



Evaluation of Seismic Performance of Dual Flexural Frame with Eccentric Bracing, Horizontal Shear and Flexural Link in Consideration of the Effect of Soil-structure Interaction under Near Field Record

Mohammad Javad Goodarzi^{1*}, Majid Moradi²

¹Faculty Member, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²PhD in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 02.16.2022

Revised: 07.17.2022

Accepted: 08.20.2022

Keyword:

Bending and Shear Link
Soil-structure Interaction
Seismic Response
Vertical Component Effect

*Corresponding Author:

Mohammad Javad Goodarzi

Email: mgoodarzi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Evaluating the seismic performance of structures is one of the interests and responsibilities of structural and earthquake engineers. The eccentric bracing system has always been one of the most important and widely used structural systems due to its high strength, stiffness and ductility. These structures are usually designed with horizontal shear and bending links. In this research, using nonlinear dynamic analysis, the seismic response and performance of these structures under near-field records with and without vertical components in addition to considering the effect of soil-structure interaction were investigated. Therefore, three types of frames of 4, 8 and 12 floors were designed and modeled nonlinearly using the finite element method in Perform-3D software. Maximum displacement and displacement of roof residue, floor drift and base shear of these structures were selected and studied as engineering demand parameters. The results showed that the structure with horizontal shear link had much better responses than the frame with horizontal bending link. In addition, the effect of soil-structure interaction increased the roof displacement and reduced the base shear on the structure.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A great deal of research has been conducted on evaluating the performance of structures against earthquake loads, of which the eccentric bracing system is one. Many parameters affect the behavior of structures. The effect of the vertical component of seismic loads and the effect of soil and structure interaction are two of these parameters. The simultaneous effect of the vertical component along with the effect of soil and structure interaction can have a great impact on the seismic response of structures. In the present research, using time history analysis, the effects of the vertical component and soil and structure interaction on the seismic behavior of eccentric bracing frames with horizontal shear and bending links were investigated simultaneously to discover which of these parameters has a greater effect on the response of the structure.

Methodology (Modeling and Seismic load)

Double bending frame systems with 4, 8, and 12-story eccentric bracing with bending and shear links were used to evaluate the seismic response of the research. For this purpose, all beam and column connections were considered rigid. Structural systems in the form of steel bending frames with external braces were modeled and designed according to the AISC regulation. The arrangement of braces is shown in the structural plan according to Figure 1.

Table 1. Values of soil hardness parameters.

Parameter	Quantity	Unit
B	2	m
g	10	m/s ²
L	15	m
G	6930000	Kg/m
G0	13860000	Kg/m
v	0.3	-
Vs	300	M/s
gama	1540	Kg/m ³
Kx	112486509.9	N/m
Kz	154929016.4	N/m
Kyy	4690503561	N/m

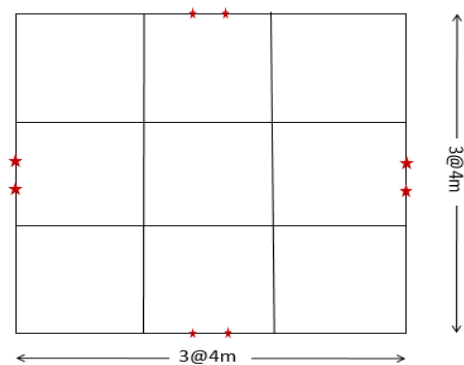


Figure 1. Braces arrangement plan.

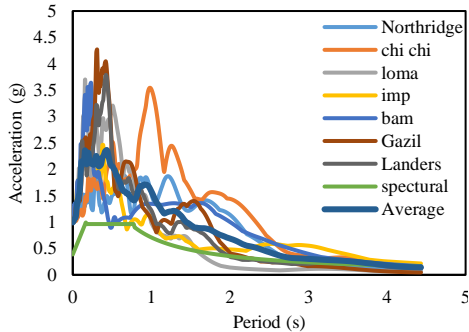


Figure 2b. Vertical components.

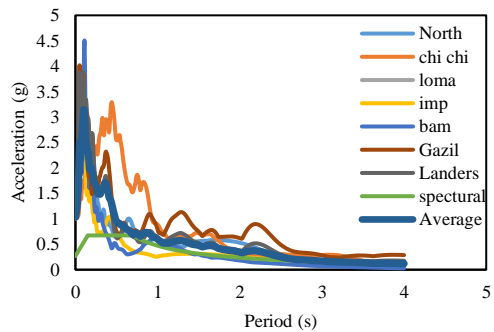


Figure 2a. The response spectrum of the records and the spectrum of the standard plot for horizontal components.

I-shaped sections were used for beams, box sections for columns, and double channels for braces. In order to introduce the shear and bending links, the lengths of half and 1 meter respectively were selected for the link beam. one of the surrounding bracing frames was selected to evaluate the seismic behavior and was modeled as finite elements in Perform-3D software in a non-linear way. For the nonlinear modeling of link beams, bending and shearing plastic joints were used in such a way that bending joints were defined at both ends of the connecting beam and shearing plastic joints were defined in the middle. An extended spring stiffness model was used to model the soil. Based on 360 publications, soil modeling parameters were considered as per Table 1. Non-linear time history analysis method was used to evaluate the performance of the structures considered in this research. Seven records of the nearby field were used. For selection of records, 2800 standard recommendations were used. Shear wave speeds between 175 and 375 m/s were taken into account as type III soil criterion in the selection of records. Figures 2 a and b respectively show the spectrum of the selected horizontal and vertical component records and its scaling with the standard spectrum of 2800. The nonlinear time history analysis was performed and the behavior of the structures due to the application of horizontal records (H), horizontal and vertical records (H+V) and the effect of soil-structure interaction (SSI) with shear links and bending (moment) was evaluated.

Results and discussion

By observing the results of the analysis, despite the definition of bending and shearing plastic joints in all connecting beams, in frames with a half-meter horizontal link, only a shearing plastic joint was formed, and in frames with a one-meter horizontal link, only a bending plastic joint was formed. To evaluate the effect of soil and structure interaction on the rotation of the plastic joints of the frames, the performance of the elements of the structures with shear and bending links in the 8-story frames under the Bam earthquake record is shown in Figure 3. The results showed that considering the effects of soil and structure interaction in the frames of this research increased the performance level of the elements. Comparing Figures 3a and b confirms that the number of elements that had

reached the level of LS performance in the case where the soil and structure interaction was taken into consideration was greater than the case where this effect was ignored.

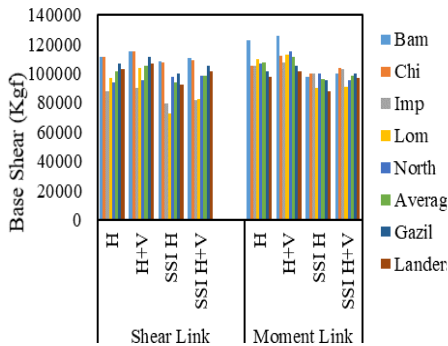


Figure 4. The maximum values of the base shear in the 8-story frame.

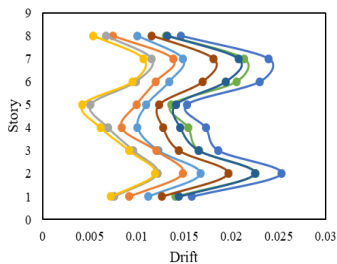


Figure 5. Average drift values in five records in the 8-story frame.

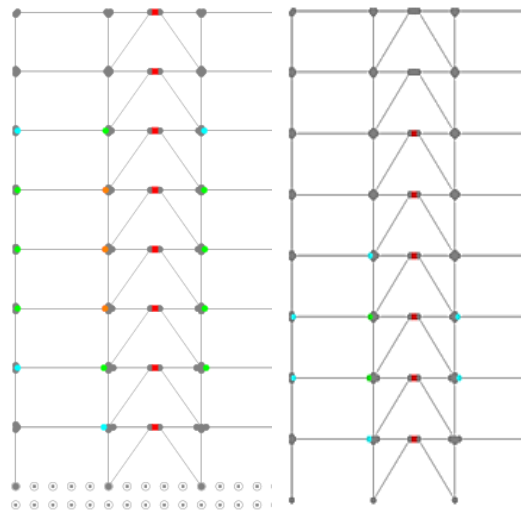


Figure 3b. 8-story frame with interaction effect.

Figure 3a. 8-story frame without interaction effect.

According to Figure 4, considering the effect of soil and structure interaction reduces the shear on the structure. As shown in Figure 5, in the structure with horizontal bending and shear links, taking into account the effect of interaction between the soil and the structure and the vertical component increased the drift in these structures, and the effect of the interaction was greater than the effect of the vertical component.

Conclusion

In the present research, the performance of 4, 8, and 12-story structures with bending and shear links under near-field records, the effects of the vertical component of the seismic load, and the effect of considering the interaction between the soil and the structure were investigated and the findings reveal the following:

- In terms of the performance of the structure with shear link, the horizontal displacement of the residual and the drift of floors were less than the structure with bending link.
- The effect of adding the vertical component of the seismic load on the response and performance of these structures was not significant and can be ignored.

- Considering that the effect of soil and structure interaction causes the shearing of the foundation into the structure to decrease and drift, absolute horizontal displacement of the roof and this increase in the structure with bending link was greater than the structure with shear link.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
تهران

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۱، دوره ۱۹، شماره ۳، ۵۰۰-۴۷۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi: 10.48301/KSSA.2022.326213.1968



ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی دوگانه با مهاربند برون‌محور دارای لینک افقی برشی و خمشی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه تحت رکورد حوزه نزدیک

محمد جواد گودرزی^{۱*}، مجید مرادی^۲

۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دکتری زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروان بابل، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها یکی از علایق و مسئولیت‌های مهندسی سازه و زلزله است. سیستم مهاربند برون‌محور به علت مقاومت، سختی و شکل‌پذیری بالایی که دارد همواره یکی از مهم‌ترین و مورد استفاده‌ترین سیستم‌های سازه‌ای محسوب شده است. این سازه‌ها معمولاً با لینک‌های افقی برشی و خمشی طراحی و اجرا می‌شوند. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی پاسخ و عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها تحت رکوردهای حوزه نزدیک با و بدون مؤلفه قائم به همراه در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه بررسی شود. از این رو سه تپ قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه طراحی و با استفاده از روش اجزای محدود به صورت غیرخطی در نرم‌افزار Perform-۳D مدل‌سازی شده است. ماکزیمم جابه‌جایی و جابه‌جایی پسماند بام، دریفت طبقات و برش پایه این سازه‌ها به‌عنوان پارامترهای تقاضای مهندسی انتخاب و بررسی شده است. نتایج نشان داده است سازه با لینک افقی برشی پاسخ‌های به‌مراتب بهتری از قاب‌های دارای لینک افقی خمشی دارد همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه جابه‌جایی بام را افزایش و برش وارد بر سازه را کاهش داده است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

کلید واژگان:

لینک خمشی و برشی
اندرکنش خاک و سازه
پاسخ لرزه‌ای
اثر مؤلفه قائم

*نویسنده مسئول: محمد جواد گودرزی

پست الکترونیکی:

mgoodarzi@tvu.ac.ir



©2022 the authors. Published by Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقدمه

ارزیابی عملکرد سازه‌ها در برابر بار لرزه‌ای یکی از مهم‌ترین وظایف مهندسی سازه و زلزله است. سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای مختلف، عملکرد متفاوتی را از خود بروز می‌دهند [۱؛ ۲]. یکی از سیستم‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله قاب خمشی دوگانه با مهاربند برون‌محور است. عملکرد این سیستم سازه‌ای براساس عملکرد نیرو کنترل‌المان‌های تیر، ستون و مهاربند و عملکرد تغییر شکل کنترل تیر پیوند است [۳]. بنابراین المان تیر پیوند مهم‌ترین عضو در این سیستم سازه‌ای محسوب می‌شود. این تیر براساس طول خود می‌تواند دارای رفتار خمشی یا برشی یا خمشی-برشی باشد [۴]. اگرچه تیرهای پیوند می‌توانند به صورت افقی و قائم استفاده شوند اما به لحاظ معماری و سایر ملاحظات رفتاری استفاده از لینک افقی متداول‌تر است [۵].

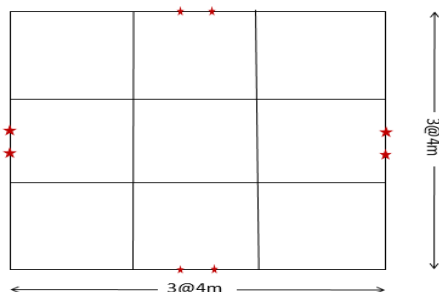
تحقیقات فراوانی در مورد ارزیابی عملکرد سازه‌ها در برابر بار زلزله انجام شده است که سیستم مهاربند برون‌محور هم یکی از آن است. کاپریلی و همکاران (۲۰۱۸) به صورت آزمایشگاهی بررسی‌هایی را بر روی یک قاب با مقیاس واقعی دارای مهاربندهای واگرای افقی و عمودی انجام دادند. آن‌ها برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای این قاب‌ها از بارگذاری سیکلیک استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان داده است اتلاف انرژی در هر دو قاب (لینک قائم و افقی) در المان‌های تیر پیوند متمرکز است و این المان‌ها با جذب انرژی توانستند از آسیب به سایر اعضا جلوگیری کنند [۶]. محسنیان و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر مقاوم‌سازی سازه با استفاده از مهاربند واگرا را بر عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند افزودن این المان‌ها به سازه‌های اولیه باعث کاهش محسوس پاسخ سازه می‌شود به طوری که آسیب‌ها به طور کامل بر روی الینک متمرکز می‌شود و سایر المان‌ها در محدوده الاستیک باقی می‌مانند. نتایج مقاوم‌سازی سازه با استفاده از لینک برشی نشان داده است شکنندگی سازه مقاوم‌سازی شده بسیار کمتر از شکنندگی سازه اولیه است [۷]. دوری و همکاران (۲۰۱۹) یک الگوی بار جانبی را مبتنی بر تغییر شکل جانبی برای سازه‌های دارای مهاربند برون‌محور ارائه دادند [۸]. عبدالله‌زاده و همکاران تأثیر استفاده از مهاربند برون‌محور را بر ضریب رفتار سازه‌ها بررسی کردند [۹]. کاپریلی و همکاران (۲۰۱۸) هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی به ارزیابی عملکرد سازه‌های دارای مهاربند برون‌محور تحت بار جانبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داده است که این سازه‌ها دارای شکل‌پذیری و مقاومت کافی در برابر بارهای جانبی هستند [۱۰]. هانس و همکاران (۲۰۱۰) نیز عملکرد سازه‌های دارای مهاربند برون‌محور را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند سازه‌های متداول که با سیستم مهاربند برون‌محور طراحی می‌شوند دارای مقدار دریفت در محدوده ایمنی جانی هستند و ظرفیت کافی را در برابر این بارها از خود نشان می‌دهند [۱۱].

عوامل بسیاری بر رفتار سازه‌ها، عملکرد و پاسخ آن‌ها در برابر بارهای جانبی مؤثرند که ممکن است در تحلیل و طراحی سازه‌ها از آن‌ها صرف‌نظر شود یا تأثیر آن‌ها به صورت غیرمستقیم در نظر گرفته شوند. تأثیر مؤلفه قائم بارهای لرزه‌ای [۱۲] و اثر اندرکنش خاک و سازه یکی از این عوامل هستند [۱۳]. تأثیر مؤلفه قائم بارهای لرزه‌ای می‌تواند بر عملکرد سازه‌ها در رکوردهای حوزه نزدیک تأثیرگذار باشد [۱۴]. تأثیر هم‌زمان مؤلفه قائم به همراه اثر اندرکنش خاک و سازه می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تأثیر فراوانی داشته باشد. بنابراین در این تحقیق سعی شده است با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی تأثیر این دو عامل بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های دارای مهاربند برون‌محور با لینک افقی برشی و خمشی بررسی شود. همچنین عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دارای لینک خمشی و برشی نیز به صورت مجزا با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک بررسی خواهد شد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی تأثیرات مؤلفه قائم، اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های دارای مهاربند برون‌محور با لینک افقی برشی و خمشی به صورت یک جا بررسی شده و نشان داده شده است که هر یک از این متغیرها تا چه میزان بر رفتار سازه‌های موردبررسی تأثیرگذارند و کدام یک از این پارامترها تأثیر بیشتری بر پاسخ سازه می‌گذارد. همچنین این تحقیق نشان داده است رفتار سازه‌های دارای لینک خمشی و برشی در شرایط اثر مؤلفه قائم و اندرکنش خاک و سازه تا چه میزان با یکدیگر متفاوت هستند. در ادامه، روش تحقیق و مدل‌های موردنظر این تحقیق معرفی شده است.

روش تحقیق

معرفی مدل‌های سازه‌ای

برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای موردنظر تحقیق از سیستم‌های قاب خمشی دوگانه با مهاربند برون‌محور ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با لینک‌های خمشی و برشی استفاده شده است. برای این منظور تمامی اتصالات تیر و ستون به‌صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. سیستم‌های سازه‌ای به‌صورت قاب خمشی فولادی با مهاربندهای برون‌محور مطابق با آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های فولادی و براساس روش LRFD مدل‌سازی و طراحی شده‌اند. بارگذاری لرزه‌ای براساس آیین‌نامه طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله (ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰) انجام شده است. پلان سازه به‌صورت یک پلان مربعی با سه دهانه با ابعاد ۴ متر انتخاب شده بود (شکل ۱). سازه‌ها در طبقاتی با ارتفاع یکسان طبقه ۳/۲ متر تحلیل و طراحی شده‌اند. بار مرده برابر با 600 kg/m^2 و بار زنده برابر با 200 kg/m^2 در نظر گرفته شده است. فرض شده است سازه در زمینی با خاک نوع III و خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد ($A=0.35g$) قرار دارد. مقاومت تسلیم فولاد برابر با ۲۴۰ مگاپاسکال و مقاومت نهایی برابر با ۳۷۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. موقعیت مهاربندها در دو دهانه میانی قاب‌های پیرامونی در نظر گرفته شده است. پس از مدل‌سازی و اعمال بارگذاری، سازه براساس استاندارد -۳۶۰ AISC ۱۰ در نرم‌افزار ایتبس طراحی شده است. در طراحی سازه سعی شده است ضمن رعایت معیار دررفت، نسبت تنش‌ها نزدیک به یک در نظر گرفته شود. خلاصه نتایج حاصل از مدل‌سازی و طراحی سازه‌های مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است. برای تیرها از مقاطع I شکل، برای ستون‌ها از مقطع باکس و دویل ناودانی برای مهاربندها استفاده شده است. در طراحی لینک خمشی و برشی (تیرهای پیوند) سعی شده است از مقطعی استفاده شود که برای هر دو رفتار خمشی و برشی معیارهای طراحی را برآورده کند. برای تعریف لینک برشی از تیر پیوندهایی با طول نیم متر و برای لینک خمشی از تیر پیوندهایی با طول یک متر استفاده شده است. اگرچه براساس روابط موجود در تعریف تیرهای پیوند خمشی و برشی این طول چک شده است اما برای اطمینان از عملکرد خمشی و برشی آن‌ها در بخش مربوطه رفتار آن‌ها بررسی شده است. اصل فرضیه این تحقیق مانند بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در زمینه اندرکنش خاک و سازه بر این اساس استوار بوده است که سازه بدون در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک و سازه طراحی شده است. طراحی سازه براساس استانداردهای طراحی و بارگذاری انجام شده است. پس از طراحی بررسی شده است که در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک و سازه تا چه حد بر رفتار و پاسخ لرزه‌ای سازه‌های موردنظر تحقیق تأثیرگذار بوده است.



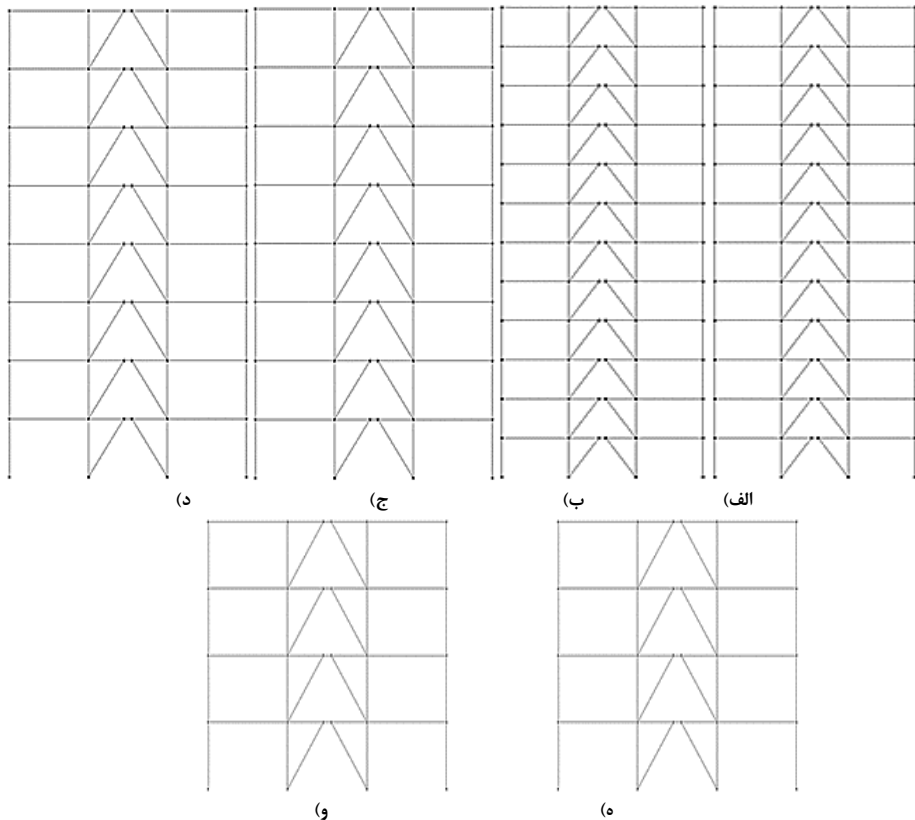
شکل ۱. پلان سازه.

جدول ۱. مشخصات مقاطع سازه‌ای.

۱۲ story					
	Beam	Inner column	Outer column	Brace	Link beam
S۱	IPE ۲۷۰	box ۵۰.X۴.۵	Box ۲۰.x۱.۶	۲UNP ۲۶۰	IPE ۵۰۰
S۲	IPE ۲۷۰	box ۵۰.X۴.۵	Box ۲۰.x۱.۶	۲UNP ۲۶۰	IPE ۵۰۰
S۳	IPE ۲۷۰	box ۵۰.X۴.۵	Box ۲۰.x۱.۶	۲UNP ۲۶۰	IPE ۵۰۰
S۴	IPE ۲۷۰	box ۴۰.X۴	Box ۲۰.x۱.۶	۲UNP ۲۶۰	nIPE ۵۰۰
S۵	IPE ۲۷۰	box ۴۰.X۴	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۶۰	IPE ۴۰۰
S۶	IPE ۲۷۰	box ۴۰.X۴	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۶۰	IPE ۴۰۰
S۷	IPE ۲۴۰	box ۳۶.X۳	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۴۰۰
S۸	IPE ۲۴۰	box ۳۶.X۳	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۴۰۰
S۹	IPE ۲۴۰	box ۳۰.X۲	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۴۰۰
S۱۰	IPE ۲۴۰	box ۳۰.X۲	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۶۰	IPE ۳۰۰
S۱۱	IPE ۲۴۰	Box ۲۰.x۱	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۶۰	IPE ۳۰۰
S۱۲	IPE ۲۴۰	Box ۲۰.x۱	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۶۰	IPE ۳۰۰
۸ story					
	Beam	Inner column	Outer column	Brace	Link beam
S۱	IPE ۲۴۰	box ۴۰.X۴	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۴۰۰
S۲	IPE ۲۴۰	box ۴۰.X۴	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۴۰۰
S۳	IPE ۲۴۰	box ۳۶.X۳	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۴۰۰
S۴	IPE ۲۲۰	box ۳۶.X۳	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۲۷۰
S۵	IPE ۲۲۰	box ۳۰.X۲	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۲۲۰	IPE ۲۷۰
S۶	IPE ۲۲۰	box ۲۴.X۲	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۸۰	IPE ۲۷۰
S۷	IPE ۲۲۰	box ۲۰.X۱	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۸۰	IPE ۲۷۰
S۸	IPE ۲۲۰	box ۲۰.X۱	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۸۰	IPE ۲۴۰
۴ story					
	Beam	Inner column	Outer column	Brace	Link beam
S۱	IPE ۲۲۰	box ۳۶.X۳	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۸۰	IPE ۲۷۰
S۲	IPE ۲۲۰	box ۲۰.X۱.۶	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۴۰	IPE ۲۷۰
S۴	IPE ۲۲۰	box ۲۰.X۱	Box ۲۰.x۱	۲UNP ۱۴۰	IPE ۲۷۰

پس از طراحی اولیه، یکی از قاب‌های مهاربندی پیرامونی برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای انتخاب شد و به صورت اجزای محدود در نرم‌افزار Perform-۳D به صورت غیرخطی مدل‌سازی گردید. برای مدل‌سازی غیرخطی از روش مفصل پلاستیک متمرکز استفاده شد. برای این منظور و براساس استاندارد Fema ۳۵۶ خصوصیات غیرخطی المان‌ها به صورت

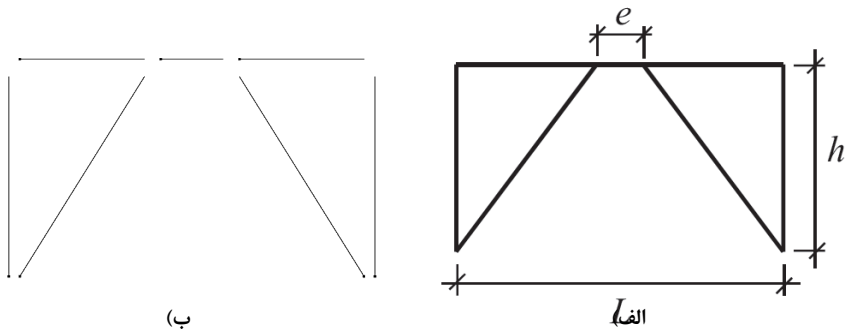
نقطه‌ای در مناطقی که بیشترین تلاش‌ها در آن قسمت وجود دارد اعمال گردید. برای مدل‌سازی غیرخطی تیرهای کناری و ستون‌ها در نرم‌افزار از المان FemaBeamColumn استفاده شده است که خصوصیات غیرخطی را به صورت متمرکز بر المان‌ها اعمال می‌کند. برای مدل‌سازی غیرخطی تیرهای پیوند از مفصل پلاستیک خمشی و برشی استفاده شده است به این ترتیب که در دو انتهای تیر پیوند مفاصل خمشی و در وسط آن مفصل پلاستیک برشی تعریف شده است. بنابراین صرف‌نظر از رفتار خمشی و برشی (طول یک متر و نیم متر تیر پیوند) خصوصیات خمشی و برشی برای پیوندها تعریف شده است تا عملکرد خمشی و برشی آن‌ها تحت بار لرزه‌ای بررسی شود. در شکل ۲ مدل‌های غیرخطی سازه‌های موردنظر این تحقیق در نرم‌افزار پرفورم نشان داده شده است. برای اعمال جرم ابتدا سطح بارگیری تیرهای موجود در قالب موردنظر با توجه به تیرریزی محاسبه شده است. براساس این سطح بارگیری مقدار بار گسترده زنده و مرده هریک از تیرها محاسبه شده است. با ضرب این بارهای گسترده با ترکیب بار $DL+0.2LL$ در سطح بارگیری هر گره در مدل دو بعدی مقدار جرم محاسبه شده و به هر گره به صورت مجزا اختصاص داده شده است.



شکل ۲. مدل‌های اجزای محدودی موردنظر تحقیق - قاب الف) ۱۲ طبقه با پیوند برشی ب) ۱۲ طبقه با پیوند خمشی ج) ۸ طبقه با پیوند برشی د) ۸ طبقه با پیوند خمشی ه) ۴ طبقه با پیوند برشی و) ۴ طبقه با پیوند خمشی.

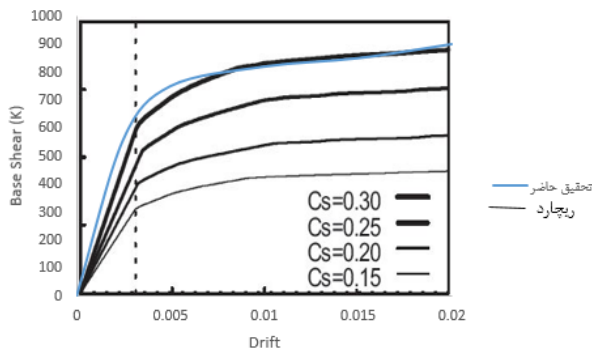
اعتبارسنجی مدل‌سازی

برای اطمینان از صحت نتایج لازم است تا یک اعتبارسنجی از مدل انجام شود. اگرچه تحقیقات فراوانی در زمینه سازه‌های دارای مهاربند واگرا انجام شده است، از تحقیق ریچارد و ماسه (۲۰۱۰) [۱۵] که به صورت عددی به بررسی تعیین سختی این قاب‌ها پرداختند استفاده شده است. آن‌ها یک مدل دو بعدی از قاب یک طبقه یک‌دهانه را به صورت عددی مدل‌سازی کردند و تحت تحلیل پوشش اور قرار دادند. اگرچه در این تحقیق از تحلیل پوشش اور استفاده نشده است اما این تحلیل اطلاعات مناسبی از مقاومت سازه و سختی آن در اختیار قرار می‌دهد. بنابراین سعی شده است تا برای ارزیابی صحت مدل‌سازی، قاب یک طبقه یک‌دهانه ریچارد و ماسه در نرم‌افزار پرفورم مدل‌سازی شود و سپس منحنی‌های پوشش اور آن‌ها با یکدیگر مقایسه شود. در شکل ۳ مدل دو بعدی ریچارد و مدل دو بعدی مدل‌سازی‌شده در این تحقیق در نرم‌افزار پرفورم نشان داده شده است:



شکل ۳. مدل‌های عددی الف) ریچارد ب) تحقیق حاضر.

برای مدل‌سازی این قاب از مفاصل پلاستیک متمرکز استفاده شده است. در محل پیوند از دو مفصل پلاستیک خمشی و یک برشی استفاده شده است زیرا در متن تحقیق ریچارد، اشاره‌ای به عملکرد خمشی یا برشی آن نشده است. پس از مدل‌سازی با استفاده از الگوی بار مثلثی سازه به اندازه $0.2/0$ در یفت سازه پوشش شده است و منحنی تغییرات در یفت سازه به برش وارد بر آن به عنوان منحنی پوشش اور با منحنی پوشش اور ریچارد مقایسه شده است. نتایج مقایسه این دو منحنی در شکل ۴ نشان داده شده است که نشان می‌دهد انطباق دو منحنی ظرفیت با یکدیگر مناسب هستند.



شکل ۴. نتایج مربوط به اعتبارسنجی.

معرفی بارهای لرزه‌ای

برای ارزیابی عملکرد سازه‌های موردنظر این تحقیق از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی در زمین نوع سه از هفت رکورد حوزه نزدیک استفاده شده است. در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای هر زمین از توصیه استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. سرعت موج برشی بین ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه به‌عنوان معیار زمین نوع ۳ در انتخاب رکوردها مدنظر قرار داده شده است. در جدول ۲ مشخصات رکوردهای موردنظر برای اعمال بار لرزه‌ای افقی در حوزه نزدیک برای زمین نوع سه نشان داده شده است. هر رکورد دانلودشده از سایت Peer دارای سه مؤلفه لرزه‌ای است که دو تا مربوط به مؤلفه افقی و یکی مربوط به مؤلفه قائم است. در این تحقیق از بین دو مؤلفه افقی مؤلفه‌ای که بیشترین مقدار PGA را داشته است به‌عنوان مؤلفه اصلی استفاده شده است. در این تحقیق سعی شده است در حد امکان از رکوردهای حوزه نزدیک و معیارهای این رکوردها استفاده شود. مواردی مانند بزرگا (بیشتر از ۶/۵)، فاصله از گسل (کمتر از ۱۵ کیلومتر) و پالس‌دار بودن از مواردی است که برای انتخاب رکوردها مدنظر قرار گرفته است. سازه‌ها در روی زمین از متغیرهایی مانند شدت زلزله (برای مثال PGA)، بزرگا، فرکانس قالب و پالس‌هایی که در رکوردها وجود دارد تأثیر بیشتری می‌گیرند. به همین دلیل در انتخاب رکوردها سعی شده است تا از رکوردهایی استفاده شود که تأثیر بیشتری بر سازه می‌گذارد نه صرفاً بر نوع خاک. از این روی متأسفانه در این تحقیق، به عامل دوام بار لرزه‌ای چندان توجه نشده است. دو رویکرد در مدلسازی و تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها وجود دارد: رویکرد اول این است که مدل سازه‌ای از درون خاک مدلسازی شود و حرکت زمین به‌صورت تغییر مکان‌های المان مدفون در خاک اعمال شود درست مانند یک مدلسازی یک سکو با شمع. در این حالت، بار لرزه‌ای به‌صورت تغییر مکان به شمع اعمال می‌شود و پاسخ آن در سازه بررسی می‌شود. نگرش دوم این است که سازه مدلسازی شود و بار لرزه‌ای به مرکز جرم طبقات اعمال شود. مانند بسیاری از تحقیقات صورت‌گرفته، در تحقیق حاضر از نگرش دوم استفاده شده است. بنابراین سازه طراحی و سپس مدلسازی غیرخطی شده است و بار لرزه‌ای به مرکز جرم طبقات اعمال شده است. این روش غیر از موجودیت در بسیاری از مجلات سازه و زلزله، روش پیشنهادی نشریه‌هایی مانند نشریه ۳۶۰ است که اساس مدلسازی خاک در این تحقیق هم بوده است. از این رو براساس انتخاب نوع روش مدلسازی و تحقیق از رکوردهای ثبت‌شده در روی زمین استفاده شده است. قطعاً مقیاس رکوردها براساس نوع زمین تأثیرات خاک را نیز لحاظ می‌کند و مواردی مانند بزرگنمایی خاک را در نظر می‌گیرد.

جدول ۲. مشخصات رکوردهای موردنظر.

Near	PGA (g)	Mag	Epicenter (km)	PGV (m/s)	Date	Station
Northridge	۰.۸۹۷	۶.۹۰E+۰۰	۱۳.۱	۱۳۰	۱۹۹۴	Sylmar - Converter Sta
Loma Perieta	۰.۶۴	۶.۹۰E+۰۰	۹	۵۵.۹	۱۹۸۹	BRAN
Chi Chi	۱.۱۶	۷.۹۰E+۰۰	۸.۹	۱۱۵	۱۹۹۹	TCU۰۸۴
Imperial Valley	۰.۵۲۸	۶.۵۰E+۰۰	۲۷	۹۱	۱۹۷۹	Elcentro#۵
Bam	۰.۸	۶.۶۰E+۰۰	۱.۷	۱۲۴	۲۰۰۳	Bam
Landers	۰.۷۹	۷.۲	۱۱	۱۴۳	۱۹۹۲	Desert Hot Springs
GAZLI	۰.۷۱	۶.۸	۳.۹	۷۱.۲	۱۹۷۶	Karakyr

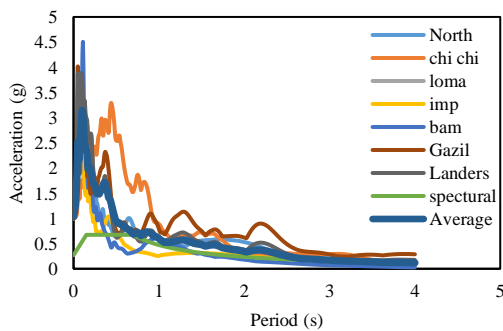
رکوردهای حوزه نزدیک دارای خصوصیتی هستند که آن‌ها را متمایز از سایر رکوردها می‌کند. خصوصیتی مانند تأثیر جهت‌پذیری، تأثیر تغییر مکان ماندگار، تأثیر فرادیواره و تأثیر مؤلفه‌های قائم از جمله مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک هستند که آن‌ها را متمایز از سایر رکوردها می‌کند. اگرچه تمامی رکوردهای مورد استفاده در این تحقیق به‌جز

رکورد مربوط به زلزله بم، براساس رکوردهای پیشنهادی FEMA P695 هستند که برای رکوردهای پیشنهادی خود تمامی معیارهای حوزه دور و نزدیک را مدنظر قرار داده‌اند. در رکورد بم نیز سعی شده است تا فاصله ایستگاه تا مرکز زلزله کمتر از ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شود. نسبت PGV به PGA این شتاب‌نگاشت برابر با ۱۵۵ می‌باشد که نزدیک به سایر رکوردها است. بزرگای زلزله‌های مورداستفاده در این تحقیق بیشتر از ۶/۵ در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان گفت رکوردهای مورداستفاده در این تحقیق معیارهای مربوط به رکورد حوزه نزدیک را دارا هستند [۱۶].

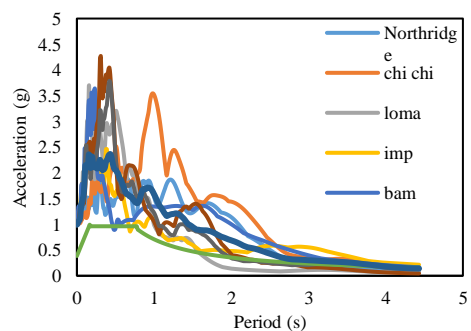
برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ابتدا باید رکوردهای خام مقیاس شوند و سپس مورد استفاده قرار گیرند. برای مقیاس کردن رکوردها از روش ارائه‌شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. مراحل مقیاس رکوردها برای استفاده در یک مدل دو بعدی به‌صورت زیر است:

ابتدا تمامی رکوردها به مقدار 1g هم‌پایه می‌شوند. طیف پاسخ سیستم یک درجه آزاد با فرض میرایی ۵ درصد برای هر رکورد استخراج می‌شود. میانگین طیف پاسخ‌ها باید با طیف طرح استاندارد مقایسه شود. اما از آنجایی که تحلیل‌ها در این تحقیق به‌صورت غیرخطی انجام می‌شوند ضریب رفتار برابر با ۱ فرض می‌شوند. همچنین با توجه به دو بعدی بودن مدل نیازی نیست که این طیف طرح در مقدار ۱/۳ ضرب شود. در هیچ‌یک از بازه بین دو دهم تا یک و نیم برابر چرخه سازه نباید میانگین طیف پاسخ از طیف طرح استاندارد کمتر شود. در شکل (۵-الف) طیف پاسخ رکوردها و طیف طرح نشان داده شده است. کمترین مقدار چرخه سازه مربوط به سازه ۴ طبقه با مقدار ۰/۵۱ و بیشترین برای سازه ۱۲ طبقه با مقدار ۱/۲ است. بنابراین کمترین مقدار دو دهم پیروی برابر با ۰/۱ و بیشترین مقدار ۱/۵ چرخه برابر با ۱/۸ ثانیه است. با مشاهده طیف‌ها مشاهده می‌شود که در این بازه میانگین طیف پاسخ برای تمامی سازه‌ها بیشتر از طیف طرح است بنابراین در تمامی سازه می‌توان ضریب مقیاس را برابر با ۱ در نظر گرفت.

یکی از اهداف تحقیق ارزیابی تأثیر مؤلفه قائم بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های موردنظر تحقیق است. برای مقیاس مؤلفه‌های قائم طیف طرح استاندارد در مقدار دوسوم ضرب شده و میانگین طیف‌های پاسخ با دوسوم طیف طرح استاندارد مقایسه شده است. ضریب مقیاس رکوردهای قائم برای سازه ۱۲ طبقه برابر با ۱/۱ و برای سایر سازه‌ها برابر با ۱ محاسبه شده است (شکل ۵-ب). براساس استاندارد ۲۸۰۰ میانگین طیف‌های پاسخ نباید در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر چرخه هر سازه کمتر از طیف طرح استاندارد باشد. همان‌طور که در متن توضیح داده شده است در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر چرخه هر سه سازه نمودار میانگین طیف‌های پاسخ بالاتر از مقدار طیف طرح استاندارد بوده است بنابراین استفاده از ضریب مقیاس 1g برای هر سه سازه می‌تواند مناسب باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۵. طیف پاسخ مربوط به رکوردها و طیف طرح استاندارد برای الف) مؤلفه‌های افقی ب) مؤلفه‌های قائم.

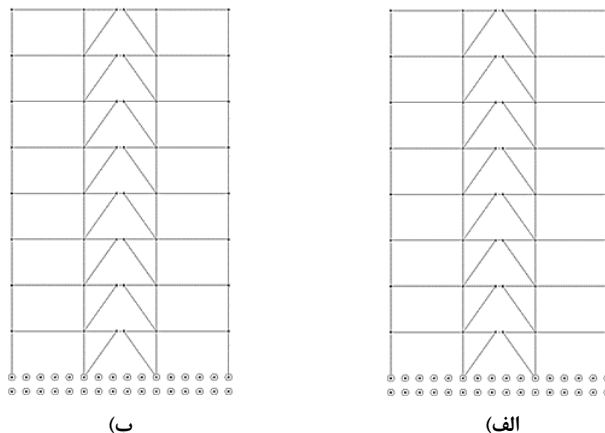
تأثیر اندرکنش خاک و سازه

برای مدل‌سازی خاک از مدل سختی گسترده در طول فنر استفاده شده است. سختی کلی خاک در جهت افقی، قائم و دورانی بر اساس روابط ۴-۸ نشریه ۳۶۰ محاسبه شده و سپس به صورت گسترده در طول پی به صورت فنرهایی با خصوصیات دورانی و محوری مدل‌سازی شده است. براساس نشریه ۳۶۰ با داشتن ابعاد پی (طول و عرض)، سختی برشی خاک و ضریب پواسن می‌توان سختی فنرهای موردنظر را محاسبه کرد. در محاسبات مربوط به سختی‌های دورانی و محوری خاک سرعت موج برشی برای خاک نوع سه برابر با ۳۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مقدار پارامترهای مربوط به سختی دورانی و محوری خاک نشان داده شده است:

جدول ۳. مقادیر متغیرهای مربوط به سختی خاک.

پارامتر	مقدار	واحد
B	۲	متر
g	۱۰	m/s ²
L	۱۵	متر
G	۶۹۳۰۰۰۰	Kg/m
G0	۱۳۸۶۰۰۰۰	Kg/m
v	۰.۳	-
Vs	۳۰۰	M/s
gama	۱۵۴۰	Kg/m ³
Kx	۱۱۲۴۸۶۵۰۹.۹	N/m
Kz	۱۵۴۹۲۹۰۱۶.۴	N/m
Kyy	۴۶۹۰۵۰۳۵۶۱	N/m

در جدول ۳ B عرض پی، L طول پی، g شتاب ثقل، G سختی برشی خاک (جدول ۴-۱ نشریه ۳۶۰)، G0 سختی برشی اولیه خاک (رابطه ۴-۶ نشریه ۳۶۰)، v ضریب پواسن، Vs سرعت موج برشی، Gama وزن مخصوص خاک است. مقادیر Kx، سختی افقی، Kz سختی قائم و Kyy سختی دورانی کلی خاک است. طول پی با فنرهایی با فاصله یک متر از هم تقسیم شده است و به هر نقطه یک فنر قائم، افقی و دورانی اختصاص داده شده است. سختی هر یک از فنرها با تقسیم مقادیر Kx، Kz و Kyy بر تعداد نقاط (۱۵) محاسبه شده است. بنابراین برای خاک نوع سه سختی افقی، قائم و دورانی هر فنر برابر با ۳۳۱۶۶۲۹، ۷۴۹۹۱۰۱ و ۱۰۴۱۱۵۲۰۷ کیلوگرم نیرویی محاسبه شده است. در شکل ۶ مدل‌های اجزای محدودی قاب‌های ۸ طبقه برای در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک و سازه نشان داده شده است.



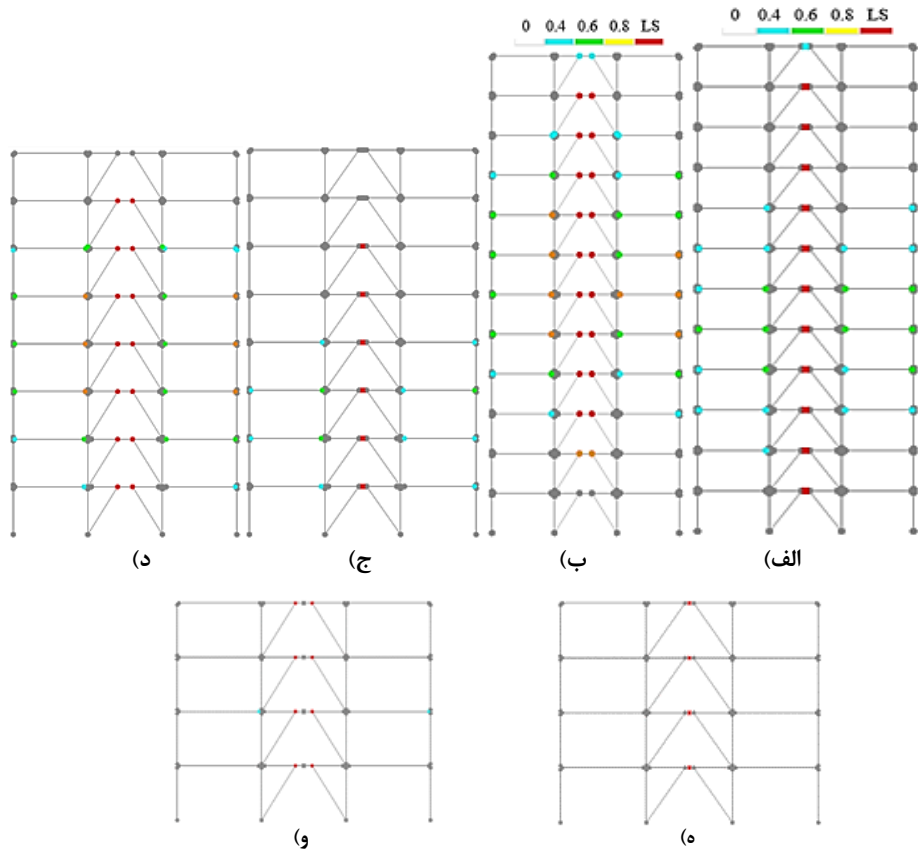
شکل ۶. مدل اجزای محدودی قاب ۸ طبقه با اثر اندرکنش خاک و سازه (الف) پیوند برشی (ب) پیوند خمشی.

پس از مدل‌سازی غیرخطی قاب‌های موردنظر این تحقیق تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده و رفتار سازه‌ها در اثر اعمال رکوردهای افقی (H) رکوردهای افقی و قائم (H+V) و اثر اندرکنش خاک و سازه (SSI) با پیوندهای برشی (Shear) و خمشی (Moment) ارزیابی شده است. موارد ذکر شده در واقع مدل‌های تحلیلی و نام‌هایی هستند که برای ارائه نتایج انتخاب شده است. در ادامه نتایج حاصل از تحقیق ارائه شده است.

بررسی نتایج

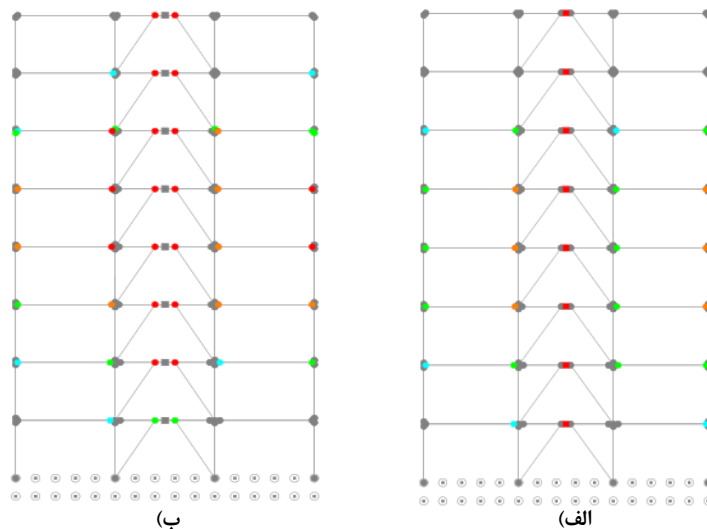
عملکرد تیرهای پیوند

در گام نخست ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های موردبررسی، عملکرد خمشی و برشی تیرهای پیوند بررسی شده است. همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شده است برای پیوند برشی از تیر پیوندی با طول نیم متر و برای پیوند خمشی از تیری با طول یک متر استفاده شده است. حال با بررسی عملکرد این تیرها صحت محاسبات سازه در بخش طراحی بررسی خواهد شد. در شکل ۷ عملکرد مفاصل پلاستیک در سطح LS برای سازه‌های موردنظر این تحقیق تحت رکورد زلزله بم بدون اعمال مؤلفه قائم و تأثیر اندرکنش خاک و سازه نشان داده شده است. در نرم‌افزار پرفورم مفاصل پلاستیک برشی به صورت مربع و خمشی به صورت دایره نشان داده می‌شوند. از آنجایی که این نرم‌افزار برخلاف نرم‌افزارهای ایتبس و سپ تمامی سطوح عملکرد را نشان نمی‌دهد تنها سطح عملکرد سطح LS بررسی شده است. همان‌طور که از شکل ۷ نتیجه می‌شود تیر پیوند در قاب‌های دارای پیوند نیم متر دارای عملکرد کاملاً برشی و در قاب‌های دارای پیوند یک متر دارای رفتار کاملاً خمشی هستند. به عبارت دیگر با وجود تعریف مفصل پلاستیک خمشی و برشی در تمامی تیرهای پیوند، در قاب‌های دارای لینک افقی نیم متر تنها مفصل پلاستیک برشی و در قاب‌های دارای پیوند افقی یک متر تنها مفصل پلاستیک خمشی تشکیل شده است. رنگ قرمز نشان می‌دهد دوران و تغییر شکل المان به سطح عملکرد LS رسیده است. مقایسه عملکرد قاب‌های دارای لینک برشی و خمشی نشان می‌دهد تعداد دوران در المان‌های قاب‌های دارای لینک برشی (به جز در تیر پیوند) کمتر از قاب‌های دارای لینک خمشی است. در واقع المان‌ها در قاب‌های دارای لینک برشی دوران کمتری را نسبت به قاب‌های دارای لینک خمشی تجربه کردند.



شکل ۷. مدل‌های اجزای محدودی موردنظر تحقیق - قاب الف) ۱۲ طبقه با لینک برشی ب) ۱۲ طبقه با پیوند خمشی ج) ۸ طبقه با پیوند برشی د) ۸ طبقه با پیوند خمشی ه) ۴ طبقه با پیوند برشی و) ۴ طبقه با پیوند خمشی.

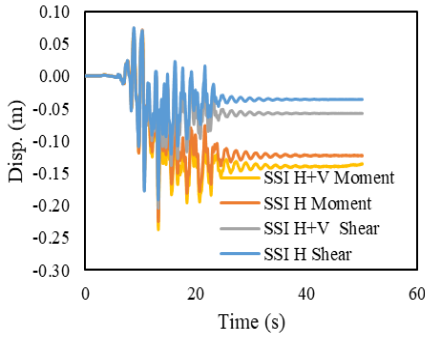
برای ارزیابی تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر دوران مفاصل پلاستیک قاب‌های موردنظر این تحقیق، در شکل ۸ عملکرد المان‌های سازه‌های دارای لینک برشی و خمشی در قاب‌های ۸ طبقه تحت رکورد زلزله بم نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن تأثیرات اندرکنش خاک و سازه در قاب‌های موردنظر این تحقیق سطح عملکرد المان‌ها را افزایش می‌دهد. مقایسه شکل‌های (۸-ب) با (۷-ج) و شکل (۸-الف) با (۷-د) مؤید این نکته است که تعداد المان‌هایی که به سطح عملکرد LS رسیده‌اند در حالتی که اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است بیشتر از حالتی است که از این اثر صرف نظر شده است.



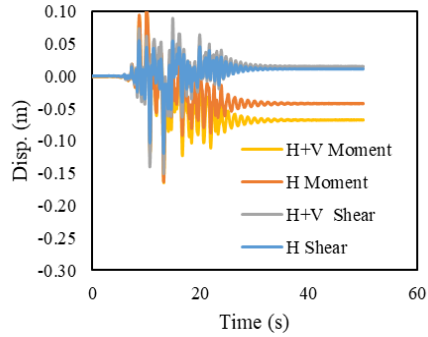
شکل ۸. دوران مفاصل پلاستیک در قاب‌های هشت طبقه با در نظر گرفتن تأثیرات اندرکنش خاک و سازه الف) با پیوند خمشی ب) پیوند برشی.

بیشینه جابه‌جایی و جابه‌جایی پسماند بام

یکی دیگر از عواملی که در ارزیابی عملکرد سازه‌ها موردنظر قرار می‌گیرد بررسی جابه‌جایی بام است. بیشینه جابه‌جایی بام در یک بار لرزه‌ای به‌عنوان بیشینه پاسخ لرزه‌ای سازه محسوب می‌شود. هرچه این جابه‌جایی و جابه‌جایی پسماند بیشتر باشد، سازه وارد شرایط بحرانی‌تری در آن بار لرزه‌ای خواهد شد. در شکل ۹ به‌عنوان نمونه منحنی‌های تاریخیچه زمانی مربوط به سازه‌های ۸ طبقه موردنظر این تحقیق با و بدون در نظر گرفتن تأثیرات اندرکنش خاک و سازه در رکورد زلزله لوماپریتا با و بدون تأثیرات مؤلفه قائم نشان داده شده است. آلفردو و همکاران (۲۰۰۰) در تحقیقی ارزیابی جابه‌جایی افقی بام را در قاب خمشی فولادی بررسی کردند. بررسی نتایج آن‌ها نشان داده است در صورتی که سازه وارد حالت غیرخطی نشود تأثیر مؤلفه قائم بر جابه‌جایی افقی بام چندان قابل ملاحظه نیست اما با وارد شدن سازه به فاز غیرخطی عموماً مؤلفه قائم باعث افزایش تغییر مکان سازه شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان داده است در سازه فولادی دارای پیوند افقی خمشی و برشی نیز افزوده شدن مؤلفه قائم عموماً جابه‌جایی بام را افزایش داده است [۱۷].



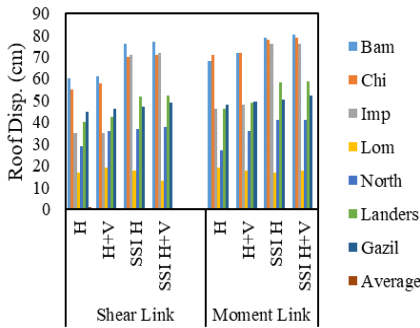
(ب)



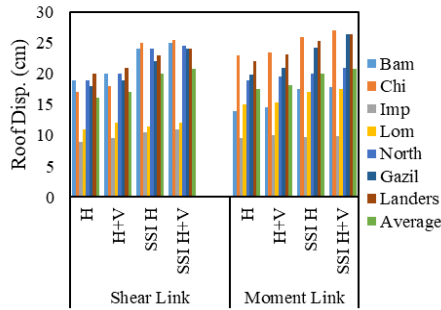
(ف)

شکل ۹. منحنی‌های تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی بام در سازه ۸ طبقه تحت رکورد زلزله لوماپریتا (الف) بدون اثر اندرکنش خاک و سازه (ب) با اثر خاک و سازه.

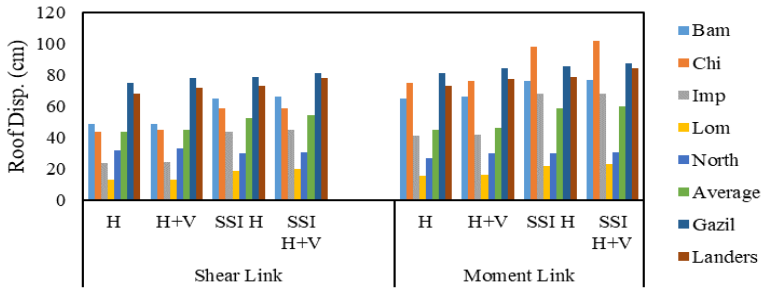
براساس شکل ۹ پاسخ قاب ۸ طبقه تحت رکوردهای زلزله لوماپریتا در حالت‌های با و بدون تأثیر اندرکنش خاک و سازه و با و بدون تأثیر مؤلفه قائم متفاوت از حالتی است که سازه با پای ثابت در برابر رکورد افقی تنها قرار دارد. افزوده شدن مؤلفه قائم به تحلیل باعث می‌شود پاسخ سازه کمی بیشتر از حالتی باشد که سازه تحت مؤلفه افقی تنها قرار دارد. افزوده شدن سختی خاک به‌جای تکیه‌گاه گیردار در پای سازه نیز باعث می‌شود که جابه‌جایی افقی بام بیشتر شود. تأثیر اندرکنش خاک و سازه باعث شده است تا ماکزیمم جابه‌جایی بام و جابه‌جایی پسماند در سازه افزایش یابد. در شکل ۱۰ مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی افقی بام و در شکل ۱۱ جابه‌جایی پسماند قاب‌های موردنظر این تحقیق در رکوردهای ذکر شده نشان داده شده است.



(ب)

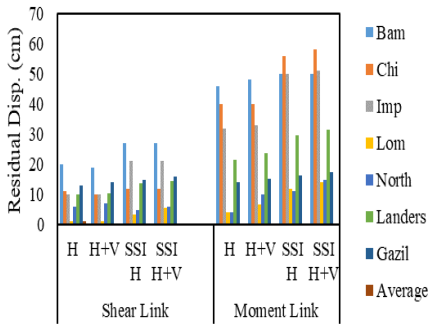


(ف)

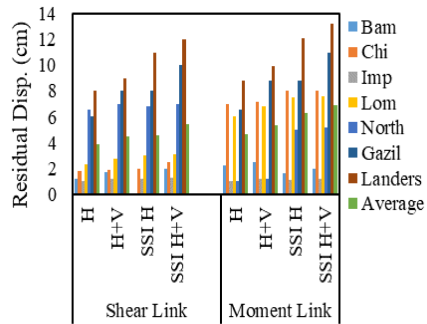


(ج)

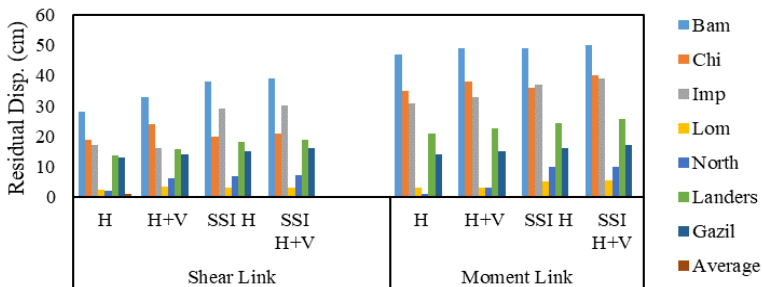
شکل ۱۰. مقادیر ماکزیمم جابجایی افقی بام در قاب‌های الف) ۴ (ب) ۸ (ج) ۱۲ طبقه.



(ب)



(ف)



(ج)

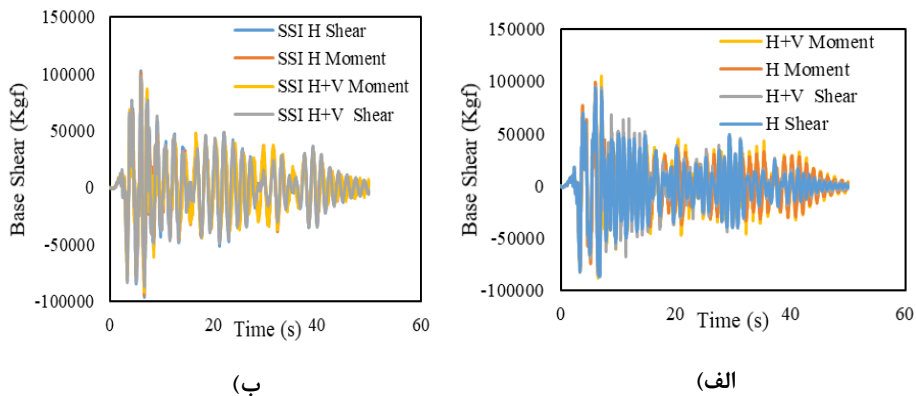
شکل ۱۱. مقادیر جابه‌جایی افقی پسماند بام در قاب‌های الف) ۴ (ب) ۸ (ج) ۱۲ طبقه.

مقادیر بیشینه جابه‌جایی بام و جابه‌جایی پسماند نشان می‌دهد تأثیر اندرکنش خاک و سازه جابه‌جایی بام را بیشتر کرده و تأثیر آن بیشتر از تأثیر مؤلفه قائم بر سازه است. همچنین در تمامی رکوردها قاب با پیوند برشی جابه‌جایی افقی بیشینه و جابه‌جایی افقی پسماند کمتری را نسبت به سازه دارای پیوند خمشی تجربه کرده است. میانگین جابه‌جایی‌های افقی بیشینه و پسماند مؤید این نکته است که پاسخ سازه در پیوند خمشی بیشتر از سازه با پیوند برشی است. در واقع

بیشترین میانگین جابه‌جایی پسماند و جابه‌جایی بیشینه بام مربوط به حالتی است که تأثیرات مؤلفه قائم و اندرکنش خاک و سازه در مدل‌ها دیده شده است و کمترین مقدار مربوط به حالتی است که این تأثیرات دیده نشده است.

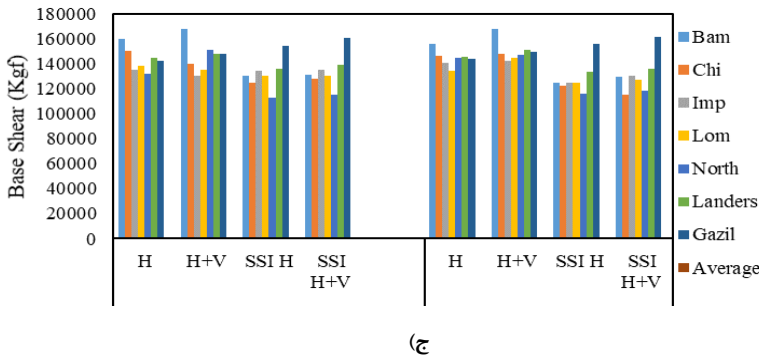
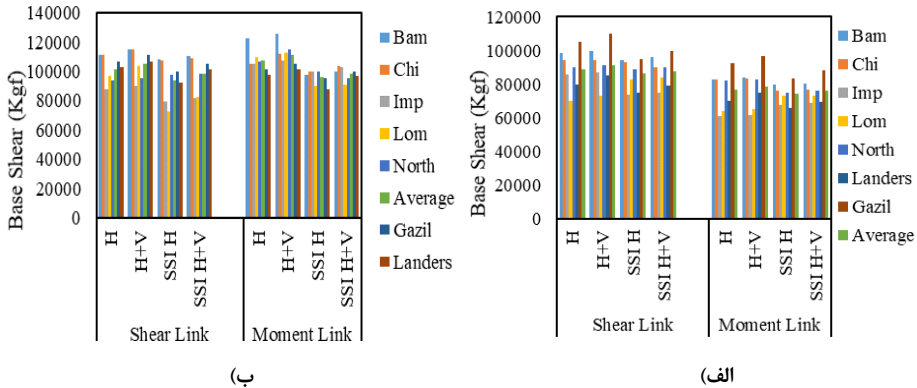
بیشینه برش پایه وارد بر سازه

یکی دیگر از عواملی که در ارزیابی عملکرد سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد بررسی برش پایه است. بیشینه برش پایه در یک بار لرزه‌ای به‌عنوان بیشینه بار جانبی وارد شده که سازه در برابر آن مقاومت کرده است محسوب می‌شود. در شکل ۱۲ نمونه منحنی‌های تاریخچه زمانی مربوط به سازه‌های ۸ طبقه موردنظر این تحقیق با و بدون در نظر گرفتن تأثیرات اندرکنش خاک و سازه در رکورد زلزله نورتریج با و بدون تأثیرات مؤلفه قائم نشان داده شده است. برای ارزیابی بهتر مقادیر بیشینه برش پایه وارد بر سازه‌های موردنظر این تحقیق تحت رکوردهای موردنظر در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. منحنی‌های تاریخچه زمانی برش پایه در سازه ۸ طبقه تحت رکورد زلزله نورتریج (الف) بدون اثر اندرکنش خاک و سازه (ب) با اثر خاک و سازه.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد همانند جابه‌جایی بام، اندرکنش خاک و سازه و افزوده شدن مؤلفه قائم به سازه تأثیراتی بر بیشینه برش پایه وارد بر سازه می‌گذارد. تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بیشینه برش پایه وارد بر سازه را کاهش می‌دهد. افزایش مؤلفه قائم بیشینه برش پایه وارد بر سازه را افزایش می‌دهد. تأثیرات استفاده از لینک خمشی و برشی بر بیشینه برش پایه در سازه با طبقات مختلف متفاوت است به‌طوری‌که در سازه ۴ طبقه به‌طور کلی استفاده از پیوند خمشی باعث کاهش برش وارد شده است اما در سایر مدل‌های سازه‌ای این روند برعکس است و در سازه دارای لینک برشی، برش پایه بیشتری به‌طور میانگین بر سازه وارد شده است. بنابراین می‌توان از میانگین نتایج بیشینه برش پایه وارد بر سازه‌ها این گونه استخراج کرد که برش پایه وارد بر سازه در حالتی که اندرکنش خاک و سازه لحاظ شده است کمتر از حالتی است که سازه با پای ثابت در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است و وارد شدن مؤلفه قائم در هر دو حالت با اندرکنش و بدون آن باعث افزایش برش پایه شده است. این روند در تحقیق ریچوردهوری و همکاران (۲۰۱۱) [۱۸] نیز مشهود است. نتایج تحلیل عددی آن‌ها نشان داده است که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های قاب خمشی فولادی باعث کاهش برش وارد بر سازه می‌شود. در تحقیق حاضر نیز نشان داده شده است که این نتیجه در سیستم سازه‌ای مهاربندی برون‌محور نیز وجود دارد و در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک و سازه باعث کاهش برش وارد بر سازه می‌شود.

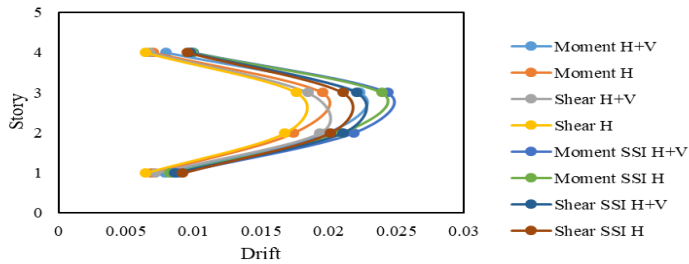


شکل ۱۳. مقادیر بیشینه برش پایه در قاب‌های الف) ۴ (ب) ۸ (ج) ۱۲ طبقه.

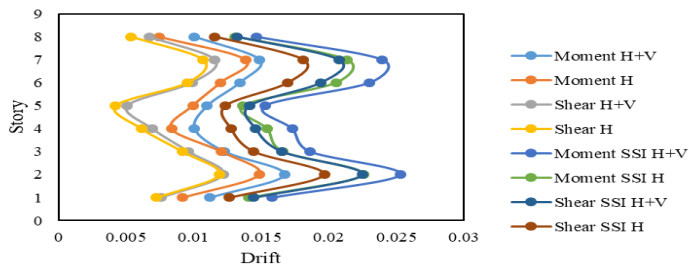
ارزیابی مقادیر دررفت طبقات

در ادامه برای ارزیابی پایداری سازه‌ها در برابر بار لرزه‌ای از مقادیر دررفت طبقات استفاده شده است. در شکل ۱۴ مقادیر میانگین بیشینه دررفت طبقات در پنج رکورد موردنظر این تحقیق نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در بین مدل‌های سازه‌ای این تحقیق مدل مربوط به پیوند برشی بدون در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش و تأثیر مؤلفه قائم کمترین مقدار میانگین دررفت طبقات را داراست. افزایش مؤلفه قائم به تحلیل باعث می‌شود این مقدار به صورت ناچیز افزایش یابد اما افزایش اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش بیشتر مقدار میانگین دررفت در سازه‌ها شده است. این روند در سازه با پیوند خمشی نیز وجود دارد اما باید ذکر شود که خود سازه دارای پیوند خمشی دررفت بیشتری را نسبت به سازه با پیوند برشی را تجربه کرده است. بنابراین بررسی دررفت نشان می‌دهد که پیوند برشی عملکرد بهتری را نسبت به سازه دارای پیوند خمشی داشته است. عبدالهی پارسا و همکاران (۲۰۱۶) [۱۹] در تحقیقی رفتار سازه دارای سیستم قاب خمشی فولادی را در اثر اندرکنش خاک و سازه و مؤلفه قائم بررسی کردند. بررسی آنها نشان داده است که مقدار بیشینه دررفت کل سازه‌ها در حالتی که تأثیر اندرکنش خاک و سازه با مؤلفه قائم در نظر گرفته شده است بیشتر از حالتی است که تنها تأثیر اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است و این حالت بیشتر از حالتی است که تنها مؤلفه افقی و قائم در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیق حاضر که در سازه دارای مهاربند برون محور است نیز منطبق بر تحقیق عبدالهی پارسا است که نشان داده شده است در سازه دارای پیوند افقی خمشی و برشی در نظر گرفتن تأثیر

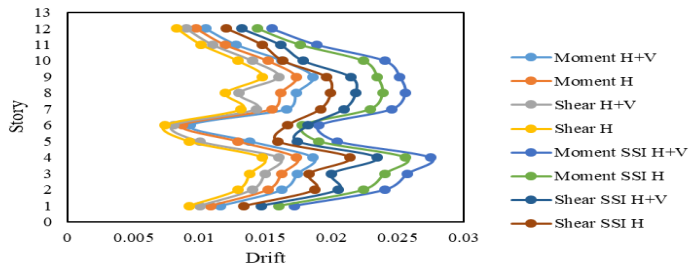
اندرکنش خاک و سازه و مؤلفه قائم باعث افزایش دریفت در این سازه‌ها شده است که تأثیر اندرکنش بیشتر از تأثیر مؤلفه قائم بوده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴. مقادیر میانگین دریفت در پنج رکورد در قاب‌های الف) ۴ (ب) ۸ (ج) ۱۲ طبقه.

نتایج تحقیق حاضر نشان داده است در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش بیشینه دریفت طبقات در کل سازه می‌شود. قطعاً این افزایش ممکن است در تمام طبقات رخ ندهد. برای مثال در سازه ۱۲ طبقه در سازه دارای پیوند خمشی بیشینه دریفت سازه در حالتی که اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است بیشتر از حالتی است که اندرکنش در نظر گرفته نشده است اما دریفت طبقه ششم کاهش داشته است.

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با پیوند خمشی و برشی تحت رکوردهای حوزه نزدیک، تأثیرات مؤلفه قائم بار لرزه‌ای و اثر در نظر گرفتن تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد:

- از نظر عملکرد سازه دارای پیوند برشی، جابه‌جایی افقی پسماند، دررفت طبقات کمتری نسبت به سازه دارای پیوند خمشی دارند بنابراین در طراحی‌ها در شرایط یکسان، استفاده از این پیوندها نسبت به پیوند خمشی به‌شدت توصیه می‌شود.
- تأثیر اضافه شدن مؤلفه قائم بار لرزه‌ای بر پاسخ و عملکرد این سازه‌ها چندان چشمگیر نیست و می‌توان از آن صرف نظر کرد.
- در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک و سازه باعث می‌شود برش پایه وارد بر سازه کاهش و دررفت جابه‌جایی افقی مطلق بام افزایش یابد و این افزایش در سازه دارای پیوند خمشی، بیشتر از سازه دارای پیوند برشی است.

References

- [1] Moradi, M., & Abdolmohammadi, M. (2020). Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method. *Journal of Constructional Steel Research*, 174(10), 106311. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106311>
- [2] Tavakoli, H., & Afrapoli, M. M. (2018). Robustness analysis of steel structures with various lateral load resisting systems under the seismic progressive collapse. *Engineering Failure Analysis*, 83, 88-101. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.10.003>
- [3] Badalassi, M., Braconi, A., Caprili, S., & Salvatore, W. (2013). Influence of steel mechanical properties on EBF seismic behaviour. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(6), 2249-2285. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9498-4>
- [4] Singhal, A., & Singh, Y. (2015). Seismic Performance of Eccentrically Braced Frame (EBF) Buildings. In V. Matsagar (Ed.), *Advances in Structural Engineering*. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2193-7_72
- [5] Mirzai, N. M., Attarnejad, R., & Hu, J. W. (2018). Enhancing the seismic performance of EBFs with vertical shear link using a new self-centering damper. *International Journal of Earthquake Engineering*, 35(4), 57-75. https://www.researchgate.net/publication/330353155_Enhancing_the_seismic_performance_of_EBFs_with_vertical_shear_link_using_a_new_self-centering_damper
- [6] Caprili, S., Morelli, F., Mussini, N., & Salvatore, W. (2018). Experimental tests on real-scale EBF structures with horizontal and vertical links. *Data in Brief*, 21(4), 1246-1257. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.126>
- [7] Mohsenian, V., Filizadeh, R., Ozdemir, Z., & Hajirasouliha, I. (2020). Seismic performance evaluation of deficient steel moment-resisting frames retrofitted by vertical link elements. *Structures*, 26, 724-736. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.043>
- [8] Dorri, F., Ghasemi, H., & Nowak, A. (2019). Developing a lateral load pattern for pushover analysis of EBF system. *Reliability Engineering and Resilience*, 1(1), 42-54. <https://doi.org/10.22115/rel.2019.184387.1009>
- [9] Abdollahzadeh, G., & Faghihmaleki, H. (2014). Response modification factor of SMRF improved with EBF and BRBs. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 6(4), 42-55. https://www.researchgate.net/publication/274509593_Response_modification_factor_of_SMRF_improved_with_EBF_and_BRBs
- [10] Caprili, S., Mussini, N., & Salvatore, W. (2018). Experimental and numerical assessment of EBF structures with shear links. *Steel and Composite Structures*, 28(2), 123-138. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.28.2.123>
- [11] Hines, E. M., & Jacob, C. C. (2010). Eccentric Braced Frame System Performance. In S. Senapathi, K. Casey, & M. Hoit (Eds.), *Structures Congress 2010*. American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41130\(369\)121](https://doi.org/10.1061/41130(369)121)

- [12] Hamidi, H., & Rouhi, A. (2019, November 11-13). *Investigation of Forward Directivity Effect on the Ductility Demand and Reduction Factor of PBPD EBF Frames*. 8th International Conferences of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran. https://www.researchgate.net/publication/337161019_Investigation_of_Forward_Directivity_Effect_on_the_Ductility_Demand_and_Reduction_Factor_of_PBPD_EBF_Frames
- [13] Buitrago Goyez, L. G. (2017). *Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Low-Rise Eccentrically Braced Frames* [Master, University of Arkansas]. Fayetteville, Arkansas. <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3938&context=etd>
- [14] Bolt, B. A., Tsai, Y. B., Yeh, K., & Hsu, M. K. (1982). Earthquake strong motions recorded by a large near-source array of digital seismographs. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(4), 561-573. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100406>
- [15] Richards, P. W. (2010). Estimating the Stiffness of Eccentrically Braced Frames. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 15(1), 91-95. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000027](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000027)
- [16] Nabid, N., Hajirasouliha, I., & Petkovski, M. (2021). Simplified Method for Optimal Design of Friction Damper Slip Loads by Considering Near-Field and Far-Field Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(9), 1851-1875. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1605316>
- [17] Salazar, A. R., & Haldar, A. (2000). Structural responses considering the vertical component of earthquakes. *Computers & Structures*, 74(2), 131-145. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(99\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(99)00031-0)
- [18] Raychowdhury, P. (2011). Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI). *Engineering Structures*, 33(3), 958-967. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.017>
- [19] Abdollahiparsa, H., Homami, P., & Khoshnoudian, F. (2016). Effect of vertical component of an earthquake on steel frames considering soil-structure interaction. *Korean Society of Civil Engineers*, 20(7), 2790-2801. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0687-y>