

Assessment of Soil–Structure Interaction Effects on Steel Frames Retrofitted with TADAS Yielding Dampers

Omid Pouresmaeil Janbaz, Abbas Haghollahi* , Saeed Ghaffarpour Jahromi 

Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This study investigates the seismic performance of three- and nine-story steel moment-resisting frames retrofitted with Triangular Added Damping and Stiffness (TADAS) yielding dampers, with a specific focus on the effects of soil–structure interaction (SSI). Nonlinear time history analyses (NLTHA) were conducted under DBE and MCE seismic hazard levels, examining three scenarios: bare frames, damped frames on a rigid base, and damped frames with SSI. Results indicate that while TADAS dampers effectively reduce inter-story drifts and base shear, the inclusion of SSI introduces additional flexibility to the system, increasing period and drift demands, especially at lower stories in mid-rise buildings. The study highlights the necessity of considering SSI in seismic retrofit designs to avoid underestimating deformation demands and ensure realistic performance evaluation.

Review History:

Received: Oct. 05, 2024

Revised: May, 26, 2025

Accepted: Jun. 05, 2025

Available Online: Jun. 16, 2025

Keywords:

Soil-Structure Interaction

TADAS Yielding Damper

Steel Moment Frame

Time-History Analysis

Seismic Hazard Level

1- Introduction

Modern seismic retrofitting techniques emphasize energy dissipation devices like TADAS dampers, which allow for targeted energy absorption through controlled plastic deformation of triangular steel plates. These devices enhance seismic resilience without altering the primary structural system. However, soil–structure interaction (SSI), particularly in soft soils, can significantly affect the dynamic response by increasing system flexibility, thus altering period, drift, and acceleration demands [1], [2]. In real scenarios, the interaction between foundation and supporting soil alters stiffness and damping properties, contradicting the assumption of fixed-base behavior. Recent studies reveal that SSI can amplify inter-story drifts at lower levels and reduce acceleration demands at upper floors. As a result, over-reliance on fixed-base models can lead to inaccurate seismic assessments. Recent codes such as ASCE/SEI 7-22 emphasize incorporating SSI into design, especially for mid- and high-rise structures. Ahmadi et al. [3] confirmed that neglecting SSI leads to unconservative drift predictions in retrofitted frames. This study evaluates the combined effects of TADAS dampers and SSI using nonlinear dynamic analysis of standard SAC benchmark frames.

2- Methodology

This study analyzes two SAC benchmark frames with 3 and 9 stories, representing low- and mid-rise structures [4]. Each was assessed in three configurations: (1) a bare frame (SAC), (2) a frame retrofitted with TADAS dampers assuming a rigid base (SAC/DAM), and (3) a frame with dampers and soil–structure interaction (SAC/DAM/SSI). TADAS dampers were modeled based on Tsai's yielding mechanism [5], ensuring the foundation (BNWF) model, incorporating nonlinear soil springs calibrated according to a bilinear hysteretic response under cyclic loading. Nonlinear time history analyses (NLTHA) were conducted using OpenSees, with seven SAC ground motion records applied for both DBE and MCE hazard levels [6]. The SSI effects were simulated using a beam-on-nonlinear-Winkler- ASCE/SEI 7-22 recommendations Parameters such as damping ratio, yield force, and damper stiffness were derived to match performance targets and were applied consistently across configurations to isolate the influence of SSI. Figure 1 illustrates the floor plans and elevations of the selected 3- and 9-story SAC frames used for the validation and dynamic analysis stages.

*Corresponding author's email: haghollahi@sru.ac.ir

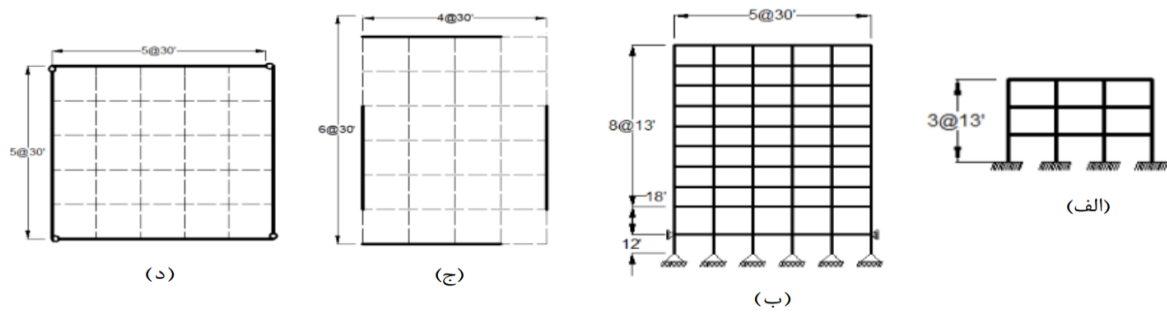


Fig. 1. Plans and elevations of 3 and 9-story SAC frames

Table 1. Summary of seismic performance across configurations

Frame Type	Hazard Level	Configuration	Drift Change (%)	Base Shear Change (%)
3-Story	DBE	With Damper	-11	-7
		With Damper + SSI	-7	-11
9-Story		With Damper	-17	-8
		With Damper + SSI	-10	-14
3-Story	MCE	With Damper	-36	-5
		With Damper + SSI	-33	-8
9-Story		With Damper	-12	-5
		With Damper + SSI	-9	-10

3- Results and Discussion

Table 1 summarizes the variations in seismic responses across different retrofit configurations and hazard levels. It clearly illustrates the reduction in drift and base shear when TADAS dampers are employed. More importantly, it shows how SSI alters the effectiveness of these dampers by increasing drift demands, particularly at the lower stories. For instance, in the 9-story frame under MCE, drift reduction decreases 9% when SSI is included. This trend suggests a non-uniform impact of soil flexibility, depending on building height and seismic intensity. Hence, designers must consider SSI to accurately predict retrofit efficiency.

4- Conclusion

The implementation of TADAS yielding dampers substantially enhances the seismic resilience of steel frames by effectively reducing inter-story drifts and base shear demands through controlled energy dissipation. Nevertheless, incorporating soil-structure interaction (SSI) alters the

dynamic characteristics of the system by increasing flexibility and lengthening fundamental periods, particularly in mid- and high-rise structures. The findings underscore that neglecting SSI can result in underestimation of drift demands and unintended amplification of floor accelerations. Therefore, to achieve accurate performance-based seismic evaluations and ensure reliable retrofit strategies, it is imperative that SSI effects be explicitly considered in both the modeling and design stages of structural assessment.

References

- [1] M.R. Akhoondi, F. Behnamfar, Seismic fragility curves of steel structures including soil-structure interaction and variation of soil parameters, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143 (2021) 106609.
- [2] S.H. Sanati, A. Karamodin, Optimum seismic design of frame structures with and without metallic yielding dampers considering life-cycle cost, *Journal of Building Engineering*, 76 (2023) 107335.

- [3] M. Ahmadi, M. Ebadi-Jamkhaneh, Seismic Upgrading of Existing Steel Buildings Built on Soft Soil Using Passive Damping Systems, in: Buildings, 2023.
- [4] S.A.C.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).
- [5] K.-C. Tsai, H.-W. Chen, C.-P. Hong, Y.-F. Su, Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, Earthquake Spectra, 9(3) (1993) 505-528.
- [6] P.G. Somerville, N.F. Smith, R.W. Graves, N.A. Abrahamson, Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, Seismological Research Letters, 68(1) (1997) 199-222.



ارزیابی اثرات اندرکنش خاک- سازه بر قاب‌های خمشی فولادی بهسازی شده با میراگر تسلیمی TADAS

امید پوراسماعیل جانباز، عباس حق اللهی*^{1b}، سعید غفارپور جهرمی^{1b}

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

کلمات کلیدی:

اندرکنش خاک - سازه

میراگر تسلیمی

قاب خمشی فولادی

تحلیل تاریخچه زمانی

سطح خطر لرزه‌ای

خلاصه: میراگرهای تسلیمی یکی از رایج‌ترین سیستم‌های کنترل غیرفعال برای بهبود عملکرد سازه در برابر زلزله هستند. ویژگی‌های دینامیکی سازه، تحت تأثیر انعطاف‌پذیری خاک و استهلاک انرژی زلزله توسط سیستم خاک-سازه، می‌تواند عملکرد میراگرهای تسلیمی را در برابر نیروهای لرزه‌ای دستخوش تغییر کند. در این پژوهش، تأثیر اندرکنش خاک-سازه و میراگر تسلیمی، بر قاب‌های خمشی ۳ و ۹ طبقه فولادی، در سه حالت مختلف و در دو سطح خطر لرزه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. اثربخشی این سیستم‌ها بر پارامترهای دوره تناوب، جابه‌جایی نسبی، شتاب مطلق و برش پایه، به عنوان معیارهای عملکرد لرزه‌ای، با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که افزودن میراگر تسلیمی TADAS در قاب‌های کوتاه و میان‌مرتبه، باعث کاهش دوره تناوب می‌شود. با این حال، اثرات اندرکنش سبب افزایش مجدد دوره تناوب گردید. همچنین، با الحاق میراگر به قاب‌ها، در هر دو سطح خطر لرزه‌ای، میزان شتاب در طبقات میانی و بالایی نسبت به طبقات زیرین افزایش بیشتری پیدا می‌کند. با این وجود، در نظر گرفتن اثرات اندرکنش، این افزایش را برای سطح خطر MCE تشدید کرده، اما برای سطح خطر DBE اندکی تعدیل می‌کند. از سوی دیگر، در هر دو قاب، اثرات اندرکنش در طبقات پایینی، برخلاف طبقات بالایی، موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی جابجایی نسبی طبقات در هر دو سطح خطر می‌شود. الحاق میراگر در هر دو قاب و در هر دو سطح خطر، موجب کاهش برش پایه در قاب‌ها شده و در نظر گرفتن اثرات اندرکنش، این کاهش را، به‌ویژه در قاب ۹ طبقه، تشدید می‌کند.

۱- مقدمه

نصب می‌شوند و با جذب انرژی، باعث افزایش میرایی، کاهش ارتعاشات و اصلاح رفتار دینامیکی سازه می‌شوند. تمرکز آسیب در این قطعات، موجب سهولت تعمیر و بازرسی سازه پس از زلزله خواهد شد. استفاده از این روش‌ها بدون ایجاد تغییرات اساسی در سیستم باربر اصلی، موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه می‌شود. در صورتی که سازه‌ای بر روی خاک نرم احداث شود، تعامل میان سازه و خاک منجر به تغییراتی در پاسخ دینامیکی آن می‌شود. این پدیده که به اندرکنش خاک و سازه معروف است، ناشی از تأثیر متقابل ویژگی‌های دینامیکی سازه و خاک می‌باشد [۲]. نتایج مطالعه گنجوی و همکاران [۳] نشان داد که ویژگی‌های خاک زیر فونداسیون می‌تواند به‌طور معناداری بر پاسخ‌های ارتجاعی و غیرارتجاعی سازه در برابر اثرات ناشی از حرکت زمین تأثیر بگذارد. طبق نتایج تحقیقات و نانزی و همکاران [۴] در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش تغییر مکان‌ها و کاهش نیروهای داخلی در سازه می‌شود. فرآیند دشوار مدل‌سازی و تحلیل اندرکنش خاک و سازه و اعتقاد به در جهت اطمینان بودن لحاظ نمودن اثرات اندرکنش بر

در رویکردهای نوین مهندسی سازه، کاهش خسارات ناشی از بارهای دینامیکی وارد بر سازه، از قبیل زلزله و باد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طور کلی، سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله را می‌توان به دو دسته سیستم‌های سنتی و سیستم‌های نوین طبقه‌بندی کرد. در سیستم‌های سنتی، اعضای اصلی سازه در نقاطی مشخص، مانند محل اتصال تیرها و ستون‌ها، با ورود به ناحیه‌ی غیرخطی و ایجاد مفصل‌های پلاستیک، همراه با بهره‌گیری از خاصیت شکل‌پذیری اعضا، انرژی ورودی ناشی از بارهای دینامیکی نظیر زلزله را مستهلک می‌کنند. در این حالت، عمدتاً خساراتی به اعضای سازه وارد می‌شود که نیاز به بازسازی پس از وقوع زلزله را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد [۱]. در مقابل، سیستم‌های نوین با بهره‌گیری از تجهیزات کنترل غیرفعال مانند میراگرها، به‌ویژه میراگرهای تسلیمی، امکان کاهش پاسخ دینامیکی سازه را فراهم می‌سازند. این میراگرها مانند فیوزهای شکل‌پذیر در نقاط مختلف سازه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: haghollahi@srui.ac.ir



پاسخ‌های سازه‌ای، دلیل اصلی نادیده گرفتن اثرات اندرکنش در آیین‌نامه‌ها بوده است. بر خلاف تصور قبلی، تحقیقات پژوهشگران در سالهای اخیر، برای سازه‌های مختلف نشان داده است که فرض در جهت اطمینان بودن اثرات اندرکنش، همواره درست نیست. بر همین اساس، در آیین‌نامه‌های جدید روشهایی برای لحاظ نمودن اثرات اندرکنش در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد شده است. اندرکنش خاک و سازه با تغییر قابل ملاحظه در رفتار دینامیکی سازه موجب کاهش سختی، افزایش دوره تناوب اصلی سازه و تغییر پاسخ‌های سازه شده که این امر بر خلاف هدف استفاده از میراگرهای تسلیمی در سازه‌ها که عموماً کاهش پاسخ‌های سازه‌ای می‌باشد، می‌تواند عملکرد سازه‌های مجهز شده به میراگرهای تسلیمی را تحت تاثیر قرار دهد. بر اساس تحقیقات انجام شده در مراجع معتبر جدید، از جمله ASCE/SEI 7-22 [۵] برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگرها، به‌ویژه در خاک‌های نرم یا با مقاومت کم، لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه ضروری است. بنابراین مدل‌سازی خاک زیر سازه و تحلیل دقیق اثرات اندرکنش برای اطمینان از عملکرد بهینه سازه‌های مجهز به میراگرهای تسلیمی و افزایش ایمنی و کارایی سیستم مقاوم‌سازی شده اهمیت ویژه‌ای دارد. در مطالعه حاضر نیز، با انجام تحلیل‌های دقیق دینامیکی غیرخطی، تأثیرات هم‌زمان اندرکنش خاک و سازه و میراگرهای تسلیمی بر پارامترهای کلیدی لرزه‌ای نظیر تغییر مکان نسبی طبقات، شتاب و برش پایه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۱- مطالعات کاربرد میراگرهای تسلیمی و اثرات اندرکنش خاک - سازه در سازه‌های فولادی

نخستین تحقیقات آزمایشگاهی جامع در مورد بررسی عملکرد میراگرهای تسلیمی، توسط کلی و همکاران [۶] انجام شد. در این پژوهش، سه نوع میراگر فلزی نوار خمیده U- شکل، تیر پیچشی و تیر خمشی مورد مطالعه قرار گرفتند. صنعتی و همکاران [۷] در پژوهشی، به بررسی طراحی بهینه دو قاب خمشی فولادی ۴ و ۸ طبقه، با و بدون میراگرهای تسلیمی TADAS، با استفاده از فرآیند طراحی مبتنی بر حداقل رساندن هزینه چرخه عمر پرداختند. برای تحلیل پاسخ سازه از روش زمان - دوام و چهار رویکرد طراحی استفاده شد. در رویکردهای سوم و چهارم این تحقیق به ترتیب مشخصات میراگر TADAS و در ادامه مشخصات قاب و میراگر TADAS به طور هم‌زمان بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد افزودن میراگرهای فلزی با پارامترهای بهینه، می‌تواند الزامات بهسازی را تأمین کرده و از طراحی

مجدد جلوگیری کند. اکبری و همکاران [۸] عملکرد سه نوع سیستم میراگر چندمرحله‌ای TADAS متشکل از مصالح با مقاومت‌های تسلیم مختلف، پدهای اصطکاکی و یا تغییر اندازه سوراخ محل اتصال ورق‌ها را در یک قاب فولادی پنج‌دهانه و ده طبقه بررسی کردند. از میان پنج میراگر طراحی شده بر اساس پارامترهایی نظیر سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی، مناسب‌ترین میراگر انتخاب شد و عملکرد لرزه‌ای این سیستم در یک قاب خمشی فولادی با پنج دهانه و ده طبقه، تحت تحلیل IDA^۲ برای دو سطح خطر زلزله و با استفاده از رکوردهای حوزه نزدیک و دور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که تاثیر میراگر چندمرحله‌ای TADAS با ۳ صفحه اصلی و ۲ صفحه کمکی، در زلزله‌های حوزه دور نسبت به حوزه نزدیک عملکرد بهتری دارد. لیبی و همکاران [۹] با ارائه یک میراگر تسلیمی نوین با عملکرد دومرحله‌ای، به مطالعه‌ی پارامترهای هندسی متنوع و بررسی میزان تأثیر این میراگر بر پاسخ‌هایی نظیر شتاب نسبی، برش پایه و سرعت طبقات در یک قاب فولادی ۳ طبقه پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت هفت شتاب‌نگاشت منتخب نشان داد که استفاده از این نوع میراگر منجر به کاهش قابل توجهی در شتاب نسبی، سرعت طبقات و برش پایه در قاب مورد مطالعه می‌شود. اورتگا و همکاران [۱۰] با هدف کاهش شتاب‌های طبقات، به بهینه‌سازی مشخصات و توزیع ارتفاعی میراگرهای هیستریزیس با استفاده از الگوریتم جستجوی الگو پرداختند. تأثیر احتمالی پریود اصلی سازه، محتوای فرکانسی تحریک، و تعداد طبقات بر مشخصات بهینه میراگرهای هیستریزیس برای طیفی از سازه‌های برشی یک طبقه الاستیک خطی با دوره تناوب‌هایی در محدوده ۰/۵ تا ۴ ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند. یافته‌های این مطالعه برای یک مدل ساختمان معیار ۹ طبقه که تحت رکوردهای طبیعی قرار گرفته است اعتبارسنجی شده‌اند. نتایج نشان داد توزیع غیریکنواخت بهینه برای میراگرهای هیستریزیس در ارتفاع سازه، در مقایسه با توزیع یکنواخت بهینه، عملکردی تقریباً مشابه یا تنها کمی بهتر دارند. پژوهش‌های متعددی به بررسی تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند. آراز و همکاران [۱۱] با تحلیل عددی یک ساختمان ۴۰ طبقه، تحت ده رکورد زلزله و شش نوع خاک مختلف نشان دادند که اندرکنش خاک و سازه موجب افزایش دوره تناوب و کاهش شتاب طبقات، به‌ویژه در سازه‌های واقع بر خاک‌های نرم می‌شود. همچنین بیشترین تغییرات شتاب در طبقات میانی و فوقانی رخ داده است، که بر اهمیت لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه در تحلیل‌های لرزه‌ای

لرزه‌ای می‌شود.

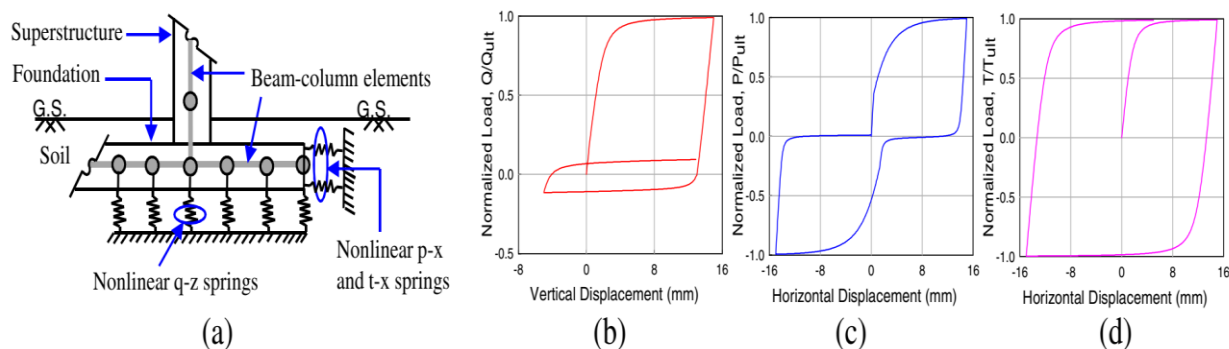
۱-۲- مبانی اندرکنش خاک و سازه

پاسخ یک سازه به تحریک زلزله تحت تاثیر اندرکنش سه عامل سازه، فونداسیون و خاک قرار می‌گیرد. تحلیل اندرکنش خاک-سازه و به عبارتی دیگر خاک-فونداسیون-سازه، ارزیابی پاسخ مجموعه این سیستم به یک تحریک زمین‌لرزه را شامل می‌شود [۱۶]. تغییرشکل‌های خاک هنگام زلزله مستقیماً بر رفتار دینامیکی سازه تأثیر می‌گذارند. تأثیری که اندرکنش دینامیکی خاک و سازه ایجاد می‌نماید به دو اثر اندرکنش اینرسی و اثر اندرکنش سینماتیکی تقسیم بندی می‌شود. اندرکنش سینماتیکی ناشی از سختی فونداسیون روی خاک نرم است و باعث اختلاف حرکت فونداسیون نسبت به میدان آزاد می‌شود. در مقابل، اندرکنش اینرسی ناشی از ارتعاش سازه و نیروی اینرسی حاصل از آن است که حرکات جدیدی در فونداسیون ایجاد می‌کند. این مؤلفه نقش کلیدی در استهلاک انرژی و تغییرشکل سیستم دارد. پژوهشگران در سال‌های اخیر دو روش مستقیم و زیرسازه را برای تحلیل و مدل‌سازی مسائل اندرکنش خاک و سازه ارائه نموده‌اند. در روش مستقیم، سازه و بخشی از خاک اطراف سازه توسط اجزای محدود مش‌بندی شده و به عنوان یک سیستم کلی مدل‌سازی می‌شوند، به طوری که تحلیل در یک مرحله انجام می‌گیرد. در این روش، فرضیه جمع آثار قوا لازم نیست؛ بنابراین، می‌توان تحلیل‌های غیرخطی واقع‌بینانه‌تری را در مسائل متنوع با هندسه‌های مختلف پیاده‌سازی کرد. در روش زیرسازه، خاک و سازه به صورت جداگانه تحلیل و سپس ترکیب می‌شوند. در این رویکرد، فنرها و میراگرهایی با ویژگی‌های مکانیکی خاک، رفتار مرزی بین سازه و خاک را شبیه‌سازی می‌کنند. این روش بر اصل برهم‌نهی آثار قوا استوار بوده و بیشتر برای رفتار خطی خاک مناسب است، هرچند به عنوان یک تقریب مهندسی موجه، برای سیستم‌هایی با رفتار غیرخطی متوسط نیز کاربرد دارد. هاردن و همکاران [۱۷] روشی را برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک در پی‌های نواری تحت بارهای لرزه‌ای و سیکیلی معرفی کردند. مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر (BNWF)^۲، به دلیل سادگی، کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی و ارائه مدلی رفتاری که با نتایج عملی و آزمایشگاهی همخوانی دارد، به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مدل‌سازی اندرکنش خاک، فونداسیون و سازه شناخته می‌شود. در این روش از مجموعه‌ای از فنرها و میراگرهای غیرخطی برای نمایش رفتار خاک استفاده می‌شود. در پژوهش

تأکید دارد. میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMDs)^۱ یکی از روش‌های مؤثر در کنترل ارتعاشات سازه‌ها در برابر بارگذاری لرزه‌ای می‌باشند که غالباً با فرض پی صلب طراحی می‌شوند. با این حال، تأثیرات اندرکنش خاک و سازه و همچنین رفتار غیرخطی خاک می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سازه‌ها داشته باشند. یانگ ژو و همکاران [۱۲] با مدل‌سازی سه‌بعدی یک قاب ۱۰ طبقه، در چهار حالت مختلف اثر رفتار غیرخطی خاک و اندرکنش خاک-سازه را بررسی کردند. نتایج حاکی از بهبود عملکرد میراگرها و کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه در حضور رفتار غیرخطی خاک بود. طراحی مبتنی بر فرکانس سیستم خاک-سازه، به‌ویژه در خاک‌های نرم، عملکرد بهتری نسبت به طراحی با فرض پی صلب داشت. در مطالعه‌ای که توسط احمدی و همکاران [۱۳] انجام شد، به بررسی بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی خمشی احداث شده بر روی خاک نرم پرداخته شده است. در این پژوهش از میراگرهای اصطکاکی و میراگرهای فلزی تسلیمی، برای بهبود مقاومت لرزه‌ای ساختمان‌های آسیب‌پذیر استفاده گردید. تحلیل‌ها با و بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه بر روی سه نمونه قاب ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از این، میراگرها منجر به کاهش تغییرمکان‌های باقیمانده، نسبت‌های دررفت بین طبقات و نیروهای برشی پایه گردید. در مرحله بعد، با لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه، رفتار واقعی‌تری از قاب‌های سازه‌ای روی خاک نرم شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که عدم لحاظ کردن اندرکنش خاک-سازه می‌تواند منجر به پیش‌بینی نادرست پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها شود. فتحی زاده و همکاران [۱۴] با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ECGA^۲، قاب‌های خمشی فولادی ۶ و ۹ طبقه را با در نظر گرفتن تابع هدف کمینه‌سازی وزن سازه، بهینه‌سازی کردند. در این تحقیق، اثرات اندرکنش خاک-سازه با استفاده از مدل تیر بر بستر غیرارتجاعی وینکلر لحاظ شده و از تحلیل پوش‌آور برای ارزیابی رفتار قاب‌ها در سطوح مختلف عملکردی استفاده شده است. در تحقیقات پیشین، روابط طراحی میراگرهای اصطکاکی با فرض ثابت بودن پایه سازه‌ها ارائه شده و اثرات اندرکنش خاک-سازه در آن‌ها مورد توجه قرار نمی‌گرفت. سانقay و همکاران [۱۵] در پژوهشی به بررسی روشهای طراحی میراگرهای اصطکاکی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه در یک قاب خمشی بتنی پرداختند. در این تحقیق، دو رفتار خطی و غیرخطی برای خاک در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک در طراحی این میراگرها، موجب به‌دست‌آمدن نتایج واقع‌بینانه‌تر در طراحی

1. Tuned Mass Dampers

2. Engineered Cluster-Based Genetic Algorithm



شکل ۱. (a) شکل شماتیک مدل (b) رفتار فنر (q-z) رفتار فنر (p-x) رفتار فنر (t-x) [۱۸]

Fig. 1. (a) Schematic representation of the BNWF model, (b) q-z spring behavior, (c) p-x spring behavior, (d) t-x spring behavior [18]

۱-۳- مبانی رفتاری میراگر تسلیمی TADAS

میراگر تسلیم‌شونده فلزی مثلثی TADAS از چندین ورق فولادی مثلثی شکل تشکیل شده که یک انتهای آن‌ها غلطکی بوده و معمولاً با چیدمان شورون به سازه متصل می‌شوند تا انرژی لرزه‌ای را مستهلک کنند. در این نوع میراگر، اتلاف انرژی از طریق ظرفیت تغییرشکل پلاستیک ورق‌های فلزی در حالت خمشی صورت می‌گیرد. شکل مثلثی ورق‌ها موجب توزیع یکنواخت انحنا و تسلیم هم‌زمان در ارتفاع میراگر شده و با تشکیل حلقه‌های هیستریزس، ظرفیت اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. پارامترهای طراحی این میراگرها تأثیر زیادی بر رفتار لرزه‌ای سازه دارند. تسای و همکاران [۲۰] نخستین آزمایش بر روی این نوع از میراگرها را بر روی قاب دو طبقه یک‌دهانه انجام داده و روابطی را برای طراحی میراگرهای TADAS پیشنهاد دادند. در روابط ارائه شده توسط ایشان، پارامترهای ظرفیت تسلیم، تغییر مکان تسلیم و سختی میراگر بر اساس رابطه (۱) بدست می‌آیند. در پژوهش حاضر از همین روابط برای طراحی میراگرهای فلزی در قاب‌های مورد نظر استفاده شده است. در این سیستم، مدل رفتاری بادبند و میراگر به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. مجموعه میراگر و بادبند، همراه با قاب، به عنوان فنرهای موازی عمل می‌کنند که سختی معادل آن‌ها از قانون ترکیب فنرها محاسبه می‌شود. روابط مربوط به محاسبه سختی معادل میراگر و بادبند در مطالعات ژیا و هانسون [۲۱] به تفصیل ارائه شده است.

حاضر به منظور ساده‌سازی و کاهش هزینه‌های محاسباتی، از روش تیر بر بستر غیرارتجاعی وینکلر (BNWF) استفاده شده است. این مدل که برای نخستین بار در نرم‌افزار OpenSees توسط ریچارد هوری و همکاران [۱۸] معرفی شد، قادر به شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و غیرالاستیک سیستم خاک-پی است. در روش BNWF، از فنرهای یک‌بعدی فشاری با طول صفر برای اتصال فونداسیون به خاک استفاده می‌شود که مقاومت قائم، جانبی و لغزشی خاک را مدل‌سازی می‌کنند. فونداسیون سطحی دوبعدی به صورت یک تیر ارتجاعی، با استفاده از المان‌های یک‌بعدی تیر-ستون با سه درجه آزادی در هر گره، شبیه‌سازی می‌شود. به کارگیری فنرهایی با سختی بالاتر و فاصله‌های کمتر در دو انتهای طول پی، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار گهواره‌ای پی را فراهم می‌کند. در این مدل، فنرهای قائم q-z به صورت متناسب با مساحت سهم هر گره توزیع شده‌اند که بیانگر مقاومت قائم و دورانی فونداسیون سطحی می‌باشند. همچنین فنرهای p-x و t-x به ترتیب، بیانگر نیروی مقاوم خاک در برابر جداره فونداسیون و مقاومت اصطکاکی مرتبط با لغزش فونداسیون هستند. این المان‌ها نسخه اصلاح شده QzSimple1، PySimple1، TzSimple1 هستند که توسط بولانگر و همکاران [۱۹] بر اساس مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی برای شمعها توسعه یافته‌اند. منحنی ارائه شده توسط آن‌ها، شامل یک ناحیه خطی تا ظرفیت باربری تسلیم و یک ناحیه غیر خطی می‌باشد. در شکل ۱ طرح کلی مدل BNWF فونداسیون‌های سطحی و رفتار بارگذاری چرخه‌ای فنرها به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی میراگرهای استفاده شده در آزمایش تسای و همکاران [۲۰]

Table 1. Geometric specifications of the dampers used in the experiment by Tsai et al. [20]

شماره طبقه	شماره میراگر	ارتفاع ورق	ضخامت ورق	عرض ورق	تعداد ورق
۱	1C1	۳۲۵	۳۶	۱۷۷/۶	۸
۲	1C1	۳۲۵	۳۶	۱۷۸/۵	۵

بار دینامیکی اعمال شده شامل شتاب‌نگاشت مولفه شمالی - جنوبی زلزله السنترو با PGA^1 مقیاس شده برابر با ۳۱۲ cm/s^2 می‌باشد. در مدل‌سازی انجام شده، رفتار الاستیک قاب در نرم‌افزار OpenSees شبیه‌سازی شده و پاسخ‌های طبقه اول و دوم مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات و ابعاد هندسی میراگرهای مثلی که در آزمایش تسای و همکاران مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج تحلیل مودال نشان می‌دهد که دوره تناوب‌های حاصل از مدل‌سازی عددی تطابق مناسبی با آزمایش تسای و همکاران دارند. این مقایسه برای قاب در دو حالت با و بدون میراگر، در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت رکورد زلزله السنترو در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. تطابق مناسب جابجایی‌های طبقات بین مدل‌سازی عددی و آزمایش تسای و همکاران، صحت مدل‌سازی OpenSees را تأیید می‌کند.

۲-۲- صحت سنجی قاب‌های انتخابی

به دلیل تنوع موجود در سیستم‌های کنترلی مختلف (کنترل فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال)، وجود چارچوبی استاندارد برای مقایسه عملکرد این سیستم‌ها ضروری است. مدل‌های سازه‌ای انتخابی در این پژوهش شامل قاب‌های پیش‌طراحی شده دو بعدی خمشی فولادی ویژه با تعداد طبقات ۳ و ۹ می‌باشند که از پروژه تحقیقاتی SAC [۲۲] به‌عنوان سازه‌های معیار انتخاب شده‌اند که به‌ترتیب نمایانگر ساختمان‌های کوتاه و متوسط می‌باشند. این قاب‌ها مطابق با الزامات آیین‌نامه UBC94^۲ برای منطقه لرزه‌خیزی لس‌آنجلس با خطر لرزه‌خیزی بالا دارای کاربری اداری بوده و متناسب با نوع خاک D برای مطالعات لرزه‌ای طراحی و تحلیل شده‌اند و اطلاعات دقیقی از مشخصات سازه‌ای و مصالح این ساختمان‌ها در دسترس است. این امر موجب می‌شود تا نتایج تحلیل‌ها قابل اعتماد و قابل مقایسه با سایر

$$\begin{aligned} P_y &= (F_y \times n \times b \times t^2) / (6 \times h), \\ \Delta_y &= (F_y \times h^2) / (E \times t), \\ K_d &= (E \times b \times t^3) / (6 \times h^3) \end{aligned} \quad (۱)$$

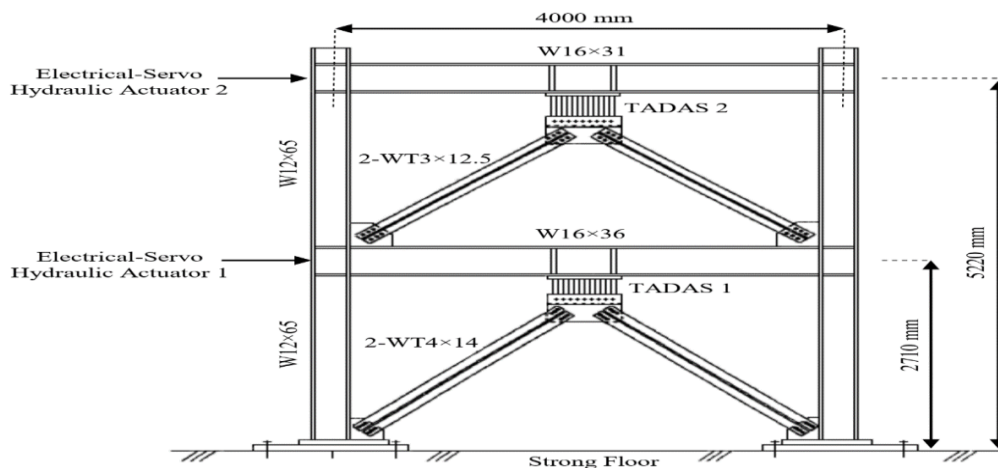
در رابطه (۱)، Δ_y تغییر مکان تسلیم، K_d سختی الاستیک میراگر فلزی، P_y ظرفیت تسلیم میراگر، F_y تنش تسلیم و E مدول الاستیسیته ورق‌ها می‌باشد. همچنین n, b, t, h به ترتیب معادل تعداد، عرض، ضخامت و ارتفاع ورق‌های میراگر است.

۲- اعتبارسنجی میراگر TADAS و قاب‌های بنچمارک SAC

۲-۱- صحت سنجی میراگر TADAS

در این پژوهش، به منظور محاسبه پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در سطوح عملکرد تعیین‌شده، از نرم‌افزار کد باز OpenSees بهره گرفته شده است. انتخاب این نرم‌افزار به دلیل سرعت بالای انجام محاسبات، قابلیت انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه‌ای و ژئوتکنیکی، و امکان اجرای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی صورت گرفته است. مدل آزمایشگاهی تسای و همکاران، که به عنوان نمونه مورد بررسی این پژوهش جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی میراگر تسلیمی TADAS در نظر گرفته شده است، در شکل ۲ نشان داده شده است. جرم هر طبقه، بر اساس کار آزمایشگاهی تسای و همکاران، برابر $۰/۰۱۹ \text{ mm} / (\text{ton} \times \text{s}^2)$ بوده و در فرآیند مدل‌سازی قاب، به صورت گره‌ای به گره‌های هر طبقه اختصاص داده شده است. مصالح المان‌های تیر و ستون از نوع Steel02 بوده و فولاد مصرفی برای میراگرها از نوع ASTM-A36 در نظر گرفته شده است. قاب دو طبقه یک‌دهانه در دو حالت با و بدون میراگر، با نسبت میرایی $\xi = ۰/۰۰۱$ تحت آزمایش شبه‌دینامیکی قرار گرفت. در آزمایش انجام شده بر روی میز لرزان،

1. Peak Ground Acceleration
2. Uniform Building Code



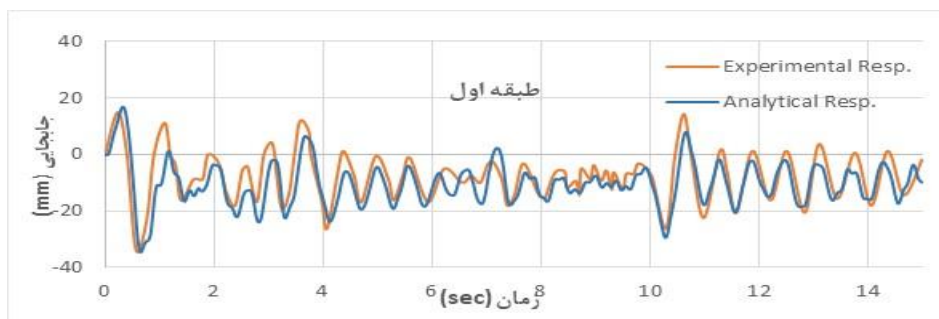
شکل ۲. مدل دو طبقه قاب آزمایشگاهی مجهز به میراگر تسلیمی تسای و همکاران [۲۰]

Fig. 2. Two-story laboratory frame model equipped with the yielding damper by Tsai et al. [20]

جدول ۲. دوره تناوب مود اول و دوم قاب با و بدون میراگر در نرم افزار OpenSees و آزمایش تسای و همکاران [۲۰]

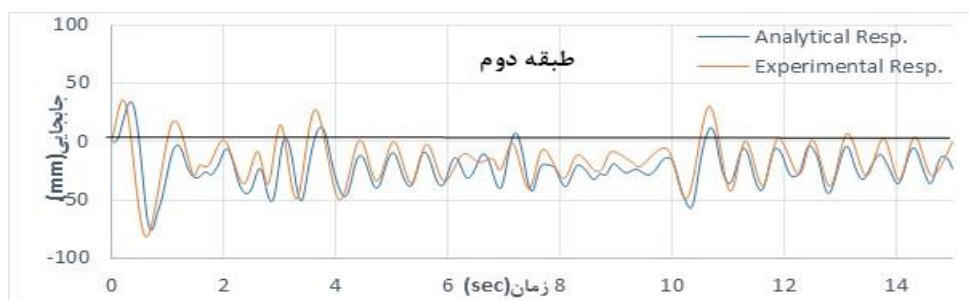
Table 2. Natural periods of the first and second modes of the frame with and without a damper in the OpenSees software and the experiment by Tsai et al. [20]

آزمایش تسای و همکاران		OpenSees	
قاب بدون میراگر			
دوره تناوب مود دوم	دوره تناوب مود اول	دوره تناوب مود دوم	دوره تناوب مود اول
۰/۲۳۷	۰/۸۸۱	۰/۲۴۶	۰/۸۷۵
قاب با میراگر			
دوره تناوب مود دوم	دوره تناوب مود اول	دوره تناوب مود دوم	دوره تناوب مود اول
۰/۲۰۱	۰/۵۷۳	۰/۱۹	۰/۵۶



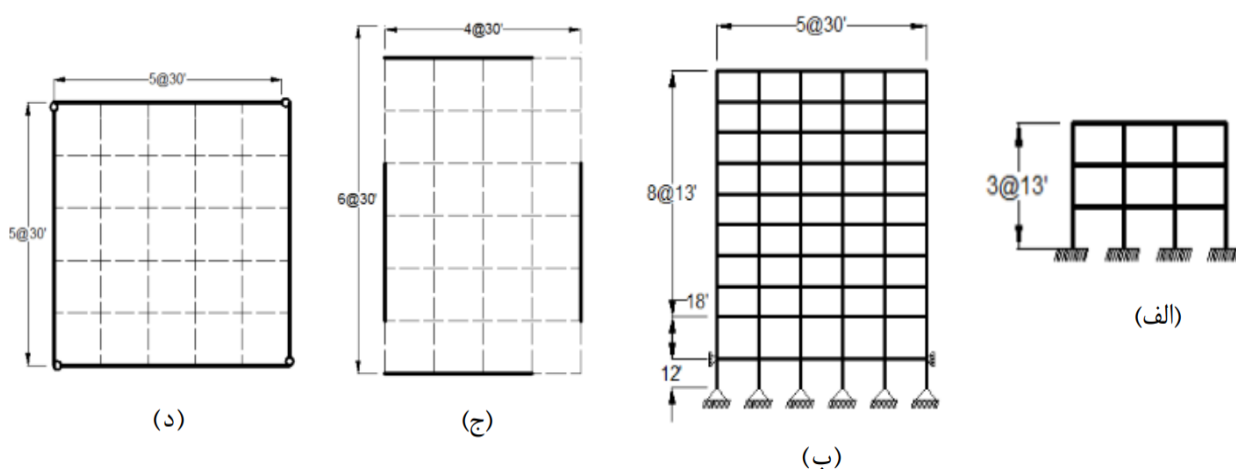
شکل ۳. تطابق نتایج تغییر مکان طبقه اول قاب در مدل آزمایشگاهی [۲۰] و مدل عددی

Fig. 3. Comparison of the first-floor displacement results of the frame between the laboratory model [20] and the numerical model



شکل ۴. تطابق نتایج تغییر مکان طبقه دوم قاب در مدل آزمایشگاهی [۲۰] و مدل عددی.

Fig. 4. Comparison of the second-floor displacement results of the frame between the laboratory model [20] and the numerical model.



شکل ۵. پلان نما و طبقات قابهای ۳ و ۹ طبقه SAC [۲۲] (الف) نمای قاب SAC3 (ب) نمای قاب SAC9 (ج) پلان قاب SAC3 (د) پلان قاب SAC9

Fig. 5. Elevation and floor plans of the 3-story and 9-story SAC frames [22]. (a) Elevation of the SAC3 frame, (b) Elevation of the SAC9 frame, (c) Floor plan of the SAC3 frame, (d) Floor plan of the SAC9 frame

um) دو سر مفصل و بدون سختی جانبی برای معادل سازی قاب دو بعدی، با استفاده از المانهای صلب محوری به قاب اصلی متصل شده و سهم بارهای ثقلی به صورت متمرکز به این ستون اعمال می شود. جزئیات بیشتر در مورد هندسه قابها و مدل سازی و بارگذاری دو قاب مدنظر در شکل ۵ و مرجع [۲۲] نشان داده شده است.

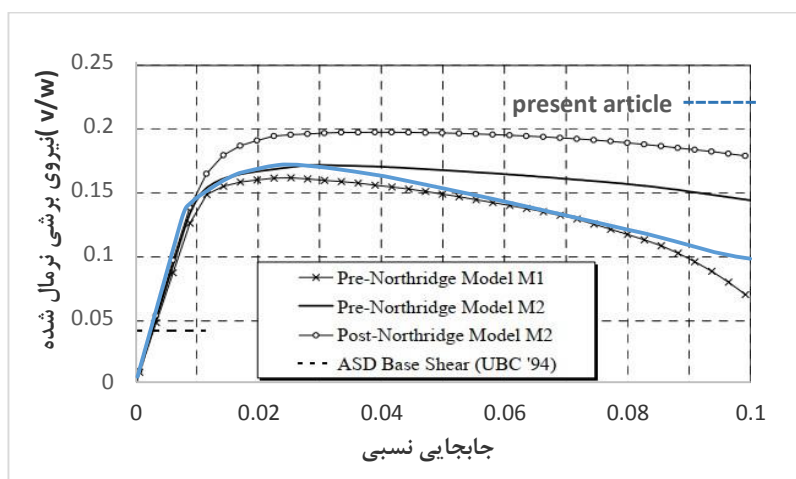
برای اعتبارسنجی مدل سازی قابها در OpenSees، قاب ۹ طبقه پس از مدل سازی، تحت تحلیل مقادیر ویژه و تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفت. در جدول ۳، مقایسه دوره تناوب سه مود اول سازه ۹ طبقه در مدل سازی صورت گرفته در این پژوهش و دستورالعمل FEMA ۳۵۵C [۲۲] ذکر شده است، که نتایج حاکی از اختلاف جزئی در پریودهای دو مدل

مطالعات باشد. در این سازه ها، قابهای خمشی پیرامونی شرقی - غربی با اتصالات گیردار به عنوان سیستم باربر جانبی عمل می کنند. تنش تسلیم تیرها و ستون ها به ترتیب ۲۴۸ و ۳۴۵ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، و میرایی ذاتی به صورت میرایی رابلی متناسب با جرم و سختی برای مود اول و سوم برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است. تیرها و ستون ها در هر دو مدل الاستیک در نظر گرفته شده و برای لحاظ نمودن زوال مقاومت و سختی در مدل سازی رفتار غیرخطی مصالح از مفاصل پلاستیک متمرکز در تیرها و ستون ها با درصد سخت شدگی کرنشی ۳ استفاده شده است. با توجه به نوع سیستم باربر جانبی برای منظور کردن اثر پی - دلتا ناشی از بارهای ثقلی قاب میانی، ستون تکیه گاهی (Leaninig Col-

جدول ۳. دوره تناوب ۳ مود اول قاب SAC9 و مدلسازی حاضر

Table 3. Natural periods of the first three modes of the SAC9 frame and the present modeling

قاب ۹ طبقه	مود اول	مود دوم	مود سوم
مطالعه‌ی حاضر	۲/۳۱	۰/۷۹	۰/۴۵
SAC9 [۲۲]	۲/۳۴	۰/۸۸	۰/۵



شکل ۶. صحت سنجی منحنی بار افزون قاب SAC9 [۲۲] و قاب مدل‌سازی شده

Fig. 6. Validation of the pushover curve for the SAC9 frame [22] and the modeled frame

قاب‌ها در حالت‌های مذکور تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های در نظر گرفته شده و مقایسه پاسخ‌ها در سطوح عملکردی مورد نظر می‌باشد. برای انجام تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی از روش شتاب متوسط نیومارک با پارامترهای $\gamma = 0.25$, $\beta = 0.25$ استفاده شده است.

۳-۱- رکوردهای انتخابی جهت انجام آنالیز دینامیکی

در تحلیل دینامیکی غیرخطی، انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب برای ارزیابی پاسخ غیرخطی قاب‌ها اهمیت دارد. با توجه به اینکه قاب‌های انتخابی این پژوهش از گروه سازه‌های SAC در شهر لس‌آنجلس می‌باشند، لذا شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در تحلیل تاریخیچه زمانی، رکوردهای ارائه شده توسط کارگروه مهندسان سازه کالیفرنیا (SAC) [۲۳] می‌باشند. شتاب‌نگاشت‌های اصلاح‌شده منطبق بر طیف طرح

می‌باشد. همچنین در شکل ۶، انطباق منحنی بار افزون سازه SAC9 [۲۲] و مدل دو بعدی مطالعه حاضر، دقت قابل قبول مدل‌سازی انجام شده را تایید می‌کند.

۳- مدل‌سازی قاب‌ها با میراگر تسلیمی TADAS و اندرکنش خاک - سازه

پس از اعتبار سنجی مدل‌سازی قاب و میراگر TADAS به مدل‌سازی قاب‌های ۳ و ۹ طبقه در حالت‌های مختلف و همچنین انتخاب رکوردهای در نظر گرفته شده جهت آنالیز سازه‌ها از روش تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار OpenSees برای ارزیابی رفتار قاب‌ها در ۳ حالت قاب بدون میراگر، قاب با میراگر تسلیمی با پایه ثابت و قاب با میراگر تسلیمی با پایه انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود. هدف از انجام تحلیل تاریخیچه زمانی، تعیین میزان جابجایی نسبی، شتاب طبقات و برش پایه هر یک از

جدول ۴. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی با سطح خطر DBE [۲۳]

Table 4. Specifications of the selected ground motion records for the DBE hazard level [23]

ردیف	رکورد	شتاب‌نگاشت	بزرگی (ریشتر)	فاصله (km)	ضریب مقیاس	مدت (ثانیه)	$PGA(in/sec^2)$
۱	LA09	Landers, 1992	۷/۳	۲۵	۲/۱۷	۷۹/۹۸	۲۰۰/۷
۲	LA11	Loma Prieta, 1989	۷	۱۲,۴	۱/۷۹	۳۹/۹۸	۲۵۶/۹
۳	LA15	Northridge, 1994, Rinaldi	۶/۷	۷/۵	۰/۷۹	۱۴/۹۵	۲۰۶
۴	LA16	Northridge, 1994, Rinaldi	۶/۷	۷/۵	۰/۷۹	۱۴/۹۵	۲۲۳/۹
۵	LA17	Northridge, 1994, Sylmar	۶/۷	۶/۴	۰/۹۹	۵۹/۹۸	۲۱۹/۹
۶	LA18	Northridge, 1994, Sylmar	۶/۷	۶/۴	۰/۹۹	۵۹/۹۸	۳۱۵/۵
۷	LA20	North Palm Spring 1986	۶/۷	۶	۲/۹۷	۵۹/۹۸	۳۸۰/۹

جدول ۵. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی با سطح خطر MCE [۲۳]

Table 5. Specifications of the selected ground motion records for the MCE hazard level [23]

ردیف	رکورد	شتاب‌نگاشت	بزرگی (ریشتر)	فاصله (Km)	ضریب مقیاس	مدت (ثانیه)	$PGA(in/sec^2)$
۱	LA25	1994 Northridge	۶/۷	۷/۵	۱/۲۹	۱۴/۹۵	۳۳۵/۳
۲	LA26	1994 Northridge	۶/۷	۷/۵	۱/۲۹	۱۴/۹۵	۳۶۴/۳
۳	LA35	Elysian Park(simulated)	۷/۱	۱۱/۲	۱/۱	۲۹/۹۹	۳۸۳/۱
۴	LA36	Elysian Park(simulated)	۷/۱	۱۱/۲	۱/۱	۲۹/۹۹	۴۲۴/۹
۵	LA37	Palos Verdes(simulated)	۷/۱	۱/۵	۰/۹	۵۹/۹۸	۲۷۴/۷
۶	LA38	Palos Verdes(simulated)	۷/۱	۱/۵	۰/۹	۵۹/۹۸	۲۹۹/۷
۷	LA40	Palos Verdes(simulated)	۷/۱	۱/۵	۰/۸۸	۵۹/۹۸	۲۴۱/۴

۷ رکورد که بیشترین جابجایی نسبی طبقات را برای قاب‌های ۳ و ۹ طبقه در حالت بدون میراگر ایجاد کرده‌اند، انتخاب شدند. مشخصات این رکوردها، همراه ضریب مقیاس آن‌ها که دارای شدت، محتوای فرکانسی و مدت زمان متفاوتی برای نشان دادن تغییرپذیری منبع لرزه‌ای هستند در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

آیین‌نامه NEHRP1997 [۲۴] متناسب با مود اول سازه برای سطوح خطر لرزه‌ای با احتمال وقوع ۱۰ درصد در ۵۰ سال (DBE) و ۲ درصد در ۵۰ سال (MCE) بر روی خاک سخت مقیاس شده‌اند. هر مجموعه از رکوردها شامل ۲۰ شتاب‌نگاشت است که در این پژوهش در هر مجموعه از شتاب‌نگاشت‌ها،

1. National Earthquake Hazards Reduction Program
2. Design Base Earthquake
3. Maximum Considered Earthquake

جدول ۶. ابعاد میراگرهای طراحی شده برای قاب SAC3

Table 6. Dimensions of the designed dampers for the SAC3 frame

مسطح مقطع مهاربند شورون	سختی میراگر	تعداد ورق	ضخامت ورق	عرض ورق	ارتفاع ورق	طبقه
(mm ²)	(ton / m)		(mm)	b (mm)	h (mm)	
۱۳۹۴۰	۱۶۶۶۰	۱۰	۳۰	۵۰۰	۳۰۰	۱
۹۷۶۵	۱۱۶۶۲	۷	۳۰	۵۰۰	۳۰۰	۲
۶۹۷۴	۸۳۳۰	۵	۳۰	۵۰۰	۳۰۰	۳

میراگرهای مثلثی شکل برای سازه‌های ۳ و ۹ طبقه به ترتیب در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. به عنوان فرض اولیه برای طراحی میراگرها، در هر دو قاب، از ورق‌هایی از نوع فولاد ASTM-A36، با ابعاد ۳۰۰، ۵۰۰ و ۳۰ میلی‌متر (ارتفاع، عرض و ضخامت) استفاده شده است. تعداد ورق‌ها و سطح مقطع مهاربندها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حداقل مقادیر پیشنهادی برای دو پارامتر SR (نسبت مجموعه سختی مهاربند و میراگر به سختی قاب تنها) و B/D (نسبت سختی افقی مهاربند به سختی ورق‌های میراگر)، مطابق با توصیه ژیا و هانسون [۲۱] مقدار ۲ را تأمین کنند سختی میراگرها متناسب با سختی هر طبقه طراحی شده و به منظور جلوگیری از ورود بادبندها به ناحیه خمیری، سختی بادبندها تقریباً ۲ برابر سختی میراگرها ($B/D=2$) انتخاب می‌گردد. با داشتن دو پارامتر از میان سختی اولیه میراگر، جابجایی تسلیم میراگر و نیروی تسلیم میراگر، پارامتر سوم به راحتی قابل تعیین خواهد بود. طبق رابطه (۱)، جابجایی تسلیم و سختی میراگر که وابسته به مشخصات پارامترهای میراگر هستند، با توجه به ثابت ماندن مشخصات هندسی ورق‌ها در تمامی طبقات، طبق رابطه مذکور به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Delta_y = \frac{F_y \times h^2}{E \times t} = \frac{24821126 \times 0.3^2}{2e10 \times 0.03} = 0.0037m = 3.7mm \quad (2)$$

$$K_{d(n=1)} = \frac{E \times b \times t^3}{6 \times h^3} = \frac{2e10 \times 0.5 \times 0.3^2}{6 \times 0.3^3} = 1666 \text{ ton/m} \quad (3)$$

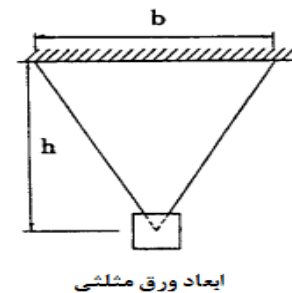
۳-۲- مدل سازی قاب‌ها، طراحی میراگر تسلیمی و تعیین ابعاد و مشخصات
برای مدل سازی اعضای سازه، از المان تیر-ستون خطی و برای رفتار غیرخطی از فنرهای غیرخطی متمرکز در دو انتهای اعضا با مدل سه خطی ایبارا و کراوینکلر، اصلاح شده توسط Lignos [۲۵] استفاده گردید. این فنرها دارای طول صفر بوده و مشخصات رفتاری این المان‌ها بر اساس مصالح غیرخطی چندخطی (Bilin Material) تعریف می‌شوند. پس از مدل سازی قاب اصلی، قاب مجهز به میراگر TADAS در نرم افزار OpenSees با همان مشخصات اعضای سازه مشابه حالت قاب بدون میراگر مدل سازی گردید. میراگر TADAS با فنر و تیر صلب بدون طول و با درصد سخت‌شوندگی ۲ درصد مدل سازی شد. ارتفاع میراگر با المانی با سختی نسبتاً زیاد مدل شده و رفتار نیرو-تغییر مکان میراگر به المان Zero Length اختصاص داده می‌شود. منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر به صورت دوطبقه فرض شده، از مصالح Steel01 برای المان با طول صفر استفاده می‌شود. برای تعیین تعداد صفحات مثلثی، مدول الاستیسیته ورق‌ها برابر 2×10^6 کیلوگرم بر سانتی متر مربع و تنش تسلیم آن‌ها ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته می‌شود. مهاربندهای متصل به میراگر با المان محوری Truss مدل سازی شده‌اند و سطح مقطع آن‌ها با هدف شبیه سازی دقیق رفتار واقعی طراحی و به مدل تخصیص داده شده است. این مهاربندها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که تحت حداکثر بار ناشی از میراگر، یا همان برش تسلیم میراگر، الاستیک باقی مانده و در فشار دچار کمانش نشوند و تسلیم آن‌ها در کشش قبل از تسلیم میراگر اتفاق نیفتد. برای تحقق این هدف، ظرفیت کمانش مهاربندها ۱/۵ برابر ظرفیت تسلیم میراگرها در نظر گرفته شده است. محل قرارگیری مجموعه میراگر و مهاربند در دهانه میانی طبقات بوده و میراگر بین مهاربند شورون و تیر طبقه بالایی قرار دارد. مشخصات

جدول ۷. ابعاد میراگرهای طراحی شده برای قاب SAC9

Table 7. Dimensions of the designed dampers for the SAC9 frame

طبقه	ارتفاع ورق $h(mm)$	عرض ورق $b(mm)$	ضخامت ورق $t(mm)$	تعداد ورق	سختی میراگر (ton / m)	مساحت مقطع مهاربند شورون (mm^2)
۱	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۸	۱۳۳۲۸	۱۱۱۶۰
۲	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۸	۱۳۳۲۸	۱۱۱۶۰
۳	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۸	۱۳۳۲۸	۱۱۱۶۰
۴	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۵	۸۳۳۰	۶۹۷۴
۵	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۵	۸۳۳۰	۶۹۷۴
۶	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۵	۸۳۳۰	۶۹۷۴
۷	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۵	۸۳۳۰	۶۹۷۴
۸	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۳	۵۰۰۰	۴۱۸۵
۹	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۳	۵۰۰۰	۴۱۸۵
۱۰	۳۰۰	۵۰۰	۳۰	۳	۵۰۰۰	۴۱۸۵

جدول ۸ آورده شده است. برای محاسبه سختی پی‌ها، باید میزان صلبیت پی نسبت به خاک زیرین با توجه به رابطه‌های (۲) و (۳)، به ترتیب برای پی‌های گسترده و نواری مشخص شود [۱۶]. بر این اساس، با توجه به ابعاد طراحی شده برای فونداسیون‌ها مطابق جدول ۶ و همچنین کنترل روابط (۴) و (۵)، پی‌ها در هر دو سازه نسبت به خاک زیرین خود عملکرد صلب دارند. با توجه به روابط ارائه شده در مرجع [۱۷] مطابق شکل ۱، برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک برای تعیین جابجایی خاک در نقطه تسلیم، و جابجایی خاک در نقطه‌ای با ۵۰ درصد از ظرفیت باربری خاک، جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی، از رابطه اصلاح شده میرهوف به صورت رابطه (۶) استفاده گردید [۲۶]. مطابق پیشنهاد اکثر آیین‌نامه‌های طراحی برای سازه‌های واقعی، مقدار ضریب اطمینان باربری قائم $F_{SV} = 3$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۷. پارامترهای هندسی ورق مثلثی شکل میراگر TADAS

Fig. 7. Geometric parameters of the triangular TADAS damper plate

۳-۳- مدل‌سازی قاب‌ها با میراگر تسلیمی به همراه اثرات اندرکنش خاک و سازه

در حالت سوم مدل‌سازی، قاب‌ها با مشخصات میراگرهای حالت دوم و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحلیل شدند. در این بخش، برای مدل‌سازی سطح مشترک خاک - فونداسیون از مجموعه‌ای از فنرهای غیرخطی وینکلر استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد و ارتفاع سازه‌ها، مشخصات نوع خاک در نظر گرفته شده و بر اساس میانگین خصوصیات ۳۰ متر بالایی لایه خاک، ابعاد فونداسیون‌های طراحی شده برای سازه‌های ۳ و ۹ طبقه در

$$K_{sv} \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^5 \frac{\sin^2\left(\frac{m\pi}{2}\right) \sin^2\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{\pi^4 D_f \left(\frac{m^2}{L^2} + \frac{n^2}{B^2}\right)} K_{sv} \leq 0.3 \quad (4)$$

$$K_{sv} = \frac{1.3G}{B(1-\nu)} \quad D_f = \frac{Et^3}{12(1-\nu_f)^2}$$

$$k_{x(horizontal)} = \frac{GB}{2-\nu} \left[3.4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 1.2 \right] \quad (10)$$

$$k_{y(horizontal)} = \frac{GB}{2-\nu} \left[3.4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.4 \frac{L}{B} + 0.8 \right] \quad (11)$$

در روابط ارائه شده برای فونداسیون‌های سطحی ν, G, B, L به ترتیب نسبت پواسون خاک، مدول برشی خاک، عرض و طول پی می‌باشند. مطالعات انجام شده در روش BNWF نشان داده است که این روش به فاصله فنرها حساسیت قابل توجهی ندارد [۲۸]. بر این اساس، در این پژوهش فاصله فنرها در ناحیه میانی و انتهایی فونداسیون به ترتیب برای سازه ۳ طبقه ۲۰ سانتی‌متر و ۵ سانتی‌متر و برای سازه ۹ طبقه ۳۰ سانتی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به طول دهانه‌ها و روابط ارائه شده برای محاسبه سختی و طول نواحی انتهایی و میانی، مقادیر مرتبط به این نواحی برای سازه‌های ۳ و ۹ طبقه مطابق جدول ۸ تعیین شده است.

۴- آنالیز و ارزیابی پاسخ‌ها

رفتار دینامیکی قاب‌های مرجع در سه حالت قاب تنها (SAC)، حالت قاب با میراگر تسلیمی و بدون درنظر گرفتن اثرات اندرکنش (SAC/DAM) و حالت قاب با میراگر تسلیمی و با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه (SAC/DAM/SSI) در دو سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE، تحت شتاب‌نگاشت‌های منتخب پرداخته می‌شود. پاسخ قاب‌ها با متغیرهای جابه‌جایی نسبی طبقات، شتاب حداکثر طبقات، برش پایه و پریود مودهای اول تا سوم ارزیابی شد تا تأثیر اندرکنش خاک و سازه در قاب‌های مجهز به میراگر تسلیمی در دو سطح خطر DBE و MCE مشخص گردد. با انجام تحلیل مودال در سه حالت مختلف برای قاب‌های ۳ و ۹ طبقه، مطابق جدول ۹، مشخص شد که افزودن میراگر تسلیمی به این قاب‌ها و در نتیجه افزایش سختی آن‌ها، پریود مود اول قاب‌ها به ترتیب ۵۲ و ۴۶ درصد کاهش یافته است. همچنین در حالت سازه مجهز به میراگر و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، پریود مود اول در قاب‌های سه و نه طبقه نسبت به حالت بدون میراگر، به ترتیب ۴۵ و ۳۹ درصد کاهش یافته است. با این حال، در مقایسه با حالت دوم (SAC/DAM)، دوره تناوب

$$\frac{E_f I_f}{l^4} < \frac{2}{3} K_{sv} B \quad (5)$$

$$q_{ult} = c N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + \gamma D_f N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 0.5 \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)، l طول پی، I_f ممان اینرسی مقطع پی، E_f مدول الاستیسیته، q_{ult} ظرفیت باربری نهایی در واحد سطح پی، c چسبندگی خاک، γ وزن مخصوص خاک، B عرض پی عمود بر امتداد مورد بررسی، D_f عمق فونداسیون، $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ ضرایب شکل، $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ ضرایب عمق، $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ ضرایب شیب بارگذاری و N_c, N_q, N_γ ضرایب مربوط به ظرفیت باربری پی هستند. تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که به دلیل حرکت گهواره‌ای فونداسیون‌های سطحی، لبه‌های انتهایی فونداسیون تحت فشار بیشتری قرار می‌گیرند. در نتیجه، در این نواحی نیاز به سختی بیشتری نسبت به بخش‌های میانی فونداسیون وجود دارد. مطالعات پیشین نیز طول مناسب ناحیه انتهایی فونداسیون‌های صلب و پارامترهای مؤثر بر آن را تعیین کرده‌اند که در رابطه (۷) ارائه شده است [۱۷]. همچنین از رابطه (۸) برای تعیین سختی الاستیک فنرهای وینکلر در ناحیه انتهایی و میانی، و از روابط (۹) و (۱۰)، برای تعیین ضرایب سختی فنرهای قائم k_z و فنرهای افقی k_y و k_x برای حالت فونداسیون صلب استفاده می‌گردد [۲۷].

$$L_e = 0.5L - L \left(\frac{1 - C_{R-V}^K}{8} \right)^{1/3} \quad (7)$$

$$C_{R-V}^K = \frac{K_{\theta y} - \frac{K_z}{A} I_z}{K_{\theta y}}$$

$$K_{mid} = \frac{K_z}{BL} \quad (8)$$

$$K_{end} = K_{mid} + C_{R-V}^K \frac{K_{\theta y}}{I_y}$$

$$k_{z(vertical)} = \frac{GB}{1-\nu} \left[1.55 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 0.8 \right] \quad (9)$$

جدول ۸. مشخصات خاک و ابعاد هندسی فونداسیون‌های قاب‌های ۳ و ۹ طبقه

Table 8. Soil properties and geometric dimensions of the foundations for the 3-story and 9-story frames

مشخصات خاک					
مدول برشی	ضریب پواسون	ضریب الاستیسیته	سرعت موج برشی	وزن مخصوص	نوع خاک
MPa		MPa	m/s	kN/m^3	
۷۵	۰/۴	۲۱۸	۲۰۰	۱۸	۳
ابعاد فونداسیون (m)					
(۱/۱-۱/۵)			(ضخامت - عرض) نواری		
۲			(ضخامت) گسترده		
			۳ طبقه		
			۹ طبقه		

جدول ۹. دوره تناوب قاب‌های ۳ و ۹ طبقه در سه حالت مورد بررسی

Table 9. Fundamental periods of the 3-story and 9-story frames under the three investigated conditions

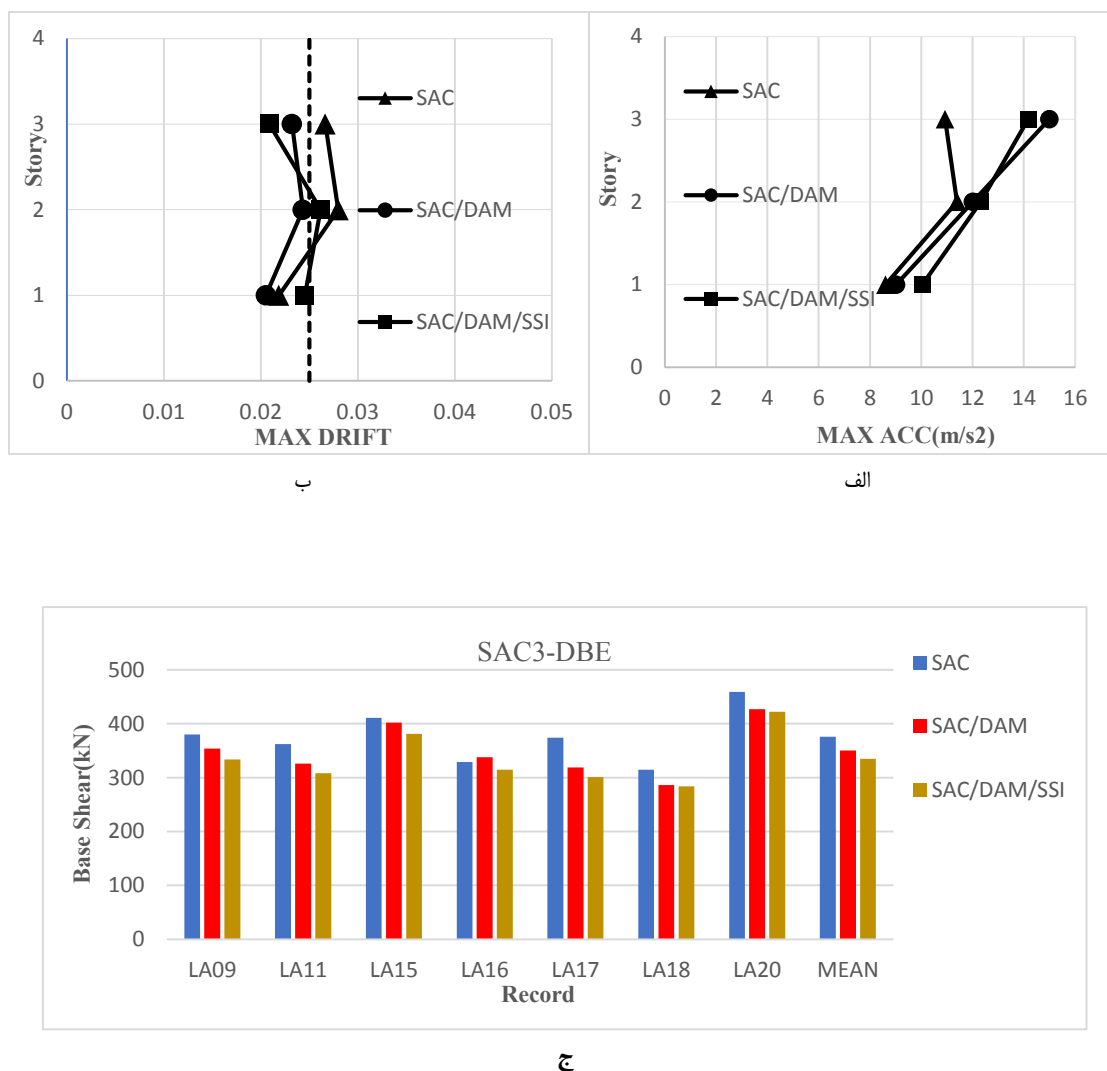
قاب		۳ طبقه			۹ طبقه	
case	SAC3	SAC3/DAM	SAC3/DAM/SSI	SAC9	SAC9/DAM	SAC9/SAM/SSI
Mode1	۱/۰۱	۰/۴۹	۰/۵۴	۲/۳۱	۱/۲۵	۱/۴۱
Mode2	۰/۳۱	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۷۹	۰/۴۴	۰/۴۴
Mode3	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۲۵

۴-۱- بررسی قاب ۳ طبقه با سطح خطر لرزه‌ای DBE

بررسی نمودار شکل -الف، نشان می‌دهد که در قاب ۳ طبقه برای سطح خطر DBE، جابجایی نسبی طبقات ۲ و ۳ از میزان مجاز ۲/۵ درصد عبور کرده و سطح عملکرد ایمنی جانی تأمین نشده است. از این رو، تعبیه میراگر تسلیمی برای کاهش اثرات لرزه‌ای و ارضا نمودن جابجایی نسبی مجاز طبقات، ضروری به نظر می‌رسد. با افزودن میراگر TADAS در دهانه میانی تمامی طبقات، میزان حداکثر جابجایی نسبی طبقه دوم به مقدار ۰/۰۲۴ کاهش یافته و در نتیجه، سطح عملکرد ایمنی جانی برای این قاب تأمین شده است. از طرفی با لحاظ نمودن اثرات اندرکنش در قاب دارای میراگر تسلیمی، مطابق شکل ۸-الف، میزان جابجایی نسبی در طبقه دوم از مقدار مجاز عبور کرده و سطح عملکرد ایمنی جانی تأمین نشده است. همچنین مطابق شکل ۸-ب، میزان شتاب حداکثر طبقه آخر با افزودن میراگر به قاب به میزان ۳۲ درصد نسبت به قاب بدون میراگر افزایش یافت که با لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه برای طبقه سوم، اندکی تعدیل شده و به ۲۴ درصد رسیده است. در این حالت شتاب در طبقات اول و دوم، با وجود

مود اول به ترتیب ۱۱ و ۱۳ درصد افزایش یافته است. اندرکنش خاک-سازه با کاهش سختی مؤثر سیستم سازه-فونداسیون-خاک، انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد که در سازه‌های بلندتر مشهودتر است. این امر با افزایش پیروید می‌تواند نیروهای لرزه‌ای را کاهش دهد، اما جابه‌جایی‌های جانبی را افزایش می‌دهد. این تغییرات نیازمند بررسی دقیق در طراحی لرزه‌ای سازه است تا نیروها و تغییر مکان‌ها در محدوده‌های مجاز باقی بمانند و عملکرد سازه در برابر زلزله مطلوب باشد.

به منظور ارزیابی سطح عملکرد قاب‌ها، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شد. در این تحلیل، میانگین حداکثر جابجایی نسبی طبقات، حداکثر شتاب هر طبقه و حداکثر برش پایه برای هر یک از رکوردهای زلزله لس‌آنجلس در دو سطح خطر DBE و MCE محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده مطابق با شکل‌های ۸ تا ۱۱، با معیارهای استاندارد [۱۶] مقایسه شد. در این پژوهش، دو معیار پذیرش برای ایمنی جانی تحت زلزله طرح و آستانه فروریزش تحت زلزله حداکثر مورد انتظار به ترتیب با حداکثر جابجایی نسبی بین طبقه‌ای معادل ۲/۵ درصد و ۵ درصد در نظر گرفته شده است.



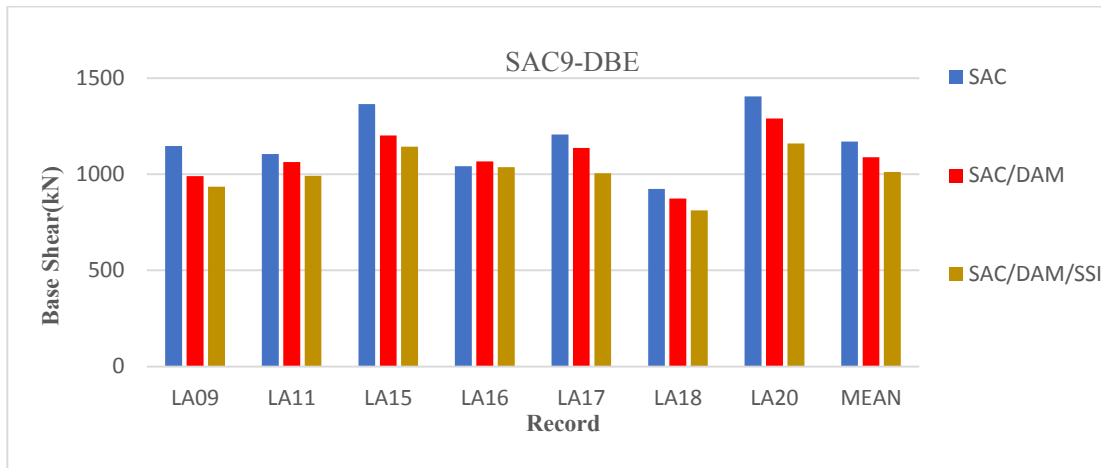
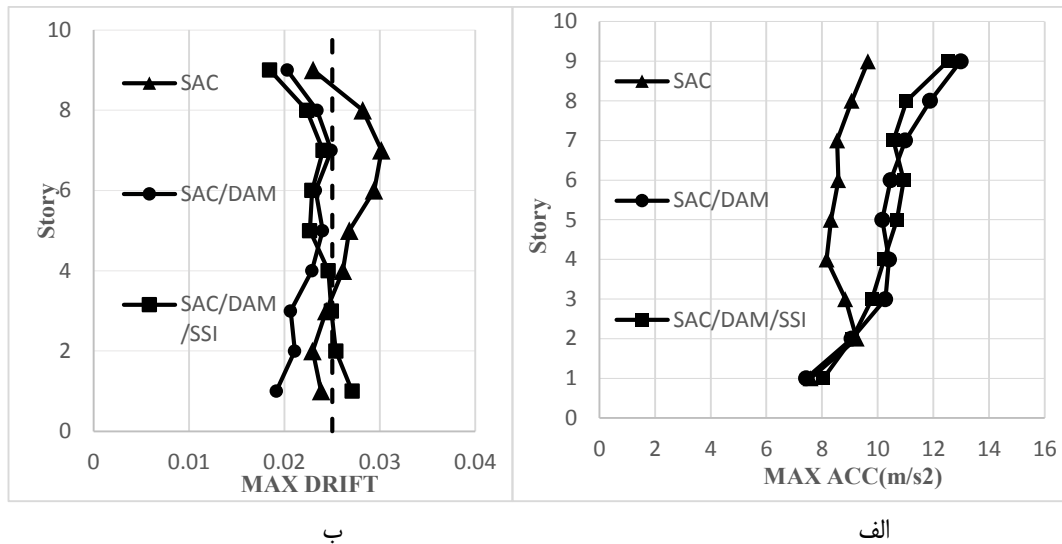
شکل ۸. (الف) نمودار میانگین جابجایی نسبی ماکزیمم طبقات قاب ۳ طبقه حالت DBE، (ب) نمودار میانگین شتاب ماکزیمم طبقات قاب ۳ طبقه حالت DBE، (ج) نمودار مقایسه‌ای برش پایه ماکزیمم هر یک از رکوردها برای قاب ۳ طبقه حالت DBE

Fig. 8. (a) Mean maximum interstory drift of the 3-story frame under DBE, (b) mean maximum floor acceleration of the 3-story frame under DBE, (c) comparison of maximum base shear for each record in the 3-story frame under DBE

۴-۲- بررسی قاب ۹ طبقه با سطح خطر لرزه‌ای DBE

با توجه به نمودار شکل ۹-الف، میزان جابجایی نسبی در طبقات میانی قاب ۹ طبقه تحت شتاب‌نگاشت‌های داده شده از حد مجاز فراتر رفته است. با نصب میراگر تسلیمی در دهانه میانی تمام طبقات، جابجایی نسبی حداکثر در طبقه هفتم به ۰۰۰۲۴ محدود شده، سطح عملکرد مطلوب تأمین گردیده و توزیع جابجایی نسبی یکنواخت‌تر شده است. در حالت اندرکنش خاک و

اثرات اندرکنش، افزایش زیادی نسبت به حالت اول و دوم ایجاد نکرده است. مطابق شکل ۸-ج، برش پایه در تمام رکوردها، جز رکورد LA16، با الحاق میراگر به طور متوسط ۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه، میزان کاهش برش پایه نسبت به قاب بدون میراگر برابر با ۱۱ درصد است. این نتیجه بیانگر تأثیر کاهنده اندرکنش خاک و سازه بر برش پایه قاب مجهز به میراگر تسلیمی می‌باشد.

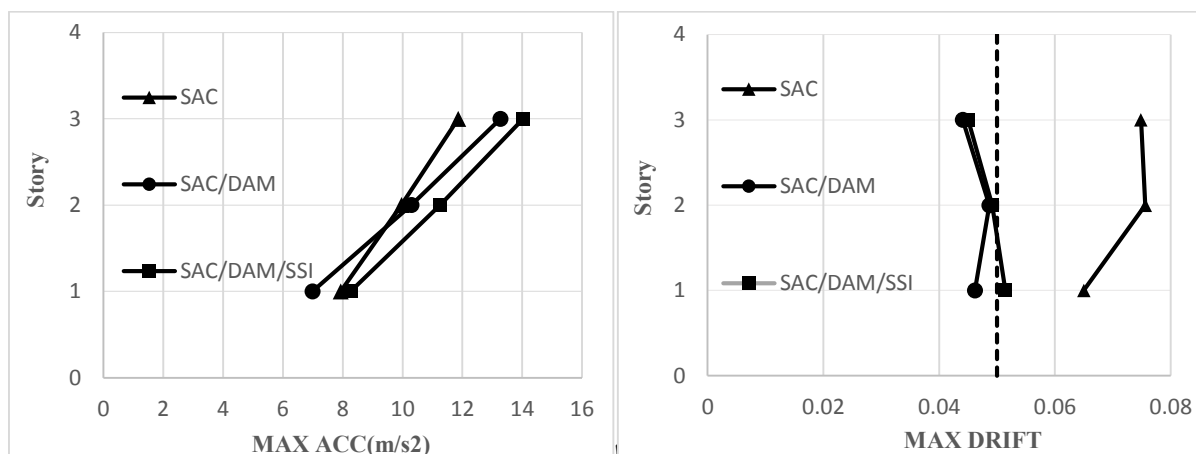


شکل ۹. (الف) نمودار میانگین جابجایی نسبی ماکزیمم طبقات قاب ۹ طبقه حالت DBE، (ب) نمودار میانگین شتاب ماکزیمم طبقات قاب ۹ طبقه حالت DBE، (ج) نمودار مقایسه‌ای برش پایه ماکزیمم هر یک از رکوردها برای قاب ۹ طبقه حالت DBE

Fig. 9. (a) Mean maximum interstory drift of the 9-story frame under DBE, (b) mean maximum floor acceleration of the 9-story frame under DBE, (c) comparison of maximum base shear for each record in the 9-story frame under DBE

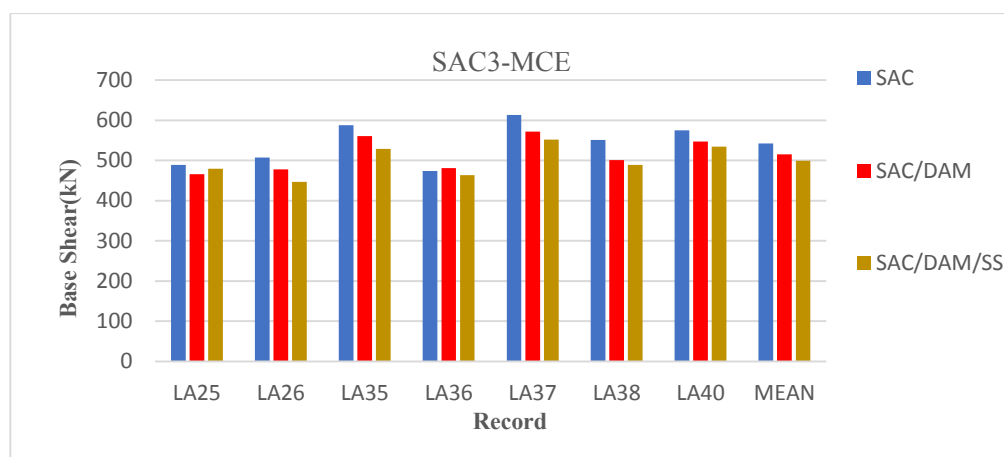
توزیع جابجایی تأثیر منفی بگذارد. برای بهبود این توزیع، بهینه‌سازی مکان و تعداد میراگرها به‌ویژه در طبقات پایینی، استفاده از سیستم‌های ترکیبی کنترل لرزه‌ای و افزایش سختی فونداسیون پیشنهاد می‌گردد. بر اساس شکل ۹-ب، با اضافه نمودن میراگر تسلیمی، میزان افزایش شتاب طبقه نهم نسبت به حالت بدون میراگر ۳۵ درصد می‌باشد. با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه شتاب طبقه نهم کاسته شده و به مقداری کمتر از حالت با

سازه، تحلیل‌ها نشان می‌دهند که جابجایی نسبی طبقات زیرین از حد مجاز بیشتر بوده و اثرات اندرکنش در طبقات پایینی قابل توجه است. اندرکنش خاک-سازه انعطاف‌پذیری سیستم سازه-پی-خاک را افزایش داده و انتقال نیروهای اینرسی از فونداسیون به طبقات بالایی را با تأخیر مواجه می‌کند. این امر موجب می‌شود که در طبقات میانی و بالایی قاب‌های بلند، تغییر مکان نسبی تحت اثر بارهای لرزه‌ای، دچار تغییرات ناهمگن شود و بر یکنواختی



ب

الف



ج

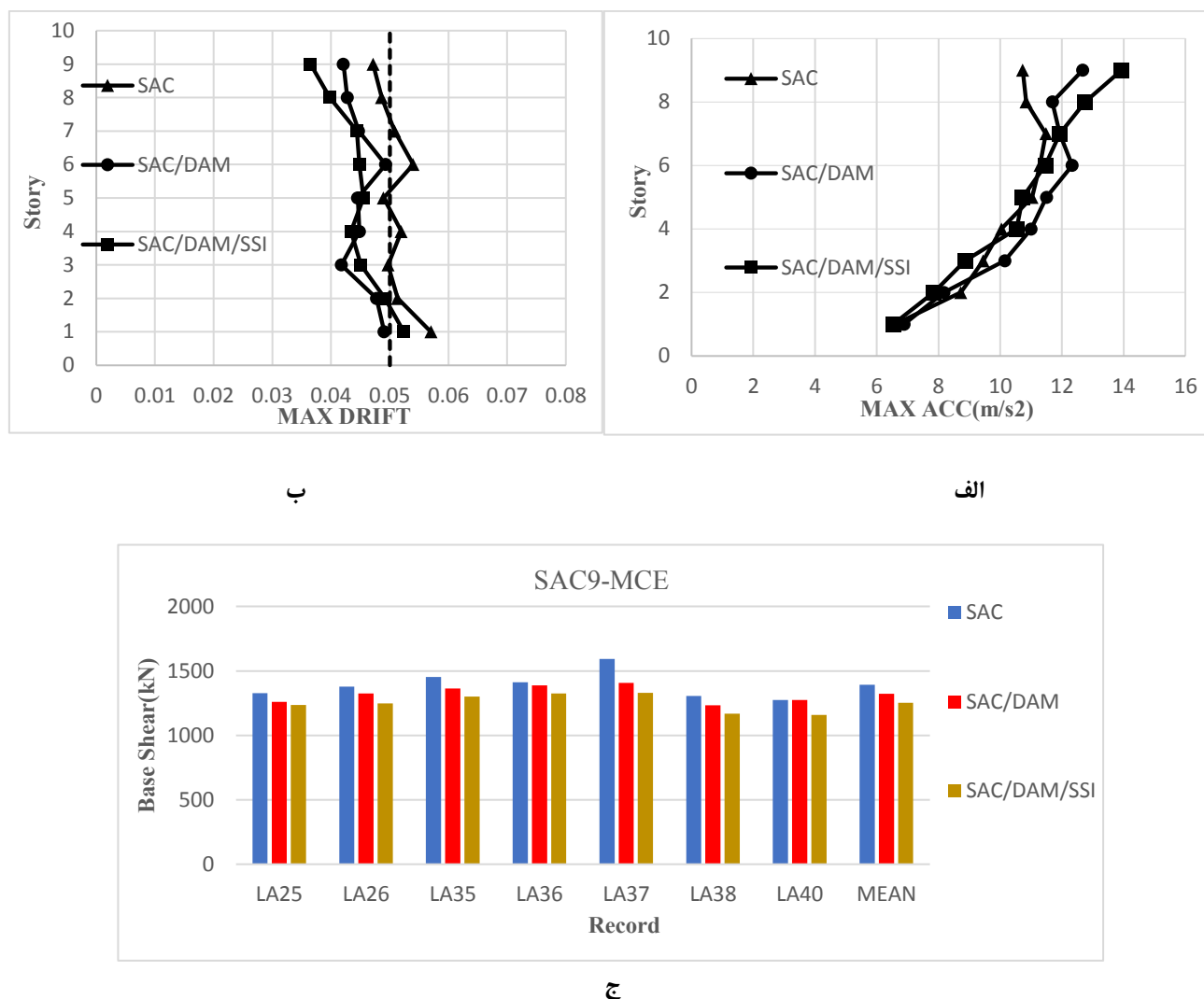
شکل ۱۰. الف) نمودار میانگین جابجایی نسبی ماکزیمم طبقات قاب ۳ طبقه حالت MCE، ب) نمودار میانگین شتاب ماکزیمم طبقات قاب ۳ طبقه حالت MCE (ج) نمودار مقایسه‌ای برش پایه ماکزیمم هر یک از رکوردها برای قاب ۳ طبقه حالت MCE

Fig. 10. (a) Mean maximum interstory drift of the 3-story frame under MCE, (b) mean maximum floor acceleration of the 3-story frame under MCE, (c) comparison of maximum base shear for each record in the 3-story frame under MCE

۴-۳- بررسی قاب ۳ طبقه با سطح خطر لرزه‌ای MCE

برای حالت MCE در قاب ۳ طبقه مطابق نمودار شکل ۱۰-الف مشخص گردید که این قاب برای شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر در تمامی طبقات مقدار جابجایی نسبی مجاز ۰/۰۰۵ را ارضا نکرده است و لذا با اضافه نمودن میراگر با مشخصات حالت DBE به این قاب میزان جابجایی نسبی حداکثر در طبقه دوم به مقدار ۰/۰۴۹ رسیده و مقدار مجاز را ارضا نمود. با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، میزان جابجایی نسبی در طبقه اول از حد مجاز ۰/۰۰۵ عبور نموده که نشان‌دهنده تأثیر اندرکنش در طبقات پایین

میراگر در طبقه نهم می‌رسد. نتایج تحلیل شتاب برای قاب میان‌مرتبه در سطح خطر DBE نشان داد که میزان افزایش شتاب در طبقات زیرین در حالت‌های دوم و سوم نسبت به حالت اول تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد، اما اثرات اندرکنش و میراگر تسلیمی در طبقات میانی و بالایی مشهود است. مطابق شکل ۹-ج، برش پایه قاب ۹ طبقه با افزودن میراگر، به‌جز رکورد LA16، به طور متوسط ۸ درصد کاهش می‌یابد. با لحاظ اندرکنش، کاهش برش پایه نسبت به حالت بدون میراگر به ۱۴ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده تأثیر مضاعف اندرکنش در کاهش برش پایه است.



شکل ۱۱. (الف) نمودار میانگین جابجایی نسبی ماکزیمم طبقات قاب ۹ طبقه حالت MCE، (ب) نمودار میانگین شتاب ماکزیمم طبقات قاب ۹ طبقه حالت MCE، (ج) نمودار مقایسه‌ای برش پایه ماکزیمم هر یک از رکوردها برای قاب ۹ طبقه حالت MCE

Fig. 11. (a) Mean maximum interstory drift of the 9-story frame under MCE, (b) mean maximum floor acceleration of the 9-story frame under MCE, (c) comparison of maximum base shear for each record in the 9-story frame under MCE

۴-۴- بررسی قاب ۹ طبقه با سطح خطر لرزه‌ای MCE در بررسی قاب ۹ طبقه، مطابق شکل ۱۱-الف، جابجایی نسبی در طبقات پایینی و میانی از حد مجاز فراتر می‌رود. با تعبیه مناسب میراگر در دهانه میانی قاب، جابجایی نسبی حداکثر در طبقات اول و ششم به محدوده استاندارد مجاز کاهش یافت. با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، جابجایی نسبی، به جز طبقه اول، در سایر طبقات در محدوده مجاز باقی ماند. مطابق شکل ۱۱-ب، بررسی شتاب طبقات در قاب ۹ طبقه برای سطح خطر لرزه‌ای MCE نشان داد که با افزودن میراگر به قاب، شتاب در طبقات

است. مطابق شکل ۱۰-ب، شتاب طبقه سوم در حالت‌های با میراگر و با میراگر و اندرکنش، به ترتیب ۱۳ و ۱۹ درصد نسبت به حالت بدون میراگر افزایش یافت. در سطح خطر MCE، شتاب مطلق طبقات بالایی با وجود میراگر تسلیمی و اثرات اندرکنش نسبت به حالت بدون میراگر افزایش پیدا می‌کند. مطابق شکل ۱۰-ج، افزودن میراگر به قاب، در سطح خطر MCE برش پایه را به طور متوسط ۵ درصد نسبت به قاب بدون میراگر کاهش داد. همچنین با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش، برش پایه نسبت به قاب بدون میراگر کاهش ۸ درصدی نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. مقایسه پاسخ‌های قاب‌های ۳ و ۹ طبقه در سه حالت مختلف در دو سطح خطر DBE و MCE

Table 10. Comparison of responses of the 3- and 9-story frames under three different conditions at DBE and MCE hazard levels

سطح خطر	قاب	حالت تحلیل	جابجایی	درصد تغییر	شتاب حداکثر طبقات (m/s2)	درصد	برش پایه (kN)	درصد تغییر
			نسبی حداکثر	جابجایی نسبی حداکثر %		حداکثر شتاب طبقات %		برش پایه %
DBE	۳	SAC3	۰/۰.۲۸	-	۱/۱۶	-	۳۷۵	-
		SAC3/DAM	۰/۰.۲۵	-۱۱	۱/۵۳	۳۲	۳۵۰	-۷
		SAC3/DAM/SSI	۰/۰.۲۶	-۷	۱/۴۴	۲۴	۳۳۵	-۱۱
MCE	۳	SAC3	۰/۰.۷۶	-	۱/۲۰	-	۵۴۲	-
		SAC3/DAM	۰/۰.۴۹	-۳۶	۱/۳۵	۱۳	۵۱۵	-۵
		SAC3/DAM/SSI	۰/۰.۵۱	-۳۳	۱/۴۳	۱۹	۴۹۹	-۸
DBE	۹	SAC9	۰/۰.۳۰	-	۰/۹۸	-	۱۱۷۷	-
		SAC9/DAM	۰/۰.۲۵	-۱۷	۱/۳۲	۳۵	۱۰۸۸	-۸
		SAC9/DAM/SSI	۰/۰.۲۷	-۱۰	۱/۲۷	۳۰	۱۰۱۱	-۱۴
MCE	۹	SAC9	۰/۰.۵۷	-	۱/۱۷	-	۱۳۹۱	-
		SAC9/DAM	۰/۰.۵۰	-۱۲	۱/۲۹	۱۰	۱۳۲۱	-۵
		SAC9/DAM/SSI	۰/۰.۵۲	-۹	۱/۴۲	۲۱	۱۲۵۲	-۱۰

رفتاری سیستم‌های مقاوم‌سازی شده و نقش اندرکنش خاک-سازه در عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر تسلیمی را شفاف‌تر می‌سازد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که استفاده از میراگر تسلیمی TADAS به کاهش جابجایی نسبی طبقات و برش پایه منجر شده است، اما در برخی موارد، شتاب طبقات را افزایش داده است. علاوه بر این، اندرکنش خاک-سازه کارایی میراگرها را در کاهش جابجایی نسبی تحت تأثیر قرار داده و در برخی شرایط، منجر به افزایش شتاب طبقات شده است. در مجموع، اندرکنش خاک-سازه تأثیر بیشتری بر افزایش شتاب در قاب ۹ طبقه دارد، در حالی که اثر آن بر کاهش برش پایه در این سازه نسبت به قاب ۳ طبقه مشهودتر است.

۵- نتیجه‌گیری

میراگرهای تسلیمی TADAS با اتلاف انرژی ورودی به سازه، نقش مؤثری در بهبود رفتار لرزه‌ای آن ایفا می‌کنند. در این پژوهش، قاب‌های فولادی ۳ و ۹ طبقه که تحت شتاب‌نگاشت‌های منطقه لس‌آنجلس نتوانستند معیارهای جابجایی نسبی مجاز را در سطوح عملکرد مختلف برآورده کنند،

میانی و بالایی افزایش می‌یابد. این افزایش شتاب در ترازهای بالایی عمدتاً ناشی از توزیع نامتقارن نیروها پس از نصب میراگر تسلیمی است. اندرکنش خاک و سازه نیز شتاب حداکثر طبقات بالایی را تشدید کرد و شرایط کنترلی سخت‌گیرانه‌تری را در این نواحی ایجاد نمود. این موضوع بر لزوم توجه دقیق به اثرات اندرکنش خاک و سازه در طراحی لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر تسلیمی تأکید دارد تا از رفتار نامطلوب در ترازهای بالایی سازه‌های متوسط جلوگیری شود. مطابق شکل ۱۱-ج، برش پایه در سطح خطر MCE با افزودن میراگر تسلیمی ۵ درصد و با احتساب اندرکنش خاک و سازه ۱۰ درصد نسبت به قاب بدون میراگر کاهش نشان داد.

جدول ۱۰ به منظور ارائه یک جمع‌بندی کمی از نتایج تحلیل‌ها در شرایط مختلف سازه‌ای و لرزه‌ای تدوین شده است تا امکان مقایسه جامع پاسخ‌های لرزه‌ای قاب‌های مورد بررسی فراهم شود. در این جدول تغییرات پارامترهای کلیدی، از جمله جابجایی نسبی، شتاب حداکثر طبقات و برش پایه در حالت‌های مختلف، شامل تأثیر اندرکنش خاک-سازه و الحاق میراگر تسلیمی، نشان داده شده است. ارائه این داده‌ها موجب درک دقیق‌تر روندهای

در سازه‌های بلندتر، با در نظر گرفتن تأثیر اندرکنش خاک-سازه مجدداً تحت تأثیر قرار می‌گیرد و از بین می‌رود. در قاب‌های بلند، اثرات اندرکنش خاک-سازه منجر به تغییر در توزیع سختی، جرم، و مدهای ارتعاشی سازه می‌شود. این تغییرات به‌همراه تأثیر رفتار غیرخطی خاک و تغییر مکان نسبی در پی، به طور مستقیم بر توزیع جابجایی نسبی طبقات تأثیر گذاشته و یکنواختی آن را مختل می‌کند. از محدودیت‌های این مطالعه، بررسی تعداد محدودی از قاب‌های خمشی فولادی و نوع خاصی از خاک‌ها می‌باشد. لذا بررسی قاب‌هایی با ارتفاع‌های مختلف و مشخصات هندسی متنوع، همراه با تحلیل اندرکنش خاک-سازه در خاک‌های گوناگون و بهینه‌سازی پارامترهای میراگرها، می‌تواند دیدگاه جامع‌تری نسبت به اثرات اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد میراگرهای TADAS ارائه دهد. نتایج این پژوهش بر ضرورت در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگر تسلیمی تأکید دارد، زیرا این اثرات می‌توانند عملکرد واقعی سازه را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های لرزه‌ای شوند. بر همین اساس، پیشنهاد می‌شود که در طراحی میراگرهای تسلیمی استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری با توابع هدف متنوع، برای بهینه‌سازی پارامترهای میراگرها و جانمایی مناسب آن‌ها انجام شود. این امر می‌تواند به بهبود عملکرد میراگرها، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری سازه کمک کند. با این حال، این امر نیازمند افزایش حجم محاسبات و پیچیدگی مدل‌سازی عددی است.

منابع

- [1] I.D. Aiken, D.K. Nims, A.S. Whittaker, J.M. Kelly, Testing of Passive Energy Dissipation Systems, Earthquake Spectra, 9(3) (1993) 335-370.
- [2] H. Shakib, G.R. Atefatdoost, Effect of Soil-Structure Interaction on Torsional Response of Asymmetric Wall Type Systems, Procedia Engineering, 14 (2011) 1729-1736.
- [3] B. Ganjavi, S.R. Mousavi, Influence of frequency-dependent dynamic soil stiffness and interacting parameters on elastic and inelastic response of soil-structure systems, Journal of Structural and Construction Engineering, 5(4) (2019) 57-75.
- [4] I. Venanzi, D. Salciarini, C. Tamagnini, The effect of soil-foundation-structure interaction on the wind-induced

با افزودن میراگرهای تسلیمی در دهانه میانی، موفق به کاهش جابجایی نسبی طبقات و دستیابی به سطح عملکرد مطلوب شدند. با این حال، در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه تأثیرات متفاوتی بر پارامترهای لرزه‌ای داشت. در ادامه ضمن در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری خاک زیر فونداسیون، مشخص شد که اثرات اندرکنش خاک-سازه در برخی موارد باعث کاهش عملکرد بهینه میراگرها می‌شود این اثر به‌ویژه در پارامترهای جابجایی نسبی و شتاب طبقات، تحت سطوح مختلف خطر زلزله، به‌وضوح مشاهده شد. نتایج این تحقیق نشان داد در قاب‌های دارای میراگر تسلیمی، تفاوت پرودهای ارتعاشی در حالت صلب و انعطاف‌پذیر بیشتر شده، که نشان‌دهنده افزایش اثر اندرکنش در سازه‌های بلندتر است. اثرات اندرکنش خاک-سازه در قاب‌های بلند به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری سیستم بیشتر است. این تفاوت می‌تواند بر توزیع جابجایی نسبی، شتاب طبقات و برش پایه تأثیر بگذارد. نتایج این پژوهش نشان داد، در هر دو قاب اثرات اندرکنش در طبقات پایینی در میزان افزایش جابجایی نسبی در هر دو سطح خطر برای قاب‌های بهسازی شده قابل ملاحظه است. همچنین در قاب ۳ طبقه در سطح خطر MCE، میزان افزایش شتاب طبقه سوم در حالت‌های با میراگر و با میراگر و اندرکنش نسبت به حالت بدون میراگر به ترتیب ۱۳ و ۱۹ درصد می‌باشد. همچنین در سطح خطر DBE، میزان افزایش شتاب طبقه سوم در حالت‌های با میراگر و با میراگر و اندرکنش نسبت به حالت بدون میراگر به ترتیب ۳۲ و ۲۴ درصد می‌باشد. به طور کلی در هر دو قاب، و برای هر دو سطح خطر، اندرکنش خاک-سازه باعث کاهش تأثیر میراگرهای تسلیمی بر کاهش جابجایی نسبی در طبقات پایینی و همچنین کاهش شتاب در طبقات بالایی می‌شود. الحاق میراگر تسلیمی موجب افزایش سختی سازه و کاهش برش پایه در هر دو قاب می‌شود. همچنین، اندرکنش خاک-سازه با افزایش میرایی سیستم، این کاهش را تشدید می‌کند. برای قاب ۹ طبقه کاهش برش پایه با الحاق میراگر و لحاظ نمودن اثرات اندرکنش نسبت به قاب بدون میراگر به ترتیب برای سطح خطر DBE، ۱۴ درصد و برای سطح خطر MCE، ۱۰ درصد می‌باشد. برای قاب ۳ طبقه کاهش برش پایه با الحاق میراگر و لحاظ نمودن اثرات اندرکنش نسبت به قاب بدون میراگر به ترتیب برای سطح خطر DBE، ۱۱ درصد و برای سطح خطر MCE، ۸ درصد می‌باشد. الحاق میراگر تسلیمی، علاوه بر کاهش جابجایی نسبی طبقات، منجر به توزیع یکنواخت‌تر جابجایی نسبی در طبقات می‌شود که به نوبه خود نیاز به شکل‌پذیری موضعی را کاهش داده و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را بهبود می‌بخشد. با این حال، یکنواختی تغییر مکان نسبی طبقات در قاب‌های بهسازی‌شده، به ویژه

- by an engineered cluster-based genetic algorithm, *Engineering Optimization*, 53(3) (2021) 440-460.
- [15] S. Sanghai, P. Pawade, Performance evaluation of friction dampers for building with soil-structure interaction, *Materials Today: Proceedings*, 60 (2022) 194-210.
- [16] Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings.
- [17] C.W. Harden, T.C. Hutchinson, Beam-on-Nonlinear-Winkler-Foundation Modeling of Shallow, Rocking-Dominated Footings, *Earthquake Spectra*, 25(2) (2009) 277-300.
- [18] P. Raychowdhury, S. Ray-Chaudhuri, Seismic response of nonstructural components supported by a 4-story SMRF: Effect of nonlinear soil-structure interaction, *Structures*, 3 (2015) 200-210.
- [19] 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*, 125(9) (1999) 750-759.
- [20] K.-C. Tsai, H.-W. Chen, C.-P. Hong, Y.-F. Su, Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, *Earthquake Spectra*, 9(3) (1993) 505-528.
- [21] C. Xia, R.D. Hanson, Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response, *Journal of Structural Engineering*, 118(7) (1992) 1903-1918.
- [22] S.A.C.J. Venture, State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking, FEMA 355C, (2000).
- [23] P.G. Somerville, N.F. Smith, R.W. Graves, N.A. Abrahamson, Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, *Seismological Research Letters*, 68(1) (1997) 199-222.
- [24] P. National Earthquake Hazards Reduction, Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures, 1997 Edition, Part 1-Provisions, Part 2-Commentary, FEMA 302, (1998).
- [25] D.G. Lignos, A.R. Hartloper, A. Elkady, G.G. Deierlein, response of tall buildings, *Engineering Structures*, 79 (2014) 117-130.
- [5] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
- [6] J.M. Kelly, R.I. Skinner, A.J. Heine, Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5(3) (1972) 63-88.
- [7] S.H. Sanati, A. Karamodin, Optimum seismic design of frame structures with and without metallic yielding dampers considering life-cycle cost, *Journal of Building Engineering*, 76 (2023) 107335.
- [8] A. Akbari Hamed, S.F. Mortazavi, M. Saeidzadeh, Evaluation of the seismic performance of structures equipped with novel multi-level TADAS dampers, *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(4) (2023) 969-988.
- [9] H. Labibi, M. Gerami, M. Hosseini, Proposing an Energy Absorber Component with Axial Behavior to Improve the Seismic Performance of Diagonal Braced Structures, *Modares Civil Engineering journal*, 23(1) (2023) 105-118.
- [10] M. Ortega, D. Lopez-Garcia, G. Fernandois, Optimal properties of hysteretic dampers to minimize peak floor accelerations in multi-story buildings subjected to earthquakes, *Structures*, 70 (2024) 107862.
- [11] O. Araz, K.F. Ozturk, T. Cakir, Effect of Soil-Structure Interaction on Story Acceleration Response of a High-Rise Building, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 61(1) (2024) 42-48.
- [12] Y. Wu, M. Zhao, Z. Gao, X. Du, Seismic performance analysis of structure equipped with tuned mass dampers considering nonlinear soil-structure interaction effects, *Structures*, 63 (2024) 106425.
- [13] M. Ahmadi, M. Ebadi-Jamkhaneh, Seismic Upgrading of Existing Steel Buildings Built on Soft Soil Using Passive Damping Systems, *Buildings*, 13(7) (2023) 1587.
- [14] S.F. Fathizadeh, V.A. R., M.R. and Banan, Considering soil-structure interaction effects on performance-based design optimization of moment-resisting steel frames

- Engineering Research Center, Berkeley, Calif. :, 2008.
- [27] D.C. Rai, A generalized method for seismic evaluation of existing buildings, *Current Science*, 94(3) (2008) 363-370.
- [28] B. Madani, F. Behnamfar, H. Tajmir Riahi, Dynamic response of structures subjected to pounding and structure-soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78 (2015) 46-60.
- R. Hamburger, Proposed Updates to the ASCE 41 Nonlinear Modeling Parameters for Wide-Flange Steel Columns in Support of Performance-Based Seismic Engineering, *Journal of Structural Engineering*, 145(9) (2019) 04019083.
- [26] Numerical models for analysis and performance-based design of shallow foundations subjected to seismic loading, in: S. Gajan (Ed.), *Pacific Earthquake*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

O. Pouresmaeil Janbaz, A. Haghollahi, S. Ghaffarpour Jahromi, *Assessment of Soil-Structure Interaction Effects on Steel Frames Retrofitted with TADAS Yielding Dampers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(5) (2025) 741-764.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23580.8185](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23580.8185)

