



Field Evaluation of Fundamental Period of Damaged and Retrofitted Reinforced Concrete Buildings: Case Study of Sarpol-e Zahab Earthquake

M. Khanmohammadi^{1*}, A.R. Aghababaie Mobarakeh², S. S. Majid Zamani³, F. Farahbod³, M. Eshraghi¹, S. Behboodi¹, S. Sayadi Moghadam¹, M. Nafisifard¹, F. Rahimi Afshar¹, A. Abdollahpoor¹

¹Civil Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran.

²University of Science and Culture, Tehran, Iran.

³Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT: The fundamental period of a building plays a critical role in determining structural behavior during strong motions such as earthquakes and estimating building base shear in the new design of structures, as well as target displacement in seismic assessment of existing buildings. Thus, having an appropriate estimation of the fundamental period of buildings can considerably affect design and evaluation processes. In this research, to investigate the effects of damages on fundamental periods, ambient vibration tests were conducted on 22 seismically-damaged reinforced concrete (RC) buildings following the earthquake of Sarpol-e Zahab 2017. The obtained values for fundamental periods were compared with their counterparts calculated by empirical relations proposed in the first and fourth edition of the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800) and the first revision of Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (No. 360). The obtained results for damaged RC buildings with moment resisting frame show a significant difference between fundamental periods of ambient vibration tests and empirical relations such that in a building with a damage state of 4, the obtained period from ambient vibration tests was 2.32 times greater than the calculated value using empirical relations. Furthermore, in retrofitted RC buildings, fundamental periods from empirical relations were up to 1.7 times greater than values determined using ambient vibrations. Therefore, two empirical relations for determining fundamental periods of damaged RC buildings with moment resisting frames and retrofitted RC buildings by adding shear walls are proposed by fitting curves on the obtained results of ambient vibration tests.

Review History:

Received: Oct. 31, 2020

Revised: Aug. 15, 2021

Accepted: Nov. 08, 2021

Available Online: Jan. 01, 2021

Keywords:

fundamental period
damaged reinforced concrete building
retrofitted reinforced concrete building
Sarpol-e Zahab earthquake
ambient vibration test

1- Introduction

In general, the behavior of structures during large vibrations induced by earthquakes depends on the dynamic characteristics of the structure (Fundamental period, damping, and mode shapes). Among these characteristics, the fundamental period of structure can be considered as the most critical and influential behavioral characteristic. With the aim of presenting an approximate estimation for the fundamental period of buildings, empirical relations have been proposed by design and evaluation codes, which are mainly based on the results of field and experimental tests. Using ambient vibration tests, Oliveira and Navarro, Chiauzzi et al., and Salameh et al. determined the fundamental periods of 197, 12, and 330 reinforced concrete (RC) buildings, respectively [1-3]. Goel and Chopra proposed empirical relations for fundamental period calculation of RC buildings by running the analyses on the recording vibrations of 27 and 16 RC

buildings with moment-resisting frame and shear wall as a lateral load resisting system, respectively, during an earthquake in California [4-6]. These relations became the base of later-proposed empirical relations in American codes and provisions. On November 12, 2017, an earthquake with a magnitude of 7.3 (Mw) struck Sarpol-e Zahab (Iran). During the earthquake, many buildings suffered considerable damages to the extent that they needed to be retrofitted. Concerning the importance of the fundamental period of structure in the evaluation and retrofitting process, ambient vibration tests were conducted on 22 damaged and retrofitted buildings. The purpose of this study is to determine the fundamental periods of damaged and retrofitted RC buildings, investigate the effect of damage rate on changes in this characteristic, and draw a comparison between the obtained results and the empirical relations proposed in different editions of Standard No. 2800 and Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (No. 360) [6-8].

*Corresponding author's email: mkhan@ut.ac.ir



2- Methodology

Ambient vibration tests are conducted on 22 RC buildings (12 damaged and 10 retrofitted buildings) whose heights range from 1 to 7 stories (i.e., 3.2 to 22.3 meters). In order to investigate the effect of damage severity on the fundamental period, buildings are classified into five damage states according to the suggested criteria in European Macroseismic Scale [9]. Damaged RC buildings were retrofitted by adding shear walls, and damaged beams and columns were locally retrofitted. Ambient vibrations of buildings were recorded using the SSR-1 data logger and Ranger Seismometer model SS-1 sensors. Sensors were located as close as possible to the story center of stiffness to measure buildings' vibrations. In cases where torsion was inevitable, in addition to the center of stiffness of each story, sensors were located at the corners of each story. In this research, records of vibrations were processed through 5 modal identification methods, including enhanced frequency domain decomposition (EFDD) and curve-fitting frequency domain decomposition (CFDD) methods in the frequency domain and stochastic subspace identification-unweighted principal component (SSI-UPC), stochastic subspace identification-principal component (SSI-PC), and stochastic subspace identification-canonical variate analysis (SSI-CVA) methods in the time domain using ARTeMIS software [10].

3- Results and Discussion

The obtained periods are compared with the results of empirical relations proposed in the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings first and fourth editions, as well as Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings 1st edition. Results show that the calculated periods using empirical relations proposed in codes present underestimated values. This difference is such that for a building with damage state of four, the acquired fundamental period from ambient vibration tests is 2.32 times the highest value calculated by empirical relations. Due to the direct influence of the fundamental period of a building on the calculated target displacement in the evaluation process of building, this significant discrepancy in period estimation can lead to incorrect evaluation of existing structure; because, according to Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings 1st edition, in target displacement estimation process the fundamental period of a building should be considered equal to the period that is calculated using empirical relations of code or the least value of 1.4 times of period that is calculated using empirical relations of code and analytical period that is obtained from analytical models [15]. Thus, an underestimated value of the fundamental period leads to an underestimated and contrary to certainty value for target displacement. Investigations show that fundamental periods of all buildings that were retrofitted by adding shear walls are lower than the values calculated using empirical relations of codes, and periods of those buildings that already had shear walls during the earthquake are greater than the values calculated using empirical relations of codes.

Due to the significant difference between the obtained periods for damaged RC buildings with moment-resisting frame and retrofitted RC buildings by adding shear walls and the calculated values of codes empirical relations, new empirical relations are proposed by curve-fitting on the obtained periods using ambient vibration tests. For damaged RC buildings with moment resisting frame as a lateral load resisting system, $T = 0.099H^{0.9}$ is proposed that approximately is twice the relations suggested by empirical relations of codes. Besides, for RC buildings with shear walls or masonry infill walls, $T = 0.036H^{0.75}$ is proposed that its result is less than the proposed values of codes empirical relations.

4- Conclusion

Due to the importance of buildings fundamental periods in estimating base shear of buildings in the design process and target displacement in buildings evaluation in retrofitting process, by curve-fitting on the obtained results of ambient vibration, $T = 0.099H^{0.9}$ and $T = 0.036H^{0.75}$ are proposed for RC damaged buildings with moment resisting frame as a lateral load resisting system and retrofitted (or new) buildings by adding shear walls, respectively.

The obtained results of this research demonstrate that the proposed empirical relation for calculation of the fundamental period of RC buildings with moment resisting frame in Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings 1st edition is significantly contrary to certainty.

References

- [1] C.S. Oliveira, M. Navarro, Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(3) (2009) 609-642.
- [2] L. Chiauzzi, A. Masi, M. Mucciarelli, J. Cassidy, K. Kutyn, J. Traber, C. Ventura, F. Yao, Estimate of fundamental period of reinforced concrete buildings: code provisions vs. experimental measures in Victoria and Vancouver (BC, Canada), in: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [3] C. Salameh, B. Guillier, J. Harb, C. Cornou, P.-Y. Bard, C. Voisin, A. Mariscal, Seismic response of Beirut (Lebanon) buildings: instrumental results from ambient vibrations, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(10) (2016) 2705-2730.
- [4] R.K. Goel, A.K. Chopra, Period formulas for moment-resisting frame buildings, *Journal of Structural Engineering*, 123(11) (1997) 1454-1461.
- [5] R.K. Goel, A.K. Chopra, Period formulas for concrete shear wall buildings, *Journal of Structural Engineering*, 124(4) (1998) 426-433.
- [6] B.a.H.R.C. (BHRC), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard No. 2800. in persian, in, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 1988, First edition.
- [7] B.a.H.R.C. (BHRC), Iranian code of practice for seismic

- resistant design of buildings, standard No. 2800. in persian, in, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 2015, Fourth edition.
- [8] M.a.P.O. (MPO), Instruction for seismic rehabilitation of buildings., in, Management and Planning Organization, Tehran, Iran, 2014.
- [9] G. Grünthal, European macroseismic scale 1998 (EMS-98), (1998).
- [10] ARTeMIS 4.0 Extractor and Modal software, in, Structural vibration solutions A/S, Denmark, 2013.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Khanmohammadi, A.R. Aghababaie Mobarakeh, S. S. Majid Zamani, F. Farahbod, M. Eshraghi, S. Behboodi, S. Sayadi Moghadam, M. Nafisifard, F. Rahimi Afshar, A. Abdollahpoor, *Field Evaluation of Fundamental Period of Damaged and Retrofitted Reinforced Concrete Buildings: Case Study of Sarpol-e Zahab Earthquake*, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 527-530.

DOI: 10.22060/ceej.2022.19174.7101





ارزیابی میدانی زمان تناوب اصلی ساختمان‌های بتن مسلح آسیب دیده و بهسازی شده: مطالعه موردی زلزله سرپل ذهاب

محمد خان محمدی^{۱*}، علیرضا آقابابائی مبارکه^۲، سید سهیل مجید زمانی^۳، فرهنگ فرحید^۴، مجید اشراقی^۱، سعید بهبودی^۱، سینا صیادی مقدم^۱، محمد نفیسی فرد^۱، فرهاد رحیمی افشار^۱، عطا عبدالله پور

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

کلمات کلیدی:

زمان تناوب اصلی

ساختمان بتن مسلح آسیب دیده

ساختمان بتن مسلح بهسازی شده

زلزله سرپل ذهاب

آزمایش ارتعاشات محیطی.

خلاصه: زمان تناوب اصلی ساختمان یکی از مولفه‌های کلیدی در تعیین رفتار سازه به هنگام وقوع ارتعاشاتی مانند زلزله و همچنین تعیین برش پایه سازه به هنگام طراحی سازه جدید یا تعیین تغییر مکان هدف در زمان ارزیابی سازه موجود است. بنابراین ارائه برآوردی مناسب از زمان تناوب اصلی ساختمان می‌تواند تأثیری چشمگیر در نتایج طراحی یا ارزیابی سازه داشته باشد. به همین دلیل پس از زلزله آبان ماه سال ۱۳۹۶ شهر سرپل ذهاب با هدف تعیین زمان تناوب اصلی آزمایش ارتعاشات محیطی بر روی ۲۲ ساختمان بتن مسلح (۱۲ ساختمان آسیب دیده و ۱۰ ساختمان بهسازی شده) انجام گرفت. زمان‌های تناوب اصلی به دست آمده با نتایج پیشنهادی حاصل از روابط تجربی آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) ویرایش‌های اول و چهارم و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) مقایسه شد. نتایج به دست آمده برای ساختمان‌های آسیب دیده بتن مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی نشان از تفاوت قابل ملاحظه بین دوره تناوب حاصل از آزمایشات و روابط تجربی داشت به گونه‌ای که در ساختمانی با سطح آسیب ۴، دوره تناوب حاصل از ارتعاشات محیطی ۲/۳۲ برابر نتایج حاصل از روابط تجربی شد. همچنین در ساختمان‌های بتن مسلح بهسازی شده نتایج حاکی از تقریبی دست بالا تا ۱/۷ برابر توسط روابط تجربی آیین‌نامه‌ها بود. به همین دلیل با برآزش خطوی بر نتایج به دست آمده، روابط تجربی مناسبی برای تعیین زمان تناوب ساختمان‌های بتن مسلح آسیب دیده با سیستم باربر جانبی قاب خمشی و ساختمان‌های بتن مسلح بهسازی شده (با در حال طراحی) با دیوار برشی پیشنهاد گردید.

۱- مقدمه

پرتغال را با استفاده از آزمایش ارتعاشات محیطی تعیین کرده و با روابط ارائه شده توسط سایر محققان مقایسه نمودند [۱]. علاوه بر این آن‌ها به بررسی اثر دیوارهای میان‌قاب^۳ روی زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها پرداخته و نتیجه گرفتند که دیوار میان‌قاب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زمان تناوب اصلی داشته و می‌تواند فرکانس سازه را ۲ تا ۳ برابر افزایش دهد. چپوزی^۴ و همکارانش با ثبت ارتعاشات محیطی ۱۲ ساختمان بتن مسلح ۴ تا ۱۹ طبقه در کانادا نشان دادند که زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقادیر به دست آمده از آیین‌نامه‌ها و مدل‌سازی‌های عددی است [۲]. سالامه^۵ و همکارانش مشخصات دینامیکی ۳۳۰ ساختمان را تعیین کردند. آن‌ها با در نظرگیری نوع خاک محل روابطی برای زمان تناوب - ارتفاع پیشنهاد کردند و نتیجه‌گیری کردند که در خاک‌های نرم زمان تناوب ساختمان‌ها بیشتر شده و هر چه مقدار این مشخصه در ساختمان بیشتر باشد میرایی سازه کمتر خواهد

به طور کلی رفتار سازه‌ها تحت ارتعاشات بزرگی مانند زلزله تابع مشخصات دینامیکی سازه (زمان تناوب، میرایی و اشکال مودی) است. در میان این مشخصات دینامیکی، زمان تناوب اصلی ارتعاش سازه را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مشخصه رفتاری در نظر گرفت. به منظور برآورد تقریبی زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها، آیین‌نامه‌های طراحی و ارزیابی روابطی تجربی پیشنهاد کرده‌اند که عمدتاً بر اساس نتایج آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی هستند. به طور کلی برای تعیین مشخصات دینامیکی سازه‌های بزرگ مانند ساختمان‌ها به جز در موارد معدودی که پاسخ ساختمان تحت زلزله ثبت شده است، از آزمایش ارتعاشات محیطی^۱ استفاده می‌شود. اولیویرا و ناوارو^۲ مشخصات دینامیکی ۱۹۷ ساختمان بتن مسلح موجود در

1 Ambient vibration test

2 Oliveira and Navarro

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mkhan@ut.ac.ir



نیست. ویدال^۸ و همکارانش با اندازه‌گیری ارتعاشات ساختمان‌های بتن مسلح قبل و بعد از زلزله سال ۲۰۱۱ در شهر لورکا^۹ (اسپانیا) مشخصات دینامیکی ساختمان‌ها را تعیین کردند و روابطی تجربی برای زمان تناوب - تعداد طبقات ارائه نمودند [۱۱]. دیتوماسو^{۱۰} و همکارانش روی ۶۸ ساختمان بتن مسلح که در زلزله سال ۲۰۰۹ لاکویلا^{۱۱} آسیب دیده بودند، آزمایش ارتعاشات محیطی انجام دادند و پس از سطح‌بندی شدت آسیب دیدگی ساختمان‌ها و همچنین تعیین زمان تناوب‌های اصلی ارتعاش، روابطی برای تعیین این مشخصه بر حسب ارتفاع ساختمان‌ها برای هر سطح آسیب ارائه کردند [۱۲]. در نهایت نشان داده شد که زمان تناوب‌های به دست آمده برای ساختمان‌ها، حتی ساختمان‌های با شدت آسیب بالا، در مقایسه با مقادیر به دست آمده از روابط یوروکود ۸^{۱۲}، مقادیر کوچک‌تری هستند.

در ۲۱ آبان ۱۳۹۶ زلزله‌ای شدید با بزرگای ۷/۳ در فاصله ۳۷ کیلومتری شهرستان سرپل ذهاب و با عمق کانونی ۱۸ کیلومتر رخ داد. در طول این زلزله بسیاری از ساختمان‌ها فرو ریختند، برخی آسیب‌های جدی دیدند و تعدادی بدون آسیب دیدگی باقی ماندند. نقائص متعدد در سازه‌های بتن مسلح اعم از نقص‌های مصالح تا جزئیات‌بندی آرماتورهای طولی و عرضی و ضعف‌های برشی، مشخصات هندسی ساختمان‌ها و عرف رایج ساخت و ساز در ایران و نیاز به اطلاع از زمان تناوب اصلی ساختمان‌های آسیب دیده به قصد ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای انگیزه اصلی انجام این تحقیق میدانی بوده است. مرور ادبیات فنی اشاره شده در فوق نشان می‌دهد که روابط و یا پیشنهادات موجود در ادبیات فنی نمی‌تواند قابل اعمال به این دست از سازه‌ها باشد. بنابراین در این پژوهش بر روی ۲۲ ساختمان آسیب دیده و بهسازی شده‌ی بتن مسلح آزمایشات ارتعاشات محیطی انجام شده است. هدف از این مطالعه تعیین زمان تناوب‌های اصلی ارتعاشی ساختمان‌های بتن مسلح آسیب دیده و بهسازی شده، بررسی تاثیر میزان آسیب دیدگی بر تغییرات این مشخصه و مقایسه آن با روابط ارائه شده در ویرایش‌های مختلف استاندارد ۲۸۰۰ و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) است [۱۳-۱۵].

۲- مشخصات ساختمان‌های مورد بررسی

در این پژوهش بر روی ۲۲ ساختمان بتن مسلح (۱۲ ساختمان آسیب

بود. علاوه بر این با مقایسه نتایج به دست آمده با روابط تجربی پیشنهادی در آیین‌نامه لبنان، نشان دادند که زمان تناوب‌های به دست آمده از روابط تجربی آیین‌نامه حدوداً ۲ برابر زمان تناوب‌های به دست آمده از برداشت‌های میدانی هستند، در حالی که مقادیر به دست آمده برای میرایی ساختمان‌ها (به خصوص ساختمان‌های بلند) بسیار کمتر از مقدار ثابت متداول میرایی که در طراحی‌ها در نظر گرفته می‌شود (۵ درصد) می‌باشد [۳].

گوئل و چوپرا^۱ با ثبت ارتعاشات ۲۷ ساختمان بتن مسلح با سیستم قاب خمشی و ۱۶ ساختمان بتن مسلح با دیوار برشی در کالیفرنیا تحت ارتعاشات زلزله، زمان تناوب ساختمان‌ها را تعیین کردند و با استفاده از نتایج به دست آمده روابطی تجربی برای تعیین زمان تناوب اصلی ساختمان‌های بتن مسلح پیشنهاد نمودند [۴ و ۵] که مبنای روابط پیشنهادی در آیین‌نامه‌های آمریکایی بوده است. مبنای روابط پیشنهادی در استاندارد ۲۸۰۰ و همچنین نشریه ۳۶۰، روابط پیشنهاد شده در ویرایش‌های مختلف آیین‌نامه‌های ASCE 7 [۶] و ASCE 41 [۷] بوده که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و میدانی انجام گرفته پس از زلزله‌های سان‌فرناندو^۲ در سال ۱۹۷۱، لوماپریتا^۳ در سال ۱۹۸۹ و به خصوص آزمایشات میدانی انجام گرفته توسط گوئل و چوپرا [۴ و ۵] پس از زلزله نورتریج^۴ در سال ۱۹۹۴ می‌باشد. هونگ و هوانگ^۵ پاسخ ۲۱ ساختمان بتن مسلح را تحت ارتعاشات زلزله اندازه‌گیری کردند و رابطه‌ای برای ارتفاع - زمان تناوب اصلی ارائه دادند [۸]. کالوی^۶ و همکارانش با جمع‌بندی مطالعات و آزمایشات انجام شده توسط پژوهشگران مختلف، به بررسی تاثیر زلزله بر افزایش زمان تناوب ساختمان‌ها پرداختند و نتیجه گرفتند که در زلزله‌های شدید، زمان تناوب اصلی ساختمان می‌تواند ۱/۸ تا ۲/۵ برابر مقدار اولیه شود که این امر معادل کاهش سختی ۷۰-٪۸۵ است [۹]. دو سازه یک طبقه بتن مسلح توسط زمباتی^۷ و همکارانش روی میز لرزه مورد آزمایش قرار گرفت [۱۰]. در این پژوهش با افزایش شدت ارتعاشات در شش سطح به سازه آسیب وارد شده و پس از هر مرحله مشخصات دینامیکی تعیین شد. نتایج نشان دهنده افزایش زمان تناوب اصلی و میرایی با افزایش آسیب بود. همچنین مشاهده شد که در کاهش فرکانس ۱۰٪ (کاهش سختی معادل ۱۵٪) همچنان ترکی در سازه قابل تشخیص

- 1 Goel and Chopra
- 2 San Fernando
- 3 Loma Prieta
- 4 Northridge
- 5 Hong and Hwang
- 6 Calvi
- 7 Zembaty

- 8 Vidal
- 9 Lorca town
- 10 Ditommaso
- 11 L'Aquila
- 12 Eurocode8

SSR-1 و حسگرهای لرزه‌سنج رنجر^۲ مدل SS-1 که سرعت را ثبت می‌کنند، اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). به منظور اندازه‌گیری ارتعاشات ساختمان‌ها سعی شده است تا حد امکان حسگرها به مرکز سختی طبقات ساختمان نزدیک باشند. در مواردی که احتمال داده شده که ساختمان دارای پیچش است، علاوه بر مرکز سختی، در گوشه‌های طبقات نیز حسگرگذاری صورت گرفته و اطلاعات ثبت گردیده است. به دلیل تعداد محدود حسگرها و با توجه به شرایط هر ساختمان، چندین آزمایش در هر ساختمان انجام شده است به گونه‌ای که در تمام طبقات حداقل یک حسگر وجود داشته باشد. در نهایت این آزمایش‌ها با استفاده از حسگرهای مرجع که غالباً در طبقات بالایی ساختمان‌ها مستقر شده‌اند، با یکدیگر ارتباط داده شده‌اند.

مشخصات مودال سازه‌ها با تحلیل ارتعاشات محیطی اندازه‌گیری شده تعیین می‌شوند. این تحلیل‌ها به صورت کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: روش‌های حوزه فرکانس، روش‌های حوزه زمان و روش‌های مشترک زمانی - فرکانسی.

برینکر و همکاران در سال ۲۰۰۰ روش تجزیه در حوزه فرکانس^۳ را پیشنهاد کردند و مدعی شدند که در این روش نقص‌های روش‌های کلاسیک حوزه فرکانسی برطرف گردیده است [۲۰]. ایده اصلی این روش بر این مبناست که در نمودار تجزیه مقدار تکین^۴ چگالی طیفی پاسخ، که در فضای فرکانسی ترسیم شده است، مقادیر تکین در هر فرکانس قابل مشاهده هستند. این مقادیر تکین هنگام وجود دو یا چند مود با فرکانس نزدیک به هم به صورت قله ترسیم شده و تعداد قله‌ها در هر فرکانس می‌تواند بیانگر تعداد مودها در آن فرکانس باشد. این روش با وجود راحتی و کارایی بالا، برآوردی تقریبی از فرکانس طبیعی را محاسبه می‌کند و دقت آن به وضوح نمودار چگالی طیفی وابسته است [۲۱]. علاوه بر این، محاسبه میرایی نیز با این روش به تنهایی امکان‌پذیر نیست. این دلایل باعث شد تا پیشنهاد دهندگان این روش، آن را ارتقا داده و روش بهبود یافته تجزیه در حوزه فرکانس^۵ را پیشنهاد دهند [۲۱]. در این روش پس از پیدایش مود اصلی با تکنیک یاد شده در روش تجزیه در حوزه فرکانس، بردارهای تکین در فرکانس‌های همسایگی این مود در نظر گرفته شده و فرکانسی که بالاترین مقدار را به خود اختصاص دهد مربوط به چگالی طیفی خودی^۶ سیستم یک درجه آزادی می‌شود. این سیستم یک درجه آزادی نماینده مود مورد نظر در

دیده و ۱۰ ساختمان بهسازی شده) ۱ تا ۷ طبقه (۳/۲ متر تا ۲۲/۳ متر) آزمایش ارتعاشات محیطی انجام شده است. به دلیل عمر نسبتاً کوتاه (غالباً کمتر از ۱۰ سال در زمان وقوع زلزله)، انتظار می‌رفت این ساختمان‌ها با در نظرگیری بارها و جزئیات لرزهای استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش‌های سوم و چهارم و مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش‌های سوم و چهارم طراحی شده باشند اما در جزئیات بندی و اجرا نقایص بسیار مشهودی قابل مشاهده بوده است [۱۶-۱۸]. از جمله‌ی این نقائص در ساختمان‌های بتن مسلح می‌توان به مقاومت مشخصه فشاری پایین بتن مورد استفاده (بین ۸ تا ۱۷ مگاپاسکال)، پوشش کاور بتنی زیاد (بین ۶ تا ۱۰ سانتی‌متر)، عدم رعایت کامل ضوابط محصور شدگی در ستون‌ها و ضعف برشی محسوس در این اعضا و به خصوص در اتصالات، اشاره نمود. در شکل ۱ نمونه‌هایی از خسارات مشاهده شده در ساختمان‌های بتن مسلح آسیب دیده شهر سرپل ذهاب آورده شده است. به منظور بررسی میزان تاثیر شدت آسیب دیدگی بر زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها، با توجه به معیارهای ارائه شده در مقیاس کلان‌لرزه‌ای اروپا^۱، ساختمان‌ها از نظر شدت آسیب دیدگی سطح بندی شده‌اند. بر طبق مقیاس کلان‌لرزه‌ای اروپا ساختمان‌های بتن مسلح از نظر سطح آسیب دیدگی به ۵ سطح تقسیم بندی می‌شوند [۱۹]. طبق بررسی‌های صورت گرفته سطح آسیب دیدگی ساختمان‌های مورد آزمایش، سطح ۲ (آسیب دیدگی متوسط) تا سطح ۴ (آسیب دیدگی خیلی سنگین) می‌باشد. ساختمان‌های بتن مسلح آسیب دیده با اضافه کردن دیوار برشی در هر دو جهت مقاوم‌سازی شده و تیرها و ستون‌های آسیب دیده نیز به صورت موضعی تعمیر شده‌اند. در شکل ۲ نمونه‌هایی از ساختمان‌های بهسازی شده نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول ۱ اطلاعات ساختمان‌های مورد بررسی شامل شماره، وضعیت ساختمان در زمان آزمایش، سیستم باربر جانبی و تعداد خطوط باربر جانبی در هر جهت، ارتفاع، تعداد طبقات، سطح آسیب دیدگی و شرایط اجزا و دیوارهای غیرسازه‌ای ارائه شده است.

۳- برداشت و تحلیل ارتعاشات محیطی

یکی از بهترین روش‌ها در برداشت مشخصات دینامیکی ساختمان‌ها استفاده از روش ارتعاش اجباری می‌باشد اما این روش به دلیل نیاز به تامین تجهیزات مناسب در عموم موارد امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین روش ارتعاشات محیطی می‌تواند در این راستا راهگشا باشد. ارتعاشات محیطی ساختمان‌های مورد بررسی با فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز و با استفاده از دستگاه

2 Ranger Seismometer
3 Frequency domain decomposition (FDD)
4 Singular value decomposition (SVD)
5 Enhanced Frequency domain decomposition (EFDD)
6 Auto spectral density

1 European Macroseismic Scale (EMS)



(ب) لایه لایه شدگی در بالای ستون بتنی ناشی از خمش
b. Concrete cover spalling at top of the column due to flexure



(الف) وقوع پدیده ستون کوتاه و تخریب ستون مجاور راه پله
a. Short column formation and destruction of a column adjacent to staircase



(ت) ایجاد ترک قطری در تیر به دلیل برش ایجاد شده ناشی از نیروی توسعه یافته در دیوار میان قاب بنایی
d. Formation of diagonal crack due to the developed diagonal force in infill wall



(پ) تخریب هسته بتنی ستون به دلیل نیروی توسعه یافته در دیوار میان قاب بنایی در بالای ستون و تخریب قسمتی از دیوار
c. Column concrete core destruction due to the developed forces at the top of the masonry infill wall and partial destruction of infill wall

شکل ۱. نمونه‌هایی از آسیب‌های مشاهده شده در ساختمان‌های بتن مسلح شهر سرپل ذهاب (ادامه دارد)

Fig. 1. Samples of observed damages in reinforced concrete buildings of Sarpol-e Zahab (Continude)



ج) ایجاد ترک قائم در ستون
f. Vertical crack formation in a column



ث) تخریب کامل بالای ستون و چشمه اتصال
e. Complete destruction of concrete core and joint at top of the column

شکل ۱. نمونه‌هایی از آسیب‌های مشاهده شده در ساختمان‌های بتن مسلح شهر سرپل ذهاب

Fig. 1. Samples of observed damages in reinforced concrete buildings of Sarpol-e Zahab



ب) مقاوم‌سازی کلی سازه با اضافه کردن دیوارهای برشی در هر دو جهت سازه

b. Global strengthening of a building by adding shear walls in both directions



الف) تقویت موضعی تیر و ستون با استفاده از الیاف تقویت کننده پلیمری^۱

a. Beam and column local strengthening using FRP

شکل ۲. نمونه‌هایی از تقویت‌های صورت گرفته در ساختمان‌های بتن مسلح

Fig. 2. Samples of strengthening strategies in reinforced concrete buildings



ب) دستگاه جمع کننده اطلاعات SSR-1
b. SSR-1 data logger



الف) کالیبره کردن حسگرهای لرزه سنج رنجر مدل SS-1
a. SS-1 Ranger Seismometer sensors calibration

شکل ۳. تجهیزات مورد استفاده برای برداشت ارتعاشات محیطی

Fig. 3. Equipment used to measure ambient vibrations of buildings

فرکانس دارند؛ به طور مثال در روش‌های حوزه فرکانس با توجه به اینکه اطلاعات با انجام تبدیل فوریه به حوزه فرکانس برده می‌شوند، نشت^۴ به وجود می‌آید که این اتفاق منجر به تخمینی دست بالا از میرایی می‌شود. در روش‌های حوزه زمان به دلیل آن که تبدیل فوریه‌ای در کار نیست، احتمال وقوع چنین خطایی وجود ندارد. روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی نیز به چند دسته تقسیم می‌شوند که در برخی رویکردها و جزئیات با یکدیگر تفاوت دارند. در [۲۴] به تفصیل در مورد رویکرد شناسایی زیرفضای تصادفی و انواع روش‌های آن توضیح داده شده است. در این پژوهش تحلیل‌ها بر روی اندازه‌گیری‌ها با استفاده از نرم‌افزار آرتمیس^۵ [۲۵] و روش‌های EFDD و CFDD در حوزه فرکانس و SSI-UPC^۶، SSI-PC^۷ و SSI-CVA^۸ در حوزه زمان، انجام شده که نتایج حاصل از آن به همراه زمان تناوب حاصل از مدل‌سازی‌های تحلیلی سازه‌ها در نرم‌افزار SAP2000 در پیوست آورده شده است.

سیستم کلی بوده و پس از تبدیل چگالی طیفی از حوزه فرکانسی به حوزه زمانی، می‌توان مقادیر میرایی و فرکانس را با تقریب خوبی به دست آورد [۲۲]. روش برازش منحنی در تجزیه در حوزه فرکانس^۱ روشی نوین بر مبنای رویکردهای توضیح داده شده بوده با این تفاوت که در آن به طور مستقیم از برازش منحنی بر روی بردارهای تکین در حوزه فرکانسی استفاده می‌شود [۲۳]. مزیت اصلی این روش دقت بیشتر تخمین فرکانس‌های اصلی و درصد میرایی است. در این روش اشکال مودی مشابه روش بهبود یافته تجزیه در حوزه فرکانس به دست می‌آیند.

تکنیک‌های شناسایی زیرفضای تصادفی^۲ در حوزه زمان کار می‌کنند و روش‌هایی داده‌محور^۳ هستند. در این رویکرد مدلی پارامتریک به طور مستقیم بر اطلاعات سری زمانی خام تطبیق داده می‌شود. مدل پارامتریک، مدلی ریاضیست با پارامترهایی که با تغییرشان می‌توان روند تطبیق مدل به اطلاعات را تغییر داد. در حالت کلی، هدف این روش دستیابی به مجموعه‌ای از پارامترهاست که انحراف بین پاسخ سیستم پیش‌بینی شده مدل و پاسخ سیستم اندازه‌گیری شده را به حداقل برسانند. به این فرآیند کالیبراسیون مدل می‌گویند. این روش‌ها مزایایی نسبت به روش‌های یاد شده در حوزه

- 1 Curve-fitting frequency domain decomposition (CFDD)
- 2 Stochastic subspace identification (SSI)
- 3 Data-driven

4 Leakage
5 ARTeMIS
6 Stochastic subspace identification – unweighted principal component
7 Stochastic subspace identification – principal component
8 Stochastic subspace identification – canonical variate analysis

جدول ۱. مشخصات ساختمان‌های مورد آزمایش

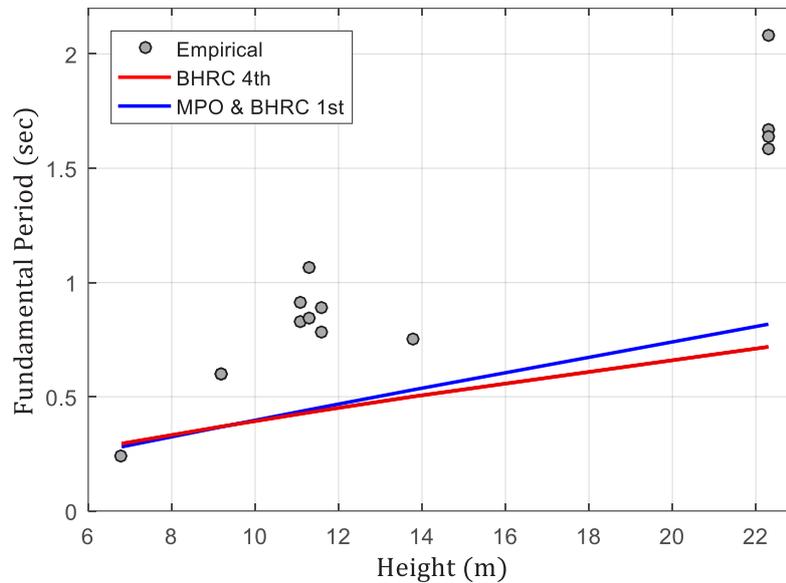
Table 1. Characteristics of examined buildings

شماره ساختمان	وضعیت	سیستم باربر جانبی در جهت طولی	سیستم باربر جانبی در جهت عرضی	ارتفاع (متر)	تعداد طبقات	سطح آسیب	وضعیت اجزای غیرسازه‌ای در جهت طولی	وضعیت اجزای غیرسازه‌ای در جهت عرضی
۱	آسیب دیده	قاب خمشی با میان قاب	قاب خمشی با میان قاب	۴/۱	۱	۳	دیوار میان قاب	دیوار میان قاب
۲	آسیب دیده	قاب خمشی با میان قاب	قاب خمشی با میان قاب	۴/۱	۱	۳	دیوار میان قاب	دیوار میان قاب
۳	آسیب دیده	قاب خمشی با میان قاب	قاب خمشی با میان قاب	۴/۱	۱	۳	دیوار میان قاب	دیوار میان قاب
۴	آسیب دیده	قاب خمشی با میان قاب	قاب خمشی	۶/۸	۲	۲	دیوار میان قاب	بدون دیوار
۵	آسیب دیده	قاب خمشی	قاب خمشی	۹/۲	۳	۳	بدون دیوار	بدون دیوار
۶	آسیب دیده	قاب خمشی	قاب خمشی	۱۱/۱	۳	۳	بدون دیوار	بدون دیوار
۷	آسیب دیده	قاب خمشی	قاب خمشی	۱۱/۳	۳	۴	بدون دیوار	بدون دیوار
۸	آسیب دیده	قاب خمشی	قاب خمشی	۱۱/۶	۳	۳	بدون دیوار	بدون دیوار
۹	آسیب دیده	دیوار برشی	قاب خمشی	۲۲/۳	۷	۲	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۰	آسیب دیده	دیوار برشی	قاب خمشی	۲۲/۳	۷	۲	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۱	آسیب دیده	دیوار برشی	قاب خمشی	۲۲/۳	۷	۲	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۲	آسیب دیده	دیوار برشی	قاب خمشی	۲۲/۳	۷	۲	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۳	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۴/۱	۱	۳	دیوار میان قاب	دیوار میان قاب
۱۴	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۴/۱	۱	۳	دیوار میان قاب	دیوار میان قاب
۱۵	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۴/۱	۱	۳	دیوار میان قاب	دیوار میان قاب
۱۶	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۹/۲	۳	۳	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۷	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۱۱/۱	۳	۳	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۸	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۱۱/۳	۳	۴	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۱۹	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۱۱/۶	۳	۳	بدون دیوار	بدون دیوار
۲۰	بهسازی شده	قاب خمشی	قاب خمشی	۱۳/۸	۴	۳	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۲۱	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۲۲/۳	۷	۲	دیوار تیغه	دیوار تیغه
۲۲	بهسازی شده	دیوار برشی	دیوار برشی	۲۲/۳	۷	۲	دیوار تیغه	دیوار تیغه

جدول ۲. روابط تجربی پیشنهادی برای زمان تناوب سیستم‌های باربر جانبی مختلف ساختمان‌های بتن مسلح در آیین‌نامه‌های مختلف

Table 2. The proposed empirical relations for calculation of fundamental periods of reinforced concrete buildings with different lateral load resisting systems in different codes

نشریه ۳۶۰	استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴)	استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۱)	نوع سیستم باربر جانبی
-	$0.05H^{0.9}$	$0.07H^{0.75}$	قاب خمشی بدون میان‌قاب
-	$0.8(0.05H^{0.9})$	-	قاب خمشی با میان‌قاب
$0.07H^{0.75}$	-	-	قاب خمشی
$0.05H^{0.75}$	$0.05H^{0.75}$	$\min(0.09 \frac{H}{D^{0.5}}, 0.06H^{0.75})$	سایر سیستم‌ها



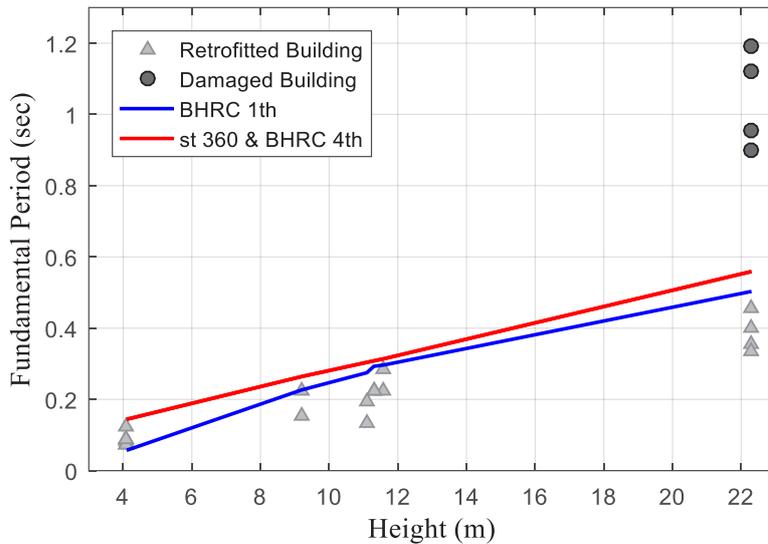
شکل ۴. زمان‌های تناوب به دست آمده از آزمایش ارتعاشات محیطی و روابط تجربی آیین‌نامه‌ها برای ساختمان‌های بتن مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی

Fig. 4. The obtained fundamental periods from ambient vibration tests and codes empirical relations of reinforced concrete buildings with moment-resisting frames as the lateral load resisting system

قرار گرفته است. در جدول ۲ به طور خلاصه روابط تجربی پیشنهاد شده برای سیستم‌های مختلف سازه‌ای توسط آیین‌نامه‌های مختلف ارائه شده است. در شکل ۴ زمان تناوب‌های اصلی به دست آمده از ساختمان‌های با سیستم باربر جانبی قاب خمشی به همراه روابط پیشنهادی در نشریه ۳۶۰ و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش اول و چهارم ترسیم شده‌اند. لازم به ذکر است همانطور که در جدول ۱ ارائه شده است، به غیر از یک مورد تمام

۴- نتایج مطالعات میدانی و مقایسه آیین‌نامه‌ای

زمان تناوب اصلی ساختمان‌ها از تحلیل ارتعاشات محیطی ثبت شده با استفاده از روش‌های عنوان شده در نرم‌افزار آرتیمیس محاسبه گردیده است. مقادیر به دست آمده با نتایج حاصل از روابط تجربی ارائه شده در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ویرایش اول و چهارم و همچنین دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) مورد مقایسه



شکل ۵. زمان‌های تناوب به دست آمده از آزمایش ارتعاشات محیطی و روابط تجربی آیین‌نامه‌ها برای ساختمان بتن مسلح با سیستم باربر جانبی دیوار برشی

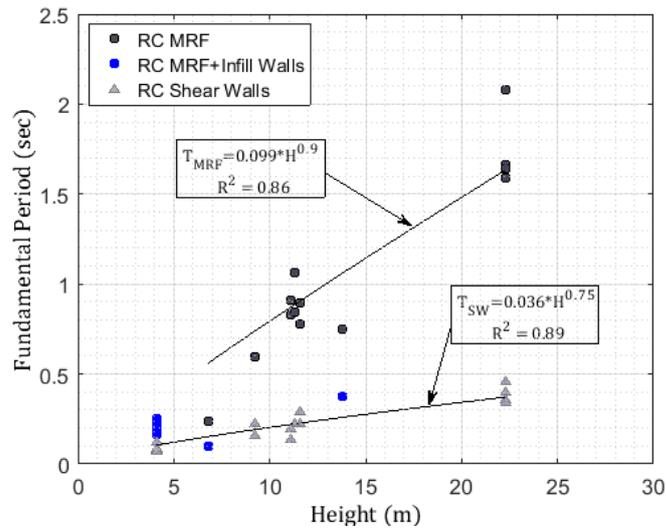
Fig. 5. The obtained fundamental periods from ambient vibration tests and codes empirical relations of reinforced concrete buildings with shear walls as the lateral load resisting system

مذکور ترسیم شده‌اند. چنانچه در شکل مشخص شده است، از بین ساختمان‌های مورد آزمایش، ۴ ساختمان آسیب دیده و سایر ساختمان‌ها با اجرای دیوار برشی مقاوم‌سازی شده هستند. در این شکل تمام ساختمان‌هایی که با اجرای دیوار برشی تقویت شده‌اند، دارای دوره تناوبی کمتر از مقادیر محاسبه شده توسط آیین‌نامه بوده و ساختمان‌هایی که دارای زمان تناوبی بیشتر از مقادیر آیین‌نامه‌ای هستند، ساختمان‌هایی هستند که از ابتدا دارای دیوار برشی بوده و در طول زلزله آسیب دیده‌اند. این تفاوت در حدی است که در برخی ساختمان‌ها مقدار حاصل از روابط تجربی پیشنهادی تا ۷۰٪ بزرگ‌تر از زمان تناوب به دست آمده از ارتعاشات محیطی است.

به دلیل تفاوت قابل ملاحظه بین زمان تناوب‌های به دست آمده برای ساختمان‌های بتن مسلح دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی که در زلزله آسیب دیده‌اند و همچنین سازه‌های مقاوم‌سازی شده با دیوار برشی با مقادیر حاصل از روابط تجربی آیین‌نامه‌ها، چنانچه در شکل ۶ نشان داده شده است، روابطی تجربی با استفاده از معادله خط برازش شده بر زمان تناوب‌های به دست آمده از آزمایشات ارتعاشات محیطی پیشنهاد شده است. در ارائه این روابط سعی شده است که جهت سازگاری بیشتر عدد توان ارتفاع، مقداری برابر با مقدار ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ بوده و تفاوت تنها در ضریب

ساختمان‌های با سیستم قاب خمشی به شدت آسیب دیده بوده و مطابق با سطح‌بندی پیشنهادی مقیاس کلان‌لرزه‌ای اروپا، دارای درجه آسیب ۳ یا ۴ هستند. چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود زمان تناوب‌های حاصل از روابط تجربی آیین‌نامه‌ها، تخمینی بسیار دست پایین به دست می‌دهد. این تفاوت در حدی است که در ساختمانی با سطح آسیب ۴، زمان تناوب به دست آمده از آزمایش ارتعاشات محیطی ۲/۳۲ برابر بیشترین زمان تناوب به دست آمده از آیین‌نامه‌ها است. به دلیل تاثیر مستقیم زمان تناوب اصلی سازه در محاسبه مقدار تغییر مکان هدف در فرآیند ارزیابی سازه به منظور بهسازی، این اختلاف قابل ملاحظه در تخمین زمان تناوب اصلی می‌تواند منجر به ارزیابی نادرستی از وضعیت سازه موجود شود؛ چرا که طبق نشریه ۳۶۰ زمان تناوب اصلی نوسان ساختمان باید برابر با روابط تجربی پیشنهادی یا کمترین مقدار ۱/۴ برابر مقدار حاصل از روابط تجربی یا زمان تناوب به دست آمده از مدل‌های تحلیلی در نظر گرفته شود [۱۵]. بنابراین تخمینی دست پایین از زمان تناوب سازه می‌تواند منجر به تخمینی دست پایین و خلاف جهت اطمینان از تغییر مکان هدف سازه شود.

در شکل ۵ دوره تناوب‌های اصلی به دست آمده از ساختمان‌های با سیستم باربر جانبی دیوار برشی به همراه روابط پیشنهادی در آیین‌نامه‌های



شکل ۶. روابط تجربی پیشنهادی برای محاسبه زمان تناوب ساختمان بتن مسلح با سیستم باربر جانبی دیوار برشی یا دیوار میان قاب بنایی و ساختمان آسیب دیده بتن مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی

Fig. 6. The proposed empirical relations for the fundamental period calculation of reinforced concrete buildings with shear wall or masonry infill wall and damaged reinforced concrete buildings with moment-resisting frame as a lateral load resisting system

در نظر گرفت.

چنانچه در مروری بر ادبیات فنی گفته شد، مشابه این پژوهش، ویدال و همکارانش [۱۱] و همچنین دیتوماسو و همکارانش [۱۲] روابطی تجربی برای تعیین دوره تناوب اصلی ساختمان‌های آسیب دیده پیشنهاد نمودند. ویدال و همکارانش برای ساختمان‌های بتن مسلح با سیستم قاب خمشی به ترتیب روابط $T_{(G_1)} = (0.065 \pm 0.002)N$ و $T_{(G_2)} = (0.077 \pm 0.002)N$ و $T_{(G_3 \text{ and } G_4)} = (0.089 \pm 0.008)N$ را برای سطوح آسیب دیدگی ۱ تا ۴ پیشنهاد کردند. در این رابطه N معرف تعداد طبقات ساختمان است. همچنین دیتوماسو و همکارانش نیز به ترتیب روابط $T = 0.026H$ و $T = 0.028H$ را برای محاسبه دوره تناوب اصلی ساختمان‌های بتن مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی که در سطح آسیب دیدگی ۲ و ۳ قرار دارند پیشنهاد کردند. نتایج این پژوهش به همراه دوره‌های تناوب به دست آمده از روابط تجربی پیشنهادی دیتوماسو و همکاران و ویدال و همکاران در پیوست آورده شده است. مقایسه نتایج نشان دهنده تفاوت قابل ملاحظه‌ای است؛ دلیل این تفاوت را می‌توان وجود دیوارهای میان قاب بنایی در اکثر دهانه‌های ساختمان‌های بررسی شده در آن پژوهش‌ها و عدم وجود المان‌های غیرسازه‌ای از جمله هرگونه دیوار

عبارت خلاصه گردد. برای ساختمان‌های آسیب دیده بتن مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی رابطه $T = 0.099H^{0.9}$ به دست آمده است که تقریباً دو برابر مقدار پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌هاست. علاوه بر این، برای محاسبه زمان تناوب ساختمان‌های دارای دیوار برشی یا دیوار میان قاب بنایی نیز رابطه $T = 0.036H^{0.75}$ حاصل شده که مقدار کمتری در مقایسه با مقادیر پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌های موجود است. این نتایج نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰)، برای ارزیابی و بهسازی سازه‌های موجود بتن مسلح با سیستم باربر جانبی قاب خمشی به طور قابل ملاحظه‌ای در خلاف جهت اطمینان است؛ چرا که تخمین دست پایین از دوره تناوب اصلی سازه منجر به برآوردی دست پایین از تغییر مکان هدف سازه می‌شود. اما از سوی دیگر، رابطه پیشنهادی برای سازه‌های بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با اضافه نمودن دیوار برشی (که می‌توان آن‌ها را معادل با سازه‌ی جدیدی که دارای سیستم باربر جانبی دیوار برشی است)، مقداری کمتر از روابط تجربی پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌های موجود را به دست می‌دهد. شاید بتوان دلیل این امر را در نظریاتی اثرات اندرکنش خاک و پی (که در ارتعاشات قوی‌تر تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر دوره تناوب اصلی سازه دارد) در روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها

و شهرسازی (بخش سازه) به دلیل در اختیار قرار دادن تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاشات محیطی دارند.

منابع

- [1] C.S. Oliveira, M. Navarro, Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(3) (2009) 609-642.
- [2] L. Chiauuzzi, A. Masi, M. Mucciarelli, J. Cassidy, K. Kutyn, J. Traber, C. Ventura, F. Yao, Estimate of fundamental period of reinforced concrete buildings: code provisions vs. experimental measures in Victoria and Vancouver (BC, Canada), in: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [3] C. Salameh, B. Guillier, J. Harb, C. Cornou, P.-Y. Bard, C. Voisin, A. Mariscal, Seismic response of Beirut (Lebanon) buildings: instrumental results from ambient vibrations, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(10) (2016) 2705-2730.
- [4] R.K. Goel, A.K. Chopra, Period formulas for moment-resisting frame buildings, *Journal of Structural Engineering*, 123(11) (1997) 1454-1461.
- [5] R.K. Goel, A.K. Chopra, Period formulas for concrete shear wall buildings, *Journal of Structural Engineering*, 124(4) (1998) 426-433.
- [6] A.S.o.C. Engineers, ASCE 7-16: Minimum Design Loads for Buildings and other Structures, in, Reston, Virginia, 2016.
- [7] A.S.o.C. Engineers, ASCE 41-06: Seismic Rehabilitation of Buildings, in, Reston, Virginia, 2007.
- [8] L.L. Hong, W.L. Hwang, Empirical formula for fundamental vibration periods of reinforced concrete buildings in Taiwan, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(3) (2000) 327-337.
- [9] G.M. Calvi, R. Pinho, H. Crowley, State-of-the-knowledge on the period elongation of RC buildings during strong ground shaking, in: *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Citeseer, 2006, pp. 3-8.

سازه‌ای یا غیرسازه‌ای در ساختمان‌های آزمایش شده در این پژوهش در نظر گرفت. در نتیجه با توجه به عدم استفاده از آجر فشاری و مصالح بنایی در بیشتر ساختمان‌های ایران در دو دهه اخیر، به نظر می‌رسد که نتایج این پژوهش می‌تواند تقریب مناسبی از دوره تناوب اصلی ساختمان‌های بتن مسلح (مخصوصاً ساختمان‌های آسیب دیده کوتاه مرتبه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی) ارائه دهد. بنابراین انجام آزمایشات میدانی متعدد بر روی سازه‌های مختلف با سیستم‌های باربر جانبی متفاوت، شریط المان‌های سازه‌ای متفاوت و سطوح آسیب مختلف به منظور حصول برآورد دقیق‌تر از وضعیت موجود سازه ضروری به نظر می‌رسد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش زمان‌های تناوب ۲۲ ساختمان بتن مسلح آسیب دیده و بهسازی شده پس از زلزله سرپل ذهاب با استفاده از آزمایش ارتعاشات محیطی اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده حاکی از تفاوت قابل ملاحظه‌ای دوره تناوب‌های به دست آمده با مقادیر حاصل از روابط تجربی پیشنهادی در آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) ویرایش اول و چهارم و همچنین دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) می‌باشد. در ساختمان‌های بتن مسلح آسیب دیده با سیستم باربر جانبی قاب خمشی این تفاوت به گونه‌ای است که دوره تناوب به دست آمده برای ساختمان‌ی با سطح آسیب دیدگی ۴، ۲/۳۲ برابر بیشترین دوره تناوب به دست آمده از روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌ها است. همچنین برای ساختمان‌های بتن مسلح بهسازی شده با اضافه نمودن دیوار برشی آیین‌نامه‌ها تقریبی دست بالا از زمان تناوب ارائه داده به گونه‌ای که در برخی موارد زمان تناوب به دست آمده از روابط پیشنهادی آیین‌نامه تا ۱/۷ برابر مقدار حاصل از آزمایش ارتعاشات محیطی بوده است. به دلیل اهمیت زمان تناوب ساختمان در تقریب مقدار برش پایه در طراحی ساختمان‌ها و همچنین مقدار تغییر مکان هدف در ارزیابی ساختمان‌ها در طول روند بهسازی، با برآزش خطوطی بر نتایج حاصله، روابط $T = 0.099H^{0.9}$ برای ساختمان بتن مسلح آسیب دیده با سیستم باربر جانبی قاب خمشی و $T = 0.036H^{0.75}$ برای ساختمان بتن مسلح بهسازی شده (یا در حال طراحی) پیشنهاد گردید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان نهایت تشکر خود را از مرکز تحقیقات راه، مسکن

- part 9: Design and construction of reinforced concrete buildings., in, Office of National Building Regulations, Tehran, Iran, 2009.
- [18] O.o.N.B.R. (ONBR). National building regulations, part 9: Design and construction of reinforced concrete buildings., in, Office of National Building Regulations., Tehran, Iran, 2013.
- [19] G. Grünthal, European macroseismic scale 1998 (EMS-98), (1998).
- [20] R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, in: Proc. of the 18*International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, 2000.
- [21] R. Brincker, C. Ventura, Introduction to operational modal analysis, John Wiley & Sons, 2015.
- [22] R. Brincker, L. Zhang, Frequency domain decomposition revisited, in: Proc. 3rd Int. Operational Modal Analysis Conf.(IOMAC'09), 2009, pp. 615-626.
- [23] N.-J. Jacobsen, P. Andersen, R. Brincker, Applications of frequency domain curve-fitting in the EFDD technique, in: Conference Proceedings: IMAC-XXVI: A Conference & Exposition on Structural Dynamics, Society for Experimental Mechanics, 2008.
- [24] P. Van Overschee, B. De Moor, Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications, Springer Science & Business Media, 2012.
- [25] ARTeMIS 4.0 Extractor and Modal software, in, Structural vibration solutions A/S, Denmark, 2013.
- [10] Z. Zembaty, M. Kowalski, S. Pospisil, Dynamic identification of a reinforced concrete frame in progressive states of damage, Engineering Structures, 28(5) (2006) 668-681.
- [11] F. Vidal, M. Navarro, C. Aranda, T. Enomoto, Changes in dynamic characteristics of Lorca RC buildings from pre-and post-earthquake ambient vibration data, Bulletin of Earthquake Engineering, 12(5) (2014) 2095-2110.
- [12] R. Ditommaso, M. Vona, M. Gallipoli, M. Mucciarelli, Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(7) (2013) 1903-1912.
- [13] B.a.H.R.C. (BHRC), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard No. 2800. in persian, in, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 1988, First edition.
- [14] B.a.H.R.C. (BHRC), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard No. 2800. in persian, in, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 2015, Fourth edition.
- [15] M.a.P.O. (MPO), Instruction for seismic rehabilitation of buildings., in, Management and Planning Organization, Tehran, Iran, 2014.
- [16] B.a.H.R.C. (BHRC), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, standard No. 2800. in persian, in, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 2005.
- [17] O.o.N.B.R. (ONBR). National building regulations,

جدول ۳ پیوست. زمان تناوب تحلیلی، آزمایشگاهی و تجربی سازه‌ها

Table 3. Appendix. Analytical, experimental, and empirical periods of buildings

زمان تناوب از رابطه تجربی پیشنهادی در این پژوهش (ثانیه)		زمان تناوب از رابطه تجربی ویدال و همکاران [۹] برای ساختمان‌های آسیب دیده (ثانیه)	زمان تناوب از رابطه تجربی دیتوماسو و همکاران [۱۰] برای ساختمان‌های آسیب دیده (ثانیه)	زمان تناوب تحلیلی (ثانیه)		زمان تناوب آزمایشگاهی (ثانیه)		شماره ساختمان
عرضی	طولی			عرضی	طولی	عرضی	طولی	
-	-	۰/۰۸۹	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۲۲	۱
-	-	۰/۰۸۹	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۳	۲
-	-	۰/۰۸۹	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۵	۳
۰/۱۵	۰/۵۶	۰/۱۵۴	۰/۱۸	۰/۵۴	۰/۶۶	۰/۱۰	۰/۲۴	۴
۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۲۶۷	۰/۲۶	۰/۸۰	۰/۷۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۵
۰/۹	۰/۹	۰/۲۶۷	۰/۳۳	۰/۸۱	۰/۹۶	۰/۷۸	۰/۸۹	۶
۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۲۶۷	۰/۳۲	۱/۰۳	۰/۸۸	۱/۰۷	۰/۸۵	۷
۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۲۶۷	۰/۳۱	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۹۱	۸
-	-	۰/۵۳۹	۰/۵۸	۲/۰۹	۰/۷۸	۲/۰۸	۱/۱۹	۹
-	-	۰/۵۳۹	۰/۵۸	۲/۰۹	۰/۷۸	۱/۶۷	۱/۱۲	۱۰
-	-	۰/۵۳۹	۰/۵۸	۲/۰۹	۰/۷۸	۱/۵۹	۰/۹۵	۱۱
-	-	۰/۵۳۹	۰/۵۸	۲/۰۹	۰/۷۸	۱/۶۴	۰/۹۰	۱۲
۰/۱	۰/۱	-	-	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۷	۱۳
۰/۱	۰/۱	-	-	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۱۴
۰/۱	۰/۱	-	-	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۱۲	۱۵
-	-	-	-	۰/۲۸	۰/۳۷	۰/۱۵	۰/۲۲	۱۶
-	-	-	-	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۲۲	۰/۲۹	۱۷
-	-	-	-	۰/۳۹	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۲۲	۱۸
-	-	-	-	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۱۴	۰/۲۰	۱۹
-	-	-	-	۱/۵۴	۱/۸۹	۰/۳۸	۰/۷۵	۲۰
۰/۳۷	۰/۳۷	-	-	۰/۶۶	۰/۷۹	۰/۳۶	۰/۴۶	۲۱
۰/۳۷	۰/۳۷	-	-	۰/۶۶	۰/۷۹	۰/۳۴	۰/۴۰	۲۲

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Khanmohammadi, A.R. Aghababaie Mobarakeh, S. S. Majid Zamani, F. Farahbod, M. Eshraghi, S. Behboodi, S. Sayadi Moghadam, M. Nafisifard, F. Rahimi Afshar, A. Abdollahpoor, Field Evaluation of Fundamental Period of Damaged and Retrofitted Reinforced Concrete Buildings: Case Study of Sarpol-e Zahab Earthquake, Amirkabir J. Civil Eng., 54(7) (2022) 2613-2626.

DOI: [10.22060/ceej.2022.19174.7101](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19174.7101)

