغزش نمونه ها براساس آیین نامه طراحی لرزه ای کالترنز [۱] و با توجه مشخصات هندسی گزارش شده در آزمایش و همچنین مقادیر سختی معادل و میرایی معادل ارائه شده در آزمایش و مطالعه ی عددی صورت گرفته توسط سیلوا و همکارانش [۵] تعیین می گردد.

#### ۲-۴- بارگذاری چرخه ای

با توجه به آزمایش، کلیدهای برشی ابتدا تحت بارهای نیرو- کنترل به میزان ۲۲۲ کیلونیوتن و ۴۴۵ کیلونیوتن قرار گرفته و باربرداری می شوند. سپس یک بار جانبی ۶۶۷ کیلونیوتن به نمونه



شکل ۳. شکل بارگذاری کلیدهای برشی [۳]  
Fig. 3. Loading protocols

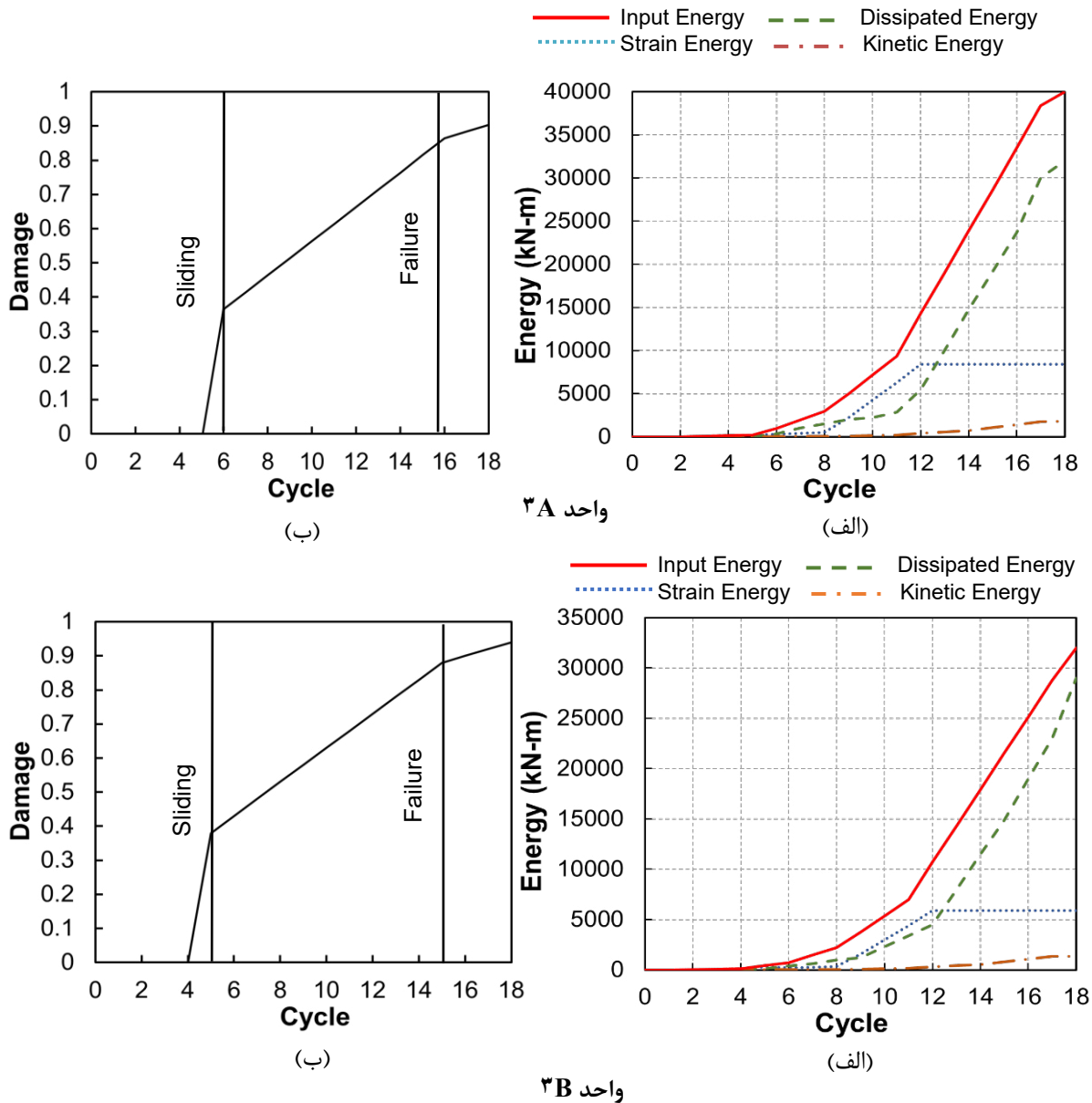


شکل ۴. مقایسه منحنی نیرو-تغییرمکان در آزمایش [۳] و اجزای محدود (الف) واحد 3A، (ب) واحد 3B  
Fig. 4. Comparison of lateral force-displacement curves in experiment and finite element a) unit 3A b) unit 3B

می دهد که در نمونه ی 3A، اولین ترک ها در نخستین سیکل های بارگذاری و در سطح تماس بین کلید برشی و کوله ظاهر می شود و تا سیکل پنجم، این ترک ها به تدریج گسترش می یابند. در این مرحله، خرابی کلید برشی کم می باشد. با ادامه ی سیکل های بارگذاری، آرماتورهای عمودی تسلیم شده و لغزش افقی کلید برشی در تغییرمکان ۳۳ میلی متر و در سیکل های ششم و هشتم مشاهده می گردد. از طرفی با توجه به منحنی خرابی شکل ۵-ب، از شروع بارگذاری تا سیکل ششم مقدار خرابی ناچیز بوده و در سیکل ششم، شاخص خرابی افزایش قابل توجهی داشته و به ۰/۳۷ می رسد، که نشان دهنده ی آستانه ی لغزش کلید برشی می باشد. نتایج تحلیل

منحنی نیرو-تغییرمکان هریک از واحدهای کلید برشی حاصل از مدلسازی اجزای محدود و آزمایش در شکل ۴ با هم مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، مدل اجزای محدود به خوبی رفتار کلیدهای برشی را پیش بینی نموده و منحنی نیرو-تغییرمکان در آزمایش و اجزای محدود مطابقت مناسبی دارند.

شاخص خرابی ارائه شده برای هریک از نمونه های کلید برشی تحت بارگذاری چرخه ای محاسبه شده و منحنی خرابی در شکل ۵ رسم شده است. همچنین انرژی های تجمعی ورودی، کرنشی، جنبشی و جذب شده، که در محاسبه شاخص خرابی مورد استفاده قرار گرفته، در شکل ۵ ترسیم شده است. گزارش آزمایش نشان



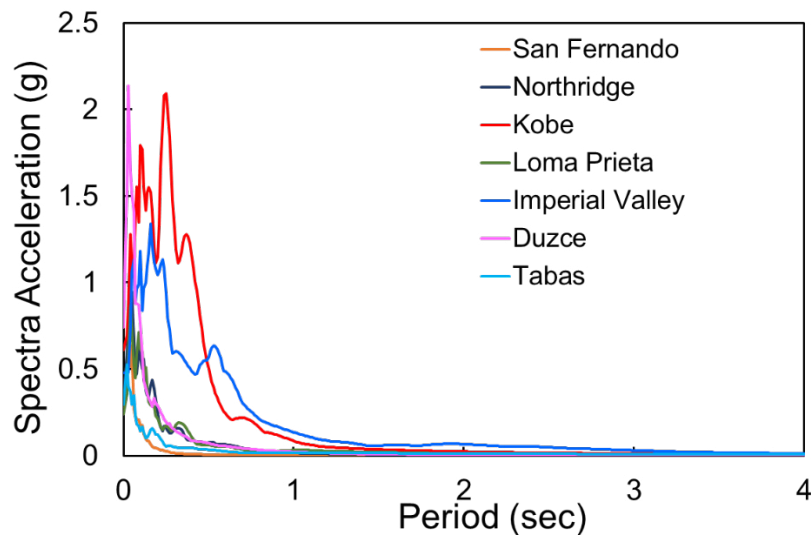
شکل ۵. الف) منحنی انرژی و ب) منحنی خرابی کلیدهای برشی 3A و 3B  
 Fig. 5.a) Energy curve b) damage curves of units 3A and 3B

کلید برشی با شیب ملایم تری صورت می گیرد. با توجه به منحنی انرژی های تجمعی، مشاهده می شود تا قبل از لغزش کلید برشی در سیکل ششم، انرژی مستهلک شده بسیار اندک می باشد. با شروع لغزش، اصطکاک بین سطوح تماس کلیدهای برشی، بخشی از انرژی ورودی را مستهلک نموده و با افزایش سیکل های بارگذاری مقدار انرژی مستهلک شده با شیب نسبتاً زیادی افزایش می یابد و همزمان انرژی کرنشی سیستم کاهش می یابد. پس از شروع گسیختگی در پایان سیکل شانزدهم، انرژی مستهلک شده با شیب کمتری افزایش

اجزای محدود و آزمایش نشان می دهد، حداکثر ظرفیت بار جانبی کلید برشی ۳A در سیکل هشتم حاصل می گردد. با ادامه ی بارگذاری، بار جانبی به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و تا رسیدن به تغییر مکان ۱۷۲ میلی متر، در انتهای سیکل پانزدهم بارگذاری، تعدادی از آرماتورها می شکنند و گسیختگی کلید برشی به وقوع می پیوندد. همان طور که در شکل ۵-ب مشاهده می شود، شاخص خرابی از سیکل ششم تا سیکل شانزدهم با شیب نسبتاً زیادی افزایش یافته و از سیکل شانزدهم تا پایان بارگذاری، افزایش خرابی در

جدول ۲. مشخصات رکوردهای زلزله  
Table 2. Earthquake ground motion characteristics

شماره	نام زلزله	سال وقوع	ایستگاه	بزرگی زلزله	PGD (cm)	PGV (cm/s)	PGA (g)
۱	San Fernando	۱۹۷۱	Cataic-Old Ridge Route	۶/۶۱	۵/۳۴	۱/۵۵	۰/۳۱۲
۲	Northridge	۱۹۹۴	Beverly Hills	۶/۹	۱۴/۶	۶/۰۱	۰/۳۲۵
۲	Kobe	۱۹۹۵	Fukushima	۶/۹	۵/۲۸	۳/۲۱	۰/۶۱۳
۴	Loma Prieta	۱۹۸۹	Anderson Dam	۶/۹۳	۱/۸۱۳	۴/۲۴	۰/۲۳۸
۵	Imperial Valley	۱۹۷۹	El Centro Array	۶/۹۵	۱۷/۱۲	۱۰/۸۸	۰/۵۸۶
۶	Duzce	۱۹۹۹	Bolu	۷/۱۴	۴/۱	۵/۰۹۸	۰/۷۳۹
۷	Tabas	۱۹۷۸	Boshrooyeh	۷/۳۵	۳/۵۶	۶/۸	۰/۲۹۴



شکل ۶. طیف پاسخ رکوردهای زلزله  
Fig. 6. Earthquake records spectra

خرابی از سیکل پنجم تا ۱۵ افزایش می یابد و در سیکل پانزدهم، مقدار شاخص خرابی به حدود ۰/۸ می رسد. سپس در فاصله ی بین سیکل های پانزدهم تا انتهای بارگذاری، خرابی با شیب کمتری نسبت به قبل از شروع گسیختگی کلید برشی افزایش می یابد. همچنین بررسی منحنی های تجمعی انرژی نشان می دهد که تا قبل از شروع لغزش نسبت انرژی مستهلک شده به انرژی ورودی کم بوده و با شروع لغزش کلید برشی، مقدار انرژی استهلاک یافته به طور قابل توجهی افزایش می یابد. انرژی مستهلک شده و جنبشی با افزایش سیکل های بارگذاری افزایش یافته و همزمان انرژی کرنشی سیستم

می یابد. با توجه به نتایج آزمایش، لغزش کلید برشی ۳B، در سیکل های پنجم تا هفتم و در تغییرمکانی برابر با ۲۵ میلی متر آغاز می شود. منحنی خرابی کلید برشی ۳B، نشان می دهد که مقدار شاخص خرابی از ابتدای بارگذاری تا سیکل پنجم بسیار اندک بوده و در سیکل پنجم با افزایش ناگهانی به مقدار ۰/۳۹ می رسد. همچنین با توجه به مشاهده های آزمایش، در سیکل های چهاردهم تا شانزدهم، متناظر با تغییرمکان ۱۳۰ میلی متر، برخی از آرماتورها شکسته و گسیختگی کلید برشی آغاز می شود. با توجه به شکل ۵-ب، شاخص

کلید برشی در PGA برابر با ۰/۰۵g و در لوما پریتا<sup>۵</sup> در ۰/۰۸g آغاز می شود. همان طور که در شکل های ۷-ج و د مشاهده می شود، مقدار شاخص خرابی کلید برشی در این شتاب ها به ترتیب برابر با ۰/۳۴ و ۰/۲۱ می باشد. در زلزله های ایمپریال ولی<sup>۶</sup>، دوزچه<sup>۷</sup> و طبس، کلید برشی در مقادیر PGA برابر با ۰/۰۶۴g، ۰/۰۴۵g و ۰/۰۴g به تغییرمکان نظیر لغزش می رسد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، مقدار شاخص خرابی کلید برشی، متناظر با این مقادیر PGA، ۰/۲۵، ۰/۳۴ و ۰/۳۶ به دست آمده است. همچنین با توجه به گزارش آزمایش، شکست کلید برشی ۳A، در تغییرمکان ۱۷۲ میلی متر رخ می دهد. نتایج مدلسازی اجزای محدود نیز نشان می دهد که نمونه کلید برشی در زلزله های سن فرناندو، نورتریج و کوبه، به ترتیب در مقادیر PGA، برابر با ۰/۶۸g، ۰/۶g و ۰/۵۶g به تغییرمکان شکست می رسند. شاخص های خرابی متناظر براساس منحنی خرابی شکل ۷، برابر با ۰/۸۵، ۰/۸۷ و ۰/۸۹ به دست می آید. همچنین در رکورد زلزله های لوما پریتا و ایمپریال ولی، نمونه کلید برشی در مقادیر PGA، ۰/۶۵g و ۰/۵۸g به تغییرمکان گسیختگی رسیده و در زلزله های دوزچه و طبس در حداکثر شتاب ۰/۴۵g و ۰/۴g به گسیختگی می رسد. با توجه به شکل ۷، مقدار شاخص خرابی متناظر با این شتاب ها در رکورد لوما پریتا ۰/۸۱ و رکورد ایمپریال ولی برابر با ۰/۸۲ و در زلزله های دوزچه و طبس ۰/۹۱ و ۰/۹۶ به دست می آید. از طرفی بررسی نتایج تحلیل خرابی کلید برشی ۳A در بارگذاری چرخه ای در بخش قبل، نشان می دهد که شاخص خرابی متناظر با شکست کلید برشی ۰/۸۸ به دست آمده است. بنابراین شاخص خرابی ارائه شده، مقادیر مشابهی برای خرابی متناظر با شکست کلید برشی PGA تحت بار چرخه ای و لرزه ای ارائه می دهد.

در کلید برشی ۳B، با توجه به آزمایش، تغییرمکان تسلیم برابر با ۲۵ میلی متر می باشد. نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی نیز نشان می دهد که کلید برشی در رکوردهای سن فرناندو، نورتریج و کوبه به ترتیب در مقادیر PGA، برابر با ۰/۰۴۷g، ۰/۰۷g و ۰/۰۴g به تغییرمکان لغزش می رسد. با توجه به منحنی های خرابی شکل ۸، مقدار شاخص خرابی در این مقادیر شتاب، برابر با ۰/۲۸، ۰/۳۳ و ۰/۳۵

کاهش می یابد. این افزایش انرژی پس از شروع گسیختگی کلید برشی در سیکل پانزدهم با شیب کمتری تا انتهای بارگذاری ادامه می یابد. همچنین نتایج آزمایش نشان می دهد که کلیدهای برشی واحد ۳B در مقایسه با کلید برشی واحد ۳A، ظرفیت باربری و تغییرمکان کمتری داشته و خرابی های بیشتری متحمل می شود. مقایسه ی منحنی های خرابی کلیدهای برشی ۳A و ۳B، نشان می دهد که شاخص خرابی ارائه شده، خرابی شدیدتری برای کلید برشی ۳B پیش بینی نموده است. به طور مثال، مقدار شاخص خرابی نظیر گسیختگی کلید برشی ۳A، برابر با ۰/۸۸ و کلید برشی ۳B برابر با ۰/۹۳ می باشد.

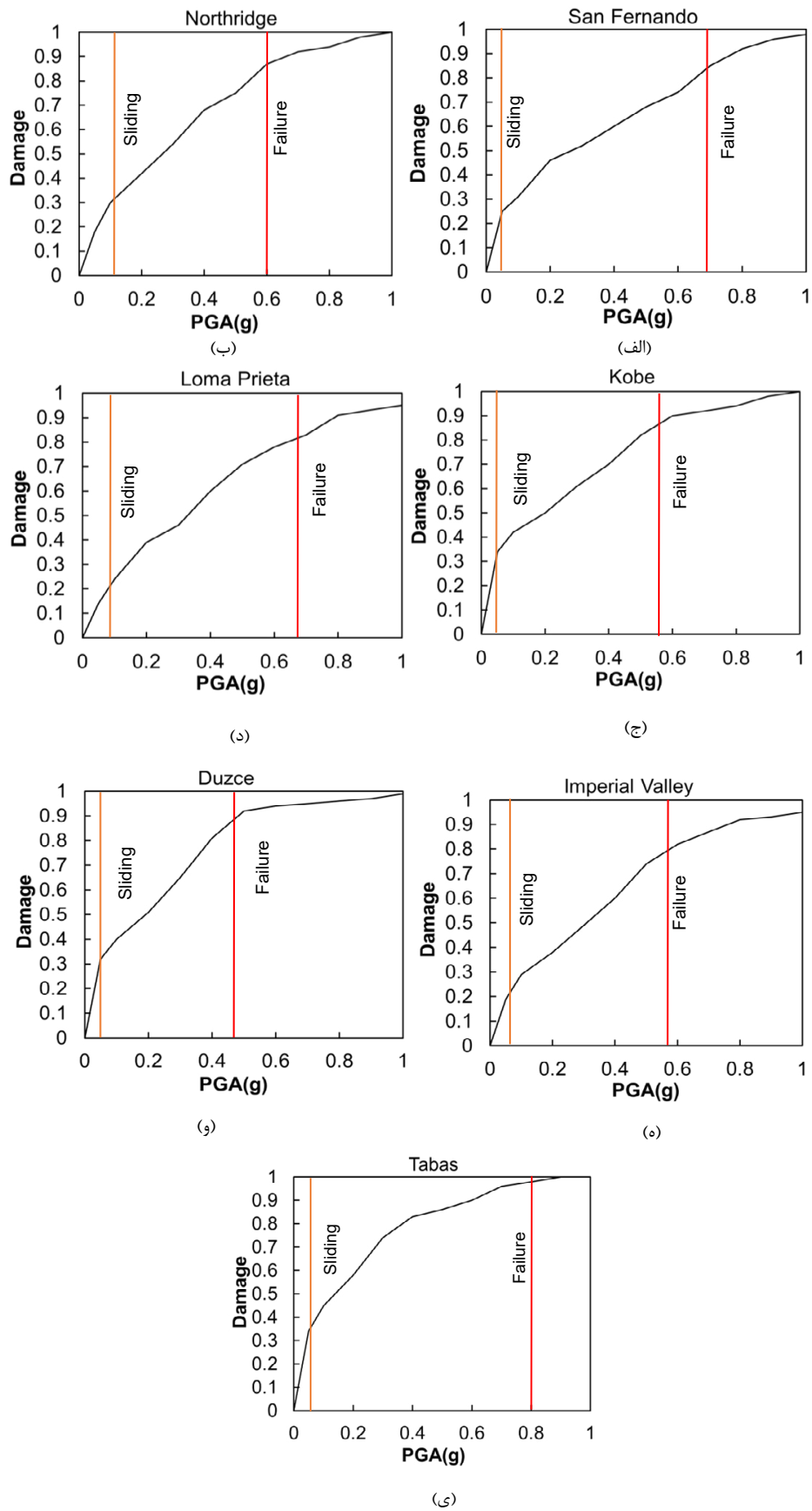
### ۳-۴- بارگذاری لرزه ای

به منظور محاسبه ی شاخص خرابی ارائه شده برای کلیدهای برشی تحت بار لرزه ای، ۷ رکورد زلزله مطابق جدول ۲ انتخاب شده و طیف پاسخ رکوردها در شکل ۶ نشان داده شده است. رکوردها با بزرگی ۶/۵-۷/۵ ریشتر و حداکثر شتاب ۰/۲g تا ۰/۸g انتخاب شده است. رکوردهای زلزله به شتاب طرح ۰/۳۵g مقیاس می شوند، سپس هر رکورد به شتاب حداکثر ۰/۱g تا ۱g با گام های ۰/۰۵ مقیاس شده و بدین ترتیب برای هر رکورد تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده (IDA) انجام می گیرد. شاخص خرابی کلید برشی در هر رکورد در گام های زمانی مختلف محاسبه شده و منحنی خرابی کلیدهای برشی ۳A و ۳B در هر زلزله، در مقادیر مختلف PGA زلزله رسم می گردد.

مشاهده نتایج آزمایش نشان می دهد که کلید برشی ۳A در تغییرمکان ۳۳ میلی متر شروع به لغزش می کند. با توجه به نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل اجزای محدود، کلید برشی ۳A، در رکورد زلزله ی سن فرناندو<sup>۱</sup>، در PGA برابر با ۰/۰۵g و در نورتریج<sup>۲</sup>، در مقدار PGA برابر با ۰/۰۷۵g، به تغییرمکان ۳۳ میلی متر می رسد و شروع به لغزش می کند. با توجه به شکل ۷-الف و ب مقدار شاخص خرابی متناظر با لغزش کلید برشی در این زلزله ها به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۳۱ به دست می آید. در زلزله کوبه<sup>۴</sup>، لغزش

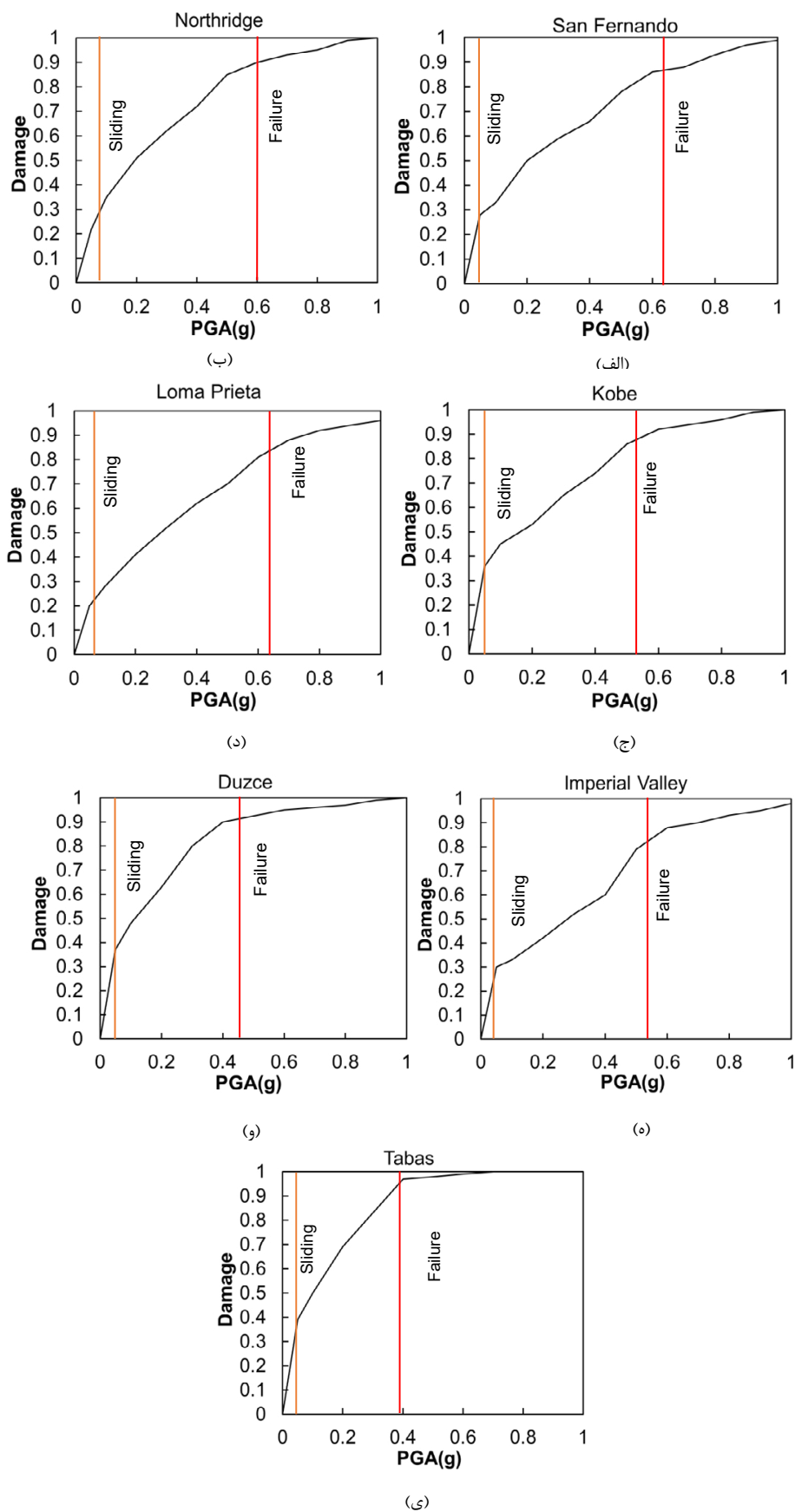
5 .Loma Prieta  
6 Imperial Valley  
7 .Duzce

1 Incremental Dynamic Analysis  
2 San Fernando  
3 .Northridge  
4 Kobe



شکل ۷. منحنی خرابی کلید برشی واحد 3A تحت رکوردهای زلزله مختلف  
 Fig. 7. Damage curves of unit 3A under different earthquake ground motions





شکل ۸. منحنی خرابی کلید برشی 3B تحت رکوردهای زلزله  
 Fig. 8. Damage curves of unit 3B under different earthquake ground motions

به دست آمده است. همچنین در رکوردهای لوما پریتا و ایمپریال ولی، کلید برشی به ترتیب در مقادیر PGA برابر با  $0/085g$  و  $0/056g$  به تغییرمکان نظیر لغزش می رسد که با توجه به شکل ۸-۵ و ه شاخص خرابی در این شتاب ها به ترتیب  $0/23$  و  $0/28$  به دست آمده است. در رکوردهای دوزچه و طبس کلید برشی در  $0/43g$  و  $0/38g$  به تغییرمکان ۲۵ میلی متر می رسد. با توجه به شکل ۸، در این مرحله شاخص خرابی، مقدار خرابی کلید برشی را برابر با  $0/36$  و  $0/38$  پیش بینی می کند. همچنین با توجه به نتایج آزمایش و همان طور که در بخش بارگذاری چرخه ای اشاره شد، تغییرمکان شکست کلید برشی ۳B، برابر با ۱۳۰ میلی متر می باشد. در زلزله سن فرناندو و نورتریج در شتاب  $0/63g$  و  $0/6g$  و در زلزله کوبه، در  $0/55g$  به این تغییرمکان می رسد. با توجه به منحنی های خرابی شکل ۸، مقادیر شاخص خرابی متناظر با این شتاب ها به ترتیب  $0/86$ ،  $0/9$  و  $0/91$  به دست آمده است. همچنین در رکورد زلزله های لوما پریتا و ایمپریال ولی، نمونه کلید برشی در مقادیر PGA،  $0/635g$  و  $0/56g$  به تغییرمکان گسیختگی رسیده و با توجه به شکل ۸، مقدار شاخص خرابی متناظر با این شتاب ها در رکورد لوما پریتا  $0/83$  و رکورد ایمپریال ولی برابر با  $0/84$  می باشد. در زلزله های دوزچه و طبس مقادیر شتاب نظیر گسیختگی به ترتیب برابر با  $0/43g$  و  $0/39g$  و مقادیر شاخص خرابی متناظر برابر با  $0/94$  و  $0/99$  می باشد. تحلیل خرابی کلید برشی ۳B، تحت بارگذاری چرخه ای نشان می دهد که در حالت گسیختگی، شاخص خرابی حدود  $0/93$  به دست آمده است، بنابراین به طور کلی مشاهده می گردد که مقادیر خرابی پیش بینی شده توسط شاخص خرابی در حالت شکست، در بارگذاری چرخه ای و لرزه ای در هر دو کلید برشی به هم نزدیک می باشد و شاخص خرابی حالت های خرابی کلید برشی را تحت بار لرزه ای به خوبی پیش بینی نموده و مقادیر قابل قبولی ارائه می دهد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک شاخص خرابی لرزه‌های برای تعیین مقدار کمی خرابی در کلیدهای برشی کوله های پل، بر مبنای انرژی مستهلک شده، ارائه شده است. بدین منظور مدل رفتاری کلیدهای برشی بر مبنای منحنی رفتاری آن ها توسعه داده شده و سپس مدل اجزای محدود چند نمونه کلید برشی آزمایش شده تحت بار چرخه ای،

تشکیل شده و شاخص خرابی هر یک از نمونه ها محاسبه شده است. سپس مقادیر سطوح خرابی پیش بینی شده توسط شاخص ارائه شده، با خرابی مشاهده شده در آزمایش مقایسه گردید. همچنین با استفاده از تحلیل IDA کلیدهای برشی تحت ۷ رکورد زلزله، منحنی های خرابی کلیدهای برشی در مقادیر مختلف PGA زلزله، به دست آمد. خلاصه ی نتایج به دست آمده بدین شرح می باشد:

• شاخص خرابی ارائه شده، به خوبی می تواند سطوح خرابی کلید برشی شامل لغزش و گسیختگی را در طول سیکل های بارگذاری و مدت زمان زلزله پیش بینی نماید.

• شاخص خرابی ارائه شده با در نظر گرفتن مقدار انرژی مستهلک شده، اثرات تجمعی تعداد سیکل های بارگذاری، و کاهش سختی و مقاومت در سیکل های بالاتر را در نظر می گیرد و برخلاف شاخص ها و معیارهای موجود ارزیابی خرابی کلیدهای برشی که اغلب براساس تغییرمکان و نیروی حداکثر می باشند، تاثیر همزمان لغزش و خستگی این المان ها ناشی از کاهش سختی و مقاومت و اثر تجمعی این کاهش ها در سیکل های آخر بارگذاری در خرابی لحاظ می کند. بنابراین، این شاخص مقدار خرابی لرزه ای را به صورت واقعی تر پیش بینی می نماید.

• شاخص خرابی ارائه شده، به جای اینکه مانند شاخص های دیگر نظیر پارک و آنگ [۱۳] از اثرات سازه ای ناشی از زلزله استفاده نماید، به طور مستقیم خرابی را براساس انرژی ورودی زلزله تعریف می کند. در واقع انرژی ورودی هر زلزله، دربرگیرنده ی ویژگی های اصلی زلزله شامل فرکانس، دامنه و مدت زمان زلزله می باشد و بنابراین به خوبی می تواند اثرات زلزله در خرابی را منظور نماید.

• شاخص خرابی ارائه شده براساس مدل اصطکاکی تعریف شده و مقدار آن قبل از شروع لغزش، نسبتا کم با رسیدن المان به تغییرمکان آستانه ی لغزش مقدار شاخص افزایش قابل توجهی داشته و استهلاک انرژی المان از طریق سایش سطوح لغزش آغاز می شود. با ادامه بارگذاری، انرژی مستهلک شده از طریق اصطکاک سطوح افزایش یافته و مقدار شاخص افزایش می یابد.

• مقادیر خرابی پیش بینی شده توسط شاخص خرابی در سطح شکست و گسیختگی نمونه های کلید برشی در آزمایش و تحت بارگذاری چرخه ای و تحت بار لرزه ای به هم نزدیک بوده و شاخص خرابی ارائه شده، در سطح خرابی گسیختگی، مقادیر خرابی تقریبا

یکسانی برای نمونه ها می دهد.

### ۶- فهرست علائم

$A_{vf}$  مساحت،  $mm^2$

$f_{yf}$  تنش تسلیم،  $N/mm^2$

$\Delta$

تغییر مکان، m

$\Delta_{cr}$

تغییر مکان بحرانی، m

$E_{hd}$

انرژی مستهلک شده، kN.m

$E_i$

انرژی ورودی، kN.m

$E_k$

انرژی جنبشی، kN.m

$E_s$

انرژی کرنشی، kN.m

### مراجع

- [9] Ghobrah, A., Abou-Elfath, H., and Biddah, A.1999. "Response based damage assessment of structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamic" 28 pp 79-104.
- [10] Mahboubi, S. and Shiravand, M.R.2018. "A proposed input energy-based damage index for RC bridge piers". Journal of Bridge Engineering. 24. pp1-19. 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001326.
- [11] Kunnath, S. K., A. El-Bahy, A. W. Taylor, and W. C. Stone. 1997. "Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers". Buffalo, NY: State Univ. of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research.
- [12] Mander, J. B., and C. T. Cheng. 1995. Renewable hinge detailing for bridge columns. In Vol. 3 of Proc., Pacific Conf. on Earthquake Engineering, 197–206. Melbourne, Australia: Australian Earthquake Engineering Society.
- [13] Park. Y.J., A., A.H.1985. "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete". Journal of Structural Engineering. 111. pp. 722-739.
- [14] Teran-Gilmore, A., Sanchez-Badillo, A. and Espinosa-Johnson, M. 2010. "Performance-based seismic design of reinforced concrete ductile buildings subjected to large energy demands". Earthquake Structure. 1. pp. 69–91.
- [15] Bassam, A., Iranmanesh, A., and Ansari, F. 2011. "A simple quantitative approach for post-earthquake damage assessment of flexure dominant reinforced concrete bridges". Engineering Structure, 33 pp.3218-3225.
- [16] Jara, J. M., Lopez, M.G., Jara, M., and Olmos, B.A. 2014. "Rotation and damage index demands for RC Medium-length span bridges". Engineering Structure. 75 pp. 205-217.
- [17] Powell, G. H., and R. Allahabadi. 1988. "Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures", Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 16. pp 719–734.
- [18] Bali, G.2014. Parametric Study of Bridge Response
- [1] Caltrans, S., Caltrans seismic design criteria. 2010. California Department of Transportation, Sacramento.
- [2] Bozorgzadeh, A., Megally, S., Restrepo, J., and Ashford, A.S.2004. "Capacity Evaluation of Exterior Sacrificial Shear Keys of Bridge Abutments". Journal of Bridge Engineering. 11,pp. 555-565.
- [3] Megally, S. H., Silva, P. F., and Seible, F.2002. "Seismic response of external sacrificial shear keys". Report No. SSRP-2001/23, Department of Structural Engineering, University of California San Diego.
- [4] Silva, P. F., Megally, S., and Seible, F.2003. "Seismic performance of sacrificial interior shear keys" ACI journal, 100,pp177–187.
- [5] Silva, P. F., Megally, S., and Seible, F.2003. Seismic performance of sacrificial interior shear keys", Earthquake Spectra, 25. pp 643–664.
- [6] Goel, R., and Chopra, A. 2008. "Role of Shear Keys in Seismic Behavior of Bridges Crossing Fault-Rupture Zones". Journal of Bridge Engineering.
- [7] Xiang N, and Li, J. 2016."Seismic performance of highway bridges with different transverse unseating-prevention devices". Journal of Bridge Engineering, 21 04016045.
- [8] Xiang N, and Li, J. 2018. "Effect of exterior concrete

- Wavelet-Based Cuckoo-Search Fuzzy Logic Controller”, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering.
- [21] Zabihi-Samani, M.2019. “Design of Optimal Slit Steel Damper Under Cyclic Loading for Special Moment Frame by Cuckoo Search”. International Journal of Steel Structures.
- [22] Sabbagh-Yazdi,S.R., Farhoudi, A. and Zabihi-Samani, M. 2019. “Transient Galerkin finite volume solution of dynamic stress intensity factors”. Asian Journal of Civil Engineering.
- under Bidirectional Earthquake Loading with Nonlinear Shear Key and Columns. MSc Thesis. Faculty of the Department of Civil Engineering California State University, Sacramento.
- [19] Bi, K. and Hao, H.2013. Influence of Shear Keys on the Seismic Behavior of Bridge Structures to spatially varying ground motions. 23rd Australasian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23)Byron Bay, Australia, 9-12 December (2013), S.T. Smith (Ed.).
- [20] Zabihi-Samani, M., and Ghanooni-Bagha, M. 2018. “Optimal Semi-active Structural Control with a

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S. Mahboubi, M.R. Shiravand, Proposed Damage Index for Seismic Evaluation of RC Bridge Shear keys, Amirkabir J. Civil Eng., 52(6) (2020) 1539-1554.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15421.5920](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15421.5920)

