

Research Paper

Seismic Design Considerations for Acceleration-sensitive Non-structural Components

Mahboobeh Pirizadeh¹ 

1. Department of Civil Engineering, W.T.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Citation** Pirizadeh, P. (2026). Seismic Design Considerations for Acceleration-sensitive Non-structural Components. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 16(1):36-61. <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.210.4>**doi** <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.210.4>

ABSTRACT

Background and objective One of the key factors in reducing human and economic losses in earthquake-prone cities is ensuring the operability and continuity of service of buildings with critical functions after probable earthquakes. To achieve this, it is essential not only to maintain the proper performance of structural components but also to preserve and guarantee the functionality of non-structural components installed within the building, preventing their damage, collapse, or detachment.

Method This study investigated the acceleration amplification factor and the resulting inertial forces on non-structural components, considering their installation locations along the building height. Two regular steel structures, each with a lateral load-bearing system consisting of a medium-ductility flexural frame at heights of 4 and 8 stories, located on a hard soil site, were subjected to nonlinear time-history analysis. The range of acceleration-sensitive non-structural components included all elements connected to a structural floor or ceiling with a natural period of less than 0.5 seconds, influenced by the acceleration generated in the corresponding diaphragm. Two subcategories of non-structural components—suspended ceilings and chiller cooling towers—were examined as case studies using single-degree-of-freedom (SDOF) modeling.

Results By examining the effects of the near-fault zone on the studied structures, increases of up to 19% and up to 10% were observed in the horizontal and vertical inertial forces, respectively, applied to the center of mass of non-structural components located on different floors—especially on floors near the roof. These additive effects were more pronounced in the short-rise structure than in the medium-rise structure, which may be attributed to the closeness of the short period of the non-structural components to the natural frequency of the short-rise structure and the frequency content of the near-fault records.

Conclusion The vertical acceleration magnification factor at the center of mass of non-structural components indicates the necessity of considering the period of the vertical mode of these components in their seismic design. For example, the average magnification factor for one type of cooling tower, with a vertical mode period of 0.22 seconds installed on the roof of the studied structures, approached values between two and three times those required by current regulations.

Keywords Non-structural components, Near-fault earthquakes, Acceleration amplification factor, Inertia force

Article Info:

Received: 22 Apr 2025

Accepted: 04 Oct 2025

Available Online: 01 Apr 2026

*** Corresponding Author:**

Mahboobeh Pirizadeh, Assistant Professor.

Address: Department of Civil Engineering, W.T.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 88385776

E-mail: pirizadeh@iau.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Non-structural components, including architectural elements, interior fittings, and electrical and mechanical installations, represent a significant portion of the investment in existing buildings. Maintaining their performance after potential earthquakes is critically important both for preserving capital in general buildings and for ensuring service continuity in relief and essential facilities. While these components depend on the main structure, they do not contribute to bearing the lateral loads during an earthquake; however, they are affected by the deformation and seismic acceleration generated in the main structure.

Given the advances made in recent decades in the functional design of earthquake-resistant structures, the focus of newer editions of seismic codes has shifted toward the functional design of non-structural components, particularly following the experiences of major earthquakes. For example, after earthquakes such as Bam (2003), Zarand in Kerman (2004), Borujerd and Dorod (2006), and Ahar-Varzeghan (2012), the fourth edition of the Iranian Standard 2800 (2013) introduced requirements for designing non-structural components in buildings of very high and high importance regardless of the number of floors, as well as in buildings of medium importance with more than eight floors. Following the damages caused by the Sarpol-e Zahab earthquake in Kermanshah (2017), a new mandatory appendix titled Seismic Design and Implementation of Architectural Non-Structural Components was added to the fourth edition of Iranian Standard 2800 (2013). This appendix provides implementation details for controlling architectural components such as interior and exterior walls, facades, staircases, and false ceilings. The draft of the fifth edition of Iranian Standard 2800 (2014) also proposes an approach to clarify the design relationships between non-structural components and their connecting supports, especially for special structures, as well as expanding the scope of mechanical and electrical non-structural components subject to special design. This draft is currently undergoing approval and notification.

Regardless of the function of non-structural components in serving the building, their seismic behavior is classified into three categories based on their location and how they are connected to the structure: acceleration-sensitive, deformation-sensitive, or both. This research focuses on the seismic design of acceleration-sensitive components that are supported or connected to the floor or ceiling of a

structure and are affected by the inertial forces generated by the earthquake at that level. Consequently, the damage to these components is due to the magnitude and direction of these forces. To calculate the shear inertia force exerted on these components from horizontal earthquake forces, three parameters are typically considered: the weight of the component; the magnification factor (amplification) of the floor acceleration relative to the input acceleration at the structural support (peak floor acceleration factor); and the magnification factor (amplification) of the acceleration of the non-structural component relative to the floor acceleration (component amplification factor). The resulting force can be calculated using either simplified equivalent static analysis or dynamic methods, following the criteria of various seismic codes. The requirement to control sliding, overturning, and collapse of the non-structural component under this force has been implemented in buildings with special conditions. Additionally, most seismic codes require that the vertical component of the earthquake force be applied simultaneously with the horizontal lateral force to the non-structural component. The magnitude of the vertical force depends on the weight and importance factor of the component. However, the installation position of the non-structural component and the vertical acceleration magnification factor at the floor level are not included in the equations proposed by codes such as Iranian Standard 2800 (2013) for calculating the vertical force applied to these components.

On the other hand, the seismic analysis methods introduced for the design of non-structural components in the current edition of Iranian Standard 2800 (2013) do not mention the use of time-history analysis with seismic accelerograms directly applicable to construction sites near faults, considering the simultaneous interaction between the structure and the non-structural components. However, in buildings located near a fault, there is a significant possibility that the fault rupture will propagate toward the construction site at very high speed, causing a large portion of the seismic energy to enter the structure—and subsequently the non-structural components—within a very short initial period of the seismic record. This results in impact-type forces due to the forward directivity, intensifying damage and losses compared to similar buildings located farther from the fault (Zhai et al., 2016).

Forward directivity

Given that most of the country's densely populated metropolises are located near fault zones, this study focused on identifying special considerations for the seismic design of non-structural components in buildings with critical functions, such as medical and relief centers, with the



aim of reducing damage and ensuring uninterrupted service during design-intensity earthquakes. The study also examined certain deficiencies in the regulatory requirements for the design of acceleration-sensitive non-structural components based on the current edition of Iranian Standard 2800 (2013).

Literature review

The specific characteristics of earthquakes recorded in near-fault zones and their destructive effects on structures located close to faults have been a focus of research since the 1950s, notably by Hausner and Hudson. Based on damage observed from the 1957 Port Hueneme earthquake in California, which had a magnitude of 4.7, issues such as fault rupture propagation toward the structure site and the insufficient time for energy dissipation between the fault rupture and the structure were addressed. The destructive effects of this phenomenon were highlighted even for earthquakes of moderate magnitude (Hausner & Hudson, 1958). However, research in this field peaked after the Northridge earthquake in 1994 and the Kobe earthquake in Japan in 1995. This surge coincided with population growth in metropolitan areas near faults and advancements in hardware and software infrastructure for recording accelerometer data in these regions (Li & Xie, 2007).

According to the definitions in some seismic codes, such as ASCE7-22 (2022), near-fault areas are defined as regions located less than 15 km from faults capable of producing maximum earthquakes with a moment magnitude of 7 or higher on the Richter scale, or less than 10 km from faults capable of producing maximum earthquakes with a moment magnitude of 6 or higher. In this context, a significant portion of seismically active cities—and sometimes the entire area of certain metropolitan cities in the country—falls within these near-fault zones. It should be noted that urban planning regulations in recent decades have primarily focused on the immediate vicinity of the fault line and surface fault zones, which represent a much smaller subset of the near-fault areas. These regulations have included restrictions on population concentration within these zones in the detailed zoning plans (Mirmoghtadaee et al., 2024) and have considered their impact on the appropriate siting of critical and service-providing infrastructure during potential earthquake crises (Kheildar & Samouei, 2022).

“Near-fault ground motion characteristics are generally governed by three factors: fault rupture mechanism, the rupture direction relative to the structure’s location (including forward directivity and fling-step effects), and

permanent tectonic displacements caused by fault slip. The study of long-period pulse characteristics in the initial stages of velocity and acceleration seismic records—specifically in the out-of-plane component observed in near-fault accelerograph data—has been a major research focus over the last two decades (Gümüş & Durucan, 2022).

Investigating the impulsive effects of this phenomenon on structural load-bearing systems—utilizing rigorous analysis methods such as Nonlinear Time-History Analysis (NLTHA) under near-fault ground motion accelerograms—has led to the implementation of specific provisions in the recent revisions of most seismic codes in seismically active countries. However, research concerning the impact of this phenomenon on the performance of non-structural components in near-fault buildings has been more limited and has gained attention more belatedly (Zhai et al., 2016). Furthermore, vertical ground motion in near-fault regions exhibits a higher proportion of narrow-band spectral content at high frequencies compared to horizontal motion (Aghaee-Arayi et al., 2019). At short periods, the ratio of peak vertical acceleration to peak horizontal acceleration in near-fault earthquakes is greater than in far-field earthquakes, and significantly exceeds the common value of two-thirds (0.67) prescribed in most seismic codes (Shahbazi et al., 2019). “This phenomenon can have significant implications for the seismic design of non-structural components, which typically possess short periods. According to research by Gremeret al. (2019), the ratio of the maximum vertical floor acceleration to the peak vertical ground acceleration (PGV/PGA) is highly dependent on the vertical stiffness of the load-bearing structure. Consequently, the error arising from the assumption of rigid vertical behavior for both the structure and the floor-attached non-structural components is considerable.

In the limited number of experimental studies utilizing shake-table testing to investigate the interaction between structural and non-structural component behavior, research has primarily focused on the horizontal seismic component, often neglecting near-fault effects. Results from one such study by Astroza et al. (2015), which performed a full-scale seismic response test on a cooling tower located on the roof of a five-story concrete building, indicated that the nonlinear behavior and the structural period significantly influence the acceleration amplification factor of the cooling tower as a non-structural component. This research highlighted that certain acceleration amplification factors for mechanical non-structural components in prevailing seismic codes are not sufficiently conservative. In supplementary research within this field,

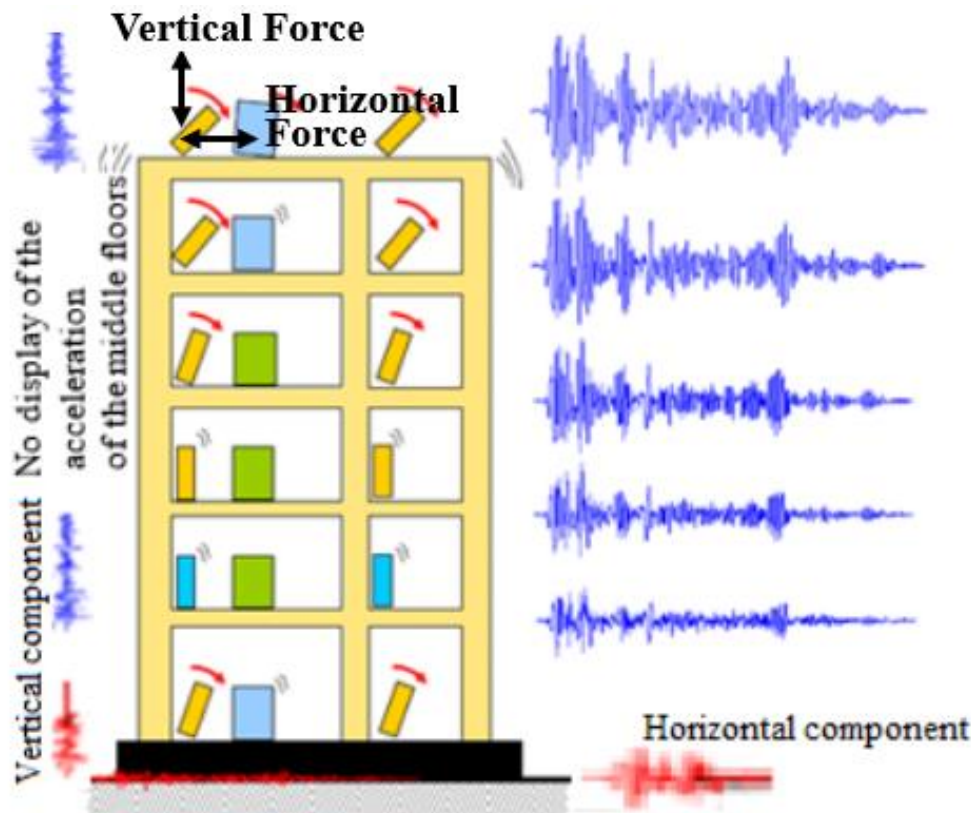


Figure 1. Schematic illustration of the extraction of floor accelerations as the driving factor for the inertial force acting at the center of mass of a non-structural component

the simultaneous vibration effects of motor-driven non-structural components operating during seismic events in service-oriented buildings have been investigated using analytical methods (Pirizadeh et al., 2024). Furthermore, a large-scale experimental study conducted on a four-story steel frame with fixed supports and a facade cladding non-structural component on a shake table—evaluating both horizontal excitation and simultaneous horizontal-vertical excitation—has emphasized the necessity of considering multi-component seismic force effects. Such considerations are crucial for the seismic design of acceleration- and displacement-sensitive non-structural components in the development of regulatory provisions for this domain (Lim et al., 2017).

Another research direction, as exemplified by the studies of Filiatrault et al. (2018), has focused on expanding the application of performance-based assessment methods for non-structural components by adopting displacement-based approaches instead of conventional force-based methods, while also considering performance evaluation over the entire service life of these components (Ahmed et al., 2024). Furthermore, the development of fragility curves to assess the performance of these com-

ponents—based on data recorded from Structural Health Monitoring (SHM) systems during seismic events, such as the 2018 Osaka earthquake in Japan—represents one of the emerging research frontiers in this field (O'Reilly et al., 2024).

Materials and Methods

In this study, an analytical approach is employed to investigate the parameters affecting the seismic design of acceleration-sensitive non-structural components, specifically the amplification (resonance) factor of the floor acceleration and the amplification (resonance) factor of the acceleration acting at the center of mass of the non-structural component. To this end, the following steps were conducted:

- 1) Seismic design of two typical low-rise and mid-rise steel structures
- 2) Evaluating the parameters that affect the seismic force exerted on acceleration-sensitive non-structural components at different floors in horizontal and vertical directions, via:

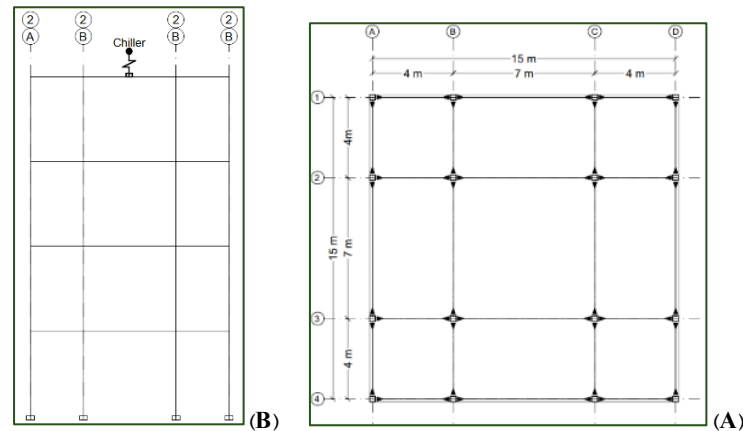


Figure 2. a) Plan view of the studied structures, b) Two-dimensional frame of the short-column structure with modeling of the non-structural component on the roof level as a single-degree-of-freedom system

1) The Equivalent Static Method, following the 4th edition of Iran Standard 2800 (2013).

2) The Dynamic Time-History Analysis method, using two sets of far-field and near-fault seismic accelerograms

“It should be noted that, to achieve the comparative objectives of this study, the seismic hazard level for both aforementioned methods was calibrated to correspond with a design earthquake having a 475-year return period, representative of the very high seismic hazard zones in the country.

As illustrated in Figure 1, this research focuses on the seismic inertial forces induced in non-structural components in both horizontal and vertical directions, considering their installation at various floor levels. To account

for realistic seismic scenarios, the simultaneous application of horizontal and vertical components of the ground motions was incorporated into the analyses; however, the discussion of the results is presented separately for each component

The studied structures and analysis method

Two types of buildings—low-rise (4-story) and mid-rise (8-story)—were modeled, both situated in very high seismic hazard regions on Site Class II per Iranian seismic regulations. The regular floor plans (Figure 2) consist of short (4 m) and long (7 m) spans, with a constant story height of 3.2 m. The lateral force-resisting system is modeled as an Intermediate Steel Moment Resisting Frame in both X and Y directions, integrated with a rigid diaphragm system. To ensure economic optimization of

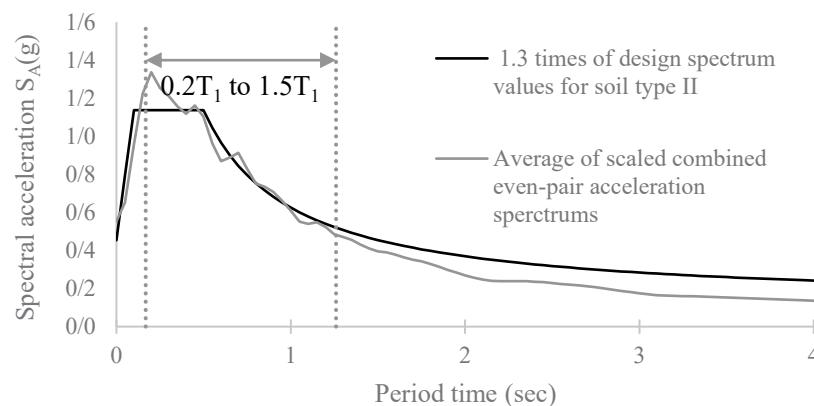


Figure 3. Average combined even-pair horizontal near-fault acceleration spectra following scaling, in comparison with the design spectrum of Iranian Standard 2800 (2013) scaled by a factor of 1.3 for type II soil conditions

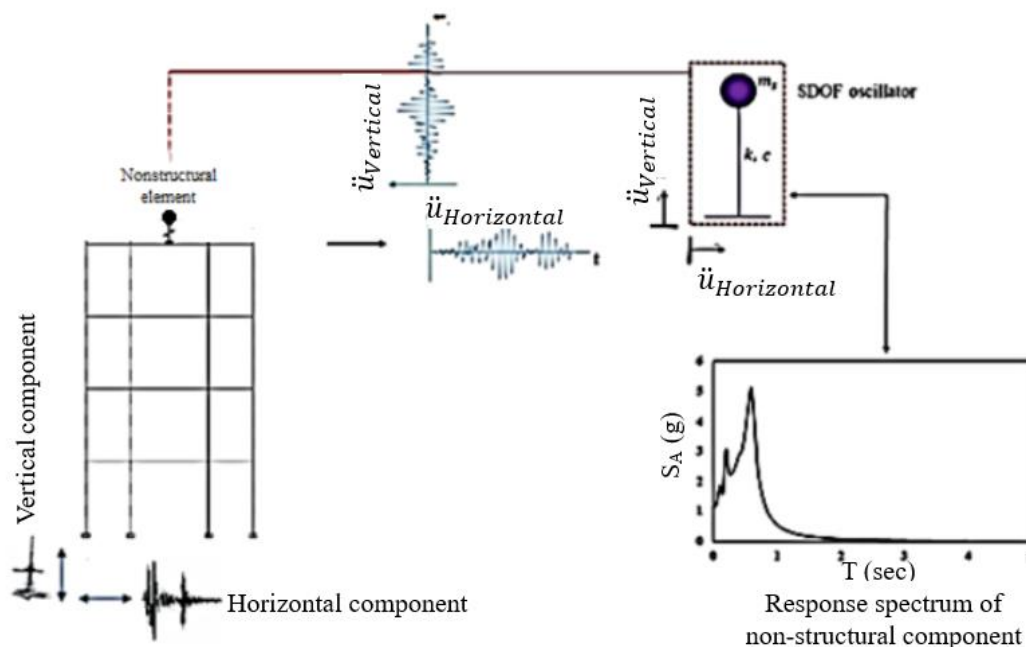


Figure 4. Schematic procedure for extracting the response spectrum of a non-structural component under the influence of horizontal and vertical seismic ground motions (Chalagola et al., 2023)

the structural design, columns are designed using box sections, while beams utilize IPE (wide-flange) profiles. The maximum inter-story drift ratios are found to be very close to the allowable limits specified in the Iranian Standard 2800 (2013). Furthermore, the stress ratios of the structural members under critical load combinations are approximately unity.

The nonlinear behavior of beam and column elements was modeled using concentrated plasticity at the ends of the flexural members within SAP2000 (version 20). The hysteretic behavior of these elements was defined based on the formulations provided in the Iranian National Building Code, Publication 360 (2013). To validate the accuracy of the nonlinear software model, the seismic response of a two-dimensional frame was compared against the benchmark results reported by Thai and Kim (Thai and Kim; 2011) under the 1994 Northridge earthquake record.

“Subsequently, nonlinear time-history analyses (NLTHA) were performed on the three-dimensional models of the target structures, considering both horizontal and vertical components. Eleven ground motion records, encompassing both near-field and far-field regions, were utilized. As detailed in Table 1, these records were selected from the PEER NGA-West2 database based on the following seismic criteria: a moment magnitude (M_w) ranging from 6.0 to 8.0, and fault-to-site distances of less than 15 km for near-field records and greater than 30 km

for far-field records. The selected near-field motions are characterized by significant velocity pulses due to forward directivity, with shear-wave velocities (V_{s30}) at the recording stations ranging from 375 to 750 m/s. Each set of ground motion records was scaled such that the seismic intensity at the structural base matches the target design spectrum for a 475-year return period, in accordance with the Iranian Standard 2800 (2013) for Site Class II. For instance, Figure 3 illustrates the average SRSS (square root of the sum of the squares) response spectrum for the pairs of near-field horizontal ground motions after the application of the scaling factors. As illustrated in the figure, the spectral values within the period range of $0.2 \text{ s} < T < 1.5 \text{ s}$ (encompassing the fundamental period of the four-story structure) exhibit a deviation of less than 10% from 1.3 times the design spectrum of the 4th edition of Iranian Standard 2800 for Site Class II in a very high seismic hazard region. Furthermore, the scaling factors for the vertical components of each ground motion were determined in a manner consistent with the horizontal components, following the established procedures for vertical component scaling to the design spectrum as prescribed in ASCE 7-16 (2022).

To mitigate the uncertainties arising from the selection of specific ground motion records on the research outcomes, statistical analyses were performed. The mean and the Mean $\pm$ SD of the responses were calculated for each group of ground motion records, and the subsequent discussion is based on these statistical parameters.

Table 1. Characteristics of far-field and near-fault ground motion records

Near Fault				Away from Fault			
Earthquake Name (location, year)	Magnitude	R (km) ^a	PGA(g) ^b	Earthquake name (location, year)	Magnitude	R (km) ^a	PGA (g) ^b
Chi-Chi Taiwan (CHY024, 1999)	M (7.6)	9.6	0.28 (H) 0.14 (V)	Chi-Chi Taiwan (HWA045, 1999)	M (7.6)	60.2	0.19 (H) 0.07 (V)
Duzce Turkey (Lamont 1061, 1999)	M (7.1)	11.5	0.13 (H) 0.05 (V)	Duzce (Mudurnu, 1999)	M (7.1)	34.3	0.12 (H) 0.06 (V)
Iwate (IWITH24, 2008)	M (6.9)	3.1	0.52 (H) 0.33 (V)	Hector Mine (Twenty-nine-Palms, 1999)	M (7.1)	42.1	0.07 (H) 0.04 (V)
Kobe Japan (Nishi-Akashi, 1995)	M (6.9)	7.1	0.48 (H) 0.39 (V)	Kern County (Taft-Lincoln School, 1952)	M (7.4)	38.4	0.18 (H) 0.11 (V)
Kocaeli Turkey (Arcelik, 1999)	M (7.5)	10.6	0.21 (H) 0.08 (V)	Kobe Japan (Chihaya, 1995)	M (6.9)	49.9	0.11 (H) 0.08 (V)
Landers (Joshua Tree, 1992)	M (7.3)	11	0.28 (H) 0.18 (V)	Kocaeli Turkey (Mecidiyekoy, 1999)	M (7.5)	51.2	0.07 (H) 0.04 (V)
Loma Prieta (Saratoga, 1989)	M (6.9)	7.6	0.51 (H) 0.39 (V)	Landers (Twenty-nine Palms, 1992)	M (7.3)	41.4	0.06 (H) 0.04 (V)
Montenegro Yugo (Hotel Albatros, 1979)	M (7.1)	1.5	0.23 (H) 0.13 (V)	Loma Prieta (Apeel10–Skyline, 1989)	M (6.9)	41.7	0.09 (H) 0.04 (V)
Northridge-01 (Pacoima Kagel, 1994)	M (6.7)	5.3	0.44 (H) 0.17 (V)	Morgan Hill (San Justo Dam, 1984)	M (6.2)	31.9	0.08 (H) 0.03 (V)
Parkfield-02 CA (Eades, 2004)	M (6)	1.4	0.39 (H) 0.20 (V)	Northridge-01 (Antelope Buttes, 1994)	M (6.7)	46.7	0.07 (H) 0.03 (V)
Tabas Iran (Dayhook, 1978)	M (7.3)	13.9	0.41 (H) 0.19 (V)	San Fernando (Pasadena – CIT, 1971)	M (6.6)	25.5	0.11 (H) 0.10 (V)

a R: Minimum distance to the fault rupture.

b PGA: Peak ground acceleration of the horizontal component (H) and the vertical component (V) from the accelerogram.

Non-structural components and analysis method

In this study, the scope of acceleration-sensitive non-structural components encompassed all elements attached to a structural floor or roof influenced by the acceleration transmitted through the respective diaphragm. To evaluate the force exerted on these non-structural components due to the application of seismic ground motion records to the structures, a linear single-degree-of-freedom (SDOF) model was employed, following the procedure illustrated in Figure 4

Following the procedure illustrated in Figure 4, the horizontal and vertical acceleration time-histories at the floor or roof level—connected to the support of the non-structural component—were extracted from each seismic record applied to the structural support. Subsequently, the acceleration amplification factor at the center of mass of the acceleration-sensitive non-structural component, relative to the input acceleration at its support, was de-

termined using SeismoSignal software (version 4.03). Finally, the maximum force exerted on the non-structural component for each ground motion record, denoted as F_p , was calculated in accordance with Equation 1 of the Iranian Standard 2800 (2013). The mean force across all considered seismic records was then obtained

$$1. F_p = I_p \cdot m_p \cdot a_i \cdot a_p \cdot R_{pu}$$

In this equation, m_p is the mass of the non-structural component, which for the comparative purposes of this study is considered equal to one kilogram, and the force exerted on a non-structural component with a unit weight is examined in the following sections. Also, a_i is the maximum acceleration resulting from the application of each of the seismic records at the floor or ceiling level connected to the non-structural component, whose unit is considered in meters per second squared. a_p is the acceleration magnification factor at the center of mass of the non-

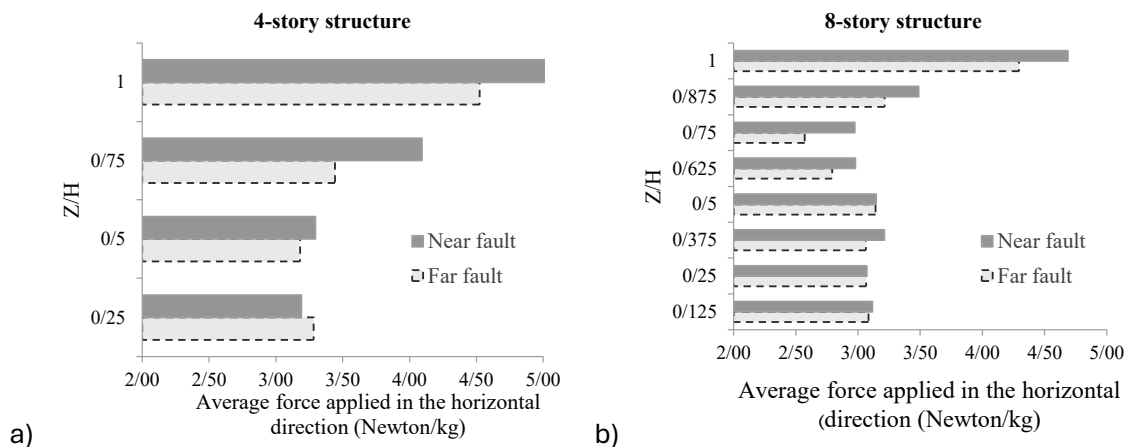


Figure 5. Average horizontal forces exerted on a unit-mass suspended ceiling under far-field and near-fault ground motion suites at various floor levels: (a) 4-story structure, (b) 8-story structure

structural component according to its type and period. I_p and R_{pu} are the importance factor and behavior factor of the non-structural component, respectively, according to the Iranian Standard 2800 (2013). The specifications of specific types of acceleration-sensitive non-structural components, including false ceilings and cooling towers, which are used as case examples in the following sections, are listed below.

Results

Investigation of near-fault effects on the horizontal force applied to the center of mass of acceleration-sensitive non-structural components

In this section, the horizontal lateral force exerted on a suspended ceiling—a prevalent type of non-structural component in buildings—is investigated using various

analytical methods under two distinct seismic scenarios: near-fault and far-field ground motions. Given that the prevention of collapse or damage to the suspended ceiling is essential to ensure the continuous serviceability of the building, an importance factor (I_p) of 4.1 and a response modification factor (R_{pu}) of 5.2 were adopted, in accordance with the Iranian Standard (2013).

To determine the acceleration amplification factor (a_p) under the influence of the selected ground motion records, the procedure illustrated in Figure 4 was adopted. The aforementioned factor was derived from the acceleration response spectrum of each floor level for each category of seismic records. The fundamental period of the suspended ceiling with gypsum boards was set to 0.8 s, based on the experimental details reported by Özçelik et al. (Özçelik et al., 2016). Subsequently, the peak force

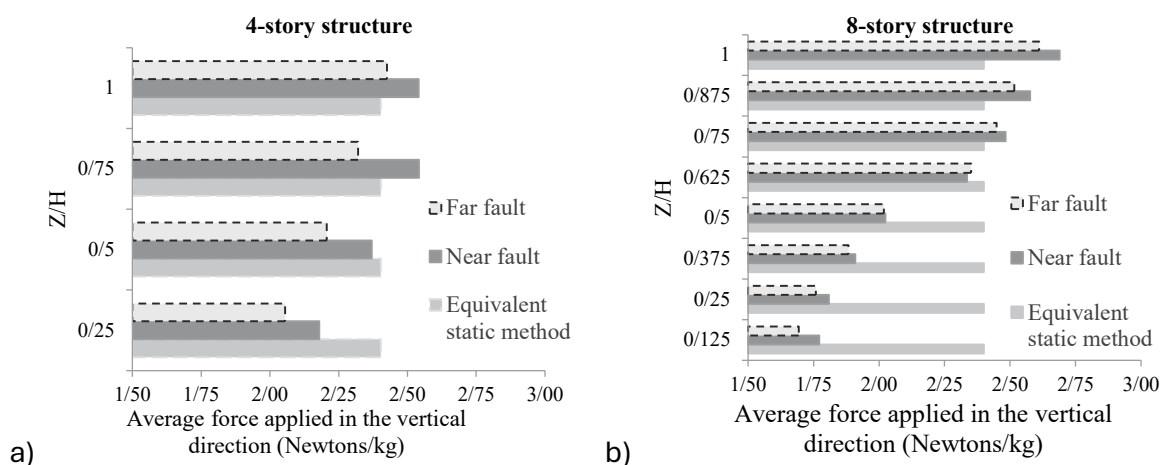


Figure 6. Average vertical forces from far-field and near-fault seismic records on a rigid unit-mass non-structural component across different floor levels: (a) 4-story, (b) 8-story (assuming unit vertical amplification factor)

Table 2. Comparison of horizontal inertial forces on a unit-mass suspended ceiling at different floor levels of a 4-story structure using various analytical methods

Story	Static Method	Dynamic Time-history Analysis Under Near-fault Ground Motion Suites (N)
	(in Newtons)	Mean±SD
1 st	2.9	3.2±3.7
2 nd	3.8	3.3±3.9
3 rd	4.8	4.1±5.1
4 th	5.8	5.2±6.1

acting on a unit mass (1 kg) of the suspended ceiling—equivalent to an area of 0.15 m²—was calculated using Equation 1.

To calculate the acceleration magnification factor a_p , under the effect of the desired records, the process shown in Figure 4 was used and the aforementioned factor was obtained through the acceleration response spectrum of each floor under the effect of each seismic record of each category. The periodic time of the first mode of the false ceiling with gypsum boards was extracted as 0.08 seconds based on the implementation details of the laboratory study by Özçelik et al. (2016). Then, the maximum force applied to a part of the false ceiling with a mass of one kilogram, equivalent to the mass of an area equal to 0.15 m² of the desired false ceiling, was calculated through Equation 1.

The average peak horizontal forces exerted on the suspended ceiling, resulting from the application of far-field and near-fault ground motion suites, are presented in Figure 5 for cases where the components are attached to the structural floor levels from the first to the top story. In this figure, H denotes the total building height, and Z represents the elevation of the non-structural component's location. As illustrated in the plots of Figure 5, the influence of near-fault effects on the amplification of horizontal forces applied to the non-structural components was significantly more pronounced in the upper half of the buildings compared to the lower half. The maximum increments were observed in the third story of the four-story building (19%) and in the sixth story of the eight-story building (16%)

It should be noted that the analytical formulas provided in the fourth edition of the Iranian Standard (2013) for estimating horizontal forces on non-structural components employ an equivalent static analysis method, which assumes a linear distribution profile increasing with height based on the Z/H ratio. An examination of the plots in Fig-

ure 5, which were derived via the nonlinear time-history analysis (NTHA) method, revealed that for the low-rise structure (4 stories), the distribution of horizontal forces closely followed the linear trend prescribed by the Iranian Standard. However, in the mid-rise structure (8 stories), a distinct discrepancy was observed: the horizontal force remained nearly constant from the first to the sixth stories, followed by a sharp increase in the upper stories under both far-field and near-fault ground motion suites. This behavior deviated significantly from the linear distribution profile mandated by the code.

Table 2 presents the mean and the Mean±SD values of the horizontal inertial forces acting on the suspended ceiling of the 4-story structure under various near-fault ground motion suites. The second column of this table provides the inertial force calculated using the simplified linear static method as prescribed by the Iranian Standard (2013) for comparative purposes. Since both analytical approaches are based on the same design earthquake hazard level, this comparison facilitates an assessment of the conservatism of the simplified code-based method relative to more realistic dynamic analysis approaches. As indicated in the table, the mean inertial force derived from the ground motion suites was lower than the value predicted by the simplified code-based equations. This suggests that, when considering mean values, the simplified code-based approach provides a conservative estimate compared to the more accurate dynamic analysis. However, when a more pessimistic scenario—defined by the mean-plus-standard-deviation—was employed, the code-based force for near-fault ground motions became non-conservative. Given this finding, it is imperative to account for these discrepancies in the seismic design of non-structural components for high- and extremely important structures located in near-fault regions to ensure uninterrupted serviceability.

Investigation of near-fault effects on the vertical forces acting on the center of mass of acceleration-sensitive non-structural components

To estimate the probability of overturning, uplift, and falling in acceleration-sensitive non-structural components, it is necessary to evaluate the vertical forces acting perpendicular to the floor or ceiling levels, in addition to the horizontal inertial forces, as illustrated in [Figure 1](#). This consideration becomes increasingly critical when the non-structural element is positioned in locations sensitive to vertical motion, such as the mid-span of long beams or on cantilevered beams.

In this section, the vertical forces exerted on the non-structural component at various floor levels are extracted under each ground motion record, assuming the component is located at the mid-span of a 7-m long beam ([Figure 2](#)). The results are categorized into far-field and near-fault suites and averaged accordingly. To this end, the assumption of full component rigidity and purely elastic vertical behavior—corresponding to $a_p=1$ and $R_{pu}=1$ —was adopted, following the approach prescribed in seismic codes, such as Iranian Standard 2800 (2013). It should be noted that a more refined method for accounting for partial vertical flexibility in certain types of non-structural components is investigated in the subsequent section.

[Figure 6](#) illustrates the mean vertical forces exerted on a unit-weight non-structural component at various floor levels under both far-field and near-fault seismic scenarios. The impact of near-fault ground motions on the non-structural component is significantly more pronounced in the 4-story structure than in the 8-story structure. This can be attributed to the proximity between the fundamental vertical natural frequency of the low-rise structure and the dominant frequency content of the vertical seismic component. The maximum increase in vertical force was observed at the third floor of the 4-story structure, amounting to 10%.

Furthermore, the vertical forces acting on the non-structural components at various heights were calculated using the equivalent static method in accordance with Iranian

Standard 2800 (2019), as illustrated in [Figure 6](#). The forces estimated via this method remained constant across all floor levels and were independent of the component's vertical position. A comparison between the dynamic time-history distribution and the simplified static distribution ([Figure 6](#)) revealed that the vertical force distribution in the 4-story structure closely followed the constant distribution of the simplified static approach. However, in the upper stories of both the low-rise and mid-rise structures, the mean vertical forces obtained through nonlinear time-history analysis under near-fault seismic records exhibited higher values compared to those predicted by the proposed code-based simplified method.

Investigation of the influence of non-structural component period on the acceleration amplification factor at the center of mass

The magnitude of acceleration amplification (resonance) at the center of mass of non-structural components, relative to the input acceleration at its floor-based connection point, is fundamentally dependent on the component's natural period and damping ratio. This section investigates the horizontal and vertical acceleration amplification factors for acceleration-sensitive non-structural components across a range of natural periods. Given that the natural periods of most non-structural components typically fall within the 0 to 0.5 s range, with damping ratios below 5% ([Gerontati & Vamvatsikos, 2025](#)), the variations in both horizontal and vertical acceleration amplification factors were examined within this specific interval.

To this end, the mean horizontal acceleration amplification factor spectra, generated for the non-structural components under all seismic records applied to the 4-story and 8-story structures, were extracted. [Figure 7a](#) presents the aforementioned spectra assuming the non-structural component is located at every floor level of the 4-story structure. For the 8-story structure, the spectra are specifically shown for the first, fourth, sixth, and top floors in [Figure 7b](#). As illustrated in these plots, the placement of the non-structural component in the lower half of the structure has a more pronounced effect on increasing the

Table 3. Horizontal periods of selected non-structural components (ASCE 7-22, 2022)

$T_p \leq 0.06$ sec	Rigid NSCs, e.g. generators
$0.06 < T_p < 0.15$ sec	Mechanical NSCs (e.g., pumps, generators, air compressors, heaters, and boilers)
$0.06 < T_p < 0.3$ sec	Electrical utility racks
$0.1 < T_p < 0.2$ sec	Electrical non-structural components

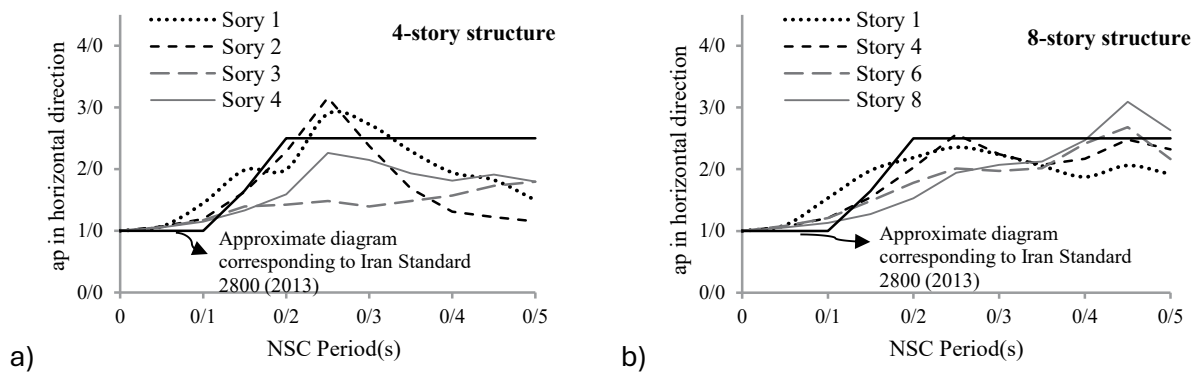


Figure 7. Mean spectrum of the horizontal acceleration amplification factor at the center of mass of the NSC period (s) with 5% damping under all seismic records across various floor levels: (a) 4-story, (b) 8-story structures

horizontal acceleration amplification factor at the component's center of mass

Since determining the natural periods of non-structural components requires extensive laboratory testing, most seismic codes, including Iran's Standard 2800 (2013), provide the horizontal acceleration amplification factor (a_p) based on component type instead of period. For this reason, an exact code-based curve for a_p versus period is unavailable, and Figure 6 presents an approximate plot. This approximation was extracted from experimental research on non-structural component periods, following the data presented in Table 3 of the ASCE 7-22 Commentary (2022). The plot shows that for non-rigid components with periods greater than 1.0 s, locating them in the lower levels leads to mean horizontal amplification factors that are higher than the code-recommended values.

Furthermore, in the 8-story structure, locating non-structural components with periods exceeding 4.0 s at the roof level resulted in horizontal acceleration amplification factors that surpassed the values prescribed by seismic

codes. This may lead to a non-conservative estimation of inertial forces when using the equivalent static method for flexible, soft-behavior non-structural components at the roof level of mid-rise structures, under both far-field and near-fault ground motion regimes. Notably, reducing the non-structural component damping ratio from 5% to 2% yielded a 40% increase in the amplification factor across all natural periods. This significant escalation led to a substantial increase in the inertial forces acting on low-damping, acceleration-sensitive components.

Subsequently, the vertical acceleration amplification factor at the center of mass of non-structural components with vertical periods shorter than 0.5 s—placed on long-span floors across various levels of the 4- and 8-story structures—was investigated. As illustrated in Figure 8, the floor level had a negligible effect on the vertical acceleration amplification factor. According to most seismic codes, such as the Iranian Standard 2800 (2013), the vertical amplification factor is assumed to be unity for all non-structural components, regardless of their type or natural period, which is represented by a constant line in Figure

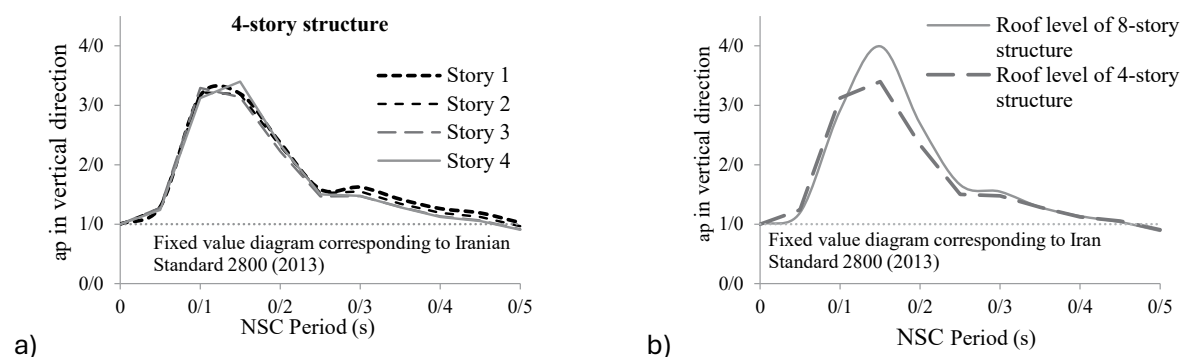


Figure 8. Mean vertical acceleration amplification spectrum at the center of mass of a non-structural component with 5% damping under all seismic records: (a) across various floor levels of a 4-story structure, (b) at the roof level of 4- and 8-story structures

8. However, for flexible non-structural components with vertical periods between 0.05 s and 0.35 s, the mean vertical amplification factor can reach up to 3 and 4 times the code-recommended values for the 4- and 8-story structures, respectively. This substantial discrepancy suggests that the equivalent static analysis method may lead to non-conservative seismic designs for these components.

For instance, the natural vertical period of a cooling tower was considered as 0.21 s when empty and 0.22 s when full, based on the experimental study by [Strozzi et al. \(2015\)](#). Its damping ratio was taken as 4%, and its weight when full was 27.9 kN. Assuming this cooling tower is installed on the roof of the studied structures, which are designated for high-importance usage, the vertical inertial force acting on the full cooling tower was calculated using time-history analysis. To this end, the vertical acceleration amplification factor corresponding to the full cooling tower's natural period, as depicted in [Figure 8](#), was employed. The mean vertical inertial force on the cooling tower installed on the roof of the 4-story and 8-story structures were found to be 13 kN and 15.3 kN, respectively, within the near-fault scenario. This is in contrast to the code-based equivalent static analysis method, which estimates this force as 6.8 kN for both structural configurations, predicated on the assumption of the non-structural component's complete vertical rigidity. Consequently, the non-conservative estimation of the vertical force for the aforementioned cooling tower using the conventional code-based method is evident.

The enhanced implementation and dissemination of the supplementary provisions of the draft of the fifth edition of Iran's Standard 2800 (2024)—specifically, the inclusion of nonlinear time-history analysis as a method for assessing non-structural components, and the clarification on selecting and applying seismic ground motions at near-fault sites—can significantly mitigate the seismic risk of critical facilities, such as hospitals and emergency response centers, against potential future earthquakes and their subsequent aftershocks.

Discussion

This research investigated the factors influencing seismic inertial forces on acceleration-sensitive non-structural components located at the floor or attached to the ceiling of steel moment-resisting frame buildings with moderate ductility. The seismic performance of two example structures—a low-rise (4-story) and a mid-rise (8-story) building—was analyzed using nonlinear time-history analysis. The structures were subjected to a simultaneous application of horizontal and vertical components of two

sets of ground motion records: near-fault and far-fault (11 records in each set). Subsequently, the forces acting on acceleration-sensitive non-structural components with periods less than 0.5 s were extracted using two methods: direct application of ground motion records and the simplified equivalent static analysis method, considering the design-level earthquake hazard. The results obtained are summarized as follows:

The amplification effects associated with near-fault ground motions on the horizontal inertial forces acting on non-structural components were observed to be more pronounced when the components were located in the upper half of the building height compared with those positioned in the lower half of the studied structures. The maximum increase, amounting to 19%, occurred at the third floor of the 4-story structure, where the estimated force under near-fault earthquakes exceeded that obtained under far-fault conditions.

Analysis of the vertical distribution of horizontal forces acting on non-structural components along the height of the studied buildings, based on nonlinear time-history analysis, indicated that the force distribution pattern in the low-rise structure (4 stories) is generally consistent with the linear distribution proposed in the equivalent static analysis procedure of the Iranian Standard 2800 (2013). However, in the mid-rise structure (8 stories), an approximately uniform force distribution from the first to the sixth floors, followed by a sharp increase in the upper stories, was observed under both near-fault and far-fault ground motion records. This trend deviates from the current code-prescribed linear distribution.

The floor level at which a non-structural component is located has a significant impact on its horizontal acceleration amplification factor, particularly for components exhibiting flexible behavior with natural periods exceeding 1.0 s. Consequently, the conventional approach adopted by many engineering firms—which involves providing uniform connection details for acceleration-sensitive non-structural components regardless of their floor level—may lead to critical failure modes, such as rocking, sliding, overturning, or complete detachment of the components.

Analysis of the vertical inertial forces using dynamic analysis indicated that the effects of near-fault ground motions on non-structural components installed at all floor levels are more pronounced in the 4-story structure than in the 8-story structure. This may be attributed to the proximity of the vertical natural frequency of the low-rise structure to the dominant frequency content of the verti-



cal seismic component. Furthermore, in the upper half of both the low-rise and mid-rise structures, the mean vertical force obtained via nonlinear time-history analysis under near-fault records was higher than the values predicted by the simplified equivalent static analysis method.

Conclusion

Analysis of the vertical acceleration amplification factor at the center of mass of the non-structural components demonstrated the necessity of considering the vertical natural periods of these components. For flexible non-structural components with vertical periods ranging from 0.05 s to 0.35 s, the mean amplification factor increased by factors of 3 and 4, respectively, compared to the code-prescribed values for the 4-story and 8-story structures. This discrepancy indicates that the current seismic design for the vertical direction of such components, when utilizing the simplified equivalent static analysis method, may be non-conservative.

Limitations

This study is limited to the seismic behavior of acceleration-sensitive non-structural components within regular plan and height structures featuring steel moment-resisting frames, specifically low-rise (4-story) and mid-rise (8-story) configurations. The analysis was conducted on firm soil sites (type II) without the presence of near-fault effects (fault rupture) directly beneath the structure. To generalize these findings, future research should investigate a broader spectrum of structural systems across various soil conditions, utilizing a wider range of ground motion records with diverse frequency contents and different seismic hazard levels.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were considered throughout this study, and informed consent was obtained from all participants prior to their participation. Since no experiments were conducted on animal or human samples, no ethical code was required.

Funding

This article was extracted from a master's thesis in Civil Engineering (Earthquake) at the Department of Civil Engineering, [West Tehran Branch, Islamic Azad University](#), Tehran, Iran. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.



مقاله پژوهشی

ملاحظات در طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب در سازه‌های کوتاه و میان مرتبه قاب خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل

محبوبه پیری‌زاده^۱

۱. گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Use your device to scan
and read the article onlineCitation Pirizadeh, P. (2026). Seismic Design Considerations for Acceleration-sensitive Non-structural Components. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 16(1):36-61. <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.210.4>doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.16.1.210.4>

حکیده

زمینه و هدف: یکی از موارد حائز اهمیت در کاهش تلفات و صدمات انسانی و اقتصادی در شهرهای لرزه‌خیز، امکان‌پذیری و تداوم بهره‌برداری و خدمات‌رسانی ساختمان‌های با کاربری‌های مهم بعد از زلزله‌های محتمل می‌باشد که برای این منظور، حفظ و تأمین عملکرد اجزای غیرسازه‌ای منصوب در ساختمان و جلوگیری از آسیب، سقوط و فروریزش این اجزاء علاوه بر حفظ عملکرد مناسب اجزای سازه‌ای ضروری می‌باشد.

روش: در این پژوهش، با لحاظ نمودن اثر هم‌زمان مؤلفه افقی و قائم ۲ دسته ۱۱ عددی از شتابنگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل، به بررسی نیروی اینرسی وارده به جزء غیرسازه‌ای با در نظر گرفتن محل نصب آن در طبقات مختلف ساختمان پرداخته شده است. دو نمونه سازه فولادی منظم با سیستم باربر جانبی قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط در دو ارتفاع ۴ و ۸ طبقه واقع در ساختمان خاک سخت تحت اثر تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته است. گستره اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب در این تحقیق، شامل کلیه اجزای متصل به یکی از کف‌ها یا سقف‌های سازه‌ای با زمان تناوب‌های کمتر از ۰/۵ ثانیه می‌باشد که از شتاب ایجادشده در دیافراگم مربوطه تأثیر می‌پذیرند. دو زیرگروه از اجزای غیرسازه‌ای شامل سقف کاذب و برج خنک‌کننده چیلر به‌عنوان نمونه موردی با مدل یک درجه آزادی بررسی شده است.

یافته‌ها: با بررسی اثرات حوزه نزدیک گسل بر سازه‌های مورد مطالعه، به‌ترتیب افزایش تا سقف ۱۹ درصد و تا سقف ۱۰ درصد در نیروی اینرسی افقی و عمودی وارده به مرکز جرم اجزای غیرسازه‌ای واقع در طبقات مختلف به‌خصوص در طبقات نزدیک بام مشاهده شده است. اثرات افزایشی مذکور در سازه کوتاه‌مرتبه نسبت به سازه میان‌مرتبه بارزتر بوده است که می‌تواند ناشی از نزدیک بودن زمان تناوب کوتاه اجزای غیرسازه‌ای به فرکانس طبیعی سازه کوتاه‌مرتبه و محتوای فرکانسی رکوردهای نزدیک گسل باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج بررسی ضریب بزرگ‌نمایی شتاب راستای قائم در مرکز جرم اجزای غیرسازه‌ای نشان داد توجه به زمان تناوب مد عمودی این اجزاء در طراحی لرزه‌ای آن‌ها ضرورت دارد؛ برای نمونه، متوسط ضریب مذکور برای یکی از انواع برج خنک‌کننده با زمان تناوب مد قائم ۰/۲۲ ثانیه، منصوب‌شده بر روی بام سازه‌های مورد مطالعه به مقداری بین ۲ تا ۳ برابر مقدار الزام‌شده آیین‌نامه‌ای نزدیک شده است.

کلیدواژه‌ها: اجزای غیرسازه‌ای، حوزه نزدیک گسل، ضریب بزرگ‌نمایی (تشدید) شتاب، نیروی اینرسی

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۰۲ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۲ مهر ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۵

* نویسنده مسئول:

دکتر محبوبه پیری‌زاده

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، گروه مهندسی عمران.

تلفن: +۹۸ (۲۱) ۸۸۳۸۵۷۷۶

پست الکترونیکی: pirizadeh@iau.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode/en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

اجزای غیرسازه‌ای شامل اجزای معماری، تجهیزات داخلی، تأسیسات برقی و مکانیکی، بخش قابل توجهی از سرمایه‌گذاری در ساختمان‌های موجود را تشکیل می‌دهند و حفظ عملکرد آن‌ها بعد از وقوع زلزله‌های محتمل هم از جنبه حفظ سرمایه در عموم ساختمان‌ها و هم از جنبه خدمت‌رسانی در ساختمان‌های امدادی و مهم از اهمیت زیادی برخوردار است. این اجزاء به سازه اصلی متکی هستند اما در تحمل بار جانبی زلزله به آن کمکی نکرده بلکه از تغییر شکل و شتاب لرزه‌ای ایجاد شده در سازه اصلی تأثیر می‌پذیرند.

باتوجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در دهه‌های اخیر در طراحی عملکردی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، رویکرد ویرایش‌های جدیدتر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای به طراحی عملکردی اجزای غیرسازه‌ای به‌خصوص بعد از تجربه‌های حاصل از زلزله‌های بزرگ معطوف شده است. برای نمونه، بعد از تجربه زلزله‌هایی نظیر بم (۱۳۸۲) و زرنند کرمان (۱۳۸۳)، بروجرد و درود (۱۳۸۵) و اهر-ورزقان (۱۳۹۱)، الزام به طراحی اجزای غیرسازه‌ای در ساختمان‌های با اهمیت بسیار زیاد و زیاد با هر تعداد طبقه و همچنین ساختمان‌های با اهمیت متوسط با تعداد طبقات بیش از ۸ طبقه به ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) اضافه گردید. بعد از تجربه خسارات زلزله سرپل ذهاب- کرمانشاه (۱۳۹۶)، پیوست لازم‌الاجرای جدیدی تحت عنوان طراحی لرزه‌ای و اجرای اجزای غیرسازه‌ای معماری به ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) الحاق گردید که رویکرد آن، ارائه جزئیات اجرایی برای مهار اجزای معماری نظیر دیوار داخلی و خارجی، نما، اجزای راه‌پله و سقف کاذب بوده است. در پیش‌نویس ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۴۰۳) نیز رویکرد تدقیق روابط طراحی اجزای غیرسازه‌ای و تکیه‌گاه اتصال‌دهنده آن‌ها به‌خصوص برای سازه‌های خاص و همچنین افزایش دامنه اجزای غیرسازه‌ای مکانیکی و برقی که مشمول طراحی ویژه هستند، پیشنهاد شده که در حال طی مراحل تصویب و ابلاغ است.

صرف‌نظر از نوع کارکرد اجزای غیرسازه‌ای در خدمت‌رسانی ساختمان، رفتار لرزه‌ای این اجزاء بنابر موقعیت قرارگیری و نحوه اتصال آن‌ها به سازه به سه دسته شامل رفتار حساس به شتاب، حساس به تغییر شکل و یا حساس به هر دو تقسیم‌بندی می‌شود. تمرکز این پژوهش بر طراحی لرزه‌ای اجزای حساس به شتاب می‌باشد که به کف یا سقف سازه‌ای تکیه یا اتصال دارند و از نیروهای اینرسی ایجاد شده ناشی از زلزله در تراز موردنظر اثر می‌پذیرند و لذا خسارات وارده بر آن‌ها ناشی از میزان و جهت اثر این نیروها می‌باشد. برای محاسبه نیروی اینرسی برشی وارده بر این اجزاء در اثر اعمال نیروی افقی زلزله، معمولاً سه پارامتر شامل وزن، ضریب بزرگ‌نمایی (تشدید) شتاب کف

طبقات نسبت به شتاب ورودی به تکیه‌گاه سازه (ضریب PFA)^۱ و ضریب بزرگ‌نمایی (تشدید) شتاب جزء غیرسازه‌ای نسبت به شتاب کف طبقه (ضریب ap)^۲ تأثیرگذار است. نیروی موردنظر براساس ضوابط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مختلف، به یکی از روش‌های ساده‌شده تحلیل استاتیکی معادل یا روش دینامیکی قابل محاسبه بوده و الزام به کنترل لغزش، واژگونی و سقوط جزء غیرسازه‌ای تحت این نیرو، در ساختمان‌هایی با شرایط خاص انجام شده است. علاوه بر این، اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مقرر می‌کنند که مؤلفه قائم نیروی زلزله باید هم‌زمان با نیروی جانبی افقی به جزء غیرسازه‌ای اثر داده شود که میزان آن بستگی به وزن و ضریب اهمیت جزء غیرسازه‌ای دارد. موقعیت نصب جزء غیرسازه‌ای و ضریب بزرگ‌نمایی شتاب قائم در کف طبقات در روابط پیشنهادی برای محاسبه نیروی عمودی وارده به این اجزاء در آیین‌نامه‌هایی نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) لحاظ نشده است.

ازسوی دیگر، در روش‌های تحلیل لرزه‌ای معرفی شده برای طراحی اجزای غیرسازه‌ای در ویرایش فعلی استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲)، به روش تحلیل تاریخچه زمانی با استفاده مستقیم از شتابنگاشت‌های لرزه‌ای متناسب با ساختگاه‌های نزدیک گسل برای اندرکنش هم‌زمان سازه و جزء غیرسازه‌ای اشاره نشده است. این در حالی است که در ساختمان‌های واقع در مناطق نزدیک گسل، امکان انتشار شکست گسل به سمت ساختگاه سازه با سرعت بسیار زیاد و ورود بخش قابل توجهی از انرژی به سازه و متعاقب آن به اجزای غیرسازه‌ای در زمان بسیار کوتاه ابتدایی رخداد رکورد لرزه‌ای امری محتمل است. این موضوع باعث ایجاد نیروهایی با ماهیت ضربه‌ای تحت اثر پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده^۳ و تشدید آسیب و خسارات نسبت به ساختمان‌های مشابه در مناطق دور از گسل می‌گردد (زای^۴ و همکاران، ۲۰۱۶م).

باتوجه به قرارگیری اکثر کلان‌شهرهای پرتراکم کشور در مناطق نزدیک گسل، احصای برخی ملاحظات ویژه در طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای در ساختمان‌هایی با کاربری مهم نظیر مراکز درمانی و امدادی با هدف کاهش خسارات و حفظ خدمت‌رسانی بی‌وقفه در زمان زلزله‌های با شدت زلزله طرح موردتوجه این تحقیق قرار گرفته است و به بررسی برخی کمبودها در حوزه الزامات آیین‌نامه‌ای طراحی اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب براساس ویرایش فعلی استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) پرداخته شده است.

1. Peak floor acceleration factor
2. Component amplification factor
3. Forward Directivity
4. Zhai



پیشینه پژوهش

ویژگی‌های خاص زلزله‌های ثبت شده در حوزه نزدیک گسل و اثرات مخرب آن بر سازه‌های واقع در محدوده نزدیک گسل، از دهه پنجاه قرن بیستم مورد توجه محققانی نظیر هاوزنر و هادسون^۵ قرار گرفته است. براساس تجربه آسیب‌های ثبت شده از زلزله پورت-هیونم^۶ کالیفرنیا در سال ۱۹۵۷ میلادی با بزرگای ۴/۷ ریشتر، به موضوعاتی نظیر انتشار گسلش به سمت ساختمان سازه و عدم فرصت کافی برای میراشدن انرژی در فاصله بین شکست گسل تا سازه پرداخته شده و به اثرات تخریبی این پدیده حتی در اثر وقوع زلزله‌های با بزرگای متوسط اشاره شده است (هاوزنر و هادسون، ۱۹۵۸م)؛^۷ لکن اوج تکمیل تحقیقات در این زمینه، مربوط به بعد از زلزله‌های نورث ریج در سال ۱۹۹۴م. و زلزله کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵م. می‌باشد که مصادف با افزایش جمعیت در کلان‌شهرهای واقع در نواحی نزدیک گسل و همچنین ارتقای زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری ثبت داده‌های شتابنگاری در این نواحی بوده است (لی و شی^۸، ۲۰۰۷م).

براساس تعریف برخی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نظیر ASCE7-22 (۲۰۲۲م)، مناطق نزدیک گسل به مناطقی اطلاق می‌گردد که با فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر نسبت به گسل‌هایی که قابلیت ایجاد زلزله‌های بیشینه با بزرگای گشتاوری ۷ ریشتر و بالاتر و یا با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر برای گسل‌هایی با قابلیت ایجاد زلزله‌های بیشینه با بزرگای گشتاوری ۶ ریشتر و بالاتر قفرار داشته باشند. به همین لحاظ، وسعت قابل توجهی از شهرهای لرزه‌خیز و بعضاً کل مساحت برخی کلان‌شهرهای کشور جزء این محدوده محسوب می‌شود. عمده توجه ضوابط شهرسازی در دهه‌های اخیر، به محدوده بلافاصل خط گسل و پهنه‌های گسلش سطحی که بخش بسیار محدودتری از مناطق نزدیک گسل را تشکیل می‌دهد معطوف شده است و ارائه ضوابط محدودکننده از تمرکز جمعیت در این محدوده در پهنه‌بندی طرح‌های تفصیلی (میرمقتدایی و همکاران، ۱۴۰۲) و تأثیر آن بر مکان‌یابی مناسب برای زیرساخت‌های مهم و خدمت‌رسان در زمان بحران زلزله‌های محتمل مورد توجه قرار گرفته است (خیلدار و سموئی، ۱۴۰۱).

خصوصیات زمین‌لرزه‌ها در محدوده نزدیک گسل معمولاً تحت تأثیر سه عامل شامل سازوکار شکست گسل، جهت انتشار شکست در گسل نسبت به ساختمان سازه (پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده و اثرات فرادیواره^۹) و تغییر مکان‌های دائمی ناشی از لغزش گسل می‌باشد. بررسی بر روی خصوصیات پالس با زمان تناوب بلند در ابتدای رکورد سرعت و شتاب لرزه‌ای در مؤلفه

عمود بر گسل که در بخشی از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های شتابنگاری واقع در فواصل نزدیک به گسل زلزله‌های مختلف مشاهده شده مورد توجه محققان در دو دهه‌ی اخیر بوده است (گوموش^{۱۰} و دیوروکان، ۲۰۲۲م).

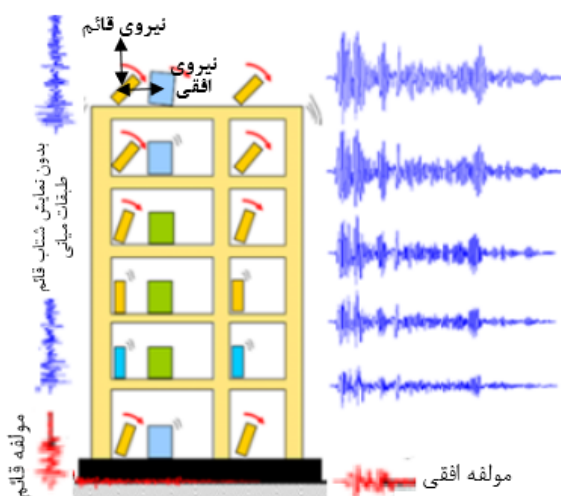
بررسی اثرات ضربه‌ای ناشی از این پدیده بر سیستم‌های باربر سازه‌ای با استفاده از روش‌های تحلیل دقیقی نظیر تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی تحت اثر شتابنگاشت‌های لرزه‌ای ثبت شده در نواحی نزدیک گسل به ابلاغ ضوابط خاص در ویرایش‌های جدیدتر اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای کشورهای لرزه‌خیز منجر شده است؛ لکن تحقیقات در خصوص تأثیر این پدیده بر عملکرد اجزای غیرسازه‌ای واقع در ساختمان‌های حوزه نزدیک گسل به صورت محدودتر و با تأخیر بیشتری مورد توجه قرار گرفته است (ژای و همکاران، ۲۰۱۶م).

ازسوی دیگر، حرکت عمودی زمین در مناطق نزدیک گسل دارای نسبت بیشتری از محتوای طیفی باند باریک در فرکانس‌های بالا نسبت به حرکت افقی زمین است (آقایی آرای و همکاران، ۱۳۹۸) و در زمان تناوب‌های کوتاه، نسبت شتاب پیک مؤلفه قائم به مؤلفه افقی در زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل بیشتر از زمین‌لرزه‌های حوزه دور از گسل و بیشتر از مقدار متداول در اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای یعنی ضریب دوسوم یا ۰/۶ می‌باشد (شهبازی و همکاران، ۲۰۱۹م). این موضوع، در طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای که عموماً زمان تناوب‌های کوتاه دارند می‌تواند تأثیرگذار باشد. براساس تحقیقات گرم^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۹م)، نسبت حداکثر شتاب قائم کف طبقه به پیک شتاب قائم زلزله ورودی، به سختی جهت قائم سازه برابر بستگی دارد و بنابراین، خطای ناشی از فرض رفتار صلب در جهت عمودی برای سازه و جزء غیرسازه‌ای متصل به کف طبقات قابل تأمل است.

در مطالعات محدودی که به روش آزمایشگاهی و انجام تست میز لرزه به بررسی اندرکنش رفتار سازه و جزء غیرسازه‌ای پرداخته شده، عمدتاً مؤلفه افقی زلزله بدون در نظر گرفتن اثرات حوزه نزدیک گسل مورد توجه قرار گرفته است. نتایج یک نمونه از این تحقیقات که استروزا^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۵م) بر روی پاسخ لرزه‌ای برج خنک‌کننده واقع در بام ساختمان پنج طبقه بتنی در مقیاس واقعی انجام دادند، حاکی از این بوده است که تأثیر رفتار غیرخطی و زمان تناوب سازه بر میزان ضریب بزرگنمایی شتاب برج خنک‌کننده به عنوان جزء غیرسازه‌ای قابل توجه می‌باشد. در این تحقیق، به محافظه‌کارانه نبودن برخی ضرایب بزرگنمایی شتاب مربوط به اجزای غیرسازه‌ای از نوع تأسیسات مکانیکی در آیین‌نامه لرزه‌ای متداول اشاره شده است. در تحقیقات تکمیلی در این زمینه، به اثرات هم‌زمانی ارتعاش اجزای غیرسازه‌ای دارای

5. Housner & Hudson
6. Port Hueneme
7. Li & Xie
8. Hanging-wall effects

9. Gümüş & Durucan
10. Gremer
11. Astroza



تصویر ۱. شکل شماتیک از استخراج شتاب کف طبقات به عنوان عامل ایجاد نیرو در مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای

برای نیل به اهداف مقایسه‌ای تحقیق، سطح خطر نیروی زلزله در هر دو روش مذکور متناظر با زلزله طرح با دوره بازگشت ۴۷۵ سال در مناطق با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد کشور لحاظ شده است.

مطابق با تصویر شماره ۱، نیروی اینرسی ایجادشده در اثر زلزله در اجزای غیرسازه‌ای در هر دو جهت افقی و قائم در شرایط قرارگیری آن‌ها در طبقات مختلف مورد توجه این تحقیق می‌باشد. با در نظر گرفتن شرایط واقعی رخداد زلزله، اثرات اعمال هم‌زمان مؤلفه افقی و قائم شتابنگاشت‌های لرزه‌ای در تحلیل‌های مورد نظر لحاظ شده است؛ لکن بحث بر روی نتایج به صورت جداگانه ارائه شده است.

معرفی سازه‌های مورد مطالعه و روش تحلیل

سازه‌های مورد مطالعه در دو دسته کوتاه‌مرتبه (۴ طبقه) و میان‌مرتبه (۸ طبقه) واقع در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد در ساختگاه خاک نوع II مطابق ضوابط لرزه‌ای کشور ایران طراحی شده است. پلان سازه‌های مورد بررسی، مطابق تصویر شماره ۲، به صورت پلان منظم و دارای دهانه‌های کوتاه (۴ متر) و بلند (۷ متر) بوده و ارتفاع سقف طبقات ۳/۲ متر می‌باشد. سیستم باربر جانبی سازه‌ای از نوع قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط در هر دو راستای X و Y با سیستم سقف صلب لحاظ شده است. مقاطع ستون‌ها از نوع قوطی (باکس)^{۱۶} و تیرها از نوع I شکل بال پهن^{۱۷} به نحوی طراحی شده که بهینه بودن اقتصادی طراحی سازه‌ها احصا شود. بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات بسیار نزدیک به مقدار مجاز استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) بوده و نسبت تنش در اعضا در ترکیب بار بحرانی نزدیک به ۱ لحاظ شده است.

موتور در حالت روشن در زمان وقوع زلزله در ساختمان‌هایی با کاربری خدمت‌رسان در زمان زلزله به روش تحلیلی پرداخته شده است (پیری‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴م).

مطالعه آزمایشگاهی دیگری که به صورت بزرگ‌مقیاس بر روی سازه چهار طبقه فولادی با تکیه‌گاه گیردار و جزء غیرسازه‌ای از نوع پوشش نما بر روی میز لرزه در دو حالت شامل اعمال مؤلفه افقی و اعمال هم‌زمان مؤلفه افقی و قائم شتابنگاشت لرزه‌ای انجام شده است، بر لزوم توجه به اثرات چندمؤلفه‌ای نیروی زلزله در طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب و تغییر مکان در توسعه روابط آیین‌نامه‌ای این حوزه تأکید داشته است (لیم و همکاران، ۲۰۱۷م).

رویکرد بخش دیگری از تحقیقات این حوزه نظیر مطالعات فیلپاترالت^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۸م) نیز بر توسعه استفاده از روش‌های ارزیابی عملکردی اجزای غیرسازه‌ای با استفاده از رویکرد طراحی براساس تغییرمکان به جای روش‌های نیرویی و توجه به ارزیابی عملکرد در قالب دوره عمر این اجزاء (احمد و همکاران، ۲۰۲۴م) بوده است. توسعه منحنی‌های شکنندگی برای عملکرد این اجزاء براساس بررسی داده‌های ثبت‌شده از سیستم پایش سلامت سازه‌ای^{۱۳} در زلزله‌هایی نظیر زلزله سال ۲۰۱۸م. اساکا^{۱۴} زاین نیز از جمله رویکردهای پژوهشی جدید در این زمینه است (اریلی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۴م).

روش

در این مطالعه، با استفاده از روش تحلیلی به بررسی پارامترهای مؤثر بر طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب شامل ضریب بزرگ‌نمایی (تشدید) شتاب کف طبقات و ضریب بزرگ‌نمایی (تشدید) شتاب وارده به مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای پرداخته می‌شود. برای این منظور، مراحل زیر طی شده است:

۱. طراحی لرزه‌ای دو نمونه از سازه‌های فولادی کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه متداول در کشور،

۲. بررسی پارامترهای مؤثر در برآورد نیروی لرزه‌ای وارده به جزء غیرسازه‌ای حساس به شتاب منصوب در طبقات مختلف در دو جهت افقی و قائم به دو روش زیر:

۱-۲. روش تحلیل استاتیکی معادل وفق روابط ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲)،

۲-۲. روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت اثر دو دسته شتابنگاشت لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک گسل.

12. Filiatrault

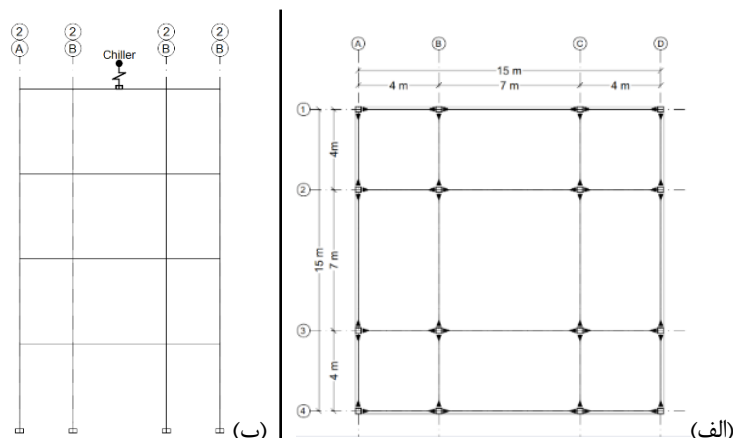
13. Structural Health Monitoring

14. Osaka earthquake

15. O'Reilly

16. Box

17. IPE



تصویر ۲. (الف) پلان سازه‌های مورد مطالعه، (ب) قاب دو بعدی سازه کوتاه مرتبه همراه با مدل‌سازی جزء غیرسازه‌ای روی طبقه بام به صورت مدل یک درجه آزادی

برابر طیف طرح ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای ساختگاه خاک نوع II واقع در منطقه با خطر نسبی لرزه‌ای خیلی زیاد دارد. ضریب مقیاس مؤلفه قائم هر شتابنگاشت لرزه‌ای نیز مشابه با ضریب مقیاس مؤلفه افقی آن براساس یکی از روش‌های قابل قبول در همپایه‌سازی مؤلفه قائم با طیف طرح در آیین‌نامه لرزه‌ای **ASCE7-16 (۲۰۱۶م.)** لحاظ شده است.

به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از انتخاب رکورد لرزه‌ای بر خروجی نتایج تحقیق، محاسبات آماری برای محاسبه میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار تحت اثر خروجی‌های هر دسته از رکوردهای لرزه‌ای انجام شده است و بر این مبنا، بحث بر روی نتایج صورت گرفته است.

معرفی اجزای غیرسازه‌ای مورد مطالعه و روش تحلیل

گستره اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب در این تحقیق، شامل کلیه اجزای متصل به یکی از کف‌ها یا سقف‌های سازه‌ای می‌باشد که از شتاب ایجاد شده در دیافراگم مربوطه تأثیر می‌پذیرند. برای بررسی نیروی وارده به جزء غیرسازه‌ای ناشی از اعمال رکوردهای شتابنگاشت لرزه‌ای وارده به سازه‌ها، از مدل یک درجه آزادی با رفتار خطی، مطابق روند نمایش داده شده در **تصویر شماره ۴**، استفاده شده است.

مطابق روند **تصویر شماره ۴**، رکورد تاریخچه زمانی شتاب در دو جهت افقی و عمودی در تراز کف یا سقف طبقه متصل به تکیه‌گاه جزء غیرسازه‌ای تحت اثر هریک از رکوردهای لرزه‌ای اعمالی به تکیه‌گاه سازه استخراج شده و سپس، از طریق نرم‌افزار ساینموسینگنال^{۲۰} نسخه ۴/۰۳، ضریب بزرگ‌نمایی شتاب در مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای حساس به شتاب نسبت به شتاب ورودی به تکیه‌گاه آن به دست آمده است. در نهایت، بیشینه نیروی وارده به جزء غیرسازه‌ای تحت اثر هر رکورد شتابنگاشت لرزه‌ای، F_p

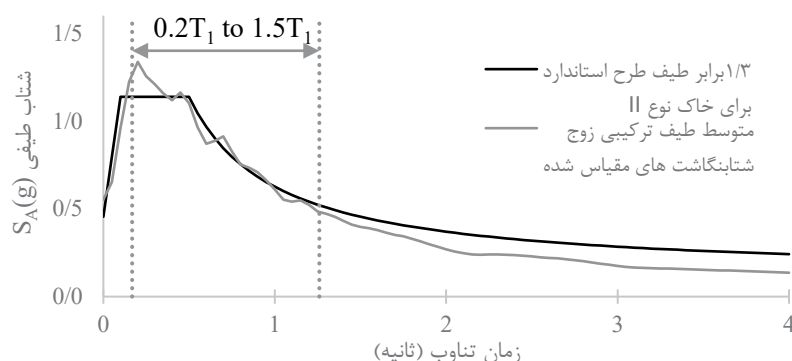
رفتار غیرخطی اعضای تیر و ستون به صورت مفصل پلاستیک متمرکز، در ابتدا و انتهای عضو خمشی در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ نسخه ۲۰ مدل‌سازی شده و منحنی رفتاری آن‌ها براساس روابط نشریه ۳۶۰ نظام فنی و اجرایی کشور (۱۳۹۲) تعریف شده است. صحت‌سنجی دقت مدل غیرخطی نرم‌افزاری از طریق مقایسه پاسخ لرزه‌ای نرم‌افزاری قاب دوبعدی موجود در مرجع **تای و کیم^{۱۸} (۲۰۱۱م.)** تحت اثر رکورد زلزله نورتریج ۱۹۹۴ میلادی انجام شده است.

در ادامه، بر روی مدل سه‌بعدی سازه‌های مورد نظر، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر مؤلفه افقی و قائم یازده رکورد شتابنگاشت لرزه‌ای حوزه نزدیک و دور از گسل انجام شده است. رکوردهای لرزه‌ای مورد استفاده مطابق **جدول شماره ۱**، براساس سناریوی بزرگای گشتاوری زلزله در محدوده بین ۶ تا ۸ و فاصله تا گسل بیشتر از ۳۰ کیلومتر برای حوزه دور و کمتر از ۱۵ کیلومتر برای حوزه نزدیک از نوع دارای پالس (جهت‌پذیری پیش‌رونده) با در نظر گرفتن سرعت موج برشی ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه در ایستگاه شتابنگاری محل ثبت از پایگاه داده شتابنگاری ^{۱۹} PEER انتخاب شده‌اند. هر دسته از رکوردهای لرزه‌ای به نحوی مقیاس شده‌اند که شدت سناریوی زلزله ورودی به تکیه‌گاه سازه، با شدت زلزله طرح با دوره بازگشت ۴۷۵ سال مطابق با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) برای ساختگاه خاک نوع II همخوانی داشته باشد. برای نمونه، در **تصویر شماره ۳**، متوسط طیف پاسخ شتاب ترکیبی به روش جذرمربعات برای زوج شتابنگاشت‌های افقی حوزه نزدیک بعد از اعمال ضرایب مقیاس مربوطه نمایش داده شده است. مطابق این **شکل**، مقادیر طیف مزبور در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب مد اول سازه چهار طبقه، اختلافی کمتر از ۱۰ درصدی با ۱/۳

18. Thai & Kim

19. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Ground Motion Database

20. Seismosignal



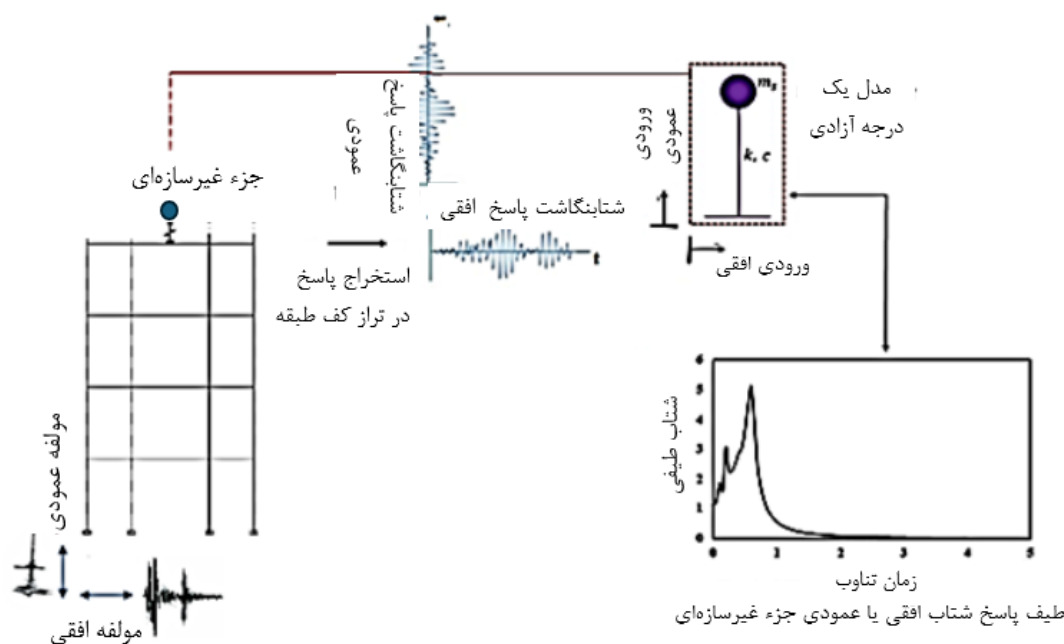
تصویر ۳. متوسط طیف شتاب ترکیبی زوج شتابنگاشت های افقی حوزه نزدیک بعد از اعمال ضرایب مقیاس با نمودار ۱/۳ برابر شده طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) در ساختگاه خاک نوع II

ثانیه لحاظ شده است. a_p ضریب بزرگنمایی شتاب در مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای برحسب نوع و زمان تناوب آن می‌باشد. I_p و R_{pu} به ترتیب ضریب اهمیت و ضریب رفتار جزء غیرسازه‌ای براساس استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۲) می‌باشد. مشخصات انواع خاصی از اجزاء غیرسازه‌ای حساس به شتاب شامل سقف کاذب و برج خنک‌کننده که به عنوان نمونه موردی در بخش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفته در ادامه ذکر شده است.

براساس فرمول شماره ۱ وفق استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) محاسبه شده و متوسط نیروی وارده تحت اثر کلیه رکوردهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

$$1. F_p = I_p \cdot m_p \cdot a_i \cdot a_p R_{pu}$$

در این فرمول، m_p جرم جزء غیرسازه‌ای می‌باشد که برای اهداف مقایسه‌ای این تحقیق برابر با ۱ کیلوگرم لحاظ شده و در واقع نیروی وارده بر جزء غیرسازه‌ای با وزن واحد در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. a_i بیشینه شتاب ناشی از اعمال هریک از رکوردهای لرزه‌ای در تراز کف یا سقف متصل به جزء غیرسازه‌ای می‌باشد که واحد آن برحسب متر بر مجذور



تصویر ۴. روند شماتیک استخراج طیف پاسخ جزء غیرسازه‌ای تحت اثر اعمال شتابنگاشت لرزه‌ای در دو جهت افقی و عمودی (چالگولا و همکاران، ۲۰۲۳م).

جدول ۱. مشخصات شتابنگاشت‌های لرزهای دسته دور و نزدیک گسل

نام زلزله (ایستگاه، سال وقوع)	بزرگای گشتاوری	R (km) ^a	PGA(g) ^b
چی چی تایوان (چی-۰۲۳، ۱۹۹۹م)	M (۷.۶)	۹/۶	(H) ۰/۲۸ (V) ۰/۱۴
دوزجی ترکیه (لامونت-۱۰۶۱، ۱۹۹۹م)	M (۷.۱)	۱۱/۵	(H) ۰/۱۳ (V) ۰/۰۵
ایوانه ژاپن (آی دلبیو تی اچ، ۲۰۰۸م)	M (۶.۹)	۳/۱	(H) ۰/۵۲ (V) ۰/۳۳
کوبه ژاپن (نیشی آکاشی، ۱۹۹۵م)	M (۶.۹)	۷/۱	(H) ۰/۴۸ (V) ۰/۳۹
کوجاالی ترکیه (آرچلیک، ۱۹۹۹م)	M (۷.۵)	۱۰/۶	(H) ۰/۲۱ (V) ۰/۰۸
لاندز آمریکا (جوشوا تری، ۱۹۹۲م)	M (۷.۳)	۱۱	(H) ۰/۲۸ (V) ۰/۱۸
لوما پریتا آمریکا (ساراتوگا، ۱۹۸۹م)	M (۶.۹)	۷/۶	(H) ۰/۵۱ (V) ۰/۳۹
مونته‌نگرو بوسنی هرزگوین (هتل آلباتروس، ۱۹۷۹م)	M (۷.۱)	۱/۵	(H) ۰/۲۳ (V) ۰/۱۳
نورث‌ریج آمریکا (پاکویم کگل، ۱۹۹۴م)	M (۶.۷)	۵/۳	(H) ۰/۴۴ (V) ۰/۱۷
پارک فیلد آمریکا (ادس، ۲۰۰۴م)	M (۶)	۱/۴	(H) ۰/۳۹ (V) ۰/۲۰
طیس ایران (دیپوک، ۱۹۷۸م)	M (۷.۳)	۱۳/۹	(H) ۰/۴۱ (V) ۰/۱۹
چی چی تایوان (اچ دلبیو ای-۰۴۵، ۱۹۹۹م)	M (۷.۶)	۶۰/۲	(H) ۰/۱۹ (V) ۰/۰۷
دوزجی ترکیه (مودورنو، ۱۹۹۹م)	M (۷.۱)	۳۴/۳	(H) ۰/۱۲ (V) ۰/۰۶
هکتور ماین آمریکا (بیستونه نخل، ۱۹۹۹م)	M (۷.۱)	۴۲/۱	(H) ۰/۰۷ (V) ۰/۰۴
کرن کانتی آمریکا (تفت لینکولن، ۱۹۵۲م)	M (۷.۴)	۳۸/۴	(H) ۰/۱۸ (V) ۰/۱۱
کوبه ژاپن (چی هایا، ۱۹۹۵م)	M (۶.۹)	۴۹/۹	(H) ۰/۱۱ (V) ۰/۰۸
کوجاالی ترکیه (مجیدیه کوی، ۱۹۹۹م)	M (۷.۵)	۵۱/۲	(H) ۰/۰۷ (V) ۰/۰۴
لاندز آمریکا (بیستونه نخل، ۱۹۹۲م)	M (۷.۳)	۴۱/۴	(H) ۰/۰۶ (V) ۰/۰۴
لوما پریتا آمریکا (آپیل-۱۰ اسکای لاین، ۱۹۸۹م)	M (۶.۹)	۴۱/۷	(H) ۰/۰۹ (V) ۰/۰۴
مورگان هیل آمریکا (سد سن داستو، ۱۹۸۴م)	M (۶.۲)	۳۱/۹	(H) ۰/۰۸ (V) ۰/۰۳
نورث‌ریج آمریکا (آنتلپ دیوت، ۱۹۹۴م)	M (۶.۷)	۴۶/۷	(H) ۰/۰۷ (V) ۰/۰۳
سان فرناندو آمریکا (پاسادنا، ۱۹۷۱م)	M (۶.۶)	۲۵/۵	(H) ۰/۱۱ (V) ۰/۱۰

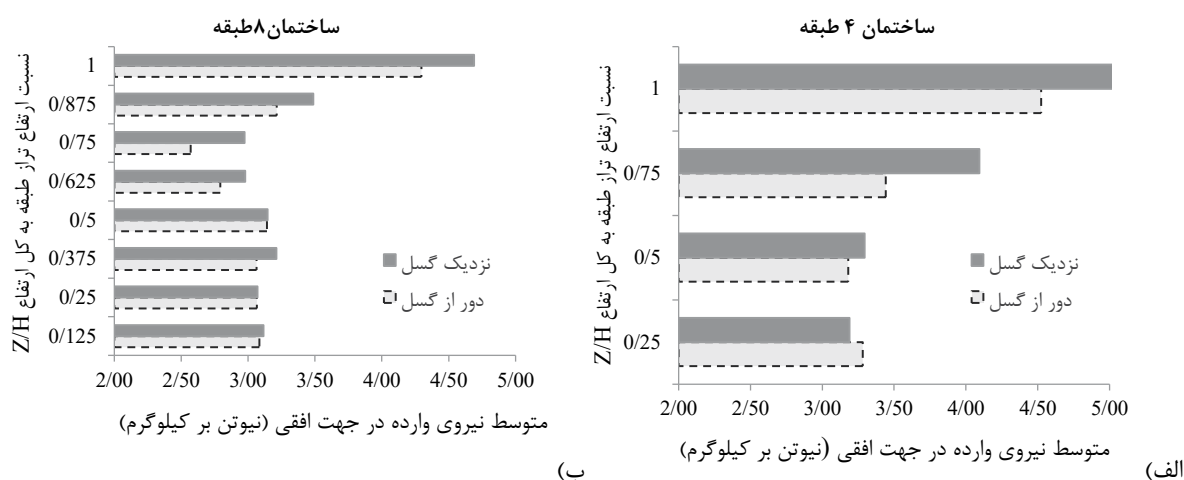
^aR: کمترین فاصله تا محل گسیختگی گسل، PGA: شتاب‌نگاشت (V) و مؤلفه قائم (H) شتاب پیک مؤلفه افقی

یافته‌ها

بررسی اثرات نزدیک گسل بر نیروی افقی وارده به مرکز جرم جزء غیرسازه‌های حساس به شتاب

در این بخش، نیروی جانبی افقی وارده به سقف کاذب،

به‌عنوان یکی از انواع اجزای غیرسازه‌ای رایج در ساختمان، با روش‌های تحلیل مختلف در دو حالت سناریوی وقوع زلزله طرح نزدیک و دور از گسل مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به اینکه عدم فروریزش یا آسیب به سقف کاذب برای تأمین عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه ساختمان ضرورت دارد، ضریب اهمیت Ip برابر با ۱/۴ و ضریب رفتار Rpu برابر با ۲/۵ مطابق با ضوابط



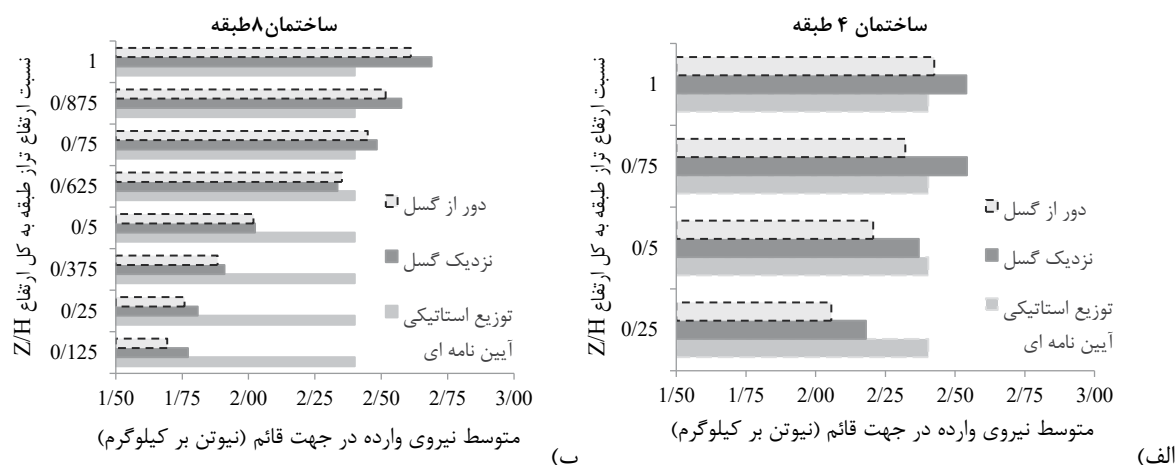
تصویر ۵. متوسط نیروی افقی ناشی از رکوردهای لرزه‌ای دور و نزدیک گسل وارده به جزء غیرسازه‌ای از نوع سقف کاذب با جرم واحد واقع در طبقات مختلف ارتفاع سازه: الف) ۴ طبقه، ب) ۸ طبقه

متوسط بیشینه نیروی افقی حاصل از اعمال دسته رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک گسل به سقف کاذب، برای حالاتی که متصل به سقف سازه‌ای طبقات اول تا آخر سازه‌های موردبررسی باشد، در تصویر شماره ۵ نمایش داده شده است. در این شکل، ارتفاع سازه و Z ارتفاع تراز طبقه قرارگیری جزء غیرسازه‌ای می‌باشد. مطابق نمودارهای تصویر شماره ۵، تأثیر اثرات نزدیک گسل بر افزایش نیروی افقی وارده به جزء غیرسازه‌ای در طبقات واقع در نیمه بالایی سازه‌ها قابل ملاحظه‌تر از نیمه پایینی بوده است. بیشترین میزان افزایش، در طبقه سوم سازه ۴ طبقه به میزان ۱۹ درصد و در طبقه ششم سازه ۸ طبقه به میزان ۱۶ درصد مشاهده شده است.

در روابط موجود در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) برای برآورد نیروی افقی وارده به اجزای غیرسازه‌ای به روش تحلیلی استاتیکی معادل، از روند توزیع خطی افزایشی در

استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) لحاظ شده است. برای محاسبه ضریب بزرگ‌نمایی شتاب a_p ، تحت اثر رکوردهای موردنظر، از روند نشان داده‌شده در تصویر شماره ۴ استفاده شده و ضریب مذکور از طریق طیف پاسخ شتاب هر طبقه تحت اثر هریک از رکوردهای لرزه‌ای هر دسته حاصل شده است. زمان تناوب مد اول سقف کاذب با صفحات گچی برابر با ۰/۰۸ ثانیه براساس جزئیات اجرایی مطالعه آزمایشگاهی از چلیک^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۶م.) استخراج شده است. سپس، بیشینه نیروی وارده به بخشی از سقف کاذب به جرم ۱ کیلوگرم، معادل با جرم مساحتی معادل با ۰/۱۵ مترمربع از سقف کاذب موردنظر، از طریق فرمول شماره ۱ محاسبه شده است.

21. Özçelik



تصویر ۶. متوسط نیروی عمودی ناشی از رکوردهای لرزه‌ای دور و نزدیک گسل وارده به جزء کاملاً صلب با جرم واحد واقع در طبقات مختلف ارتفاع سازه: الف) ۴ طبقه، ب) ۸ طبقه (با فرض ضریب بزرگ‌نمایی شتاب واحد در جهت عمودی)

جدول ۲. نیروی اینرسی وارده بر سقف کاذب با جرم واحد واقع در طبقات مختلف سازه چهار طبقه در روش‌های تحلیل مختلف

طبقه	روش استاتیکی (بر حسب نیوتن)	روش دینامیکی تاریخچه زمانی تحت اثر رکوردهای دسته نزدیک گسل (نیوتن) میانگین $\pm$ انحراف معیار
اول	۲/۹	۳/۲۳/۷
دوم	۳/۸	۳/۳۳/۹
سوم	۴/۸	۴/۱۵/۱
چهارم	۵/۸	۵/۲۶/۱

روش ساده‌شده آیین‌نامه‌ای برای حوزه نزدیک گسل در خلاف جهت اطمینان خواهد بود. باتوجه به این موضوع، در طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای سازه‌های با اهمیت زیاد و بسیار زیاد برای تأمین سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه در نواحی نزدیک گسل ضرورت دارد.

بررسی اثرات نزدیک گسل بر نیروی عمودی وارده به مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای حساس به شتاب

برای برآورد احتمال وقوع واژگونی، بلندشدگی و سقوط در اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب، نیاز به بررسی نیروی وارده به اجزای غیرسازه‌ای در جهت عمود بر تراز کف یا سقف طبقات علاوه بر نیروی اینرسی جهت افقی، مطابق با تصویر شماره ۱، می‌باشد. این موضوع، در صورت قرارگیری محل المان غیرسازه‌ای در موقعیت‌های حساس به حرکت قائم نظیر وسط دهانه تیرهای بلند و یا روی تیرهای طره، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

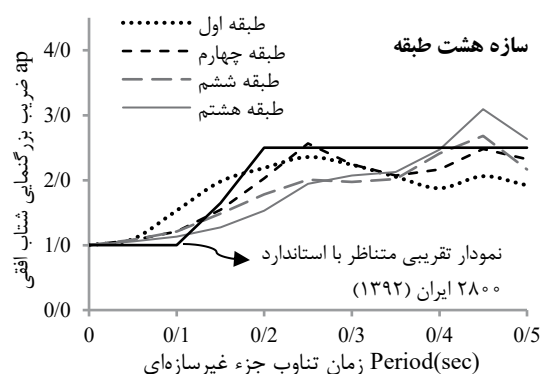
در این بخش، میزان نیروی وارده در جهت عمودی به جزء غیرسازه‌ای در طبقات مختلف سازه‌ها با فرض قرارگیری در وسط دهانه تیر بلندتر ۷ متری (تصویر شماره ۲)، تحت اثر هر یک از رکوردهای لرزه‌ای استخراج شده و در دو دسته حوزه دور و نزدیک گسل میانگین‌گیری شده است. برای این منظور، از فرض صلبیت کامل جزء غیرسازه‌ای و رفتار کاملاً خطی الاستیک در جهت قائم که به معنی $ap=1$ و $Rpu=1$ می‌باشد، مطابق با رویکرد موجود در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) استفاده شده است. روش دقیق‌تر برای اعمال اثرات عدم صلبیت کامل در جهت عمودی در برخی از انواع اجزای غیرسازه‌ای در بخش بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

ارتفاع سازه از طبقه اول تا آخر متناسب با نسبت Z/H استفاده شده است. بررسی نمودارهای تصویر شماره ۵، که براساس روش تحلیل تاریخچه زمانی استخراج شده، نشان می‌دهد روند توزیع نیروی افقی در ارتفاع سازه کوتاه مرتبه (۴ طبقه) به روند خطی پیشنهادی در روش تحلیل استاتیکی خطی استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) نزدیک می‌باشد؛ لکن، در سازه میان مرتبه (۸ طبقه)، توزیع تقریباً ثابت نیرو در طبقات اول تا ششم و روند افزایشی شدید در طبقات آخر تحت اثر هر دو دسته رکوردهای حوزه دور و نزدیک گسل مشاهده شده که با روند توزیع خطی آیین‌نامه‌ای متفاوت است.

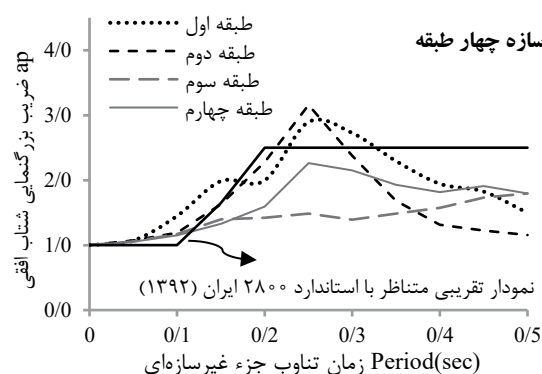
مقدار میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار داده‌های مربوط به نیروی اینرسی افقی سقف کاذب در سازه ۴ طبقه، تحت اثر رکوردهای مختلف لرزه‌ای دسته نزدیک گسل، در جدول شماره ۲ ارائه شده است. در ستون دوم این جدول، مقدار نیروی اینرسی حاصل از اعمال رابطه مربوط به روش ساده‌شده استاتیکی خطی استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) نیز جهت مقایسه ارائه شده است. باتوجه به اینکه سطح خطر زلزله در هر دو روش تحلیل، سطح خطر زلزله طرح می‌باشد، مقایسه مذکور می‌تواند به ارزیابی از میزان محافظه‌کارانه بودن برآورد روش تحلیل ساده‌شده آیین‌نامه‌ای در مقایسه با روش‌های واقعی‌تر دینامیکی کمک کند. مطابق این جدول، مقدار میانگین نیروی اینرسی ناشی از رکوردهای لرزه‌ای از مقدار متناظر با روابط ساده‌شده آیین‌نامه‌ای کمتر می‌باشد. درواقع، خروجی روش ساده‌شده آیین‌نامه‌ای نسبت به میانگین داده‌های روش دقیق‌تر، در جهت اطمینان بوده است؛ لکن، در صورتی که به‌جای میانگین، از سناریوی بدبینانه‌تر میانگین به علاوه انحراف معیار استفاده شود، مقدار پیشنهادی

جدول ۳. زمان تناوب برخی اجزای غیرسازه‌ای در جهت افقی (ASCE7-22، ۲۰۲۲م.)

$Tp \leq 0.06 \text{ Sec}$	اجزای غیرسازه‌ای صلب نظیر ژنراتورها
$0.06 < Tp \leq 0.15 \text{ Sec}$	اجزای غیرسازه‌ای نظیر تأسیسات مکانیکی (پمپ، ژنراتور، کمپرسورهای هوا، هیتر و بویلر)
$0.06 < Tp \leq 0.3 \text{ Sec}$	اجزای غیرسازه‌ای نظیر قفسه‌های تأسیسات الکتریکی
$0.1 < Tp \leq 0.2 \text{ Sec}$	اجزای غیرسازه‌ای تأسیسات الکتریکی



(ب)



(الف)

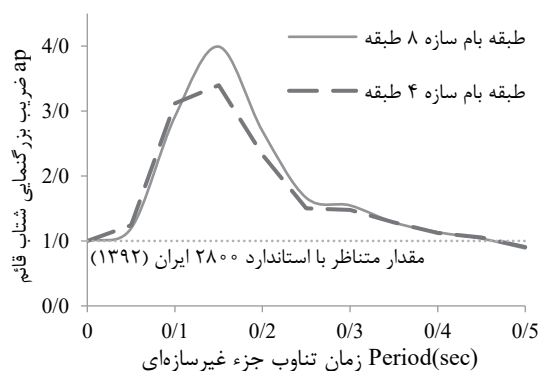
تصویر ۷. متوسط طیف ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی در مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای با میرایی ۵ درصد تحت کلیه رکوردهای لرزه‌ای واقع در طبقات مختلف سازه: (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه

طبقات نیمه بالایی هر دو سازه کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه، متوسط نیروی به‌دست‌آمده به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک مقادیر بالاتری نسبت به روش ساده‌شده پیشنهادی آیین‌نامه‌ای داشته است.

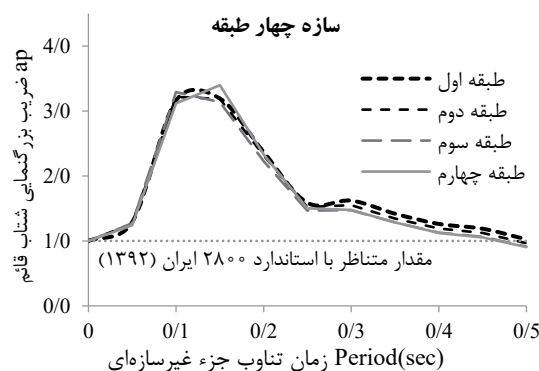
بررسی تأثیر زمان تناوب جزء غیرسازه‌ای بر ضریب بزرگ‌نمایی شتاب در محل مرکز جرم

میزان بزرگ‌نمایی (تشدید) شتاب در محل مرکز جرم اجزای غیرسازه‌ای نسبت به شتاب ورودی به محل تکیه‌گاه اتصال آن‌ها به کف یا سقف طبقه، وابسته به زمان تناوب و میرایی جزء غیرسازه‌ای می‌باشد. در این بخش، به بررسی ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی و قائم در مرکز جرم اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب با زمان تناوب‌های مختلف پرداخته شده است. باتوجه‌به اینکه زمان تناوب اکثر اجزای غیرسازه‌ای در بازه بین ۰ تا ۰/۵ ثانیه و میرایی آن‌ها زیر ۵ درصد است (گرونتاتی و وامواتسیکوس^{۲۲}، ۲۰۲۵م)، لذا تغییرات ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی و قائم در این بازه موردبررسی قرار گرفته است.

22. Gerontati & Vamvatsikos



(ب)



(الف)

تصویر ۸. متوسط طیف ضریب بزرگ‌نمایی شتاب عمودی در مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای با میرایی ۵ درصد تحت کلیه رکوردهای لرزه‌ای: (الف) در طبقات مختلف سازه ۴ طبقه، (ب) در طبقه بام سازه ۴ و ۸ طبقه



براساس اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲)، ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت قائم برای تمام اجزای غیرسازه‌ای با انواع و زمان تناوب‌های مختلف برابر با ۱ لحاظ می‌گردد که به صورت یک خط مستقیم ثابت در **تصویر شماره ۸** نمایش داده شده است. مطابق با این **نمودار**، متوسط ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت قائم اجزای غیرسازه‌ای با رفتار غیرصلب که زمان تناوب مد قائم آن‌ها بین ۰/۵ تا ۰/۳۵ ثانیه می‌باشد می‌تواند به ترتیب به ۳ و ۴ برابر مقدار توصیه شده آیین‌نامه‌ای برای سازه ۴ و ۸ طبقه افزایش یابد. این موضوع می‌تواند باعث غیرمحافظه کارانه شدن طراحی لرزه‌ای این نوع اجزا با استفاده از روش تحلیل ساده شده استاتیکی معادل شود.

برای نمونه، زمان تناوب مد قائم یک نمونه برج خنک کننده براساس مطالعه آزمایشگاهی **استروزا و همکاران (۲۰۱۵م)** در حالت خالی و پر از آب به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۲۲ ثانیه، ضریب میرایی آن برابر با ۴ درصد و وزن آن در حالت پر برابر با ۲۷/۹ کیلونیوتن در نظر گرفته شده است. با فرض اینکه برج خنک کننده مذکور بر روی بام سازه‌های مورد مطالعه با کاربری با اهمیت زیاد نصب شده باشد، مقدار نیروی اینرسی برج خنک کننده در حالت پر در جهت قائم به روش تحلیل تاریخچه زمانی محاسبه شده است. برای این منظور، از ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت عمودی متناظر با زمان تناوب برج خنک کننده با وضعیت پر مطابق **تصویر شماره ۸** استفاده شده است. مطابق محاسبات انجام شده، مقدار متوسط نیروی اینرسی جهت عمودی به برج خنک کننده منصوب بر روی بام سازه ۴ طبقه و ۸ طبقه به ترتیب برابر با ۱۳ و ۱۵/۳ کیلونیوتن در سناریوی حوزه نزدیک گسل به دست آمده است. این در حالی است که مقدار نیروی مذکور براساس روش تحلیل استاتیکی معادل آیین‌نامه‌ای که از فرض صلبیت کامل جزء غیرسازه‌ای در جهت عمودی استفاده می‌کند برابر با ۶/۸ کیلونیوتن در هر دو حالت نصب بر روی سازه ۴ و ۸ طبقه برآورد می‌گردد. به این ترتیب، غیرمحافظه کارانه بودن برآورد نیروی وارده در جهت قائم برای جزء غیرسازه‌ای مذکور در روش متداول آیین‌نامه‌ای محرز است.

نتایج این بخش نشان می‌دهد توسعه به کارگیری و ابلاغ ضوابط تکمیلی پیش‌نویس ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۴۰۳) در اضافه کردن روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به عنوان یکی از روش‌های تحلیل اجزای غیرسازه‌ای و تصریح در مورد نحوه انتخاب و اعمال شتابنگاشت‌های لرزه‌ای در ساختگاه‌های نزدیک گسل می‌تواند به کاهش خطرپذیری سازه‌های خاص نظیر بیمارستان‌ها و مراکز امداد و نجات کشور در حین زلزله‌های محتمل آتی و پس‌لرزه‌های متوالی منجر شود.

برای این منظور، نمودار میانگین طیف ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی ایجاد شده در اجزای غیرسازه‌ای تحت اثر کلیه رکوردهای لرزه‌ای وارده به سازه ۴ طبقه و ۸ طبقه استخراج شده است. در **تصویر شماره ۷-الف**، طیف مذکور با فرض قرارگیری جزء غیرسازه‌ای در طبقه‌های اول تا آخر سازه ۴ طبقه نمایش داده شده است و در مورد سازه ۸ طبقه، صرفاً در طبقات اول، چهارم، ششم و آخر سازه در **تصویر شماره ۷-ب** نمایش داده شده است. مطابق این **نمودارها**، قرارگیری جزء غیرسازه‌ای در طبقات نیمه پایینی سازه تأثیر بیشتری بر افزایش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت افقی در مرکز جرم اجزای غیرسازه‌ای داشته است.

باتوجه به اینکه محاسبه و اندازه‌گیری زمان تناوب اجزای غیرسازه‌ای به مطالعات آزمایشگاهی نیاز دارد، لذا اکثر آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نظیر استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲)، ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت افقی a_p را برحسب نوع جزء غیرسازه‌ای به جای زمان تناوب آن ارائه کرده‌اند. به همین لحاظ، امکان ارائه نمودار دقیق آیین‌نامه‌ای از تغییرات ضریب مذکور برحسب زمان تناوب نمی‌باشد و لذا نموداری تقریبی از ضریب مذکور در **تصویر شماره ۶** ترسیم شده است. این نمودار تقریبی، براساس بررسی زمان تناوب اجزای غیرسازه‌ای در تحقیقات آزمایشگاهی مختلف که در مراجعی نظیر تفسیر استاندارد **ASCE 22-2022 (م. ۲۰۲۲)** مطابق **جدول شماره ۳** ارائه شده، استخراج گردیده است. مطابق این نمودار، در اجزایی که صلبیت کامل ندارند و زمان تناوب بالاتر از ۰/۱ ثانیه دارند، قرارگیری در طبقات پایینی سازه باعث می‌شود متوسط ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی، مقادیری بالاتر از مقادیر توصیه شده آیین‌نامه‌ای را نشان دهند.

علاوه بر این، در سازه ۸ طبقه، قرارگیری اجزای غیرسازه‌ای با زمان تناوب بالای ۰/۴ ثانیه در طبقه بام به افزایش ضریب بزرگ‌نمایی شتاب افقی نسبت به مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌ای منجر شده است. این موضوع می‌تواند باعث غیرمحافظه کارانه شدن نیروی اینرسی محاسبه شده با روش استاتیکی معادل برای اجزای غیرسازه‌ای با رفتار نرم و انعطاف‌پذیر در طبقه بام سازه میان مرتبه در هر دو حوزه دور و نزدیک گسل شود. براساس نتایج بررسی این تحقیق، با کاهش میرایی اجزای غیرسازه‌ای از ۵ درصد به ۲ درصد، افزایش ۴۰ درصدی ضریب بزرگ‌نمایی برای کلیه زمان‌های تناوب رخ می‌دهد که به افزایش نیروی اینرسی وارده به جزء غیرسازه‌ای حساس به شتاب از نوع کم میرا منجر خواهد شد.

در ادامه، ضریب بزرگ‌نمایی شتاب در جهت عمودی در مرکز جرم جزء غیرسازه‌ای با زمان تناوب‌های کمتر از ۰/۵ ثانیه برای مد عمودی که بر روی دهانه بلند طبقات مختلف دو سازه ۴ و ۸ طبقه قرار گرفته، بررسی شده است. مطابق **تصویر شماره ۸**، محل قرارگیری جزء غیرسازه‌ای در طبقات مختلف، تأثیری در میزان ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت عمودی نداشته است.



بحث

قائم زلزله باشد. ضمن اینکه، در طبقات نیمه بالایی هر دو سازه کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه، متوسط نیروی به‌دست‌آمده به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک مقادیر بالاتری نسبت به روش ساده‌شده استاتیکی معادل داشته است.

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی ضریب بزرگ‌نمایی شتاب راستای قائم در مرکز جرم اجزای غیرسازه‌ای نشان داد توجه به زمان تناوب مد عمودی این اجزا ضرورت دارد. متوسط ضریب مذکور برای اجزای غیرسازه‌ای با رفتار غیرصلب، با زمان تناوب مد قائم بین ۰/۰۵ تا ۰/۳۵، ثانیه، به‌ترتیب افزایش تا ۳ و ۴ برابری نسبت به مقدار الزام‌شده آیین‌نامه‌ای برای سازه ۴ و ۸ طبقه نشان داده است. این موضوع می‌تواند باعث غیرمحافظه‌کارانه شدن طراحی لرزه‌ای جهت عمودی این نوع اجزاء با استفاده از روش تحلیل ساده‌شده استاتیکی معادل شود.

محدودیت‌های پژوهش

در این پژوهش، صرفاً به بررسی رفتار اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب در سازه‌های منظم در پلان و ارتفاع با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی از نوع کوتاه مرتبه (۴ طبقه) و میان مرتبه (۸ طبقه) واقع در ساختمان خاک سخت (نوع II) بدون برخورد با خط گسلش در زیر ساختمان سازه پرداخته شده است. برای تعمیم نتایج، نیاز است طیف گسترده‌تری از انواع سازه‌ها بر روی انواع ساختمان‌های خاک تحت بازه گسترده‌تری از رکوردهای لرزه‌ای با خصوصیات متنوع و سطوح خطر مختلف موردبررسی قرار گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مطالعه، تمام اصول و ملاحظات اخلاقی رعایت شد و قبل از شرکت در مطالعه، از همه شرکت‌کنندگان رضایت‌نامه آگاهانه اخذ گردید.

حامی مالی

این مطالعه برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران-زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب است. این تحقیق هیچ کمک مالی از سازمان‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

در این پژوهش، به بررسی برخی عوامل تأثیرگذار بر نیروی اینرسی ناشی از زلزله بر اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب واقع در کف یا متصل به سقف طبقات ساختمان‌های قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط پرداخته شد. برای این منظور، رفتار لرزه‌ای دو نمونه از سازه‌های ساختمانی کوتاه مرتبه (۴ طبقه) و میان مرتبه (۸ طبقه) براساس تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های افقی و قائم دو دسته شتابنگاشت لرزه‌ای در حوزه نزدیک و حوزه دور از گسل (۱۱ رکورد در هر دسته) مورد بررسی قرار گرفت. سپس، نیروی وارده بر اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب با زمان تناوب‌های زیر ۰/۵ ثانیه، به دو روش شامل اعمال مستقیم رکورد شتابنگاشت لرزه‌ای و روش ساده‌شده تحلیل استاتیکی معادل برای سطح خطر زلزله طرح استخراج گردید. نتایج به‌دست‌آمده، به شرح ذیل خلاصه شده است:

اثرات افزایشی ناشی از حوزه نزدیک گسل بر نیروی اینرسی افقی وارده به اجزای غیرسازه‌ای در حالات قرارگیری در طبقات نیمه بالایی قابل توجه‌تر از نیمه پایینی ارتفاع سازه‌های مورد مطالعه مشاهده گردید. بیشترین میزان افزایش به میزان ۱۹ درصد در طبقه ۳ سازه ۴ طبقه در نیروی برآوردشده تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نسبت به وضعیت حوزه دور از گسل رخ داده است.

بررسی توزیع نیروی افقی وارده بر اجزای غیرسازه‌ای در ارتفاع سازه‌های موردبررسی به روش تاریخچه زمانی غیرخطی نشان داد روند توزیع نیروی افقی در ارتفاع سازه کوتاه مرتبه (۴ طبقه) به روند خطی پیشنهادی در روش تحلیل استاتیکی معادل استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۲) نزدیک می‌باشد. لکن، در سازه میان مرتبه (۸ طبقه)، توزیع تقریباً ثابت نیرو در طبقات اول تا ششم و روند افزایشی شدید در طبقات آخر تحت اثر هر دو دسته رکوردهای حوزه دور و نزدیک گسل مشاهده شده که با روند توزیع خطی فعلی آیین‌نامه‌ای متفاوت است.

تراز طبقه قرارگیری جزء غیرسازه‌ای تأثیر قابل توجهی در ضریب بزرگ‌نمایی شتاب جهت افقی اجزای غیرسازه‌ای به‌خصوص در اجزای با رفتار نرم در جهت افقی و با زمان تناوب‌های بالاتر از ۰/۱ ثانیه داشته است. بنابراین رویکرد متداول اکثر دفاتر مهندسی در ارائه جزئیات یکسان برای نحوه اتصال اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب در طبقات مختلف می‌تواند به شکل‌گیری مد خرابی حرکت گهواره‌ای یا لغزشی، واژگونی و سقوط اجزای غیرسازه‌ای منجر شود.

بررسی نیروی عمودی وارده به اجزای غیرسازه‌ای به روش دینامیکی حاکی از بارزتر بودن اثرات حوزه نزدیک گسل بر جزء غیرسازه‌ای منصوب در تمام طبقات سازه ۴ طبقه نسبت به سازه ۸ طبقه بوده است. این موضوع می‌تواند ناشی از نزدیکی فرکانس طبیعی جهت قائم سازه کوتاه‌مرتبه به محتوای فرکانسی مؤلفه

References

- Aghaei-Araei, A., Ghodrati-Ghazaani, A., Attarchian, N., Salamat, A. S. & Hasani, H. (2019). [Design spectra for near fault ground motions considering frequency-dependence of material behavior (Persian)]. Tehran: Building and Housing Research Center (BHRC), Iran. [Link]
- Ahmad, Z., Ahmed, H. A., Shahzada, K., & Li, Y. (2024). Vulnerability of non-structural elements (NSEs) in buildings and their life cycle assessment: A review. *Buildings*, 14(1), 170. [DOI:10.3390/buildings14010170]
- ASCE standard. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers. [DOI:10.1061/9780784415788]
- Astroza, R., Pantoli, E., Selva, F., Restrepo, J. I., Hutchinson, T. C., & Conte, J. P. (2015). Experimental evaluation of the seismic response of a rooftop-mounted cooling tower. *Earthquake Spectra*, 31(3), 1567-1589. [DOI:10.1193/071513EQS205M]
- Challagulla, S. P., Kontoni, D. P. N., Suluguru, A. K., Hossain, I., Ramakrishna, U., & Jameel, M. (2023). Assessing the seismic demands on non-structural components attached to reinforced concrete frames. *Applied Sciences*, 13(3), 1817. [DOI:10.3390/app13031817]
- Filiatrault, A., Perrone, D., Merino, R. J., & Calvi, G. M. (2021). Performance-based seismic design of nonstructural building elements. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(2), 237-269. [DOI:10.1080/13632469.2018.1512910]
- Gerontati, A., & Vamvatsikos, D. (2025). Intensity measures for short-period structures and their non-structural components. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54(5), 1361-1375. [DOI:10.1002/eqe.4314]
- Gremer, N., Adam, C., Medina, R. A., & Moschen, L. (2019). Vertical peak floor accelerations of elastic moment-resisting steel frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, 3233-3254. [DOI:10.1007/s10518-019-00576-6]
- Gümüş, M., & Durucan, C. (2022). Effects of pulse-like ground motion records with and without acceleration pulses on the earthquake responses of structures with varying dynamic properties. *Structures*, 45, 427-436. [DOI:10.1016/j.jstruc.2022.09.042]
- Housner, G. W., & Hudson D. E. (1958). The Port Hueneme Earthquake of March 18, 1957. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 48, 163-168. [DOI:10.1785/BSSA0480020163]
- Iranian Management and Planning Organization. (2014). [Instructions for seismic rehabilitation of existing buildings (Persian)]. Tehran: Publications of The Executive Technical System, Iran. [Link]
- Building and Housing Research Center. (2015). [Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800 (Persian)]. Tehran: Building and Housing Research Center (BHRC), Iran. [Link]
- Iranian Seismic Code. (2025). [Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800, Ed. 5 (Draft for public comment) (Persian)]. Tehran: Building and Housing Research Center (BHRC), Iran. [Link]
- Kheildar, F. & Samouei, P. (2022). [Low-risk camps and medical service centers locating before an earthquake using the COCOSO MCDM method, case study: Rudbar, Gilan. (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 12 (3), 289-299. [Link]
- Li, S., & Xie, L. L. (2007). Progress and trend on near-field problems in civil engineering. *Acta Seismologica Sinica*, 20(1), 105-114. [DOI:10.1007/s11589-007-0105-0]
- Lim, E., Jiang, L., & Chouw, N. (2017). Dynamic response of a non-structural component with three supports in multi-directional earthquakes. *Engineering Structures*, 150, 143-152. [DOI:10.1016/j.engstruct.2017.07.028]
- Mirmoghadaee, M., Siadati, F., Eslamlou, M. S., Majid Zamani, S. S., Nayeri, A., & Sadeghi, Z., et al. (2024). [Urban Planning Regulations for Fault Avoidance Zone (Persian)]. Tehran: Building and Housing Research Center (BHRC), Iran. [Link]
- O'Reilly, G. J., Hasegawa, K., Shahnazaryan, D., Poveda, J., Fukutomi, Y., & Kusaka, A., et al. (2024). On the fragility of non-structural elements in loss and recovery: Field observations from Japan. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(3), 1125-1144. [DOI:10.1002/eqe.4066]
- Ozcelik, O., Misir, I. S., & Saridogan, S. (2016). Performance evaluation of suspended ceiling systems using shake table test. *Structural Engineering and Mechanics*, 58(1), 121-142. [DOI:10.12989/sem.2016.58.1.121]
- PEER Ground Motion Database. (2026). *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Berkeley: University of California. [Link]
- Pirizadeh, M., Karoubi, A., & Lashgari-gehraz, S. M. (2024). On the vertical seismic response of the floor mounted motorized non-structural components. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 26(1), 61-70. [DOI:10.48303/jsee.2024.2031211.1098]
- Shahbazi, S., Mansouri, I., Hu, J. W., Sam Daliri, N., & Karami, A. (2019). Seismic response of steel smfs subjected to vertical components of far and near field earthquakes with forward directivity effects. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 2647387. [DOI:10.1155/2019/2647387]
- Thai, H. T., & Kim, S. E. (2011). Practical advanced analysis software for nonlinear inelastic dynamic analysis of steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 453-461. [DOI:10.1016/j.jcsr.2010.09.009]
- Zhai, C. H., Zheng, Z., Li, S., Pan, X., & Xie, L. L. (2016). Seismic response of nonstructural components considering the near-fault pulse-like ground motions. *Earthquakes and Structures*, 10(5), 1213-1232. [DOI:10.12989/eas.2016.10.5.1213]