



A Relationship between the Energy Demands of MDOF and Equivalent SDOF Systems under Pulse-Type Near-Fault Earthquakes

S. Abdonnabi Razavi¹, N. Siahpolo^{2,*}, M. Mahdavi Adeli³

¹Department of Civil Engineering, Abadan Branch, Islamic Azad University, Abadan, Iran

²Department of Civil Engineering, Institute for Higher Education ACECR, Khuzestan, Iran

³Department of Civil Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

ABSTRACT: The main purpose of the paper is the qualitative and quantitative study of the relationship between the energy demand of multi-degree-of-freedom systems, MDOF, and equivalent-single-degree-of-freedom systems to calculate the total energy demand of the MDOF system using the ESDOF energy demand. For this purpose, multi-story special steel moment frames were designed and analyzed under the influence of 10 near-fault earthquakes with forward-directivity effects. Moreover, the process is done for the ESDOF system considering specified values of R (degree of nonlinearity). Accordingly, linear and nonlinear total dissipated energy (TDE), hysteretic energy (HE), and damping energy (DE) ratios were introduced to estimate the relationship of the ESDOF and MDOF energy. Results show that the ratio of nonlinear to linear TDE and HE/TDE is affected by period and R in the ESDOF system. However, as the period and R increase, the ratio converges to one. The same result was observed between the nonlinear TDE of the MDOF system and the linear TDE of the ESDOF system. In other words, ESDOF linear TDE can be used instead of MDOF for long periods. In addition, the nonlinear TDE of the MDOF system to the nonlinear TDE of the ESDOF system ratio is affected by higher modes and periods; by increasing the period, the ratio is generally greater than one for the constant R . Also, the effect of higher modes on the ratio of total story dissipated energy to total structure dissipated energy was significant for low R values. With increasing R , the structure tends to damp all the dissipated energy in the first mode.

Review History:

Received: Dec. 04, 2019

Revised: Jan. 18, 2020

Accepted: Jan. 22, 2020

Available Online: Feb. 02, 2020

Keywords:

Energy Demand

MDOF Systems

SDOF Systems

Pulse-Type Near-Fault Earthquake

Higher Modes Effects.

1- Introduction

Goel *et al.* proposed a performance-based plastic design (PBPD) method with the energy factor of elastic-plastic SDOF systems quantifying the seismic demand [1]. The effectiveness of this method has been examined by applying the procedure in steel moment-resisting frames [2], steel frame with buckling restrained braces [3], braced truss moment frames [4, 5] and steel frames with steel shear walls [6].

Hall *et al.* indicated that the displacement caused by the pulses of near-fault earthquakes imposes considerable seismic demand on structures [7]. Krawinkler *et al.* assessed a steel moment-resisting frame under the effect of a near-fault earthquake and stated that the structural response to the continuation of the acceleration pulse, which matches the fundamental period, is critical [8]. On the other hand, many researchers have investigated the effects of this pulse-type ground motion on the linear and nonlinear behavior of SDOF systems [9].

2- Material and Method

2.1 Description Of Frames

In this study, 4-, 10-, 15-, 20-, and 30-story 2D steel MRFs with three bays are considered. Gravity and seismic loads are applied models in accordance with the Iranian National

Building Code-Part 6 [10]. Gravity load consists of dead load, equivalent partitioning load and live load on the beams of the frames of this study equal to 1.75, 1 and 1.25 kN/m, respectively. The DBE is expressed by the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings - 4th edition (also known as Standard 2800) [11] design spectrum for peak ground acceleration equal to 0.35g, behavior factor R equal to 7, importance factor I , and soil type III.

2.2 Research Methodology

Following the initial analysis, design, and determining the sections, the models introduced in Section 3.1 are used to generate the practical ratios through analysis. To this end, initially, the target behavior coefficient (R_{ti}) is set to 0.25, 0.5, 0.75, and 1 in the elastic analyses. This coefficient is considered equal to 1.5-6 in the inelastic analyses (with 0.5 increments). The yield base shear coefficient (C_y) is calculated using the ASCE/SEI 41-13 through pushover analysis of the MDOF structure. It is noteworthy that the coefficient introduced as the behavior coefficient in this study ($R_{exist,i}$) is the ratio of the elastic spectral acceleration to the yield strength of the MDOF structure (with damping ratio 5%).

*Corresponding author's email: siahpolo@acecr.ac.ir



MDOF Hysteresis to SDOF Hysteresis Energy Ratio - Median FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$

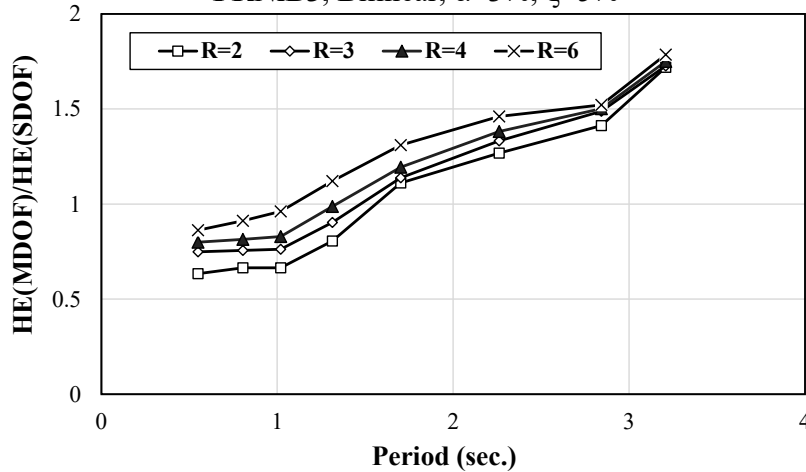


Fig. 1. Higher mode effects (MDOF effects) on HE demand

3- Results and Discussion

3.1 Hysteretic Energy Demand In MDOF Systems

On the basis of a study conducted by Gerami and Abdollahzadeh, Hysteretic Energy (HE) can be considered as a key factor to minimize expected structural damages [12]. Hence, the mean HE energy of the 2D steel MRFs of the present study are depicted and discussed. Figure 1 shows the ratio of hysteretic energy dissipated energy in the MDOF system to the corresponding values obtained from an E-SDOF system considering various R values (level of nonlinearity).

3.2. Height Wise Distribution Of Hysteretic Energy Demand (He)

Results obtained in these sections fail to give an accurate insight into the hysteretic energy demands (HE) over the height of the structure. Hence, the concept of the story hysteretic energy demand ($HE_{s,i}$) is introduced. In order to gain a better statistical understanding of the accumulation of the story hysteretic energy, the story HE demand is normalized by the total dissipated hysteretic energy (HE_t).

Figure 2 shows the mean values of the normalized story hysteretic energy over the height. Due to space limitations, graphs are shown only for $R=2.0, 3.0, 4.0$ and 6.0 . The following observation can be made from the presented graphs:

- In the structures in which there is a high possibility of plastic hinges formation, accumulation of maximum energy demands is observed at the lower stories.
- In low- and mid-rise frames, the peak $HE_{s,i}/HE_t$ ratio is influenced by the higher modes and locates at the upper stories for $R=2.0$ and 3.0 . However, in high-rise frames (15 stories and more), the peak $HE_{s,i}/HE_t$ ratio occurs at the lower floors due to the nature of near-field motions and dynamic instability.

4- Conclusion

The energy demand of the MDOF system was normalized with the corresponding energy demand of the E-SDOF system to consider the effects of higher modes and degrees of freedom. According to the results of the analyses, the following findings can be concluded:

- The TDE^{in}/TDE^{el} ratio resulted for the ESDOF system is weakly dependent on period and nonlinearity, except for periods shorter than 1 Sec. The same finding is available for HE/TDE ratio. The trend of HE/TDE ratio for long period systems depends on the earthquake energy content substantially.
- TDE of the elastic MDOF structure is equal to 80% of the TDE demand of the corresponding elastic E-SDOF system. With an increase in the period, due to the MDOF effect, the TDE ratio ($TDE_{MDOF}^{el}/TDE_{SDOF}^{el}$) increases drastically.
- Evaluation of ($TDE_{MDOF}^{in}/TDE_{MDOF}^{el}$) ratio demonstrates that dissipated energy in the nonlinear structure is equal to dissipation of energy due to damping in the elastic system, except for short period frames.
- The ratio of ($TDE_{MDOF}^{in}/TDE_{SDOF}^{el}$) shows the effect of MDOF increases the corresponding TDE of the inelastic MDOF system. But for short period models, elastic TDE of E-SDOF is an acceptable estimation.
- The trend of HE/TDE ratio resulted in MDOF structure is similar to corresponding E-SDOF ratio. Hence, the E-SDOF system ratio is practical for the MDOF system.

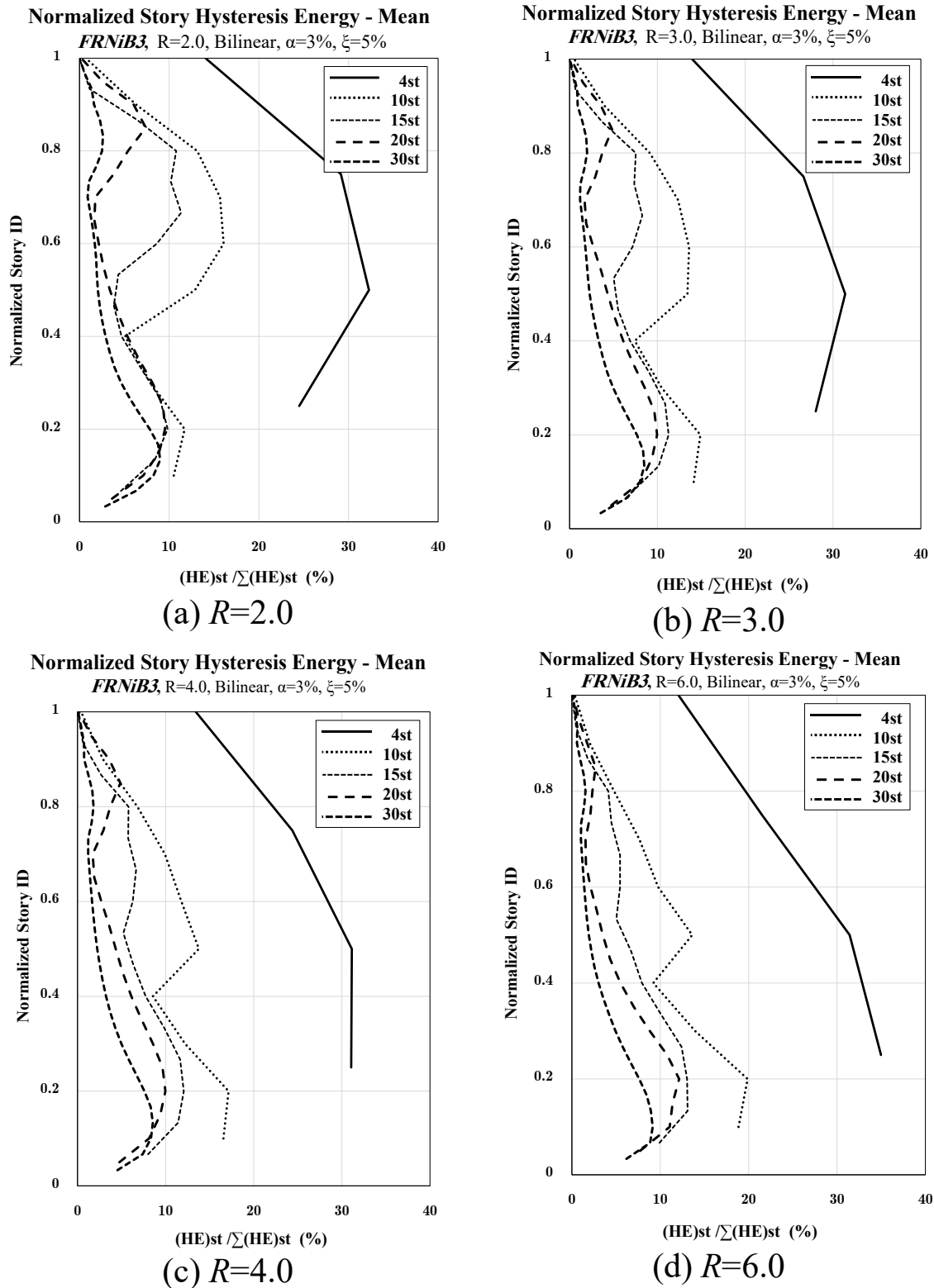


Fig. 2. The story hysteretic energy distributed at height, $HE_{st,i}$ normalized by the total hysteretic energy for $R=2, 3, 4, 6$ and 4-, 10-, 15-, 20-, and 30-story frames

References

- [1] Goel, S. C., Liao, W. C., Bayat, MR., Chao, SH., "Performance-based plastic design (PBD) method for earthquake-resistant structures: an overview", *Struct Des Tall Spec*, 19(1–2), pp. 115–37
- [2] Banihashemi, MR., Mirzagoltabar, AR., Tavakoli, HR., "Development of the performance based plastic design for steel moment resistant frame", *Int J Steel Struct*, 15(1), pp. 51–62, 2015.
- [3] Sahoo, DR., Chao, S., "Performance-based plastic design method for buckling-restrained braced frames", *Eng Struct*, 32(9), pp. 2950–2958, 2013.
- [4] Wongpakdee, N., Leelataviwat. S., Goel. SC., Liao, WC., "Performance-based design and collapse evaluation of buckling restrained knee braced truss moment frames", *Eng Struct*, 60, pp. 23–31, 2014.
- [5] Heidari, A., Gharehbaghi, S., "Seismic performance improvement of special truss moment frames using damage and energy concepts", *Earthq Eng Struct Dyn*, 44(7), pp. 1055–1073, 2015.
- [6] Kharmale, SB., Ghosh, S., "Performance-based plastic design of steel plate shear walls", *J Constr Steel Res*, 90, pp. 85–97, 2013.
- [7] Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., Wald, D. J., "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake spectra*, 11(4), pp.569-605. 1995.
- [8] Krawinkler, H., Anderson, J., Bertero, V., Holmes, W., Theil, Jr. C., "Steel buildings", *Earthquake Spectra*, 12(S1), pp. 25-47, 1996.
- [9] Makris, N., Black, C. J., "Dimensional analysis of bilinear oscillators under pulse-type excitations", *Journal of engineering mechanics*, 130(9), pp. 1019-1031, 2004.
- [10] Corporate author "DHUD-Part6: Applied loads on buildings", Department of Housing and Urban Development, "Iranian National Building Code-Part 6", third edition, (in Persian), Iran, 2014.
- [11] Corporate author "BHRC-PN 253: Iranian code of practice for seismic resistant design of building", Iranian building codes and standards, forth revision, (in Persian), Iran, 2014.
- [12] Gerami, M., Abdollahzadeh, D., "Estimation of forward directivity effect on design spectra in near field of fault", *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(9), pp. 8670-8678, 2012.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Abdonnabi Razavi, N. Siahpolo, M. Mahdavi Adeli, A Relationship between the Energy Demands of MDOF and Equivalent SDOF System under Pulse-Type Near-Fault Earthquakes. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 571-574.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17466.6569](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17466.6569)





مطالعه کمی و کیفی رابطه بین نیاز انرژی سیستم MDOF و ESDOF تحت اثر زلزله حوزه نزدیک گسل پالس گونه

سیدعبدالنبی رضوی^۱، نوید سیاه پلو^{۲*}، مهدی مهدوی عادل^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد آبادان، دانشگاه آزاداسلامی، آبادان، ایران
^۲ گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاددانشگاهی، خوزستان، ایران
^۳ گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاداسلامی، شوشتر، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

تقاضای انرژی
سیستم MDOF
سیستم SDOF
زلزله نزدیک گسل پالس گونه
اثر مودهای بالاتر

خلاصه: مطالعه کیفی و کمی رابطه بین نیازهای انرژی سیستم چند درجه آزاد، (MDOF) و سیستم یک درجه آزاد (ESDOF) به نحوی که حداکثر نیاز انرژی سیستم MDOF را به کمک نیاز انرژی ESDOF محاسبه نمود، هدف اصلی مقاله حاضر است. بدین منظور قاب‌های فولادی خمشی ویژه با تنوع طبقاتی مختلف طراحی و در برابر ۱۰ زلزله نزدیک گسل دارای اثرات جهت پذیری پیش‌رونده تحلیل شدند. همین موضوع برای سیستم ESDOF و برای مقادیر مشخص R (اندازه غیرخطی شدگی) انجام گرفت. در ادامه برای تخمین رابطه انرژی سیستم ESDOF با MDOF نسبت‌هایی متناظر با کل انرژی تلف شده خطی و غیرخطی (TDE) و انرژی تلف شده چرخه‌ای (HE) و میرایی (DE) معرفی گردید. نتایج نشان می‌دهد در سیستم ESDOF نسبت TDE غیرخطی به خطی و HE/TDE متاثر از پرید و R است. البته با افزایش پرید و R، نسبت مذکور به یک همگرا می‌شود. همین نتیجه بین TDE غیرخطی سیستم MDOF با TDE خطی سیستم ESDOF نیز مشاهده شد. به عبارتی برای پریدهای بلند می‌توان از TDE خطی سازه ESDOF به جای MDOF استفاده نمود. به علاوه نسبت TDE غیرخطی سیستم MDOF به TDE غیرخطی سیستم ESDOF متاثر از مودهای بالاتر و پرید است به نحوی که برای R ثابت، با افزایش پرید نسبت مذکور عموماً بزرگ‌تر از یک به دست می‌آید. همچنین برای مقادیر کم R، تاثیر مودهای بالاتر بر نسبت انرژی تلف شده طبقه به کل انرژی تلف شده سازه قابل توجه بوده در حالی که با افزایش R سازه تمایل دارد کل انرژی تلف شده طبقات را در مود اول مستهلک نماید.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، روش‌هایی بر پایه ی انرژی در مهندسی زلزله به دست آمده که اکنون کاربرد آن در بهینه سازی طراحی مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. اگر چه شاخص‌ترین مطالعه‌ای که باعث شد مفهوم انرژی ورودی و خروجی بتواند به عنوان یک معیار اندازه گیری خسارت سازه در نظر گرفته شود، مقاله‌ای است که توسط یانگ و برترو^۱ (۱۹۹۰) نوشته شد [۲]، با ای+ن حال هاسنر^۲ (۱۹۵۶) اولین محقق بود که روش انرژی را برای طراحی لرزه ای ارائه نمود

[۳]. همچنین در ۱۹۹۹ طراحی قاب‌های خمشی بر این اساس توسط لیلا تاویوات و همکاران^۳ ارائه گردید [۴]. مطالعه وی اهمیت انرژی ورودی مطلق را اثبات نمود و نشان داد که در تاریخچه زمانی انرژی ورودی همواره یک جهش قابل توجه در انرژی وجود دارد. از آن پس تعداد قابل توجهی مطالعه انجام گرفت تا به کمک آن بتوان تخمین مناسبی از نیازهای انرژی و مکانیسم اتلاف آن در سازه به دست آورد [۵-۱۱].

استدلال اساسی در روش طراحی بر پایه انرژی این است که قابلیت اتلاف انرژی المان‌های سازه‌ای را می‌توان به کمک نیاز انرژی تحمیل شده در اثر زلزله محاسبه نمود. برای کمینه نمودن انرژی

1 . Uang and Bertero
2 . Hosner

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: siahpolo@acecr.ac.ir

3 . Leelataviwat et al



منتقل شده به سازه دو تعریف انرژی ورودی نسبی و مطلق استفاده می شود. برخی محققین از تعریف انرژی ورودی نسبی در مطالعات خود بهره گرفته‌اند [۱۴-۱۲]. برخی دیگر از تعریف انرژی ورودی مطلق در تخمین نیازهای غیرخطی سازه استفاده نموده‌اند. البته در هیچ یک از مطالعات مذکور مفهوم اثر مشخصات زلزله در تعریف انرژی ورودی مطلق و نسبی به شکل صریح در نظر گرفته نشده است. پر واضح است که در مجاورت گسل های فعال، حرکت زمین به شدت متأثر از مکانیسم گسلش، راستا و جهت پارگی گسل با توجه به سایت (به طور مثال جهت پذیری پیش‌رونده) و تغییر شکل استاتیکی ماندگار در محل گسلش است که به عنوان اثرات پرتابی یا حرکت پرتابه ای شناخته می‌شود؛ بنابراین پارامترهای زلزله نزدیک گسل باعث می‌شود که مقدار قابل توجهی انرژی پارگی گسل، به شکل یک تحریک پالس گونه با پیوند بلند نمایان گردد (لازم به ذکر است که اثرات جهت پذیری پس‌رونده فاقد ماهیت پالس گونه است). این موضوع از مهم ترین وجوه تمایز زلزله های حوزه ی نزدیک و دور از گسل می‌باشد. حرکت زمین دارای چنین ماهیت پالس گونه است که غالباً در ابتدای شتاب‌نگاشت نمایان شده و تمایل دارد که بخش پیوند بلند طیف پاسخ شتاب را افزایش دهد. در این حالت سازه مقدار قابل توجهی انرژی زلزله را با تعداد اندکی اغتشاش با دامنه بزرگ مستهلک نموده و نیازهای قابل توجهی بر سازه تحمیل می‌شود. در نتیجه خطر ایجاد شکست ترد در المان های سازه با جزئیات اجرایی ضعیف تقویت می گردد. تأثیرات تعیین کننده چنین پدیده ای در خلال زلزله ارزکان (۱۹۹۲)، لاندرز (۱۹۹۲)، نورث ریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، کوچاپلی (۱۹۹۹)، دیوز و چی-چی تایوان مشاهده گردید. بنیوف^۱ (۱۹۵۵) گزارشی از مهم ترین ویژگی های زلزله نزدیک گسل را به کمک الگوهای شدت ایجاد شده در اثر زلزله کرن-کانتی (۱۹۵۲) ارائه نمود [۱۵]. بعدها افراد دیگری همچون ماهین^۲ (۱۹۷۶) [۱۶] و برترو و همکاران^۳ (۱۹۷۸) [۱۷] موضوع آسیب های سازه ای را به دلیل ماهیت پالس گونه زلزله نزدیک گسل سان-فرناندو (۱۹۷۱) بررسی نمودند. هال و همکاران^۴ (۱۹۹۵) نشان دادند که تغییر مکان ایجاد شده در اثر پالس زلزله نزدیک گسل، نیازهای لرزه ای قابل توجهی را بر سازه تحمیل نمود [۱۸]. کراوینکلر و

1 . Benioff
2 . Mahin
3 . Bertero et al.
4 . Hall et al.

همکاران^۵ (۱۹۹۶) با ارزیابی قاب خمشی فولادی در اثر رکورد نزدیک گسل، نشان دادند که پاسخ سازه نسبت به زمان تداوم پالس شتاب که متناسب با دوره تناوب اصلی است، بسیار حساس است [۱۹]. از طرفی اثرات این ماهیت پالسی بر رفتار خطی و غیرخطی سیستم یک درجه آزادی^۶ نیز مورد توجه محققین مختلف بوده است [۲۰].

برقراری توازن بین ظرفیت استهلاک انرژی سازه و انرژی ورودی جهت بهبود روش طراحی بر اساس انرژی و مطالعه رابطه بین انرژی تلف شده چرخه‌ای و کل انرژی ورودی در سازه‌های مجهز به مهاربند شورون در محدوده خطی و غیرخطی از دیگر محورهای مطالعاتی قبل بوده است [۲۱]. توسعه طیف پاسخ و انرژی برای سازه‌های تک درجه و چند درجه آزادی مجهز به میراگر ویسکوز برای زلزله‌های نزدیک گسل با مقادیر مختلف پیوند پالس (T_p) و رابطه بین نسبت پیوند سازه و پیوند پالس (T/T_p) بر نیاز لرزه‌ای از موضوعات جدیدی است که مطرح شده است. نتایج نشان می‌دهد برای نسبت‌های مذکور کمتر از ۱ بیشینه تقاضا به شدت افزایش یافته اما به دلیل پیچیدگی در ویژگی‌های دینامیکی سازه چند درجه آزادی نمی‌توان رابطه‌ای بین تقاضای انرژی سازه چند درجه آزادی و یک درجه آزادی استخراج نمود [۲۲]. توسعه و پیشنهاد روش طراحی بر اساس انرژی برای طراحی سازه با دریافت و شکل‌پذیری یکتواخت در ارتفاع و بررسی کارایی روش به کمک تحلیل تعدادی قاب دو بعدی در برابر زلزله‌های مصنوعی و واقعی از دیگر اقدامات انجام شده در مطالعات پیشین است [۲۳].

رابطه بین ویژگی‌های زلزله و انرژی ورودی حاصل از پالس سرعت با دوره تناوب بلند که یا به طور مشخص از شتاب‌نگاشت پالسی شکل منشأ می‌گیرد و یا در اثر شتاب پالس گونه با محتوای فرکانسی بالا شکل می‌گیرد، می‌تواند دریچه‌ای مفید برای درک بهتر اثرات مخرب زلزله‌های نزدیک گسل بر ساختمان‌های مهندسی‌ساز محسوب گردد. در گام نخست، محاسبه انواع انرژی، اعم انرژی تلف شده در اثر رفتار چرخه‌ای، انرژی میرایی و انرژی کرنشی ارتجاعی مورد بررسی و سنجش قرار می‌گیرد. به علاوه مجموع انرژی تلف شده که در انتهای رکورد تقریباً با انرژی ورودی یکی است، از دیگر نیازهای انرژی محاسبه شده در این مقاله است. این مقادیر برای سازه

5 . Krawinkler et al.
6 . Single Degree of Freedom (SDOF)

SDOF با میرایی ویسکوز در اثر زلزله افقی نتیجه می‌گردد:

$$m \frac{(\ddot{u} + \ddot{u}_g)}{2} + \int (cu) du + \int f(u) du = \int m (\ddot{u}_g + \ddot{u}) du = \int m (\ddot{u}_g + \ddot{u}) \ddot{u}_g dt \quad (3)$$

معادله (۳) را می‌توان به شکل عمومی زیر نوشت. در این حالت انواع مؤلفه‌های انرژی قابل تعریف می‌باشند:

$$E_K + E_\xi + E_s + E_H = E_{AI} \quad (4)$$

جایی که، E_{AI} ، انرژی ورودی مطلق، E_K ، انرژی جنبشی مطلق، E_ξ ، انرژی میرایی، E_s ، انرژی کرنشی ارتجاعی و E_H ، انرژی کرنشی پلاستیک (انرژی چرخه‌ای غیر قابل برگشت (تجدید ناپذیر)). از طرفی اگر از رابطه (۲) نسبت به u انتگرال گرفته شود، رابطه زیر برای معرفی انرژی نسبی سیستم SDOF به دست می‌آید:

$$m \frac{\dot{u}}{2} + \int (cu) du + \int f(u) du = - \int m (\ddot{u}_g) du = - \int m \ddot{u}_g \dot{u} dt \quad (5)$$

فرم بسته مؤلفه‌های انرژی را در رابطه (۵) می‌توان به شکل زیر

نوشت:

$$E_{KR} + E_\xi + E_s + E_H = E_{RI} \quad (6)$$

جایی که، E_{RI} ، انرژی ورودی نسبی، E_{KR} ، انرژی جنبشی نسبی است. E_I ، نماینده کاری است که به وسیله نیروی اینرسی ($m\ddot{u}_g$) بر سازه اثر می‌کند که معادل کار انجام شده توسط کل نیروی برش پایه در اثر حرکت زمین است. از سوی دیگر، E_{RI} ، نماینده کار انجام شده توسط سازه با پای ثابت در اثر نیروی جانبی معادل است. در نتیجه این انرژی فاقد اثر حرکت جسم صلب است. تمایز بین این دو انرژی در حقیقت اختلاف بین انرژی جنبشی مطلق و نسبی است؛ زیرا هر دو رابطه (۴) و (۶) مقادیر انرژی میرایی، کرنشی ارتجاعی و پلاستیک یکسان است. اختلاف بین دو تعریف انرژی را می‌توان به

یک درجه آزاد و چند درجه آزاد^۱ محاسبه شده‌اند. در ادامه تلاش شده است تا برای تبیین تأثیرات MDOF بر نیاز انرژی، نسبت نیاز انرژی به دست آمده از سازه MDOF بر مقادیر متناظر با سازه یک درجه آزاد معادل^۲ تقسیم و به عنوان اثرات MDOF معرفی گردد. این نسبت‌های کاربردی می‌توانند زمینه‌ساز پیشنهاد فرآیندی ساده باشند که به کمک انرژی به دست آمده از سازه SDOF، بیشینه انرژی سازه MDOF را محاسبه نمود.

کمبود مطالعات کافی در خصوص اثر زلزله نزدیک گسل بر انواع انرژی‌های موجود در سازه، انگیزه اصلی این مطالعه است. واضح است که در صورتی می‌توان روش‌های انرژی را در طراحی سازه‌ها در برابر زلزله نزدیک گسل توسعه داد که در کی عمیق و بسیط از این موضوع در دسترس قرار گیرد. همچنین ابتدا لازم است مفاهیم مرتبط با انرژی در سازه SDOF بررسی شده و سپس برای توسعه به سازه MDOF به کار گرفته شود. لذا اهمیت تحقیق حاضر از آن جهت چند برابر می‌گردد که نسبت‌های کاربردی پیشنهاد شده می‌توانند مقدمه توسعه فرمول‌های تجربی باشند که ارتباط دهنده انواع نیاز انرژی سازه ESDOF و MDOF است.

۲- فرمول نویسی پایه در انرژی ورودی سیستم SDOF

از مبانی دینامیک سازه معادله حرکت سیستم SDOF میرا عبارت است از:

$$m\ddot{u}_t + cu + f(u) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه m ، جرم سازه و c ، ضریب میرایی، $f(u)$ ، نیروی ذخیره شده فنر در سیستم خطی، u_t ، تغییر مکان مطلق (کلی)، u_g ، تغییر مکان زمین و u ، تغییر مکان نسبی سیستم نسبت به زمین است. می‌توان رابطه (۱) را به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$m\ddot{u} + cu + f(u) = -m\ddot{u}_g \quad (2)$$

اگر از رابطه (۱) و (۲) نسبت به تغییر مکان نسبی، u ، انتگرال‌گیری شود، دو تعریف برای انرژی ورودی به دست می‌آید. اگر از رابطه (۱) نسبت به u انتگرال گرفته شود، فرمول‌بندی انرژی مطلق سیستم

1 . Multi Degree of Freedom (MDOF)

2 . Equivalent Single Degree of Freedom (ESDOF)

شکل زیر نوشت:

$$E_{AI} - E_{RI} = E_K - E_{KR} = \frac{1}{2} m \dot{u}_g^2 + m u_g \ddot{u}_g \quad (7)$$

سمت راست رابطه (۷) دو عبارت دارد. اولی انرژی جنبشی در اثر سرعت زمین و دومی کار انجام شده توسط شتاب زمین از نظر افزایش تدریجی تغییر مکان سازه. در یک نتیجه‌گیری اولیه می‌توان این‌گونه استدلال نمود که اندازه انرژی ورودی نسبی و مطلق برای سازه‌های بسیار سخت و بسیار نرم تفاوت خواهد داشت. در سازه‌های انعطاف‌پذیر (نرم) که پیوند ارتعاشی آن‌ها به مراتب بزرگ‌تر از پیوند غالب حرکت زمین است، جرم سازه در موقعیت اولیه خود ثابت مانده در حالی که پایه سازه همزمان و به اندازه حرکت زمین جابجا می‌شود. در این حالت، انرژی مطلق ورودی به سازه صفر است در حالی که انرژی نسبی قابل توجهی به سازه منتقل می‌گردد. در مقابل برای سازه سخت، تغییر مکان نسبی جرم با توجه به حرکت زمین بسیار ناچیز بوده و در نتیجه انرژی نسبی ورودی زلزله نزدیک صفر و مقدار قابل توجهی انرژی مطلق به سازه وارد می‌شود.

۳- مدل سازی تحقیق

۳-۱- معرفی مدل‌ها

مدل‌ها از نظر تنوع طبقاتی به شکل ساختمان با تعداد طبقات ۴، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ در نظر گرفته شده است. تعداد دهانه‌های قاب ۳ مفروض شده است. به منظور سهولت در معرفی قاب‌ها، در تحقیق حاضر هر قاب با نام $FRNiB^3$ معرفی گردیده است که منظور، قاب طبقه است. در قاب‌های مورد مطالعه، ارتفاع کلیه طبقات ثابت و برابر ۴ متر و طول دهانه‌ها ثابت و برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است. برای قاب‌های خمشی فولادی دو بعدی مورد استفاده در این مطالعه شکل‌پذیری از نوع ویژه انتخاب گردید.

تمامی قاب‌های فوق الذکر، مطابق مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ایران [۲۴] بارگذاری ثقلی شده‌اند. در بارگذاری ثقلی، بار مرده طبقات، بار معادل تیغه‌بندی و بار متوسط زنده طبقات به ترتیب مقادیر ۵۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع با عرض بارگیر ۵ متر در نظر گرفته شد. همچنین در راستای منظور نمودن بارگذاری لرزه‌ای، با عنایت به استاندارد ۲۸۰۰ [۲۵] در محاسبه جرم طبقات از بار مرده به علاوه ۲۰ درصد بار زنده استفاده شده است. خاک محل احداث، خاک نوع III، منطقه با خطرپذیری بسیار زیاد و نوع کاربری

مسکونی با درجه اهمیت متوسط در نظر گرفته شده است. کلیه قاب‌های مذکور با به کارگیری نرم‌افزار Etabs ۲۰۱۶ [۲۶] و با استفاده از تحلیل استاتیکی معادل (در برخی مدل‌ها تحلیل شبه دینامیکی و همسان‌سازی برش پایه طراحی) و به روش ضرایب بار و مقاومت طراحی شده‌اند [۲۷]. علاوه بر طراحی بر اساس معیار مقاومت، توزیع سختی قاب‌ها در ارتفاع به گونه‌ای تنظیم شده است تا بیشینه دررفت بین طبقه‌ای به مقادیر مجاز مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۵] محدود گردد. برای تیرها از مقطع تیر ورق و برای ستون‌ها از مقطع جعبه‌ای استفاده گردید. در کلیه مقاطع ضابطه مقطع فشرده لرزه‌ای رعایت گردید. مشخصات مقاطع تیر و ستون‌های قاب‌های مورد تحقیق در جداول (۱) تا (۳) ارائه شده است.

۳-۲- مشخصات رکوردهای مورد استفاده در تحقیق

در یک دسته‌بندی، نگاشت‌های نزدیک گسل را بر اساس قضاوت مهندسی از زلزله‌های دور از گسل تمیز می‌دهند. به خصوص چنانچه نگاشت سرعت زلزله در دسترس باشد، تشخیص آن به مراتب ساده‌تر است. یکی دیگر از معیارهای تشخیص زلزله نزدیک گسل، فاصله سایت تا منبع لرزه‌ای است. معمولاً در زلزله‌های نزدیک گسل فواصل بین ۱۵ تا ۳۰ کیلومتر را به عنوان نزدیک گسل تعریف می‌گردد. بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط بیکر تعریف کلی برای تشخیص زلزله نزدیک گسل ارائه شده است. بر اساس این تعریف سه ویژگی می‌بایست به طور همزمان در نظر گرفته شوند تا به یک زلزله لفظ نزدیک گسل اختصاص یابد [۲۸]. این معیارها عبارت‌اند از:

- شاخص پالس از ۰/۸۵ بیشتر باشد.

- پالس در لحظات اولیه سرعت نگاشت شکل گیرد.

- PGV رکورد زلزله بیشتر از ۳۰ متر بر ثانیه باشد.

بر این اساس ایشان ۹۱ رکورد نزدیک گسل را با توجه به سه معیار بالا تعریف نمودند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تعریف شده در خصوص پالس‌های نزدیک گسل، زمان تناوب پالس سرعت است. برای تشخیص زمان تناوب پالس روش‌های مختلفی توسط محققین مختلف انجام گرفته است. دسته‌ای از کارهای انجام شده مؤید این موضوع است که پیوند غالب پالس را می‌توان از طریق مشاهده نگاشت سرعت محاسبه نمود. به این ترتیب که فاصله زمانی بین اولین نقطه

جدول ۱. تیپ بندی مقاطع تیر و ستون در مدل‌ها

Table 1. Beam and column section types in models

طبقه	FR4B3		FR10B3		FR15B3		FR20B3		FR30B3	
	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر
۱	C3	B3	C4	B6	C7	B6	C8	B6	C11	B7
۲	C3	B3	C4	B6	C7	B6	C8	B6	C11	B7
۳	C3	B2	C4	B6	C7	B6	C8	B6	C11	B7
۴	C2	B1	C4	B6	C6	B6	C7	B6	C10	B7
۵			C3	B6	C6	B6	C7	B6	C10	B7
۶			C3	B5	C6	B6	C7	B6	C10	B7
۷			C3	B5	C4	B6	C7	B6	C10	B7
۸			C3	B4	C4	B6	C7	B6	C10	B7
۹			C3	B4	C4	B5	C7	B6	C10	B7
۱۰			C3	B4	C4	B5	C7	B6	C9	B7
۱۱					C4	B5	C6	B6	C9	B7
۱۲					C3	B5	C6	B6	C9	B7
۱۳					C3	B5	C6	B6	C9	B7
۱۴					C3	B5	C4	B6	C9	B7
۱۵					C3	B5	C3	B5	C9	B7
۱۶							C3	B5	C8	B7
۱۷							C3	B5	C8	B7
۱۸							C2	B4	C8	B7
۱۹							C2	B4	C8	B7
۲۰							C2	B4	C8	B7
۲۱									C8	B7
۲۲									C7	B7
۲۳									C7	B6
۲۴									C7	B6
۲۵									C6	B6
۲۶									C6	B6
۲۷									C6	B6
۲۸									C4	B5
۲۹									C4	B5
۳۰									C4	B5

شده تبدیل گردد. آنگاه شتاب‌نگاشت با بیش‌ترین ضریب تبدیل موجک به‌عنوان شتاب‌نگاشت مستخرج انتخاب گردد. آنگاه از این شتاب به دست آمده طیف پاسخ سرعت ترسیم شود. نقطه متناظر با حداکثر مقدار سرعت طیفی روی محور افقی طیف نشان‌دهنده پریود غالب پالس است. مطالعات بیکر نشان داد که پریود پالس محاسبه شده از روش پیشنهادی ایشان به مراتب به مقدار مشاهده شده در نگاشت سرعت نزدیک است [۲۸].

با توجه به توضیحات ارائه شده در این مقاله تصمیم گرفته شد که از بین ۹۱ رکورد نزدیک گسل پالس‌گونه ۱۰ مؤلفه عمود بر گسل

برخورد نگاشت سرعت تا دومین نقطه هم‌فاز آن را پریود غالب پالس نام‌گذاری می‌کنند. اشکال عمده این روش این است که ممکن است با خطا همراه باشد. دسته دیگر از محققین معتقدند که برای محاسبه پریود غالب پالس می‌توان طیف پاسخ سرعت را استخراج نموده و هرکجا بیشینه طیف پاسخ سرعت اتفاق افتاده است، آن نقطه متناظر با پریود پالس است.

بیکر^۱ (۲۰۰۷) در مطالعه خود پیشنهاد نمود که ابتدا نگاشت شتاب اصلی، با انجام آنالیز موجک به مجموعه‌ای از نگاشت‌های تجزیه

1 . Baker

جدول ۲. مشخصات تیپ بندی مورد استفاده در تیرها (اعداد به میلی‌متر)

Table 2. Properties of beam sections (in millimeter)

نام‌گذاری	شناسه تیپ بندی مقطع	عرض بال b_f	ضخامت بال t_f	ارتفاع جان h_w	ضخامت جان t_w
TW300F150TH15	B1	150	15	300	15
TW350F150TH15	B2	150	15	350	15
TW400F200TH15	B3	200	15	400	15
TW450F200TH15	B4	200	15	450	15
TW500F250TH15	B5	250	20	500	20
TW550F250TH20	B6	250	20	550	20
TW600F300TH20	B7	300	20	600	20
TW600F350TH20	B8	350	20	600	20

جدول ۳. مشخصات تیپ بندی مورد استفاده در ستون‌ها (اعداد به میلی‌متر)

Table 3. Properties of column sections (in millimeter)

نام‌گذاری	شناسه تیپ بندی مقطع	عرض بال b_f	ضخامت بال t_f	ارتفاع جان h_w	ضخامت جان t_w
BOX 200X15	C1	200	15	200	15
BOX 250X15	C2	250	15	250	15
BOX 300X25	C3	300	25	300	25
BOX 350X30	C4	350	25	350	25
BOX 350X30	C5	350	30	350	30
BOX 400X30	C6	400	30	400	30
BOX 450X30	C7	450	30	450	30
BOX 500X40	C8	500	40	500	40
BOX 550X40	C9	550	40	550	40
BOX 600X40	C10	600	40	600	40
BOX 650X40	C11	650	40	650	40

نمایند. بدین منظور، در گام نخست، ضرایب رفتار هدف، R_{ti} ، برای تحلیل‌های ارتجاعی معادل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ و همچنین برای تحلیل‌های غیرارتجاعی ۱/۵ تا ۶ با گام‌ها ۰/۵ واحد در نظر گرفته شد. سپس به ازای هر یک از ۱۰ رکورد زلزله نزدیک گسل که دارای خصوصیات جهت پذیری پالس گونه بوده و بر اساس توضیحات بخش ۲-۳ انتخاب می‌گردد مقادیر ویژه و دوره تناوب مود اول محاسبه و طیف‌های پاسخ ارتجاعی تغییر مکان، سرعت و شتاب آن‌ها متناظر با میرایی ۵٪ ترسیم گردید. از طرفی با استفاده از آنالیز بار افزون سازه MDOF، ضریب برش پایه تسلیم عمومی C_p به کمک الگوی

دارای اثرات جهت پذیری پیش‌رونده برای بررسی و تحقیق انتخاب گردید. برای رکوردهای مورد استفاده از علامت اختصاری NF-SP استفاده شده است. مشخصات این رکوردها در جدول (۴) نشان داده شده است.

۴- روش تحقیق

مدل‌های معرفی شده در بخش ۳-۱، پس از تحلیل و طراحی اولیه و استخراج مقاطع طراحی، در گام بعد می‌بایست طی یک فرآیند تحلیل نسبت‌های کاربردی مورد انتظار تحقیق را تولید

جدول ۴. مشخصات ۱۰ زلزله نزدیک گسل دارای اثرات جهت پذیری پیش‌رونده مؤلفه موازی با گسل (NF-SP)

Table 4. Specifications of 10 near-fault forward-directivity

شماره رکورد	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	مشخصات زلزله		
				PGA ^a (g)	Mw ^b	R ^c (km)
1	Loma Prieta	1989	Gilroy - Gavilan Coll.	0.25	6.93	9.96
2	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	0.18	6.69	5.92
3	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	0.33	6.69	5.48
4	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	0.08	6.69	6.50
5	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	0.58	6.69	5.19
6	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	0.30	7.51	10.92
7	Landers	1992	Yermo Fire Station	0.10	7.28	23.62
8	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	0.23	6.19	0.53
9	Kobe, Japan	1995	KJMA	1.05	6.90	0.96
10	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	0.94	6.90	0.27

اینجا، ویژگی‌های پاسخ انرژی حاصل از تحلیل دستگاه‌های SDOF معادل در برابر رکوردهای نزدیک گسل پالس گونه ارائه شده‌اند. این نتایج عنوان پایه و اساس توزیع انرژی در سازه MDOF قابل استفاده می‌باشند. نیازهای انرژی به شدت و زمان تداوم زلزله وابسته می‌باشند. به همین دلیل تغییر در R به منزله تغییر در شدت زلزله است؛ اما برای آنکه نتایج تا آنجا که ممکن است مستقل از دو عامل قبل باشند، گراف‌های کاربردی که در ادامه پیشنهاد شده‌اند بدون بعد و به صورت نسبت‌های کاربردی انرژی تعریف شده‌اند. این نسبت‌ها در ادامه و به طور جداگانه تعریف می‌شوند:

۵-۱- نسبت نیاز انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی (TDEⁱⁿ/TDE^{el})

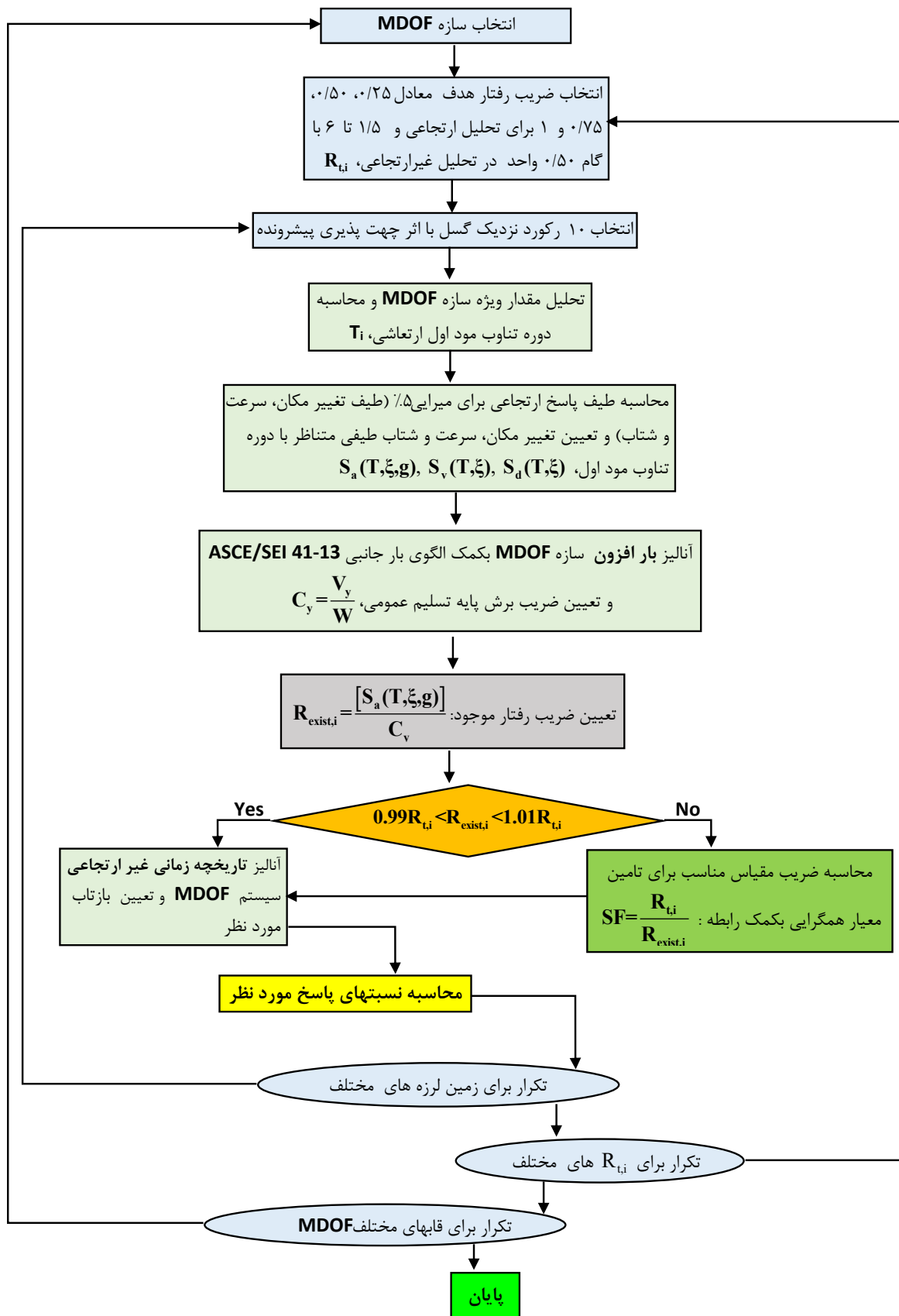
در شکل (۲) میانگین مجموع انرژی تلف شده^۱ غیرارتجاعی به ارتجاعی، TDEⁱⁿ/TDE^{el}، ترسیم شده است. لازم به ذکر است که آنچه در این بخش و در ادامه آن محاسبه گردیده است، نیاز انرژی تلف شده است که در انتهای حرکت زمین برابر است با مجموع انرژی میرایی و چرخه‌ای. واضح است که در محدوده پریودهای کوتاه، غیرخطی شدگی باعث افزایش قابل توجه TDEⁱⁿ می‌گردد. پریود

بار ASCE/SEI ۴۱-۱۳ [۲۹] محاسبه گردید. آنچه در این تحقیق به عنوان ضریب رفتار، R_{exist,i} معرفی شده است، عبارت است از نسبت شتاب طیفی ارتجاعی برای میرایی ۵٪ به مقاومت تسلیم سازه MDOF. این تعریف با آنچه در FEMA ۴۴۰ [۳۰] ارائه شده است نیز همخوانی دارد. با مقایسه ی مقادیر R_{ti} و R_{exist,i}، در صورت وجود اختلاف کمتر از ۱٪، نتایج پاسخ های آنالیز تاریخیچه زمانی مورد پذیرش قرار گرفته و نسبت های مورد انتظار محاسبه می گردند. در غیر این صورت ضریب SF = R_{ti} / R_{exist,i} در رکوردها ضرب و آنالیز تاریخیچه زمانی تا زمان تحقق همگرایی لازم، تکرار می گردد. جهت تبیین هر چه بیشتر موضوع، فلوجارت ارائه شده در شکل (۱) مراحل انجام کار را تشریح می نماید.

۵- نسبت های کاربردی انرژی در سیستم SDOF

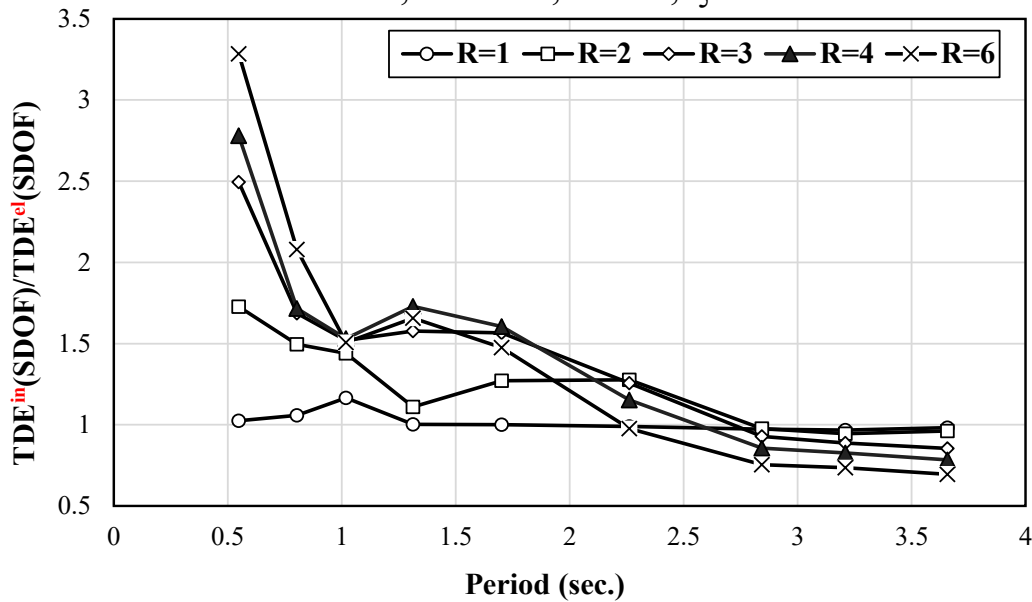
یکی از مهم ترین و کارآمدترین ابزار اندازه گیری و کمینه سازی خسارت های تجمعی نیاز انرژی است که در خلال زلزله به سازه وارد می شود و در مقابل عکس العملی است که سازه برای جذب، استهلاک و اتلاف انرژی از خود نشان می دهد. به همین دلیل در این مقاله تلاش گسترده ای انجام گرفته است تا روشی برای تخمین انواع بیشینه انرژی و رابطه آن با سیستم MDOF ارائه و پیشنهاد گردد. در

1 . Total Dissipated Energy (TDE)



شکل ۱. فلوچارت مراحل انجام تحقیق
 Fig. 1. Flowchart steps of the research

SDOFⁱⁿ/SDOF^{el} Total Dissipated Energy Ratio - Mean FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



شکل ۲. تغییرات نسبت انرژی تلف شده غیرارتجاعی به ارتجاعی در سیستم SDOF معادل در برابر دوره تناوب برای R= ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۶

Fig. 2. Changes in the TDE_{in}(SDOF)/TDE_{el}(SDOF) ratio to the period for R = 1, 2, 3, 4, 6

در سازه‌هایی با مقاومت جانبی سازه اندک، انرژی تلف شده چرخه‌ای مکانیسمی است که انرژی وارد شده به سازه را متوازن می‌سازد. این انرژی غالباً به درجه خسارت‌های سازه‌ای مرتبط می‌گردد. از آنجا که TDE چندان به درجه غیرخطی شدگی R (به جز برای سازه‌های با پرپود کوتاه) حساس نیست، منطقی به نظر می‌رسد که اندازه انرژی تلف شده در اثر رفتار چرخه ای (HE) و رابطه آن با TDE ارزیابی گردد. در شکل (۳) میانگین مقادیر نسبت HE/TDE برای ۱۰ رکورد نزدیک گسل محاسبه و نمایش داده شده‌اند. نتایج به دست آمده از این گراف از انطباق مناسبی با نتایج سایر محققان برخوردار است که به دلیل پایداری این اندیس است [۳۱ و ۳۲]. برای پرپودهای کوتاه، نسبت HE/TDE با افزایش R افزایش می‌یابد اما برای $1T/Sec <$ این افزایش در اثر رشد R حذف می‌گردد. این نسبت با افزایش پرپود به صورت خطی کاهش می‌یابد. نرخ تغییرات به دست آمده در محدوده پرپود بلند به شدت به محتوای انرژی زلزله وابسته است که البته این موضوع با مراجعه به طیف پاسخ ارتجاعی نیز مشاهده می‌گردد. به طور نمونه اگر در محدوده پرپود بلند نرخ تنزل طیف میانگین پاسخ شدید باشد، نسبت

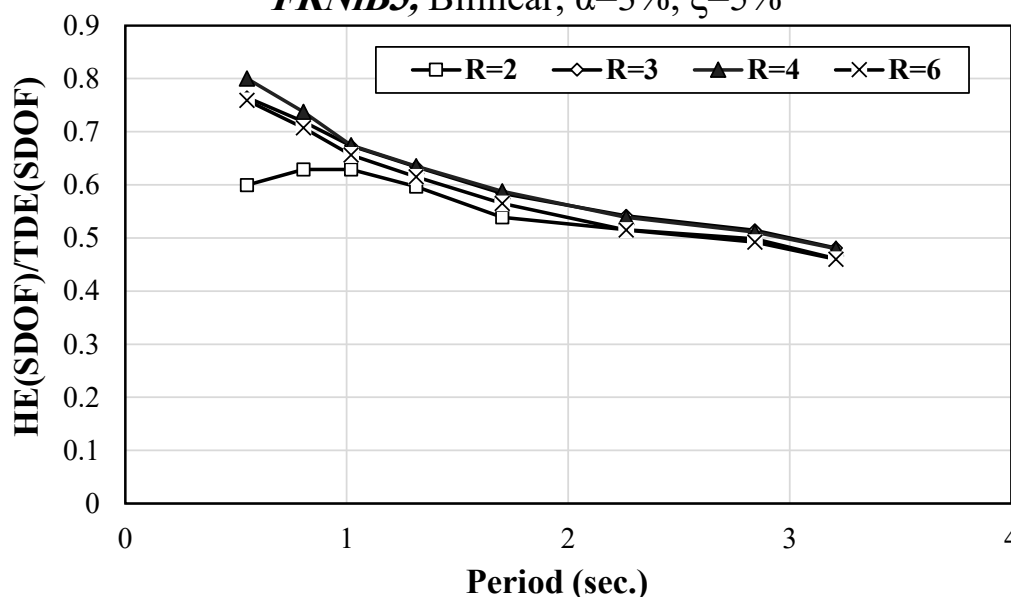
متناظر با ناحیه پرپودهای کوتاه و بلند ۱ ثانیه برآورد گردیده است. برای پرپودهای بالاتر ۱ ثانیه، افزایش R (افزایش شکل‌پذیری) باعث کاهش نیاز TDEⁱⁿ می‌گردد و در این محدوده پرپود، نسبت نیاز محاسبه شده کمتر وابسته تغییر پرپود است. مطالعات انجام گرفته در گذشته نشان می‌دهد که این نسبت چندان به ضریب سختی شدگی کرنشی وابسته نیست [۳۱].

شاید مهم‌ترین نتیجه‌ای که از مطالعه شکل (۲) می‌توان به دست آورد این است که به جز در سازه‌های با پرپود کوتاه، TDE چندان به درجه غیرخطی شدن سازه (ضریب R) وابسته نیست. حتی در سیستم‌های ارتجاعی که انرژی تلف شده تنها در اثر میرایی ویسکوز ۵٪ است، TDE^{el} در انتهای زمان تداوم جنبش نیرومند زمین تقریباً با TDEⁱⁿ سیستم غیر ارتجاعی با R=2 برابر است. این بدان معنی است که بین انرژی میرایی ویسکوز و انرژی تلف شده توازن برقرار است که باعث می‌شود مجموع این دو مکانیسم اتلاف انرژی چندان نسبت به درجه غیرخطی شدن سازه حساس نباشد.

۵-۲- نسبت نیاز انرژی چرخه‌ای^۱ به مجموع انرژی تلف شده (HE/TDE)

1 Hysteretic Energy (HE)

SDOF Hysteresis to TDE Energy Ratio - Mean *FRNiB3*, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



شکل ۳. تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای به کل انرژی تلف شده در سیستم SDOF معادل در برابر دوره تناوب برای $R=2, 3, 4, 6$

Figure 3. Changes in the HE(SDOF)/TDE(SDOF) ratio to the period for $R = 2, 3, 4, 6$

ویدیک^۱ (۱۹۹۴) نشان دادند که نسبت انرژی HE به انرژی ورودی در انتهای حرکت زمین، IE، می‌تواند عنوان پارامتری پایدار تلقی گردد [۳۲]. به علاوه، این واقعیت که طیف انرژی ورودی چندان به نیروی ذخیره شده حساس نیست، باعث می‌گردد IE یک پارامتر مناسب برای تعریف زلزله طرح محسوب شود [۳۳]. با این وجود مطالعات اندکی برای مرتبط ساختن این ویژگی به سیستم MDOF انجام گرفته است. روش عمومی برای تخمین انرژی سیستم MDOF به کمک نیاز انرژی تلف شده کل سیستم SDOF ارتجاعی به عنوان اطلاعات پایه در بخش قبل تشریح گردید. آنچه در این بخش از مقاله ارائه شده است در راستای توسعه کیفی و کمی رابطه بین نیازهای انرژی سیستم MDOF و سیستم ESDOF است، به نحوی که بتوان با استفاده از این اطلاعات که از نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی^۲، به دست آمده حداکثر نیاز انرژی سیستم MDOF را به کمک نیاز انرژی ESDOF محاسبه نمود. لازم به یادآوری است که نیازهای انرژی وارد به سازه به مدت زمان تداوم و شدت زمین لرزه

HE/TDE نیز با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد. از آنجا که مطالعات قبلی نشان می‌دهد که تأثیر ضریب کرنش سخت شدگی، α ، بر نسبت HE/TDE ناچیز است، بنابراین از ارزیابی تأثیر این عامل صرف نظر شده است [۳۱].

۶- رابطه بین نیازهای انرژی سیستم MDOF و SDOF

نیاز انرژی، نسبت به نیاز مقاومت و تغییر شکل ابزار اندازه‌گیری مناسب‌تری از پاسخ لرزه‌ای و عملکرد سازه است. به علاوه، انرژی هیستریزس (چرخه‌ای، HE) می‌تواند ابزار اندازه‌گیری مناسبی از خسارت‌های تجمعی باشند. به‌رغم اینکه مفاهیم طراحی بر اساس انرژی تا به امروز چندان عمومیت پیدا نکرده‌اند و استفاده از آن‌ها دشوار است، همچنان ضروری به نظر می‌رسد که روند اتلاف انرژی در سازه ارزیابی گردد. این موضوع در توسعه اندیس‌های خسارت می‌تواند مفید فایده باشد. نیازهای انرژی سیستم‌های SDOF موضوع بسیاری از تحقیقات قبلی بوده است که البته به نتایج قابل توجه مختلفی منجر گردیده است. نتایج مطالعه انجام شده توسط فجفر و

1 Fajfar and Vidic

2 Nonlinear Time History Analysis (NTHA)

وابسته است.

طور متوسط ۸۰٪ نیاز TDE سیستم SDOF ارتجاعی نماینده مود اول است. در این حالت استفاده از TDE^{el} سیستم SDOF به جای TDE^{el} سیستم MDOF در جهت اطمینان است.

- با افزایش پیروید تأثیر درجات آزادی پر اهمیت می‌گردد، بنابراین نسبت TDE نیاز به شدت افزایش می‌یابد. این نسبت بزرگ‌تر از یک محاسبه شده است. به عبارتی افزایش بیشتر در نیاز TDE منعکس‌کننده اهمیت بیشتر تأثیر مدهای بالاتر و درجات آزادی است.

در ادامه و در شکل (۵) نسبت نیاز TDE سیستم MDOF غیر ارتجاعی به نیاز ارتجاعی سازه MDOF در دو حالت نسبی و مطلق نمایش داده شده‌اند. گراف‌های ارائه شده از نظر الگوی تغییرات بسیار به آنچه برای سیستم SDOF به دست آمد نزدیک است. در پیوندهای بلند (بزرگ‌تر از ۲ ثانیه) نتایج نشان می‌دهد که سیستم غیرخطی به همان اندازه انرژی تلف می‌کند که سیستم ارتجاعی به کمک میرایی تلف می‌کند. این یافته برای سطوح مختلف شکل‌پذیری برقرار است. به عبارتی، بین انرژی تلف شده توسط میرایی و انرژی تلف شده توسط عملکرد چرخه‌ای توازن و تعادل برقرار است. در این بخش نیز مطالعات قبل نشان می‌دهد که سخت‌شدگی کرنشی تأثیر اندکی بر

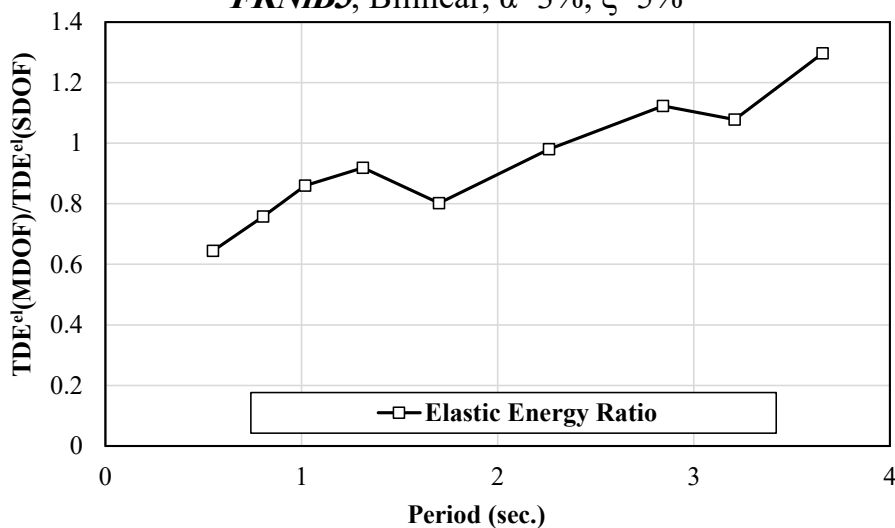
۶-۱- نیاز کل انرژی تلف شده (TDE)

نیاز کل انرژی تلف شده طبق تعریف عبارت است از مجموع انرژی میرایی و چرخه‌ای. این انرژی در این مقاله در انتهای فاز اعمال نیروی زلزله محاسبه شده است. از آن جایی که در انتهای پاسخ، سازه دارای اندکی انرژی جنبشی است، این کمیت بسیار به اندازه انرژی ورودی نزدیک است. نتایج TDE در شکل (۵) و شکل (۶) نمایش داده شده‌اند. این تصاویر علاوه بر اینکه ارزیابی TDE سیستم سازه‌ای MDOF را میسر می‌سازد، می‌تواند به عنوان اطلاعات اساسی جهت محاسبه TDE سیستم MDOF به کمک طیف انرژی SDOF فراهم آورد.

شکل (۵) نسبت تقاضای TDE سیستم ارتجاعی را نشان می‌دهد، جایی که انرژی تلف شده تنها به دلیل ۵٪ ضریب میرایی ویسکوز است. نتایج ارائه شده به صورت نسبت TDE^{el} سیستم MDOF به TDE^{el} سیستم SDOF متناظر با مود اول است. میانگین نتایج در شکل (۵) به تصویر کشیده شده‌اند. مشاهده و ارزیابی شکل (۵) به نتایج زیر می‌انجامد:

- برای سیستم‌های ارتجاعی با پیروید کوتاه و متوسط، نیاز TDE به

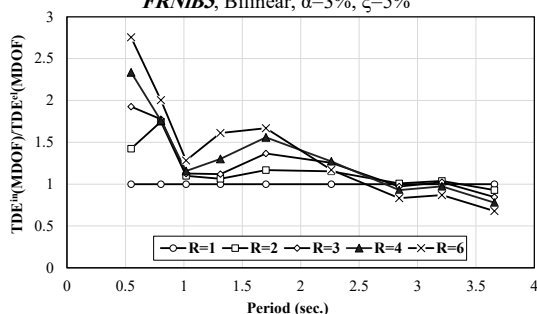
MDOF Elastic "TDE" to SDOF Elastic "TDE" - Mean
FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



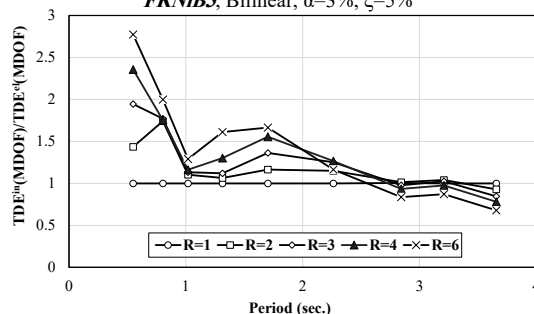
شکل ۴. تغییرات نسبت مجموع انرژی تلف شده ارتجاعی سیستم MDOF به سیستم SDOF معادل در برابر دوره تناوب

Fig. 4. Changes in the $TDE^{el}(MDOF)/TDE^{el}(SDOF)$ ratio to the period

Inelastic to Elastic MDOF "Relative TDE" Ratio - Mean
FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$

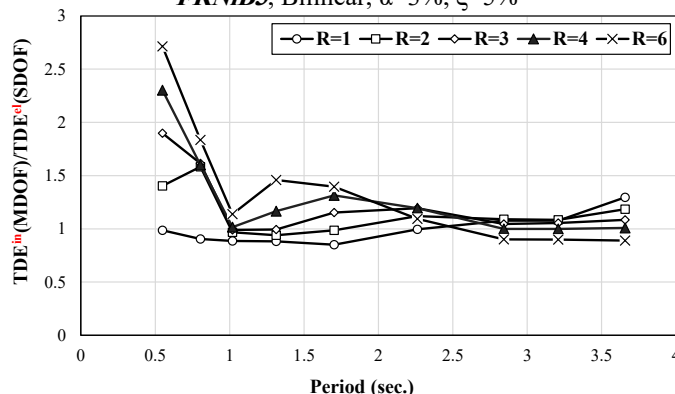


Inelastic to Elastic MDOF "Absolute TDE" Ratio - Mean
FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



شکل ۵. تغییرات نسبت انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی در سیستم MDOF در برابر دوره تناوب برای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۶ و R = ۱
Fig. 5. Changes in the $TDE_{in}(MDOF)/TDE_{el}(MDOF)$ ratio to the period for $R = 1, 2, 3, 4, 6$

MDOFⁱⁿ/SDOF^{el} Total Dissipated Energy Ratio - Mean
FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



شکل ۶. تغییرات نسبت مجموع انرژی تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم MDOF به مجموع انرژی تلف شده ارتجاعی در سیستم SDOF معادل در برابر دوره تناوب برای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۶ و R = ۱
Fig. 6. Changes in the $TDE_{in}(SDOF)/TDE_{el}(SDOF)$ ratio to the period for $R = 1, 2, 3, 4, 6$

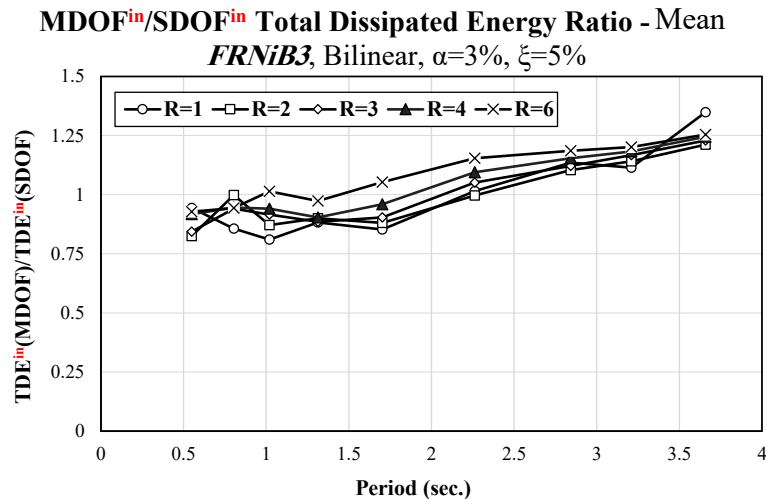
غیر ارتجاعی سیستم ESDOF برای مقادیر مختلف R ارائه شده‌اند. مشابه بخش‌های قبل میانگین نتایج به تصویر کشیده شده است. برای سازه‌های با پیوند کوتاه، نیاز TDE سیستم MDOF کوچک‌تر از نیاز TDE سیستم SDOF معادل است. افزایش دوره تناوب و افزایش اهمیت اثرات درجات آزادی باعث می‌شود که نیاز TDE سیستم MDOF تقویت گردد. تغییرات نسبت TDE تقریباً مستقل از مقاومت طرح و درجه غیرخطی شدگی است.

نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۶) و (۷) اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین نیاز TDE سازه قابی به کمک مقادیر حاصل از سیستم ESDOF را فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده

نسبت TDE نیاز می‌گذارد [۳۳].

یکی دیگر از نسبت‌های کاربردی که می‌توان برای ارزیابی رابطه بین سیستم MDOF و SDOF استفاده نمود، نسبت نیاز TDE سیستم MDOF غیر ارتجاعی به نیاز ارتجاعی سازه SDOF است. تغییرات این نسبت در برابر دوره تناوب در شکل (۶) ترسیم شده است. روند تغییرات این گراف مشابه شکل (۶) است که برای سازه SDOF تعریف گردید.

آنچه در شکل (۷) نمایش داده شده است مشابه شکل (۶) است، با این تفاوت که در این شکل به جای بررسی نسبت TDE ارتجاعی، نسبت TDE غیر ارتجاعی سیستم MDOF به TDE



شکل ۷. تغییرات نسبت مجموع انرژی تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم MDOF به مجموع انرژی تلف شده غیر ارتجاعی در سیستم SDOF معادل در برابر دوره تناوب برای ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۶

Fig 7. Changes in the TDEin(MDOF)/TDEin(SDOF) ratio to the period for R = 1, 2, 3, 4, 6

HE نیاز کاهش می‌یابد. در چنین حالتی اثر مودهای بالاتر به شدت تشدید می‌گردد.

در ادامه نتایج نسبت نیاز HE به TDE برای مدل‌های MDOF در شکل (۹) نمایش داده شده‌اند. شکل کلی نمودار HE/TDE شبیه همان نموداری است که برای نسبت HE/TDE سیستم SDOF متناظر با مود اول به دست آمد؛ بنابراین می‌توان از اطلاعات سیستم ESDOF برای تخمین نسبت HE/TDE در مدل MDOF استفاده نمود. در شکل (۹) صراحتاً رابطه بین HE/TDE در سازه‌های قابی به نسبت HE/TDE برای سیستم ESDOF ارائه شده‌اند. مراجعه به این تصاویر نشان می‌دهد که نسبت HE/TDE در سیستم MDOF مستقل از دوره تناوب بوده به قسمی که اثر مودهای بالاتر چندان بر آن قابل توجه نیست؛ بنابراین از اطلاعات سیستم SDOF می‌توان استفاده نمود. البته با افزایش درجه غیرخطی شدگی سازه (افزایش ضریب R) این نسبت برای سیستم MDOF به نتایج سیستم SDOF نزدیک‌تر می‌شود. به عبارتی افزایش R از تأثیر مودهای بالاتر می‌کاهد.

۳-۶- توزیع نیاز انرژی چرخه‌ای (HE) در ارتفاع برای سیستم MDOF نتایج ارائه شده در بخش‌های قبل بیشتر بر محاسبه انرژی هیستریزس (چرخه‌ای) کل سازه تمرکز داشته است. اطلاعات ارائه شده نمی‌تواند درک مناسبی از توزیع نیازهای انرژی چرخه‌ای، HE،

مربوط به زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده است.

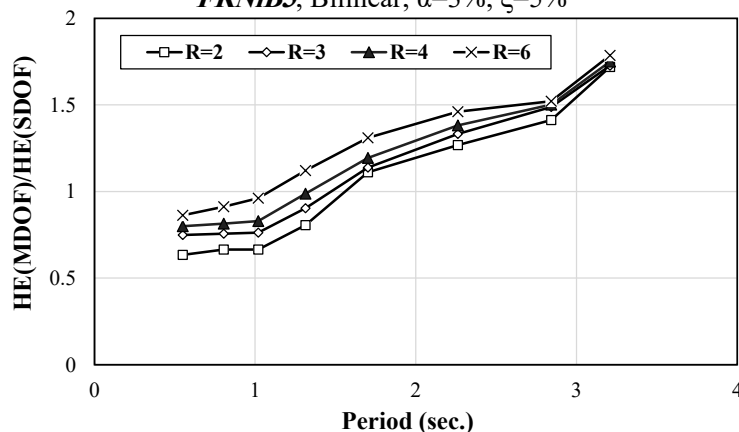
۲-۶- نیاز انرژی چرخه‌ای (HE) در سیستم MDOF

نیاز انرژی چرخه‌ای بخشی از انرژی ورودی است که به وسیله تسلیم المان‌های سازه تلف می‌شود. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که انرژی چرخه‌ای می‌تواند به عنوان پارامتر مورد نیاز در کمینه‌سازی خسارت‌های سازه‌ای قابل انتظار تعریف شود [۳۳]. آنچه در ادامه ارائه شده است میانگین نتایجی است که برای تخمین انرژی چرخه‌ای سازه‌های قابی شکل به کار گرفته شده است.

برای مدل‌های تحلیل مورد استفاده در این مقاله انرژی تلف شده، HE را می‌توان انرژی تلف شده چرخه‌ای در هر یک از مفاصل پلاستیک تعریف نمود. در شکل (۸) نسبت انرژی تلف شده چرخه‌ای در سیستم MDOF به مقدار محاسبه شده در سیستم SDOF متناظر با مود اول ارتعاش برای مقادیر مختلف R نمایش داده شده است. نمودارها نمایانگر تأثیر مودهای بالاتر و درجات آزادی بر نیازهای HE می‌باشند. بسته به تعداد طبقات تسلیم شده و موقعیت آن، توزیع و اندازه نیاز HE می‌تواند متفاوت باشد. به دلیل تعادل موجود در انرژی تلف شده سیستمی که مقادیر سرعت نسبی بزرگ‌تری را تجربه می‌کند، سهم انرژی میرایی تلف شده افزایش یافته، لذا مقدار

MDOF Hysteresis to SDOF Hysteresis Energy Ratio - Mean

FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$

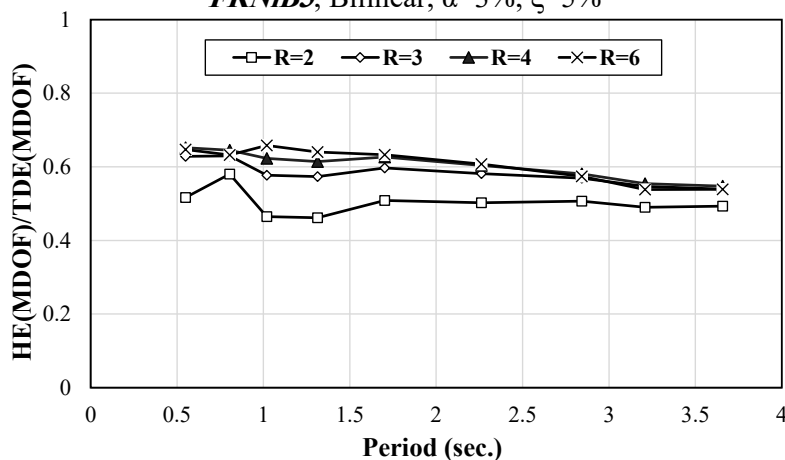


شکل ۸. تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای تلف شده در سیستم MDOF به انرژی چرخه‌ای تلف شده در سیستم SDOF در برابر دوره تناوب برای ۲ و ۳ و ۴ و ۶

Figure 8. Changes in the HE(MDOF)/HE(SDOF) ratio to the period for R = 2, 3, 4, 6

MDOF Hysteresis to Total Dissipated Energy Ratio - Mean

FRNiB3, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



شکل ۹. تغییرات نسبت انرژی چرخه‌ای تلف شده در سیستم MDOF به کل انرژی تلف شده در سیستم MDOF در برابر دوره تناوب برای ۲ و ۳ و ۴ و ۶

Fig. 9. Changes in the HE(MDOF)/TDE(MDOF) ratio to the period for R = 2, 3, 4, 6

آورد، در این قسمت نیاز انرژی هیستریزس طبقه به وسیله مجموع انرژی تلف شده چرخه‌ای سازه، HE_p ، هم‌پایه شده است. منظور از مجموع انرژی تلف شده چرخه‌ای سازه، HE_p ، جمع انرژی تلف شده چرخه‌ای در هر یک از طبقات سازه است؛ بنابراین نسبت مورد نظر می‌تواند به شکل زیر تعریف گردد:

در ارتفاع سازه را به دنبال داشته باشد. بدین جهت مفهوم نیاز انرژی هیستریزس طبقه، $HE_{s,i}$ ، استفاده می‌گردد. این کمیت از طریق انتگرال‌گیری نیروی برش طبقه نسبت به دریفتم طبقه محاسبه می‌شود و می‌تواند به عنوان یک پارامتر قابل اعتماد در ارزیابی توزیع خسارت‌های سازه‌ای در ارتفاع استفاده گردد. برای آنکه بتوان از دیدگاه آماری درک بهتری از تجمع انرژی هیستریزس طبقه به دست

مشاهده شده است.

به دلیل تأثیر موده‌های بالاتر، الگوی توزیع انرژی هیستریزس در طبقات مشابه آن چیزی است که برای نیاز شکل‌پذیری طبقه به دست آمد.

در قاب‌های کوتاه و میان مرتبه برای ۳ و ۲= R نسبت $HE_{s,i}/HE_t$ متأثر از موده‌های بالا بوده و در طبقات فوقانی قرار دارند. در حالی که برای قاب‌های بلند مرتبه (۱۵ طبقه به بعد) بیشینه این نسبت در طبقات پایین سازه است. با افزایش R برای ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه نیز تجمع $HE_{s,i}/HE_t$ به تراز تحتانی منتقل شده و اثر موده‌های بالاتر کم می‌گردد.

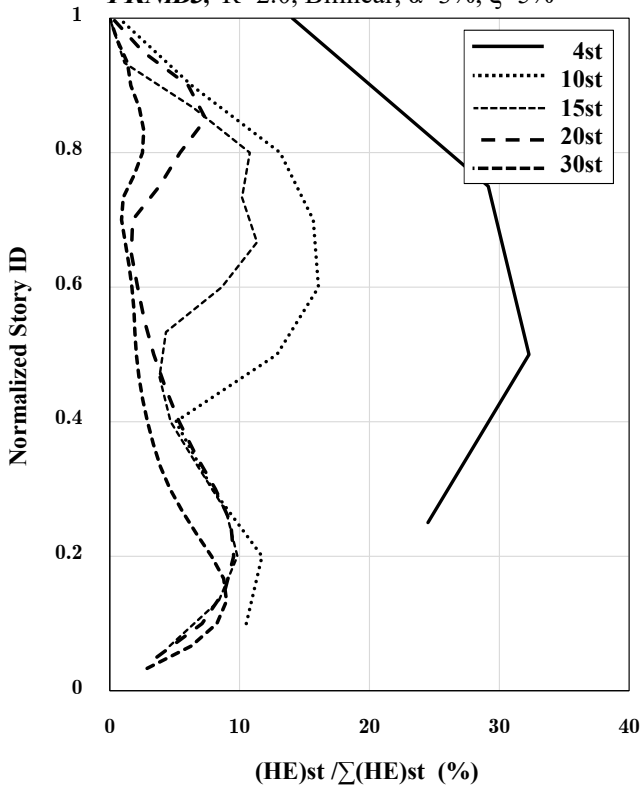
در طبقات فوقانی سازه $HE_{s,i}/HE_t$ با افزایش R کاهش می‌یابد. به عبارتی افزایش R از تأثیر موده‌های بالابر این نسبت می‌کاهد. در مقابل برای طبقات تحتانی سازه، افزایش R باعث می‌شود $HE_{s,i}/HE_t$ افزایش یابد. این موضوع مؤید تمایل سازه به ارتعاش در مود

$$\frac{HE_{s,i}}{\sum HE_{s,i}} = \frac{HE_{s,i}}{HE_t} \quad (8)$$

در شکل (۱۰) و (۱۱) میانگین مقادیر نیازهای انرژی هم‌پایه شده در ارتفاع برای تعداد مشخصی قاب ترسیم شده‌اند. لازم به ذکر است که محور قائم کلیه گراف‌های شکل (۱۰) و (۱۱) بدون بعد می‌باشند تا بتوان همزمان نتایج قاب‌های مختلف را در کنار هم نمایش داد. این گراف‌ها به تفکیک برای مقادیر مختلف R ترسیم شده‌اند. برای دست‌یابی به درک عمیق‌تر از تأثیر R بر پروفیل توزیع انرژی تلف شده چرخه‌ای، تغییرات نسبت $HE_{s,i}/HE_t$ به تفکیک برای هریک از قاب‌ها ترسیم شده‌اند. بررسی شکل‌های ارائه شده به نتایج زیر می‌انجامد:

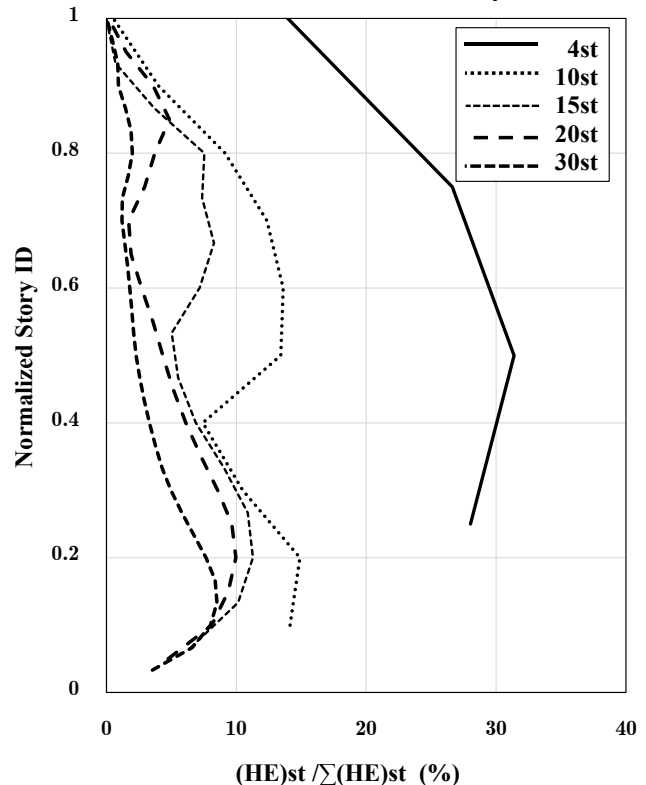
برای سازه‌هایی که امکان تشکیل مفاصل پلاستیک در آن‌ها زیاد است، تجمع نیازهای انرژی بیشینه در طبقات تحتانی سازه قرار

Normalized Story Hysteresis Energy - Mean
FRNiB3, R=2.0, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$

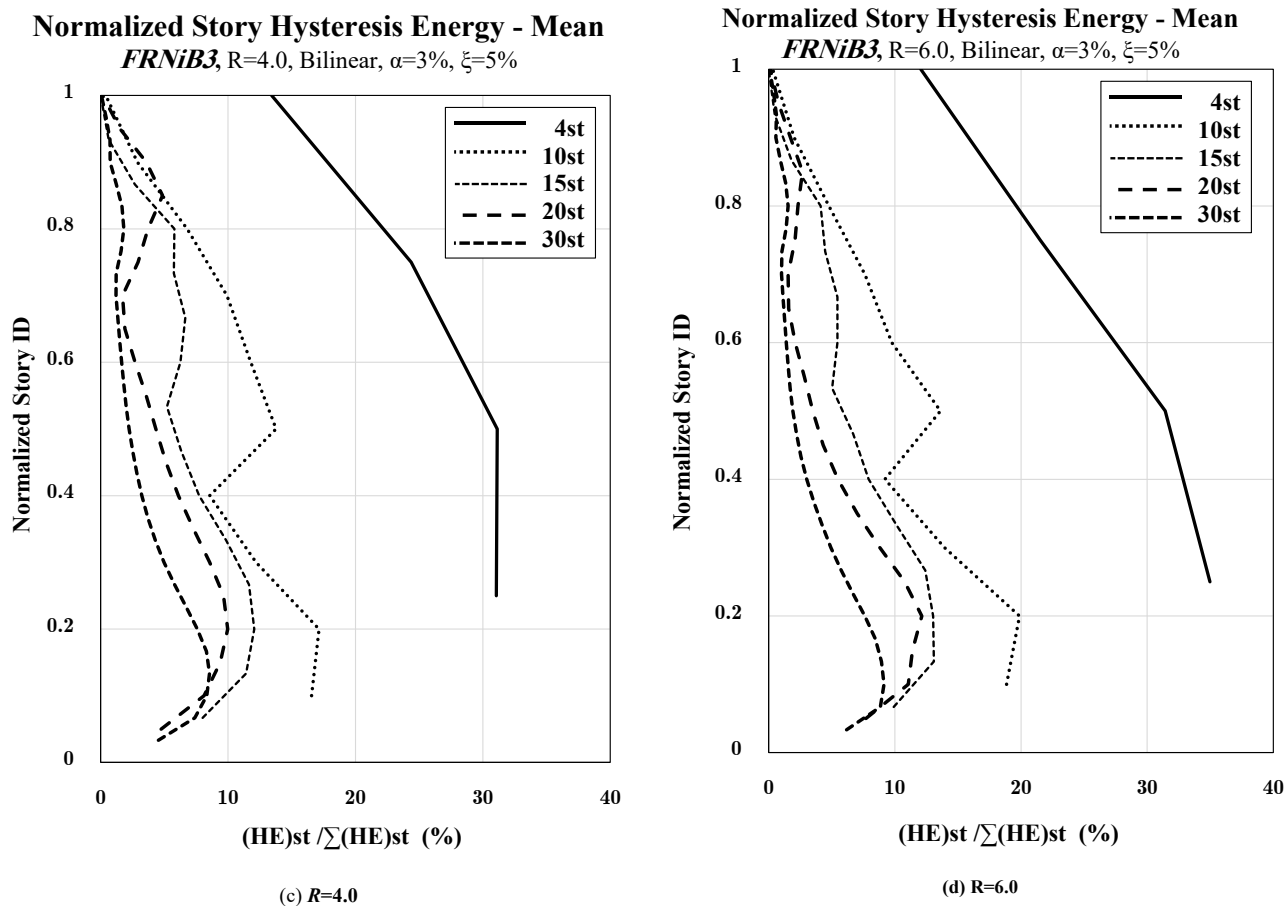


(a) R=2.0

Normalized Story Hysteresis Energy - Mean
FRNiB3, R=3.0, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



(b) R=3.0



شکل ۱۰. انرژی چرخه‌ای طبقه توزیع یافته در ارتفاع، هم‌پایه شده با کل انرژی چرخه‌ای برای $R=2$ و 3 و 4 و 6 - قاب‌های 4 ، 10 ، 15 ، 20 و 30 طبقه

Fig. 10. Hysteresis energy distributed in height, normalized with total hysteresis energy for $R=2, 3, 4, 6$ - (4-, 10-, 15-, 20-, 30-story)

جنبشی، E_K ، انرژی میرایی، E_ξ و مجموع انرژی کرنشی ارتجاعی و غیر ارتجاعی، $E_{sc} + E_K$ ، در سازه MDOF با استفاده از رابطه (۸) می‌توان روابط زیر را تعریف نمود:

$$E_K = \frac{1}{2} \{\dot{u}\}^T [m] \{\dot{u}\} \quad (9)$$

$$E_\xi = \int (\{\dot{u}\} [c] \{\dot{u}\}) dt = \int (\{\dot{u}\}^T [c] \{\dot{u}\}) dt \quad (10)$$

$$E_{sc} + E_H = \int \{f(u)\} d\{u\} = \int \{\dot{u}\}^T [K] \{u\} dt \quad (11)$$

انرژی کرنشی از دو بخش انرژی کرنشی ارتجاعی و انرژی کرنشی غیرارتجاعی (چرخه‌ای) تشکیل شده است که در رابطه (۱۱) آورده شده‌اند. انرژی کرنشی ارتجاعی بخشی از انرژی ورودی زلزله است

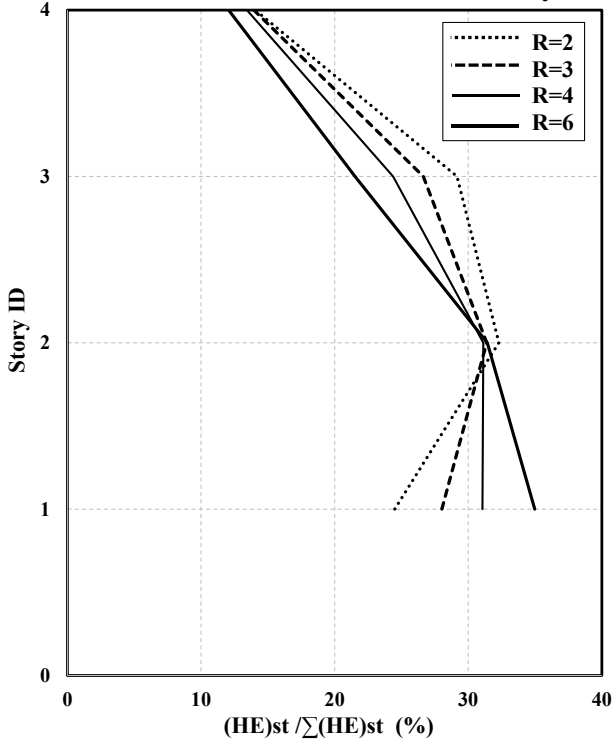
اول است. البته افزایش اثرات $\Delta-P$ نیز می‌بایست مد نظر قرار گیرد. برای قاب‌های بلند، بخشی از ارتفاع سازه (تقریباً یک-سوم میانی)، نسبت $HE_{s,i} / HE_t$ دارای پروفیل مشابه بوده و چندان به تغییر R وابسته نیست.

- در مقایسه با تغییرات شکل‌پذیری طبقه در ارتفاع، نیاز $HE_{s,i}$ بیشتر در طبقات تحتانی قرار دارند.

۴-۶- مطالعه سهم انرژی چرخه‌ای و میرایی برای سیستم MDOF

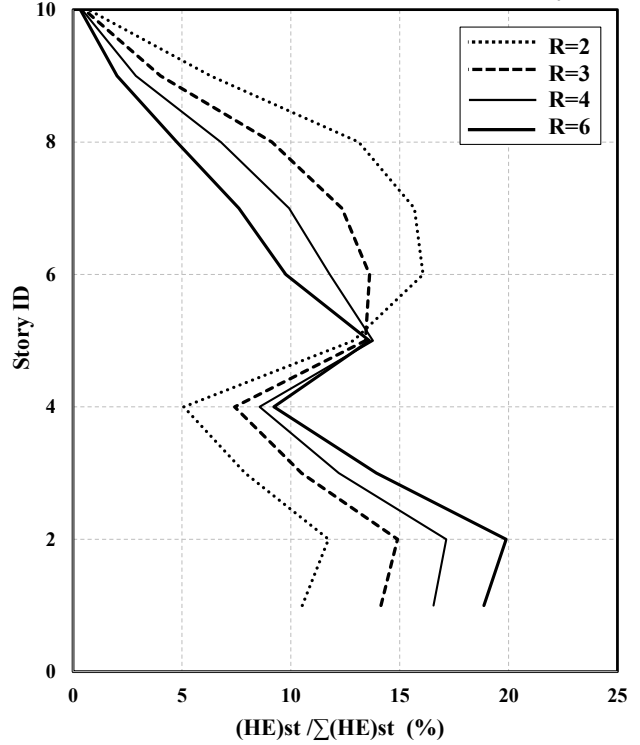
بعد از زلزله، چنانچه سازه تخریب نشده باشد، باقی‌مانده انرژی کرنشی و جنبشی زلزله به وسیله میرایی و در خلال ارتعاش آزاد سازه تلف می‌گردد؛ بنابراین، بعد از ارتعاش آزاد، مجموع انرژی میرایی و چرخه‌ای برابر است با کل انرژی ورودی زلزله. برای محاسبه انرژی

Normalized Story Hysteresis Energy - Mean
FRN4B3, R=2, 3, 4 and 6, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



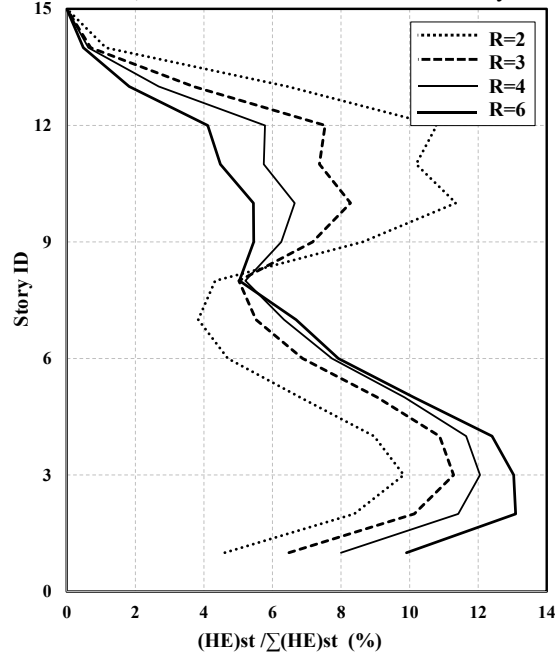
(a) FRN4B3

Normalized Story Hysteresis Energy - Mean
FRN10B3, R=2, 3, 4 and 6, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$

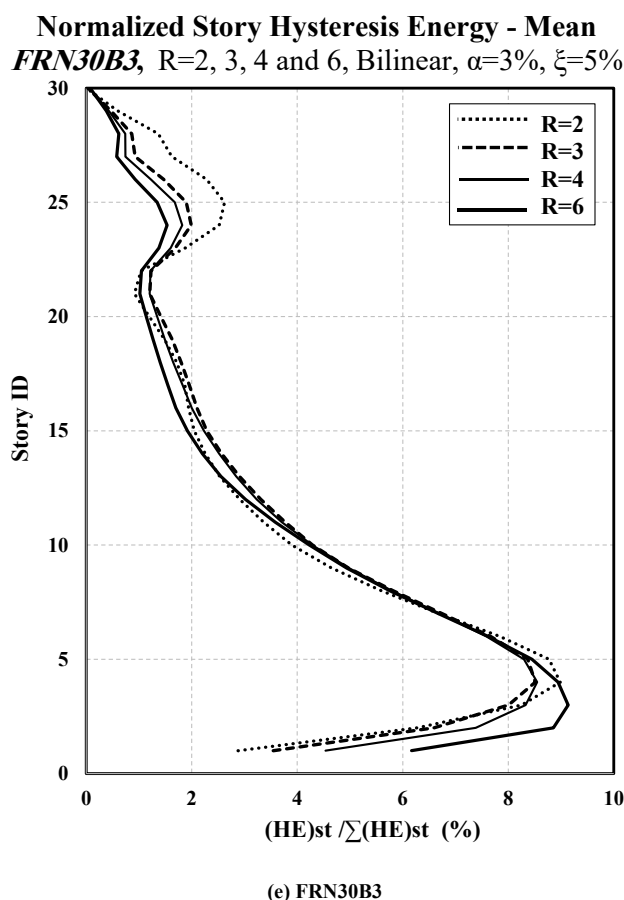
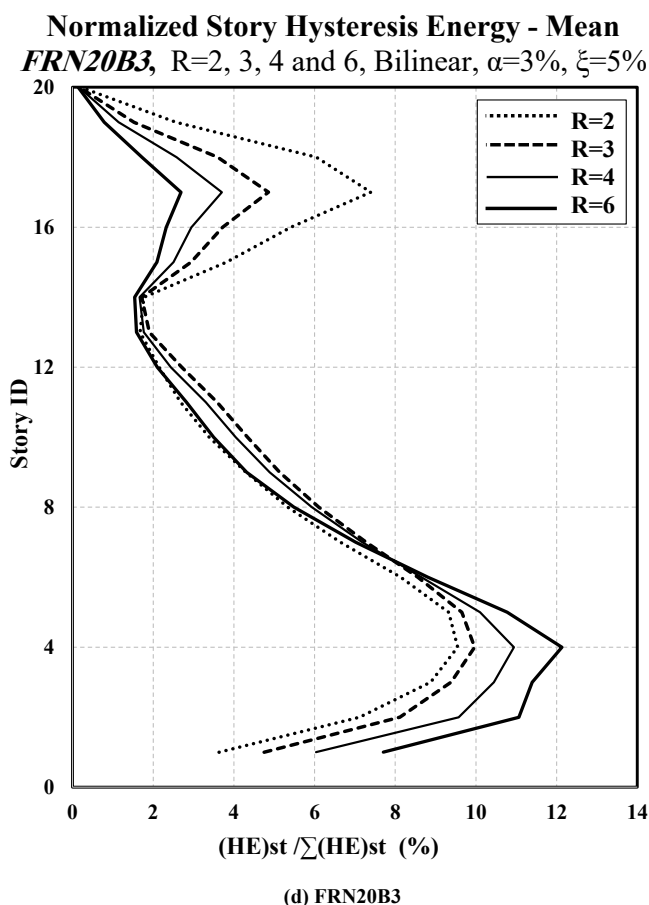


(b) FRN10B3

Normalized Story Hysteresis Energy - Mean
FRN15B3, R=2, 3, 4 and 6, Bilinear, $\alpha=3\%$, $\xi=5\%$



(c) FRN15B3



شکل ۱۱. انرژی چرخه‌ای طبقه توزیع یافته در ارتفاع، HE_{st} ، هم‌پایه شده با کل انرژی چرخه‌ای به تفکیک برای قاب‌های ۴، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ طبقه

Fig. 11. Hysteresis energy distributed in storeys, normalized with total hysteresis energy for R=2, 3, 4, 6 – (4-, 10-, 15-, 20-, 30- (story

انرژی تلف شده در اثر میرایی افزایش یابد. در توجیه این پدیده اینکه در سازه‌های بلند با افزایش درجه غیرخطی شدن سازه، افزایش R ، بیشینه نیازهای غیرخطی سازه در طبقات تحتانی متمرکز می‌گردد بنابراین با کاهش سهم اثر مودهای بالاتر تعداد المان‌هایی که غیرخطی می‌شوند کمتر خواهد بود. پس برای برقراری توازن انرژی تلف شده، سهم انرژی میرایی افزایش می‌یابد. این نتیجه برعکس نتیجه حاصل از $R=2$ است؛ زیرا در این حالت اثر مودهای بالا باعث می‌شود توزیع بیشینه نیازهای غیرخطی در ارتفاع سازه صورت گرفته و تعداد المان بیشتری را وارد ناحیه غیرخطی نماید. نتیجه به دست آمده از این بخش برای مقادیر کوچک R با نتایج تحقیقات قبلی در

که به شکل کرنش ارتجاعی در المان‌های سازه ذخیره می‌شود (که البته در خلال ارتعاش آزاد سازه به انرژی میرایی و جنبشی تبدیل می‌گردد). انرژی چرخه‌ای دربرگیرنده مجموع انرژی تلف شده در اثر تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی در المان‌های سازه است. در انتهای ارتعاش سازه، درصد انرژی تلف شده در اثر میرایی و تغییر شکل‌های غیرخطی به همراه کل انرژی ورودی برای مقادیر مختلف R در شکل (۱۲) برای برخی از مدل‌های ۳ دهانه این مقاله مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش R سهم انرژی میرایی کاهش می‌یابد. البته اندازه کاهش به ارتفاع سازه نیز وابسته است. به نحوی که برای $R=6$ افزایش ارتفاع سازه باعث گردید سهم

قاب (FRN30B3) تغییر در R تأثیری بر تغییر سهم انرژی تلف شده چرخه‌ای و میرایی نمی‌گذارد. به عبارتی تأثیر هر دو مکانیسم اتلاف انرژی یکسان و شبیه هم است.

۷- نتیجه گیری

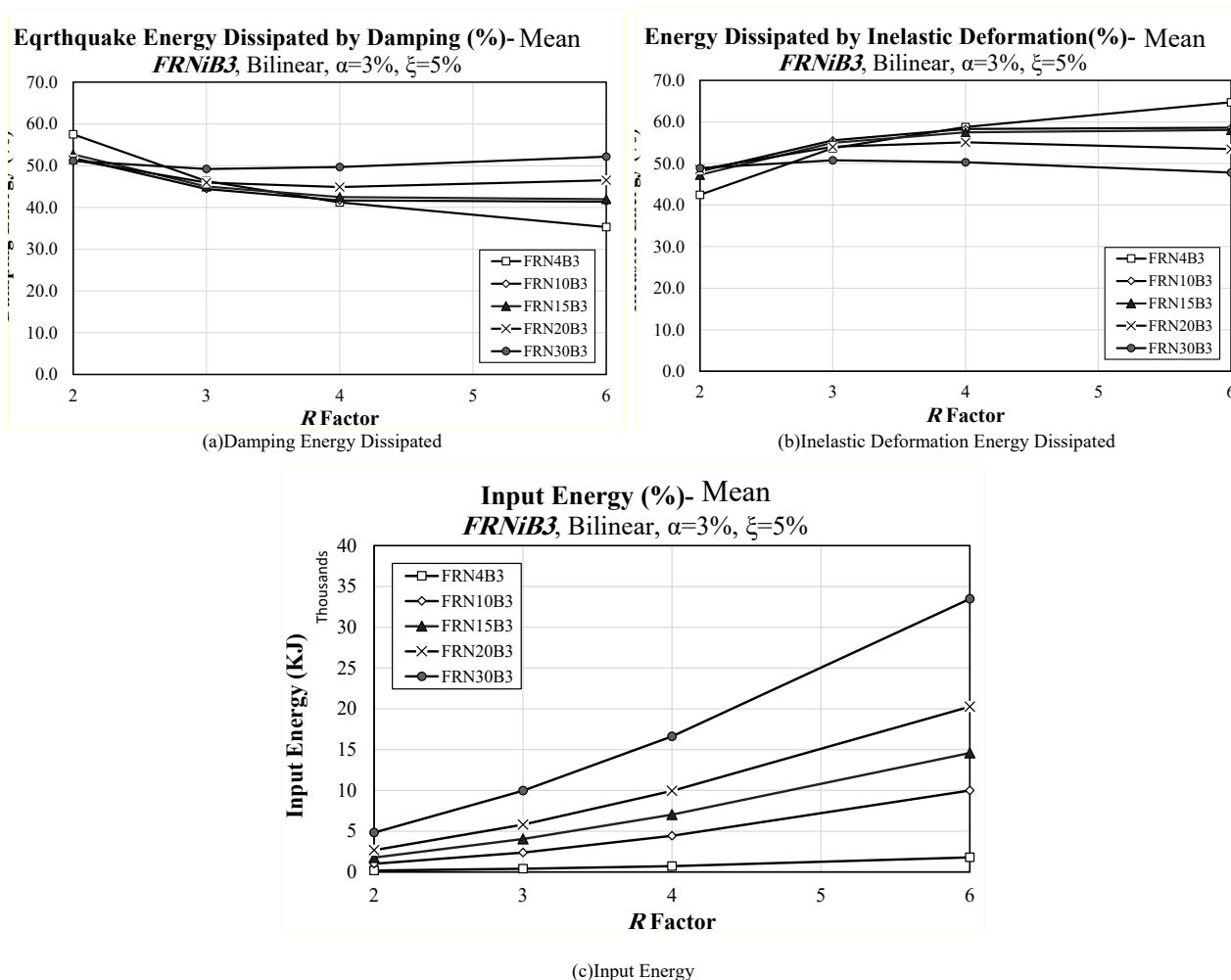
در نتیجه پس از محاسبه ی انواع انرژی اعم انرژی تلف شده در اثر رفتار چرخه‌ای، انرژی میرایی و انرژی کرنشی ارتجاعی، نسبت‌هایی برای تخمین انواع بیشینه انرژی و رابطه آن با سیستم MDOF ارائه و معرفی گردید. ویژگی‌های پاسخ انرژی حاصل از تحلیل دستگاه‌های SDOF معادل در برابر رکوردهای نزدیک گسل پالس گونه ارائه شدند. در راستای پیشنهاد نسبت‌های کاربردی انرژی، نسبت‌هایی همچون نسبت انرژی تلف شده غیر ارتجاعی به ارتجاعی، نسبت انرژی تلف شده هیستریزس به کل انرژی تلف شده برای سیستم MDOF و

یک راستا است [۳۴]. برای مقایسه بهتر بین سهم انرژی تلف شده در اثر میرایی و تغییر شکل‌های غیرخطی و تأثیر اندازه غیرخطی شدن سازه بر آن، جدول (۵) ارائه شده است. میانگین نتایج به دست آمده از جدول نشان می‌دهند که در سازه‌های کوتاه و میان مرتبه، چنانچه تراز غیرخطی شدن سازه اندک باشد ($R=2$ در این تحقیق)، سهم انرژی تلف شده در اثر میرایی تا ۱۰٪ بیشتر از انرژی تلف شده چرخه‌ای است. البته با افزایش R این رويه برعکس می‌گردد. افزایش R باعث شد سهم انرژی میرایی ۵۳-۳۵٪ و سهم انرژی چرخه‌ای بین ۶۵-۴۷٪ تغییر داشته باشد. هر چه ارتفاع سازه کمتر باشد، سهم انرژی چرخه‌ای بیشتر از انرژی میرایی است. به طور نمونه در قاب ۴ طبقه برای $R=6$ سهم انرژی چرخه‌ای نسبت به انرژی میرایی قابل توجه‌تر می‌گردد. نکته دیگر اینکه با افزایش تعداد طبقات (به طور نمونه

جدول ۵. سهم انرژی ورودی، میرایی و چرخه‌ای برای مقادیر مختلف در قاب‌های ۴، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ طبقه

Table 5. Contribution of input, damping and hysteresis energy for different values of R (4-, 10-, 15-, 20-, 30- story)

مدل	ضریب رفتار، R	انرژی ورودی زلزله (KJ)	مجموع انرژی تلف شده	
			میرایی (%)	هیستریزس (%)
FRN4B3	2	178	57.5	42.5
	3	399	46.3	53.7
	4	722	41.2	58.8
FRN10B3	6	1802	35.3	64.7
	2	1001	51.9	48.1
	3	2389	44.4	55.6
FRN15B3	4	4439	41.7	58.3
	6	9994	41.4	58.6
	2	1765	52.7	47.3
FRN20B3	3	4040	45.0	55.0
	4	7039	42.5	57.5
	6	14597	42.0	58.0
FRN30B3	2	2669	51.4	48.6
	3	5813	46.0	54.0
	4	9928	44.9	55.1
	6	20265	46.5	53.5
	2	4816	51.1	48.9
	3	9967	49.2	50.8
	4	16608	49.7	50.3
	6	33462	52.2	47.8



شکل ۱۲. تغییرات انرژی میرایی، چرخه ای و ورودی برای مقادیر مختلف R
Fig. 12. Changes in the input, damping and hysteresis energy for different values of R

R) وابسته نیست. این بدان معنی است که بین انرژی میرایی ویسکوز و انرژی تلف شده توازن برقرار است که باعث می شود مجموع این دو مکانیسم اتلاف انرژی چندان نسبت به درجه غیرخطی شدن سازه حساس نباشد.

مطالعه نسبت نیاز انرژی چرخه ای به مجموع انرژی تلف شده (HE/TDE) در سیستم SDOF نشان می دهد که برای پریودهای کوتاه، نسبت HE/TDE با افزایش R افزایش می یابد اما برای $0.1 < T/Sec$ این افزایش در اثر رشد R حذف می گردد. این نسبت با افزایش پریود به صورت خطی کاهش می یابد. نرخ تغییرات به دست آمده در محدوده پریود بلند به شدت به محتوای انرژی زلزله وابسته است که البته این موضوع با مراجعه به طیف پاسخ ارتجاعی نیز مشاهده می گردد. به طور نمونه اگر در محدوده

SDOF معادل محاسبه و برای منظور نمودن اثرات درجات آزادی نیاز انرژی به دست آمده برای سازه MDOF با مقدار متناظر آن در سازه SDOF معادل هم پایه شده است. بررسی نتایج حاصله بخش های مختلف در قالب نکات زیر قابل ارائه می باشند:

- در سازه SDOF مشابه نسبت تغییر مکان هم پایه شده در محدوده پریودهای کوتاه، غیرخطی شدگی باعث افزایش قابل توجه نسبت TDE^{in}/TDE^{el} می گردد. پریود متناظر با ناحیه پریودهای کوتاه و بلند ۱ ثانیه برآورد گردیده است. برای پریودهای بالاتر ۱ ثانیه، افزایش R (افزایش شکل پذیری) باعث کاهش نیاز TDE^{in}/TDE^{el} می گردد و در این محدوده پریود، نسبت نیاز محاسبه شده کمتر وابسته تغییر پریود است. به علاوه به جز در سازه های با پریود کوتاه، TDE چندان به درجه غیرخطی شدن سازه (ضریب

سیستم SDOF متناظر با مود اول به دست آمد. مراجعه به این تصاویر نشان می‌دهد که نسبت HE/TDE در سیستم MDOF مستقل از دوره تناوب بوده به قسمی به طور متوسط ۶۰٪ مجموع انرژی تلف شده در سازه متأثر از نیاز انرژی چرخه‌ای است؛ بنابراین اطلاعات سیستم SDOF می‌توان استفاده نمود. البته با افزایش درجه غیرخطی شدگی سازه (افزایش ضریب R) این نسبت برای سیستم MDOF به نتایج سیستم SDOF نزدیک‌تر می‌شود.

با افزایش ضریب رفتار سازه، R، نسبت $HE_{s,i} / HE_i$ در طبقات فوقانی سازه کاهش یافته که نشان‌گر کاهش اثر مودهای بالاتر می‌باشد. این در حالی است که در طبقات تحتانی سازه، نسبت $HE_{s,i} / HE_i$ افزایش می‌یابد که تمایل سازه به ارتعاش در مود اول را نشان می‌دهد.

افزایش درجه غیرخطی شدن سازه، R، برای سازه‌های بلندمرتبه - با توجه به تمرکز بیشینه نیازهای غیرخطی سازه در طبقات تحتانی و به دنبال آن کاهش المان‌هایی که به واسطه ی کاهش سهم اثر مودهای بالاتر غیرخطی می‌شوند - افزایش سهم انرژی تلف شده در اثر میرایی را به دنبال دارد. این در حالی است که در سازه های کوتاه مرتبه، افزایش R موجب کاهش سهم انرژی میرایی می‌شود.

مراجع

- [1] J. Stanford, J. Ward, The hyporheic habitat of river ecosystems, *Nature*, 335(6185) (1988) 64.
- [2] P.J. Hancock, A.J. Boulton, W.F. Humphreys, Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater, *Hydrogeology Journal*, 13(1) (2005) 98-111.
- [3] T.C. Bjornn, D.W. Reiser, Habitat requirements of salmonids in streams, *American Fisheries Society Special Publication*, 19(837) (1991) 138.
- [4] A. Argerich, E. Martí, F. Sabater, M. Ribot, Temporal variation of hydrological exchange and hyporheic biogeochemistry in a headwater stream during autumn, *Journal of the North American Benthological Society*, 30(3) (2011) 635-652.

پریود بلند نرخ تنزل طیف میانگین پاسخ شدید باشد، نسبت HE/TDE نیز با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

در راستای توسعه کیفی و کمی رابطه بین نیازهای انرژی سیستم MDOF و سیستم ESDOF نیاز کل انرژی تلف شده (TDE) در دو حالت ارتجاعی و غیر ارتجاعی محاسبه شده و نتایج ارائه شده به صورت نسبت TDE^{el} سیستم MDOF به TDE^{el} سیستم SDOF معرفی شده‌اند. مطالعه اجمالی یافته‌ها نشان می‌دهد که برای سیستم‌های ارتجاعی با پریود کوتاه، نیاز TDE سازه MDOF به طور متوسط ۸۰٪ نیاز TDE سیستم SDOF ارتجاعی نماینده مود اول است. با افزایش پریود تأثیر درجات آزادی پر اهمیت می‌گردد، بنابراین نسبت TDE نیاز به شدت افزایش می‌یابد.

نسبت نیاز TDE سیستم MDOF غیرارتجاعی به نیاز ارتجاعی سازه MDOF در دو حالت نسبی و مطلق از دیگر نسبت‌های کاربردی پیشنهادی است. یافته مؤید این موضوع است که سیستم غیرخطی به همان اندازه انرژی تلف می‌کند که سیستم ارتجاعی به کمک میرایی تلف می‌کند. البته این موضوع برای پریودهای کوتاه برقرار نیست. به عبارتی، بین انرژی تلف شده توسط میرایی و انرژی تلف شده توسط عملکرد چرخه‌ای توازن و تعادل برقرار است.

یکی دیگر از نسبت‌های کاربردی که می‌توان برای ارزیابی رابطه بین سیستم MDOF و SDOF استفاده نمود، نسبت نیاز TDE سیستم MDOF غیرارتجاعی به نیاز ارتجاعی سازه SDOF است. از مطالعه این نسبت این طور نتیجه می‌گردد که برای سازه‌های با پریود کوتاه، نیاز TDE سیستم MDOF کوچک‌تر از نیاز TDE سیستم SDOF معادل است. افزایش دوره تناوب و افزایش اهمیت اثرات درجات آزادی باعث می‌شود که نیاز TDE سیستم MDOF تقویت گردد. تغییرات نسبت TDE تقریباً مستقل از مقاومت طرح و درجه غیرخطی شدگی است.

نیاز انرژی چرخه‌ای (HE) در سیستم MDOF بخشی از انرژی ورودی است که به وسیله تسلیم المان‌های سازه تلف می‌شود. نسبت نیاز HE به TDE برای مدل‌های MDOF می‌تواند یک نسبت کاربردی مفید باشد. شکل کلی نمودار HE/TDE سازه MDOF شبیه همان نموداری است که برای نسبت HE/TDE

- [16] J. Bredehoeft, I. Papaopulos, Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile, *Water Resources Research*, 1(2) (1965) 325-328.
- [17] R. Stallman, Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature, *Journal of geophysical Research*, 70(12) (1965) 2821-2827.
- [18] D. Kunii, J. Smith, Heat transfer characteristics of porous rocks: II. Thermal conductivities of unconsolidated particles with flowing fluids, *AIChE Journal*, 7(1) (1961) 29-34.
- [19] K. Cartwright, Measurement of fluid velocity using temperature profiles: experimental verification, *Journal of Hydrology*, 43(1-4) (1979) 185-194.
- [20] K. Cartwright, Groundwater discharge in the Illinois Basin as suggested by temperature anomalies, *Water Resources Research*, 6(3) (1970) 912-918.
- [21] M.L. Sorey, Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells, *Water Resources Research*, 7(4) (1971) 963-970.
- [22] S. Suzuki, Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields, *Journal of Geophysical Research*, 65(9) (1960) 2883-2885.
- [23] S.E. Silliman, J. Ramirez, R.L. McCabe, Quantifying downflow through creek sediments using temperature time series: one-dimensional solution incorporating measured surface temperature, *Journal of Hydrology*, 167(1-4) (1995) 99-119.
- [24] C. Schmidt, M. Bayer-Raich, M. Schirmer, Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4) (2006) 1419-1446.
- [25] C. Anibas, K. Buis, R. Verhoeven, P. Meire, O. Batelaan, A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction, *Journal of Hydrology*, 397(1-2) (2011) 93-104.
- [26] D. Cheng, J. Song, W. Wang, G. Zhang, Influences of riverbed morphology on patterns and magnitudes
- [5] C. Anibas, J.H. Fleckenstein, N. Volze, K. Buis, R. Verhoeven, P. Meire, O. Batelaan, Transient or steady-state? Using vertical temperature profiles to quantify groundwater-surface water exchange, *Hydrological Processes*, 23(15) (2009) 2165-2177.
- [6] M. Brunke, T. Gonser, The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater biology*, 37(1) (1997) 1-33.
- [7] A.J. Boulton, S. Findlay, P. Marmonier, E.H. Stanley, H.M. Valett, The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1) (1998) 59-81.
- [8] M. Mutz, A. Rohde, Processes of Surface-Subsurface Water Exchange in a Low Energy Sand-Bed Stream, *International Review of Hydrobiology*, 88(3-4) (2003) 290-303.
- [9] M. Sophocleous, Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeology journal*, 10(1) (2002) 52-67.
- [10] M.P. Anderson, Heat as a ground water tracer, *Groundwater*, 43(6) (2005) 951-968.
- [11] D.A. Stonestrom, K.W. Blasch, APPENDIX E: DETERMINING TEMPERATURE AND THERMAL PROPERTIES FOR HEAT-BASED STUDIES OF SURFACE-WATER GROUND-WATER INTERACTIONS, STATEMENT BY AUTHOR, (2003) 169.
- [12] D.A. Stonestrom, J. Constantz, Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams, US Dept. of the Interior, US Geological Survey, 2003.
- [13] C.S. Lowry, J.F. Walker, R.J. Hunt, M.P. Anderson, Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor, *Water Resources Research*, 43(10) (2007).
- [14] R.G. Storey, K.W. Howard, D.D. Williams, Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: A three-dimensional groundwater flow model, *Water Resources Research*, 39(2) (2003).
- [15] C. Van Orstrand, Temperature gradients, *Problems of petroleum geology*, 989 (1934) 1021.

of hyporheic water exchange within a natural river
confluence, Journal of hydrology, 574 (2019) 75-84.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Abdonnabi Razavi, N. Siahpolo, M. Mahdavi Adeli, A Relationship between the Energy Demands of MDOF and Equivalent SDOF System under Pulse-Type Near-Fault Earthquakes . Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2601-2624

DOI: [10.22060/ceej.2020.17466.6569](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17466.6569)



