

Influence of Angle of Incidence on Seismic Demands of Eccentric Braced Frames Subjected to Near-Fault Ground Motions

Mohammad Amin Safari¹, Horr Khosravi^{2*}, Sara Farzaneh³

1- Master of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Associate Professor of Structural and Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Master of Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

The effect of the angle of incidence on the structural damage and the seismic demand in far-fault earthquakes has been taken into consideration by many researchers for several decades. However, this issue has recently received more attention from researchers and design codes for near-fault earthquakes. This issue is due to the pulse-type motion caused by forward directivity phenomena in near-fault earthquakes which increases the influence of the angle of incidence on the seismic demand. Due to the importance of the issue, several researches have been conducted in the past years to improve the design criteria for near-fault regions. For example, for Nonlinear Time History Analysis (NTHA), ASCE/SEI 7-16 design code recommended that the selected near-fault ground motions should be first rotated in the fault-normal/fault-parallel directions and then applied to the main axes of the structure. This paper aims to investigate the accuracy and efficiency of the proposed method for design of structures in near-fault regions. For this purpose, using nonlinear macro modelling of an Eccentrically Braced Frame (EBF) and applying near-fault ground motions with different angle of incidence, the seismic demands of structures were evaluated. The analysis results show that not only the direction of maximum response changes with the change of near-fault ground motions and the types of seismic demand parameters, but also it varies in different stories of a building. Nevertheless, the fault-normal response usually provides an acceptable estimate of the maximum response, which is suitable for design purposes. So that in almost 70% of the cases, the ratio of the fault-normal response to the maximum response is more than 0.75.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 April 2023

Revise Date: 01 July 2023

Accept Date: 15 July 2023

Keywords:

Near-fault ground-motion
Angle of incidence
Eccentric braced frame
Response history analysis
Engineering demand
parameters

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393097.3096>

*Corresponding author: Horr Khosravi.
Email address: Khosravi@nit.ac.ir

تاثیر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌های دو جهته بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای سیستم‌های مهاربندی واگرا

محمد امین صفری^۱، حر خسروی^{۲*}، سارا فرزانه^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌ها به سازه‌ها بر روی خسارت وارده به سازه و نیاز لرزه‌ای در زلزله‌های دور از گسل از چند دهه پیش مورد توجه محققین بوده است. اما این موضوع در زلزله‌های حوزه نزدیک اخیراً بیشتر مورد توجه محققین و آیین نامه‌های طراحی قرار گرفته است. این موضوع به علت حرکت‌های پالسی شکل زمین ناشی از پدیده جهت پذیری پیش رونده در زلزله‌های نزدیک گسل می‌باشد، که تاثیر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌ها را بر روی نیاز لرزه‌ای بیشتر می‌کند. با توجه به اهمیت این موضوع در سالیان گذشته تحقیقات متعددی جهت تکمیل ضوابط طراحی در نواحی نزدیک گسل انجام شده است. به عنوان مثال آیین نامه بارگذاری آمریکا برای طراحی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، توصیه می‌کند که نگاشت‌های نزدیک گسل انتخابی ابتدا در جهت موازی و عمود بر گسل به محورهای اصلی سازه اعمال شوند. هدف از این تحقیق بررسی کارایی روش پیشنهادی جهت طراحی سازه‌ها در نزدیک گسل می‌باشد. بدین منظور با مدل‌سازی غیرخطی سازه‌ای با سیستم مهاربندی واگرا و اعمال شتاب نگاشت‌های نزدیک گسل به سازه با زوایای برخورد متفاوت، پاسخ‌های نیاز لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نه تنها جهت پاسخ بیشینه، با تغییر شتاب نگاشت و نوع پارامتر نیاز لرزه‌ای تغییر پیدا می‌کند، بلکه این جهت در طبقات مختلف مدل مورد نظر نیز متغیر است. اما پاسخ سازه به جهت عمود بر گسل تخمین قابل قبولی از بیشینه پاسخ ارائه می‌دهد که برای اهداف طراحی مناسب است. به طوریکه تقریباً در ۷۰٪ مواقع، نسبت پاسخ جهت عمود بر گسل به پاسخ بیشینه، بیش از ۰/۷۵ می‌باشد.

کلمات کلیدی: حوزه‌ی نزدیک گسل، زاویه اعمال شتاب نگاشت، سیستم مهاربندی واگرا، تحلیل تاریخچه زمانی، پارامترهای نیاز مهندسی.

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|--------------------|---|--------------|---------------|-----------------|------------|------------|
| doi: | https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393097.3096 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2023.393097.3096 | ۱۴۰۲/۰۲/۳۱ | ۱۴۰۲/۰۴/۲۴ | ۱۴۰۲/۰۴/۲۴ | ۱۴۰۲/۰۴/۱۰ | ۱۴۰۲/۰۲/۰۳ |
| حر خسروی | | | | *نویسنده مسئول: | | |
| Khosravi@nit.ac.ir | | | | پست الکترونیکی: | | |

۱- مقدمه

فاصله سازه از گسل یکی از مسائل مهم در تحلیل و طراحی سازه‌ها است. این فاصله مشخص کننده شدت زلزله وارد شده به سازه و رفتار سازه هنگام زلزله می‌باشد. با توجه به اینکه هنگام وقوع زلزله، صفحه زمین در جهت‌های مختلف حرکت می‌کند و این حرکات در تمام جهات یکسان نیست، سازه می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان دهد. در این میان، برای حوزه نزدیک گسل به دلیل وجود پالس‌هایی با پیوند بلند، این موضوع اهمیت بیشتری نسبت به حوزه دور از گسل پیدا می‌کند. با توجه به اهمیت این موضوع، در سالیان گذشته محققین متعدد تحقیقاتی را در این زمینه انجام دادند، که در نتیجه آن ضوابطی مرتبط با طراحی سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل به آیین نامه بارگذاری آمریکا [۱] اضافه شد. با توجه به این ضوابط، آیین نامه پیشنهاد می‌کند برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی در حوزه نزدیک گسل، نگاشت‌های زلزله به صورت موازی و عمود بر گسل به جهت‌های اصلی سازه اعمال شوند.

دوران دادن جفت مولفه‌های نگاشت زلزله به جهت‌هایی که منجر به پاسخ بیشینه سازه شود، از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. محققین با استفاده از روابط ریاضی متعدد، تعریفی برای جهت‌های اصلی ارائه دادند [۲ و ۳]. همچنین به کمک ایده محورهای اصلی، سعی کردند زاویه‌ای برای اعمال شتاب نگاشت‌ها پیدا کنند که منجر به پاسخ بیشینه شود و این زاویه را زاویه بحرانی نامیدند [۴-۶]. به عنوان مثال آتاناتوپولو^۱ با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی سازه‌ی نامتقارن، رابطه‌ای برای زاویه بحرانی وقوع زمین‌لرزه ارائه داد. این رابطه با فرض اینکه رفتار سازه در محدوده‌ی خطی قرار دارد، به دست آمده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که برای یک زمین‌لرزه، زاویه بحرانی برای نوع پاسخ‌های مختلف، متفاوت است. همچنین نگاشت‌های مختلف نیز زوایای بحرانی متفاوتی را ایجاد می‌کنند [۷].

در ادامه محققین متعددی اثر دوران نگاشت‌های زلزله را بر پاسخ‌های سازه با کمک تحلیل تاریخچه زمانی بررسی کردند [۸-۱۱]. ریگاتو و مدینا^۲ به صورت تحلیلی به مطالعه تأثیر دوران نگاشت‌ها بر پارامترهای مختلف نیاز سازه پرداختند. آن‌ها با دوران رکوردها زاویه ۰ تا ۱۸۰ درجه با گام ۵ درجه، به تحلیل تاریخچه‌زمانی پرداختند و تغییرشکل‌های سازه را بررسی کردند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که تغییرشکل پلاستیک سازه‌ها، وقتی که نگاشت‌ها در جهت‌های اصلی سازه به آن اعمال می‌شوند، مقادیر کمتری نسبت به مقادیر بیشینه خواهند داشت که در جهت‌های دیگری اتفاق می‌افتد [۱۲]. هونگ و گودا^۳ به بررسی میزان وابستگی شتاب‌نگاشت‌ها به جهت‌دوران، برای تحلیل خطر لرزه‌ای پرداختند [۱۳]. آن‌ها همچنین به مقایسه جهت‌های اصلی زمین‌لرزه و جهت بیشینه شتاب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد این دو جهت نسبت به همدیگر هم‌راستا نیستند [۱۴].

پس از اضافه شدن ضوابط مرتبط با طراحی سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل به آیین نامه‌های طراحی، تحقیقات متعددی به ارزیابی این ضوابط پرداختند. به عنوان مثال کالکان و کونگ^۴ جهت‌های پیشنهادی آیین نامه بارگذاری آمریکا ASCE 7-10 [۱] برای اعمال شتاب‌نگاشت‌ها به سازه در تحلیل تاریخچه‌زمانی سازه‌های نزدیک گسل را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با مدل‌سازی یک سازه ۶ طبقه با سیستم قاب خمشی و با استفاده از تعدادی رکورد حوزه نزدیک گسل، به بررسی این موضوع پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اعمال نگاشت‌ها در جهت‌های موازی و عمود بر گسل، تقریباً هیچ گاه موجب پاسخ بیشینه نسبت به تمامی زوایای دوران نمی‌شود [۱۵]. ریز و کالکان^۵ نیز به بررسی این موضوع، با سازه‌ها و نگاشت‌های متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد که زاویه‌ی دورانی که موجب پاسخ بیشینه‌ی خطی می‌شود، با زاویه‌ای که منجر به پاسخ بحرانی غیرخطی می‌شود، متفاوت است [۱۶-۱۷].

در سال‌های اخیر اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌ها به سازه در زمینه‌های مختلف دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت. اسکولیدو و همکاران^۶ به بررسی تاثیر زاویه اعمال بر روی احتمال فروریزش سازه‌های بتنی پرداختند [۱۸-۱۹]. وارگاس و همکاران^۷ روش ساده‌ای برای در نظر گرفتن اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت به سازه برای ارزیابی لرزه‌ای سازه ارائه دادند [۲۰]. با توجه به تحقیقات مرور شده،

¹ Athanatopoulou

² Rigato & Medina

³ Hong & Goda

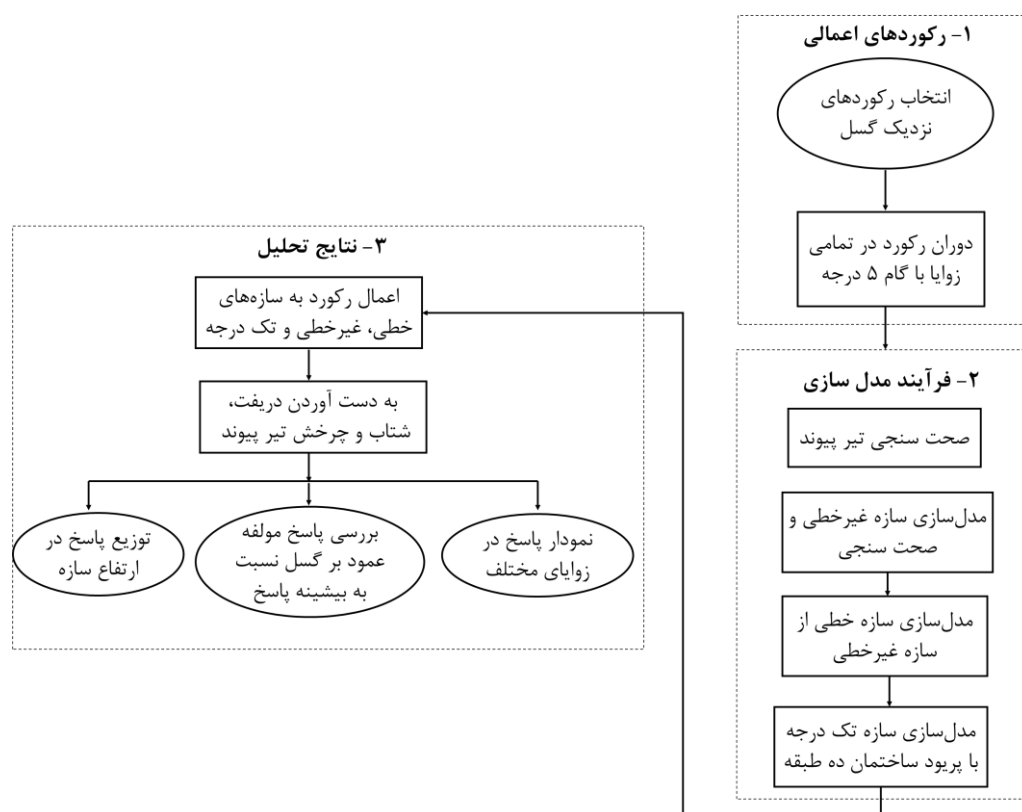
⁴ Kalkan & Kwong

⁵ Reyes & Kalkan

⁶ Skoulidou et al.

⁷ vargas et al.

مشاهده می‌شود که در بیشتر تحقیقات برای بررسی اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌های دوجبهه، از سازه تک درجه آزاد استفاده شده است و کارایی آن بر روی سازه‌های واقعی کمتر مورد توجه بوده است. همچنین در مورد توصیه آیین نامه‌ها مبنی بر دوران شتاب نگاشت‌ها به جهت‌های موازی و عمود بر گسل در حوزه‌ی نزدیک با استفاده از سیستم‌های مختلف مطالعات کافی صورت نگرفته است. یکی از سیستم‌هایی که اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌ها بر پارامترهای نیاز مهندسی، در آن بررسی نشده است سیستم مهاربندی می‌باشد. هرچند در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار لرزه‌ای مهاربندها انجام گرفته است [۲۱-۲۴]. بنابراین هدف این تحقیق بررسی تاثیر زاویه اعمال نگاشت‌ها بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای با استفاده از سازه واقعی با سیستم مهاربندی واگرا می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از توصیه آیین نامه بارگذاری آمریکا مرتبط با جهت اعمال شتاب نگاشت‌ها، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند. مراحل انجام این تحقیق، به صورت فلوچارتی در شکل (۱) آورده شده است.

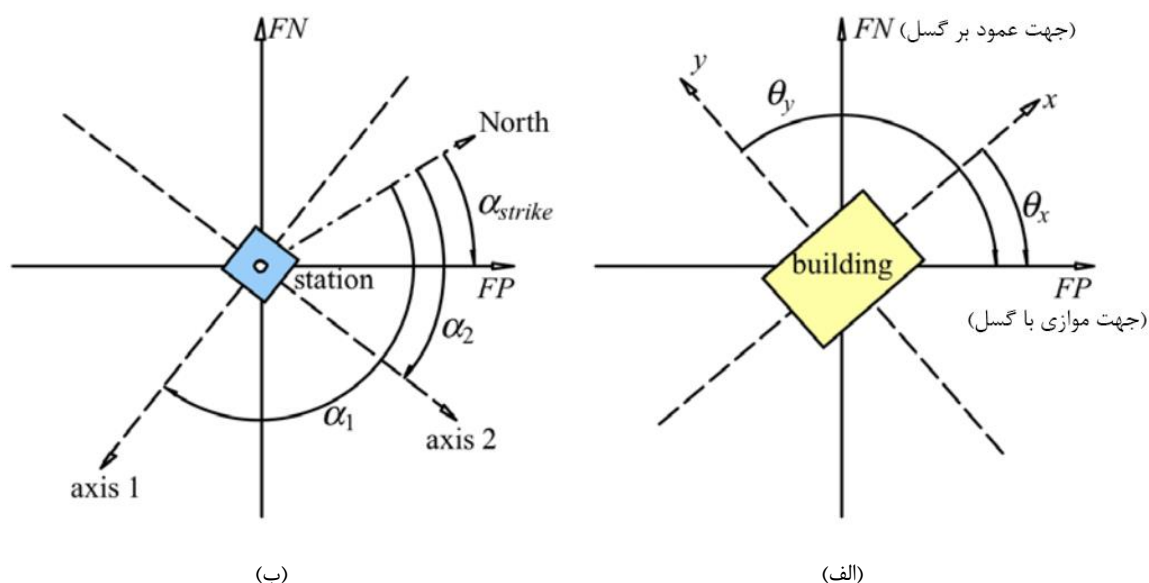


شکل ۱: فلوچارت مراحل انجام این تحقیق.

۲- نحوه‌ی ارزیابی اثر زاویه اعمال نگاشت بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای

۲-۱ چرخش نگاشت‌ها

به منظور ارزیابی اثر زاویه اعمال نگاشت بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای، لازم است تا نگاشت‌ها با زاویه‌های مختلف به سازه اعمال شوند. بدین منظور ابتدا نگاشت‌های مورد نظر مطابق شکل (۲) و با استفاده از روابط (۱) و (۲) در جهت‌های عمود و موازی گسل تصویر می‌شوند. سپس نگاشت‌های تصویر شده به صورت پادساعت گرد با گام‌های ۵ درجه به کمک روابط (۳) و (۴) چرخانده می‌شوند. نگاشت‌ها در این مرحله از زاویه ۰ تا ۳۶۰ درجه، با گام‌های ۵ درجه دوران می‌یابند.



شکل ۲: (الف): زاویه بین سازه و جهت‌های عمود و موازی با گسل. (ب): محورهای دستگاه شتاب نگار و زوایای بین آن‌ها و جهت‌های عمود و موازی با گسل.

$$\ddot{u}_{FP} = \ddot{u}_1 \cos(\beta_1) + \ddot{u}_2 \cos(\beta_2) \quad (1)$$

$$\ddot{u}_{FN} = \ddot{u}_1 \sin(\beta_1) + \ddot{u}_2 \sin(\beta_2) \quad (2)$$

\ddot{u}_{FN} و \ddot{u}_{FP} به ترتیب مولفه‌های شتاب دوران یافته در جهت موازی و عمود با گسل هستند. مولفه‌های \ddot{u}_1 و \ddot{u}_2 نیز مطابق شکل (۲) مولفه‌های متناسب با جهت ۱ و ۲ هستند. در این روابط β_1 و β_2 به ترتیب زاویه بین محورهای شتاب نگار (α_1 و α_2) و جهت گسل α_{strike} است. که $\beta_1 = \alpha_{strike} - \alpha_1$ و $\beta_2 = \alpha_{strike} - \alpha_2$ است. \ddot{u}_x و \ddot{u}_y به ترتیب مولفه‌های شتاب در جهت x و y مطابق شکل (۲) هستند. نیز زاویه محور x با جهت موازی با گسل می‌باشد.

$$\ddot{u}_x = \ddot{u}_{FP} \cos(\theta_x) + \ddot{u}_{FN} \cos(\theta_x + 90) \quad (3)$$

$$\ddot{u}_y = \ddot{u}_{FP} \sin(\theta_x) + \ddot{u}_{FN} \sin(\theta_x + 90) \quad (4)$$

به این ترتیب سازه مورد نظر، با استفاده از توضیحات بالا در جهت‌های مختلف تحت نگاهت‌های مورد نظر قرار گرفته و تحلیل تاریخیچه زمانی به ازای هر زاویه انجام می‌گیرد. پس از انجام تحلیل، دریافت طبقه، شتاب طبقه، چرخش تیرپیوند مربوط به هر طبقه و جابجایی طبقه بام به عنوان پارامترهای نیاز لرزه‌ای ثبت می‌شوند و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲-۲ مشخصات رکوردهای استفاده شده

در این تحقیق از ۳۰ نگاهت حوزه نزدیک گسل مورد استفاده در تحقیق ریز و کالکان [۱۷] استفاده شده است. رکوردهای انتخابی در جدول (۱) ارائه شده‌اند و دارای ویژگی‌های زیر هستند.

- کمترین فاصله از گسل: $0.1 \text{ (Km)} \leq Rrup \leq 15 \text{ (Km)}$
- بزرگای گشتاوری: $M_w = 6.7 \pm 0.2$
- بزرگترین پیرو قابل استفاده نگاهت‌ها: $T_{max} \leq 6 \text{ (s)}$

جدول ۱: مشخصات رکوردهای استفاده شده در این تحقیق.

| شماره نگاشت | رکورد | ایستگاه | سال وقوع | $R_{rup}(Km)$ | M_w | نوع گسلش | PGA(g) مولفه‌ی FN | $T_{max}(s)$ |
|-------------|-----------------------|-----------------------------|----------|---------------|-------|-------------|-------------------|--------------|
| ۱ | Gazli, USSR | Karakyr | 1976 | 5.5 | 6.8 | Thrust | 0.70 | 4.9 |
| ۲ | Imperial Valley-06 | Aeropuerto Mexicali | 1979 | 0.3 | 6.5 | Strike-slip | 0.34 | 2.4 |
| ۳ | Imperial Valley-06 | Agrarias | 1979 | 0.7 | 6.5 | Strike-slip | 0.30 | 2.4 |
| ۴ | Imperial Valley-06 | Bonds Corner | 1979 | 2.7 | 6.5 | Strike-slip | 0.77 | |
| ۵ | Imperial Valley-06 | EC Meloland Overpass FF | 1979 | 0.1 | 6.5 | Strike-slip | 0.38 | 4.4 |
| ۶ | Imperial Valley-06 | El Centro Array #6 | 1979 | 1.4 | 6.5 | Strike-slip | 0.45 | 4.2 |
| ۷ | Imperial Valley-06 | El Centro Array #7 | 1979 | 0.6 | 6.5 | Strike-slip | 0.47 | 4.5 |
| ۸ | Irpinia, Italy-01 | Auletta | 1980 | 9.6 | 6.9 | Normal | 0.07 | |
| ۹ | Irpinia, Italy-01 | Bagnoli Irpinio | 1980 | 8.2 | 6.9 | Normal | 0.16 | 1.9 |
| ۱۰ | Irpinia, Italy-01 | Sturno | 1980 | 10.8 | 6.9 | Normal | 0.24 | 3.6 |
| ۱۱ | Nahanni, Canada | Site 1 | 1985 | 9.6 | 6.8 | Thrust | 0.95 | |
| ۱۲ | Nahanni, Canada | Site 2 | 1985 | 4.9 | 6.8 | Thrust | 0.48 | 2.6 |
| ۱۳ | Nahanni, Canada | Site 3 | 1985 | 5.3 | 6.8 | Thrust | 0.20 | |
| ۱۴ | Superstition Hills-02 | Parachute Test Site | 1987 | 1.0 | 6.5 | Strike-slip | 0.44 | 3.4 |
| ۱۵ | Superstition Hills-02 | Westmorland Fire Sta | 1987 | 13.0 | 6.5 | Strike-slip | 0.21 | |
| ۱۶ | Loma Prieta | BRAN | 1989 | 10.7 | 6.9 | Reverse | 0.63 | |
| ۱۷ | Loma Prieta | Gilroy Array #3 | 1989 | 12.8 | 6.9 | Reverse | 0.53 | 3.5 |
| ۱۸ | Loma Prieta | LGPC | 1989 | 3.9 | 6.9 | Reverse | 0.66 | 4.3 |
| ۱۹ | Loma Prieta | San Jose – St. Teresa Hills | 1989 | 14.7 | 6.9 | Reverse | 0.28 | |
| ۲۰ | Loma Prieta | Saratoga – Aloha Ave | 1989 | 8.5 | 6.9 | Reverse | 0.37 | 5.1 |
| ۲۱ | Loma Prieta | Saratoga – W Valley Coll. | 1989 | 9.3 | 6.9 | Reverse | 0.40 | 5.2 |
| ۲۲ | Erzincan, Turkey | Erzincan | 1992 | 4.4 | 6.7 | Strike-slip | 0.43 | 3.0 |
| ۲۳ | Northridge-01 | Jensen Filter Plant Gen | 1994 | 5.4 | 6.7 | Reverse | 0.40 | 3.7 |
| ۲۴ | Northridge-01 | Newhall – Fire Sta | 1994 | 5.9 | 6.7 | Reverse | 0.72 | 1.0 |
| ۲۵ | Northridge-01 | Newhall – W Pico Can. Rd | 1994 | 5.5 | 6.7 | Reverse | 0.41 | 2.5 |
| ۲۶ | Northridge-01 | Pacoima Dam (downstr) | 1994 | 7.0 | 6.7 | Reverse | 0.50 | 0.6 |
| ۲۷ | Northridge-01 | Rinaldi Receiving Sta | 1994 | 6.5 | 6.7 | Reverse | 0.89 | 4.0 |
| ۲۸ | Northridge-01 | Sylmar – Olive V. Med FF | 1994 | 5.3 | 6.7 | Reverse | 0.73 | 3.1 |
| ۲۹ | Kobe, Japan | KJMA | 1995 | 1.0 | 6.9 | Reverse | 0.86 | 0.8 |
| ۳۰ | Kobe, Japan | Nishi-Akashi | 1995 | 7.1 | 6.9 | Reverse | 0.48 | |

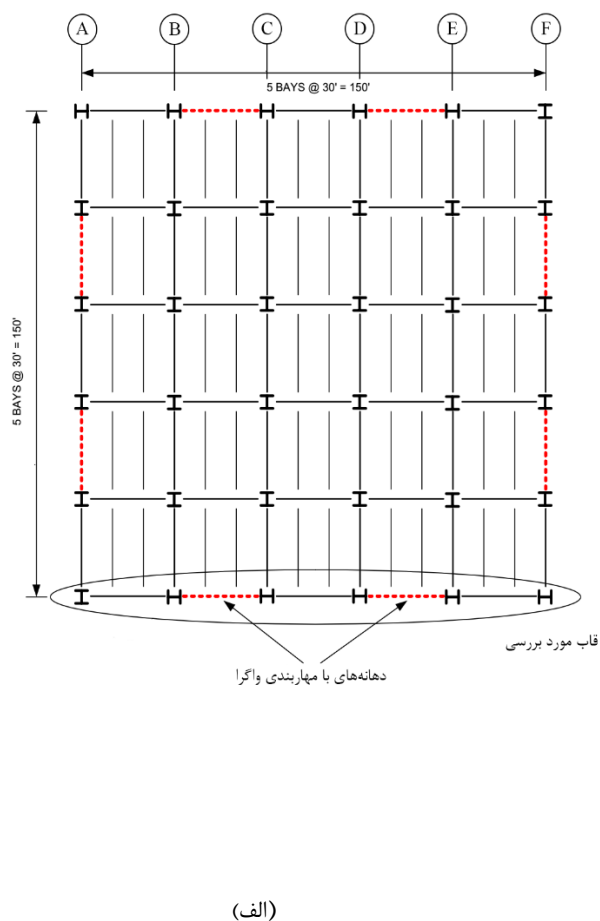
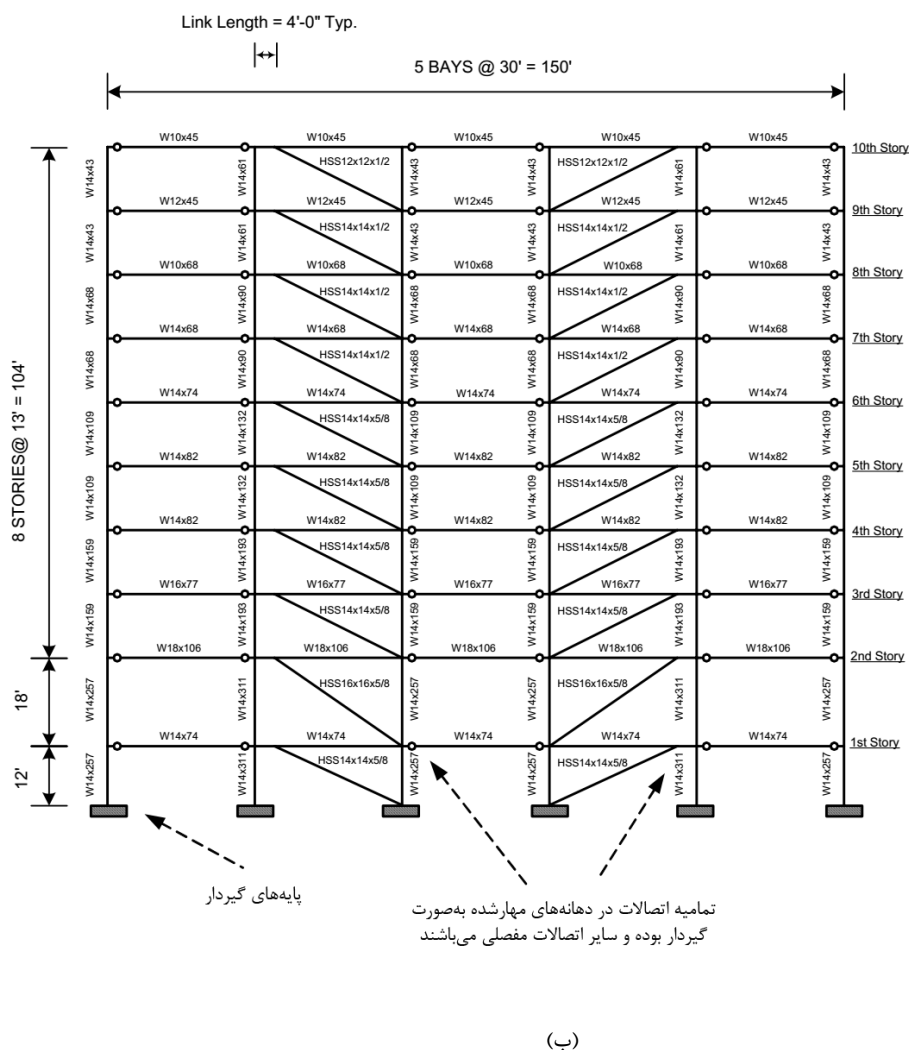
۳- مدل سازی

۳-۱ خصوصیات مدل ساختمانی

در این تحقیق به منظور بررسی اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای، از یک سازه ۱۰ طبقه فولادی با سیستم مهاربندی واگرا استفاده شده است. این سازه توسط چائو و گوئل^۸ [۲۵] بر اساس آیین نامه‌ی IBC ۲۰۰۰ برای منطقه لس آنجلس و خاک نوع D طراحی شده است [۲۶]. پلان این سازه در شکل (۳-الف) آورده شده است. با توجه به این شکل، پلان در دو جهت متقارن بوده و دارای ۵ دهانه می‌باشد که ۲ دهانه آن دارای سیستم مهاربند واگرا است. با توجه به این شکل سازه دارای قاب پیرامونی می‌باشد که سیستم

^۸ Chao & Goel

مهاربندی واگرا بار جانبی لرزه‌ای را تحمل می‌کند و قاب‌های داخلی صرفاً وظیفه تحمل بار ثقلی را بر عهده دارند. قاب مورد بررسی در این تحقیق، در شکل (۳-ب) مشخص شده است. طول دهانه‌ها، ارتفاع طبقات و مقاطع استفاده شده در شکل (۳-ب) آورده شده است. مطابق شکل (۳-ب)، مشهود است که اتصال پایه‌ی ستون‌ها به زمین صلب می‌باشد. اتصال تیرهایی که در قاب مهاربندی شده قرار دارند و همچنین مهاربندها، به ستون‌ها صلب بوده و اتصال تیرهایی در خارج از قاب قرار دارند، به ستون‌های اطراف آن‌ها از نوع مفصل می‌باشد.



شکل ۳: (الف): پلان استفاده شده در این تحقیق. (ب): قاب استفاده شده در این تحقیق.

۳-۲ مدل‌سازی غیرخطی

مدل ۱۰ طبقه مورد نظر به صورت قابی دوبعدی در نرم افزار OpenSees [۲۷] ساخته شده است. جرم لرزه‌ای مورد استفاده در مدل ۲ بعدی برای ۹ طبقه اول قاب برابر ۳۳۸/۵ کیلوگرم بر متر مربع و برای طبقه دهم برابر ۳۶۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. جرم‌های لرزه‌ای به صورت گره‌ای در محل اتصال تیرها و ستون‌ها قرار داده شده‌اند. ستون‌های فرضی^۹ برای در نظر گرفتن اثرات P-Δ ناشی از بارهای ثقلی، مدل شده‌اند. این ستون‌ها به صورت المان‌های صلب توسط تیرهای صلبی با اتصال مفصلی به انتهای قاب متصل می‌شوند و بارهای ثقلی به آن‌ها اعمال می‌شود. در این قاب، میرایی رایلی ۰/۲ به روی مودهای اول و سوم اعمال شده است.

^۹ Leaning Column

برای مدل سازی رفتار برشی تیر پیوند، از دستور Steel02 برای ساخت فولاد استفاده می شود که نیروی تسلیم آن، نیروی برشی تسلیم تیر پیوند (V_y) است و از رابطه $V_y = 0.6 \cdot f_y \cdot A_v$ به دست می آید. همچنین سختی اولیه آن برابر GAY است، که در آن G مدول برشی فولاد و معادل ۲۰۰ گیگاپاسکال است. همچنین A_y سطح مقطع برشی تیر پیوند است. در این دستور، پارامترهای انتقال الاستیک-پلاستیک (R0, cR1 و cR2) به ترتیب، ۲۰، ۰/۹۲۵ و ۰/۰۱ و همچنین پارامترهای سخت شوندگی ایزوتروپیک (a_1, a_2, a_3 و a_4) به ترتیب، ۰/۰۲، ۰/۰۲، ۱ و ۱ در نظر گرفته شده اند. سپس این فولاد ساخته شده، با کمک دستور aggregate نرم افزار، با مقطع فایبر که خود از فولاد steel02 که دارای سخت شوندگی کینماتیک و اثر بوشینگر^{۱۰} است، تجمیع شده و در نهایت مقطع به دست آمده به المان غیرخطی nonlinearBeamColumn اعمال می شود.

برای سایر اجزای سازه مانند تیرها، ستون ها و مهاربندها از دستور ElasticBeamColumn استفاده شده است، که در دو انتهای آن ها فنرهای چرخشی به کار رفته است. برای آن دسته از تیرهایی که به صورت مفصلی به ستون ها متصل شده اند، این فنرها، با سختی چرخشی ناچیز در نظر گرفته شده اند و برای سایر اعضای که دارای اتصالات گیردار هستند، رفتار هیسترتیک لنگر-انحنای به عنوان رفتار غیرخطی المان ها اختصاص داده شده است. برای اعمال رفتار هیسترتیک از فنرهای اصلاح شده ایبارا کراوینکلر^{۱۱}، استفاده شده است [۲۸]. منحنی اسکلتی مدل اصلاح شده ایبارا کراوینکلر در شکل (۴) آورده شده است. در این شکل Ke سختی موثر، My و θy به ترتیب مقاومت و چرخش تسلیم موثر، Mc و θc به ترتیب لنگر و چرخش قسمت سخت شونده مونوتونیک، θp ظرفیت چرخشی قسمت سخت شونده، θ_{PC} چرخش شاخه نزولی منحنی، و Mr مقاومت پسماند می باشند. همچنین θu چرخش نهایی عضو است. سختی سازه (Ke) و مقاومت تسلیم تیر و ستون به ترتیب از روابط (۵-۷) محاسبه می شوند.

$$K_e = \frac{6EI}{L} \quad (5)$$

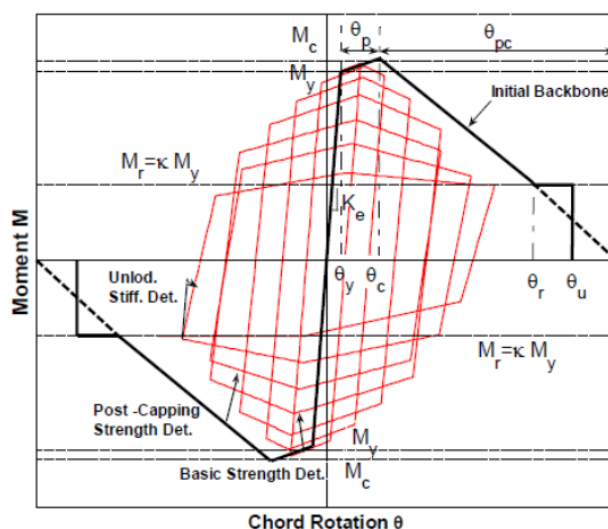
$$M_y = Z \cdot F_y \quad (6)$$

$$M_y = Z \cdot \left(F_y - \frac{P}{A} \right) \quad (7)$$

در این روابط F_y تنش تسلیم فولاد می باشد که در این تحقیق معادل ۳۴۵ مگاپاسکال است. Z مدول پلاستیک مقطع، I ممان اینرسی، L طول عضو، P نیروی محوری ستون، A مساحت مقطع و E مدول الاستیسیته فولاد می باشند. مدول الاستیسیته فولاد در این تحقیق معادل ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. روابط مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای منحنی اسکلتی، با توجه به نوع مقاطع استفاده شده در این تحقیق (مقاطع w و قوطی) انتخاب شده اند و مورد استفاده قرار گرفته شده اند. در این قسمت ابتدا روابط مرتبط با مقطع w ارائه می شود. پارامترهای θ_p ، θ_{PC} و پارامتر زوال (Δ) مقاطع w به ترتیب از روابط (۸-۱۰) محاسبه می شوند.

¹⁰ Bauschinger effect

¹¹ Ibarra-Krawinkler



شکل ۴: منحنی رفتاری اسکلتی استفاده شده در این تحقیق [۲۸].

$$\theta_p = 0.07 \left(\frac{h}{t_w} \right)^{-0.35} \left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^{-0.09} \left(\frac{L}{d} \right)^{0.31} \left(\frac{d}{c_{unit}^1 \cdot 21} \right)^{-0.281} \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{50} \right)^{-0.383} \quad (8)$$

$$\theta_{pc} = 4.645 \left(\frac{h}{t_w} \right)^{-0.449} \left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^{-0.837} \left(\frac{d}{c_{unit}^1 \cdot 21} \right)^{-0.265} \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{50} \right)^{-1.136} \quad (9)$$

$$\Lambda = 26.36 \left(\frac{h}{t_w} \right)^{-0.589} \left(\frac{b_f}{2t_f} \right)^{-0.574} \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{50} \right)^{-1.454} \quad (10)$$

در این روابط $\frac{h}{t_w}$ نسبت عمق جان مقطع به ضخامت جان مقطع، $\frac{b_f}{t_f}$ نسبت پهنای جان مقطع به ضخامت جان مقطع، $\frac{L}{d}$ نسبت فاصله مفصل پلاستیک تا مکان نقطه عطف به عمق مقطع است. d عمق مقطع است و F_y مقاومت تسلیم مقطع است که در این تحقیق ۳۴۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. c_{unit}^1 و c_{unit}^2 ضرایب مرتبط با تبدیل واحد هستند که اگر واحد پارامترهای ذکر شده بر حسب میلی متر و مگاپاسکال باشند، مقدار این دو ضریب به ترتیب برابر با ۰/۲۵۴ و ۰/۱۴۵ است. پارامترهای θ_p ، θ_{pc} و پارامتر زوال (Λ) مقایسه قوطی به ترتیب از روابط (۱۱-۱۳) محاسبه می‌شوند.

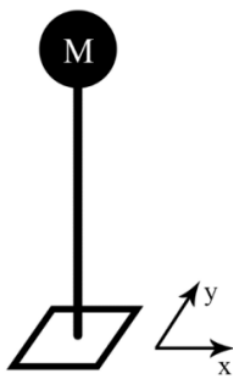
$$\theta_p = 0.7 \left(\frac{D}{t} \right)^{-1.079} \left(1 - \frac{N}{N_y} \right)^{0.828} \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{50} \right)^{-0.298} \quad (11)$$

$$\theta_{pc} = 4.316 \left(\frac{D}{t} \right)^{-0.957} \left(1 - \frac{N}{N_y} \right)^{2.742} \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{50} \right)^{0.486} \quad (12)$$

$$\Lambda = 3800 \left(\frac{D}{t} \right)^{-2.492} \left(1 - \frac{N}{N_y} \right)^{3.501} \left(\frac{c_{unit}^2 \cdot F_y}{50} \right)^{-2.391} \quad (13)$$

در این روابط، $\frac{D}{t}$ نسبت پهنا به ضخامت مقطع قوطی، $\frac{N}{N_y}$ نسبت نیروی محوری مقطع به نیروی محوری تسلیم است. در این روابط اگر تنش تسلیم (F_y) بر حسب مگاپاسکال وارد روابط شود، ضریب c_{unit}^2 برابر با ۰/۱۴۵ به روابط اعمال می‌شود. پس از انجام مدل‌سازی در نرم افزار Opensees پیروود مود اول نوسان سازه برابر ۱/۶۵ می‌باشد. ضریب رفتار (R_u) سیستم مهاربندی واگرا مطابق آیین نامه ۲۰۰۰ IBC [۲۶] برابر ۸ می‌باشد. ضریب کاهش مقاومت سازه (R) از نسبت ضریب رفتار سازه (R_u)، به ضریب اضافه مقاومت (Ω) به دست می‌آید.

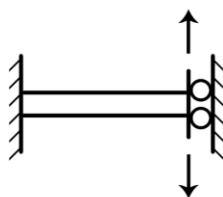
ضریب اضافه مقاومت نیز از تقسیم برش پایه‌ی سازه (V_0)، به برش پایه‌ی طراحی (V_d) به دست می‌آید، که در این تحقیق برابر $1/32$ می‌باشد. با توجه به توضیحات فوق، مقدار ضریب کاهش مقاومت (R) سازه مورد نظر در این تحقیق برابر با ۶ می‌شود. برای تکمیل و ارزیابی دقیق‌تر نتایج، سازه‌ی ۱۰ طبقه خطی و سازه تک درجه آزاد^{۱۲} با پیوند برابر با سازه ۱۰ طبقه غیرخطی نیز مدل شده‌اند. سازه ۱۰ طبقه خطی با فرض بی‌نهایت بودن مقاومت تسلیم (F_y) و لنگر خمشی فنرهای چرخشی دو انتهای اعضا، مدل شده است. مدل تک درجه آزاد از یک جرم متمرکز در راس مدل و یک المان الاستیک که به زمین گیردار شده، مطابق شکل (۵) تشکیل شده است. این مدل در نرم افزار Opensees مدل شده است و جرم آن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که پیوند آن با پیوند مدل ۱۰ طبقه غیرخطی ($1/65$ ثانیه) برابر باشد.



شکل ۵: سیستم تک درجه آزادی.

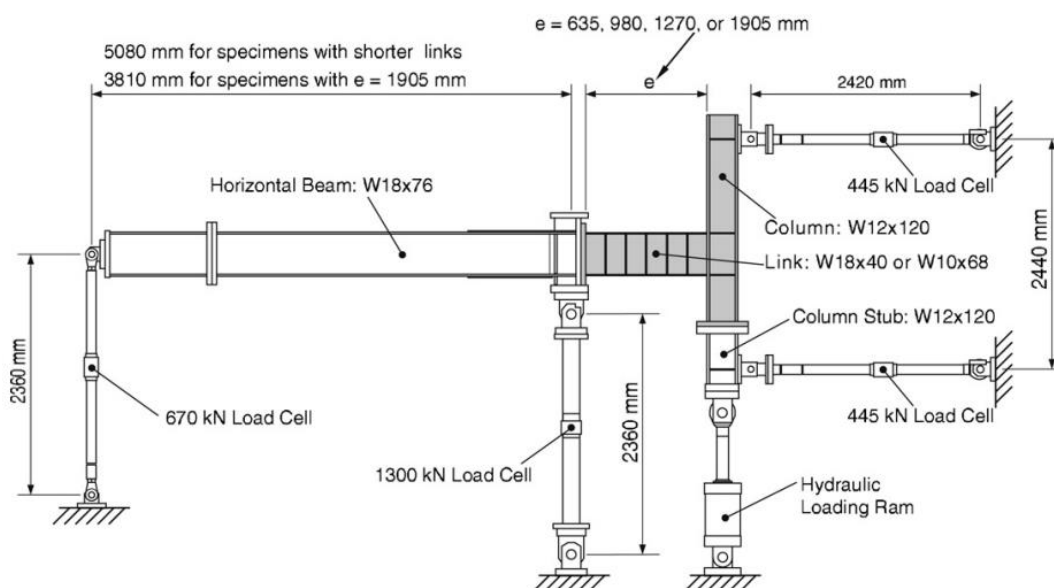
۳-۳ صحت سنجی مدل

به منظور اطمینان از صحت نحوه مدل‌سازی تیر پیوند در این تحقیق، تیر پیوند آزمایش شده در تحقیق اوکازاکی و همکاران [۲۹] انتخاب شده و مطابق جزئیات مقاله مدل‌سازی شده است. تیر انتخاب شده به صورت یک سر گیردار و یک سر با مفصل برشی با مقطع $W18 \times 40$ ، مطابق شکل (۶) ساخته شده و تحت بار رفت و برگشتی قرار می‌گیرد. جزئیات دستگاه انجام تست و مدل آزمایشگاهی در شکل (۷) نشان داده شده است.



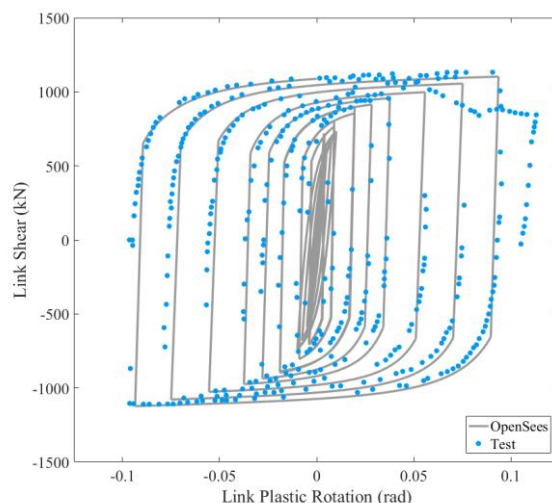
شکل ۶: مدل تیر پیوند یک سر گیردار و یک سر مفصل برشی تحت بار رفت و برگشتی.

¹² Single Degree of Freedom



شکل ۷: جزئیات مدل آزمایشگاهی [۲۹].

نتایج حاصل از تحلیل تیر پیوند ساخته شده در این تحقیق با نرم افزار، با نتایج آزمایشگاهی موجود در تحقیق اوکازاکی و همکاران [۲۹] مورد مقایسه قرار گرفت. نمودار برش تیر پیوند بر حسب چرخش پلاستیک تیر پیوند در شکل (۸) آورده شده است. مطابق این شکل نتایج حاصل از مدل ساخته شده در این تحقیق تطابق بالایی با نتایج آزمایشگاهی موجود در گزارش دارد. این امر نشان دهنده صحت مدل‌سازی تیر پیوند ساخته شده در این تحقیق است.

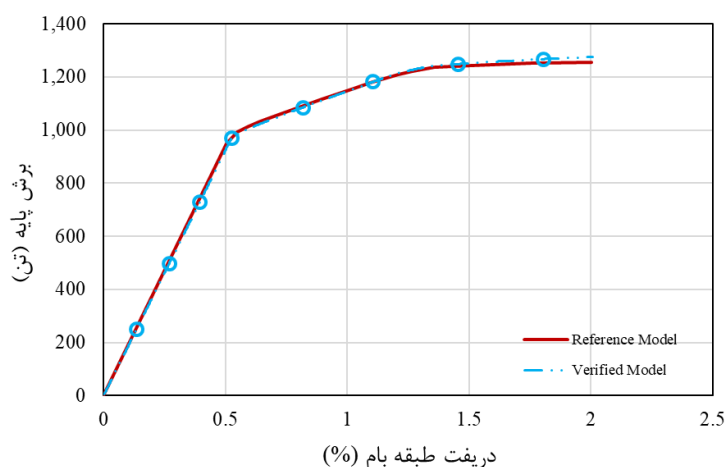


شکل ۸: مقایسه بارگذاری تیر پیوند زیر بار رفت و برگشتی در نرم افزار و گزارش آزمایشگاهی.

با توجه به توضیحات بخش ۳-۱، در این تحقیق برای ارزیابی اثر زاویه اعمال شتاب نگاشت‌ها بر روی پارامترهای نیاز لرزه‌ای از مدل ۱۰ طبقه که توسط چائو و گوئل^{۱۳} [۲۵] طراحی شده، استفاده شده است. به منظور اطمینان از صحت مدل ساخته شده در این تحقیق با نرم افزار OpenSees لازم بوده تا نتایج حاصل با نتایج موجود در تحقیق چائو و گوئل [۲۵] مقایسه شود. مدل ۱۰ طبقه غیرخطی مورد نظر با توجه به جزئیات موجود در گزارش ساخته شده و سپس تحت تحلیل پوش اور قرار گرفته است. نمودار حاصل از تحلیل پوش اور

¹³ Chao & Goel

مدل ساخته شده در این تحقیق و نمودار موجود در گزارش در شکل (۹) آورده شده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان مشاهده کرد نمودار پوش اور مدل ساخته شده در نرم افزار OpenSees در این تحقیق از تطابق بسیار بالایی با نمودار پوش اور موجود در مقاله [۲۵] برخوردار است، که این امر نشان دهنده صحت مدل ساخته شده در این تحقیق است.



شکل ۹: صحت سنجی نمودار پوش اور مدل ساخته شده در این تحقیق با مدل موجود در گزارش [۲۵].

۴- نتایج تحلیل

۴-۱ نمودارهای پاسخ در زوایای اعمال مختلف

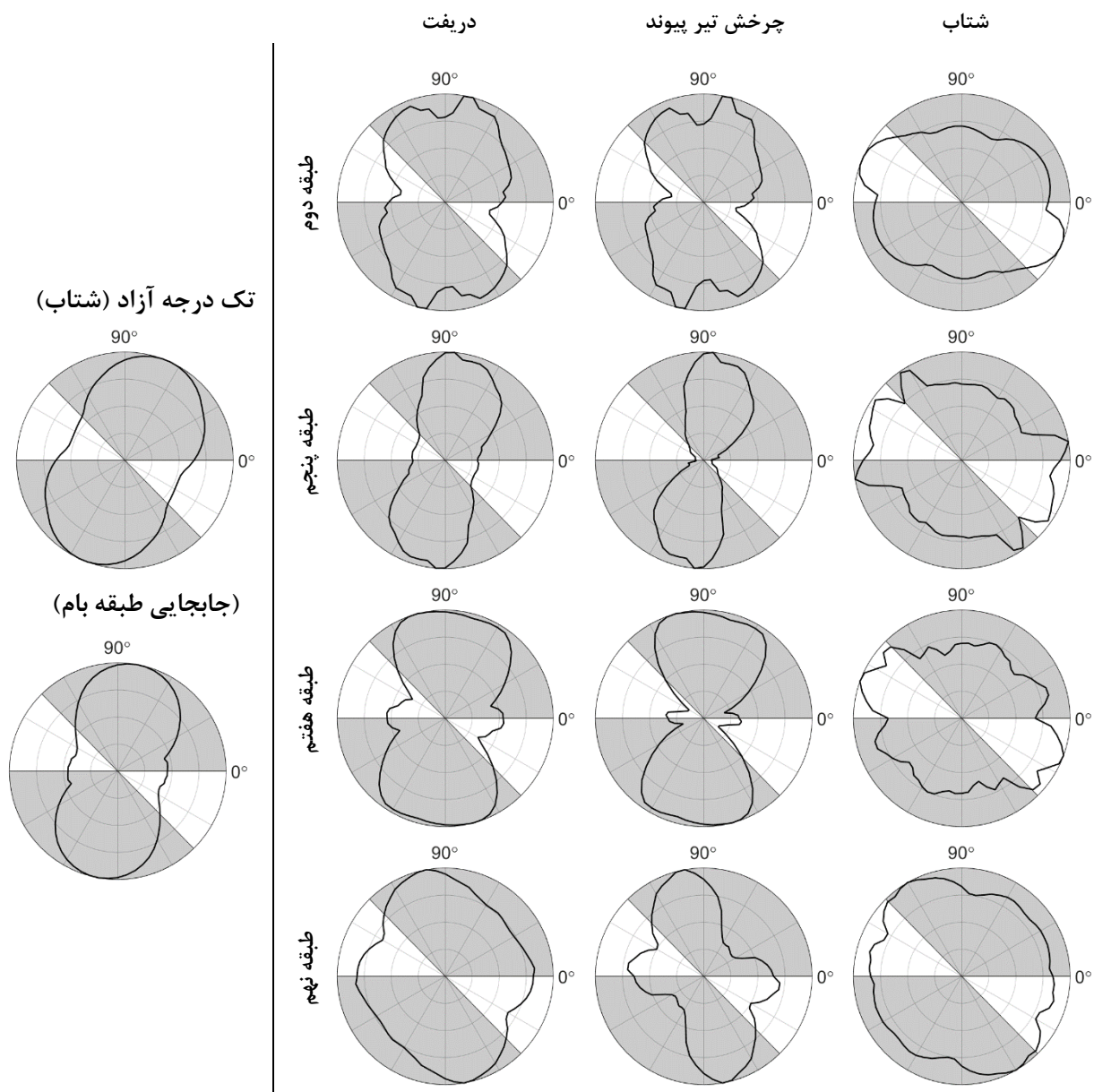
به منظور بررسی اثر دوران نگاشت‌های زلزله بر سازه و مقایسه پاسخ‌های سازه در زوایای مختلف، نمودارهای قطبی برای مدل‌های ۱۰ طبقه غیرخطی، خطی و تک درجه آزاد به ازای نگاشت‌ها و پارامترهای نیاز مختلف رسم شده است. با توجه به تعدد نمودارها، یک نمونه از نمودارهای مربوط به یک نگاشت مشخص در این بخش قرار داده شده است. برای رسم نمودارهای قطبی هر نگاشت به ازای هر پارامتر نیاز، مقدار پاسخ بیشینه سازه در هر تحلیل که در واقع برای یک جهت خاص انجام گرفته است، به دست می‌آید و با کنار هم قرار دادن تمامی این پاسخ‌ها برای تمامی زوایا، نمودار قطبی حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر پاسخ‌های جهت‌های مختلف برای هر نگاشت، نسبت به پاسخ بیشینه، مقیاس شده و سپس از این داده‌های نرمال شده استفاده شده است. در حوزه‌ی نزدیک گسل، امواج لرزه‌ای تحت اثرات تغییر مکان ماندگار^{۱۴} و جهت پذیری پیش رونده^{۱۵} قرار می‌گیرند که این اثرات موجب رسیدن انرژی لرزه‌ای زیاد از گسل به شکل پالس با سرعت بلند پیروند می‌شوند. ریز و کالکان با استفاده از روش عددی برای هر نگاشت در زوایای مختلف θx پالس سرعت را در صورت وجود شناسایی کرده و بزرگترین پیروند پالس را مشخص کرده‌اند [۱۷]. در نمودارهای قطبی ترسیم شده برای هر نگاشت، زوایایی که پالس سرعت در آن‌ها توسط ریز و کالکان [۱۷] مشخص شده بودند، به شکل بازه‌های خاکستری رنگ مشخص شده است. در این نمودارها، زاویه‌ی ۹۰ درجه نشانگر جهت عمود بر گسل (FN)^{۱۶} و زاویه‌ی ۰ نشانگر جهت موازی با گسل (FP)^{۱۷} می‌باشد. شکل (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نمودارهای قطبی پاسخ‌های غیرخطی و خطی سازه مرتبط با نگاشت Turkey, Erzincan را به ازای پارامترهای نیاز نرمال شده (دریفت، چرخش تیر پیوند و شتاب) را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای پاسخ در زوایای اعمال مختلف مطابق شکل (۱۰) و شکل (۱۱) به ازای هر نگاشت، می‌توان مشاهده کرد که در بیش از ۶۰ درصد نگاشت‌ها، پاسخ دریفت سازه در بازه‌هایی که پالس سرعت وجود دارد (نواحی خاکستری) رخ می‌دهد.

¹⁴ Fling steps

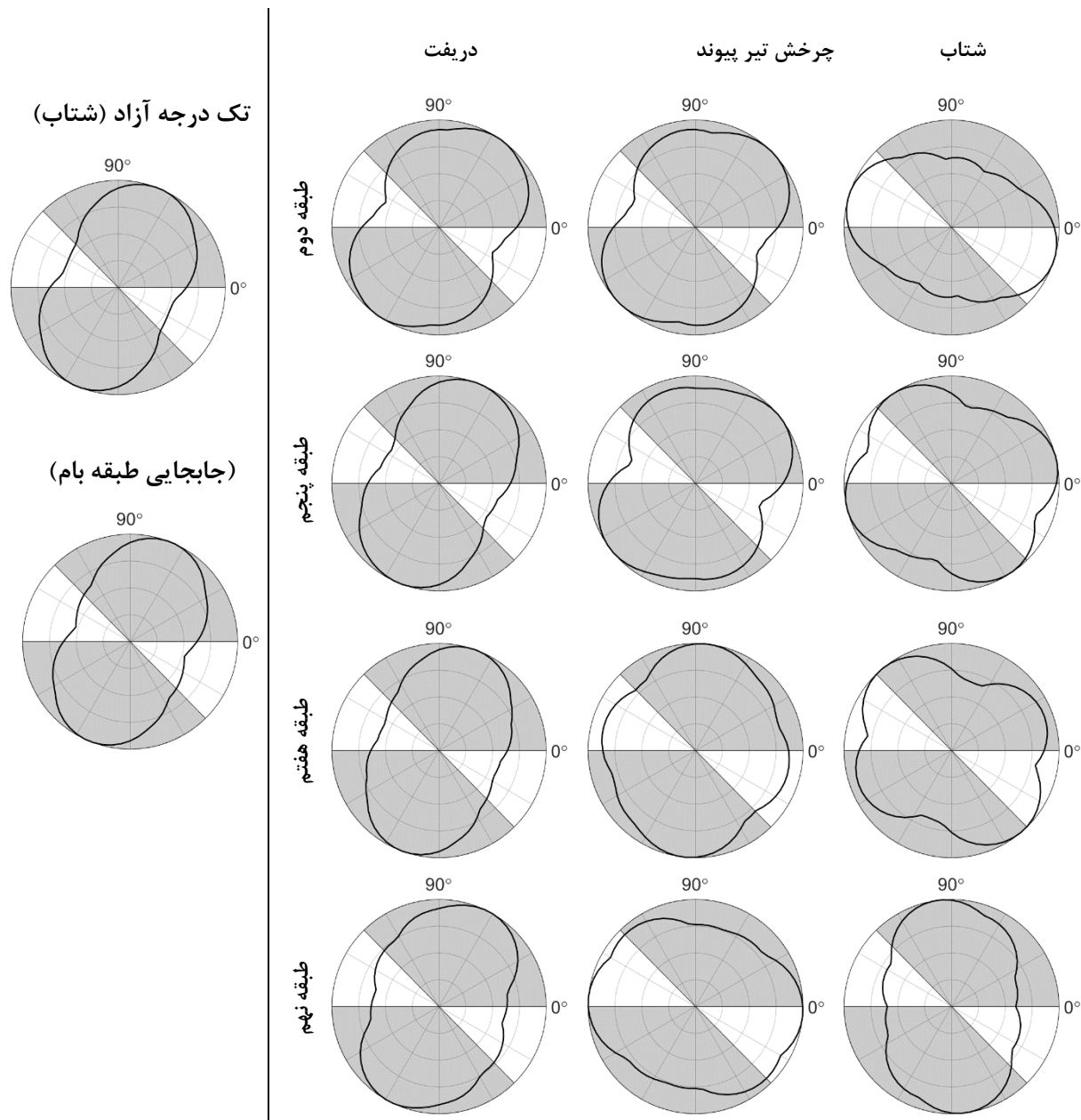
¹⁵ Forward Directivity

¹⁶ Fault-Normal

¹⁷ Fault-Parallel



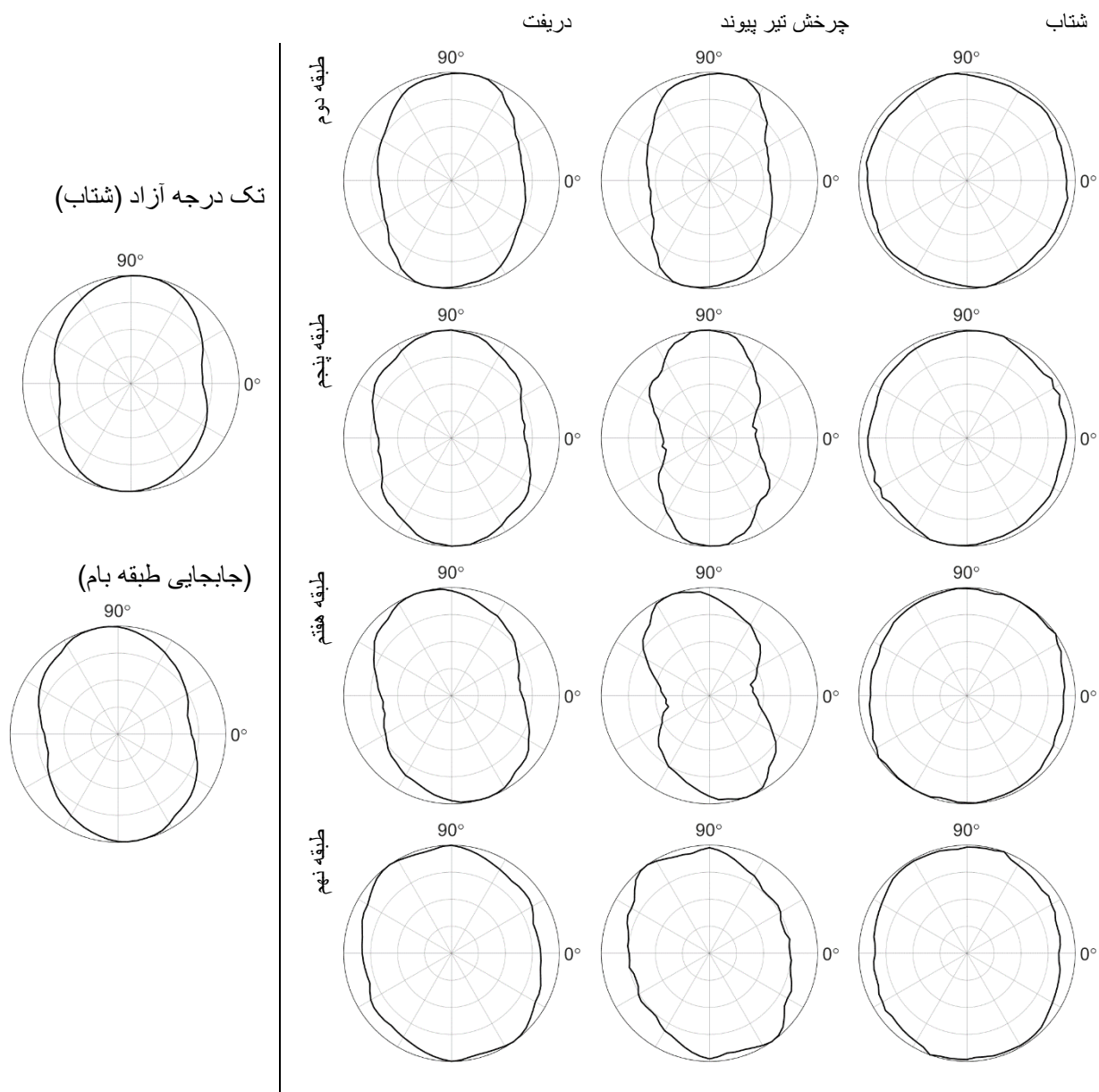
شکل ۱۰: نمودارهای قطبی پارامترهای نیاز نرمال شده در جهت x سازه ۱۰ طبقه غیرخطی و سازه یک درجه آزاد معادل مربوط به نگاشت Turkey, Erzincan.



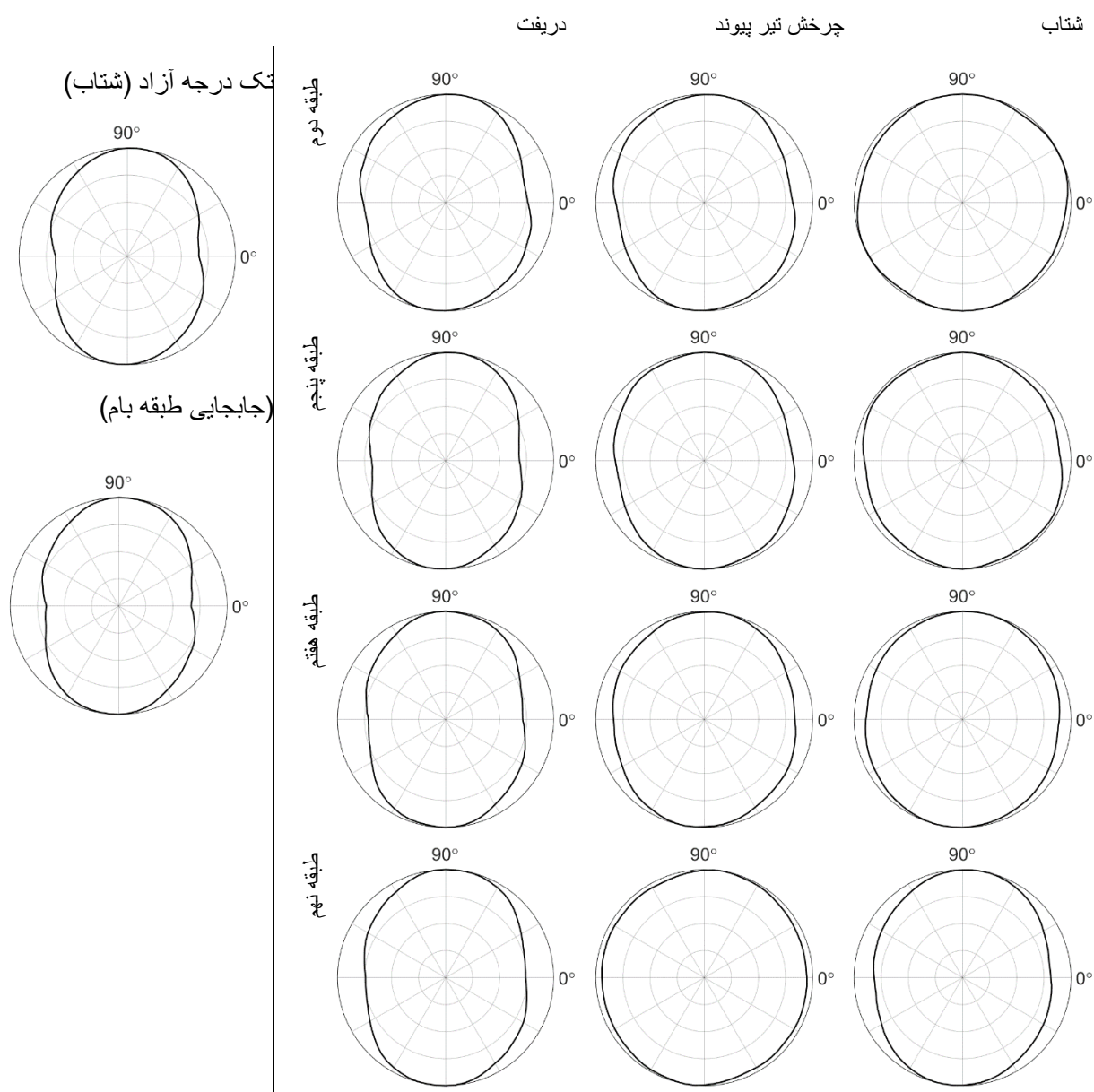
شکل ۱۱: نمودارهای قطبی پارامترهای نیاز نرمال شده در جهت x سازه ۱۰ طبقه خطی و سازه یک درجه آزاد معادل مربوط به نگاشت Turkey, Erzincan.

برای جمع بندی بهتر نتایج حاصل از نمودارهای قطبی، می توان از نمودار قطبی میانگین هندسی استفاده کرد. میانگین هندسی (μ)، از رابطه (۱۴) محاسبه می شود. در این رابطه x_n داده های آماری هستند، که در این تحقیق پاسخ های هر نگاشت محسوب می شوند. نمودارهای قطبی میانگین پاسخ های غیرخطی و خطی سازه ۱۰ طبقه را به ازای پارامترهای نیاز نرمال شده (دریفت، چرخش تیر پیوند و شتاب) به ترتیب در شکل (۱۲) و (۱۳) آورده شده است.

$$\mu = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (14)$$



شکل ۱۲: نمودارهای قطبی میانگین پارامترهای نیاز نرمال شده سازه ۱۰ طبقه غیرخطی و سازه یک درجه آزاد معادل آن در جهت x.



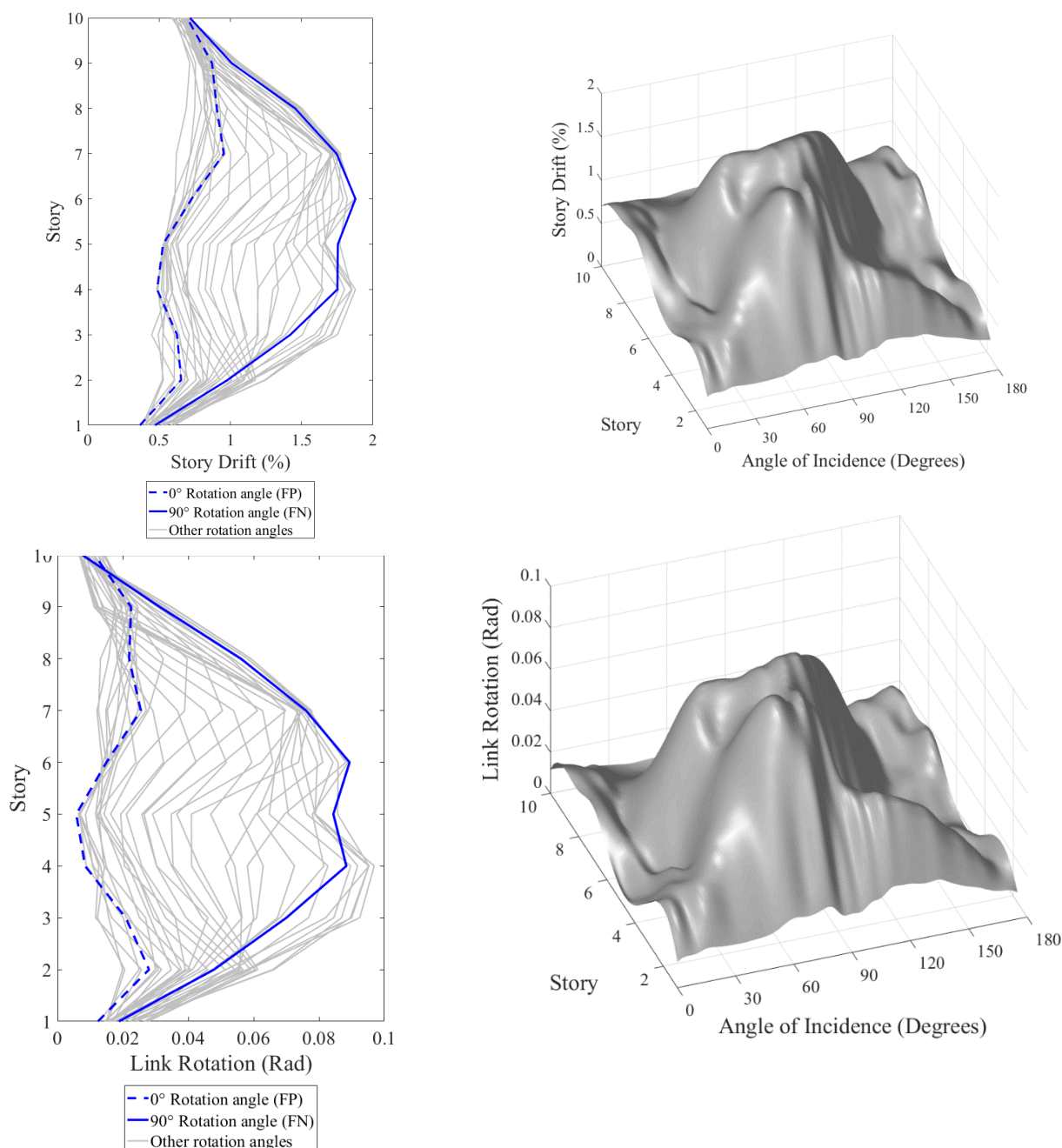
شکل ۱۳: نمودارهای قطبی میانگین پارامترهای نیاز نرمال شده سازه ۱۰ طبقه خطی و سازه تک درجه آزاد معادل آن در جهت x.

با توجه به شکل (۱۲) و (۱۳) می‌توان مشاهده کرد که پاسخ میانگین سازه ۱۰ طبقه خطی و غیرخطی به ازای پارامترهای نیاز مختلف، تقریباً همیشه در جهت FN بیشترین مقدار را دارد. همچنین پاسخ شتاب بیشینه مدل تک درجه آزاد نیز همانند مدل ۱۰ طبقه در جهت FN رخ می‌دهد. با دقت در نمودارهای قطبی هر طبقه می‌توان مشاهده کرد که پاسخ‌های شتاب همه طبقات در زوایای مختلف، اختلاف چندانی باهم ندارند، در حالی که پاسخ دریفت و چرخش تیر پیوند نسبت به شتاب، جهت گیری بسیار بیشتری دارد. همچنین پاسخ‌های دریفت و چرخش تیر پیوند سازه‌ی ۱۰ طبقه غیرخطی مطابق شکل (۱۲) با افزایش طبقات، نسبت به جهت FN زاویه می‌گیرند و

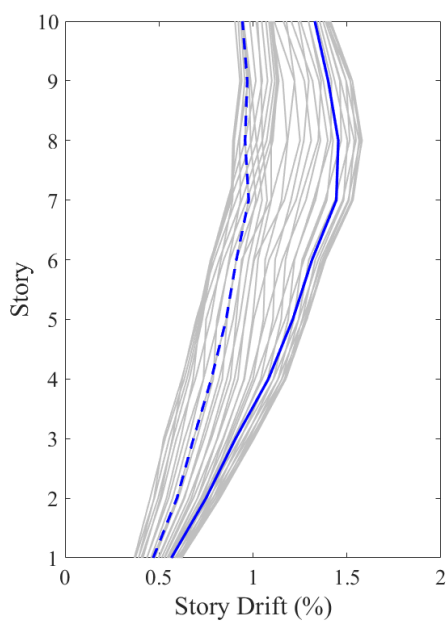
قطبیت بیشتری پیدا می‌کنند. این در حالی است که مطابق شکل (۱۳)، پاسخ‌های دررفت و چرخش تیرپیوند سازه‌ی خطی، با افزایش طبقات زاویه چندان نسبت به جهت FN نمی‌گیرند.

۲-۴ توزیع پاسخ در ارتفاع سازه

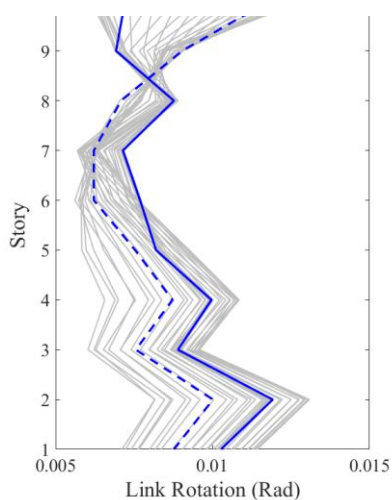
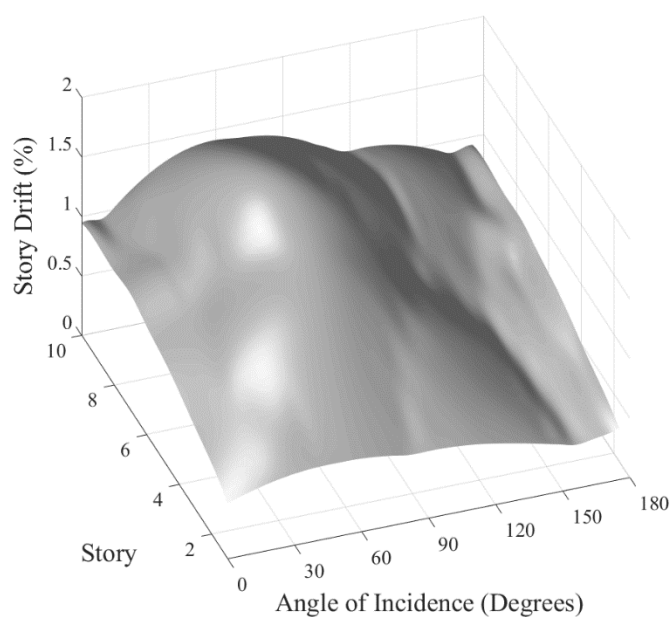
به منظور مشاهده بهتر توزیع دررفت و چرخش تیرپیوند در ارتفاع سازه در تمام زوایا، نمودارهای دو بعدی و رویه‌های ۳ بعدی برای نگاشت Turkey, Erzincan برای حالت‌های غیرخطی و خطی به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) رسم شدند. نمودارها و رویه‌های میانگین پاسخ‌ها برای حالت‌های غیرخطی و خطی نیز به ترتیب در شکل (۱۶) و (۱۷) رسم شده‌اند.



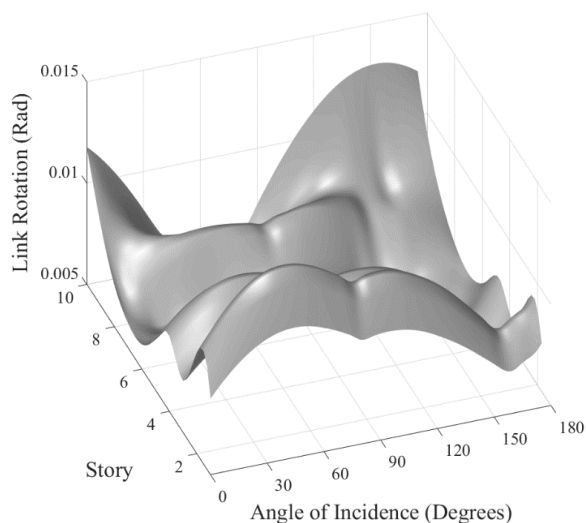
شکل ۱۴: میزان دررفت طبقات و چرخش تیرپیوند در طبقات سازه‌ی ۱۰ طبقه غیرخطی در هر درجه از دوران نگاشت θx مربوط به نگاشت Turkey, Erzincan.



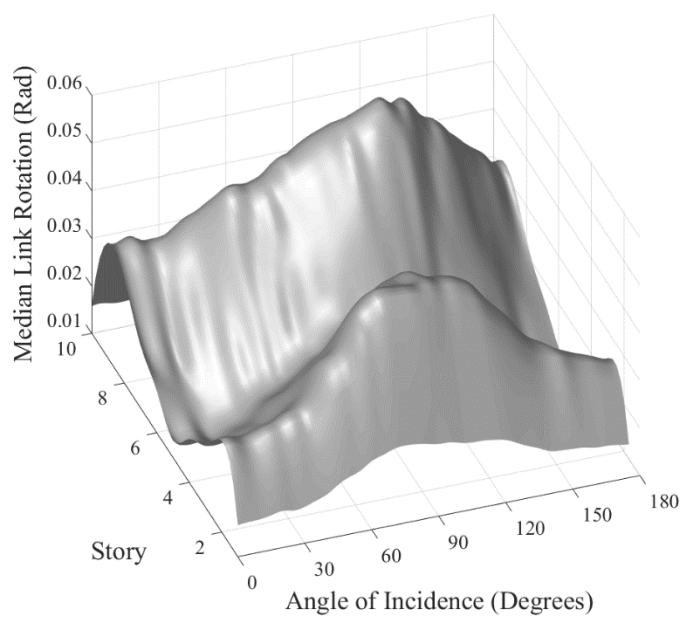
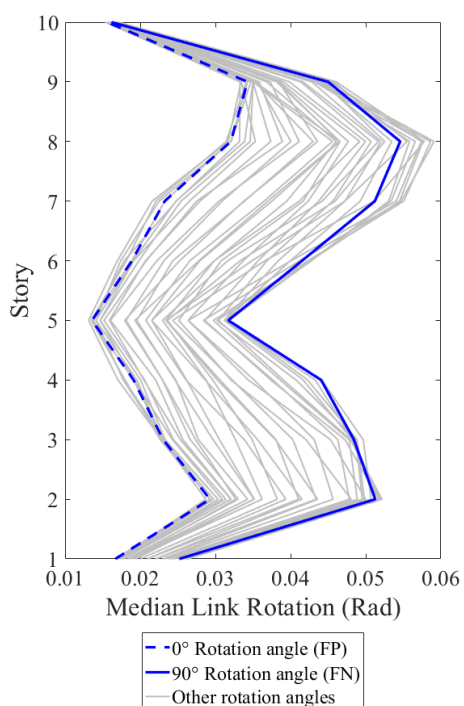
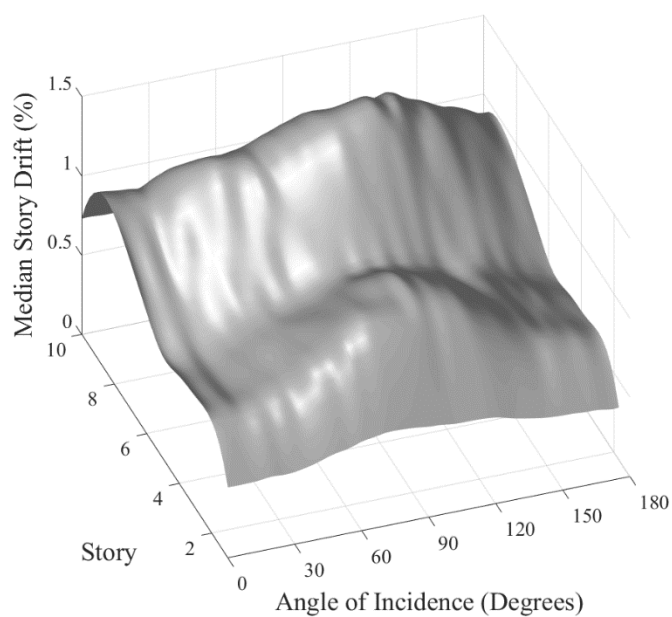
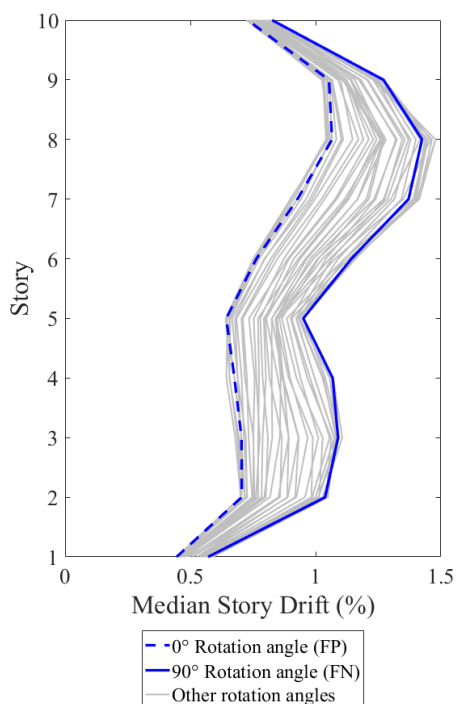
- - 0° Rotation angle (FP)
 — 90° Rotation angle (FN)
 — Other rotation angles



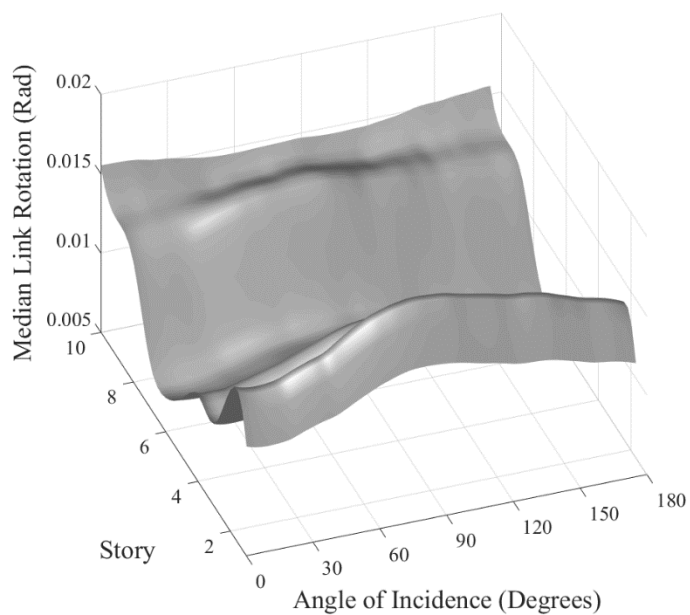
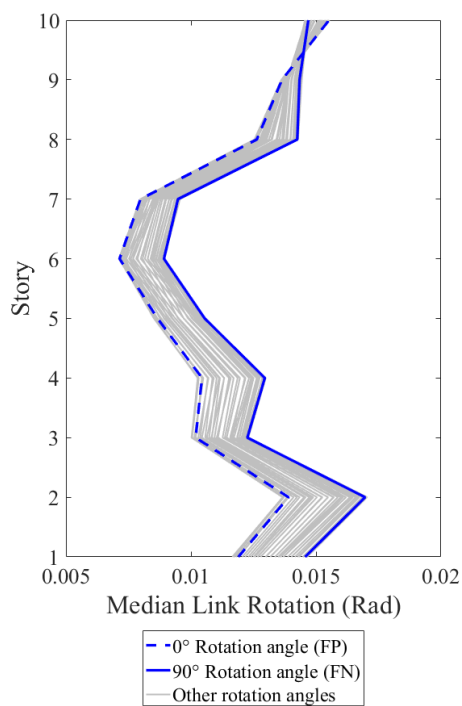
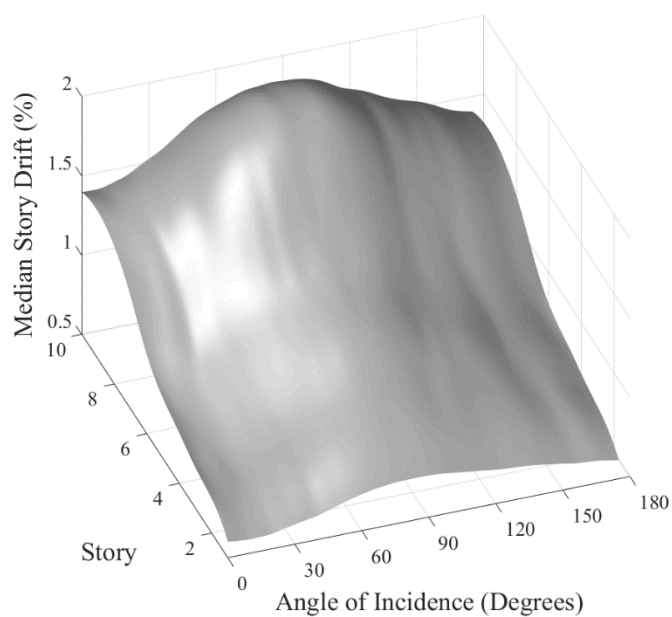
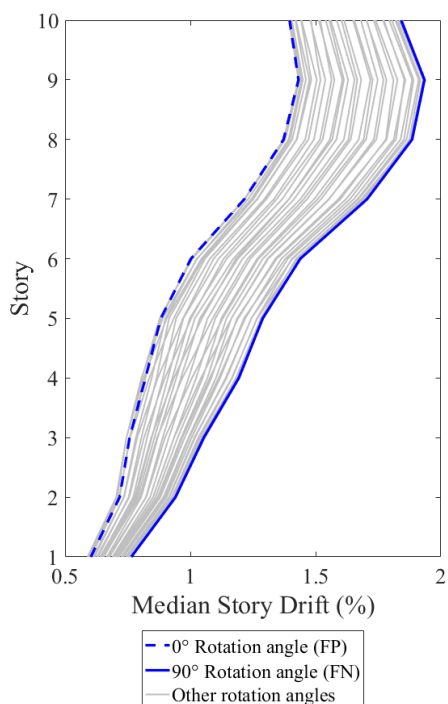
— 0° Rotation angle (FP)
 — 90° Rotation angle (FN)
 — Other rotation angles



شکل ۱۵: میزان دریفت طبقات و چرخش تیرپیوند در طبقات سازه‌ی ۱۰ طبقه خطی در هر درجه از دوران نگاشت θ_x مربوط به نگاشت Turkey, Erzincan.



شکل ۱۶: میزان میانگین دررفت طبقات و چرخش تیرپیوند در طبقات سازه‌ی ۱۰ طبقه غیرخطی در هر درجه از دوران نگاهت θx با استفاده از ۳۰ نگاهت مورد نظر.

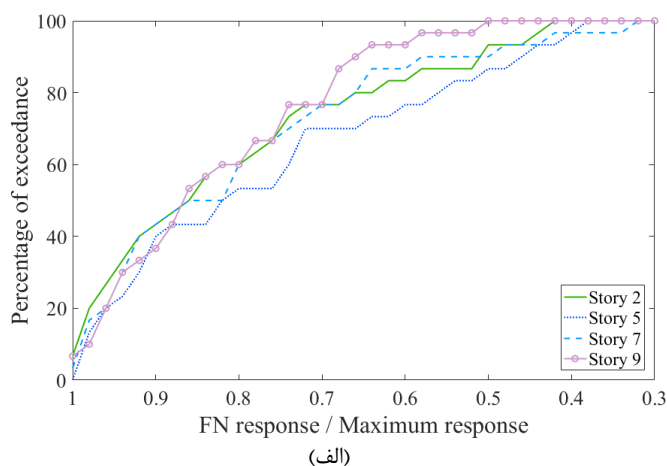
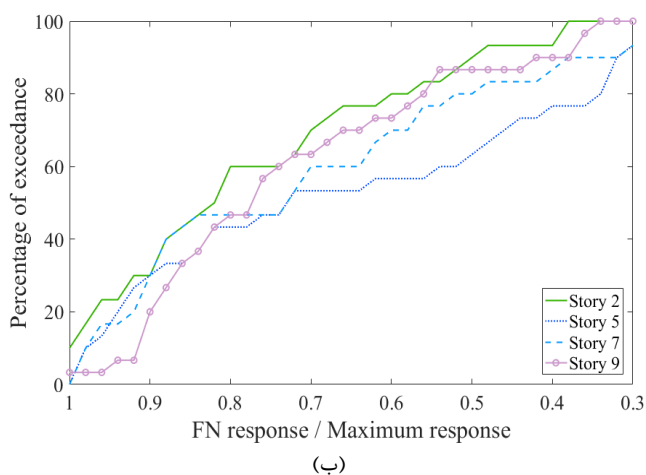


شکل ۱۷: میزان میانگین دررفت طبقات و چرخش تیرپیوند در طبقات سازه‌ی ۱۰ طبقه خطی در هر درجه از دوران نگاهت θx با استفاده از ۳۰ نگاهت مورد نظر.

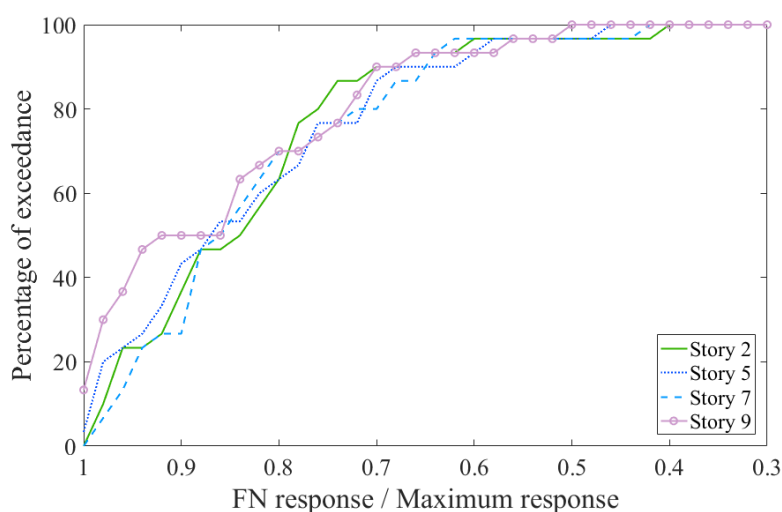
با توجه به شکل (۱۴) می‌توان مشاهده کرد که در سازه ۱۰ طبقه غیرخطی، جهت پاسخ بیشینه در طبقات مختلف تغییر می‌یابد که البته این تغییر جهت، در سازه‌ی خطی مطابق شکل (۱۵) نیز رخ می‌دهد ولی از شدت کمتری برخوردار است. همچنین جهت پاسخ‌های بیشینه سازه در حالت غیرخطی مطابق شکل (۱۴) در هر طبقه متفاوت با جهت پاسخ بیشینه سازه در حالت خطی در شکل (۱۵) می‌باشد، که این امر نشان دهنده این است که پیدا کردن جهت بیشینه پاسخ صرفاً با بررسی حالت خطی سازه‌های مختلف، امکان پذیر نمی‌باشد. در بیشتر نگاشت‌ها و به خصوص در طبقات پایین‌تر، پاسخ‌های بیشینه در نزدیکی جهت عمود بر گسل (FN) اتفاق می‌افتد اما طبقات بالاتر از این جهت دور می‌شوند. البته مورد مذکور در مدل غیرخطی مطابق شکل (۱۴) بیشتر مشهود است. همچنین با در نظر گرفتن پاسخ طبقات بحرانی که در آن‌ها مقادیر پاسخ دریافت بیشتر از سایر طبقات می‌باشد، جهت بیشینه پاسخ دریافت حدود ۶۷٪ مواقع، مایل به جهت عمود بر گسل (FN) می‌باشد. شکل (۱۶) و شکل (۱۷) نمودارهای میانگین توزیع دریافت و چرخش تیرپیوند را در طبقات نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱۶) که میانگین پاسخ‌ها را در حالت غیرخطی نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که پاسخ‌های بیشینه دریافت در طبقه ۸ ام و اطراف آن اتفاق می‌افتد، در حالی که بیشینه چرخش تیرپیوند علاوه بر طبقات بالا در طبقه ۲ ام نیز دیده می‌شود. در حالت خطی بر اساس شکل (۱۷) نیز تقریباً اتفاق مشابه رخ می‌دهد. این در حالی است برای تمامی طبقات، پاسخ جهت FN نزدیک به پاسخ بیشینه است.

۳-۴ بررسی پاسخ مولفه عمود بر گسل نسبت به بیشینه پاسخ

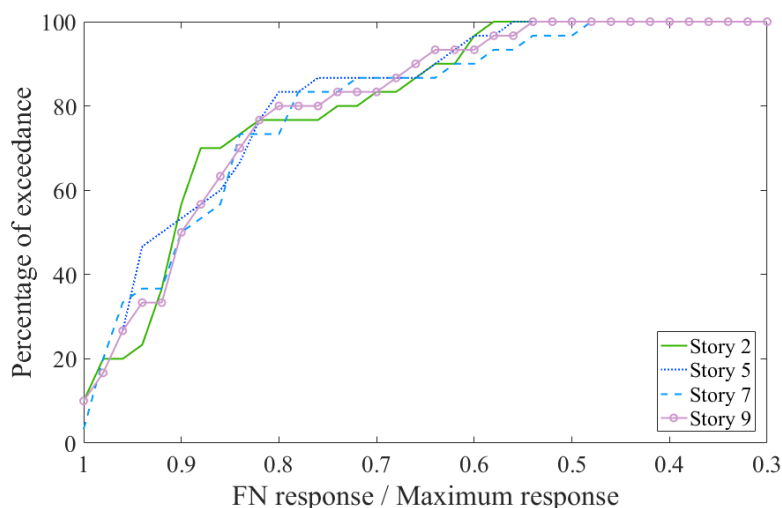
با بررسی نسبت پاسخ‌های سازه در جهت عمود بر گسل (FN) به پاسخ بیشینه سازه در بین تمامی جهات در هر نگاشت، نمودارهای درصد احتمال فراگذشت به ازای پاسخ‌های دریافت طبقات، شتاب طبقات و چرخش تیرپیوند در هر طبقه برای حالت‌های غیرخطی و خطی ترسیم شده‌اند. این نمودارها در شکل (۱۸) تا (۲۱) آورده شده است.



شکل ۱۸: نمودار درصد احتمال فراگذشت نسبت پاسخ‌های: (الف) دریافت (ب) چرخش تیرپیوند طبقات سازه در جهت FN به مقدار بیشینه برای سازه‌ی ۱۰ طبقه غیرخطی.

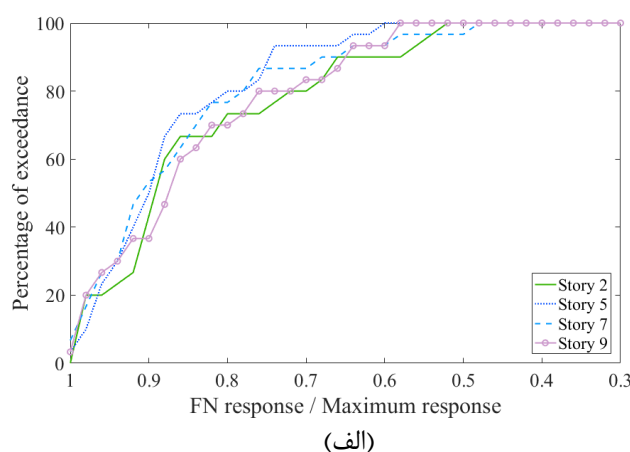
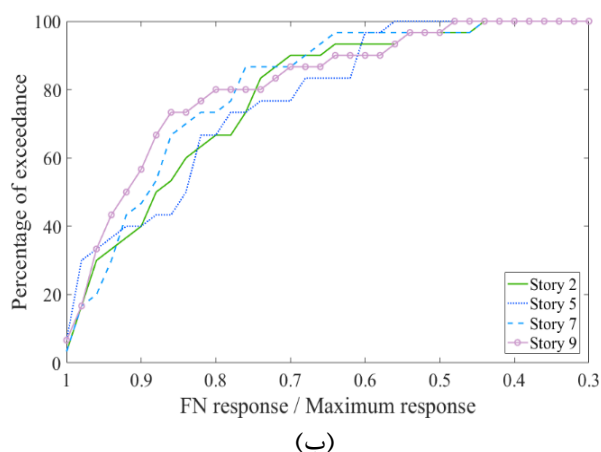


شکل ۱۹: نمودار درصد احتمال فراگذشت نسبت پاسخ‌های شتاب طبقات سازه در جهت FN به مقدار بیشینه برای سازه‌ی ۱۰ طبقه غیرخطی.



شکل ۲۰: نمودار درصد احتمال فراگذشت نسبت پاسخ‌های دررفت طبقات سازه در جهت FN به مقدار بیشینه برای سازه‌ی ۱۰ طبقه خطی.

با توجه به شکل (۱۸-الف) می‌توان مشاهده کرد تقریباً در ۶۵٪ مواقع، نسبت پاسخ جهت FN به پاسخ بیشینه، به طور متوسط بیش از ۰/۷۵ می‌باشد و در ۳۵٪ مواقع این نسبت بیش از ۰/۹ می‌باشد. در حالی که در نمودارهای مربوط به چرخش تیرپیوند، شکل (۱۸-ب) در هر طبقه دیده می‌شود که سطح نمودار پایین‌تر بوده و این نسبت تقریباً در ۵۵٪ و ۲۵٪ مواقع به ترتیب، بیش از ۰/۷۵ و ۰/۹ می‌باشد. همچنین قابل ذکر است که بالاترین سطح نمودارها مربوط به پاسخ شتاب شکل (۱۹) می‌باشد. این نمودارها نشان می‌دهند که با بررسی موردی نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که الزاماً جهت FN موجب پاسخ‌های بیشینه نشده و می‌توانند تا حدودی غیرمحافظة کارانه نیز باشند. در مقابل در سازه‌های خطی (شکل ۲۰ و ۲۱) سطح نمودارها نسبت به سازه‌های غیرخطی بالاتر است. برای مثال در نمودار دریافت مشاهده می‌شود، که تقریباً در ۸۰٪ مواقع، نسبت پاسخ جهت FN به پاسخ بیشینه، به طور متوسط بیش از ۰/۷۵ می‌باشد. در نمودارهای مربوط به حالت غیرخطی دیده می‌شود که اختلاف سطح بین هر خط، که همان نمودار پاسخ مرتبط با هر طبقه می‌باشد، بسیار بیشتر از نمودارهای سازه‌ی خطی می‌باشد که نشانگر این است که در سازه‌های غیرخطی، جهت‌گیری پاسخ‌های بیشینه در هر طبقه با سایر طبقات متفاوت بوده اما در حالت خطی، این تفاوت کمتر است.



شکل ۲۱: نمودار درصد احتمال فراگذشت نسبت پاسخ‌های (الف): چرخش تیر پیوند (ب): شتاب طبقات سازه در جهت FN به مقدار بیشینه برای سازه‌ی ۱۰ طبقه خطی.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق میزان تأثیر دوران مولفه‌های نگاشت‌های حوزه نزدیک گسل بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای سازه با استفاده از سیستم مهاربندی واگرا مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک سازه‌ی ۱۰ طبقه به دو صورت خطی و غیرخطی با پریود $1/65$ ثانیه و ضریب کاهش مقاومت ۶، و مدل تک درجه آزاد معادل آن در نرم افزار OpenSees مدل شدند. تحلیل تاریخچه زمانی به ازای هر زاویه که از چرخش نگاشت‌ها با گام‌های ۵ درجه به دست آمده، انجام گرفته شده است. پس از انجام تحلیل و به دست آوردن پارامترهای دریافت، شتاب و چرخش تیر پیوند به ازای هر گام، تأثیر دوران مولفه‌های نگاشت بر پارامترهای نیاز لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این تحقیق در مجموع ۲۱۶۰ تحلیل برای سازه‌های ۱۰ طبقه خطی و غیرخطی انجام گرفته است. نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- (۱) با بررسی سازه‌ی ۱۰ طبقه می‌توان مشاهده کرد که جهت پاسخ‌های بیشینه در طبقات مختلف، وقتی که رفتار سازه خطی است، تا حدود زیادی مشابه بوده ولی در حالت غیرخطی، این جهت در طبقات مختلف تغییرات قابل توجهی دارد. به طوری که حتی در مواردی که پاسخ‌های بیشینه دریافت و چرخش تیر پیوند طبقات پایین به جهت عمود بر گسل نزدیک می‌باشد، جهت پاسخ‌های بیشینه در طبقات بالاتر از این جهت دور می‌شوند.
- (۲) در سازه‌های ۱۰ طبقه، با دوران شتاب نگاشت نحوه‌ی توزیع دریافت در ارتفاع تغییر می‌یابد. برای مثال در نمونه‌ای مشاهده شد که در یک زاویه، پاسخ دریافت در طبقه‌ی نهم بیشینه است، ولی در جهتی با اختلاف زاویه‌ی ۳۰ درجه، بیشینه دریافت در طبقه‌ی دوم و نهم اتفاق می‌افتد. این موضوع می‌تواند در توزیع سختی و مقاومت در ارتفاع سازه، مورد توجه قرار گیرد.
- (۳) با توجه به آیین‌نامه بارگذاری آمریکا که توصیه می‌کند برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی نگاشت‌های حوزه نزدیک گسل، نگاشت‌ها در جهت‌های موازی و عمود بر گسل، به محورهای اصلی سازه اعمال شوند، مشاهده می‌شود که به طور میانگین جهت بیشینه در نزدیکی جهت عمود بر گسل قرار دارد.
- (۴) نسبت پاسخ دریافت در جهت عمود بر گسل به پاسخ جهت بیشینه متغیر است. با این حال پاسخ عمود بر گسل در حوزه‌ی خطی به پاسخ جهت بیشینه نزدیک‌تر بوده و در حوزه غیرخطی فاصله بیشتری می‌گیرد. به طوری که به طور میانگین در ۵۰٪ و ۷۰٪ موارد، این نسبت به ترتیب بیش از ۹/۰ و ۷۵/۰ مقدار پاسخ جهت بیشینه می‌باشد. به بیان دیگر در ۳۰٪ موارد، پاسخی که از این روش آیین‌نامه‌ای به دست می‌آید، کمتر از ۷۵/۰ پاسخ بیشینه می‌باشد و کمی غیرمحافظة کارانه است.
- (۵) با توجه به آیین‌نامه بارگذاری آمریکا که در آن طیف طرح ساختگاه بر اساس جهت بیشینه شتاب تعیین شده است، در این تحقیق مشاهده می‌شود که به طور میانگین، برای همه‌ی پارامترهای نیاز، پاسخ جهت بیشینه شتاب به پاسخ جهت عمود بر گسل

نزدیک است. اما به طور موردی در بعضی رکوردهای زلزله، زاویه بیشینه پاسخ و بیشینه شتاب با جهت عمود بر گسل تفاوت قابل توجهی دارند.

(۶) به طور کلی استفاده از جهت‌های موازی و عمود بر گسل (FP/FN) برای گرفتن پاسخ‌های محافظه‌کارانه بهتر از استفاده از جهت‌های ثبت‌شده توسط شتاب نگارها می‌باشد.

(۷) در بسیاری از مطالعات انجام شده بر روی زلزله‌های نزدیک گسل، اشاره شده که بیشینه‌ی پاسخ‌ها، در جهت پالس سرعت اتفاق می‌افتد. اما این پالس سرعت در دامنه‌ی وسیعی از زوایای دوران مشاهده می‌شود و زاویه یا زوایای شاخصی را برای کاربرد عملی به دست نمی‌دهد.

مراجع

- [1] ASCE/SEI 7-16. (2016). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.
- [2] Penzien, Joseph. and Makoto, Watabe. (1974). Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 3(4), 365- 373.
- [3] Aria, A. (1970). A measure of earthquake intensity in Seismic Design for Nuclear Power Plants. MIT Press, Cambridge, MA, 438-483.
- [4] Wilson, E.L. and Suharwardy, I. (1995). A clarification of the orthogonal effects in a three-dimensional seismic analysis. *Earthquake Spectra*, 11(4), 659-666.
- [5] López, Oscar A. and Torres, Ronald. (1997). The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(9), 881-894.
- [6] Lopez, Oscar A. Chopra, Anil K. and J. Hernandez, Julio. (2000). Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(12), 1759-1778.
- [7] Athanatopoulou, A. M. (2005). Critical orientation of three correlated seismic components. *Engineering Structures*, 27(2), 301-312.
- [8] Amarloo, N. and Emami, AR. (2019). A 3-dimensional perspective for inter-storey drift, ductility and damage distributions in plan-irregular RC buildings considering seismic orientation effect. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(6), 3447-74.
- [9] Pavel, F. and Nica, G. (2019). Influence of Rotating Strong Ground Motions on the Response of Doubly Symmetrical RC Wall Structures in Romania and Its Implication on Code Provisions. *International Journal of Civil Engineering*, 17(7), 969-79.
- [10] Giannopoulos, D. and Vamvatsikos, D. (2018). Ground motion records for seismic performance assessment: To rotate or not to rotate? *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(12), 2410-25.
- [11] Ahsaan, Hussain. Sekhar Chandra Dutta, Sreekanta Das. (2022). Seismic behaviour of structures under bidirectional ground motion: Does the angle of incidence have any influence? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 159, 107328.
- [12] Rigato, AB. and Medina, RA. (2007). Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions. *Engineering Structures*, 29(10), 2593-601.
- [13] Hong, H. P., and K. Goda. (2007). Orientation-dependent ground-motion measure for seismic-hazard assessment, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1525-1538.
- [14] Hong, H. P., and K. Goda. (2010). Characteristics of horizontal ground motion measures along principal directions, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(1), 9-22.
- [15] Kalkan, E. and Kwong, NS. (2014). Pros and cons of rotating ground motion records to fault-normal/parallel directions for response history analysis of buildings, *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013062.

- [16] Kalkan, E. and Reyes, JC. (2015). Significance of rotating ground motions on behavior of symmetric-and asymmetric-plan structures: part II. Multi-story structures. *Earthquake Spectra*, 31(3), 1613-28.
- [17] Reyes, Juan C. and Kalkan, Erol. (2012). Should Ground-Motion Records be Rotated to Fault Normal/Parallel or Maximum Direction for Response History Analysis of Buildings? *US Department of the Interior, US Geological Survey*.
- [18] Skoulidou, D. Romão, X. Franchin, P. (2019). How is collapse risk of RC buildings affected by the angle of seismic incidence? *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(14), 1575-94.
- [19] Skoulidou, D. Romão, X. (2020). The significance of considering multiple angles of seismic incidence for estimating engineering demand parameters. *Bulletin of earthquake engineering*, 18(1), 139-63.
- [20] Vargas, Y. Silva, V. Vamvatsikos, D. Pujades, L. (2021). A simplified approach for including the incidence angle effect in seismic risk assessment. *Earthquake engineering structural dynamics*, 51(1), 191-212.
- [21] Kheyroddin, A. Gholhaki, M. Pachideh, G. (2019). Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and pushover methods in the near-fault field, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 7 (1), 159-173.
- [22] Pachideh, G. Kafi, M. Gholhaki, M. (2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, *Structures*, 28, 467-481.
- [23] Pachideh, G. Gholhaki, M. Kafi, M. (2020). Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Steel and Composite Structures*, 36 (2), 197-211.
- [24] Moradian, M. Pachideh, G. Moshtagh, M. (2022). Study of seismic behavior and development of fragility curves of divergent braced frames under successive earthquakes, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8 (4), 156-175.
- [25] Chao, Shih-Ho. And Goel, Subhash C. (2005). Performance-based seismic design of EBF using target drift and yield mechanism as performance criteria. *Ann Arbor* 1001, 48109-2125.
- [26] International Code Council (ICC). (2000). International Building Code, ICC, Birmingham, AL.
- [27] McKenna, F. Fenves, GL. Scott, MH. (2000). Open system for earthquake engineering simulation. Berkeley, CA: Univ. California.
- [28] Lignos, Dimitrios. (2008). Sidesway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations, Stanford University.
- [29] Okazaki, T. Engelhardt, M. D. Drolas, A. Schell, E. Hong, J.K, Uang, C.M. (2009). Experimental investigation of link-to-column connections in eccentrically braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(7), 1401-1412.