

ضرایب عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مرکب بتنی-فولادی نگهدارنده سیستم‌های خنک کننده

هوایی نیروگاهی

حمید حجازی طلب^۱، تورج تقی خانی^{۱*}، امین مجید گلنگشی^۲، سالار مرادی اصیل^۱، مهدی کاردان قراملکی^۱، علیرضا کنعانی^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- گروه مینا، شرکت احداث و توسعه نیروگاه‌های مینا (توسعه ۱)، تهران، ایران

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ttaghikhany@aut.ac.ir

چکیده

سازه‌های مرکب بتنی-فولادی نگهدارنده سیستم‌های خنک‌کننده هوایی در نیروگاه‌ها، از اجزای حیاتی زیرساخت تولید برق به شمار می‌روند. با توجه به قرارگیری بسیاری از این تأسیسات در پهنه‌های لرزه‌خیز، ارزیابی رفتار لرزه‌ای آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، رفتار غیرخطی این سازه‌ها با هدف تعیین ضرایب عملکرد لرزه‌ای شامل ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه‌مقاومت، و همچنین شناسایی مکانیزم‌های خرابی، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، یازده نمونه سازه‌ای با ویژگی‌های هندسی و اجرایی متداول در پروژه‌های نیروگاهی، طراحی، مدل‌سازی و تحلیل شدند. برای بررسی دقیق رفتار غیرخطی سازه‌ها، مدل‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی در دو جهت متعامد قرار گرفتند. سپس، یکی از مدل‌های منتخب با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین ضریب رفتار سازه‌های مورد بررسی برابر ۷/۴۹ بوده و بیش از ۹۰ درصد مقادیر محاسباتی در بازه ۶ تا ۹ قرار دارند. همچنین مقادیر میانگین ضریب اضافه‌مقاومت و ضریب شکل‌پذیری به ترتیب ۱/۷۷ و ۴/۵ به دست آمد. تحلیل الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل‌ها آشکار ساخت که رفتار غیرخطی عمدتاً از پای ستون‌های بتنی آغاز می‌شود، با این حال بحرانی‌ترین مفاصل، از نظر احتمال رسیدن به سطح گسیختگی، در ناحیه فوقانی اتصال مهاربند به ستون تشکیل می‌گردند؛ ناحیه‌ای که نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری سازه دارد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی جهت بازنگری ضرایب لرزه‌ای و بهبود ضوابط طراحی این نوع سازه‌ها در پروژه‌های نیروگاهی آینده، قرار گیرد.

کلمات کلیدی

سازه‌های خنک‌کننده نیروگاهی، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، ضرایب عملکرد لرزه‌ای، مکانیزم خرابی.

تأمین پایدار انرژی، ستون فقرات توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورها را تشکیل می‌دهد و سازه‌های نیروگاهی در این میان نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. طراحی ایمن و قابل اطمینان این سازه‌ها در برابر مخاطرات محیطی، به‌ویژه رویدادهای لرزه‌ای، از اولویت‌های اصلی مهندسی محسوب می‌شود. در نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی، سیستم‌های خنک‌کننده مسئولیت تبدیل بخار خروجی از توربین به آب و بازگرداندن آن به سیکل فرایند را داشته و نقشی کلیدی در تضمین عملکرد پیوسته و قابلیت اطمینان نیروگاه ایفا می‌کنند. با توجه به کمبود منابع آبی و الزامات زیست محیطی، سیستم‌های خنک‌کننده هوایی^۱ (ACC) که از هوای محیط و فن‌ها به جای آب برای خنک‌کاری در مبدل‌های حرارتی استفاده می‌کنند، به گزینه‌ای متداول و ضروری در این نیروگاه‌ها تبدیل شده‌اند.

سیستم‌های ACC شامل لوله‌های انتقال و تجهیزات دوار سنگین (مانند پمپ‌ها و فن‌ها) بوده و فرایند خنک‌سازی توسط آنها، به امکان گردش هوا به داخل مجموعه وابسته است [۱]. به منظور فراهم آوردن جریان هوای مناسب و فرایند خنک‌سازی حداکثری، لازم است این تجهیزات بر روی سازه‌هایی با ارتفاع زیاد و دهانه‌های وسیع قرار گیرند. تاکنون انواع مختلفی از سیستم‌های سازه‌ای، شامل قاب‌های خمشی بتنی، قاب‌های فولادی مهاربندی شده، و سیستم‌های مرکب بتنی-فولادی، برای پشتیبانی از سیستم‌های ACC مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در شکل ۱ انواع سیستم‌های سازه‌ای استفاده شده در سازه‌های ACC نشان داده شده است. به دلیل انتظارات عملکردی، این سازه‌ها به صورت قاب‌های یک طبقه با دهانه‌های بزرگ طراحی و اجرا شده که در تراز طبقه آن‌ها، فن‌ها قرار می‌گیرند. در این میان، سیستم سازه‌ای مرکب شامل ستون‌های بتن مسلح توخالی همراه با شاه‌تیر و یا خرپاهای فولادی، به دلیل صرفه اقتصادی و انعطاف‌پذیری بالا برای ارائه طرح‌های سازه‌ای، متناسب با نیازهای و الزامات پروژه‌های صنعتی، به عنوان گزینه‌ای پذیرفته شده در پروژه‌های نیروگاهی مطرح است. متناسب با ظرفیت پروژه نیروگاهی، مشخصات فن‌های استفاده شده و شرایط بهره‌برداری، ابعاد دهانه‌های این سازه‌های مرکب در محدوده ۲۲ تا ۲۷ متر و ارتفاع ستون‌های مورد استفاده در محدوده ۲۰ تا ۵۵ متر طراحی می‌شوند.



شکل ۱. انواع سیستم‌های سازه‌ای استفاده شده در سازه‌های نگهدارنده ACC نیروگاهی

Fig. 1. Types of structural systems used in power-plant ACC support structures

سازه‌های نگهدارنده سیستم‌های ACC نیروگاهی تحت تاثیر عوامل متعددی از جمله تغییرات توان خروجی نیروگاه و شرایط محیطی، بارگذاری‌های متغیر و پیچیده‌ای را تحمل کرده و به دلیل قرارگیری تجهیزات سنگین در بخش فوقانی سازه، الزامات ارتعاشی و تغییر مکانی خاص و پیچیده‌ای را در زلزله از خود نشان می‌دهند [۲]. از این رو ارزیابی دقیق عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها، به ویژه درک رفتار غیرخطی آن‌ها در زلزله‌های شدید، برای تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان آن‌ها ضروری بوده و در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. این توجه فزاینده، ضرورت تحقیقات تجربی و عددی جامع در این حوزه را برجسته می‌سازد.

ژیو و همکاران [۳] عملکرد لرزه‌ای سازه‌های نگهدارنده ACC را در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا از طریق مجموعه‌ای از آزمایش‌های شبه‌دینامیکی بر روی یک نمونه آزمایشگاهی یک‌دهانه با مقیاس یک‌هشتم از سازه واقعی ارزیابی کردند. این نمونه شامل چهار ستون

¹ Air-Cooled Condensers

بتنی توخالی، تیرهای اصلی متشکل از خرپاهای فولادی و اعضای مهاربندی فولادی رابط خرپاها به ستون‌های بتنی بود. پاسخ سازه تحت پنج سطح مختلف شتاب اوج زمین و یک برنامه بارگذاری چرخه‌ای ثبت گردید. داده‌های حاصله، شامل جابه‌جایی‌های جانبی، کرنش‌ها و الگوهای ترک، امکان تحلیل دقیق رفتار غیرخطی نمونه را فراهم ساخت. نتایج نشان داد که این سیستم سازه‌ای، در صورت طراحی با ضریب شکل‌پذیری^۱ بیش از ۴، ظرفیت مناسبی برای تحمل تقاضاهای لرزه‌ای دارد. تحلیل تنش‌ها در بخش‌های مختلف نمونه نشان داد که اغلب اعضای رابط‌های بین‌ستونی، شامل خرپاها و مهاربندهای فولادی در تمام مراحل آزمایش در محدوده رفتار الاستیک باقی ماندند. این مسئله ناشی از آن است که این اجزا به دلیل نقش کلیدی که در پشتیبانی تجهیزات سنگین، حساس و گران‌قیمت سیستم خنک‌کننده دارند، معمولاً با سختی و مقاومت بالا طراحی می‌شوند تا از بروز هرگونه تغییر شکل غیرمجاز در تجهیزات جلوگیری شود. ارزیابی الگوی گسترش ترک‌ها نیز نشان داد که آسیب ابتدا در نواحی میانی ستون‌ها و زیر کربل‌ها ایجاد شده و با افزایش شدت بارگذاری به پای ستون‌ها و سپس به نواحی فوقانی محل اتصال مهاربندها به ستون گسترش یافته است.

سازه‌های نگهدارنده ACC متشکل از ستون‌های لوله‌ای توخالی بتن مسلح و خرپاهای فولادی، دارای سختی جانبی و قائم نسبی کمی هستند و بنابراین استفاده از آنها در نیروگاه‌هایی تا ظرفیت متوسط مناسب است. با افزایش ظرفیت نیروگاه و در نتیجه افزایش وزن تحمل شده توسط این سازه‌ها، این امکان وجود دارد که یکپارچگی عملکردی دو قسمت فولادی و بتنی در خطر افتاده و الزامات لرزه‌ای آیین‌نامه‌ای فراهم نگردد. راهکار رفع این مشکل، جایگزینی یک شاه‌تیر فولادی صلب به جای خرپای فولادی در دو جهت عمود بر هم پلان، به همراه استفاده از اعضای مهاربندی مورب بین شبکه‌ی تیرهای فولادی و ستون‌های بتنی پیشنهاد شده است. دای و وانگ [۴] مدل عددی نظیر چنین سازه‌ای در مقیاس کامل را در محیط نرم‌افزار ABAQUS تحت آزمون شبه دینامیکی، تحلیل نمودند. بررسی الگوی آسیب توزیع شده در اعضای مدل نشان داد که آسیب در ستون‌های لوله‌ای بتن مسلح متمرکز بوده و عمدتاً در نواحی قسمت تحتانی پای ستون، قسمت پایینی و قسمت بالایی محل اتصال کربل به ستون‌ها رخ داده در حالی که اجزای فولادی این سازه هیبریدی در برابر بارگذاری جانبی وارده به مرحله تسلیم نرسیدند.

وانگ و همکاران [۵-۷] و یائو و لویی [۸] در مطالعات خود نشان دادند اگرچه پلان طبقه در سازه‌های نگهدارنده ACC تقریباً در امتداد هر دو محور افقی متقارن است و جرم کف در هر دو جهت کم و بیش به طور مساوی در سطح پلان توزیع می‌شود، با این وجود به دلیل توزیع غیریکنواخت جرم و سختی در ارتفاع سازه، موده‌های ارتعاشی در دو جهت انتقالی سازه متفاوت هستند. در نتیجه، اثرات پیچش و کوپل خمش و پیچش در رفتار سازه موثر بوده و بنابراین در طراحی این نوع سازه باید اثرات رفتار دوسویه و ترکیب موده‌ها را در نظر گرفت. در همین راستا، وانگ و همکاران [۹] با بررسی آزمایشگاهی رفتار پیچشی و پاسخ لرزه‌ای غیرخطی در سازه‌های اصلی نیروگاهی، نشان دادند که ایجاد پیچش غیرالاستیک و اثرات کوپلینگ حرکت انتقالی و پیچشی می‌تواند باعث افت سختی پیچشی و اغتشاش در میدان جابه‌جایی تراز تجهیزات و مهاربندها شوند.

علاوه بر پاسخ‌های لرزه‌ای، سازه‌های نگهدارنده ACC به دلیل ابعاد بزرگ و هندسه خاص، به شدت در برابر بارهای محیطی نظیر باد حساس هستند. ژائو و همکاران [۱۰] با شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات و تحلیل‌های دینامیکی در ABAQUS، پاسخ دینامیکی این سازه‌ها را تحت اثر بارهای باد آشفته و با در نظر گرفتن اثر تداخل ساختمان‌های مجاور، ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حضور ساختمان‌های اطراف، ضریب شکل باد و ضریب نوسان دینامیکی را در اجزای سازه خنک‌کننده به‌ویژه دیوارهای بادگیر به شدت افزایش می‌دهد.

از سوی دیگر، با توجه به تمرکز آسیب‌های لرزه‌ای در ستون‌های توخالی بتنی سازه‌های خنک‌کننده، مطالعه رفتار غیرخطی و ارتقای شکل‌پذیری این اعضا در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است. کی و همکاران [۱۱] با ارائه یک مدل عددی پیشرفته، اثر متقابل نیروی محوری، خمش و برش را در ستون‌های توخالی بتن مسلح تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و زلزله‌های دارای پالس بررسی نمودند. همچنین استفاده از راهکارهای نوین مقاوم‌سازی نظیر استفاده از روکش‌های UHPC^۲ و ژاکت‌های FRP^۳ جهت تقویت و بهبود رفتار پیچشی و شکل‌پذیری ستون‌های توخالی بتنی، در پژوهش‌های فو و همکاران [۱۲] و ژانگ و همکاران [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته

¹ Ductility Factor

² Ultra-High Performance Concrete

³ Fiber-Reinforced Polymer

است. به منظور اصلاح رفتار لرزه‌ای پای ستون‌های توخالی و کاهش نیروهای منتقل شده به فونداسیون نیز اتصالات نیمه مفصلی پیشنهاد شده است [۱۴].

شرایط عملکردی ویژه و توزیع نامتقارن جرم و سختی در ارتفاع سازه‌های نگهدارنده ACC موجب می‌شود که در بسیاری از این سازه‌ها، مود پیچشی به یکی از مدهای غالب ارتعاشی تبدیل شود یا نسبت دوره تناوب مود پیچشی به مود انتقالی مقدار قابل توجهی داشته باشد. در نتیجه، انتظار می‌رود این سازه‌ها در هنگام زلزله رفتار ارتعاشی پیچیده‌ای ناشی از اندرکنش مدهای انتقالی و پیچشی از خود نشان دهند.

اگرچه آیین‌نامه‌های متداول طراحی لرزه‌ای، ضوابطی برای در نظر گرفتن اثرات پیچش اتفاقی، بی‌نظمی‌های سازه‌ای و بارگذاری دوجهته ارائه می‌کنند، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این ضوابط در برخی سازه‌های نامتقارن یا دارای توزیع نامنظم جرم و سختی، همواره قادر به برآورد مناسب پاسخ لرزه‌ای و پارامترهای طراحی لرزه‌ای نبوده و در برخی شرایط می‌توانند به برآوردهای بیش از حد محافظه‌کارانه یا حتی غیرمحافظه‌کارانه منجر شوند [۱۵]. علاوه بر این، آیین‌نامه‌های موجود ضرایب عملکرد لرزه‌ای اختصاصی برای سازه‌های مرکب بتنی- فولادی نگهدارنده سیستم‌های خنک‌کننده هوایی با ویژگی‌های هندسی و عملکردی خاص ارائه نکرده‌اند. از این رو، میزان تأثیر کوپلینگ مدهای انتقالی و پیچشی بر ضرایب عملکرد لرزه‌ای این نوع سازه‌ها همچنان به‌طور کامل روشن نبوده و نیازمند بررسی و ارزیابی بیشتر است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده عمدتاً بر ارزیابی کلی رفتار لرزه‌ای، پاسخ غیرخطی و الگوی گسترش آسیب در نمونه‌های آزمایشگاهی یا مدل‌های عددی سازه‌های نگهدارنده ACC متمرکز بوده‌اند. با وجود ارزش علمی این پژوهش‌ها، تعیین کمی ضرایب عملکرد لرزه‌ای اختصاصی (شامل ضریب رفتار R ، ضریب شکل‌پذیری μ و ضریب اضافه‌مقاومت Ω^2) متناسب با ویژگی‌های هندسی، عملکردی و رفتاری این سازه‌ها، ارزیابی میزان انطباق ضرایب تجویزی آیین‌نامه‌ها با رفتار واقعی آن‌ها، و نیز شناسایی جامع مکانیزم‌های خرابی و نواحی بحرانی تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه‌های مرکب بتنی- فولادی متداول در نیروگاه‌های کشور، تاکنون مغفول باقی مانده است. علاوه بر این، سازه‌های مورد استفاده در پروژه‌های نیروگاهی ایران از نظر نوع مقاطع، ابعاد اعضای اصلی و جزئیات اجرایی، تفاوت‌های قابل توجهی با نمونه‌های گزارش شده در مطالعات بین‌المللی دارند که ضرورت انجام یک مطالعه مستقل بر روی این سازه‌ها را دوچندان می‌کند.

بر این اساس، در پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی، ابتدا با بهره‌گیری از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی انجام شده بر روی یازده سازه نمونه نیروگاهی کشور، اقدام به استخراج ضرایب عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مرکب بتنی- فولادی نگهدارنده سیستم‌های ACC متناسب با رفتار واقعی آن‌ها نموده و درجه انطباق این ضرایب با ضوابط آیین‌نامه‌ای، بررسی می‌گردد. سپس مکانیزم‌های خرابی و تعیین نواحی بحرانی تشکیل مفاصل پلاستیک شناسایی می‌شود. صحت مکانیزم‌های خرابی شناسایی شده مبتنی بر نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده بر روی یکی از سازه‌های نمونه مورد مطالعه و تحت رکورد زلزله رودبار (منجیل)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای بازنگری ضرایب عملکرد لرزه‌ای و بهبود ضوابط طراحی این دسته از سازه‌های نیروگاهی و در نهایت دستیابی به طرح‌هایی ایمن‌تر، اقتصادی‌تر و منطبق با شرایط اجرایی کشور را فراهم آورد.

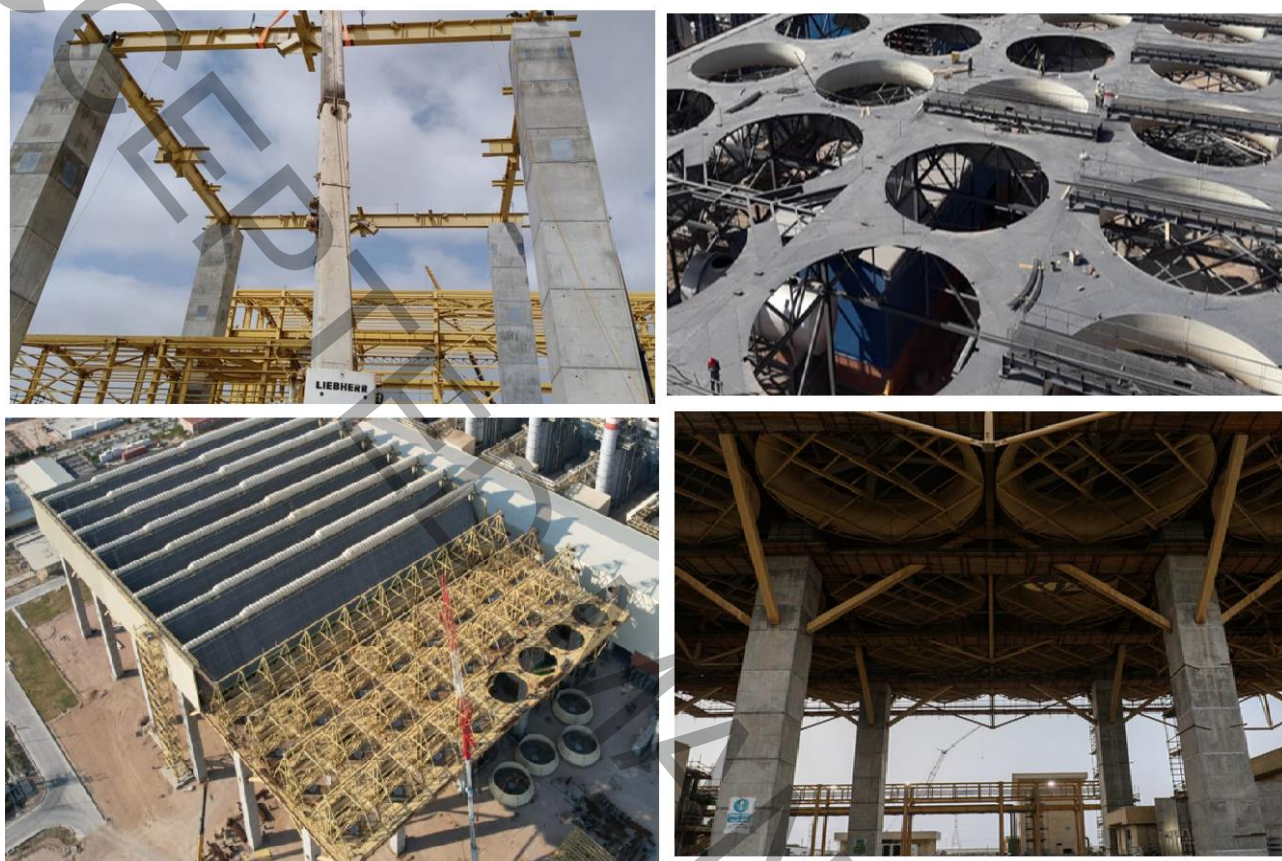
۲- مشخصات سازه‌های خنک‌کننده مورد مطالعه

از میان سیستم‌های سازه‌ای مختلفی که تاکنون برای پشتیبانی سامانه‌های خنک‌کننده هوایی نیروگاهی به کار گرفته شده است، تمرکز این تحقیق بر روی تحلیل غیرخطی سازه‌های مرکب بتنی- فولادی است که در نیروگاه‌های حرارتی متوسط و بزرگ رایج هستند. مقطع ستون‌های بتنی استفاده شده در این سازه‌ها به دو صورت دایره شکل یا مربع شکل توخالی اجرا می‌شود. همان‌طور که در شکل

¹ Response Modification (Behavior) Factor

² Overstrength Factor

۲ نشان داده شده است، در سازه‌های نیروگاهی کشور ایران استفاده از ستون‌های بتنی با مقطع مربع شکل رواج دارد. پس از اجرای ستون‌های بتنی و شاه‌تیرهای فولادی، تیرهای فولادی میانی به شاه‌تیرها متصل شده و سپس صفحات (ورق‌های) فولادی بر روی قاب موجود قرار گرفته که فن‌ها بر روی فضاهای تعبیه شده در این ورق‌ها قرار می‌گیرند. قاب‌های A شکل و دیواره‌های بادگیر^۱ از دیگر اجزای الحاقی به این سازه‌ها هستند. برای حفظ یکپارچگی و عملکرد هماهنگ اجزای سازه در طول زلزله، اعضای مهاربندی (استرات) فولادی، شاه‌تیرها را به ستون‌های بتنی متصل می‌کنند (شکل ۲).



شکل ۲. مراحل ساخت و قسمت‌های اصلی سازه‌های مرکب بتنی-فولادی نگهدارنده ACC

Fig. 2. Construction stages and main components of RC-steel composite ACC support structures

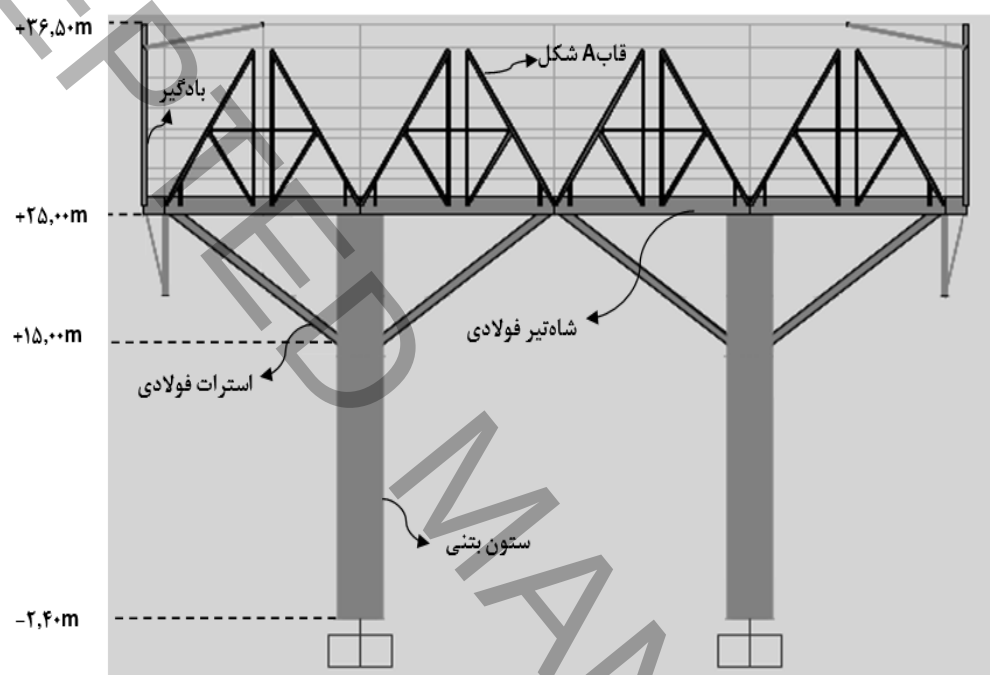
سازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش براساس سازه‌های مرکب بتنی-فولادی پشتیبان سیستم‌های ACC مورد استفاده در پروژه‌های نیروگاهی کشور ایران انتخاب شدند. در شکل ۳ نمای شماتیک و جزئیات اجزای مختلف این سازه نشان داده شده است. بررسی جامع پروژه‌های اجرایی نشان می‌دهد که اجزای سیستم باربر، هندسه کلی سازه (شامل ارتفاع کل و ترازهای مختلف اجزا)، نوع و آرایش اعضای اصلی، شکل مقاطع و مشخصات مکانیکی مصالح در اغلب طرح‌ها یکسان بوده و تنها ابعاد برخی مقاطع متناسب با الزامات هر پروژه تغییرات محدودی دارد. با این حال، تفاوت‌های اصلی در پیکربندی هندسی این سازه‌ها عمدتاً شامل طول دهانه‌ها، تعداد دهانه‌ها در دو امتداد اصلی پلان و وجود یا عدم وجود کنسول در پیرامون سازه است.

مطابق جزئیات ارائه شده در شکل ۳، مقطع ستون بتنی این سازه‌ها از نوع مربع شکل توخالی به طول ضلع $2/6$ تا ۳ متر و ضخامت جداره ۳۰ تا ۳۵ سانتیمتر که در هر جداره آن دو ردیف آرماتور فولادی تعبیه شده است. مقطع طراحی شده برای شاه‌تیرهای فولادی از نوع تیر ورق I شکل به ارتفاع در حدود $1/25$ متر است. استرات‌های فولادی از مقاطع مربع شکل توخالی فولادی به طول ضلع ۵۵ سانتیمتر و ضخامت جداره ۲۵ تا ۳۰ میلیمتر و اعضای قاب A شکل از نوع تیر ورق I شکل هستند. مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی

¹ Wind Wall

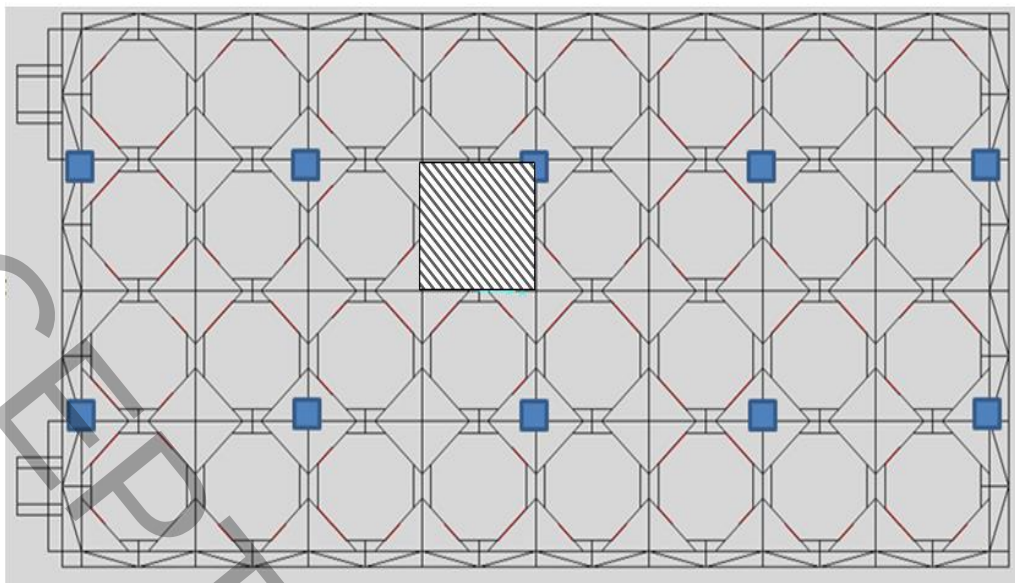
شامل بتن با مقاومت فشاری ۲۸ مگاپاسکال، آرماتور فولاد با تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال و فولاد مصرفی استفاده شده در ساخت مقاطع فولادی از نوع فولاد نرمه با تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال است.

آنچه سازه‌های نگهدارنده ACC اجرا شده در پروژه‌های مختلف نیروگاهی ایران را از نظر هندسی متمایز می‌کند، جزئیات پلان طبقه این سازه‌ها شامل طول و تعداد دهانه‌های طراحی شده در هر یک از دو امتداد عمود بر هم پلان است. به دلیل ملاحظات فنی، اجرایی و الزامات بهره‌برداری تجهیزات خنک‌کننده، طول دهانه‌های مورد استفاده در این سازه‌ها عمدتاً در بازه ۱۱/۴۵ تا ۱۳/۳۵ قرار داشته و استفاده از دهانه‌هایی خارج از این محدوده در پروژه‌های نیروگاهی کشور متداول نیست. تعداد دهانه‌ها در هر امتداد نیز بین ۴ تا ۸ دهانه متغیر است. در شکل ۴ تصویر شماتیک پلان طبقه سازه اجرا شده در پروژه نیروگاه حرارتی بهبهان ارائه شده است. ناحیه هاشور زده شده در این شکل، یکی از نواحی است که فن‌های سیستم خنک‌کننده در آن قرار می‌گیرند. این نواحی را اصطلاحاً پانل نامیده و طول هر پانل در هر یک از امتدادهای عمود بر هم پلان، معادل نصف طول دهانه سازه در آن امتداد است.



شکل ۳: نمای شماتیک و اجزای مختلف یکی از قاب‌های سازه‌های مرکب نگهدارنده ACC رایج در نیروگاه‌های ایران

Fig. 3. Schematic view and major components of a typical frame of RC-steel composite ACC support structures commonly used in Iranian power plants



شکل ۴: نمای شماتیک پلان طبقه و ستون گذاری نظیر سازه نگهدارنده ACC در نیروگاه حرارتی بهبهان (سازه شماره ۱)

Fig. 4. Schematic plan view and column layout of the ACC support structure at the Behbahan thermal power plant (Structure No. 1)

جهت ارزیابی هدفمند رفتار لرزه‌ای این سیستم سازه‌ای، در مجموع یازده مدل سازه‌ای انتخاب و تحلیل شدند. فرایند انتخاب این مدل‌ها بدین صورت بود که ابتدا شش مدل متناظر با سازه‌های واقعی احداث شده در نیروگاه‌های کشور انتخاب گردید. سپس، به منظور تکمیل دامنه مطالعه و پوشش هرچه بیشتر آرایش‌های متداول هندسی، پنج مدل تکمیلی با ترکیب‌های متفاوت از تعداد و طول دهانه‌ها و شرایط متغیر کنسول در امتدادهای مختلف پلان به مجموعه افزوده شد. جزئیات هندسی پلان طبقه این یازده مدل در جدول پیوست ۱ ارائه شده است.

مجموعه یازده مدل انتخابی به گونه‌ای پیکربندی شده‌اند که متداول‌ترین و پرکاربردترین آرایش‌های اجرایی در پروژه‌های نیروگاهی کشور را پوشش دهند. انتخاب این مدل‌ها بر اساس رویکرد توصیه شده در دستورالعمل FEMA-P695 [۱۶] انجام شده است؛ این دستورالعمل بر ارزیابی رفتار لرزه‌ای بر مبنای مجموعه‌ای متنوع از مدل‌های سازه‌ای (که بازتاب‌دهنده پیکربندی‌های اصلی سیستم در دامنه کاربردی آن باشند) تأکید دارد تا نتایج حاصل، از پایداری و قابلیت تعمیر مناسبی به پروژه‌های مشابه برخوردار باشند.

۳- روش تحلیل و مدل سازی عددی سازه‌ها

۳-۱- مدل سازی اولیه سازه‌ها در SAP2000

مدل سازی اولیه سازه‌های ACC در محیط SAP2000 با هدف ایجاد یک چارچوب پایه برای تحلیل‌های خطی و تهیه اطلاعات لازم جهت توسعه مدل‌های غیرخطی انجام شد. این مرحله بر مبنای هندسه واقعی ۱۱ سازه منتخب، مشخصات اجرایی پروژه‌های نیروگاهی و مفروضات طراحی منطبق بر آیین‌نامه‌های ملی و بین‌المللی صورت گرفت. در تمامی مدل‌ها، تلاش شد تا ماهیت سه‌بعدی سیستم و نقش متقابل ستون‌ها، تیرها، مهاربندها و پانل‌ها با دقت لحاظ شود.

۳-۱-۱- فرضیات مدل سازی، بارگذاری و طراحی

مدل سازی عددی سازه‌های ACC با در نظر گرفتن شرایط واقعی بهره‌برداری نیروگاه، ویژگی‌های هندسی اعضا و ترکیبات بار آیین‌نامه‌ای انجام شد. در تمامی مدل‌ها، اثرات $P-\Delta$ به طور کامل فعال گردید تا اثرات تغییر مکان‌های بزرگ در سختی مؤثر سازه لحاظ

شود. اعضای تیر و ستون با المان‌های Frame و مهاربندها بسته به نقش محوری-برشی، با المان‌های Frame یا Truss در نرم‌افزار SAP2000 مدل شدند.

بارگذاری‌ها شامل بارهای ثقلی، بهره‌برداری و لرزه‌ای مطابق با ماهیت اجزای سازه‌ای و تجهیزات عملکردی این سازه‌ها تعیین شدند. بار مرده شامل وزن اعضای فولادی و ستون‌های بتن‌آرمه بوده و این مقادیر بر اساس مقاطع مدل‌شده در نرم‌افزار به‌صورت خودکار محاسبه شده است. افزون بر آن، بار ناشی از کلاف ACC، داکت‌های فوقانی و تجهیزات وابسته (نظیر لوله‌های میعان، عایق‌ها و اتصالات) مطابق مقادیر ارائه‌شده توسط تیم تأسیسات در قالب بارهای گسترده یا نقطه‌ای بر روی اعضای A-Frame و پرلین‌های مرتبط اعمال شده است. بار مرده پل فن نیز شامل وزن موتور، گیربکس، پره‌ها، کابل‌ها و سازه نگهدارنده بوده و به‌صورت بارهای متمرکز در محل اتصالات اصلی پل فن اختصاص یافته است. همچنین، بارهای مرده ناشی از تجهیزات و متعلقات نصب‌شده بر روی سکوه‌های فن، که شامل تجهیزات جانبی، تأسیسات و اجزای بهره‌برداری هستند، مطابق رویه متداول طراحی این سازه‌ها به‌صورت یک بار گسترده معادل 1 kN/m^2 بر روی سکوه‌های فن اعمال گردید. بار ناشی از دیوارپوش‌های بادگیر و بارهای مرده مرتبط با سکوه‌های فن، به‌صورت بار گسترده بر اساس چیدمان ورق‌ها و جهت انتقال بار در مدل منظور شده است.

بارهای زنده مطابق الزامات بهره‌برداری برای سکوه‌های فن و پل فن در قالب بار گسترده سطحی اعمال گردید. بار زنده سکوه‌های فن برابر با 5 kN/m^2 در نظر گرفته شد که معرف بار ناشی از حضور نفرات، تجهیزات تعمیراتی و عملیات بهره‌برداری است. در پل فن، اثرات دینامیکی ناشی از عملکرد سیستم انتقال هوا و افزایش سرعت فن نیز از طریق اعمال بار متمرکز اضافی در محل اتصالات اصلی لحاظ شد. بارهای برف و یخ با توجه به اینکه در شرایط بهره‌برداری معمول تجمع نمی‌یابند، تنها برای وضعیت تعمیر و نگهداری و بر اساس ضوابط فصل ۱۶ استاندارد UBC 97 [۱۷] به سکوه‌های مربوطه اختصاص داده شدند. مقدار بار برف، متناسب با موقعیت جغرافیایی نیروگاه‌های مورد مطالعه، در بازه $0.84/1.26 \text{ kN/m}^2$ بر روی سطوح مستعد تجمع برف نظیر سکوها و مسیرهای دسترسی اعمال شد. بارهای باد، زلزله به عنوان بارگذاری جانبی، همچنین اثرات حرارتی و بارهای مکانیکی ناشی از عملکرد تجهیزات ارتعاشی به عنوان بارهای عملکردی مؤثر بر این سازه‌ها، در فرایند تحلیل و طراحی آنها لحاظ گردید. اثر زلزله بر اساس تیپ خاک II و سطح خطر زیاد تا خیلی زیاد، مطابق طیف طرح نظیر شرایط لرزه‌خیزی محدوده نیروگاه و پارامترهای استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۸] اعمال شد. مقادیر ضریب رفتار ۵، ضریب اضافه مقاومت ۳ و ضریب نامعینی یک برای طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. انواع و ضرایب بارهای ترکیبات بارگذاری و روند طراحی این سازه‌ها مطابق آیین‌نامه‌های AISC 341-16 [۱۹]، AISC 360-16 [۲۰]، ACI 318 [۲۱] و استاندارد ۲۸۰۰ ایران انجام شد. شایان ذکر است که فرضیات ذکرشده با استناد به فراوانی به‌کارگیری آن‌ها در دفترچه‌های محاسباتی این سازه‌ها توسط شرکت بهره‌بردار پروژه اتخاذ شده‌اند. در جدول پیوست ۲، مقادیر زمان تناوب سه مود اول هر یک از سازه‌های مورد مطالعه، همراه با نوع مود غالب و وزن کل سازه‌ها ارائه شده است. مطابق تعریف محورها، راستاهای X و Y نشان‌دهنده محورهای افقی در صفحه پلان هستند و راستای Z محور عمود بر پلان سازه را بیان می‌کند. بررسی داده‌های جدول نشان می‌دهد که در این سازه‌ها حضور مود پیچشی در بین مودهای پایین‌مرتبه قابل توجه است و می‌تواند بر روی رفتار لرزه‌ای سازه اثرگذار باشد.

۲-۳- توسعه مدل‌ها برای تحلیل غیرخطی

در گام دوم، مدل‌های اولیه طراحی شده در SAP2000 به منظور انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی توسعه یافتند. در این مرحله، رفتار غیرخطی اعضا از طریق تعریف مفاصل پلاستیک و اعمال خواص غیرخطی مصالح در مدل‌ها لحاظ گردید. موضوعی که در سازه‌های نگهدارنده سامانه‌های ACC، به دلیل ضرورت حفظ پایداری سازه و تداوم عملکرد تجهیزات نیروگاهی در هنگام زلزله، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزون بر این، نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیشین بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های ACC، نشان داده است که عمده‌ی رفتار غیرخطی در ستون‌های بتن‌آرمه این سازه‌ها رخ می‌دهد، در حالی که تیرها و مهاربندهای فولادی آن‌ها، معمولاً در محدوده‌ی ارتجاعی خطی باقی خواهند ماند.

برای استخراج دقیق منحنی رفتاری ستون‌های بتن مسلح توخالی مربع شکل سازه‌های ACC مورد بررسی، متناسب با جزئیات هندسی، آرایش آرماتورهای طولی و عرضی و ویژگی‌های مکانیکی بتن و فولاد بدست آمده از نتایج طراحی و داده‌های اجرایی هر سازه،

مدل عددی جداگانه‌ای از هر ستون در محیط برنامه OpenSees ساخته شد. هریک از مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای استاندارد قرار گرفتند و پاسخ بار-تغییر مکان آن‌ها به صورت نمودارهای هیستریزیس نیرو-جابجایی ($P-\Delta$) و یا لنگر-دوران ($M-\theta$) استخراج گردید.

۱-۲-۳- صحت سنجی مدل‌سازی عددی

برای اطمینان از اعتبار نتایج تحلیل عددی ستون‌های بتنی با مقطع مربع شکل توخالی، ابتدا فرایند مدل‌سازی و مفروضات تحلیل در نرم‌افزار OpenSees مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت. این صحت‌سنجی از طریق مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های حاصل از یک مطالعه آزمایشگاهی مشابه، که توسط ژانگ و همکاران [۲۲] صورت پذیرفت.

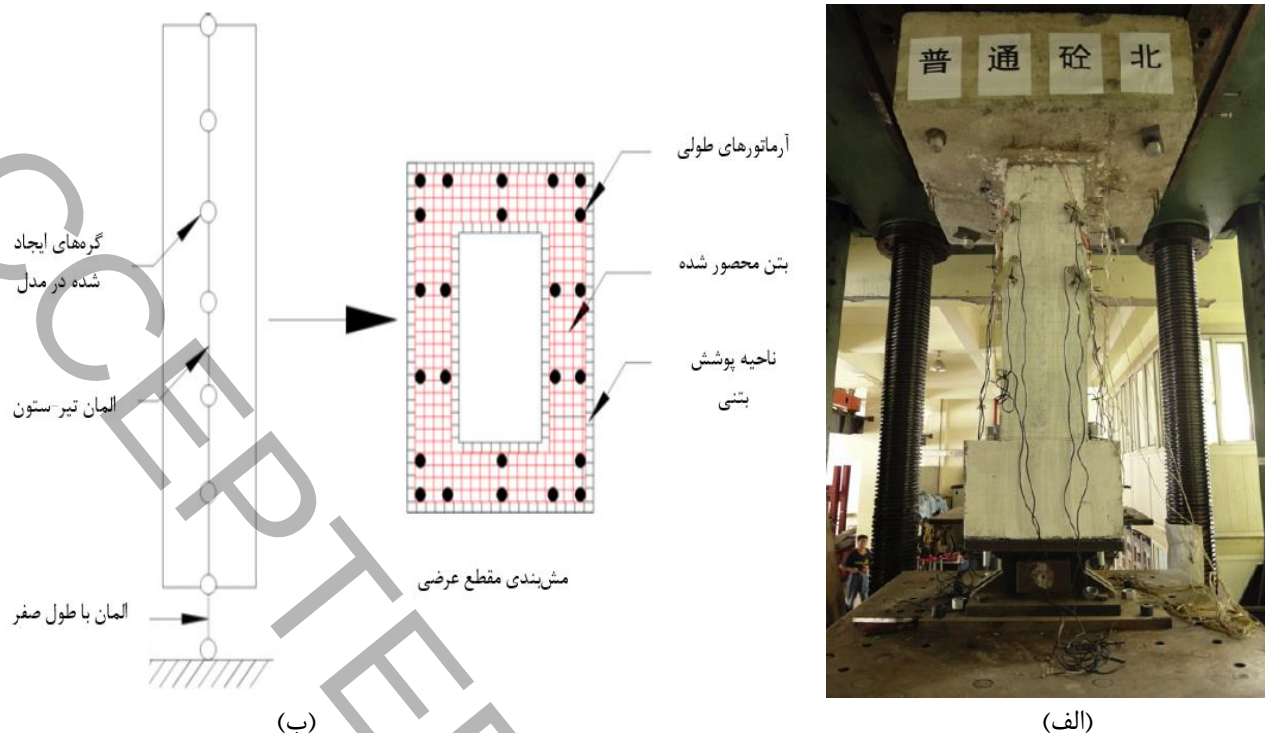
همان‌طور که در شکل ۵- (الف) نشان داده شده است، نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی یک ستونی بتنی با مقطع مستطیلی توخالی (360×500 میلی‌متر، ضخامت جداره ۱۰۰ میلی‌متر) است که تحت بار محوری ثابت ۵۱۰ کیلونیوتن (معادل ۱۰٪ ظرفیت اسمی ستون) و بارگذاری جانبی به صورت شبه استاتیکی و تحت حالت کنترل تغییر مکان شامل جابجایی‌های جانبی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۰۵ میلی‌متر قرار گرفته و برای هر میزان جابجایی سه چرخه لحاظ گردید. آرماتورهای طولی نمونه شامل دو لایه میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر بوده و ارتفاع کلی نمونه با بلوک‌های فونداسیون و بارگیر معادل ۲۰۸۰ میلی‌متر است. مقاومت فشاری بتن $38/7$ مگاپاسکال، تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد به ترتیب ۳۳۵ و ۵۰۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین مقادیر کرنش فولاد در آغاز مرحله کرنش سختی و در قله نمودار تنش-کرنش به ترتیب، ۰/۱۶ و ۰/۰۸ تعیین شد.

مدل عددی ستون، مطابق با مشخصات نمونه آزمایشگاهی در OpenSees به صورت یک المان دوبعدی با شرایط مرزی گیردار در یک انتها و آزاد در انتهای دیگر مدل‌سازی شد. مقطع توخالی با استفاده از المان‌های فایبر^۱ ایجاد گردید تا توزیع دقیق تنش و کرنش در مقطع لحاظ شود. رفتار غیرخطی بتن با مدل Concrete07، که قادر به شبیه‌سازی مراحل باربرداری، بارگذاری مجدد و رفتار پس از گسیختگی عضو بتنی است، شبیه‌سازی شد. از مدل Reinforcing Steel Material برای مدل‌سازی رفتار فولاد تقویتی استفاده شده است. این مدل امکان شبیه‌سازی اثرات نرم‌شدگی کرنش، کماتش فشاری و شکست کششی احتمالی رخ داده در آرماتورهای فولادی را فراهم کرده و می‌تواند پاسخ‌های واقع‌بینانه‌تری برای نمونه‌های فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای ارائه نماید [۲۳-۲۵].

مدل فولاد نظیر رفتار آرماتورها، با استفاده از مقادیر تنش، کرنش اخذ شده از مطالعه آزمایشگاهی همچنین بر اساس استانداردهای معتبر بین‌المللی، تعیین و برای نرم‌افزار تعریف گردید [۲۳-۲۵]. به‌منظور در نظر گرفتن اندرکنش بین ستون و فونداسیون، یک المان مقطع با طول صفر در محل تلاقی این دو جزء در نظر گرفته شد؛ این المان که در شکل ۵- (ب) نمایش داده شده است، تغییر شکل‌های مقطع را با تغییر شکل‌های واحد خود برابر فرض می‌کند.

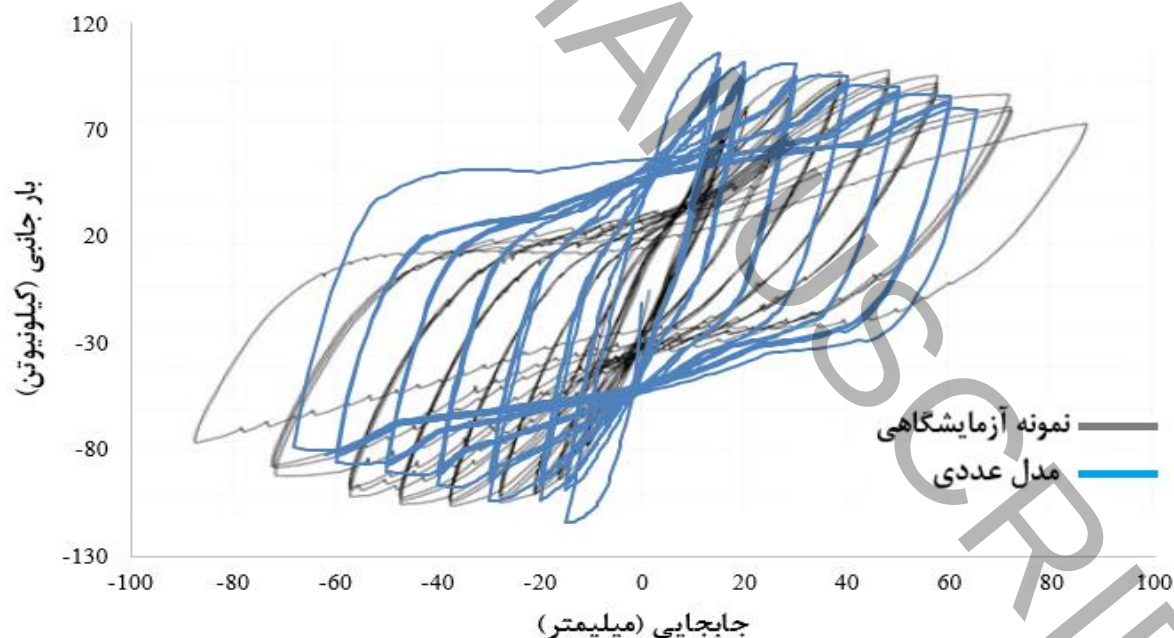
مقایسه نمودار هیستریزیس حاصل از تحلیل مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی (شکل ۶) انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد. حداکثر مقاومت برشی پایه در نمونه آزمایشگاهی ۱۰۴٫۹ و ۱۰۸- کیلونیوتن و در مدل عددی ۱۰۶٫۶ و ۱۱۴٫۶- کیلونیوتن به دست آمد که نشان‌دهنده اختلاف ناچیز ۱٫۶٪ و ۶٫۱٪ است. علاوه بر این، مقایسه نمودارهای هیستریزیس تأیید می‌کند که مدل عددی قادر به شبیه‌سازی مؤثر پدیده میرایی، افت مقاومت و ظرفیت باربری در طول بارگذاری چرخه‌ای، همانند نمونه آزمایشگاهی، بوده است؛ این امر در روند نزولی حلقه‌های هیستریزیس مشهود است.

¹ Fiber elements



شکل ۵: (الف) نحوه استقرار نمونه آزمایشگاهی مطالعه شده توسط ژانگ و همکاران [۲۲]، (ب) شماتیک فرضیات لحاظ شده برای مدل سازی عددی ستون بتنی با مقطع توخالی شامل دو لایه آرماتور واقع در جداره مقطع در محیط نرم افزار OpenSees

Fig. 5. (a) Test setup of the experimental specimen investigated by Zhang et al. [22]; (b) schematic representation of the assumptions adopted for numerical modeling of the hollow RC column with two layers of reinforcement distributed within the section walls in OpenSees



شکل ۶: مقایسه منحنی های هیستریزیس نیرو-جابجایی بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی توسط ژانگ و همکاران [۲۲] و مدل عددی ساخته شده در محیط نرم افزار OpenSees

Fig. 6. Comparison of the force-displacement hysteresis curves obtained from the experimental study by Zhang et al. [22] and the OpenSees numerical model

۳-۲-۲- مدل سازی و تحلیل غیرخطی ستون های بتنی سازه های ACC

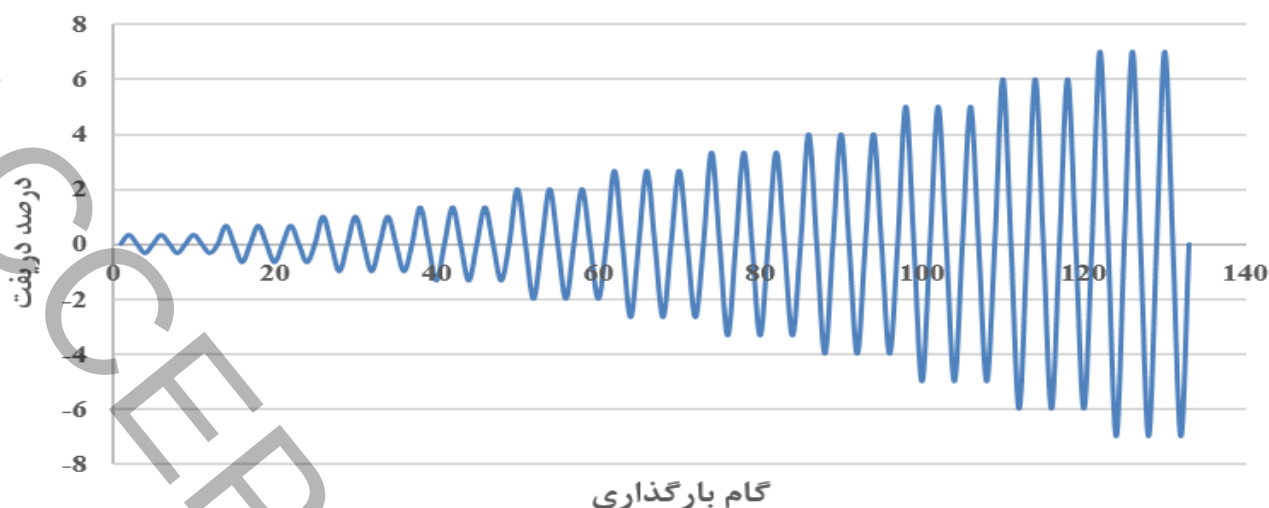
پس از مرحله صحت سنجی و با استفاده از فرضیات لحاظ شده در طول این مرحله، مدل عددی نظیر تیپ ستون های مختلف موجود در یازده سازه های نگهدارنده ACC مورد مطالعه در این پژوهش، در محیط نرم افزار OpenSees ایجاد گردید. در مجموع شش مقطع بتن مسلح مختلف برای ستون های این سازه ها لحاظ شده که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

براساس اطلاعات جدول ۱، مدل های عددی نظیر مقاطع های مختلف شناسایی شده برای ستون های بتنی استفاده شده در سازه های نگهدارنده ACC مورد بررسی، ایجاد شد. در ادامه هر یک از مدل ها تحت شرایط مرزی شامل پای گیردار و بارگذاری های ثقلی (محوری) و جانبی وارده به سر آزاد ستون (در تراز ارتفاعی ۲۵+ متر) تحلیل شدند. نحوه اعمال بار جانبی به صورت کنترل تغییر مکان در سر آزاد هر مدل، به گونه ای تعریف شد که میزان دوران ایجاد شده در ستون با پروتکل بارگذاری مورد استفاده در مرحله صحت سنجی مدل عددی مطابقت داشته باشد. بر این اساس، همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، بارگذاری چرخه ای با اعمال تغییر مکان های متناظر با نسبت دریافت های ۰/۳۳، ۰/۶۷، ۱، ۱/۳۳، ۲، ۲/۶۷، ۳/۳۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ درصد در سر آزاد ستون انجام شد و هر سطح دریافت در سه سیکل کامل بارگذاری تکرار گردید. در نهایت ابتدا نمودار هیستریزیس نیرو (برش پای ستون) - جابجایی جانبی (تغییر مکان سر آزاد ستون) برای هر مدل بدست آمده و با استفاده از این نمودارها و براساس ابعاد هندسی مدل ها، نمودار لنگر - انحنای نظیر هر مدل تعیین می شود.

جدول ۱: مشخصات مقاطع مختلف ستون های بتنی شناسایی شده در سازه های نگهدارنده ACC مورد بررسی

Table 1. Characteristics of the different RC column sections identified in the investigated ACC support structures

شماره مقطع	۱	۲	۳	۴	۵	۶
طول مقطع (متر)	۲/۶	۳	۲/۶	۳	۲/۶	۳
عرض مقطع (متر)	۲/۶	۳	۲/۶	۳	۲/۶	۳
ضخامت مقطع (متر)	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳	۰/۳۵
تعداد میلگردهای طولی در یک بال مقطع	۱۲	۱۰	۱۴	۱۴	۱۲	۱۴
تعداد لایه های میلگرد در یک بال مقطع	۲	۲	۲	۲	۲	۲
تعداد میلگردهای طولی در یک جان مقطع	۷	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد لایه های میلگرد در یک جان مقطع	۲	۲	۲	۲	۲	۲
قطر میلگرد طولی (میلی متر)	۲۲	۲۵	۲۵	۲۸	۲۵	۲۵
تعداد میلگردهای گوشه	-	۴	-	-	-	-
قطر میلگرد گوشه (میلی متر)	-	۲۸	-	-	-	-
شماره مدل سازه ای که مقطع ستون در آن استفاده شده است	۲	۴	۵	۶	۱۱ و ۱۰ و ۹ و ۱	۳ و ۷ و ۸



شکل ۷: پروتکل بارگذاری چرخه‌ای جانبی اعمال به سر آزاد ستون‌های بتنی تحلیل شده در محیط نرم‌افزار OpenSees

Fig. 7. Lateral cyclic loading protocol applied at the free ends of the RC columns analyzed in OpenSees

۳-۲-۳- تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک ستون‌های بتنی سازه‌های ACC

در تحلیل‌های غیرخطی سازه‌ها، اعضا در نواحی با بیشترین تقاضای لرزه‌ای وارد محدوده غیرارتجاعی خود می‌شوند. این رفتار با استفاده از منحنی‌های هیستریزیس به دست آمده از تحلیل اعضا، قابل پیش‌بینی و شبیه‌سازی است. از آنجایی که در نرم‌افزار SAP2000 امکان تعریف مستقیم منحنی‌های کامل هیستریزیس اعضا را وجود ندارد، رفتار غیرخطی اعضا در این نرم‌افزار از طریق تعریف مشخصات مفاصل پلاستیک و اختصاص آن‌ها به نواحی بحرانی اعضا شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین، تعیین دقیق مشخصات این مفاصل تأثیر مستقیمی بر دقت نتایج تحلیل‌های غیرخطی سازه خواهد داشت.

در این پژوهش، به منظور تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک ستون‌های بتن‌آرمه توخالی، ابتدا رفتار غیرخطی هر مقطع به صورت مستقل در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شد و منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران متناظر با بارگذاری چرخه‌ای استخراج گردید. با اتصال نقاط بیشینه هر سیکل بارگذاری، پوش منحنی‌های هیستریزیس ترسیم گردید. در مرحله بعد لازم است نمودارهای پوش رسم شده به صورت نمودارهای چند خطی که مراحل سختی اولیه، نقطه تسلیم، افت و زوال مقاومت عضو را در بر می‌گیرند، ایده‌آل‌سازی شوند. از آنجایی که دستورالعمل ATC-72 [۲۶] در مقایسه با FEMA-440 [۲۷] جزئیات دقیق‌تر و کاربردی‌تری در این حوزه ارائه کرده است، در این مطالعه از رویکرد ATC-72 برای ایده‌آل‌سازی منحنی‌های هیستریزیس ستون‌های بتنی توخالی سازه‌های ACC مورد بررسی، استفاده شده است.

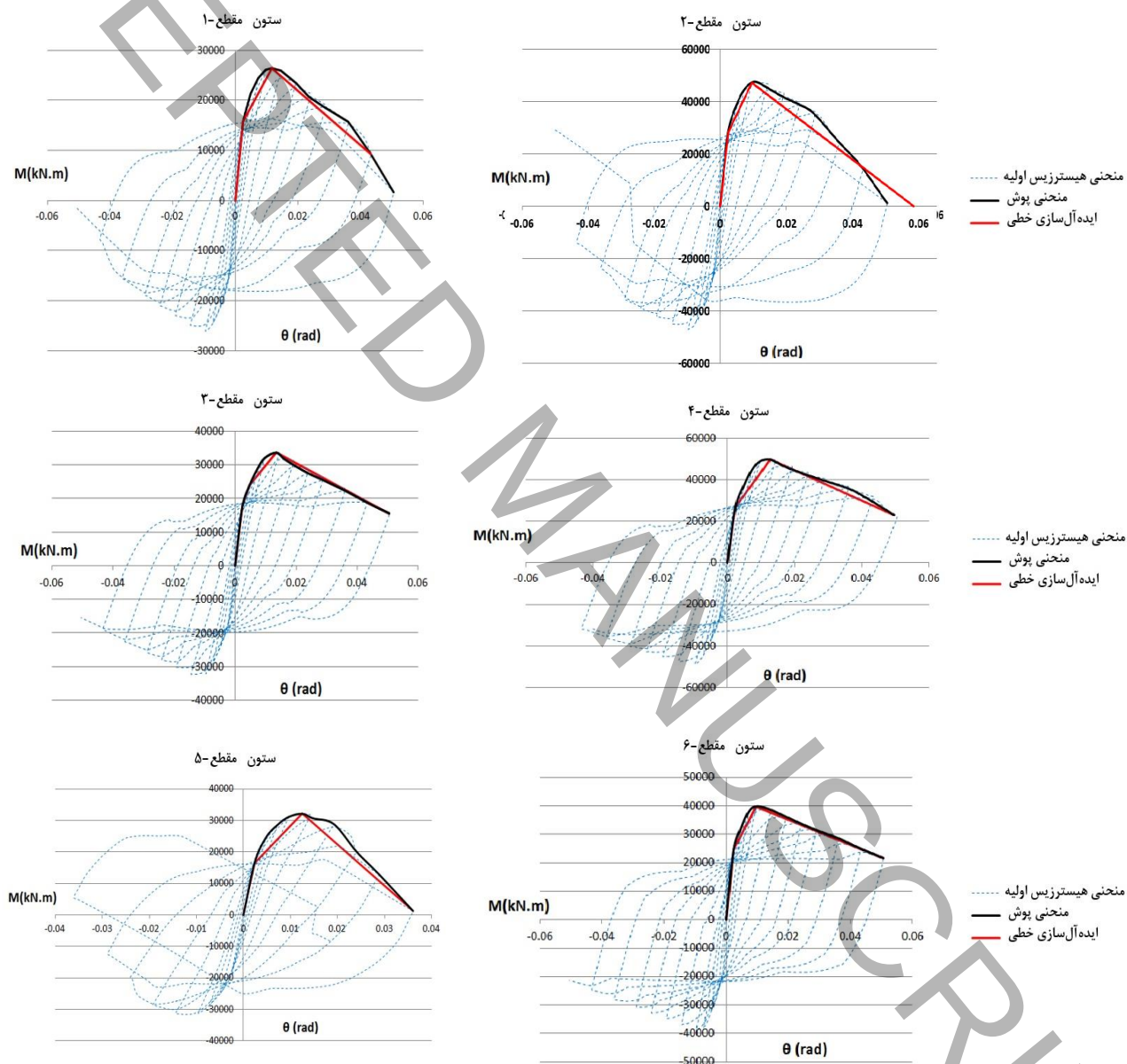
مطابق این روش، منحنی اولیه به سه ناحیه اصلی شامل رفتار الاستیک، سخت‌شدگی پس از تسلیم و نرم‌شدگی پس از رسیدن به مقاومت بیشینه تقسیم گردید. بدین منظور، ابتدا نقطه تسلیم بر اساس سختی اولیه و دوران متناظر با شروع تسلیم مقطع تعیین شد. سپس نقطه حداکثر مقاومت^۱ از روی منحنی پوش استخراج گردید. در ادامه نقطه نهایی ظرفیت با امتداد شیب ناحیه نرم‌شدگی مطابق ضوابط ATC-72 تعیین شد. همچنین، به منظور جلوگیری از ایجاد افت ناگهانی مقاومت و افزایش پایداری همگرایی در تحلیل‌های غیرخطی، شیب ناحیه نرم‌شدگی مطابق توصیه‌های این دستورالعمل اصلاح گردید.

در شکل ۸ منحنی‌های هیستریزیس لنگر-دوران بدست آمده برای شش مقطع مختلف شناسایی شده در ستون بتن مسلح سازه‌های ACC مورد مطالعه همراه با نمودارهای خطی ایده‌آل‌سازی شده هریک ارائه شده است. تعریف رفتار غیرخطی نظیر این ستون‌ها در نرم‌افزار SAP2000، با استفاده از ناحیه پلاستیک (بعد از تسلیم) نمودارهای ایده‌آل‌سازی شده انجام می‌شود. در شکل ۹ به صورت

^۱ Capping Point

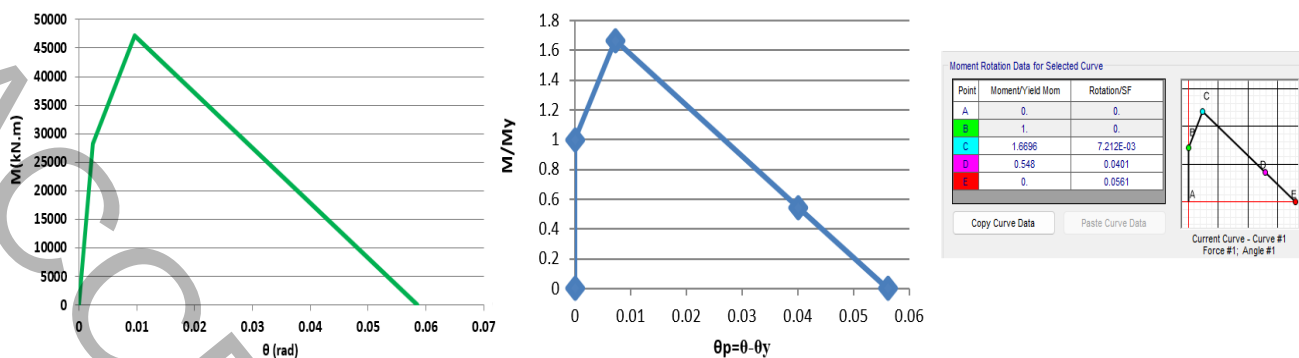
نمونه، استخراج پارامترهای لازم جهت تعریف مفاصل پلاستیک ستون بتن مسلح مقطع ۲- در نرم افزار SAP2000 نشان داده شده است.

با توجه به اینکه ستون‌های بتن‌آرمه سازه‌های نگهدارنده سیستم‌های ACC علاوه بر خمش، همواره تحت اثر بار محوری ناشی از وزن سازه و تجهیزات قرار دارند، رفتار غیرخطی این اعضا در نرم‌افزار SAP2000 با استفاده از مفاصل پلاستیک اندرکنشی غیرخطی محوری-خمزش دوسویه (P-M2-M3) مدل‌سازی شدند. استفاده از این نوع مفصل، اثر هم‌زمان بار محوری و خمش دو محوره را بر ظرفیت و رفتار غیرخطی ستون‌ها در نظر گرفته و در نتیجه، شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تری از عملکرد لرزه‌ای این اعضا نسبت به استفاده از مفاصل صرفاً خمشی فراهم می‌کند. در تمامی مدل‌ها، مفاصل پلاستیک به صورت مفاصل متمرکز در موقعیتی به فاصله ۱۰ درصد طول عضو نسبت به هر یک از گره‌های انتهایی عضو، مدل‌سازی شد.



شکل ۸: نمودارهای پوش و پوش ایده‌آل‌سازی شده نظیر منحنی‌های هیستریزیس بدست آمده از تحلیل ستون‌های بتنی استفاده شده در سازه-های نگهدارنده ACC مطالعه شده در این پژوهش

Fig. 8. Backbone and idealized curves corresponding to the hysteresis responses obtained from the analysis of the RC columns used in the investigated ACC support structures



شکل ۹: ایده‌آل‌سازی و تعیین منحنی $M-\theta$ متناسب با جزئیات مفاصل ستون‌های بتنی در محیط نرم افزار SAP2000 برای ستون مقطع ۲-

Fig. 9. Idealization and determination of the $M-\theta$ curve corresponding to the RC column hinge properties in SAP2000 for Column Section 2

۳-۳- تحلیل غیرخطی مدل‌های سازه‌ای

در این پژوهش، تمامی یازده مدل سازه‌ای توسعه‌یافته با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر این مدل متناظر با سازه شماره ۲ با استفاده از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، مبنای اصلی تعیین و استخراج پارامترهای کلیدی طراحی لرزه‌ای شامل ضریب رفتار (R)، ضریب شکل‌پذیری (μ) و ضریب اضافه‌مقاومت (Ω) برای مدل‌های مختلف سازه‌های ACC قرار گرفته‌اند. تحلیل پوش‌آور برای هر مدل در دو راستای عمود بر هم پلان و با لحاظ نمودن اثرات $P-\Delta$ انجام گرفت. با توجه به رفتار ویژه سازه‌های مورد مطالعه و این واقعیت که هر سازه عملاً در قالب یک مدل فقط با یک تراز عرشه در برابر زلزله ارتعاش می‌کند، بار جانبی پوش به صورت یک بار تغییرمکانی با الگوی یکنواخت به گره مرکز جرم تراز عرشه سازه‌ها تعریف گردید. مقدار تغییرمکان هدف هر مدل نیز برابر با جابجایی متناظر با حد ظرفیت باربری ستون‌های بتنی، پیش از رسیدن آن‌ها به مرحله خرابی، تعیین گردید.

علاوه بر تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی، صرفاً به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی کیفی رفتار غیرخطی سازه، همچنین مشاهده نحوه شکل‌گیری و توزیع مفاصل پلاستیک در اعضای مختلف سازه تحت تحریک لرزه‌ای واقعی، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیز انجام شد. در این تحلیل، شتاب‌نگاشت ثبت‌شده زلزله رودبار-منجیل با هدف بررسی اثر شدت تحریک، در سه سطح شتاب بیشینه زمین^۱ (PGA) برابر با $0.135g$ ، $0.5g$ و $2g$ مقیاس گردید و سازه نمونه تحت اثر رکورد مقیاس‌شده متناظر با هر یک از این سطوح به صورت جداگانه تحلیل شد تا طیفی از شدت‌های مختلف تحریک لرزه‌ای بررسی گردد. این سطوح PGA صرفاً به عنوان پارامترهای شدت تحریک برای بررسی روند تغییر پاسخ سازه از محدوده تقریباً الاستیک تا محدوده غیرخطی شدید در نظر گرفته شده‌اند و بیانگر سطوح خطر لرزه‌ای متناظر با دوره بازگشت مشخص نیستند. برای هر سطح شتاب، دو تحلیل دینامیکی جداگانه بر روی مدل سازه شماره ۲ انجام شد:

(الف) تحلیل تحت شتاب اعمالی در جهت X ،

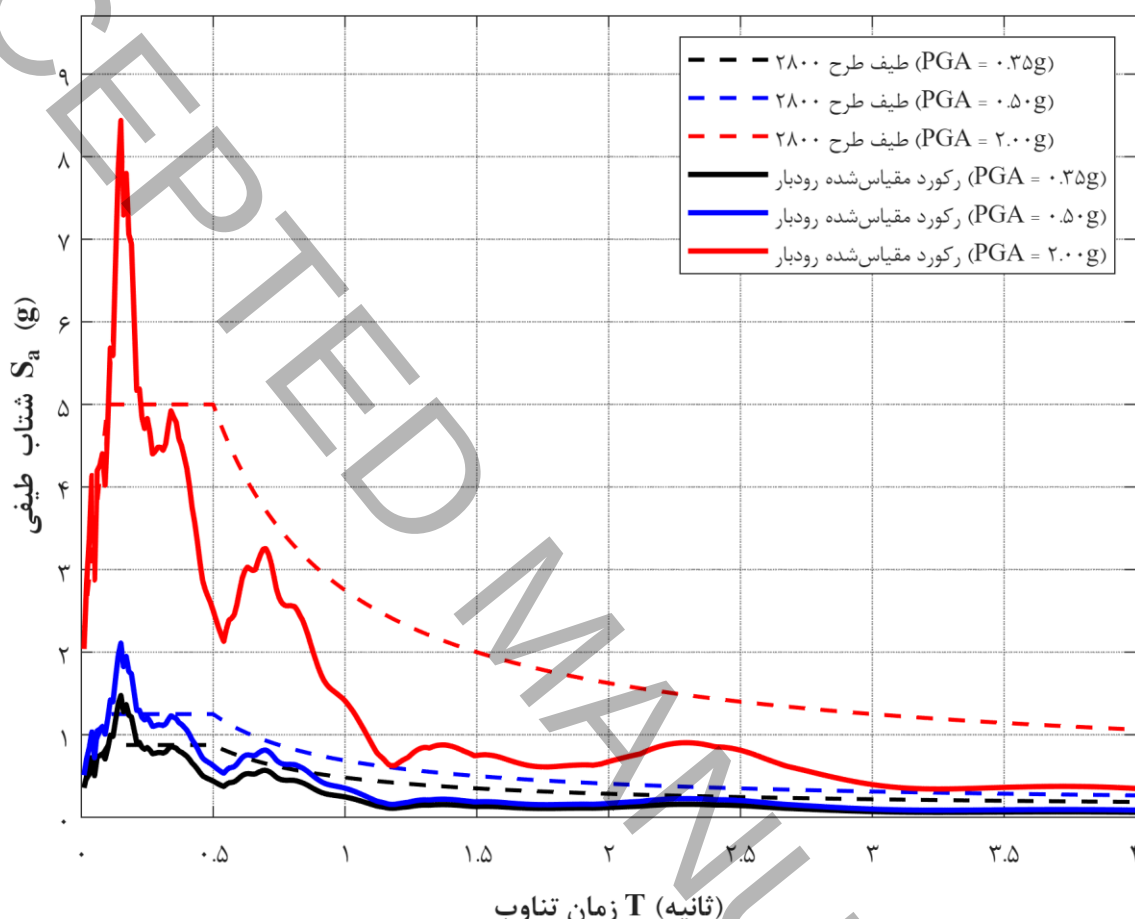
(ب) تحلیل تحت شتاب اعمالی به صوت همزمان در دو جهت X و Y .

در تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، میرایی سازه با استفاده از میرایی رایلی^۲ مدل‌سازی شد. براین اساس در نرم‌افزار SAP2000 گزینه Specify Damping by Period به کار گرفته شد و در این مرحله دوره‌های تناوب متناظر با دو مود مرجع سازه به همراه نسبت میرایی ۵ درصد برای هر دو مود تعریف گردید. نرم‌افزار با محاسبه خودکار ضرایب میرایی جرم‌متناسب و سختی‌متناسب، ماتریس میرایی را مطابق فرمول‌بندی رایلی تشکیل می‌دهد. در نتیجه، نسبت میرایی مودهای مرجع برابر ۵ درصد بوده و میرایی سایر مودها نیز بر اساس همین مدل تعیین شد.

¹ Peak Ground Acceleration

² Rayleigh Damping

به منظور حفظ رابطه واقعی میان دو مؤلفه افقی ثبت شده زلزله رودبار، شامل نسبت دامنه، محتوای انرژی و ویژگی‌های زمانی حرکت زمین، در تمامی تحلیل‌های دینامیکی که در آن‌ها دو مؤلفه افقی به طور هم‌زمان به سازه اعمال شد، هر دو مؤلفه در هر یک از سطوح شتاب مورد بررسی با یک ضریب مقیاس یکسان متناسب با همان سطح شتاب مقیاس شدند. از این رو، هیچ گونه مقیاس‌سازی مستقل برای مؤلفه‌های X و Y انجام نشد و نسبت واقعی میان دو مؤلفه در تمامی تحلیل‌ها بدون تغییر حفظ گردید. در شکل ۱۰ طیف پاسخ شتاب با نسبت میرایی ۵ درصد برای رکورد زلزله رودبار پس از مقیاس‌سازی، در کنار طیف طرح متناظر استاندارد ۲۸۰۰ متناسب با شرایط ساختگاه لحاظ شده در طراحی مدل‌های سازه‌ای و برای سطوح مختلف شدت زلزله ارائه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه‌ی طیف‌های پاسخ شتاب با میرایی ۵ درصد رکورد مقیاس شده زلزله رودبار در برابر طیف‌های طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) برای خاک نوع II و منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای خیلی زیاد در سه سطح شدت ۰/۳۵g، ۰/۵g و ۲g

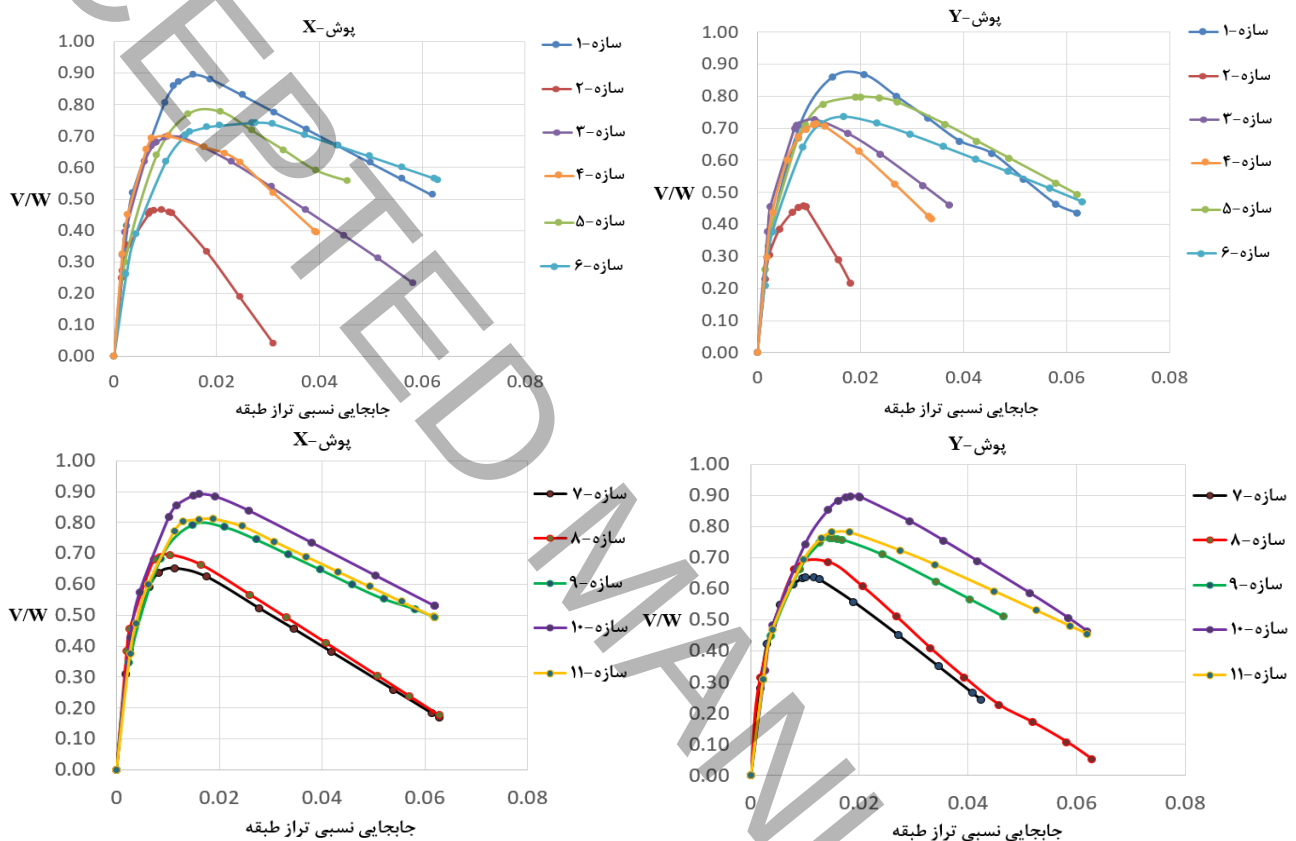
Fig. 10. Comparison of the 5%-damped acceleration response spectra of the scaled Roudbar earthquake record with the Iranian Standard 2800 design spectra (Fourth Edition) for Soil Type II and very high seismic hazard at PGA levels of 0.35g, 0.5g, and 2g

۴- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج تحلیل پوش‌آور یازده مدل سازه‌ای متناظر با سازه‌های نگهدارنده ACC ارائه می‌شود. این نتایج شامل منحنی‌های پوش حاصل از اعمال بار جانبی در دو جهت عمود بر هم، ضرایب عملکرد لرزه‌ای استخراج شده از این منحنی‌ها، و روند شکل گیری و توسعه مفاصل پلاستیک در طول بارگذاری است. در ادامه، نتایج به دست آمده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی مدل سازه شماره ۲ ارائه شده است که تمرکز آن بر نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در سطوح مختلف شدت شتاب‌نگاشت ورودی است.

۴-۱- استخراج ضرایب عملکرد لرزه‌ای

در شکل ۱۱، منحنی ظرفیت^۱ بدست آمده از تحلیل یازده مدل سازه مورد بررسی، به تفکیک و برای هر یک از دو امتداد عمود بر هم پلان، ارائه شده است. در این نمودارها، محور قائم بیانگر نسبت برش پایه به وزن هر سازه است و محور افقی جابجایی نسبی مرکز جرم پلان طبقه را در راستای بار پوش اعمال شده نمایش می‌دهد. منحنی‌های ظرفیت (نمودارهای پوش) بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیر خطی مدل‌های مختلف، مبنای تعیین پارامترهای لرزه‌ای سازه‌ها محسوب می‌شوند. برای استخراج ضرایب عملکرد لرزه‌ای لازم است این منحنی‌ها بر مبنای معیارهای مهندسی، چندخطی‌سازی شوند. به همین منظور، منحنی ظرفیت به صورت دوخطی یا سهخطی ایده آل‌سازی می‌گردد تا ترازهای کلیدی از جمله نقطه تسلیم و حداکثر ظرفیت سازه به طور مناسب بازنمایی شوند.



شکل ۱۱: نمودارهای پوش نرمال شده بدست آمده از تحلیل مدل‌های نظیر سازه‌های ACC مورد بررسی

Fig. 11. Normalized pushover curves obtained from the analysis of the investigated ACC structural models

در مدل سهخطی، بخش نخست نمایانگر رفتار عمدتاً خطی سازه تا پیش از وقوع تسلیم است. بخش دوم، رفتار سازه را پس از تسلیم تا رسیدن به حداکثر ظرفیت برشی^۲ توصیف می‌کند. بخش سوم، نیز مرحله افت مقاومت^۳ و رفتار سازه پس از عبور از حداکثر ظرفیت را نشان می‌دهد. در روش سهخطی‌سازی منحنی ظرفیت، خط نخست از مبدأ و با شیبی برابر با سختی جانبی موثر ترسیم می‌شود. سختی جانبی موثر بر اساس سختی سکانت^۴ محاسبه شده روی منحنی ظرفیت، در نقطه‌ای که برش پایه برابر با ۶۰٪ برش پایه جاری شدن موثر سازه است، تعیین می‌گردد. همچنین این خط نباید در هیچ نقطه‌ای از منحنی، از حداکثر برش پایه سازه ظرفیت تجاوز کند.

^۱ Pushover curve

^۲ Peak Capacity

^۳ Stiffness Degradation

^۴ Secant Stiffness

[۲۷ و ۲۸]. در کنار این مدل سه خطی، FEMA-P695 رویکردی عمدتاً دوخطی^۱ را نیز پیشنهاد می‌کند. در این روش، نقطه تسلیم مؤثر^۲ بر اساس مقدار حداکثر برش پایه و جابجایی مؤثر تسلیم، تعریف می‌شود. همچنین، ضریب اضافه مقاومت به صورت نسبت حداکثر برش پایه به برش طراحی تعیین می‌شود، و جابجایی نهایی سازه^۳ معادل جابجایی متناظر با کاهش ۲۰٪ ظرفیت برشی نسبت به مقدار حداکثر در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به ماهیت تقریبی و متکی بر قضاوت مهندسی در فرایند چند خطی سازی منحنی‌های ظرفیت، تا کنون رویکردها و روش‌های متفاوتی در دستور العمل‌ها و مطالعات مختلف ارائه شده است. در این مطالعه، برای ارزیابی و مقایسه پارمترهای طراحی حاصل از به کارگیری هر از این رویکردها، چهار روش مختلف پیاده سازی شده است که به طور خلاصه در زیر معرفی می‌شود [۲۷ و ۱۸ و ۱۶]:

- رویکرد اول (تساوی مساحت، شیب ثانویه صفر): در این رویکرد، خط دوم (مرحله پس از تسلیم) با شیبی معادل صفر درصد سختی مؤثر در نظر گرفته شد. منحنی سه خطی به گونه‌ای ترسیم گردید که مساحت زیر آن با مساحت منحنی ظرفیت اصلی برابر باشد. این روش، بر حفظ انرژی کلی جذب شده توسط سازه تأکید دارد.

- رویکرد دوم (بهینه‌سازی شیب خط اول، تساوی مساحت تا برش طراحی): ابتدا، نقطه پایانی خط دوم منحنی معادل، معادل نقطه‌ای با برش پایه ۸۰٪ حداکثر برش پایه سازه و جابجایی متناظر آن در نظر گرفته شد. خط دوم با شیبی معادل صفر درصد سختی مؤثر ترسیم گردید. سپس، با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، شیب خط اول به گونه‌ای تعیین گردید که مساحت زیر منحنی ظرفیت اصلی و نمودار سه خطی معادل، با یکدیگر برابر شوند. نکته کلیدی در این رویکرد آن است که خط اول نمودار سه خطی، منحنی ظرفیت سازه را در نقطه برش طراحی که از پیش برای هر مدل تعیین شده است، قطع می‌کند. این امر، دقت در تطابق رفتار اولیه سازه با مدل سه خطی را افزایش می‌دهد.

- رویکرد سوم (تساوی مساحت تا دو خط ابتدایی): در این روش، مشابه رویکرد اول، عمل شد، اما مبنای مقایسه مساحت‌ها، تنها مساحت زیر دو خط ابتدایی نمودار سه خطی معادل و منحنی ظرفیت اصلی، تا نقطه تلاقی این دو خط در نظر گرفته شد. این رویکرد، بر دقت در شبیه‌سازی رفتار خطی و مرحله اولیه تسلیم تأکید دارد.

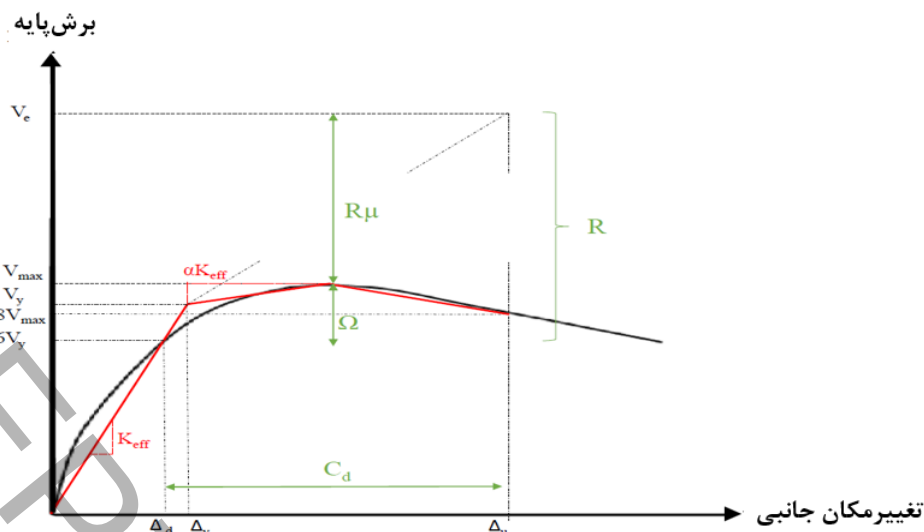
- رویکرد چهارم (تساوی مساحت تا قسمت دوخطی): این روش، مشابه رویکرد دوم عمل کرد، با این تفاوت که مبنای مقایسه مساحت‌ها (برای یکسان‌سازی مساحت زیر منحنی اصلی ظرفیت و منحنی معادل‌سازی شده) تا نقطه پایان مرحله دوخطی نمودار معادل‌سازی شده نهایی در نظر گرفته شد.

مبتنی بر این چهار رویکرد، هر یک از منحنی‌های ظرفیت بدست آمده برای یازده مدل سازه‌ای مورد بررسی، سه خطی سازی شدند و ضرایب عملکرد لرزه‌ای شامل، ضریب شکل‌پذیری (μ)، ضریب اضافه مقاومت (Ω) و ضریب رفتار (R) از نمودارهای ایده‌آل سازی شده استخراج گردید. نحوه تعریف و تعیین این ضرایب مطابق (NEHRP (FEMA 450 [۲۹] در روابط (۱) تا (۴) ارائه شده و مفهوم هر کدام در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

¹ Bilinear Idealization

² Effective Yield Point

³ Ultimate Displacement



شکل ۱۲: معرفی ضرایب لرزه‌ای بدست آمده از نمودار سه خطی معادل منحنی ظرفیت سازه

Fig. 12. Definition of the seismic performance factors obtained from the equivalent trilinear capacity curve

با استفاده از منحنی سه خطی شده روابط محاسبه ضرایب عملکرد لرزه‌ای به صورت زیر است:

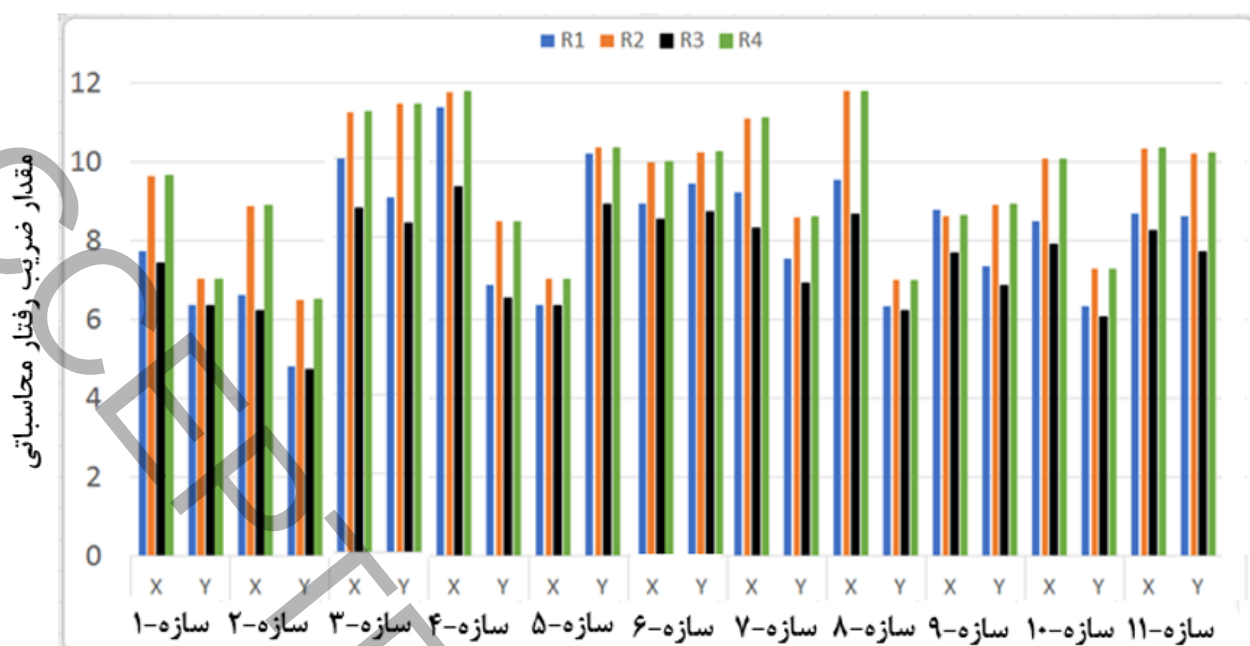
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

$$\Omega = \frac{V_y}{V_d} \quad (2)$$

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \quad (3)$$

$$R = R_\mu \times \Omega \quad (4)$$

در روابط بالا، Δ_y جابجایی تسلیم موثر، Δ_u جابجایی نهایی سازه متناظر با افت ۲۰ درصدی مقاومت یا نقطه فروریزش، V_d برش پایه طراحی آیین‌نامه‌ای، V_y برش پایه تسلیم موثر حاصل ایده‌آل‌سازی، R_μ ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری و Φ ضریبی تابع زمان تناوب T و شرایط خاک است. لازم به ذکر است ضریب μ گزارش شده در این پژوهش با ضریب بزرگنمایی تغییر مکان غیرخطی (C_d) که یک ضریب آیین‌نامه‌ای برای برآورد تغییر مکان‌های غیرارجاعی با استفاده از نتایج تحلیل‌های خطی است، تفاوت مفهومی دارد. در شکل ۱۳ مقادیر ضریب رفتار بدست آمده از نمودارهای خطی سازی شده توسط هریک از چهار رویکرد استفاده شده در این مطالعه به صورت نمودارهای مقایسه‌ای ارائه شده است. مقادیر R_1, R_2, R_3 و R_4 ارائه شده در این شکل معرف مقادیر ضریب رفتار بدست آمده از منحنی ظرفیت جهت X یا Y هر سازه، با استفاده از منحنی‌های خطی شده با رویکردهای اول تا چهارم است. جهت ارزیابی کمی و مبانی تئوریک انتخاب رویکرد برتر، شاخص‌های آماری ضریب رفتار حاصل از ۲۲ تحلیل پوش‌آور انجام‌شده (۱۱ مدل در ۲ جهت) برای چهار رویکرد مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۳: مقایسه مقادیر ضریب رفتار استخراج شده در دو امتداد متعامد X و Y هر مدل سازه‌ای براساس رویکرد خطی سازی چهارگانه مورد بررسی (R1: بدست آمده از رویکرد اول، R2: بدست آمده از رویکرد دوم، R3: بدست آمده از رویکرد سوم، و R4: بدست آمده از رویکرد چهارم)

Fig. 13. Comparison of the response modification factors obtained in the two orthogonal X and Y directions for each structural model using the four capacity-curve idealization approaches (R1: obtained from Approach 1; R2: obtained from Approach 2; R3: obtained from Approach 3; and R4: obtained from Approach 4)

جدول ۲: مقایسه آماری و کمی ضرایب رفتار به دست آمده از چهار رویکرد خطی سازی منحنی ظرفیت

Table 2. Statistical and quantitative comparison of the seismic performance factors obtained from the four capacity-curve idealization approaches

رویکرد خطی سازی استفاده شده	مقدار میانگین ضریب رفتار	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
	R_{ave}	STD	
رویکرد اول	۸/۱۲	۱/۵۷	۱۹/۳۷
رویکرد دوم	۹/۳۸	۱/۶۲	۱۷/۲۵
رویکرد سوم	۷/۴۹	۱/۱۷	۱۵/۶۸
رویکرد چهارم	۹/۳۸	۱/۶۲	۱۷/۲۵

با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۲، مقادیر ضریب رفتار بدست آمده از رویکرد سوم با انحراف معیار ۱/۱۷ و ضریب تغییرات ۱۵/۶۸ درصد، کمترین میزان پراکندگی را در میان سه روش دیگر دارد. این امر نشان دهنده پایداری مناسب این روش در مواجهه با هندسه‌ها و مقاطع مختلف سازه‌های مورد بررسی است. مقادیر ضریب رفتار بدست آمده از رویکرد سوم در مقایسه با سایر رویکردها که مقادیر ضریب رفتار بالای ۱۰ نیز ارائه می‌کنند، محافظه‌کارانه‌تر است و همگرایی بسیار بهتری با محدوده مقادیر ضریب رفتار پیشنهادی آیین‌نامه‌های معتبر برای سازه‌های مختلف دارد. بنابراین قابلیت اطمینان بیشتری را در طراحی لرزه‌ای سازه‌های ACC منجر می‌شود. از این رو سایر ضرایب عملکرد لرزه‌ای هدف این پژوهش نیز با استفاده از نمودارهای خطی سازی شده توسط این رویکرد محاسبه شدند. در جدول ۳ مقادیر ضرایب عملکرد لرزه‌ای شامل ضریب شکل‌پذیری، ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار سازه برای هر یک از یازده مدل مورد بررسی مبتنی بر رویکرد سوم فرایند خطی سازی منحنی‌های ظرفیت بدست آمده از تحلیل‌های پوش‌آور ارائه شده است.

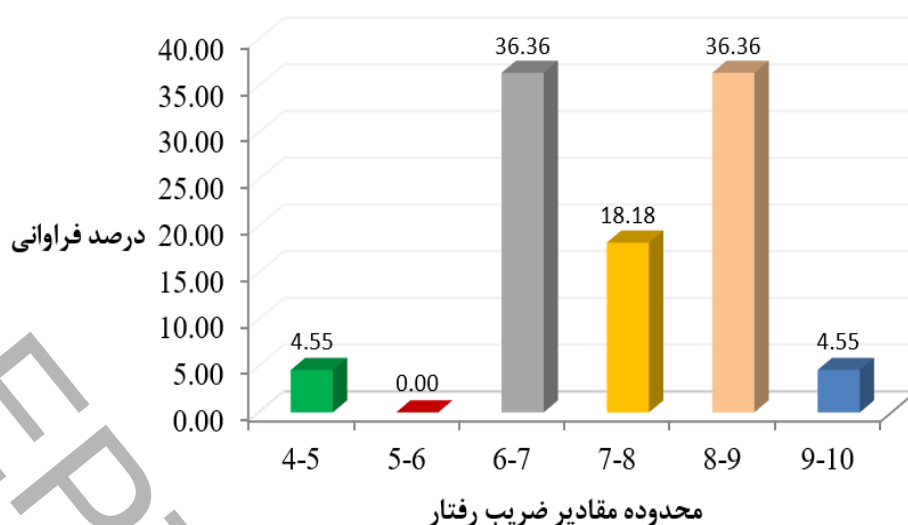
مقادیر مینیمم، ماکزیمم و میانگین ضریب رفتار برای سازه‌های ACC مورد بررسی در این تحقیق، به ترتیب ۴/۷۴، ۹/۳۵ و ۷/۴۹ بدست آمده است.

جدول ۳: مقادیر ضرایب عملکرد لرزه‌ای بدست آمده برای مدل‌های مورد بررسی مبتنی بر رویکرد سوم خطی‌سازی منحنی ظرفیت سازه

Table 3. Seismic performance factors obtained for the investigated models based on the third capacity-curve idealization approach

نام مدل	ضریب شکل پذیر	ضریب اضافه مقاومت	ضریب رفتار
سازه-۱	X	۴/۴۶	۷/۴۳
	Y	۳/۸	۶/۳۴
سازه-۲	X	۳/۷۴	۶/۲۳
	Y	۲/۸۴	۴/۷۴
سازه-۳	X	۵/۲۵	۸/۷۳
	Y	۵	۸/۳۴
سازه-۴	X	۵/۶۱	۹/۳۵
	Y	۳/۹۲	۶/۵۳
سازه-۵	X	۳/۸	۶/۳۴
	Y	۵/۳۶	۸/۹۳
سازه-۶	X	۵/۱۳	۸/۵۴
	Y	۵/۲۳	۸/۷۲
سازه-۷	X	۴/۹۹	۸/۳۲
	Y	۴/۱۵	۶/۹۱
سازه-۸	X	۵/۲۱	۸/۶۸
	Y	۳/۷۴	۶/۳۴
سازه-۹	X	۴/۶	۷/۶۷
	Y	۴/۱۱	۶/۸۶
سازه-۱۰	X	۴/۷۴	۷/۹۱
	Y	۴/۶۴	۶/۰۷
سازه-۱۱	X	۴/۹۴	۸/۲۴
	Y	۴/۶۳	۷/۷۲
میانگین		۴/۵۰	۷/۴۹
انحراف معیار		۰/۷۱	۰/۳۳

در شکل ۱۴ درصد فراوانی مقادیر ضریب رفتار بدست آمده براساس نتایج ۲۲ تحلیل انجام شده، در هر یک از محدوده‌های مقداری به صورت نموداری ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود بیش از ۹۰ درصد مقادیر ضریب رفتار محاسبه شده در محدوده ۶ تا ۹ قرار دارند.



شکل ۱۴: درصد فراوانی هریک از محدوده مقادیر ضریب رفتار بدست آمده از تحلیل مدل‌ها

Fig. 14. Frequency distribution of the obtained response modification factors across the investigated models

ارزیابی ضرایب عملکرد لرزه‌ای محاسبه شده برای ۲۲ حالت تحلیلی نشان می‌دهد که ضریب اضافه مقاومت (Ω) در تمامی مدل‌ها در محدوده‌ای نسبتاً اندکی (۱/۷۳ تا ۱/۸۶) تغییر می‌کند؛ از این رو، تغییرات ضریب رفتار عمدتاً ناشی از تغییرات ضریب شکل‌پذیری (μ) سازه است. در واقع، دامنه تغییرات ضریب شکل‌پذیری (۲/۸۴ تا ۵/۶۱) به مراتب بیشتر از نوسانات ضریب اضافه مقاومت بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار نهایی ضریب رفتار ایفا می‌کند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر ضریب رفتار حول مقدار میانگین ۷/۴۹ عمدتاً به ویژگی‌های پیکربندی سازه، نحوه توزیع سختی جانبی و میزان مشارکت اعضای مقاوم در رفتار غیرخطی وابسته است. در امتدادهایی که تعداد پانل‌ها کمتر بوده یا تمرکز سختی و مقاومت در تعداد محدودی از اعضا رخ داده است، ظرفیت توزیع تغییر شکل‌های غیرالاستیک کاهش یافته و در نتیجه ضریب شکل‌پذیری و به تبع آن ضریب رفتار نیز کمتر شده است. این موضوع به‌ویژه در سازه شماره ۲ در امتداد Y با کمترین مقدار ضریب رفتار ($R=4/74$) و ضریب شکل‌پذیری ($\mu=2/84$) به‌وضوح مشاهده می‌شود.

در مقابل، سازه‌هایی که از توزیع مناسب‌تر سختی در پلان، تعداد بیشتر اعضای باربر در امتداد بارگذاری، درجه نامعینی بیشتر و آرایش سازه‌ای متعادل‌تری برخوردار بوده‌اند، امکان گسترش تدریجی رفتار غیرالاستیک و تشکیل مفاصل پلاستیک در تعداد بیشتری از اعضا را فراهم کرده‌اند؛ در نتیجه، ظرفیت شکل‌پذیری افزایش یافته و ضریب رفتار نیز به مقادیر بالاتری رسیده است. این روند در سازه‌هایی نظیر مدل شماره ۳ (با پلان تقریباً مربعی ۷×۷ پانل)، مدل شماره ۴ در امتداد X ($R=9/35$)، مدل شماره ۵ در امتداد Y ($R=8/93$) و مدل شماره ۶ در هر دو امتداد ($R=8/54$ و $R=8/72$) به‌خوبی قابل مشاهده است.

همچنین مقایسه مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که تغییرات وزن کل سازه به‌تنهایی رابطه مشخص و یکنواختی با مقدار ضریب رفتار ندارد؛ به‌گونه‌ای که سازه‌های با وزن بیشتر و کمتر، هر دو می‌توانند مقادیر بالایی از ضریب رفتار را از خود نشان دهند. بنابراین، آرایش سازه‌ای، توزیع سختی و مقاومت جانبی، درجه نامعینی سازه و نحوه توزیع تغییر شکل‌های غیرالاستیک، عوامل مؤثرتری در تعیین مقدار نهایی ضریب رفتار نسبت به وزن کل سازه محسوب می‌شوند.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که دستیابی به مقادیر بالاتر ضریب رفتار در سازه‌های نگهدارنده ACC، بیش از آنکه به افزایش مقاومت اولیه سازه وابسته باشد، به توانایی سیستم در توزیع یکنواخت تغییر شکل‌های غیرالاستیک و جلوگیری از تمرکز آسیب در تعداد محدودی از اعضا بستگی دارد. در واقع، سازه‌هایی که رفتار غیرخطی در آن‌ها به‌صورت تدریجی و در گستره وسیع‌تری از سیستم باربر جانبی توسعه می‌یابد، از ظرفیت شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بیشتری برخوردار بوده و در نتیجه ضریب رفتار بزرگ‌تری از خود نشان

می‌دهند. بنابراین در این نوع سازه‌ها، طراحی سازه‌ای به گونه‌ای که منجر به توزیع مناسب مفاصل پلاستیک و پرهیز از تمرکز خرابی در تعداد محدودی از اعضای بحرانی شود، مهم‌ترین عامل در ارتقای ظرفیت لرزه‌ای و افزایش ضریب رفتار سازه است. به‌منظور ارزیابی نتایج در چارچوب ضوابط آیین‌نامه‌ای، مقادیر ضریب رفتار استخراج‌شده با مقادیر ارائه‌شده در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقایسه شد. بررسی این استاندارد نشان می‌دهد که برای سازه‌های مرکب بتن‌آرمه- فولادی نگهدارنده سامانه‌های خنک‌کننده هوای (ACC)، ضریب رفتار اختصاصی ارائه نشده است. نزدیک‌ترین سیستم سازه‌ای از نظر رفتار غیرخطی، قاب‌های خمشی بتن‌آرمه متوسط و ویژه هستند که به‌ترتیب دارای ضرایب رفتار ۵ و ۷/۵ هستند. شایان ذکر است که ضریب رفتار محاسبه‌شده در این مطالعه، از تحلیل استاتیکی غیرخطی و ظرفیت واقعی سازه استخراج شده است، در حالی که ضریب رفتار استاندارد ۲۸۰۰ یک ضریب طراحی آیین‌نامه‌ای است که علاوه بر نتایج مطالعات تحلیلی، با لحاظ عدم قطعیت‌های موجود، الزامات اجرایی و ملاحظات محافظه‌کارانه تدوین شده است؛ بنابراین این دو پارامتر از نظر مفهومی کاملاً معادل یکدیگر نیستند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میانگین ضریب رفتار سازه‌های مورد بررسی برابر ۷/۴۹ است که از نظر عددی همخوانی بسیار نزدیکی با مقدار پیشنهادی برای قاب خمشی بتن‌آرمه ویژه دارد. با این حال، با توجه به تفاوت‌های اساسی این سازه‌ها از نظر سیستم باربر جانبی، ترکیب اعضای بتن‌آرمه و فولادی، نحوه انتقال بارهای ثقلی و جانبی و مکانیزم مقاومت لرزه‌ای، این همخوانی صرفاً به معنای نزدیکی عددی بوده و بیانگر معادل بودن رفتار لرزه‌ای این دو سیستم نیست. از این‌رو، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند مبنای فنی مناسبی برای پیشنهاد ضریب رفتار اختصاصی سازه‌های نگهدارنده ACC در بازنگری‌های آتی آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای باشد.

۲-۴- مکانیزم‌های خرابی سازه‌ای حاصل از تحلیل‌های پاش آور

بررسی نوع، نحوه و محل تشکیل مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای سازه‌های ACC مورد بررسی در طول روند اعمال تدریجی بار پوش در هر یک از دو جهت عمود بر هم پلان X و Y نشان می‌دهد، اولین مفاصل پلاستیک در پای تعدادی از ستون‌های بتن مسلح سازه و نزدیک به ناحیه تکیه‌گاهی آن‌ها ایجاد می‌شود. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نحوه وقوع اولین مفاصل پلاستیک در اعضای مدل‌های سازه‌های ۲ و ۴، نشان داده شده است. با ادامه بار پوش وارده به سازه، مفاصل پلاستیک در پای تعداد بیشتری از ستون‌ها ایجاد شده و همزمان تشکیل مفاصل پلاستیک در دو ناحیه فوقانی و تحتانی محل اتصال اعضای مهاربندی به ستون‌های بتن مسلح ایجاد و گسترش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است، در انتهای بار پوش اعمالی به مدل سازه‌های ۲ و ۴، مفاصل پلاستیک ایجاد شده در ناحیه فوقانی محل اتصال اعضای مهاربندی به تعدادی از ستون‌ها، به سطح گسیختگی رسیده در حالی که مفاصل پلاستیک ایجاد شده در سایر نواحی دارای سطح آسیب کمتری هستند.

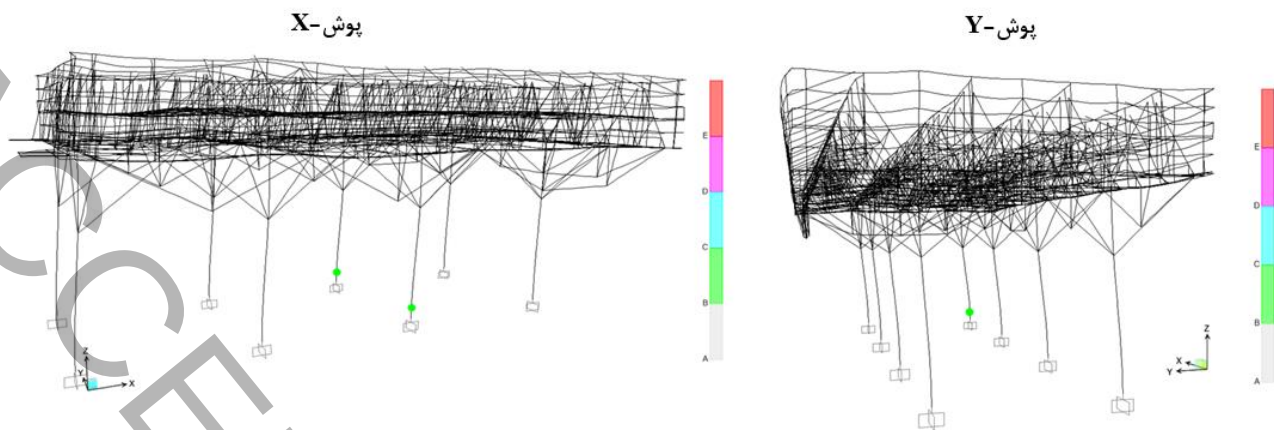
در نمایش مفاصل پلاستیک ارائه شده در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸، رنگ خاکستری (بازه A-B) بیانگر رفتار الاستیک عضو پیش از تسلیم است. نقطه B معرف نقطه تسلیم بوده و رنگ سبز (بازه B-C) نشان‌دهنده آغاز رفتار غیرخطی و تشکیل مفصل پلاستیک تقریباً متناظر با سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه^۱ (IO) است. نقطه C معرف نقطه ظرفیت نهایی، نقطه D معرف نقطه افت مقاومت و رنگ فیروزه‌ای (بازه C-D) بیانگر گسترش تغییرشکل‌های غیرالاستیک و نزدیک شدن عضو به سطح عملکرد ایمنی جانی^۲ (LS) است. رنگ بنفش (بازه D-E) نشان‌دهنده کاهش قابل توجه ظرفیت عضو و نزدیک شدن به سطح عملکرد آستانه فروپاشی^۳ (CP) است. رنگ قرمز (بازه فراتر از E) بیانگر زوال شدید مقاومت، ناپایداری موضعی و رسیدن مفصل پلاستیک به حالت گسیختگی نهایی^۴ است.

¹ Immediate Occupancy

² Life Safety

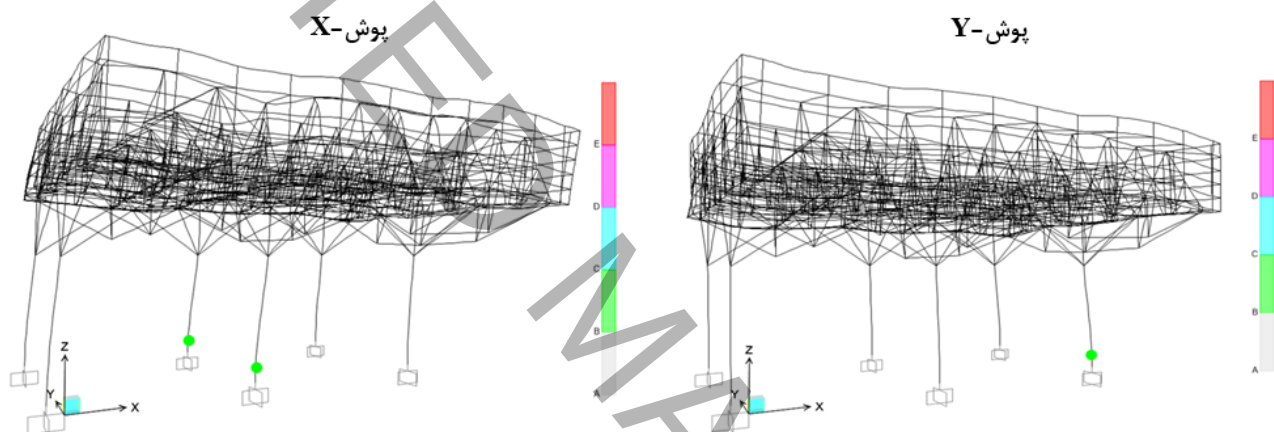
³ Collapse Prevention

⁴ Ultimate Failure



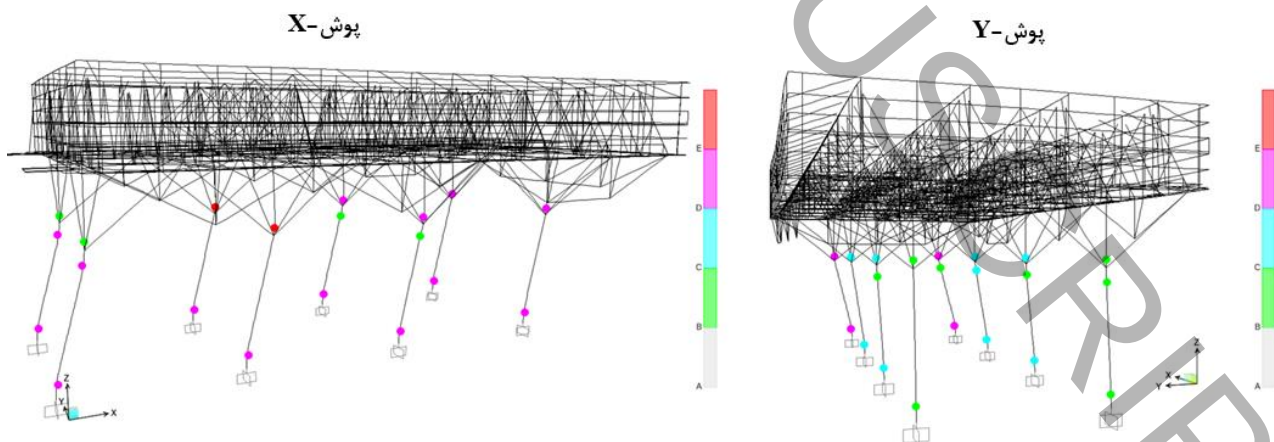
شکل ۱۵: تشکیل اولین مفاصل پلاستیک اعضای مدل سازه ACC شماره ۲ تحت بار پوش در دو جهت X و Y

Fig. 15. Formation of the first plastic hinges in the members of ACC Structural Model No. 2 under pushover loading in the X and Y directions



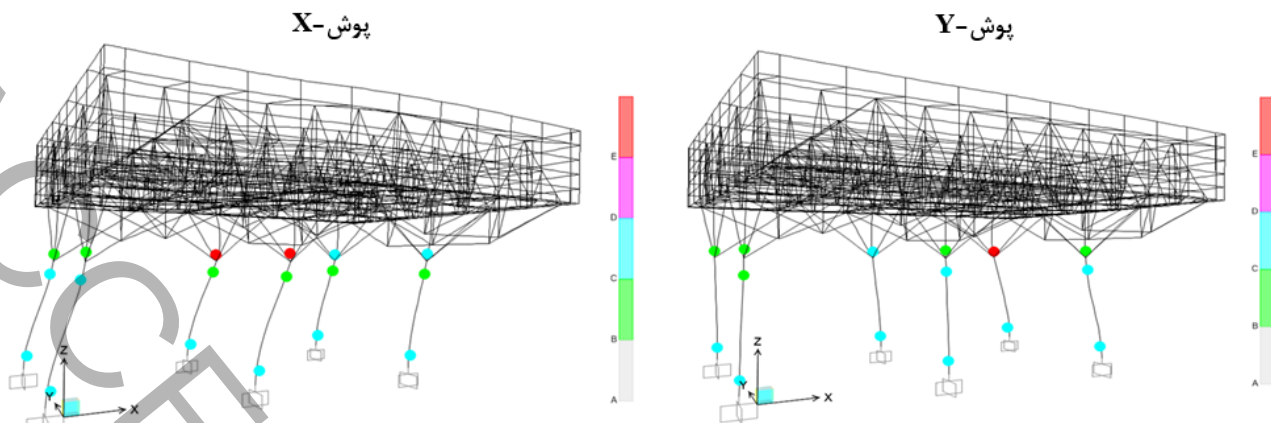
شکل ۱۶: تشکیل اولین مفاصل پلاستیک اعضای مدل سازه ACC شماره ۴ تحت بار پوش در دو جهت X و Y

Fig. 16. Formation of the first plastic hinges in the members of ACC Structural Model No. 4 under pushover loading in the X and Y directions



شکل ۱۷: مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای مدل سازه ACC شماره ۲ در انتهای بار پوش اعمالی در دو جهت X و Y

Fig. 17. Plastic hinges formed in the members of ACC Structural Model No. 2 at the end of pushover loading in the X and Y directions



شکل ۱۸: مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای مدل سازه ACC شماره ۴ در انتهای بار پوش اعمالی در دو جهت X و Y

Fig. 18. Plastic hinges formed in the members of ACC Structural Model No. 4 at the end of pushover loading in the X and Y directions

بر اساس ارزیابی دقیق خروجی ۲۲ تحلیل پوش اور انجام شده (شامل ۱۱ مدل سازه‌ای در دو جهت متعامد)، اولین مفصل پلاستیک در تراز بار جانبی بین ۲۸٪ تا ۵۵٪ از برش پایه حداکثر (V_{max}) تشکیل گردیده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که اکثریت مدل‌ها (بیش از ۷۲٪ از تحلیل‌ها) در بازه ۴۰٪ تا ۵۵٪ از V_{max} دچار نخستین تسلیم شده‌اند که نشان‌دهنده مرز پایان رفتار ارتجاعی خطی سازه است.

بررسی مکانیزم خرابی نشان می‌دهد که بحرانی شدن ناحیه فوقانی اتصال مهاربند به ستون بتن‌آرمه عمدتاً ناشی از تمرکز انتقال نیرو در محل اتصال اعضای مهاربندی، تغییر ناگهانی توزیع نیروهای داخلی در ستون و اندرکنش هم‌زمان نیروی محوری و لنگر خمشی است. مهاربندهای فولادی به دلیل سختی محوری زیاد، بخش قابل توجهی از نیروهای جانبی را به صورت نیروهای متمرکز گرهی به ستون منتقل می‌کنند که این امر موجب افزایش تقاضای برشی و خمشی در ناحیه اتصال می‌شود. علاوه بر این، تغییرات نیروی محوری ستون در اثر عملکرد مهاربندها، با توجه به اندرکنش غیرخطی $P-M-M$ ، ظرفیت خمشی مؤثر مقطع را کاهش داده و تشکیل مفصل پلاستیک را در این ناحیه تسریع می‌کند. در مقابل، هرچند نخستین مفاصل پلاستیک در پای ستون تشکیل می‌شوند، اما در این ناحیه تقاضای داخلی عمدتاً تحت اثر لنگر خمشی قرار دارد. با افزایش بار جانبی، انتقال هم‌زمان نیروهای محوری، برشی و خمشی ناشی از عملکرد مهاربندها موجب می‌شود نسبت تقاضا به ظرفیت در محل اتصال مهاربند به ستون با سرعت بیشتری افزایش یابد؛ از این رو، مفاصل پلاستیک این ناحیه زودتر به سطوح عملکردی بحرانی و در نهایت به حالت گسیختگی می‌رسند. این نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌های مورد بررسی، ناحیه اتصال مهاربند به ستون بتن‌آرمه یکی از بحرانی‌ترین نواحی از نظر تمرکز آسیب لرزه‌ای محسوب می‌شود؛ از این رو، ظرفیت انتقال نیرو، آرایش مهاربندها و جزئیات اجرایی این اتصال باید در طراحی و ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها مورد توجه ویژه قرار گیرد.

۴-۳- نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی

از آنجایی که بخش زیادی از سازه‌های نیروگاهی کشور در مناطقی با خطر نسبی زلزله زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند، لازم است رفتار لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای ACC، تحت اثر اعمال مولفه‌های زلزله مورد مطالعه قرار گیرد. براین اساس یکی از مدل‌های سازه‌ای (سازه شماره ۲)، تحت اثر مولفه افقی نظیر شتاب‌نگاشت ثبت شده از زلزله رودبار قرار گرفت. به منظور بررسی بحرانی‌ترین رفتار سازه تحت تحریک جانبی ناشی از زلزله، پاسخ غیرخطی این سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای در دو حالت زیر:

(الف) جابجایی امتداد X در تراز عرشه تحت اثر مولفه X زلزله،

(ب) جابجایی امتداد X در تراز عرشه تحت اثر اعمال هم‌زمان مولفه‌های X و Y زلزله،

برای هر یک از سطوح شتاب تعریف شده، تعیین گردید. در جدول ۴ مقادیر ماکزیمم جابجایی ثبت شده نظیر نقطه کنترل سازه واقع در تراز عرشه آن، برای هر سه سطح شتاب و هر یک از حالت‌های (الف) و (ب) آورده شده است. مطابق مقادیر این جدول، همزمانی اثر دو مولفه افقی زلزله در سطح شتاب ۲g سبب افزایش قابل توجه پاسخ سازه شده است.

جدول ۴: مقایسه مقادیر ماکزیمم جابجایی تراز عرشه سازه ACC شماره ۲ در دو حالت اعمال رکورد زلزله

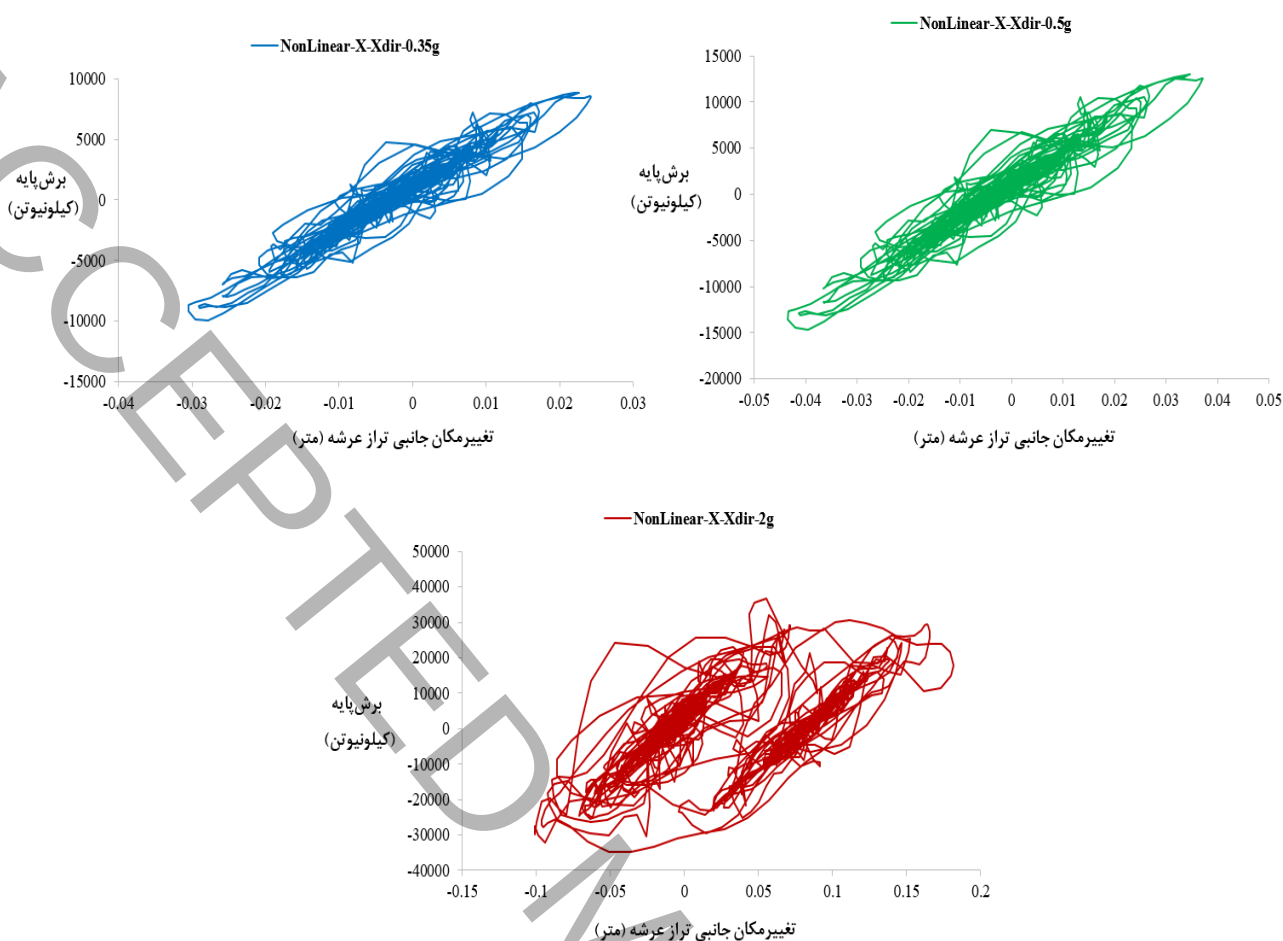
Table 4. Comparison of the maximum deck-level displacements of ACC Structural Model No. 2 under the two earthquake excitation cases

سطح شتاب زلزله اعمال شده به سازه		ماکزیمم جابجایی تراز عرشه در امتداد X پلان (mm)
تحت اثر فقط مولفه X زلزله		تحت اثر همزمان مولفه‌های X و Y زلزله
۰/۳۵g	۳۰/۵	۳۰/۹
۰/۵g	۴۳/۴	۴۶/۹
۲g	۱۷۸/۸	۲۵۲

همان‌گونه که نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد، تفاوت پاسخ سازه در دو حالت اعمال یک‌مولفه‌ای و دو مولفه‌ای زلزله در سطوح شتاب ۰/۳۵g و ۰/۵g بسیار محدود است؛ به‌گونه‌ای که افزایش حداکثر جابجایی در امتداد X به ترتیب تنها حدود ۱/۳ و ۸/۱ درصد است. علت این موضوع آن است که در این دو سطح شتاب، پاسخ سازه عمدتاً در محدوده الاستیک باقی مانده و هیچ مفصل پلاستیکی در حالت تک‌مولفه‌ای و تنها تعداد بسیار محدودی مفصل پلاستیکی در حالت دو مولفه‌ای تشکیل می‌شود. در نتیجه، سختی جانبی مؤثر سازه تقریباً ثابت مانده و اثر اعمال همزمان دو مؤلفه افقی بر پاسخ کلی سازه محدود است.

در مقابل، در سطح شتاب ۲g، با ورود سازه به محدوده رفتار غیرخطی، اختلاف پاسخ دو حالت به‌طور محسوسی افزایش یافته و حداکثر جابجایی در امتداد X از ۱۷۸،۸ به ۲۵۲ میلی‌متر (حدود ۴۱ درصد) می‌رسد. در این مرحله، کاهش تدریجی سختی اعضا در اثر تشکیل مفصل پلاستیک، اندرکنش همزمان نیروهای محوری و لنگرهای خمشی در ستون‌های بتن‌آرمه رفتار (P-M-M) و همچنین مشارکت همزمان مودهای انتقالی و پیچشی، موجب تشدید پاسخ لرزه‌ای سازه در حالت اعمال همزمان دو مؤلفه افقی می‌شود. بنابراین، اختلاف قابل توجه پاسخ در سطح شتاب ۲g عمدتاً ناشی از فعال شدن رفتار غیرخطی سازه است، در حالی که در سطوح شتاب پایین‌تر، به دلیل باقی ماندن سازه در محدوده تقریباً الاستیک، چنین اختلافی مشاهده نمی‌شود.

در شکل ۱۹ نمودار تغییرات برش پایه سازه شماره ۲ برحسب جابجایی امتداد X نقطه کنترل واقع در تراز عرشه سازه برای حالت اعمال شتاب زلزله فقط در امتداد X سازه و سه سطح شتاب زلزله ارائه شده است. در شکل ۲۰ نمودار تغییرات برش پایه-جابجایی افقی تراز عرشه سازه برای سطح شتاب زلزله ۲g در دو حالت سازه تحت اثر مولفه X زلزله و سازه تحت اثر همزمان دو مولفه X و Y زلزله به صورت مقایسه‌ای ارائه شده است. مطابق نمودارهای نشان داده شده در این شکل، در حالتی که شتابنگاشت زلزله به صورت همزمان در دو جهت عمود بر هم پلان سازه بر آن وارد می‌شود، سازه تحت تقاضای لرزه‌ای بیشتری قرار گرفته و انرژی بیشتری را از طریق مکانیزم‌های میرایی و هیستریزیس مستهلک می‌کند. به عبارتی دیگر، اعمال همزمان دو مولفه افقی شتابنگاشت زلزله در دو جهت X و Y در مقایسه با حالت اعمال یک مولفه‌ای، موجب افزایش تغییرشکل‌های غیرخطی و ورود گسترده‌تر اعضای سازه‌ای به ناحیه پلاستیک می‌شود. این موضوع با افزایش قابل توجه مساحت محصور درون چرخه‌های هیستریزیس و عریض‌تر شدن آن‌ها به روشنی قابل مشاهده است؛ امری که نشان‌دهنده افزایش اتلاف انرژی چرخه‌ای و جذب کار پلاستیک بیشتر در اعضا به‌قیمت وقوع آسیب‌های سازه‌ای شدیدتر در مقایسه با حالت بارگذاری تک‌جهته می‌باشد.



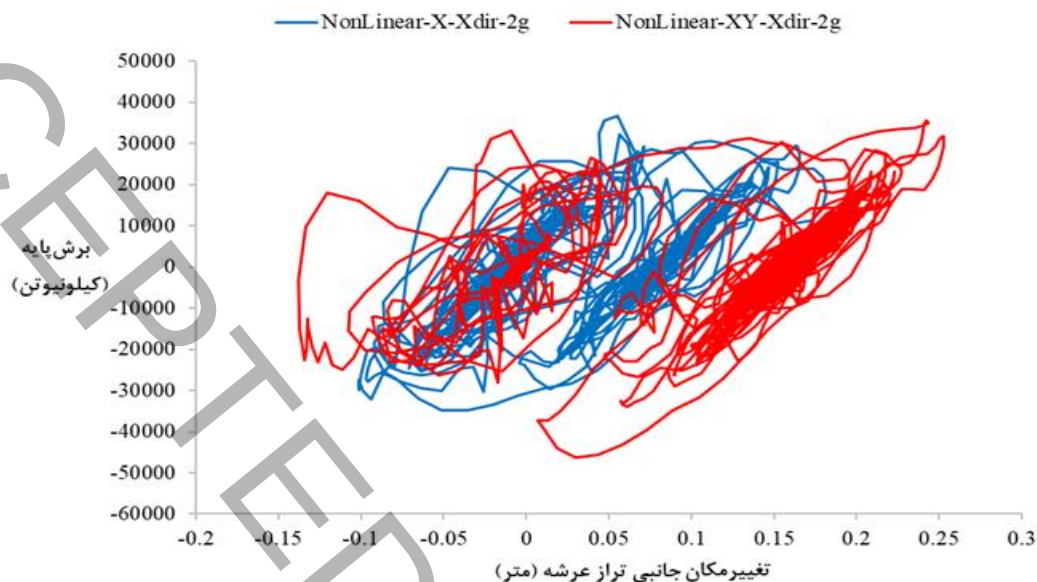
شکل ۱۹: نمودار برش پایه-جابجایی امتداد X عرشه سازه ACC شماره ۲ بدست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه تحت اثر مؤلفه افقی X زلزله رودبار در سه سطح شتاب زلزله انتخابی

Fig. 19. Base shear–deck displacement curves in the X direction obtained from nonlinear dynamic analysis of ACC Structural Model No. 2 under the Roudbar earthquake record at the three selected earthquake intensity levels

در شکل ۲۱ نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای مدل سازه شماره ۲ تحت اثر اعمال تنها مؤلفه افقی X و نیز اعمال همزمان دو مؤلفه افقی زلزله رودبار در سطح شتاب ۲g نشان داده شده است. در حالت بارگذاری یک-مؤلفه‌ای، حداکثر جابجایی تراز عرشه در امتداد X برابر ۱۷۸/۸ میلی‌متر بوده و در مجموع ۲۰ مفصل پلاستیک شامل ۱۲ مفصل در بازه B-C و ۸ مفصل در بازه C-D در ستون‌های بتن‌آرمه تشکیل شده است. در این حالت، بحرانی‌ترین ناحیه آسیب در محل اتصال فوقانی اعضای مهاربندی به ستون‌های بتنی مشاهده می‌شود.

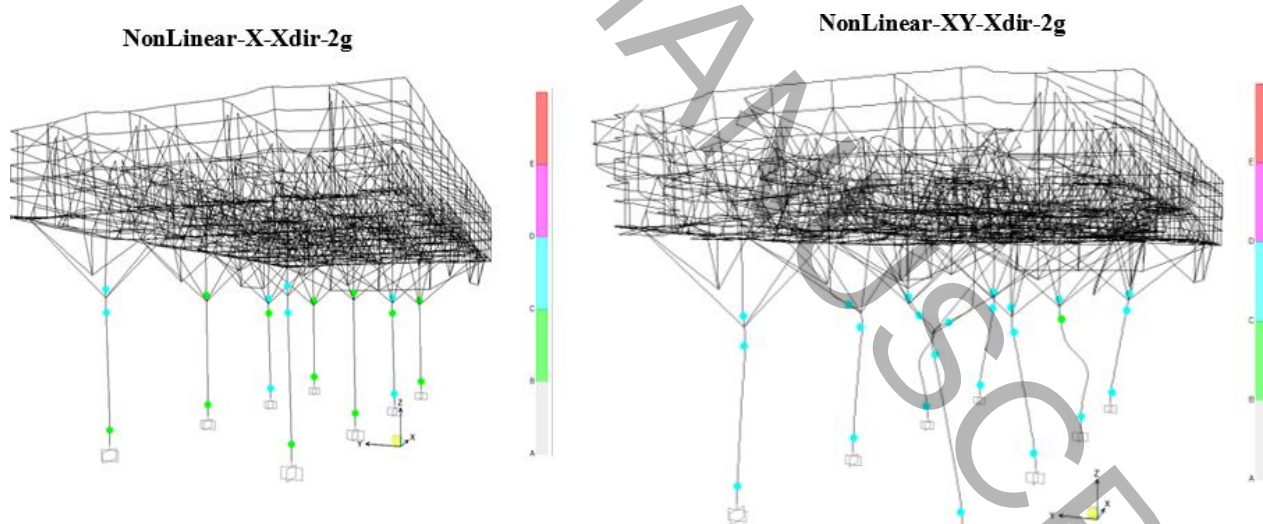
در مقابل، با اعمال همزمان دو مؤلفه افقی زلزله، حداکثر جابجایی تراز عرشه به ۲۵۲ میلی‌متر در امتداد X افزایش یافته و الگوی توزیع آسیب نیز به‌طور محسوسی تغییر نموده؛ به‌گونه‌ای که تنها یک مفصل در بازه B-C و ۲۳ مفصل در بازه C-D تشکیل شده است. این تغییر بیانگر آن است که در اثر بارگذاری دو-مؤلفه‌ای، بخش قابل توجهی از مفاصل پلاستیک از مراحل اولیه رفتار غیرخطی عبور کرده و به سطوح بالاتر آسیب منتقل شده‌اند. علاوه بر این، برخلاف حالت یک-مؤلفه‌ای که تمرکز اصلی آسیب در محل اتصال فوقانی مهاربندها به ستون‌ها مشاهده می‌شود، در حالت دو-مؤلفه‌ای شدت آسیب در پای ستون‌ها نیز به‌طور محسوسی افزایش یافته است. این رفتار ناشی از افزایش همزمان تقاضای خمشی و محوری در ستون‌ها، کاهش ظرفیت خمشی مؤثر اعضا در اثر اندرکنش P-M-M و فعال شدن همزمان مودهای انتقالی و پیچشی است. با این حال، بررسی وضعیت مفاصل پلاستیک نشان می‌دهد که تمامی مفاصل

تشکیل شده همچنان در بازه‌های B-C و C-D قرار دارند و هیچ مفصلی وارد بازه D-E یا فراتر از آن نشده است؛ بنابراین، هرچند بارگذاری دومولفه‌ای موجب تشدید رفتار غیرخطی و گسترش نواحی آسیب‌دیده شده است، سازه هنوز به مرحله فروریزش یا ناپایداری کلی نزدیک نشده است.



شکل ۲۰: مقایسه نمودار برش پایه-جابجایی در امتداد X سازه ACC شماره ۲ در سطح شتاب زلزله ۲g، برای دو حالت سازه فقط تحت مولفه X زلزله و سازه تحت اثر همزمان دو مولفه X و Y زلزله

Fig. 20. Comparison of the base shear–deck displacement curves in the X direction of ACC Structural Model No. 2 at a PGA of 2g under X-component-only excitation and simultaneous X- and Y-component excitation



شکل ۲۱: مقایسه نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای مدل سازه شماره ۲ تحت مولفه افقی زلزله رودبار تک جهته X و دو جهته X و Y

Fig. 21. Comparison of plastic hinge formation in the members of ACC Structural Model No. 2 under unidirectional X-component and bidirectional X- and Y-component Roudbar earthquake excitation

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ضرایب عملکرد لرزه‌ای و مکانیزم‌های خرابی سازه‌های بتنی نگهدارنده سامانه‌های خنک‌کننده هوایی نیروگاهی (ACC) با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، یازده مدل سازه‌ای که طیف متداول پیکربندی‌های هندسی مورد استفاده در پروژه‌های نیروگاهی کشور را پوشش می‌دهند، توسعه یافته و برای هر مدل، تحلیل پاش‌آور در دو امتداد اصلی پلان انجام شد. در مجموع ۲۲ منحنی پاش استخراج گردید که همراه با نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سازه در طول اعمال بار جانبی، امکان تعیین ظرفیت غیرخطی، رفتار پس‌کمانش و نواحی بحرانی این سازه‌ها را فراهم نمودند.

نتایج نشان داد که میانگین ضریب رفتار این سازه‌ها برابر $7/49$ بوده و دامنه تغییرات آن از $4/74$ تا $9/35$ را شامل می‌شود. بیش از ۹۰ درصد مقادیر محاسبه‌شده در بازه ۶ تا ۹ قرار دارند که گویای ظرفیت مناسب سازه‌ها در اتلاف انرژی تحت بارهای لرزه‌ای است. همچنین مقادیر میانگین ضریب شکل‌پذیری و ضریب اضافه مقاومت به ترتیب $4/50$ و $1/77$ به دست آمد که بیانگر ظرفیت مناسب این سیستم سازه‌ای در تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک، اتلاف انرژی لرزه‌ای و برخورداری از مقاومت مازاد نسبت به مقادیر طراحی است. میانگین ضریب رفتار به‌دست‌آمده ($7/49$) از نظر عددی با مقدار پیشنهادی برای قاب خمشی بتن‌آرمه ویژه در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران همخوانی نزدیکی دارد، با این وجود به دلیل تفاوت در سیستم باربر جانبی و مکانیزم مقاومت، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تدوین ضریب رفتار اختصاصی برای سازه‌های نگهدارنده ACC در آیین‌نامه‌های آتی قرار گیرد.

بررسی روند تشکیل و گسترش مفاصل پلاستیک نشان داد که اگرچه آغاز رفتار غیرخطی عمدتاً از پای ستون‌های بتن‌آرمه صورت می‌گیرد، با افزایش شدت بارگذاری لرزه‌ای، بیشترین تمرکز آسیب و بحرانی‌ترین مفاصل پلاستیک در ناحیه فوقانی اتصال مهاربندهای فولادی به ستون‌های بتن‌آرمه ایجاد می‌شود. تحلیل مکانیزم خرابی نشان داد که این رفتار ناشی از تمرکز انتقال نیروهای ناشی از مهاربندها، تغییر ناگهانی توزیع نیروهای داخلی و اندرکنش هم‌زمان نیروی محوری و لنگر خمشی در این ناحیه است. این یافته بیانگر نقش کلیدی ناحیه اتصال اعضای مهاربندی به ستون‌های بتنی در عملکرد لرزه‌ای سازه، تأمین پایداری موضعی ستون‌ها، محدودسازی گسترش خرابی و حفظ پایداری کلی سازه‌های نگهدارنده ACC است.

نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی نشان داد که در سطوح پایین‌تر شدت تحریک لرزه‌ای (PGA برابر با $0/35g$ و $0/5g$)، اختلاف پاسخ سازه بین اعمال یک مؤلفه افقی زلزله و اعمال هم‌زمان دو مؤلفه افقی محدود است؛ با این حال، با افزایش شدت تحریک و ورود سازه به محدوده رفتار کاملاً غیرخطی (PGA برابر با $2g$)، اعمال هم‌زمان دو مؤلفه افقی زلزله موجب افزایش قابل توجه جابجایی‌ها و توسعه مفاصل پلاستیک نسبت به حالت تک‌جهته گردید. این نتایج نشان می‌دهد که اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی زلزله می‌تواند در شدت‌های بالای تحریک نقش مهمی در تغییر مکانیزم پاسخ و گسترش آسیب سازه‌ای داشته باشد.

از دیدگاه طراحی مهندسی، نتایج این پژوهش چند پیامد کاربردی مهم را برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های نگهدارنده ACC به همراه دارد. با توجه به میانگین ضریب رفتار به‌دست‌آمده، استفاده از مقدار $R=7$ به‌عنوان یک مقدار محافظه‌کارانه برای طراحی اولیه این سازه‌ها قابل پیشنهاد است. با این حال، با توجه به دامنه تغییرات ضریب رفتار در مدل‌های مختلف، انجام تحلیل‌های غیرخطی به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد لرزه‌ای توصیه می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه بیشترین تمرکز آسیب و بحرانی‌ترین مفاصل پلاستیک در ناحیه فوقانی اتصال مهاربندها به ستون‌های بتن‌آرمه تشکیل می‌شوند، لازم است طراحی این ناحیه با دقت بیشتری انجام شود و تمهیدات مناسبی برای افزایش ظرفیت انتقال نیرو، کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد اتصال در نظر گرفته شود؛ این اهداف می‌توانند متناسب با شرایط هر پروژه از طریق بهبود جزئیات اجرایی یا استفاده از روش‌های مناسب تقویت موضعی تأمین شوند. افزون بر این، نتایج تحلیل‌های دینامیکی نشان داد که در سطوح بالای شدت لرزه‌ای، اعمال هم‌زمان دو مؤلفه افقی زلزله موجب افزایش قابل توجه پاسخ سازه و گسترش نواحی آسیب می‌شود؛ از این‌رو، در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای و طراحی سازه‌های نگهدارنده ACC، به‌ویژه در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا، اثر هم‌زمان مؤلفه‌های افقی زلزله نباید نادیده گرفته شود.

در مجموع، نتایج این پژوهش مبنایی کمی برای تعیین ضرایب عملکرد لرزه‌ای سازه‌های نگهدارنده ACC فراهم می‌آورد و می‌تواند در بازنگری ضرایب طراحی، توسعه دستورالعمل‌های اختصاصی لرزه‌ای و ارتقای ضوابط طراحی این دسته از سازه‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، از آنجایی که که تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی در این پژوهش صرفاً با هدف بررسی تکمیلی مکانیزم‌های خرابی، روند تشکیل مفاصل پلاستیک و مقایسه رفتار سازه تحت اثر اعمال یک‌جهته و دوجته زلزله انجام گردید و بدین منظور تنها از

یک رکورد واقعی زلزله رودبار در آن استفاده شد، امکان ارزیابی آماری پاسخ دینامیکی و بررسی پراکندگی پاسخ ناشی از تغییر رکوردهای زلزله فراهم نگردید. بر این اساس، بررسی پاسخ این سازه‌ها با استفاده از مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله سازگار با طیف طرح، انجام تحلیل‌های دینامیکی فزاینده، ارزیابی شکنندگی و قابلیت اعتماد لرزه‌ای، می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین محورهای تحقیقات آینده برای تکمیل و تعمیم نتایج این پژوهش مدنظر قرار گیرد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب سپاس صمیمانه خود را از شرکت احداث و توسعه نیروگاه‌های مپنا (توسعه ۱) ابراز می‌دارند. همکاری ارزشمند این شرکت در فراهم‌سازی اطلاعات فنی، تسهیل فرایند جمع‌آوری داده‌ها و مشارکت مؤثر در مراحل مختلف انجام این پژوهش نقش تعیین‌کننده‌ای در پیشبرد و تکمیل موفقیت‌آمیز این مطالعه داشته است. نویسندگان قدردان حمایت‌های فنی و سازمانی این مجموعه بوده و از همراهی و اعتماد آنان صمیمانه تشکر می‌کنند.

۷- منابع و مراجع

- [1] A. Říhová, M. Kočová, Technological structures for air cooled condensers, *European Journal of Engineering Research and Science*, 4(11) (2019). DOI: 10.24018/ejers.2019.4.11.1622.
- [2] Z. Wang, X. Gao, Z. Zhao, Y. Liu, Y. Meng, Seismic fragility assessment of traditional air-cooled support structure and air-cooled support energy dissipation structure based on IDA method, *Structures*, 39 (2022) 974–986. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.03.082.
- [3] Y. Xu, G. Bai, J. Zhu, Pseudodynamic test and numerical simulation of a large direct air-cooling structure, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(4) (2015) 280–299.
- [4] H. Dai, B. Wang, Seismic Analysis of Steel Solid Web Girder–RC Tubular Column Hybrid Structure, *Applied Sciences*, 8(11) (2018) 2095.
- [5] B. Wang, T. Wu, H. Dai, G. Bai, Numerical study on the seismic performance of a steel–concrete hybrid supporting structure in thermal power plants, *Applied Sciences*, 8(2) (2018) 294.
- [6] B. Wang, H. Dai, T. Wu, G. Bai, Y. Bai, Experimental investigation on seismic behavior of steel truss–RC column hybrid structure with steel diagonal braces, *Applied Sciences*, 8 (2018) 131. DOI: 10.3390/app8010131.
- [7] B. Wang, H.J. Dai, Y.T. Bai, K. Xiao, Influence mechanism of steel diagonal braces on mechanical behavior of steel truss–RC tubular column hybrid structure, *Journal of Earthquake Engineering*, 25(9) (2021) 1876–1902. DOI: 10.1080/13632469.2019.1605317.
- [8] Z. Yao, E.M. Lui, Experimental and numerical investigation of the seismic performance of an A-frame–truss–column hybrid supporting structure, *Advances in Structural Engineering*, 20(9) (2017) 1277–1296. DOI: 10.1177/1369433216674951.
- [9] Z. Wang, X. Gao, Z. Li, K. Liu, G. Zhang, Y. Li, A. Shi, A comparative shaking table study on inelastic torsion and torsional performance of conventional thermal power plant main building and thermal power plant main building with the buckling-restrained braces, *Journal of Structural Engineering*, 148(9) (2022) 04022131. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000344.
- [10] G. Zhao, Z. Shao, D. Zhao, S. Chen, Wind-induced structural response of air-cooling structures considering the effects of surrounding buildings, *Results in Engineering*, 30 (2026) 110991. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.110991.
- [11] Q. Qi, C. Shao, H. Yang, H. Cui, Z. Chen, W. Gong, Axial-flexure-shear model for seismic analysis of RC thin-walled hollow piers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 195 (2025) 109375. DOI: 10.1016/j.soildyn.2025.109375.

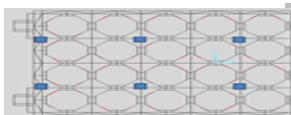
- [12] T. Fu, K. Wang, Z. Zhu, X. Ren, Y. Li, L. Xu, L. Meng, Z. Sun, Seismic performance of prefabricated square hollow section piers strengthened by jacketing using UHPC and high-strength steel, *Structures*, 47 (2023) 449–465. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.11.077.
- [13] W. Zhang, X. Yang, J. Lin, B. Lin, Y. Huang, Experimental and numerical study on the torsional behavior of rectangular hollow reinforced concrete columns strengthened by CFRP, *Structures*, 70 (2024) 107690. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107690.
- [14] Y. Shen, X.-P. Jiang, J.-T. Zhou, J.-Z. Li, Q.-H. Fang, J. Zhou, Seismic performance of railway hollow piers with semi-hinged column-footing connections: Numerical simulation and implementation guidelines, *Engineering Failure Analysis*, 180 (2025) 109837. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109837.
- [15] O. Makhdoom, A. Aziminejad, P. Zarfam, A.S. Moghadam, Modification of seismic design parameters for multi-story asymmetric buildings with improvement of safety margin, *Bulletin of Earthquake Engineering* (2026). DOI: 10.1007/s10518-026-02485-x.
- [16] FEMA, Quantification of building seismic performance factors, FEMA-P695, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, (2009).
- [17] UBC, Uniform Building Code, UBC-97, International Conference of Building Officials (ICBO), California, USA, (1997).
- [18] BHRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings: Standard No. 2800. BHRC-IS2800, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, (2014). (In Persian).
- [19] AISC, Seismic provisions for structural steel buildings, AISC 341-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, (2016).
- [20] AISC. Specification for structural steel buildings. AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, (2016).
- [21] ACI, Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-14, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, (2014).
- [22] Y.Y. Zhang, K.A. Harries, W.C. Yuan, Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced concrete, *Engineering Structures*, 48 (2013) 255–265. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.09.040.
- [23] N.J. Du, G.L. Bai, Y.Z. Xu, C.G. Qin, Experimental and numerical researches on the seismic behavior of tubular reinforced concrete columns of air-cooling structures, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11 (2017) 459–475. DOI: 10.1007/s40069-017-0207-6.
- [24] Z.-X. Li, C.-Y. Du, X. Liang, B. Zhao, Flexural behavior of circular hollow RC piers with reduced amounts of inner hoops, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1) (2020) 9. DOI: 10.1186/s40069-019-0383-7.
- [25] X. Li, J. Liu, X. Wang, Y.F. Chen, Assessment on the seismic performance of circular tubed reinforced concrete column to steel beam frames using numerical modeling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 163 (2022) 107567. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107567.
- [26] ATC, Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings, ATC-72, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA, (2010).
- [27] FEMA. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, (2005).
- [28] ASCE. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI 41-17, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, (2017).

[29] BSSC, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, DC, USA, (2004).

جدول پیوست ۱: مشخصات یازده سازه‌های نمونه مورد بررسی در این تحقیق

Appendix Table 1. Characteristics of the eleven representative ACC support structures investigated in this study

شماره سازه	تعداد پانل در امتداد Y	تعداد پانل در امتداد X	وجود کنسول		طول پانل در امتداد (m) X	طول پانل در امتداد (m) Y	ابعاد کل پلان (m)	پلان طبقه و ستون گذاری سازه
			انتها	ابتدا				
۱	۸	۴	X	X	✓	✓	۱۱/۴۵	۹۷/۴×۵۰
۲	۷	۴	✓	X	✓	✓	۱۱/۸۳	۸۸/۳×۵۲
۳	۷	۷	X	✓	✓	X	۱۳/۳۵	۹۶/۲۵×۹۵/۶۵
۴	۵	۴	✓	X	✓	✓	۱۳/۲۴	۵۴/۸×۷۰/۱۸
۵	۶	۵	✓	✓	X	✓	۱۱/۴۵	۷۳×۶۱/۸
۶	۶	۴	✓	✓	✓	✓	۱۳/۲۴	۸۳/۴×۵۴/۸
۷	۷	۴	X	✓	✓	✓	۱۳/۳۵	۹۶/۲۵×۵۵/۲
۸	۸	۴	X	X	✓	✓	۱۳/۳۵	۱۰۹/۶×۵۵/۲
۹	۷	۴	X	✓	✓	✓	۱۱/۴۵	۸۶×۵۰
۱۰	۶	۴	X	X	✓	✓	۱۱/۴۵	۷۴/۵×۵۰



63x50

11/18

11/45

✓

✓

✓

x

4

5

11

جدول پیوست ۲: وزن کل و مشخصات سه مود اول یازده سازه‌ی مورد مطالعه

Appendix Table 2. Total weight and characteristics of the first three vibration modes of the eleven investigated structures

شماره سازه	وزن کل (تن نیرو)	شماره مود	زمان تناوب (ثانیه)	نوع مود	مود غالب	درصد مشارکت تجمعی جرم موثر (%)
۱	۶۲۷۵/۶۴	اول	۰/۹۸	انتقالی	X	۷۰/۴
		دوم	۰/۸۶۶	پیچشی	Z	۳۶/۱
		سوم	۰/۸۵۳	انتقالی	Y	۸۸/۷
۲	۷۱۲۱/۴۴	اول	۰/۸۸۷	انتقالی	X	۵۸
		دوم	۰/۸۲۸	پیچشی	Z	۴۹/۸
		سوم	۰/۷۴۹	انتقالی	Y	۷۱
۳	۹۲۰۶/۳۱	اول	۰/۸۵	انتقالی	Y	۶۷/۶
		دوم	۰/۷۷۸	پیچشی	Z	۵۷/۸
		سوم	۰/۷۳	انتقالی	X	۸۳/۵
۴	۵۶۳۵/۹۲	اول	۰/۸۶۹	انتقالی	X	۷۵/۳
		دوم	۰/۸۵۱	پیچشی	Z	۶۳/۵
		سوم	۰/۷۴۹	انتقالی	Y	۸۲/۶
۵	۴۵۱۱/۴	اول	۱/۱۸۱	پیچشی	Z	۱۰/۷۴
		دوم	۰/۹۶	پیچشی	Z	۴۴/۵۶
		سوم	۰/۸۹۲	انتقالی	X	۶۰/۳۷
۶	۵۷۵۱/۵۸	اول	۰/۴۸۵	پیچشی	Z	۹۲/۸۶
		دوم	۰/۴	انتقالی	Y	۸۴/۶۶
		سوم	۰/۳۸۸	انتقالی	X	۹۲/۸۷
۷	۵۳۱۳	اول	۰/۹۳۹	انتقالی	Y	۵۷/۷۸
		دوم	۰/۸۴۴	پیچشی	Z	۸۰/۴۴
		سوم	۰/۷۷۹	انتقالی	X	۹۳/۲
۸	۵۴۹۷/۹۲	اول	۰/۸۸۸	انتقالی	Y	۸۱/۱
		دوم	۰/۸۱	پیچشی	Z	۷۲/۲
		سوم	۰/۷۲۳	انتقالی	X	۹۵/۸
۹	۴۳۰۰	اول	۰/۹۷	انتقالی	X	۷۷/۳
		دوم	۰/۹۵۲	پیچشی	Z	۵۸/۹
		سوم	۰/۸۴۵	انتقالی	Y	۸۸/۱
۱۰	۳۷۲۵	اول	۰/۹۰۶	انتقالی	X	۷۸/۱
		دوم	۰/۸۳۹	انتقالی	Y	۸۹
		سوم	۰/۸۱	پیچشی	Z	۶۶
۱۱	۳۱۵۰	اول	۰/۹۶۵	پیچشی	Z	۵۹/۹
		دوم	۰/۹۰۲	انتقالی	X	۸۵/۶
		سوم	۰/۸۲	انتقالی	Y	۹۰