



NEW APPROACHES in CONSTRUCTION and PROJECT MANAGEMENT

Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering

<https://cpm.aletaha.ac.ir>



Seismic behavior assessment of steel shear walls with knee bracing

Mohammad reza Yousefi^a, Reza Attarnejad^{b*}

^aM.Sc. in Civil Engineering, Structural Engineering Major, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; mreza.yousefi219@gmail.com

^bProfessor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; attarnejad@ut.ac.ir

Abstract

The knee-braced structural system has gained significant attention for implementation in tall buildings. This structural configuration demonstrates considerable effectiveness in reducing structural responses to lateral loads. In high-seismic regions, steel plate shear wall systems are widely used due to their high ductility and energy dissipation capacity. However, despite the notable advantages of steel shear walls, their overturning stiffness in high-rise buildings remains relatively low.

One common method to enhance structural stiffness involves implementing knee bracing at specific story levels. In this study, a three-story structural model incorporating a central steel shear wall core was analyzed using the Finite Element (FE) method, with steel plate shear wall panels serving as knee braces at different story levels. Four distinct models were developed, and the seismic performance of the knee-braced steel shear wall system was evaluated through nonlinear static (pushover) analysis.

Structural responses, including base shear-roof displacement curves, absorbed energy, ductility, and maximum story drifts, were examined to determine the optimal positioning of knee braces. The research findings indicate that the optimal knee brace configuration aligns with linear static analysis results. For single knee-brace implementations, the mid-height position proves to be the optimal location along the building height.

Article history:

Received: 07/11/2024

Revised: 02/12/2024

Accepted: 19/02/2025

Keywords

Steel plate shear wall (SPSW), knee bracing, Steel panel knee brace, Nonlinear static analysis (Pushover analysis).

* corresponding author: Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; attarnejad@ut.ac.ir; ORCID: 0000-0003-1955-2887



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی آل ط

رویکردهای نوین در مدیریت ساخت و پروژه

فصلنامه گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی

<https://cpm.aletaha.ac.ir>



بررسی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی با مهار بازویی

محمد رضا یوسفی^۱، رضا عطارنژاد^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد عمران گرایش سازه، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران؛ mreza.yousefi219@gmail.com

۲. استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران؛ attarnejad@ut.ac.ir

چکیده فارسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

فرم سازه‌ای مهار بازویی به صورت گسترده جهت به کارگیری در ساختمان‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است. این فرم سازه‌ای کارایی زیادی در کاهش پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای جانبی دارد. در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی به دلیل شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی بالا متداول است. البته در کنار مزایای قابل توجه دیوار برشی فولادی، در ساختمان‌های بلندمرتبه سختی آن در برابر واژگونی پایین است. یکی از روش‌های متداول برای افزایش سختی در سازه‌ها، استفاده از مهار بازویی در طبقات خاصی است. در این پژوهش، مدل سازه‌ای سه طبقه شامل هسته مرکزی دیوار برشی فولادی با استفاده از روش FE تحلیل شده و استفاده از پانل دیوار برشی فولادی به عنوان مهار بازویی در طبقات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین ترتیب در مجموع ۴ مدل ساخته شده و عملکرد لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی با مهار بازویی به کمک تحلیل استاتیکی غیرخطی تعیین شده است. پاسخ سازه شامل منحنی برش پایه - تغییر مکان بام، انرژی جذب شده، شکل پذیری و حداکثر دررفت طبقات جهت تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی اختیار شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که موقعیت بهینه مهار بازویی مشابه حالت استاتیکی خطی است. برای حالت وجود یک مهار بازویی در ارتفاع سازه، موقعیت بهینه در میانه ارتفاع ساختمان می‌باشد.

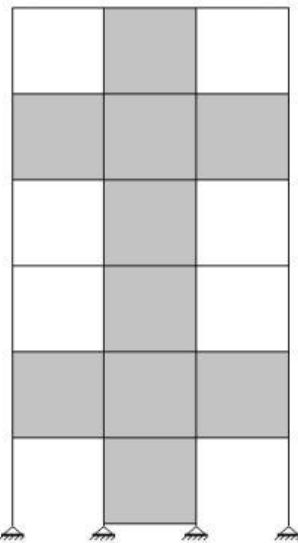
واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی، مهار بازویی، مهار بازویی به صورت پانل فولادی، تحلیل استاتیکی غیرخطی.

* نویسنده مسئول: استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران؛ attarnejad@ut.ac.ir

۱. مقدمه

ساختمان‌های مرتفع امروزی، نیازمند استفاده از سیستم‌های مقاوم برابر جانبی مناسب می‌باشند. یکی از سیستم‌های نوین، استفاده از دیوارهای برشی فولادی به صورت مهار بازویی در طبقات مختلف سازه است. سیستم مهار بازویی در سالیان اخیر برای ساختمان‌های بلندمرتبه مورد استفاده قرار گرفته است. این فرم سازه‌ای دارای یک هسته مرکزی است که توسط خرپاهای بازمانند یا شاه‌تیرها به ستون‌های خارجی متصل می‌شوند. همچنین می‌توان از مهارهای بازویی در چند تراز استفاده کرد که در این صورت انتظار خواهیم داشت پیوستگی بین هسته مرکزی و ستون‌های پیرامونی افزایش یابد. به‌کارگیری مهار بازویی سبب خواهد شد که از طریق ایجاد یک کوپل، لنگر واژگونی ساختمان در تراز قرارگیری مهارهای بازویی کاهش یابد. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل و بررسی استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی به‌عنوان مهار بازویی است. آرایش اجزای تشکیل‌دهنده این سیستم در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. سیستم مهار بازویی به‌صورت دیوار برشی فولادی [۱]

از اواخر دهه ۱۹۷۰ تحقیقات درباره دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده آغاز شد که تماماً مقاومت پس‌کمانشی (Post-buckling) را مورد مطالعه قرار داده‌اند. مزایای اصلی این سیستم شامل سختی اولیه زیاد، رفتار چرخه‌ای پایدار، ظرفیت اتلاف انرژی زیاد و شکل‌پذیری قابل توجه است. این سیستم باعث سبک شدن سازه، افزایش فضای کاربری، سرعت ساخت بالا و قابلیت کنترل کیفیت در مقایسه با دیوارهای برشی بتن‌آرمه می‌شود [۲].

در سال‌های اخیر، دیوارهای برشی فولادی به‌عنوان سیستم مقاوم جانبی در تعدادی از ساختمان‌ها استفاده شده‌اند که می‌توان به بیمارستان ۶ طبقه سیلمار (Sylmar hospital) در لوس‌آنجلس و ساختمان ۳۵ طبقه کوبه‌سیتی‌هال (Kobe City Hall) در کوبه ژاپن اشاره کرد [۳].

ولین برنامه تحقیقاتی مهم در مورد رفتار دیوارهای برشی فولادی در سال ۱۹۷۳ انجام شد. هدف از این تحقیق آزمایشگاهی، مطالعه رفتار دیوارهای برشی بدون سخت‌کننده و دیوارهای برشی با آرایش‌های مختلف سخت‌کننده‌ها تحت اثر بارهای چرخه‌ای غیرالاستیک بود تا پایداری آن‌ها را برای استفاده به‌عنوان سیستم مقاوم جانبی ارزیابی کنند [۴].

تاراناث (Taranath) در سال ۱۹۷۵ تحلیل و طراحی سازه‌های با یک مهار بازویی را مورد بررسی قرار داد و همچنین موقعیت بهینه مهار بازویی در ارتفاع سازه را تعیین کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که موقعیت بهینه مهار بازویی تقریباً در وسط ارتفاع ساختمان می‌باشد [۵].

مک ناب و موودی (McNabb & Muvdi) در سال ۱۹۷۵ موقعیت بهینه مهارها را برای سازه با دو مهار بازویی تعیین کردند که فاصله‌ای تقریباً $0/3$ و $0/7$ برابر ارتفاع سازه است. هر دو این تحلیل‌ها با فرض رفتار استاتیکی حاصل شده بودند و معیار تعیین موقعیت بهینه مهارهای بازویی، حداقل کردن تغییر مکان افقی بالای سازه بوده است [۶].

استافورد اسمیت و سلیم (Stafford Smith & Salim) در سال ۱۹۸۱ رفتار سازه‌های سازه‌های با مهار بازویی را تحت اثر بار افقی یکنواخت در ارتفاع سازه مورد مطالعه قرار دادند و به کمک تحلیل پارامتری، نتایج را براساس پارامترهای بدون بعد (نسبت سختی خمشی اعضا) ارائه کردند [۷].

دینگ (Ding) در سال ۱۹۹۱ یک سازه با مهار بازویی را در نظر گرفت و تأثیر پارامترهای سازه‌ای مختلف از جمله نسبت سختی هسته مرکزی به ستون و نسبت سختی هسته به مهار بازویی را بر روی موقعیت بهینه مهار بازویی مورد بررسی قرار داد [۸].
ژانگ (Zhang) و همکاران در سال ۱۹۹۶ مدل‌های عددی را برای آنالیز سازه‌های با چند مهار بازویی مورد بررسی قرار دادند [۹].
تارانات در سال ۱۹۹۸ درباره موقعیت بهینه یک سیستم سازه‌ای با دو مهار بازویی مطالعاتی را انجام داد [۱۰].
فو (Fu) در سال ۱۹۹۹ معیارهای طراحی را برای یک ساختمان بلند بتن آرمه با مهارهای بازویی تبیین کرد [۱۱].
وو و لی (Wu & Li) در سال ۲۰۰۳ عملکرد سازه‌ای یک ساختمان بلند با چند مهار بازویی را مورد مطالعه قرار دادند و تأثیرات موقعیت مهارهای بازویی و تغییرات سختی المان‌های سازه‌ای را بر روی لنگر پایه هسته و دریف بالای سازه و پیوند طبیعی سیستم مورد بررسی قرار دادند.

۲. روش‌ها

در این بخش به وضوح شیوه انجام تحقیقات، روش‌های به کار گرفته شده، نرم‌افزارهای مورد استفاده، آزمایشات انجام شده معرفی و شرح داده می‌شوند. با مطالعه این بخش، مخاطب می‌تواند در رابطه با نتایج ارائه شده در بخش نتایج اطمینان حاصل کند.
به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش قاب سه طبقه که در آن نیروی جانبی با استفاده از دیوار برشی فولادی مهار شده، طراحی شده و مهار بازویی به شکل دیوار برشی فولادی تعبیه شده است. به طوری که محل مهار بازویی به ترتیب در طبقات مختلف قرار داده شده، تا امکان برآورد محل بهینه برای قرار دادن مهار بازویی به شکل دیوار برشی فراهم شده باشد و همچنین عملکرد آن در مقایسه با مهار بازویی به شکل شاه‌تیر که در سایر منابع و مقالات [۱] انجام شده فراهم شده و مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.
برای طراحی اولیه این قاب‌ها از آیین‌نامه‌های AISC-341(2010) و AISC-360 (2010) استفاده شده است. همچنین برای بارگذاری لرزه‌ای از آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم بهره‌گیری شده است. بر همین اساس این قاب‌ها به گونه‌ای طراحی خواهند شد تا قادر باشند به تنهایی ۲۵ درصد بار لرزه‌ای را تحمل کنند. در نهایت با انجام تحلیل بارافزون (Pushover Analysis)، رفتار غیرخطی قاب‌ها توسط نرم‌افزار ABAQUS مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت.
نوع کاربری سازه، مسکونی و با اهمیت متوسط فرض شده است. براساس ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰، این ساختمان‌ها در منطقه با خطر لرزه‌ای بسیار زیاد و خاک نوع ۳ در نظر گرفته شده‌اند. ارتفاع طبقات ۴ متر، طول دهانه قاب‌ها ۴ متر، تعداد دهانه قاب‌ها ۳ عدد و عرض بارگیر سقف ۴ متر است.
بر این اساس مدل‌های قاب‌های مرجع [۱] برای ارزیابی انتخاب شده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ زیر نشان داده شده است. مدل ۳-۴-۴، به معنای قاب سه طبقه با دهنه داخلی ۴ متر و دهنه خارجی ۴ متر است.

جدول ۱. مشخصات طیفی سازه سه طبقه براساس آیین‌نامه ۲۸۰۰

Story	T (s)	N	B1	B	A (g)	S _a (g)	C=S _a I/R
3	0.52	1.00	2.75	2.75	0.35	0.96	0.16
9	1.18	1.10	1.63	1.80	0.35	0.63	0.10
14	1.64	1.20	1.176	1.41	0.35	0.49	0.08

جدول ۲. نتایج حاصل از طراحی مدل ۳-۴-۴

Level	Plate thickness (mm)	SPSW_VBEs	SPSW_HBEs	Outer columns	Outer beams
3	1.59	W14x370	W24x162	W10x45	W10x17
2	1.59	W14x370	W18x50	W10x45	W10x17
1	1.59	W14x370	W18x50	W10x45	W10x17

۳. شبیه‌سازی عددی و بررسی نتایج

در مدل‌سازی اعضاء سازه‌ای از نوع 3D_Deformable و دیوارهای برشی نیز از نوع 3D_shell انتخاب شده‌اند. تعداد این اعضاء در سازه ۳ طبقه ۲۱ عضو (بدون در نظر گرفتن دیوارهای برشی) است. مشخصات ابعادی مقاطع در مازول طراحی محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است. همچنین به منظور تأثیر ضخامت ورق در مهار بازویی، بیشترین و کمترین ضخامت در طراحی ورق هسته مرکزی، برای ضخامت ورق مهار بازویی منظور شده است.

جدول ۳. مدل ۳-۴-۴ در مازول طراحی

Level	Outrigger's plate thickness (mm)	Plate thickness (mm)	SPSW_VBEs	SPSW_HBEs	Outer columns	Outer beams
3	1.59	1.59	W14x370	W24x162	W10x45	W10x17
2	1.59	1.59	W14x370	W18x50	W10x45	W10x17
1	1.59	1.59	W14x370	W18x50	W10x45	W10x17

در این پژوهش به‌طور کلی دو نوع مصالح استفاده شده:
 ۱- فولاد رده ASTM-A36 (برای دیوارهای برشی).
 ۲- فولاد رده ASTM-A572 (برای اعضاء سازه‌ای).
 مشخصات مصالح در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات فولاد رده ASTM-A36 (برای دیوارهای برشی) و ASTM-A572 (برای اعضاء سازه‌ای).

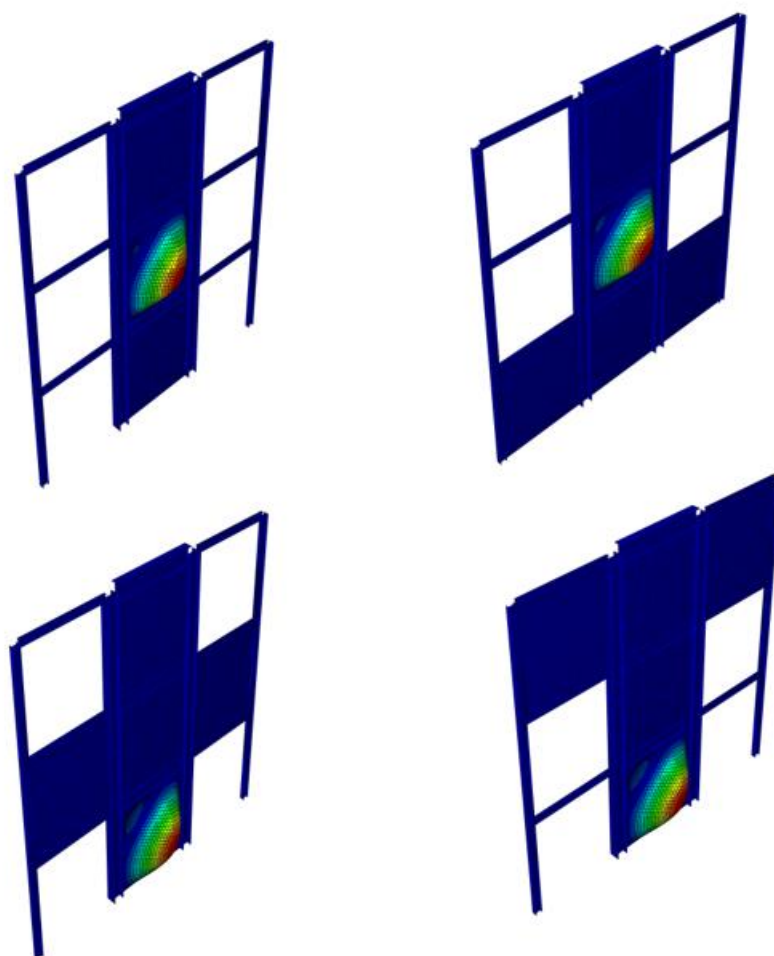
Material	Plastic Behavior	Density (Kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Damping ratio α	Damping ratio β
fsASTM-A36	eElastic-Plastic	7850	200	0.31	325	0.3883	0.00424
AASTM-A572	eElastic-Plastic	7850	200	0.31	385	0.3883	0.00424

در این پژوهش می‌توان سه گام را برای تحلیل سیستم در نظر گرفت. مشخصات این گام‌ها در جدول ۴ آمده است.

جدول ۵. مشخصات گام‌های به‌کار رفته در تحلیل

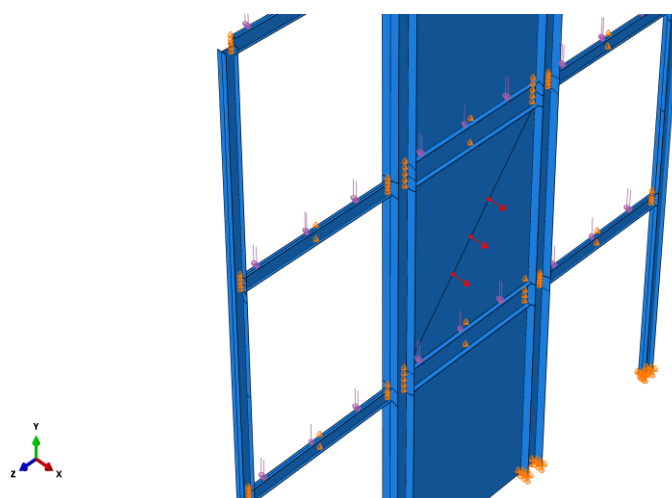
نوع تحلیل	مدت گام	نوع گام
بار ثقلی	۱ ثانیه	کوازی استاتیک (Quasi Static)
اعمال خطای ساخت (تحلیل کمانش)	۱ ثانیه	کوازی استاتیک
صریح (Explicit) (روش بارافزون)	۱ ثانیه	کوازی استاتیک

بعد از آنالیز قاب در نرم‌افزار مدهای کمانشی قاب به‌دست می‌آید. برای ایجاد خطای ساخت مد اول کمانش در نظر گرفته شده است. این تحلیل برای هر مدل انجام شده تا مد اول کمانش در هر قاب مشخص شود. شکل ۲ مد اول کمانش در قاب سه طبقه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مود اول کمانش در قاب سه طبقه

بعد از پیدا کردن مود کمانشی، در گام دوم (اعمال خطای ساخت) با وارد کردن نیروی ناچیزی (بیست نیوتون) در محل به وجود آمدن کمانش در مود اول، این مود فعال می‌شود. تأثیرات این گام در گام سوم اثر می‌گذارد. برای نمونه در شکل ۳ اعمال بار ۲۰ نیوتون در راستای مود اول کمانش در قاب سه طبقه بدون مهار بازویی، نشان داده شده است.

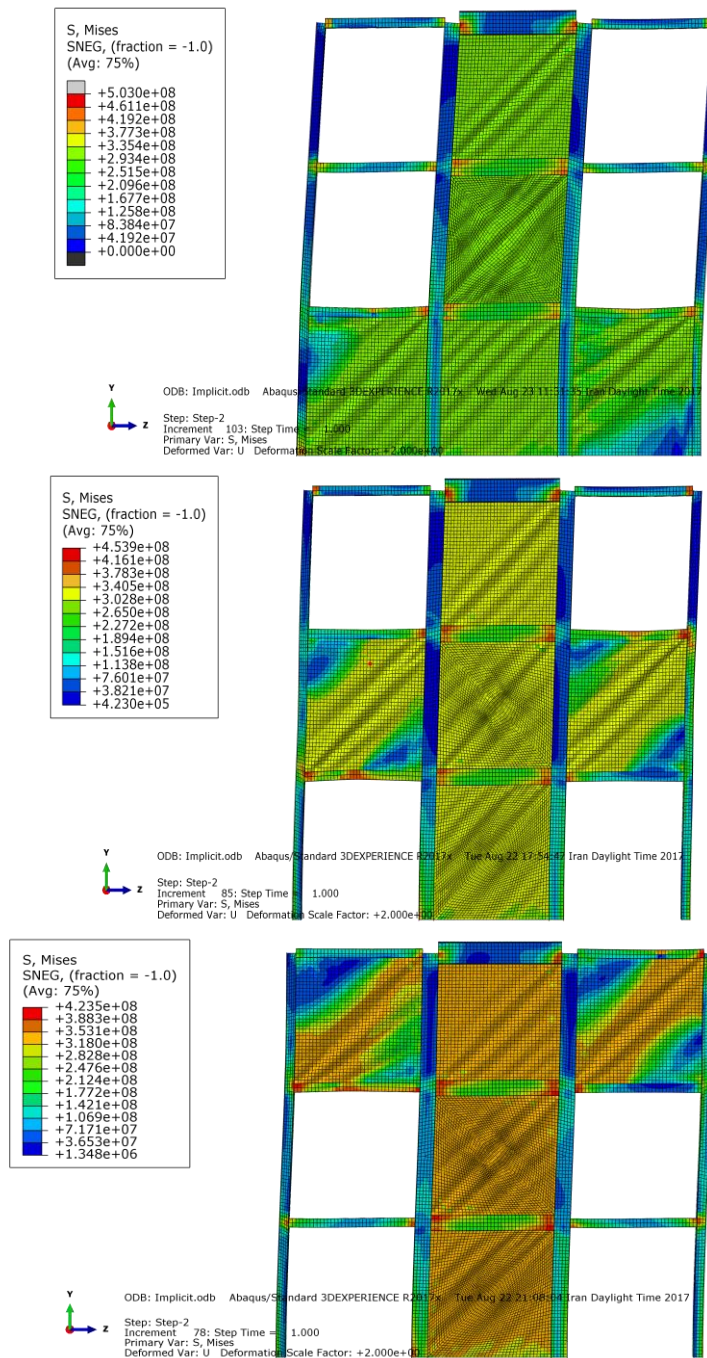


شکل ۳. اعمال بار در راستای مود اول کمانش قاب سه طبقه بدون مهار بازویی

در گام سوم بار جانبی در طبقه اول به صورت ۱۰۰ کیلو نیوتون بر سازه اعمال می‌شود. به طبع آن بار جانبی در طبقه بعدی ۲۰۰ کیلو نیوتون، طبقه بعدی ۳۰۰ کیلو نیوتون است. توزیع بار در تراز اعمال بار به صورت یکنواخت توزیع شده است.

۴. نتایج شبیه‌سازی

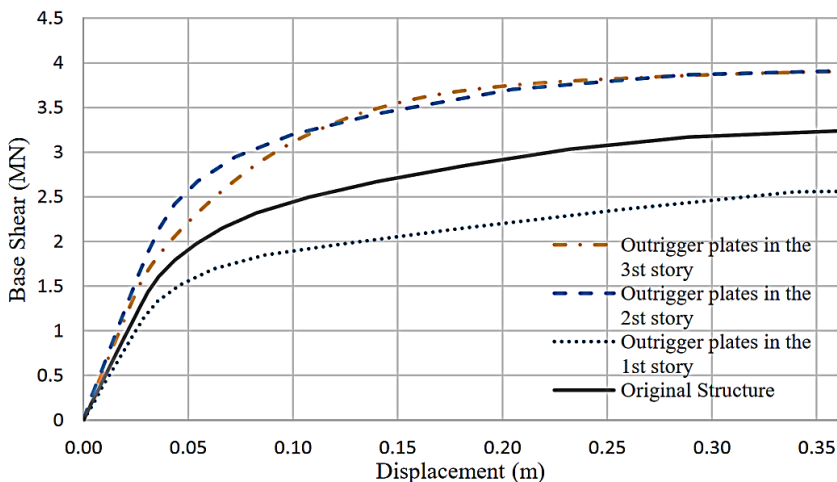
بعد از آنالیز در نرم‌افزار، نتایج حاصل از تحلیل بار افزون حاصل شد. این نتایج در قالب شکل‌ها و نمودارهای این بخش بیان می‌شود. در شکل ۴ توزیع تنش فون - میزس در قاب‌های سه طبقه در پایان تحلیل بار افزون نشان داده شده است.



شکل ۴. توزیع تنش فون - میزس در قاب در پایان تحلیل بار افزون و رسیدن به تغییر مکان هدف (برحسب Pa)

منحنی پوش‌آور قاب‌های سه طبقه در شکل ۵ نشان داده شده است. این منحنی تا لحظه خرابی اعتبار دارد. برای قاب‌های مختلف، سازه تا جابه‌جایی خرابی پوش داده می‌شود. در جدول ۵ جابه‌جایی در اولین نقطه مشاهده شده خرابی، نشان داده شده است. برای

به دست آوردن این نتیجه، سازه تا کرنش ۰/۲ پوش داده شده و مقدار جابه‌جایی ثابت شده است.



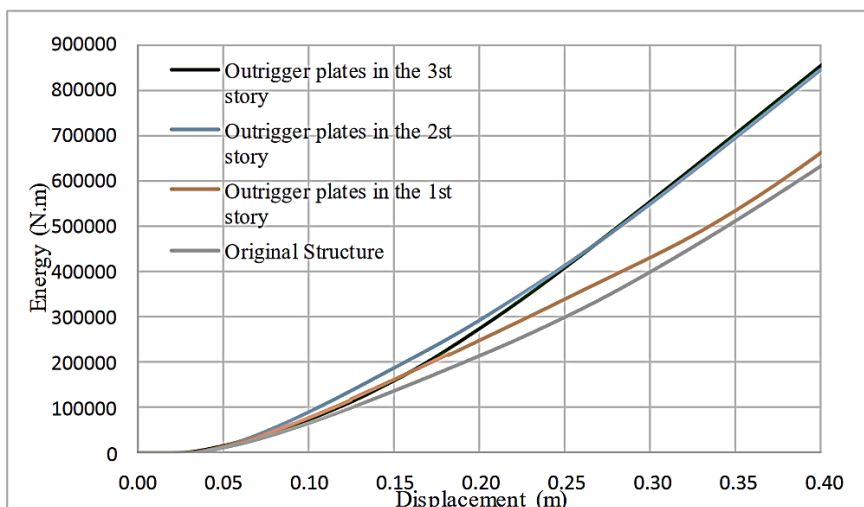
شکل ۵. منحنی بار افزون قاب‌های سه طبقه

جدول ۵. جابه‌جایی در نقطه خرابی سازه ۳ طبقه

محل مهار بازویی	جابه‌جایی بام (متر)
بدون مهار بازویی	۰/۵۲
مهار بازویی در طبقه اول	۰/۴۸
مهار بازویی در طبقه دوم	۰/۵۰
مهار بازویی در طبقه سوم	۰/۵۱

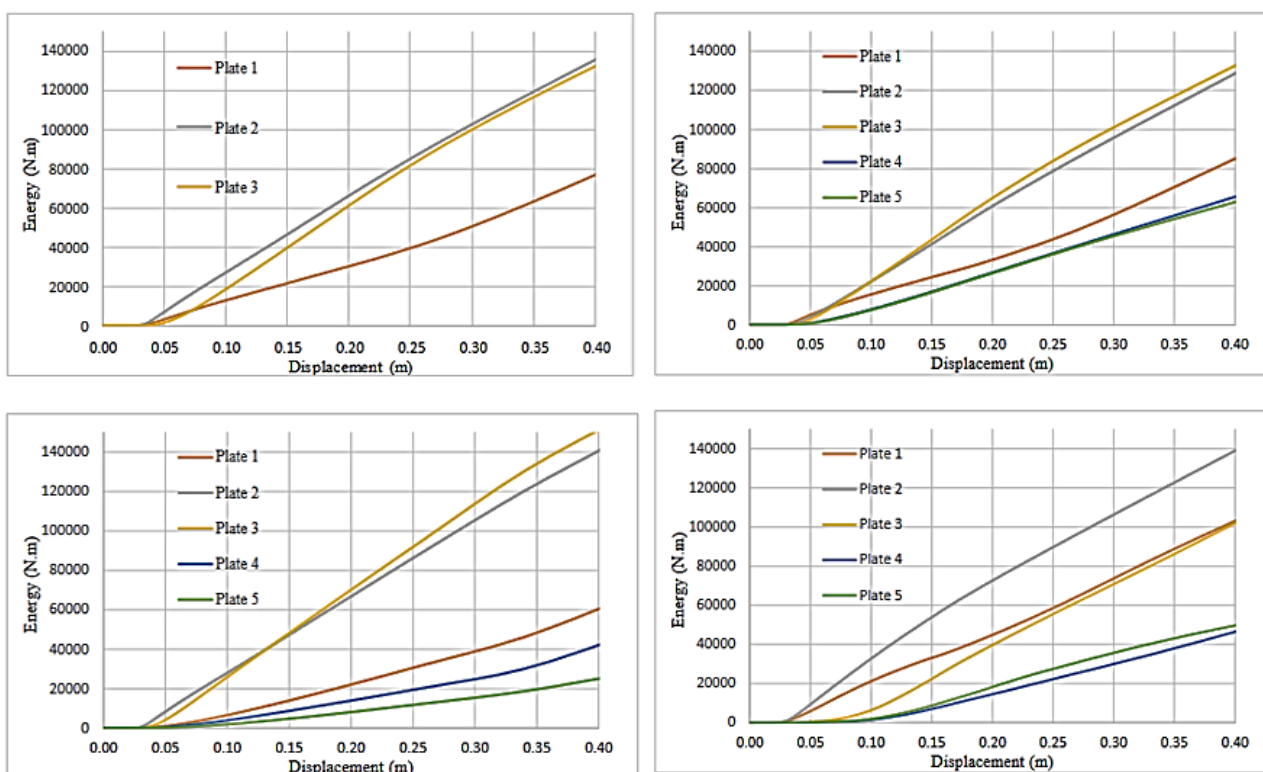
استفاده از مهار بازویی به صورت دیوار برشی، باعث افزایش ظرفیت ساختاری سازه می‌شود. جابه‌جایی هدف قاب‌های سه طبقه ۳۶ سانتیمتر است. استفاده از مهار بازویی سازه را سخت‌تر کرده و ظرفیت جذب انرژی را بالا می‌برد در حالی که جابه‌جایی بام در لحظه خرابی با وجود کاهش، کمتر از جابه‌جایی هدف نمی‌شود و این نشان‌دهنده آن است که از ظرفیت جذب انرژی سازه بیشتر استفاده شده است.

منحنی انرژی - جابه‌جایی قاب‌های ۳ طبقه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی انرژی - جابه‌جایی سازه ۳ طبقه

در قاب بعد از اعمال بار و پوش دادن سازه، انرژی آزاد شده توسط اعضای سازه جذب می‌شود. این جذب انرژی هرچه توسط اعضای غیراصلی بیشتر باشد، می‌تواند معیار خوبی برای سازه بهینه باشد. نمودار ۶ کل انرژی جذب شده توسط سازه را نشان می‌دهد و نسبت انرژی جذب شده توسط ورق‌ها به اعضای اصلی همچون تیرها و ستون‌ها را نشان نمی‌دهد. برای بررسی بهتر انرژی جذب شده توسط ورق‌های هر قاب به صورت جداگانه توسط نرم‌افزار به دست آمده است. در شکل ۷ نمودار انرژی قاب‌های سه طبقه مشاهده می‌شود. در شکل‌ها، دیوارهای برشی به صورت صفحه‌هایی از پایین به بالا شماره‌گذاری شده‌اند. دیوارهای برشی مهار بازویی شماره‌های ۴ و ۵ هستند.



شکل ۶. منحنی انرژی - جابه‌جایی دیوار برشی قاب‌های سه طبقه الف) بدون مهار بازویی؛ ب) مهار بازویی در طبقه اول؛ ج) در طبقه دوم؛ د) در طبقه سوم.

هرچه روند جذب انرژی توسط صفحه‌ها یکنواخت بوده و نمودارها به یکدیگر نزدیک‌تر باشد، می‌توان نتیجه مناسب‌تری از قاب برداشت کرد. به عبارت دیگر هرچه صفحه‌ها بیشتر و به‌طور یکسان انرژی ایجاد شده توسط بارگذاری را جذب کنند سازه عملکرد بهتری دارد. برای بررسی بهتر نمودارها، انرژی جذب شده توسط هر صفحه در جابه‌جایی هدف سازه استخراج شده و از آن‌ها انحراف معیار گرفته شده است. جدول ۶ درصد انحراف معیار انرژی جذب شده نسبت به کمترین انحراف معیار هر قاب ۳ طبقه را نشان می‌دهد.

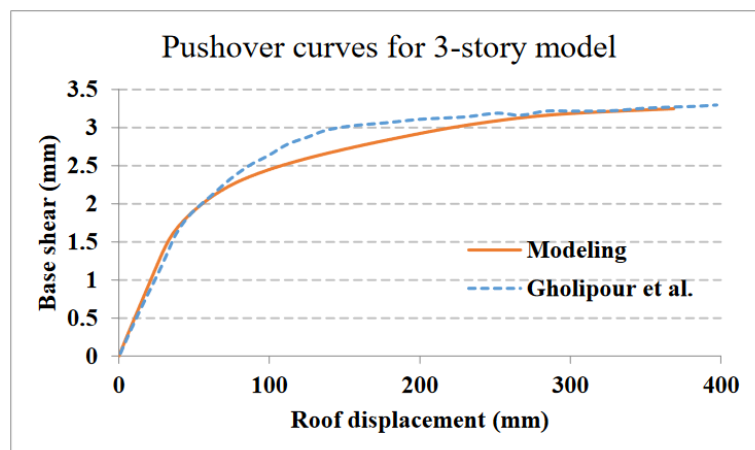
جدول ۶. انحراف معیار انرژی جذب شده و درصد مشارکت در جذب انرژی توسط صفحه‌ها

محل مهار بازویی	انحراف معیار (%)	درصد جذب انرژی توسط صفحه‌ها در جابه‌جایی هدف به انرژی کل
		1 2 3 4 5
بدون مهار بازویی	1	12.27 22.48 22 - -
در طبقه اول	1.60	9 23.44 25.42 5.84 3.62
در طبقه دوم	1.06	10 14.91 15.32 7.64 7.31
در طبقه سوم	1.15	12.3 16.73 12.06 5.41 5.94

همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده توسط صفحه در طبقه اول نسبت به سایر صفحه‌ها کمتر بوده و این امر گویای این مطلب است که به کار بردن مهار بازویی در طبقه اول تأثیری در روند بهینه کردن سازه ندارد. در شکل ۶ (د) می‌توان این موضوع را مشاهده کرد. بیشترین جذب انرژی مهار بازویی در قاب با مهار بازویی در طبقه دوم به میزان ۳۰ درصد از انرژی کل سازه می‌باشد.

۵. اعتبار سنجی

برای صحت نتایج عددی، یکی از مدل‌های نرم‌افزاری با نتایج مقاله مرجع [۱] مقایسه شده است. برای ارزیابی مدل سه طبقه با عرض دهانه ۴ متر انتخاب شده است. در شکل ۷ نتایج ارزیابی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج ارزیابی قابل قبول است.



شکل ۷. صحت‌سنجی با مقاله مرجع [۱]

۶. نتیجه‌گیری

- ۱- براساس نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی صورت گرفته می‌توان گفت که موقعیت مهار بازویی بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تأثیرگذار بوده است. با توجه به نتایج این پژوهش، مکان بهینه برای قرار دادن مهار بازویی تا حداکثر یک‌دوم ارتفاع کل از پای سازه است.
- ۲- براساس معیارهای برش پایه، درصد جذب انرژی سازه، ظرفیت شکل‌پذیری و روند تسلیم ورق‌های دیوار برشی، مکان بهینه برای مهار بازویی در قاب سه طبقه، در طبقه دوم است.

منابع

- [1] Gholipour M, Asadi E and Alinia MM. (2014). "The Use of Outrigger System in Steel Plate Shear Wall Structures". *Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran 15875-4413, Iran.*
- [2] Roberts TM, Sabouri-Ghomi S. (1992). "Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels". *Thin-Walled Structures 14*: 139-151.
- [3] Astaneh-Asl, A. and Zhao, Q. (2001). "Cyclic Tests of Steel Shear Walls," *Report Number UCB/CE-Steel-01/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, August.*
- [4] Takahashi Y, Takeda T, Takagi M. (1973). "Experimental Study on Thin Steel Shear Walls and Particular Bracing Under Alternative Horizontal Load, Preliminary Report" *IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, Lisbon, Portugal, 185-191.
- [5] Taranath, B. (1975). "Optimum belt truss location for high-rise structures." *Structural Engineer, 53(8)*, 18-21.
- [6] McNabb, J. W., and Muvdi, B. B. (1975). "Drift reduction factors for belt high-rise structures." *Engineering Journal, 3rd Quarter*, 88-91.
- [7] Stafford Smith, B., and Salim, I. (1981). "Parameter study of outrigger braced tall building structures." *Journal of Structural Engineering, 107(T10)*, 2001-2014.
- [8] Ding, J. M. (1991). "Optimum belt truss location for high-rise structures and top level drift coefficient." *Journal of Building Structures, (4)*, 10-13.

- [9] Zhang, Z. G., Fu, X. Y., Wang, J. J., and Wei, Y. N. (1996). "Studies on structural performance of ultra high-rise building with outrigger belts." *Journal of Building Structures*, 17(4), 2–9.
- [10]. Taranath, B. (1998). *Steel, Concrete, and Composite Design of Tall Buildings* (2nd ed.). McGraw-Hill, New York.
- [11] Fu, X. Y. (1999). "Design proposal for reinforced concrete high-rise building structure with outrigger belts." *Journal of Building Structures*, (10), 11–19.