



Seismic Behavior Assessment of RC Precast Frame Damaged in Bojnord Earthquake 2017 Considering Soil-Structure Interaction Effects

R. Talebkhah^a, M. Adibi^{b*}, A.A. Yahyaabadi^c

Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

ABSTRACT: Experiences of previous earthquakes show the effects of soil-structure interaction and behavior of beam-column connections on the seismic behavior of the building structures. In this research, seismic vulnerability assessment of RC precast Frames is investigated by consideration of the effect of soil-structure interaction and nonlinear behavior of beam-column connections. The RC precast building represented in this study, damaged in the Bojnord earthquake 2017 and located on the soil type II of Iranian seismic design code. The soil-structure interaction is modeled using the Beam-on-Nonlinear-Winkler foundation. In this procedure, an array of vertical $q-z$ springs are used to capture vertical and rotational resistance of the foundation, while two springs, namely $p-x$ and $t-x$, are placed horizontally to capture the passive and sliding resistance of the foundation, respectively. The seismic vulnerability and performance of RC precast frames are evaluated using nonlinear static pushover, nonlinear dynamic time-history analyses, and incremental dynamic analyses (IDA). The numerical models are developed using OpenSees software by consideration of the nonlinear behavior of the beam-column joints. The numerical results showed the significant role of soil-structure interaction and beam-column connections on the seismic vulnerability and performance of RC precast buildings. In fact, seismic vulnerability of RC precast buildings was increased by considering soil-structure interaction and beam-column connections effects.

Review History:

Received: Jan. 05, 2020

Revised: Mar. 17, 2020

Accepted: Mar. 19, 2020

Available Online: Apr. 03, 2020

Keywords:

RC precast frames

Soil-structure interaction

Beam-column connections

Incremental dynamic analyses

Seismic fragility curve

1. INTRODUCTION

The effects of soil-structure interactions are generally not significant in the structure with rigid bases, while the nonlinear behavior of soil-structure interaction (SSI) causes various changes in the seismic response of structures with flexible bases [1]. The considered precast buildings consist of a precast column with corbel and semi-precast beams. The connectivity between the beam bottom and the corbel top is established by welding two steel plates and two threaded bars of the top beam passed through the stirrups of the beam and two holes in the column. Then, expandable grout is used to fill the space of the connection and two holes in the column. One of the important points in the implementation of precast concrete structures is how to connect the precast elements of the beam to the column, which will have a significant effect on the seismic behavior of these structures. So, in this paper, the effect of soil-structure interaction and beam-column connections are studied to seismic vulnerability assessment of RC precast Frames. The precast concrete building represented in this study referred to the 5-story precast building (Deesman) damaged during the Bojnord earthquake in Iran on 13th May 2017.

2. METHODOLOGY

For nonlinear static and dynamic analyses of the buildings, a 2D model was created in Opensees software. The displacement-base beam-column element with fiber section has been used for the modeling of beams and columns. Concrete01 (no tensile strength) and Steel02 were used to define concrete and steel materials. In addition, confinement of the concrete in columns was considered according to the relationships provided by Mander *et al.* [2]. In this study, the nonlinear behavior of precast beam-column joints was simulated by a nonlinear model proposed by Adibi *et al.* [3]. Due to the cracking pattern observed in the substructure, it can be assumed that the nonlinear behavior of the section at the end of the beams controls the nonlinear behavior of the substructure. Therefore, a nonlinear rotational spring is considered at the end of the beam at the connection to the column for introducing the nonlinear behavior of the substructure. Characteristics of the spring are largely dependent on the implementation details of the precast joints. The soil-structure interaction is modeled using the Beam-on-Nonlinear-Winkler foundation. In this procedure, an array of vertical $q-z$ springs is used to capture vertical and rotational resistance of the foundation, while two springs, namely $p-x$

*Corresponding author's email: m.adibi@ub.ac.ir



Table 1. Details of soil parameters

Soil type	C (kpa)	ϕ	ν	γ (gr/cm ³)	q_{ult} (kg/cm ²)
II	0	29	0.25	1.99	5.048

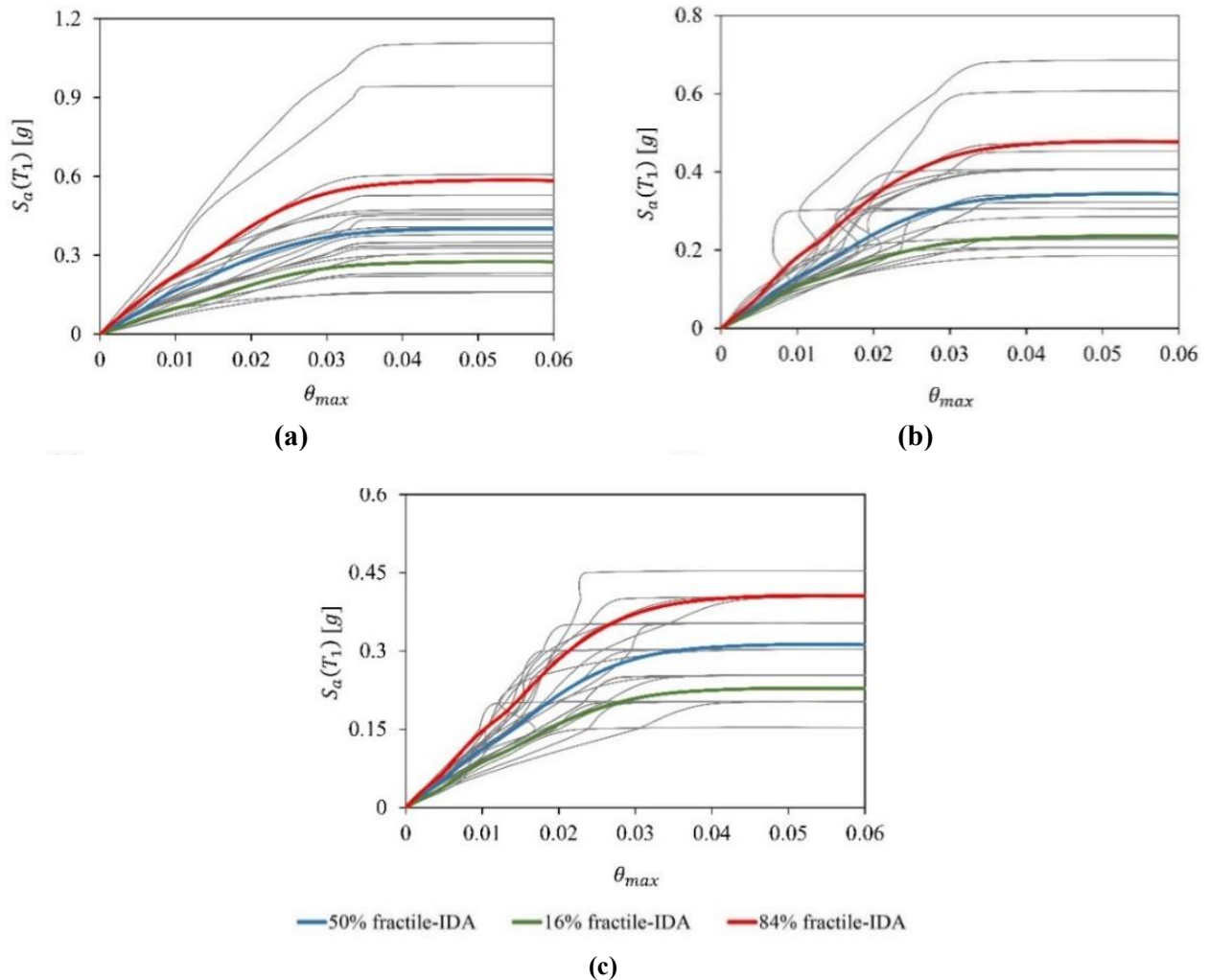


Fig. 1. Results of IDA for (a) Without SSI & BCC, (b) Without SSI & with BCC, and (c) With SSI & BCC

and $t-x$, are placed horizontally to capture the passive and sliding resistance of the foundation, respectively [4]. The geotechnical design parameters are presented in Table 1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Incremental dynamic analyses were conducted to develop fragility curves for various damage states. In IDA, a structural model is subjected to a set of ground motion records, scaled to different levels of intensity to describe the structural behavior from elastic to collapse [5]. The HAZUS-MH-MR-5 provisions were used to determine damage limit states (maximum inter-story-drift ratio). Fragility curves

provide a probabilistic framework to estimate the likelihood of seismic demand exceeding pre-defined limit-states, i.e., slight, moderate, extensive, and complete collapse. Fragility curves are also derived as a function of “first-mode” spectral acceleration, $S_a(T_1, 5\%)$, for the slight- complete collapse prevention limit state based on the statistical exploitation of the IDA results (Fig. 2) of the given structural systems (Fig. 3). Without considering soil-structure interaction (without SSI) and beam-column connections (without BCC), the median spectral acceleration amount was 0.0409g, 0.07245g, 0.1925g, 0.3865g, for slight, moderate, extensive, and complete damage, respectively. By considering beam-

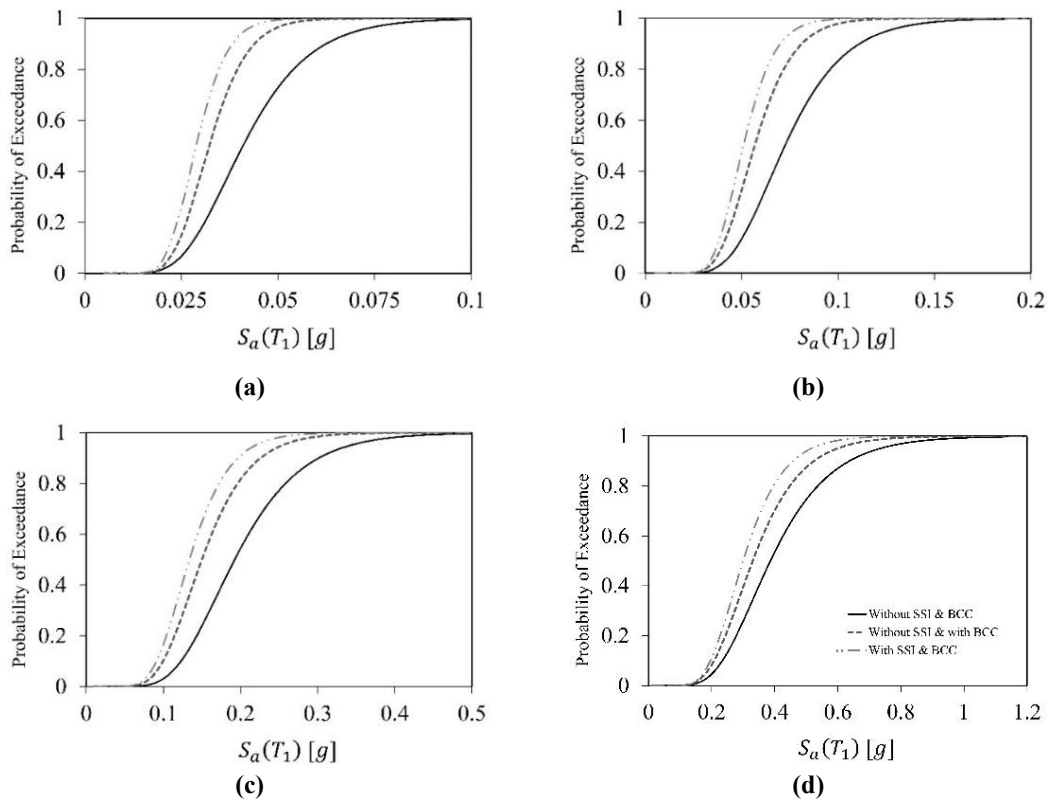


Fig. 2. Fragility curves for (a) slight, (b) moderate, (c) extensive, and (d) complete damage

column connections (with BCC) and without considering soil-structure interaction (without SSI) the median spectral acceleration amount was 0.03215g, 0.05675g, 0.15g, 0.3305g, for slight, moderate, extensive, and complete damage, respectively. By considering soil-structure interaction (with SSI) and beam-column connections (with BCC) the median spectral acceleration amount was 0.028g, 0.0509g, 0.13385g, 0.3g, for slight, moderate, extensive, and complete damage, respectively.

4. CONCLUSION

By considering soil-structure interaction (SSI) and beam-column connections (BCC) the seismic vulnerability of precast frames is increased at four hazard levels (slight, moderate, extensive, and complete). The results emphasized the necessity of consideration of SSI and BCC effects for safe structural design.

REFERENCES

- [1] M. Lou, H. Wang, X. Chen, Y. Zhai, Structure-soil-structure interaction: Literature review, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(12) (2011) 1724-1731.
- [2] J.B. Mander, M.J. Priestley, R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of structural engineering*, 114(8) (1988) 1804-1826.
- [3] M. Adibi, R. Talebkhah, A. Yahyaabadi, Simulation of cyclic response of precast concrete beam-column joints, *Computers and Concrete*, 24(3) (2019) 223-236.
- [4] Opensees, Open system for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley Ca, <https://opensees.berkeley.edu/>, (2016).
- [5] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3) (2002) 491-514.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Talebkhah, M. Adibi, A.A. Yahyaabadi, *Seismic Behavior Assessment of RC Precast Frame Damaged in Bojnord Earthquake 2017 Considering Soil-Structure Interaction Effects*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 671-674.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17608.6633](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17608.6633)





ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب بتن مسلح پیش‌ساخته آسیب دیده در زلزله بجنورد با لحاظ اندرکنش خاک-سازه

مهدی ادیبی*، علی اکبر یحیی‌آبادی، روزبه طالب‌خواه

دانشکده مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:

قاب‌های بتن مسلح پیش‌ساخته

اندرکنش خاک-سازه

اتصالات تیر به ستون

تحلیل دینامیکی افزایشی

آسیب‌پذیری لرزه‌ای

خلاصه: رخ داده‌های لرزه‌ای اخیر نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه اندرکنش خاک-سازه و همچنین رفتار اتصالات تیر به ستون بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح پیش‌ساخته است. از این رو در این پژوهش، تأثیر اندرکنش خاک-سازه و مدل‌سازی اتصالات تیر به ستون بر آسیب‌پذیری ساختمان پنج طبقه بتن مسلح پیش‌ساخته اجرا شده در شهر بجنورد و واقع بر خاک نوع II ارزیابی شده است. مدل‌های عددی با لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه و رفتار غیرخطی اتصالات تیر به ستون، توسط نرم‌افزار Opensees ساخته شده‌اند. برای لحاظ اثر اندرکنش غیرخطی خاک-سازه از مدل تیر واقع بر بستر غیرخطی وینکلر (BNWF) استفاده شده است. در مدل بستر غیرخطی وینکلر از فرم‌های قائم $q-z$ برای بیان مقاومت قائم و دورانی شالوده سطحی استفاده شده است و مقاومت اصطکاکی خاک نیز در این مدل در نظر گرفته شده است. از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و همچنین تحلیل دینامیکی افزایشی جهت ارزیابی عملکرد و آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های پیش‌ساخته استفاده گردیده است. همچنین مدل‌سازی رفتار اتصال تیر-ستون نیز با استفاده از یک مدل غیرخطی پیشنهادی انجام شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه و رفتار غیرخطی اتصالات تیر به ستون در ساختمان پیش‌ساخته مورد بررسی در این تحقیق، منجر به افزایش دوره تناوب و کاهش برش پایه نسبت به مدل بدون لحاظ این اثرات می‌گردد. با این وجود نتایج تحلیل حاکی از آن است که مدل‌سازی رفتار اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته منجر به کاهش سطح عملکرد و افزایش احتمال فروریزش ساختمان‌های پیش‌ساخته می‌شود.

۱- مقدمه

باشد. به منظور بررسی اندرکنش خاک-سازه دو روش مستقیم و زیرسازه وجود دارد [۱-۵].

در روش مستقیم قسمتی از خاک همراه با سازه مدل می‌شود و حرکت میدان آزاد خاک بر روی مرزهای مصنوعی محیط اعمال می‌شود. در حقیقت در این روش، قسمت مهمی از خاک اطراف سازه‌ی مدفون توسط اجزای محدود المان‌بندی شده و تحلیل در یک گام صورت می‌گیرد. از مزایای این روش می‌توان به لحاظ کردن مشخصات غیر همگن خاک یا سنگ اشاره نمود. در این روش زمانی که هندسه سیستم پیچیده بوده و یا رفتار غیرخطی مصالح سازه

یکی از مهم‌ترین مراحل در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها، تعیین حرکت زمین در محل ساخت سازه می‌باشد. با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه (SSI^1) در سازه‌های واقع بر خاک نرم یا نسبتاً نرم، رفتار غیرخطی زمین منجر به پاسخ‌های کاملاً متفاوت از پاسخ یک سازه با پای صلب می‌شود. تأثیر اندرکنش بر روی پاسخ سازه‌ها در مقایسه با پاسخ سازه واقع بر تکیه‌گاه صلب، بسته به خصوصیات سازه و خاک ممکن است به صورت کاهنده یا افزایشنده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.adibi@ub.ac.ir



ضریب اطمینان طراحی بر عملکرد قاب‌های خمشی فولادی ویژه کوتاه مرتبه با لحاظ اندرکنش خاک-سازه پرداختند. بدین منظور یک قاب پنج طبقه از نوع قاب خمشی واقع بر دو نوع خاک متفاوت (خاک نوع دو و چهار) در نظر گرفته شده است. روش تیر بر روی شالوده غیرخطی وینکلر به منظور مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است. مدل‌های مورد نظر تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی توسط هفت رکورد زلزله قرار گرفته و پاسخ های آن‌ها با هم مقایسه گردیده است. نتایج حاکی از آن است که لحاظ اندرکنش خاک-سازه تأثیر به‌سزایی بر عملکرد لرزه‌ای قاب های خمشی فولادی دارد [۱۸]. در پژوهش دیگر، رحمن شکرگزار و همکاران به تأثیر مدل‌سازی اتصالات تیر به ستون و خاک بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که لحاظ اثر اتصالات و اندرکنش خاک-سازه باعث کاهش برش پایه می‌شود [۶].

با توجه به استفاده از سیستم های پیش‌ساخته بتنی در مناطق لرزه‌ای کشور، ضرورت انجام مطالعات بر روی آسیب‌پذیری این نوع سیستم سازه‌ای احساس می‌شود. تجربه زلزله‌های اخیر از جمله زلزله ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶ در شهر بجنورد حاکی از آن است که نقش اتصالات تیر به ستون در ساختمان های پیش‌ساخته در عملکرد لرزه‌ای آنها تعیین‌کننده می‌باشد. با توجه به اینکه در اغلب تحقیقات گذشته [۱۹-۲۶] اثر اندرکنش خاک-سازه همراه با لحاظ اثر اتصالات تیر - ستون بر پاسخ‌های سازه‌های پیش‌ساخته ارزیابی نشده است، لذا در این پژوهش از یک مدل مناسب جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی اتصالات بهره‌برداری شده است [۲۷]. برای لحاظ اثر اندرکنش غیرخطی خاک-سازه از مدل تیر واقع بر بستر غیرخطی وینکلر استفاده شده است [۱۰]. مدل‌های عددی دو بعدی سازه با فرض عدم لحاظ اثر خاک و اتصالات، لحاظ اثر اتصالات و بدون لحاظ اثر خاک و همچنین لحاظ اثرات خاک و اتصالات به صورت همزمان توسط نرم‌افزار Opensees ساخته شده اند [۱۱]. در نهایت به توسعه منحنی شکنندگی برای سیستم قاب پیش‌ساخته بتنی بر مبنای نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA^۲) پرداخته می‌شود. علاوه بر این نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در این مقاله آورده شده است.

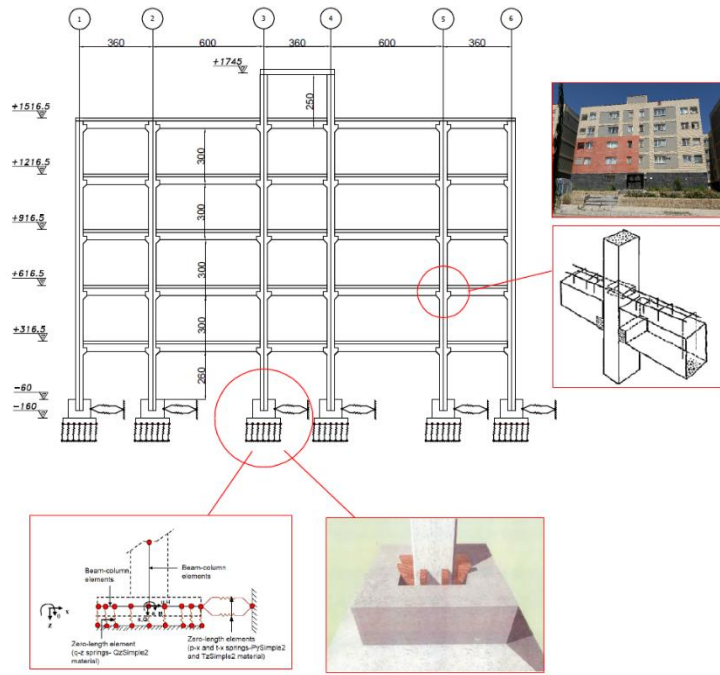
قابل توجه باشد، محاسبات زمان‌بر و بسیار حجیم است [۶-۸]. در روش زیرسازه، سیستم خاک-سازه به دو قسمت تقسیم می‌شود که قسمت اول سازه مستقر بر روی فندانسیون و قسمت دوم خاک که یک مرز مشترک با فندانسیون سازه دارد و با تعدادی فنر و میراگر مدل می‌شود. در این روش برخی از معایب روش مستقیم برطرف گردیده است. روش زیرسازه در مواقعی که بخشی از سیستم دارای هندسه ساده است اما بخش‌های دیگر هندسه پیچیده دارد، کاربرد و پاسخگویی مناسب دارد [۹]. روش تیر بر روی شالوده غیرخطی وینکلر (BNWF^۱) یکی از ساده‌ترین روش‌های برای مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه در نرم‌افزار Opensees^۱ است [۱۰، ۱۱]. مدل بیان شده شامل فنرهای مستقل غیرخطی قائم می‌باشد، که در امتداد طول پی قرار گرفته‌اند. این فنرها قابلیت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی و غیرخطی مصالح و به عبارتی جابه‌جایی‌های افقی، قائم و گهواره‌ای پی را دارا هستند [۱۲]. برخی پژوهش‌ها بر پدیده اندرکنش دینامیکی خاک-سازه و تأثیر آن در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به کمک روش زیرسازه متمرکز شده اند [۱۳، ۱۴] و در برخی دیگر از پژوهش‌ها مدل‌های عددی پیشرفته‌ای نسبت به مدل زیرسازه برای لحاظ اثرات اندرکنش خاک و سازه به کار گرفته شده است [۱۵]. [۱۶]. در ادامه به برخی از تحقیقات صورت گرفته بر روی اندرکنش خاک-سازه اشاره خواهیم نمود:

مکی و همکاران به بررسی اندرکنش خاک-سازه، تغییر نوع خاک، اهمیت پارمترهای خاک و نسبت سختی فندانسیون به خاک بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح پرداختند [۱۷].

حکم‌آبادی و فتاحی به بررسی تأثیر نوع فندانسیون و اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد لرزه‌ای یک ساختمان ۱۵ طبقه بتن مسلح به صورت سه بعدی پرداختند. آنها ساختمان مورد نظر را با چهار نوع فندانسیون متفاوت از جمله: تکیه‌گاه صلب، فندانسیون سطحی، شمع-رادیه و شمع اصطحکاکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که نوع فندانسیون تأثیر بسزایی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها با لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه دارد. همچنین باید دقت کافی در انتخاب نوع فندانسیون به منظور طراحی ایمن و مقرون به صرفه صورت گیرد [۱۵].

زارع آقبلاغ و همکاران به بررسی تأثیر نوع خاک، فندانسیون و

1 <https://opensees.berkeley.edu/>



شکل ۱. جزئیات اتصالات تیر به ستون و جزئیات شالوده گلدانی مورد بررسی
Fig. 1. Detailing of precast beam-column connection and foundation

می‌باشد. این ساختمان در منطقه با خطر نسبی زیاد و بر روی خاک نوع II مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران واقع شده است. ابعاد قاب پیش‌ساخته مورد بررسی در شکل ۱ و جزئیات میلگردگذاری اجزای تیر و ستون‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳- مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Opensees

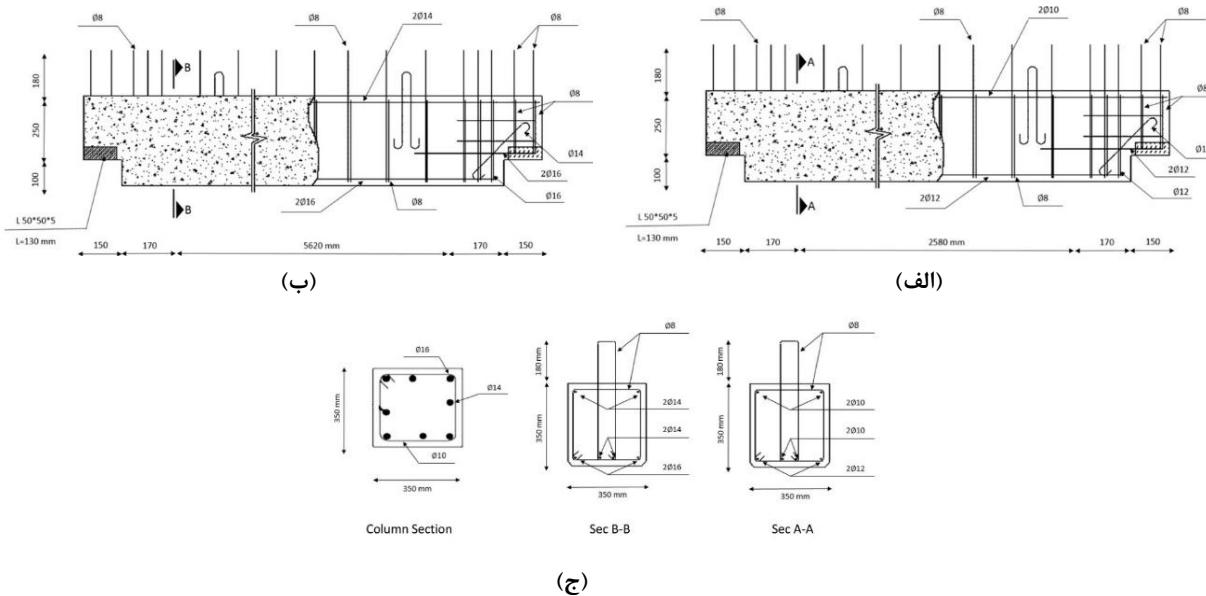
۳-۱- مدل‌سازی اثر اندرکنش خاک - سازه

مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر، یکی از رایج‌ترین روش‌ها در مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه محسوب می‌گردد. در این روش، از المان غیرخطی و یک بعدی فنر برای اتصال شالوده سازه به خاک اطراف استفاده می‌شود. این فنرها قادر به مدل‌سازی رفتار قائم، خمشی و جانبی هستند. شالوده به صورت یک تیر ارتجاعی توسط المان‌های یک بعدی تیر-ستون با سه درجه آزادی در هر گره مدل می‌شود که توسط تعدادی فنر غیرخطی نگهداری می‌گردد. شکل ۳ طرح کلی از مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر (BNWF) را برای فندانسیون‌های سطحی نشان می‌دهد. مشخصات سختی و میرایی این مدل بر مبنای روابط کازتاس محاسبه می‌گردد [۱۰، ۱۲۹]. در این مدل هر فنر مستقل از سایر فنرهاست و به صورت المان‌های یک بعدی با طول صفر (Zero length elements) در

۲- جزئیات ساختمان پیش‌ساخته مورد بررسی

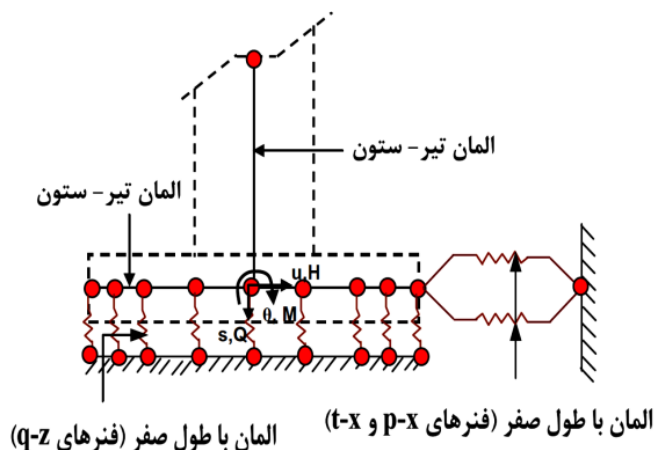
قاب‌ها در سیستم سازه‌ای پیش‌ساخته از ستون‌های پیش‌ساخته دارای نشیمن کربل، سقف با هسته ی توخالی و تیرهای نیمه‌پیش‌ساخته که در کارخانه تولید می‌شوند، تشکیل شده است. قطعات ستون پیش‌ساخته و تیر و سقف نیمه پیش‌ساخته، پس از حمل از کارخانه، در محل کارگاه نصب می‌شوند. تمام اتصالات سقف‌های با هسته توخالی با یکدیگر و به تیرها و همچنین ناحیه فوقانی تیرهای نیمه پیش‌ساخته به صورت درجا در محل کارگاه بتن ریزی خواهند شد. در این سیستم سازه‌ای، برای اتصال ستون به شالوده، از روش شالوده گلدانی استفاده می‌شود، در این روش گوه‌های چوبی در فاصله بین ستون و شالوده کوبیده می‌شوند، تا عملیات شاغول کردن ستون میسر شود، سپس فاصله بین شالوده گلدانی و ستون باید با بتن رده C40 پر شود.

در این تحقیق از ساختمان‌های پیش‌ساخته موجود در کشور ایران استفاده شده است و به صورت موردی از ساختمان پیش‌ساخته ۵ طبقه اجرا شده در شهر بجنورد (شکل ۱) معروف به ساختمان دیسمان انتخاب گردیده است. این ساختمان در زلزله ۲۳ اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ بجنورد نیز دچار آسیب‌هایی شده است [۲۸]. مقاومت فشاری بتن ۲۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم میلگردها ۴۰۰ مگاپاسکال



شکل ۲. جزئیات میلگردگذاری؛ (الف) جزئیات میلگردگذاری تیر به طول دهانه ۳۶۰ سانتی‌متر، (ب) جزئیات میلگردگذاری تیر به طول دهانه ۶۰۰ سانتی‌متر، (ج) مقاطع A-A، B-B و مقطع ستون‌ها

Fig. 2. (a) Details of the precast beam with length of 3600 mm, (b) Details of the precast beam with length of 6000mm, and (c) Cross sections of the columns and beams in precast beam-column joint



شکل ۳. مدل تیر بر شالوده غیرخطی وینکلر [10]

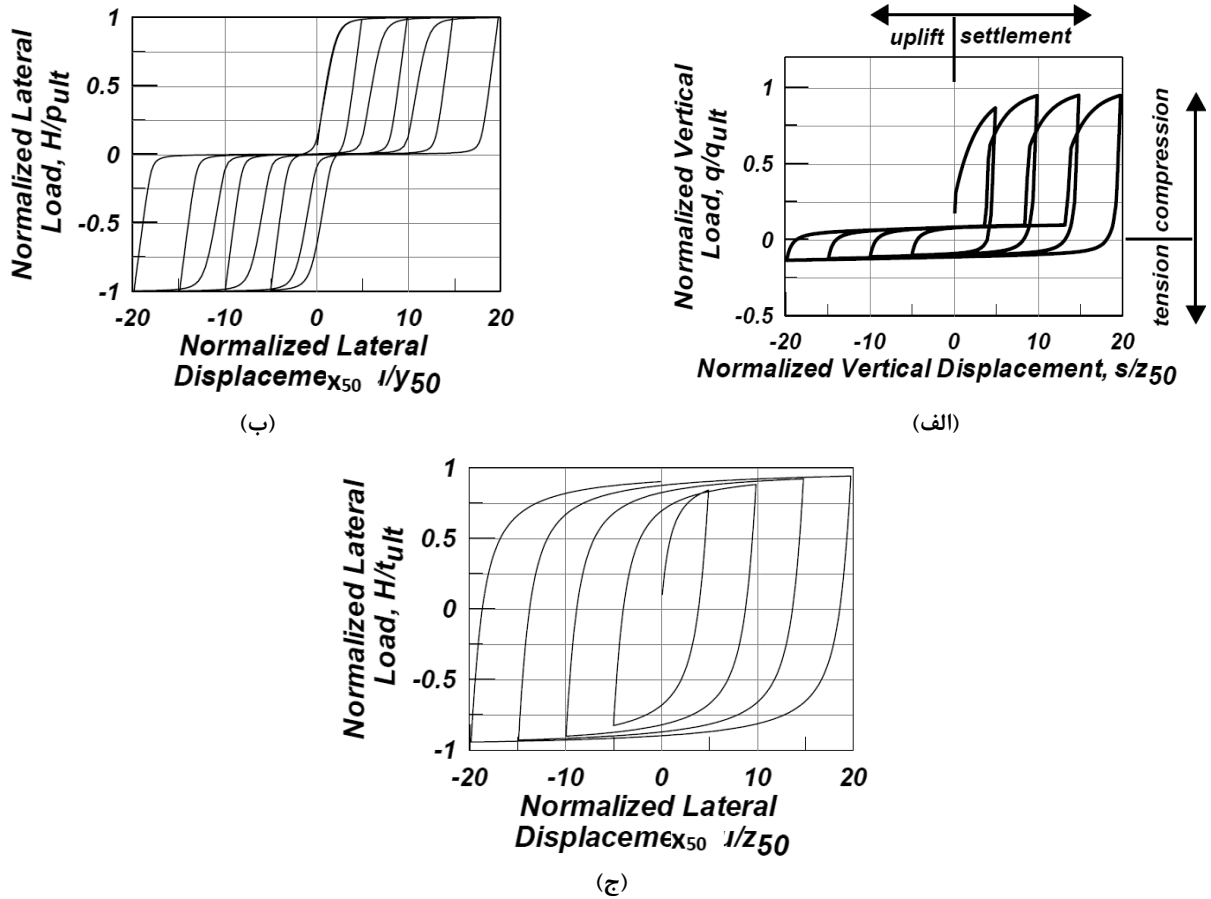
Fig. 3. Beam-on-Nonlinear-Winkler foundation model

رفتار تیر و ستون استفاده شده است (شکل ۵) [۱۱]. برای مدل‌سازی چشمه اتصال نیز از ۳ المان خطی با رفتار صلب استفاده شده است. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی اتصال پیش‌ساخته، از یک فنر دورانی غیرخطی (المان با طول صفر) در انتهای تیر در محل اتصال تیر به ستون استفاده شده است. پارامترهای نهایی اختصاص داده شده به فنر دورانی ایجاد شده در بر اتصال را که مهم‌ترین ویژگی مدل ارائه شده می‌باشند، می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود. این پارامترها در مرحله اول از کالیبره نمودن مدل ارائه شده رفتار آزمایشگاهی نمونه

نظر گرفته می‌شود. فنرهای قائم Q-Z برای بیان مقاومت قائم و دورانی شالوده سطحی بکار رفته‌اند. فنرهای p-x و t-x به ترتیب بیانگر نیروی مقاوم خاک در برابر جداره فندانیسیون و مقاومت اصطکاکی مرتبط با لغزش شالوده است. روابط حاکم بر این فنرها توسط منحنی برگشتی غیرخطی که بر مبنای نتایج چندین آزمایش انجام یافته و برای شالوده‌های سطحی کالیبره شده‌اند، بدست آمده و در نرم‌افزار Opensees به صورت مصالح QzSimple²، PxSimple¹ و TxSimple¹ نام‌گذاری گردیده است. این مصالح نسخه اصلاح شده مدل مصالح ارائه شده توسط بولانگر و همکارانش می‌باشد که برای استفاده در شمع‌ها پیشنهاد شده است [۱۱]. این اصلاحات بر مبنای نتایج آزمایشات گسترده بر روی شالوده‌های سطحی است. منحنی‌های برگشتی غیرخطی مدل‌های مصالح ذکر شده در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. مشخصات مکانیکی خاک ساختگاه در ساختمان مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۳- مدل‌سازی غیرخطی اتصالات پیش‌ساخته

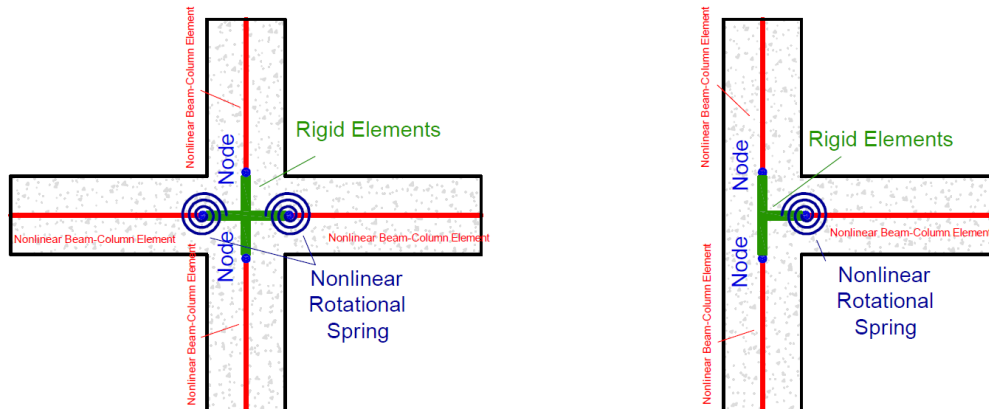
برای مدل‌سازی رفتار اتصالات پیش‌ساخته از مدل ارائه شده توسط ادیبی و همکاران استفاده گردید [۲۷]. در مدل ارائه شده در نرم‌افزار Opensees از المان دارای رفتار غیرخطی، برای مدل‌سازی



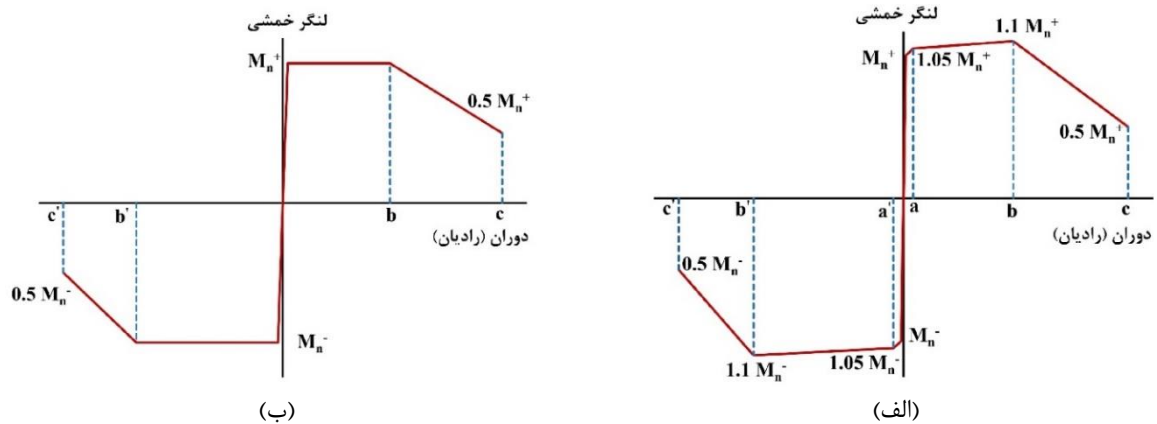
شکل ۴. پاسخ چرخه‌ای فنرهای الف) QzSimple2، ب) PxSimple1، ج) TxSimple1 [۱۰]Tysimple1
 Fig. 4. Cyclic response of. (a) q-z spring (QzSimple2), (b) p-x spring (PxSimple1), and (c) t-x spring (TxSimple1)

جدول ۱. مشخصات خاک ساختگاه (خاک نوع II)
 Table 1. Details of soil parameters

Soil type	C (kPa)	θ	ν	γ (gr/cm ³)	q_{ult} (kg/cm ²)
II	0	29	0.25	1.99	5.048



شکل ۵. مدل استفاده شده برای تعیین پارمترهای اتصال تیر به ستون در ساختمان‌های پیش‌ساخته [۲۷]
 Fig. 5. Proposed model for the exterior and interior precast joint substructures



شکل ۶. مشخصات غیرخطی فنر ارائه شده، (الف) در بر اتصال پیش‌ساخته خارجی، (ب) در بر اتصال داخلی [۲۷]
Fig. 6. Proposed Nonlinear characteristics of springs at the precast joints (a) Exterior joint (b) Interior joint

جدول ۲. مشخصات غیرخطی فنر ارائه شده در مدل اتصال پیش‌ساخته خارجی و داخلی [27]
Table 2. Proposed nonlinear deformations of spring at the precast exterior and interior joint

a (rad)	b (rad)	c (rad)	a' (rad)	b' (rad)	c' (rad)
0.001	0.022	0.045	0.001	0.03	0.045

که در زلزله ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶ شهر بجنورد آسیب دیده است، پرداخته می‌شود. برای بررسی رفتار لرزه‌ای این قاب پیش‌ساخته از روش پیشنهادی در این تحقیق برای لحاظ کردن اثر اتصالات با در نظر گرفتن فنر دورانی در ناحیه اتصال تیر به ستون استفاده شود. برای لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه از مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر استفاده شده است.

۴-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی

در شکل ۸ نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت الگوی بار جانبی مثلثی برای ساختمان پیش‌ساخته مورد بررسی در سه حالت با و بدون لحاظ رفتار اتصالات، و با در نظر گرفتن همزمان رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه، نمایش داده شده است. نتایج مقایسه برخی پارامترهای رفتاری قاب پیش‌ساخته که شامل محاسبه ضریب شکل‌پذیری، حداکثر مقاومت باربری و میزان سختی اولیه قاب می‌باشد، در جدول ۳ آورده شده است.

چنانچه از نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی رفتار قاب پیش‌ساخته تحت اثر الگوی بار وارده می‌توان دید، میزان باربری قاب مورد نظر بدون مدل‌سازی رفتار اتصال و در نظر گرفتن اندرکنش رفتار

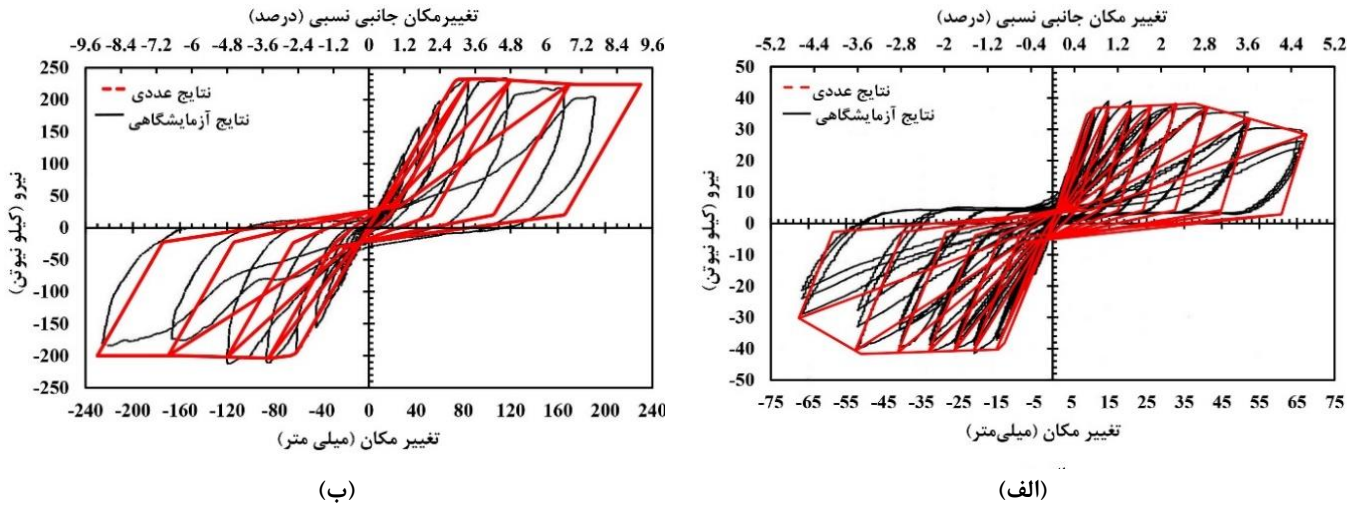
اتصالات پیش‌ساخته به دست آمده است و در مرحله بعد به صورت پارامتریک و بر اساس مشخصات سازه‌ای المان‌های سازه ارائه شده است. پارامترهای مدل غیرخطی فنر دورانی نمایش داده شده در شکل ۶ که بر اساس رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه شده، در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است تغییرشکل الاستیک فنر غیرخطی، برابر با دوران الاستیک تیر در نظر گرفته می‌شود و مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta = \frac{ML_b}{EI_b} \quad (1)$$

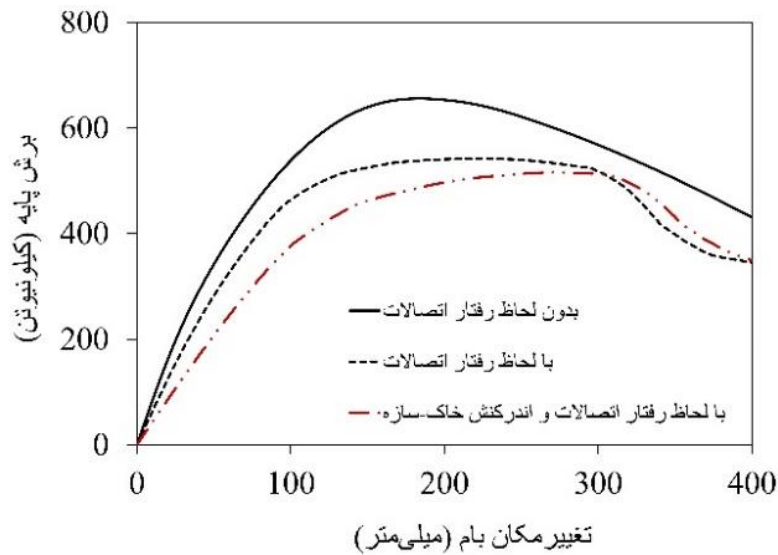
در رابطه (۱)، M ، L_b و E به ترتیب لنگر خمشی، طول تیر، مدول الاستیسیته و ممان اینرسی مقطع تیر می‌باشد. در شکل ۷ می‌توان تطابق منحنی‌های هیستریزس نیرو-تغییرمکان نمونه‌ی آزمایشگاهی اتصال خارجی و داخلی را با مدل‌سازی عددی پیشنهاد شده توسط ادیبی و همکاران مشاهده نمود.

۴- عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح پیش‌ساخته

در این بخش به بررسی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل تاریخچه زمانی یکی از قاب‌های ساختمان پیش‌ساخته دیسمان



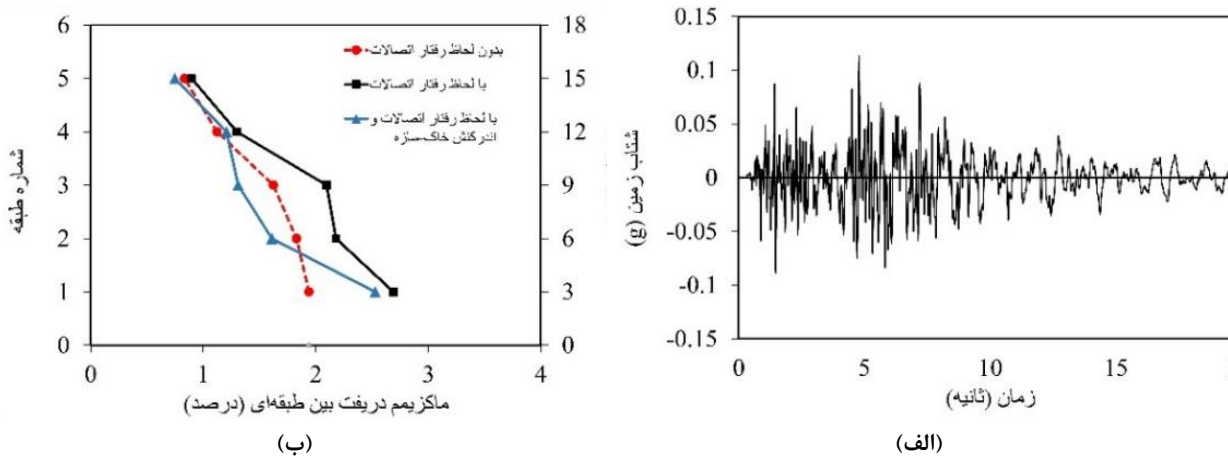
شکل ۷. مقایسه منحنی هیستریزیس نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه عددی. (الف) اتصال خارجی، (ب) اتصال داخلی [27]
 Fig. 7. Comparison between simulated Load- Displacement responses with obtained experimental results. (a) Exterior joint, (b) Interior joint



شکل ۸. نمودار برش پایه در مقابل تغییر مکان بام، بدون لحاظ رفتار اتصالات، با لحاظ رفتار اتصالات و با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه
 Fig. 8. Nonlinear static analysis results with and without soil-structure interaction and beam-column joints effects

جدول ۳. مقایسه پارمترهای لرزه‌ای مدل‌های مورد بررسی
 Table 3. Comparison of seismic parameters models

نوع مدل	پذیری شکل	بیشینه ظرفیت باربری (N)	سختی اولیه (N/mm)
بدون لحاظ رفتار اتصالات	۴/۸۵	۶۵۶۰۴۰	۸۴۵۹
با لحاظ رفتار اتصالات	۳/۹۵	۵۴۱۸۴۰	۶۳۶۹
با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه	۳/۳۳	۵۱۵۹۹۱	۴۲۹۹



شکل ۹. مقایسه پاسخ‌های تحلیل تاریخچه زمانی مدل‌های مورد بررسی با و بدون لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه. (الف) تاریخچه زمانی رکورد زلزله بجنورد، (ب) نسبت دررفت بین طبقه‌ای

Fig. 9. Comparison of time-history analysis results with and without soil-structure interaction and beam-column joints effects. (a) Bojnornd earthquake record, and (b) Maximum drift ratio

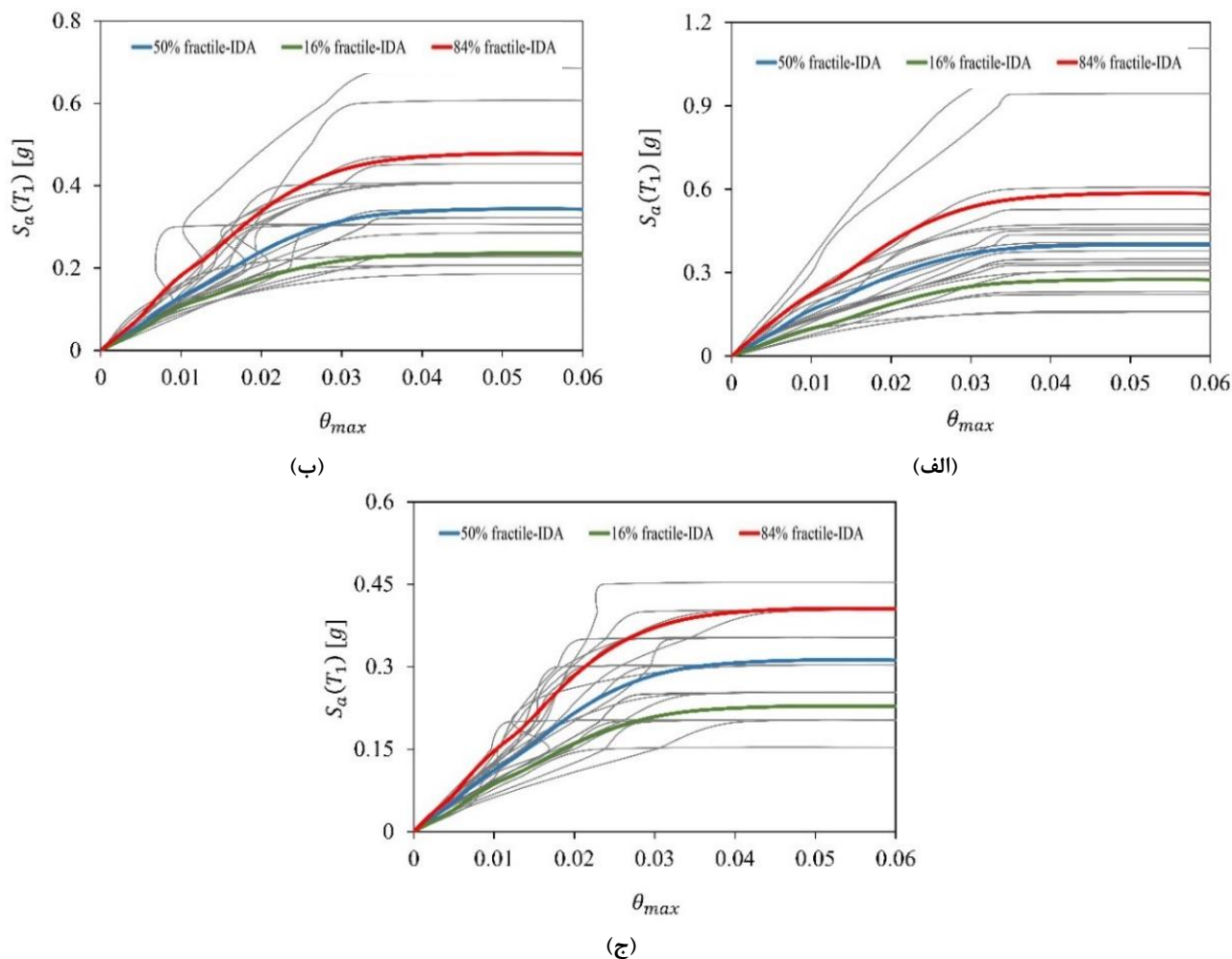
۴-۲- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

در این بخش نتایج تحلیل تاریخچه زمانی مدل‌های مورد بررسی تحت رکورد زلزله ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶ شهر بجنورد پرداخته می‌شود. در شکل ۹-الف تاریخچه زمانی رکورد زلزله بجنورد نمایش داده شده است. جهت اختصار نتایج مقادیر نسبت بیشینه دررفت بین طبقات برای مدل‌های مورد بررسی در شکل ۹-ب نمایش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که اندرکنش خاک-سازه و مدل‌سازی رفتار اتصالات تیر به ستون باعث کاهش قابل توجه در نسبت دررفت در تراز سقف دوم و سوم می‌گردد. در تراز سقف چهارم و پنجم مقادیر نسبت دررفت مدل‌های مورد بررسی تقریباً نزدیک به هم می‌باشد. زمان تناوب مود اول قاب‌های پیش‌ساخته بدون لحاظ رفتار اتصالات و تکیه‌گاه گیردار، با لحاظ رفتار اتصالات و تکیه‌گاه گیردار و همچنین مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه به ترتیب برابر 0.185 ، 1 و 1.23 ثانیه می‌باشد.

۵- تحلیل دینامیکی افزایشی

تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده، شامل تعداد زیادی تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های زلزله است. در این روش یک شتاب‌نگاشت تحت ضرایب مقیاس مختلف قرار می‌گیرد و حداکثر پاسخ سازه به ازای هر یک از ضرایب مقیاس از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت رکورد مقیاس شده، محاسبه می‌شود.

سازه با خاک تا نیرویی برابر با 600 کیلونیوتن، یعنی در حدود 20 درصد بیش از ظرفیت واقعی سازه افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه این نمودارها مشخص می‌شود که پس از عبور از تغییرمکان جانبی 300 میلی‌متر که تقریباً معادل با دررفت جانبی 2 درصد در سازه می‌باشد، هر سه منحنی دچار افت شدید در میزان باربری می‌شوند. مطابق با جدول ۳، میزان ضریب شکل‌پذیری سازه که بیانگر ظرفیت تغییرشکل‌های غیر ارتجاعی آن است، با لحاظ رفتار اتصالات $18/6\%$ نسبت به مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات کاهش می‌یابد. در مدلی که رفتار اتصالات و اندرکنش به صورت همزمان در نظر گرفته شده است، شکل‌پذیری به میزان $15/6\%$ نسبت به مدلی که تنها رفتار اتصالات لحاظ شده است، کاهش می‌یابد. میزان مقاومت بیشینه قاب سازه‌ای با لحاظ رفتار اتصالات نیز به میزان $17/4\%$ نسبت به مدلی که رفتار اتصالات کاهش می‌یابد. با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش به صورت همزمان مقاومت بیشینه 5% نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات لحاظ نشده است، کاهش می‌یابد. با محاسبه سختی اولیه قاب نیز مشخص می‌شود که سختی اولیه مدل با لحاظ کردن رفتار اتصالات به میزان $24/7\%$ نسبت به مدلی که رفتار اتصالات در آن لحاظ نشده است، کاهش می‌یابد. با لحاظ کردن تأثیرات رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه، سختی اولیه به میزان $32/5\%$ نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. نتایج تحلیل IDA به همراه چندک‌های آماری ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ برای مدل‌های موردی. (الف) بدون لحاظ رفتار اتصالات، (ب) با لحاظ رفتار اتصالات، (ج) با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه

Fig. 10. Results of IDA for (a) Without soil-structure interaction and beam-column joints effects, (b) Without soil-structure interaction & with beam-column joints effects, and (c) With soil-structure interaction and beam-column joints effects

خاک نوع II استاندارد ۲۸۰۰ ایران، استفاده شده است. این مجموعه شامل ۱۰ عدد رکورد حوزه دور و ۵ عدد رکورد حوزه نزدیک با اثر پالس و ۵ عدد رکورد حوزه نزدیک بدون اثر پالس می‌باشد. مشخصات رکوردهای انتخابی در جدول ۴ و طیف‌های شبه‌شتاب مربوطه در میرایی ۵ درصد در شکل ۱۱ آورده شده است. دستورالعمل HAZUS-MH MR 5- که توسط FEMA منتشر شده، جهت تعیین محدوده شکست انتخاب شده است [۳۳]. در دستورالعمل HAZUS-MH 5-MR، چهار سطح خرابی کم، متوسط، زیاد و کامل بر حسب معیار حداکثر دررفت بین طبقه‌ای، در نظر گرفته شده، که مقادیر متناظر آن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲۶، ۰/۰۰۴۷، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۳۵ می‌باشد. نتایج منحنی‌های IDA و همچنین منحنی‌های خلاصه شده IDA

شتاب نگاشت به گونه‌ای به صورت فزاینده مقیاس می‌شود که بتوانند محدوده رفتار خطی، غیرخطی و در نهایت فروریزش سازه را تحت پوشش قرار دهد [۳۰، ۳۱]. برترو^۱ در سال ۱۹۷۷، اولین فردی بود که مفهوم مقیاس کردن بارگذاری لرزه‌ای را مطرح نمود [۳۲]. برای انجام تحلیل دینامیکی فزاینده قاب‌های بتن مسلح پیش‌ساخته و همچنین قاب‌های خمشی مشابه، شتاب طیفی مود اول رکوردهای اعمال شده به سازه از ۰/۰۵g تا خرابی کامل (آستانه فروریزش) با گام‌های ۰/۰۵g مقیاس شدند. سپس با تحلیل سازه در هر گام توسط نرم‌افزار OpenSees، منحنی‌های IDA ترسیم گردید.

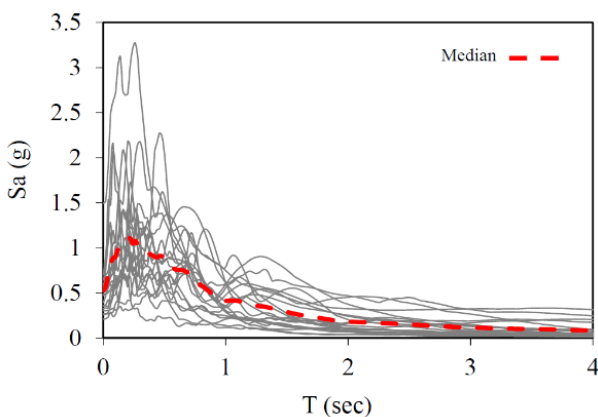
در این پژوهش از یک مجموعه ۲۰ تایی رکورد زلزله منطبق بر

1 V.V. Bertero

جدول ۴. مجموعه رکوردهای استفاده شده در این پژوهش [۳۴]

Table 4. Details of 20 earthquake ground motions considered in this study

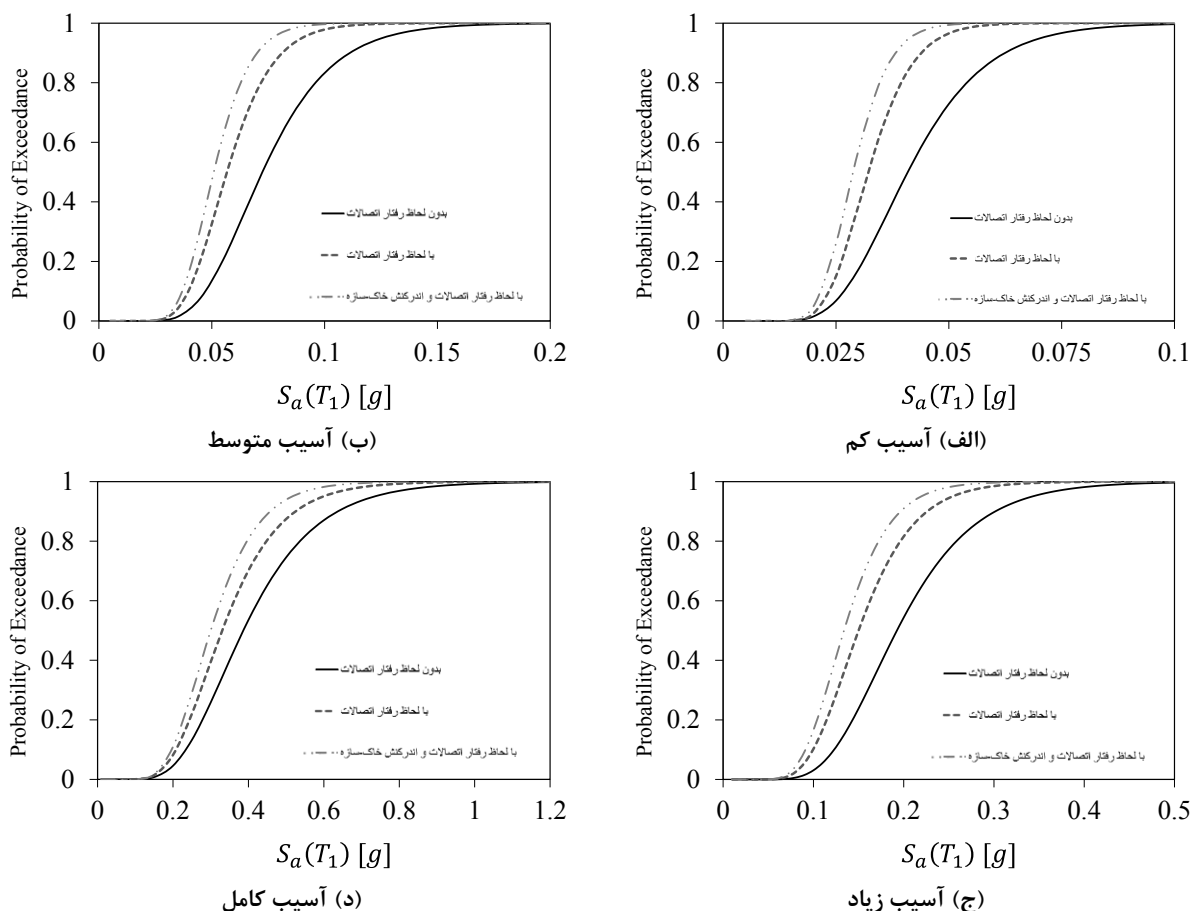
Far-Field Record Set						
No	Event	Year	Station Name	M	R(KM)	Vs3 (m/s ²)
1	Hector Mine	1999	Hector	7.1	11.7	685
2	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	7.1	609
3	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.5	13.5	523
4	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.4	12.6	724
5	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.6	26.0	705
6	Friuli, Italy	1976	Tolmezzo	6.5	15.8	425
7	Tabas	1978	Deyhook	7.4	13.9	471
8	Whittier Narrows-01	1987	San Gabriel-E Grand Av	5.9	15.2	401
9	Parkfield	1966	Temblor Pre1969	6.1	15.9	528
10	Victoria, Mexico	1980	Cerro Prieto	6.3	14.3	472
Near Fault Record Set With Pulse						
11	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.0	8.2	713
12	Landers	1992	Lucerne	7.3	2.2	685
13	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View	5.3	9.0	441
14	Chi-Chi, Taiwan	1978	TCU102	7.6	7.7	714
15	Bam	2003	Bam	6.5	0.0	487
Near Fault Record set Without Pulse						
16	Gazli, USSR	1976	Karakyr	6.8	5.5	660
17	Nahanni, Canada	1985	Site 2	6.8	4.9	660
18	Loma Prieta	1989	Corralitos	6.9	3.9	462
19	Cape Mendocino	1992	Cape Mendocino	7.0	7.0	514
20	Silakhor	2006	Chalan Choolan	5.9	9.0	428



شکل ۱۱. طیف شبه‌شتاب مجموعه رکوردهای انتخابی در میرایی ۵ درصد
Fig. 11. Response spectrum of 20 earthquake ground motions

در شکل ۱۰ آورده شده است. به منظور رسم نمودارهای خلاصه شده IDA، چندک‌های آماری ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ مقادیر شتاب‌های طیفی در مود اول در پنج دریفیت مختلف و همچنین مقدار دوران بیشینه^۱ محاسبه و مقایسه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که لحاظ کردن رفتار اتصالات نسبت به عدم لحاظ رفتار اتصالات تیر به ستون به ترتیب منجر به کاهش ۶/۵٪، ۱۷/۴٪ و ۲۰٪ در برآورد چندک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ می‌شود. میزان این کاهش با لحاظ کردن همزمان تأثیر رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه نسبت به مدلی که تنها

$$1 \theta_{max}$$



شکل ۱۲. مقایسه منحنی‌های شکنندگی برای مدل‌های مورد بررسی با و بدون لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه
Fig. 12. Fragility curves for (a) slight, (b) moderate, (c) extensive, and (d) complete damage

در رابطه (۲)، P تابع احتمال، LS حالت حدی یا حالت آسیب مورد نظر و IM شاخص شدت زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. پارامتر S_T بیانگر مقدار شتاب طیفی است که احتمال آسیب سازه برای آن محاسبه می‌شود. $\hat{\mu}_{\ln(S_{CT})}$ و $\hat{\sigma}_{\ln(S_{CT})}$ به ترتیب تخمین مقدار میانگین و انحراف معیار لگاریتم مقادیر شتاب طیفی است که منجر به حالت آسیب مورد نظر شده‌اند [۳۵]. این مقادیر بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده قاب‌ها تحت بیست رکورد انتخابی برای هر حالت آسیب محاسبه شده‌اند.

در این مطالعه، منحنی‌های شکنندگی طبق رابطه (۲) و تنها با در نظر گرفتن عدم قطعیت، رکورد به رکورد محاسبه شده است. در شکل‌های ۱۲ الف، ب، ج و د می‌توان منحنی‌های شکنندگی مدل‌های مذکور برای چهار حالت خرابی کم، متوسط، شدید و کامل که به کمک نتایج تحلیل IDA ترسیم شده‌اند، را برای قاب پیش

رفتار اتصالات تیر به ستون در نظر گرفته شده است، برابر با ۱۶٪، ۲۱/۴٪ و ۱۹٪ می‌باشد.

۶- توسعه منحنی شکنندگی

منحنی‌های شکنندگی احتمال فراگذشت پاسخ سازه از حد مجاز عملکردی را در شدت‌های متفاوت زمین‌لرزه بیان می‌کنند. یک نقطه بر روی منحنی شکنندگی، نشان‌دهنده احتمال تجاوز آسیب سازه تحت یک زلزله با شدت مشخص از حالت خاصی از خسارت می‌باشد. منحنی شکنندگی برای هر حالت آسیب را می‌توان از انطباق یک توزیع لوگ نرمال بر مقادیر شاخص شدت حرکات زمین که منجر به حالت آسیب مورد نظر می‌شوند، بیان کرد:

$$P[LS | IM = S_T] = \phi \left(\frac{\ln(S_T) - \hat{\mu}_{\ln(S_{CT})}}{\hat{\sigma}_{\ln(S_{CT})}} \right) \quad (2)$$

جدول ۵. ظرفیت میانه فروریزش مدل‌های مورد بررسی با و بدون لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه

Table 5. Structural Fragility curve parameters for R_c precast frames with and without soil-structure interaction and beam-column joints effects

شتاب طیفی میانه (g)				نوع مدل
خرابی کم	خرابی متوسط	خرابی زیاد	خرابی کامل	
۰/۰۴۰۹	۰/۰۷۲۴۵	۰/۱۹۲۵	۰/۳۸۶۵	بدون لحاظ رفتار اتصالات
۰/۰۳۲۱۵	۰/۰۵۶۷۵	۰/۱۱۵	۰/۳۳۰۵	با لحاظ رفتار اتصالات
۰/۰۲۸	۰/۰۵۰۹	۰/۱۳۳۸۵	۰/۳	با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه

و همچنین مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه به ترتیب برابر با ۵۴٪، ۸۱٪ و ۹۰٪ می باشد، در مجموع مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات احتمال فراگذشت از حالت آسیب زیاد را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۳۳/۳ درصد کمتر برآورد می کند. به طور مشابه، مدل با لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه احتمال فراگذشت از حالت آسیب زیاد را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۱۰/۹ درصد کمتر برآورد می کند.

• مطابق شکل ۱۲-د، احتمال وقوع خرابی کامل در شتاب طیفی ۰/۴g برای مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات، با لحاظ رفتار اتصالات و همچنین مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه به ترتیب برابر با ۵۳٪، ۷۰٪ و ۸۰٪ می باشد، در مجموع مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات احتمال فراگذشت از حالت آسیب کامل را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۲۴/۲ درصد کمتر برآورد می کند. به طور مشابه، مدل با لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه احتمال فراگذشت از حالت آسیب کامل را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۱۲/۵ درصد کمتر برآورد می کند.

جدول ۵ اثر اندرکنش خاک-سازه و مدل سازی رفتار اتصالات تیر به ستون بر ظرفیت فروریزش مدل‌های مورد مطالعه را برحسب شتاب طیفی میانه (شتاب طیفی با احتمال وقوع ۵۰ درصد) نشان می دهد. نتایج حاکی از آن است که شتاب طیفی میانه برای مدل با لحاظ رفتار اتصالات تیر به ستون و اندرکنش خاک-سازه به صورت همزمان مقادیر کمتری نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات و یا مدل بدون رفتار اتصالات دارد. بر اساس نتایج بدست آمده، می توان

ساخته ۵-طبقه مورد بررسی به تفکیک مشاهده نمود. از مطالعه منحنی‌های شکنندگی نمایش داده شده در این اشکال، نتایج زیر حاصل می شود:

• مطابق شکل ۱۲-الف، احتمال وقوع خرابی کم در شتاب طیفی ۰/۰۴g برای مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات، با لحاظ رفتار اتصالات و همچنین مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه به ترتیب برابر با ۴۷٪، ۸۱٪ و ۹۳٪ می باشد، در مجموع مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات احتمال فراگذشت از حالت آسیب کم را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۴۱ درصد کمتر برآورد می کند. به طور مشابه، مدل با لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه احتمال فراگذشت از حالت آسیب کم را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۱۳ درصد کمتر برآورد می کند.

• مطابق شکل ۱۲-ب، احتمال وقوع خرابی متوسط در شتاب طیفی ۰/۰۷۵g برای مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات، با لحاظ رفتار اتصالات و همچنین مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه به ترتیب برابر با ۵۴٪، ۸۴٪ و ۹۶٪ می باشد، در مجموع مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات احتمال فراگذشت از حالت آسیب متوسط را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۳۵ درصد کمتر برآورد می کند. به طور مشابه، مدل با لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل با لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه احتمال فراگذشت از حالت آسیب متوسط را در شتاب طیفی ذکر شده حدود ۱۲/۵ درصد کمتر برآورد می کند.

• مطابق شکل ۱۲-ج، احتمال وقوع خرابی زیاد در شتاب طیفی ۰/۱g برای مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات، با لحاظ رفتار اتصالات

- [2] A. Mohammadi, H. tahghighi, Seismic Performance Assessment of RC MRF Buildings on Shallow Foundations Incorporating Soil-Structure Interaction, *Journal of Civil and Environmental Engineering (University of Tabriz)*, 93(48) (2019). 77-63
- [3] N. Rahgozar, N. Rahgozar, A.S. Moghadam, Controlled-rocking Braced Frame Bearing on a Shallow Foundation, in: *Structures*, Elsevier, 2018, pp. 72-63
- [4] B. Goyez, L. Gerardo, Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Low-Rise Eccentrically Braced Frames, (2017).
- [5] M. Zare Aghblagh, H. Rahman Shokrgozar, An investigating into the effect of various modeling parameters on the behavior of special steel moment frames, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2018).
- [6] H. Rahman Shokrgozar, M. Zare aghblagh, A.A. Khodaiee Ardabili, The effect of beam-column connections and soil on the seismic behavior of intermediate steel moment-resisting frames, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Issue 2) (2019). 74-57
- [7] M.J. Givens, Dynamic soil-structure interaction of instrumented buildings and test structures, UCLA, 2013
- [8] A. Veletsos, Design concepts for dynamics of soil-structure interaction, in: *Developments in dynamic soil-structure interaction*, Springer, 1993, pp. 325-307.
- [9] J.P. Wolf, Soil-structure interaction, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey ISBN 0 13, 9)221565) (1985). 01
- [10] P. Raychowdhury, Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures, UC San Diego, 2008
- [11] Opensees, Open system for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley Ca, <http://opensees.berkeley.edu>, (2016).
- [12] R.W. Boulanger, C.J. Curras, B.L. Kutter, D.W. Wilson, A. Abghari, Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 9)125) (1999). 759-750
- [13] B. Sbartai, Dynamic interaction of two adjacent

بیان کرد که نتایج تحلیل‌ها بدون در نظر گرفتن رفتار اتصالات تیر به ستون و اندرکنش خاک-سازه می‌تواند دقت ارزیابی عملکرد سازه‌ها را خدشه‌دار نموده و به طرح غیرواقعی سازه منجر گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای قاب بتن مسلح پیش‌ساخته آسیب دیده در زلزله ۱۳۹۶ بجنورد، با و بدون لحاظ رفتار اتصالات تیر به ستون و اندرکنش خاک-سازه پرداخته شده است. مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار Opensees با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) مورد ارزیابی قرار گرفتند. خلاصه نتایج به شرح ذیل است:

• نتایج آنالیز مودال نشان می‌دهد که دوره تناوب سازه با لحاظ رفتار اتصالات نسبت به مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات افزایش می‌یابد. همچنین در مدلی که رفتار اتصالات در نظر گرفته شده است، در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه باعث می‌شود دوره تناوب سازه افزایش یابد. افزایش دوره تناوب به معنای وقوع رفتار نرم‌تری از سوی سازه می‌باشد.

• نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی حاکی از آن است که لحاظ رفتار اتصالات تیر به ستون و اندرکنش خاک-سازه منجر به کاهش تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و کاهش برش پایه سازه نسبت به مدل بدون لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه می‌شود.

• نتایج تحقیق نشان می‌دهد با لحاظ رفتار اتصالات تیر به ستون بتن مسلح پیش‌ساخته و اندرکنش خاک-سازه، در دریافت و شتاب طیفی کمتری سازه به نقطه فروریزش می‌رسد، این بدان معناست که لحاظ رفتار اتصالات و اندرکنش خاک-سازه موجب افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان پیش‌ساخته موردنظر می‌شود.

مراجع

- [1] J. Khazei, A. Amiri, M. Khalilpour, NUMERICAL ANALYSIS OF INTERACTION BETWEEN SOIL AND LARGE FOUNDATIONS, CONSIDERING SIZE EFFECTS, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 4.1)34.2) (2019) 25-13.

- 118 (2016) .370-357
- [24] M. Ercolino, D. Bellotti, G. Magliulo, R. Nascimbene, Vulnerability analysis of industrial RC precast buildings designed according to modern seismic codes, *Engineering Structures*, 15 (8) (2018) 78-67.
- [25] J. Zhu, P. Tan, J. Jin, Fragility analysis of existing precast industrial frames using CFRP reinforcement, in: 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation, Atlantis Press, .2015
- [26] M. Farzam, M. Barghian, B.A. Khah, Developing Fragility Curves for Precast Concrete Structures, *Journal of Civil and Environmental Engineering* . 84(46) (2016) .61-51
- [27] M. Adibi, R. Talebkah, A. Yahyaabadi, Simulation of cyclic response of precast concrete beam-column joints, *Computers and Concrete*, 3(24) (2019) .236-223
- [28] A. Yahyaabadi, M. Adibi, M.K. bakavoli, Analytical Assessment of Bojnord Earthquake on May 2017, Bojnord University .2017
- [29] Gazetas, *Foundation Engineering Handbook*. Fang, H.Y. edit. Van Nostrand Rienhold, (1991).
- [30] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, Incremental dynamic analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(31) (2002) .514-491
- [31] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering, in: *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, .2002
- [32] V.V. Bertero, Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments, *Structural engineering and structural mechanics*, 1(53) (1977) .79-29
- [33] HAZUS-MH MR5, *Earthquake loss Estimation Methodology Model*, FEMA, Washington, D.C., (2005).
- [34] Report No. FEMA P695, FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, FEMA P695-Quantification of Building Seismic Performance Factors, Washington, D.C, June .2009
- [35] O.C. Celik, B.R. Ellingwood, Seismic fragilities for non-ductile reinforced concrete frames–Role of aleatoric and epistemic uncertainties, *Structural Safety*, 1(32) (2010) .12-1
- foundations embedded in a viscoelastic soil, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 03(16) (2016) .1450110
- [14] A.R. Sameti, M.A. Ghannad, Equivalent linear model for existing soil-structure systems, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 02(16) (2016) .1450099
- [15] A.S. Hokmabadi, B. Fatahi, Influence of foundation type on seismic performance of buildings considering soil-structure interaction, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 08(16) (2016) .1550043
- [16] H.R. Tabatabaiefar, B. Fatahi, Idealisation of soil-structure system to determine inelastic seismic response of mid-rise building frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66 (2014) .351-339
- [17] M. Mekki, S. Elachachi, D. Breysse, M. Zoutat, Seismic behavior of RC structures including soil-structure interaction and soil variability effects, *Engineering Structures*, 126 (2016) .26-15
- [18] M. Zare Aghblagh, K. Ardabili, A. Ali, Comparison the effect of soil and shallow foundation types on the seismic performance of low-rise special steel moment frames considering soil-structure interaction, *Modares Civil Engineering journal*, 6(18) (2019) .130-121
- [19] A. Yahyaabadi, R. Talebkah, M. Adibi, Development of fragility curves for precast concrete frames comparing the methods of static pushover and incremental dynamic analysis, *Sharif Journal of Civil Engineering (sjce)*, (2020).
- [20] S.M. Senel, A.H. Kayhan, Fragility based damage assesment in existing precast industrial buildings: A case study for Turkey, *Structural engineering & mechanics*, 1(11) (2010) .39
- [21] K.A. Korkmaz, A.E. Karahan, Investigation of seismic behavior and infill wall effects for prefabricated industrial buildings in Turkey, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25 (3) (2010) 171-158.
- [22] C. Casotto, V. Silva, H. Crowley, R. Nascimbene, R. Pinho, Seismic fragility of Italian RC precast industrial structures, *Engineering Structures*, 94 (2015) .136-122
- [23] A. Babič, M. Dolšek, Seismic fragility functions of industrial precast building classes, *Engineering Structures*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Talebkhah, M. Adibi, A.A. Yahyaabadi, *Seismic Behavior Assessment of RC Precast Frame Damaged in Bojnord Earthquake 2017 Considering Soil-Structure Interaction Effects*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 3051-3066.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17608.6633](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17608.6633)



