

بررسی رفتار غیرخطی سیستم تطبیقی و غیرفعال سختی منفی و اثر آن در رفتار لرزه‌ی سازه‌ها

امید شفق (کارشناس ارشد)

نورج تقی‌خانی* (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۳/۲، ص. ۱۳۵-۱۴۵، (پادداشت نوی)

عملکرد تطبیقی ابزار سختی منفی در سیستم‌های قابی موجب می‌شود تا سازه بدون تضعیف یا قطع اجزاء باربر اصلی، رفتاری مشابه سیستم‌های تسلیم شده داشته باشد. مطالعات انجام شده تا کنون بر روی اثر سیستم سختی منفی تطبیقی با فرض رفتار ارتجاعی سازه قابی بوده است. لیکن ضروری است تا جهت بررسی امکان به کارگیری ابزار سختی منفی برای کنترل پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها، اثر آن در رفتار حد فروریزش قاب‌های خمشی بررسی شود. در نوشتار حاضر، به بررسی اثر ابزار سختی منفی در رفتار غیرخطی دو قاب خمشی فولادی ۵ و ۸ طبقه پرداخته شده است. برای این منظور از آنالیز دینامیکی افزایشی برای شناسایی رفتار غیرخطی و سطوح فروریزش سازه‌ها در ترکیب با ابزار سختی منفی استفاده شده است. نتایج نشان از کاهش هم‌زمان برش پایه و جابه‌جایی بین طبقه‌ی سیستم‌هایی با پیکربندی سازه با ابزار سختی منفی و میراگر دارد. نتایج به دست آمده از منحنی‌های شکست سازه‌ها با توزیع ابزار سختی منفی در ترازهای مختلف نشان از کاهش ریسک فروریزش در تمامی سطوح خطر لرزه‌ی و همچنین کاهش بیشینه‌ی تغییرشکل نسبی طبقات دارد.

واژگان کلیدی: ابزار سختی منفی، میراگر غیرفعال، رفتار کشسان، آنالیز دینامیکی افزایشی، منحنی فروریزش، رفتار غیرخطی.

omidshafeghat@gmail.com
ttaghikhany@aut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه پژوهشگران مختلف به دنبال یافتن روش‌های نوین جهت کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌هایی که تحت تحریک‌های لرزه‌ی مختلف قرار می‌گیرند، هستند. تاکنون روش‌های گوناگونی برای بهبود رفتار لرزه‌ی سازه‌ها ارائه شده است که ایده‌آل‌ترین آن‌ها، روش‌هایی است که قادر به کنترل هم‌زمان تغییرشکل و شتاب در سازه‌ها هستند. ترکیب روش‌های کنترل غیرفعال و ابزار سختی منفی (NSD)^[۱] که توسط ناگارجاها و همکاران در سال ۲۰۰۹ طراحی و معرفی شده است،^[۱] راهکاری مؤثر است که قادر به کاهش برش پایه و تغییرشکل سازه است. مفهوم اولیه‌ی سختی منفی، اولین بار در سال ۱۹۵۷ در قالب چند روش پیشنهادی برای سیستم‌های جداساز لرزه‌ی معرفی شد.^[۲] در این حالت از پیش فشرده کردن فنر برای ایجاد سختی منفی استفاده می‌شد که ایده‌ی غیرعملی بود.

سیس در سال ۲۰۰۴، ایده‌ی مذکور در پیشبرد و توسعه‌ی سیستم‌های جداساز لرزه‌ی با کارایی بسیار بالا به واقعیت تبدیل و ایده‌ی مذکور عملیاتی شد.^[۳] برخی

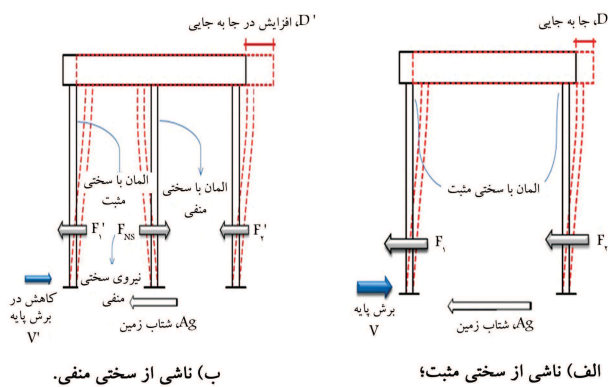
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۷/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۵/۹/۲۳.

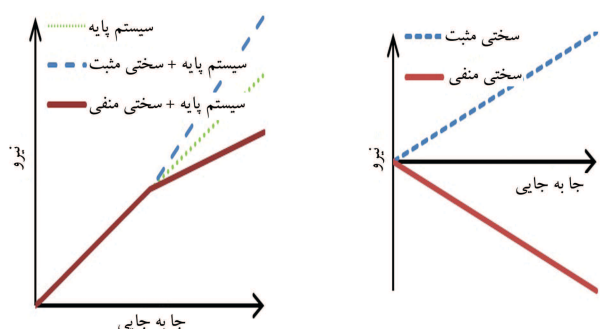
DOI: 10.24200/J30.2018.1422

پژوهشگران نیز در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶^[۴] ضمن استفاده از الگوریتم کنترل فعال و نیمه‌فعال با به‌کارگیری میراگرهای متغیر به قابلیت تولید شبه سختی منفی^۲ دست یافتند و پس از شبیه‌سازی‌های عددی با ترکیب شبه سختی منفی و میراگرهای ویسکوز توانستند به کاهش در جابه‌جایی و نیروهای اینرسی عرشه‌ی پل دست یابند. سیستم مذکور فقط توانایی تولید حلقه‌های نیرو - جابه‌جایی شبه سختی منفی را داشت و توانایی به‌وجود آوردن رفتار واقعی نیرو - جابه‌جایی سختی منفی را نداشت. لذا در پژوهشی در سال ۲۰۰۹^[۵] ابزار غیرفعال که توانایی تولید سختی منفی را داشت، به‌صورت مدلی با مقیاس آزمایشگاهی توسعه یافت، که در آن عرشه‌ی پل بر روی قسمت فوقانی تکیه‌گاه‌های پاندولی محذب^۳ قرار می‌گرفت و سختی منفی در سیستم مذکور به‌وسیله‌ی قسمتی از وزن سازه که بر روی تکیه‌گاه‌های پاندولی وارد می‌شد، زمینه‌ی کنترل جابه‌جایی مدل آزمایشگاهی پل را فراهم می‌ساخت. در پژوهش مذکور نشان داده شد که مدل توسعه‌یافته برای انتقال وزن عرشه در پل‌هایی با مقیاس واقعی، ناپایداری دارند و تولید پیوسته‌ی سختی منفی بین عرشه و پایه‌های پل غیرعملی است.

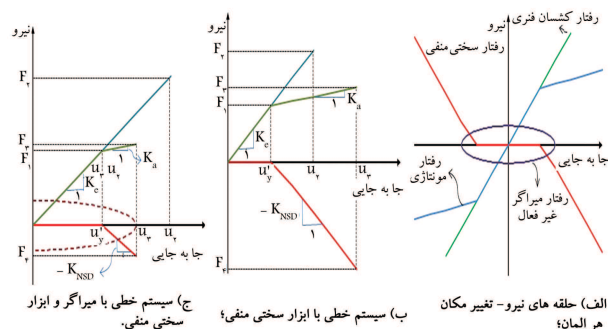
در سال‌های اخیر، توسعه‌ی سیستم‌های تطبیقی به‌عنوان نسل بعدی سیستم‌های



شکل ۱. دیاگرام نیروها.



شکل ۲. تأثیر اضافه کردن سختی به سیستم پایه.



شکل ۳. رفتار ترکیب های سختی منفی در سازه.

فنر سازه (K_e)، سختی منفی (K_{NSD}) و المان میراگر غیرفعال با ضریب میرایی (C) هستند، در نظر گرفته شده است. رفتار نیرو - جابه جایی هر یک از مؤلفه های ذکر شده در شکل ۳ الف نشان داده شده است. با افزودن سیستم NSD ، سختی سیستم مونتاژ شده با مقدار $K_a = K_e - K_{NSD}$ برابر می شود. شکل ۳ ب نشان می دهد که به دلیل لقی اولیه که در سیستم قرار داده شده است، سختی منفی (K_{NSD}) با فاصله و پس از جابه جایی u_y عمل می کند. اگر F_2 و u_2 به ترتیب بیشینه ی نیروی بازگرداننده و بیشینه ی تغییر مکان در سیستم کاملاً خطی باشند، با اضافه شدن نیروی وارده از فنر سختی منفی، بیشینه ی نیروی بازگرداننده و بیشینه ی تغییر مکان مونتاژی به ترتیب برابر F_2 و u_2 خواهد بود. همان طوری که مشاهده می شود، K_n باعث کاهش مطلوب در نیروی برشی طراحی می شود. اگرچه کاهش در برش پایه حاصل می شود، اما چنانچه با یک سیستم کشسان مقایسه شود، بیشینه ی تغییر شکل سیستم ترکیبی افزایش می یابد. با افزودن ابزار میرایی به صورت موازی

محافظت لرزه یی مورد توجه بنیاد علمی بین المللی (NSF)^۴ ایالات متحده قرار گرفته است که شاخه یی از ایده ی سیستم های محافظت لرزه یی نسل بعدی بررسی شده است. ایده ی مذکور بر مبنای خصوصیات مصالح است که می تواند شامل سختی منفی و میرایی منفی باشد. توسعه ی مفاهیم بنیادی در زمینه ی ذکر شده، مورد توجه دانشگاه های ایالات متحده واقع شده است که جذابیت زیادی به همراه داشته است. همچنین در سال ۲۰۱۰^[۷] اقدام به ساخت مدل آزمایشگاهی سازه ی ۳ طبقه با ۳ دهانه در ۲ راستا با حضور ابزار سختی منفی شد و در آن از تکیه گاه های الاستومری و میراگرهای ویسکوز در تراز کف استفاده و بهینه شدن پاسخ سازه ی مذکور در کاهش برش پایه، جابه جایی طبقه یی، و بین طبقه یی، و بیشینه ی شتاب در طبقات مدل ساخته شده در دو نوع آزمایش جابه جایی کنترل نشان داده شد.

عطاری و همکاران^[۸] نیز با ساخت یک مدل آزمایشگاهی از سازه یی نرم، کاهش در برش پایه، جابه جایی بین طبقه یی، و بیشینه ی شتاب نشان داده شد. همچنین در سال ۲۰۱۱^[۹] به بررسی بازدهی مدل پل جداسازی شده با حضور ابزار سختی منفی پرداختند که نتایج نشان از کاهش هم زمان برش پایه و شتاب و همچنین افزایش اثر میرایی سیستم در کنترل تغییر شکل های سازه ناشی از پدیده ی نرم شدگی می داد. در مورد تأثیر سیستم مذکور در رفتار سازه ها، همچنان مطالعات متعددی در حال انجام است.

لازم به ذکر است که در تمامی مطالعات ذکر شده، اثر سیستم سختی منفی تطبیقی در حوزه ی ارتجاعی در رفتار دینامیکی سازه ها بررسی شده است. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا دیدگاه تضعیف ظاهری سازه با استفاده از ابزار سختی منفی در رفتار حد فروریزش قاب های خمشی بررسی شود. در فرایند ذکر شده با مدل سازی رفتار ابزار سختی منفی در نرم افزار OpenSees، اقدام به تحلیل دینامیکی افزایشی سازه های مذکور و تعیین اثر ابزار سختی منفی در منحنی فروریزش آن ها شده است. در این ارتباط، رفتار دینامیکی سازه های ۵ و ۸ طبقه با رویکرد ارتجاعی مطالعه شده است.

۲. مفهوم سختی منفی و دیدگاه کاربردی آن در سازه ها

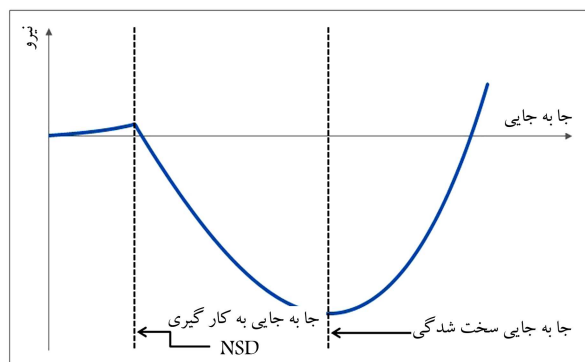
اشیاء معمولاً در برابر تغییر شکل های اعمالی به وسیله ی نیروی ذخیره کننده، مقاومت می کنند. سختی مثبت زمانی رخ می دهد که تغییر شکل اعمالی و نیروی مقاوم در یک جهت نباشند و در جهت مخالف با یکدیگر مقابله می کنند (شکل ۱ الف). در حالی که در سختی منفی، نیروی مقاوم وجود نخواهد داشت و تغییر شکل و نیروی حاصل از آن در یک جهت قرار می گیرند. بدین صورت نیروی سختی منفی در حرکت سیستم نقش خواهد داشت (شکل ۱ ب). بنابراین می توان مفهوم «منفی» را به هل دادن^۵ سیستم در جهت جابه جایی اعمالی و مفهوم سختی را به نیرویی که در وابستگی به جابه جایی به وجود می آیند، تعریف کرد. مطابق با شکل ۲ الف، تفاوت سختی منفی و مثبت را می توان در شیب نمودار نیرو - جابه جایی مشاهده کرد. اگر مطابق با شکل ۲ ب، رفتار سیستم پایه، کشسان در نظر گرفته شود (خط آبی)، اضافه شدن سختی مثبت باعث افزایش سختی سیستم پایه و در نتیجه افزایش نیرو و کاهش جابه جایی می شود. در مقابل، با اضافه شدن سختی منفی به سیستم پایه، نیرو کاهش و جابه جایی سیستم پایه افزایش می یابد.

برای درک بهتر کاربرد سختی منفی، دو فنر و میراگر که به ترتیب نماینده ی سختی

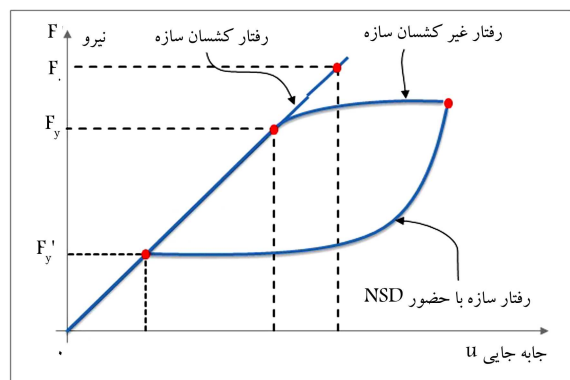
می‌شود، شیب منحنی نیرو - جابه‌جایی ابزار سختی منفی در جابه‌جایی صفر، مقدار بیشینه را دارد. بعد از این مرحله و با افزایش جابه‌جایی NSD، نیرو در فنر پیش‌فشرده کاهش می‌یابد و بدین‌گونه مقدار سختی منفی، روند کاهشی می‌یابد. با افزایش مقادیر جابه‌جایی، NSD سختی مثبت را به‌وجود می‌آورد (نقطه‌ی سخت‌شدگی) که ویژگی مطلوبی برای محدود کردن تقاضای جابه‌جایی در زلزله‌های بزرگ است. برای حصول اطمینان از عدم حرکت ابزار مذکور در برابر تحریکات کوچک لرزه‌یی، مانند باد از مکانیزم درز فتری مونتاژی (GSA) استفاده می‌شود. NSD را می‌توان در دو حالت با و بدون حضور GSA ها در سازه استفاده کرد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، وجود درز فتری مونتاژی GSA موجب لقی اولیه در منحنی نیرو - جابه‌جایی ابزار NSD می‌شود. دلیل وجود چنین لقی، خنثی شدن نیروی سختی منفی ابزار تحت تحریکات کوچک است. شکل ۷، رفتار سیستم سازه‌یی را در اثر استفاده از ابزار NSD به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. ابزار سختی منفی، توانایی لازم برای تغییر سختی در طی جابه‌جایی‌های جانبی را به‌صورت تطبیقی دارد. به این ترتیب بسامد ارتعاشی سیستم مطابق با بسامد بار اعمالی به طبقات سازه به‌صورت کاملاً مکانیکی و غیرفعال بدون نیاز به منابع خاص انرژی تغییر می‌کند.

تمام نکاتی که تاکنون در مورد عملکرد ابزار NSD ذکر شده است، اثر آن در رفتار ارتجاعی و حدی سازه متمرکز شده است. اما نکته‌ی قابل ذکر در مورد رفتار لرزه‌یی سازه‌ها، بررسی اثر سیستم‌های سختی منفی (NSD) در رفتار غیرخطی و حد فروریزش سازه است که در ادامه، به آن پرداخته شده است.



شکل ۶. نمودار نیرو- جابه‌جایی ابزار NSD با حضور درز فتری مونتاژی GSA. [۸]

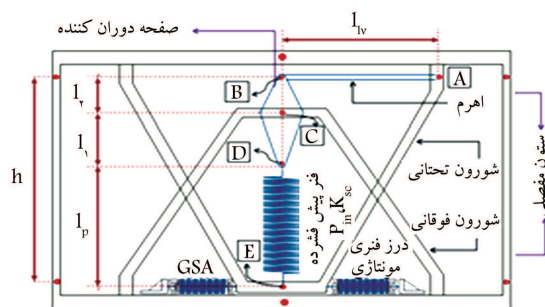


شکل ۷. رفتار شماتیک نیرو- جابه‌جایی ترکیب سازه و سیستم سختی منفی (NSD) و کاهش ظاهری مقاومت. [۷]

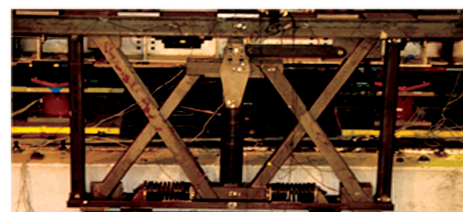
به سیستم NSD، تغییر شکل مجموعه در شکل ۳ کاهش می‌یابد، به طوری که $u_2 > u_3$ می‌شود. در حالی که برش پایه‌ی مجموعه به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، u'_y در حقیقت «جابه‌جایی شبیه‌سازی تسلیم»^۶ است و برای جلوگیری از پاسخ جابه‌جایی بیش از اندازه در برابر تحریکات خارجی کوچک تعبیه شده است. [۸]

۳. مروری بر رفتار ابزار سختی منفی

NSD ابزاری به‌صورت ذاتی ناپایدار است که می‌تواند در دو پیکربندی بین زمین و سازه و یا در بین طبقات نصب شود. شکل ۴، نمایی از ابزار سختی منفی را نشان می‌دهد که در آن با جابه‌جایی القایی قاب فنر پیش‌فشرده در جهت مخالف دوران می‌کند و باعث به‌وجود آمدن سختی منفی می‌شود. در شکل مذکور، L_1 و L_2 به ترتیب طول‌های CD و BC صفحه‌ی گردان و K_{sc} ، L_p و P_{in} نیز به ترتیب طول، سختی و نیروی پیش‌بارگذاری فنر NSD هستند. همچنین طول اهرم، سختی‌های اولیه و ثانویه و نیروی پیش‌فشرده‌ی درز فتری مونتاژی به ترتیب با P_{is2} و K_{s2} ، K_{s1} ، L_{lv} معرفی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده

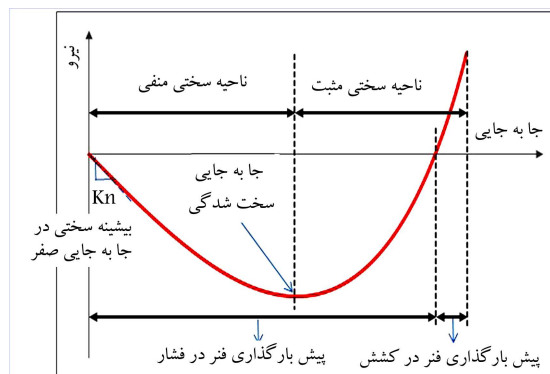


الف) اعضای تشکیل دهنده ی NSD؛



ب) نمونه ی آزمایشگاهی NSD در حالت تغییر شکل نیافته.

شکل ۴. ابزار سختی منفی (NSD).

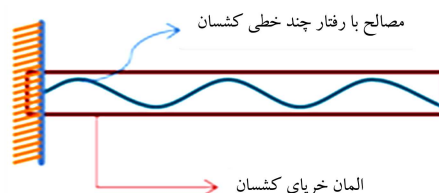


شکل ۵. نمایی از ابزار سختی منفی. [۸]

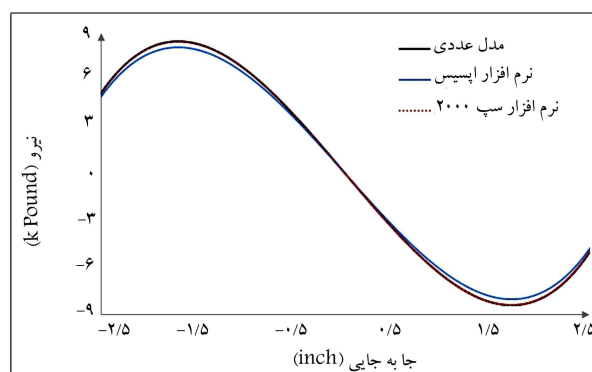
۴. مدل سازی رفتار سختی منفی در نرم افزار

OpenSees و SAP۲۰۰۰

برای مدل سازی رفتار سختی منفی در نرم افزار SAP۲۰۰۰ از مصالح Nonlinear Elastic Link Element و در نرم افزار OpenSees از مصالح Multi-Linear Uniaxial-Material-Elastic استفاده شده است که رفتار آن از فرمول های نوشتاری در سال ۲۰۱۳^[۸] تبعیت می کند. برای اجرای رفتار سختی منفی، دو نقطه به فاصله ای مناسب از یکدیگر تعریف می شوند. برای سادگی در آنالیز لازم است یک نقطه از المان فاقد حرکت باشد و نقطه ای دیگر تحت جابه جایی قرار گیرد. برای مدل سازی در نرم افزار OpenSees، از روش تعریف المان خرابایی^۷ با تخصیص مصالح رفتاری ذکر شده استفاده می شود (شکل ۸). لازم است تا سختی المان خرابایی در راستای تحریک مقداری ناچیز باشد تا رفتار نهایی سختی منفی را تحت تأثیر قرار ندهد و سایر پارامترهای سختی برابر صفر در نظر گرفته شود. مدل سازی رفتاری ابزار سختی منفی در نرم افزار OpenSees و SAP۲۰۰۰ با پارامترهای جدول ۱ انجام شده است که نمودار نیرو - جابه جایی آن در شکل ۹ مقایسه شده است.



شکل ۸. نحوه ی مدل سازی رفتار ابزار سختی منفی در نرم افزارهای محاسباتی.



شکل ۹. رفتار نیرو - جابه جایی ابزار سختی منفی مطابق با پارامترهای جدول ۱.

جدول ۱. مشخصات مؤلفه های مورد استفاده در ابزارهای NSD و GSA.^[۳]

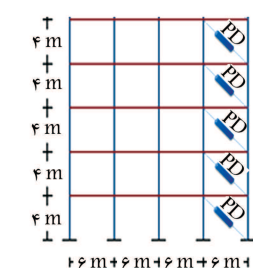
GSA		NSD	
مقادیر	پارامتر	مقادیر	پارامتر
۳/۴۹	$K_{s1} (kN/cm)$	۱۰/۱۶	$l_1 (cm)$
۰/۴۱	$K_{s2} (kN/cm)$	۱۲/۷	$l_2 (cm)$
۶/۴۵	$P_{is2} (kN)$	۷۶/۲	$lp (cm)$
۱/۳۲	$d'_{gap} (cm)$	۱۶/۹۱	$P_{in} (kN)$
		۷/۸۹	$K_{sc} (kN/cm)$

نتایج تحلیل تاریخیچه ی زمانی در شکل ۹ تحت بار هارمونیک با دامنه ی ۱/۵ سانتی متر و به صورت رابطیه ی نیرو - جابه جایی انتهای آزاد ابزار سختی منفی به دست آمده است. نتایج مدل سازی در شکل مذکور، تقریب قابل قبول را نشان می دهد.

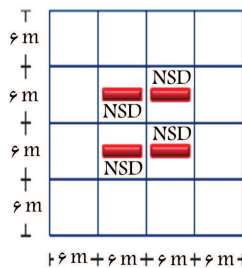
۵. معرفی پیکربندی سازه یی و الحاق ابزارهای مکانیکی

هدف اصلی در بخش حاضر، بررسی پاسخ پیکربندی ها در پارامترهای مختلف (برش پایه، جابه جایی نسبی و شتاب) و مقایسه ی عملکرد هر کدام از پیکربندی های با پلان ۴ دهانه ی ۶ متری متقارن بوده است. آیین نامه ی بارگذاری مورداستفاده، آیین نامه ی ۱۰-ASCE و آیین نامه ی طراحی المان های فولادی، آیین نامه ی ۱۰-۳۶-AISC بوده و برای ملاحظات لرزه یی کلی سیستم سازه یی از آیین نامه ی ۱۰-۳۴-AISC استفاده شده است. لازم به ذکر است که هر کدام از سازه ها در ۴ پیکربندی متفاوت: ۱. سازه ی پایه (BS)، ۲. سازه با میراگر (PS)، ۳. سازه ی پایه با ابزار سختی منفی (NS) و ۴. سازه با ابزار سختی منفی و میراگر (AS) مقایسه شده اند.

در مطالعه ی حاضر از دستگاه NSD معرفی شده در جدول ۲، برای بررسی رفتار مدل های سازه یی استفاده شده است. در پیکربندی NS و AS از ۴ دستگاه NSD در تراز پایه ی سازه استفاده شده است که در شکل ۱۰ الف مشاهده می شود. چیدمان میراگرها در پیکربندی PS و AS قطری و در قاب های بیرونی در نظر گرفته شده و مشخصات آن ها در طبقات مختلف یکسان فرض شده است (شکل ۱۰ ب). برای محاسبه ی سختی، از روابط ارائه شده در نوشتاری در سال ۲۰۱۳، استفاده شده است.^[۷] در جدول ۳، نتایج به دست آمده برای ضریب میرایی و سختی سیستم بادبند متصل به آن ارائه شده است.



ب) موقعیت قرارگیری میراگرهای ویسکوز در سازه.



الف) آرایش دستگاه های NSD در پلان همکف؛

شکل ۱۰. چیدمان ابزارها.

جدول ۲. مشخصات پارامترهای مربوط به رفتار ابزار سختی منفی NSD و GSA.

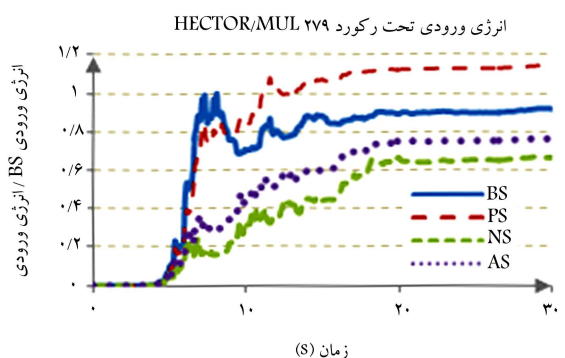
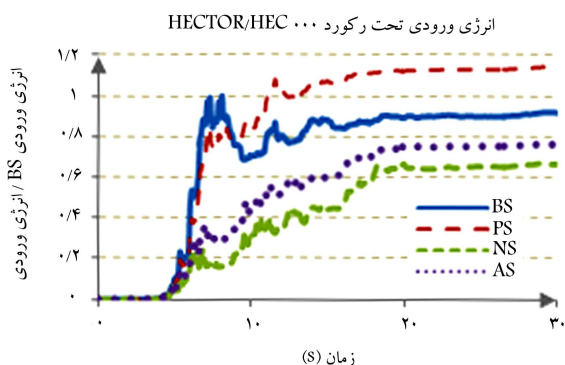
GSA		NSD	
۱/۳۲	$d'_{gap} (cm)$	۸۰	$LP (cm)$
		۱۲/۷	$L(1) (cm)$
۶/۴۵	$P_{is2} (kN)$	۶۳/۵	$L(2) (cm)$
۳/۴۹	$K_{s1} (kN/cm)$	۱۵	$K_{SC} (ton/cm)$
۰/۴۱	$K_{s2} (kN/cm)$	۴۰	$P_{in} (ton)$

جدول ۳. ضریب میرایی و سختی میراگرهای مکانیکی.

سازه	پیکربندی	میرایی هدف	ضریب بزرگ‌نمایی	ضریب میرایی ($\text{ton}\cdot\text{sec}/\text{m}$)	سختی میراگر (ton/m)
۵ طبقه	قطری	۲۰٪	$f_h = 0.83$ $f_v = 0.55$	۳۶۵	۴۰۰۰

جدول ۴. معرفی شاخص‌های بازدهی برای سازه‌های مورد استفاده. [۱۲]

نام شاخص	پارامتر مورد ارزیابی	فرمولاسیون
J_1	تغییر شکل	$\max_t (u(t)/(u_y))$
J_2	شتاب مطلق	$\max_t (\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) / \max(\ddot{u}_g(t)))$
J_3	برش پایه	$\max_t (F_{TF} / K_e u_y)$
J_4	نیروی ستون	$\max_t (F_{col} / K_e u_y)$



شکل ۱۱. نمودارهای انرژی ورودی به پیکربندی‌های مختلف تحت اثر جفت رکورد Northridge/MUL279 و HectorMine0000.

است. مطابق با گراف‌های شکل مذکور در صورت استفاده از NSD، انرژی ورودی به سیستم سازه‌ای کاهش می‌یابد. این موضوع به وضوح در پیکربندی NS قابل مشاهده است. در اثر استفاده از میراگر (PS)، انرژی ورودی به سیستم سازه‌ای در اثر افزایش میرایی و سختی افزایش می‌یابد. ترکیب دو ابزار مذکور در پیکربندی AS، کاهش انرژی کمتری نسبت به پیکربندی NS را نشان می‌دهد.

۲.۷. پاسخ شتاب طبقه‌ای و برش پایه

شکل ۱۲، مقادیر بیشینه‌ی شتاب به دست آمده در طبقات سازه‌ی ۵ طبقه برای سیستم‌های مختلف را نشان می‌دهد که مطابق آن، استفاده از ابزار سختی منفی

۶. شاخص‌های پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها

برای مقایسه‌ی پاسخ سیستم‌های مختلف از ۴ شاخص لرزه‌ی پیشنهادی در نوشتاری در سال ۲۰۰۲، [۱۰] استفاده شده است که در جدول ۴ معرفی شده‌اند. شاخص‌های مذکور در حقیقت پاسخ‌های بیشینه‌ی نرمال‌شده‌ی سیستم سازه‌ی هستند که با اصلاحاتی جزئی نسبت به شاخص مرجع ارائه شده‌اند.

۷. مقایسه‌ی پاسخ‌های لرزه‌ی پیکربندی‌ها

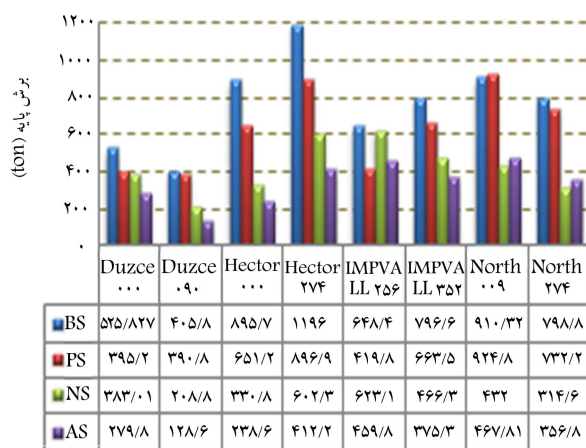
در بخش کنونی با تحلیل تاریخی‌چهی زمانی کلیه‌ی پیکربندی‌ها به ارزیابی رفتار دینامیکی آن‌ها تحت ۴ جفت شتاب‌نگاشت توصیه‌شده در آیین‌نامه‌ی FEMA - P695 پرداخته شده است. [۱۱] شتاب‌نگاشت‌های مذکور بر روی خاک با مشخصات D ثبت شده و شدت‌های مشابه، محتوای بسامدی و مدت زمان مطلوبی داشتند که در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

۱.۷. انرژی ورودی

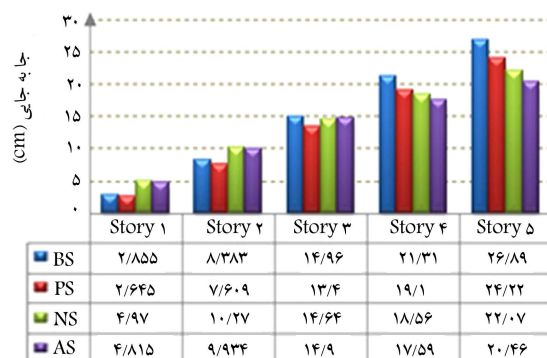
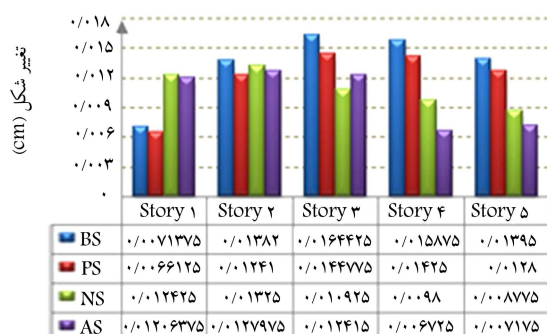
خرابی و آسیب در سازه معمولاً تحت اثر بیشینه‌ی مقدار انرژی ورودی و شتاب تجربه‌شده در سیستم سازه‌ی به وجود می‌آید. لذا بیشینه‌ی پاسخ سیستم سازه‌ی به مقدار انرژی منتقل شده به سازه و نحوه‌ی توزیع آن در طبقات بستگی دارد. بنابراین لازم است که مقدار انرژی ورودی پیکربندی‌های مختلف بررسی شود. برای بیان بهتر موضوع ذکر شده، انرژی ورودی تمام پیکربندی‌ها به انرژی سازه‌ی پایه (BS) نرمال می‌شود. برای نمونه، تغییرات تاریخی‌چهی زمانی انرژی ورودی به سازه‌ی ۵ طبقه تحت جفت رکورد HectorMine و Northridge در شکل ۱۱ نشان داده شده

جدول ۵. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های تحلیل تاریخی‌چهی زمانی. [۱۳]

ID	PGV_{max} (cm/s)	PGA_{max} (g)	نمونه‌ی فایل‌ها - رکوردهای افقی		پایین‌ترین بسامد
			مولفه‌ی اول	مولفه‌ی دوم	
۱	۶۳	۰.۵۲	NORTHR/MUL279	NORTHR/MUL009	۰.۲۵
۲	۶۲	۰.۸۲	DUZCE/BUL090	DUZCE/BUL000	۰.۰۶
۳	۴۲	۰.۳۴	HECTOR/HEC090	HECTOR/HEC000	۰.۰۴
۴	۳۳	۰.۳۵	IMPVALL/H-DLT352	IMPVALL/H-DLT262	۰.۰۶



شکل ۱۴. بیشینه‌ی پاسخ برش پایه‌ی پیکربندیهای تحت اثر تحریک‌های مختلف.

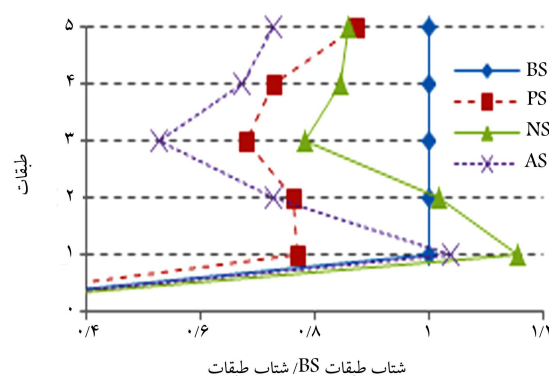


شکل ۱۵. پاسخ جابه‌جایی و تغییرشکل پیکربندیهای مختلف تحت اثر تحریک Northridge/MUL۰۰۹.

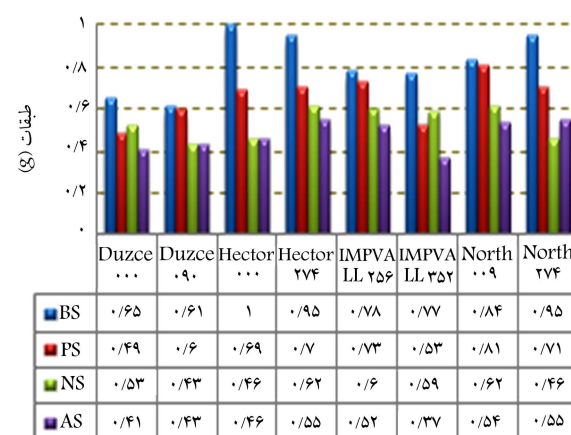
($P - \Delta$) کنترل شود. تحت شرایط ذکرشده، جابه‌جایی و تغییرشکل‌های اضافی ناشی از به‌کارگیری NSD را می‌توان با بهره‌گیری از میراگرها کنترل کرد.

۸. بررسی رفتار لرزه‌ی پیکربندی‌های براساس شاخص‌های لرزه‌ی

در جدول ۶، مقادیر به‌دست آمده برای ۴ شاخص معرفی شده برای کلیه‌ی پیکربندی‌های تحت ۷ شتاب‌نگاشت ارائه شده است. جدول مذکور عملکرد مطلوب پیکربندی AS را نسبت به سایر پیکربندی‌های نشان می‌دهد. شاخص تغییرشکل J_1 برای پیکربندی AS، دامنه‌ی کاهش بین ۳۸٪ تا ۷۰٪ را نسبت به پیکربندی BS نشان



شکل ۱۲. مقایسه‌ی بیشینه‌ی پاسخ شتاب طبقات در پیکربندی‌های مختلف تحت اثر رکورد HectorMine۲۷۴.



شکل ۱۳. بیشینه‌ی پاسخ شتاب طبقه‌ی بام سازه تحت اثر تحریک‌های مختلف.

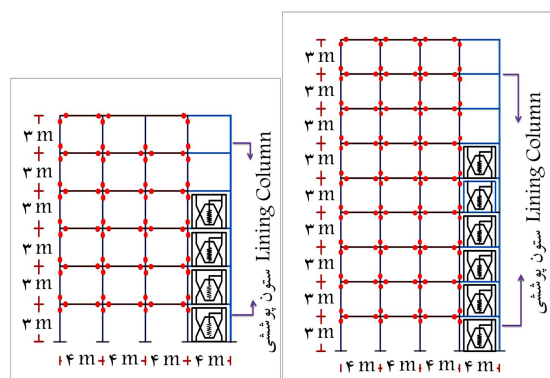
در تراز کف سازه، موجب کاهش بیشینه‌ی شتاب نسبی طبقه‌ی در پیکربندی NS نسبت به BS در تمامی طبقات به جز طبقه‌ی اول می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که اضافه شدن میراگرها به سازه با و بدون سیستم NSD به مقدار قابل توجهی شتاب طبقه‌ی را کاهش می‌دهد. مقایسه‌ی مذکور برای بیشینه‌ی شتاب طبقه‌ی نرمال‌شده‌ی سازه‌ی ۵ طبقه تحت زلزله‌های مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. در شکل مذکور، استفاده از ابزار سختی منفی موجب کاهش قابل توجه بیشینه‌ی شتاب طبقه‌ی می‌شود. به نحوی مشابه در شکل ۱۴، ابزار سختی منفی موجب کاهش برش پایه تحت تحریک‌های لرزه‌ی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود هم‌زمان میراگرهای مکانیکی و ابزار سختی منفی، بیشترین کاهش را در برش پایه‌ی سازه به همراه دارند.

۳.۷. بررسی پاسخ جابه‌جایی و تغییرشکل نسبی

شکل ۱۵، میزان جابه‌جایی و تغییرشکل نسبی بین طبقه‌ی سازه‌ی ۵ طبقه را در کلیه‌ی پیکربندی‌های نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه اضافه شدن NSD منتج به کاهش بیشینه‌ی شتاب طبقه‌ی و متعاقب آن برش پایه می‌شود، اما موجب افزایش جابه‌جایی و تغییرشکل نسبی طبقه‌ی اول و دوم سیستم سازه‌ی می‌شود. علت این امر کاهش سختی جانبی به دلیل وجود سیستم NSD در طبقه‌ی همکف است. این موضوع باعث می‌شود که با کاهش انرژی انتقالی به ترازهای بالاتر، جابه‌جایی نسبی کمتری در طبقات بالاتر اتفاق بیفتد و آثار تغییرشکل ثانویه

جدول ۶. خلاصه‌ی شبیه‌سازی پیکربندی‌های مختلف سازه‌ی ۵ طبقه تحت تحریک‌های مختلف.

شاخص بازدهی	نوع سیستم	Duzce ۰۰۰	Duzce ۰۹۰	Hector Mine ۰۰۰	Hector Mine ۲۷۴	Imperiall Vally ۲۶۲	Imperiall Valley ۳۵۲	Northridge ۰۰۹	Northridge ۲۷۹
J_1	BS	۰/۴۱۸	۰/۴۸۶	۱/۰۱۷	۱/۰۲۳	۰/۷۵۵	۰/۹۳۴	۱/۱۷۴	۱/۰۹۴
	PS	۰/۳۷۵	۰/۴۳۴	۰/۴۹۲	۰/۹۵۳	۰/۴۹۲	۰/۶۲۷	۱/۰۶۲	۰/۸۶۴
	NS	۰/۶۱۵	۰/۴۴۴	۰/۵۳۸	۰/۸۷۲	۰/۹۶۴	۰/۹۵۳	۰/۹۴۲	۰/۶۳۹
	AS	۰/۴۴۸	۰/۳۵	۰/۳۹۱	۰/۷۲۷	۰/۷۴۲	۰/۷۳۴	۰/۸۴۹	۰/۶۵۵
J_2	BS	۴/۹۴۴	۲/۹۷۳	۲/۱	۵/۹۶	۵/۲۳۲	۳/۶۴۹	۴/۹۳۲	۵/۸۷۸
	PS	۳/۳۰۳۶	۳/۱۱۵	۲/۶۷۷	۳/۶۰۶	۳/۷۲۱	۲/۷۹۶	۳/۳۷۳۲	۳/۷۴۷
	NS	۲/۹۷۳	۱/۵۱۲	۲/۱	۲/۸۸	۳/۷۵۷	۲/۳۳۱	۲/۹۹۹	۳/۱۷۳
	AS	۲/۳۷۳	۱/۷۹۲	۱/۹۷۱	۲/۵۵	۲/۳۷۸	۱/۹۲۳	۱/۸۹	۲/۶۳۹
J_3	BS	۰/۶۲۸	۰/۴۸۴	۱/۰۷	۱/۴۲۸	۰/۷۷۴	۰/۹۵۱	۱/۰۸۷	۰/۹۵۴
	PS	۰/۴۷۲	۰/۴۶۷	۰/۷۷۸	۱/۰۷۱	۰/۵۰۱	۰/۷۹	۱/۰۰۴	۰/۸۷۴
	NS	۰/۴۵۷	۰/۲۴۹۳	۰/۳۹۵	۰/۷۱۹	۰/۷۴۴	۰/۵۵۶	۰/۵۱۶	۰/۳۷۵
	AS	۰/۳۳۴	۰/۳۳۴	۰/۲۸۵	۰/۴۹۲	۰/۵۴۹	۰/۴۴۸	۰/۵۴۹	۰/۴۲۶
J_4	BS	۰/۷۷	۰/۹۴	۱/۸۸	۲/۴۳	۱/۵۲	۱/۷۶	۲/۲۷	۲/۰۲
	PS	۰/۶۳	۰/۸۲	۱/۴۴	۱/۷۳	۰/۹۴	۱/۲۷	۱/۹۱	۱/۶۱
	NS	۱/۱	۰/۸۶	۱/۰۳	۱/۶۶	۱/۸۷	۱/۸۶	۱/۶۲	۱/۱۵
	AS	۰/۸۳	۰/۶۳	۰/۷۶	۱/۳۶	۱/۳۱	۱/۳۹	۱/۵۶	۱/۱۱



شکل ۱۶. نمای از توزیع ابزار سختی منفی در طبقات مدل‌های غیرخطی.

۱۰. قرارگیری ابزار سختی منفی (NSD) در مدل‌های

غیرخطی و معرفی پیکربندی‌ها

دستگاه NSD مورداستفاده در سازه‌ها، مربوط به المان‌ها و مؤلفه‌های آزمایشگاهی توسعه‌یافته در نوشتاری در سال ۲۰۱۳^[۷] بوده و از آن برای بررسی رفتار مدل‌های سازه‌یی استفاده شده است. مشخصات هندسی و نیروی تولیدی دستگاه NSD در جدول ۱ معرفی شده است. رفتار سازه‌ی پایه (BS) بدون حضور ابزار با رفتار سازه‌یی با حضور ابزار (NS) در دو مدل مختلف، بررسی و مقایسه شده است.

می‌دهد. شاخص J_1 برای رکورد Duzce^{۰۰۰} با افزایش جزئی همراه است که علت آن افزایش انرژی ورودی به سازه در پیکربندی AS به دلیل نزدیکی دوره‌های تناوب غالب لرزه‌یی و دوره‌ی تناوب ارتعاشی طبیعی است. در پیکربندی ذکرشده، شاخص شتاب سازه‌ی J_2 به کمتر از ۵٪ می‌رسد. در این خصوص شاخص J_3 دامنه‌ی کاهش در برش پایه بین ۳٪ تا ۶٪ و شاخص نیروی تجربه‌شده توسط ستون‌ها (J_4) بین ۱۵٪ تا ۶٪ کاهش می‌یابد.

۹. ارزیابی مدل‌های غیرخطی سازه‌یی

مدل‌های مورداستفاده براساس سیستم سازه‌یی قاب خمشی با تعداد طبقات ۵ (به ارتفاع ۱۵ متر) و ۸ (به ارتفاع ۲۴ متر) هستند. در پژوهش حاضر، از آنجا که هدف تعیین توزیع تقاضای لرزه‌یی در سازه‌های منظم است، از قاب‌های دو بُعدی ۳ دهانه‌ی شرقی سازه استفاده و همان‌طورکه در نوشتاری در سال ۲۰۰۲^[۱۲] اشاره شده است، انتظار می‌رود قاب‌های دو بُعدی منظم در نظر گرفته‌شده (شکل ۱۶)، پارامترهای پاسخ کلی مانند تغییر مکان نسبی بام و پارامترهای پاسخ محلی مانند چرخش در سطح اعضا را در سازه‌ی سه بُعدی واقعی نشان دهند. رفتار غیرخطی المان‌های سازه‌یی سیستم براساس مدل اصلاح‌شده‌ی ایبار-کراوینگر طراحی شده است.^[۱۳] در جدول ۷، مقاطع مورداستفاده در مدل‌های غیرخطی مشاهده می‌شود.

جدول ۷. مشخصات مقاطع مورد استفاده در مدل‌های غیرخطی.

قاب خمشی ویژه‌ی ۵ طبقه		
طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
۵	$C20 \times 20 \times 1,5$	IPE240
۴	$C20 \times 20 \times 1,5$	IPE240
۳	$C25 \times 25 \times 1,5$	IPE270
۲	$C25 \times 25 \times 1,5$	IPE270
۱	$C25 \times 25 \times 1,5$	IPE270

قاب خمشی ویژه‌ی ۸ طبقه		
طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
۸	$C25 \times 25 \times 1,5$	IPE240
۷	$C25 \times 25 \times 1,5$	IPE240
۶	$C30 \times 30 \times 1,5$	IPE270
۵	$C30 \times 30 \times 1,5$	IPE270
۴	$C30 \times 30 \times 1,5$	IPE270
۳	$C32 \times 32 \times 2$	IPE300
۲	$C32 \times 32 \times 2$	IPE300
۱	$C32 \times 32 \times 2$	IPE300

جدول ۸. مقادیر کمیته، متوسط و بیشینه‌ی ۳ پارامتر مربوط به رکورد حوزه‌ی دور FEMA-P695 [۱۴].

پارامتر	کمیته	متوسط	بیشینه
بزرگا	۶/۵	۷	۷/۶
$PGA_{max}(g)$	۰/۲۱	۰/۴۳	۰/۸۲
فاصله‌ی کانونی از مرکز زمین لرزه (km)	۱۱/۱	۱۶/۴	۲۶/۴

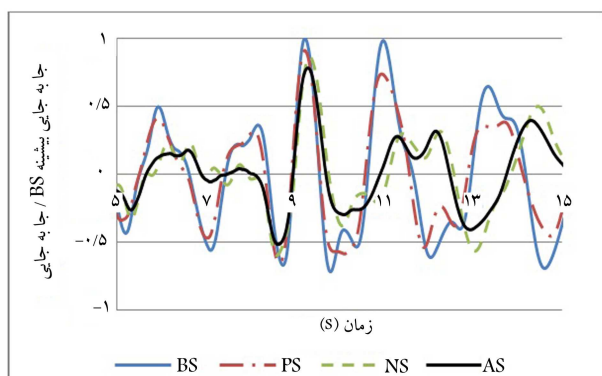
۱۳. منحنی‌های شکست

منحنی‌های شکست^{۱۲} را می‌توان از روی نمودارهایی که توزیع تقاضا را در یک سطح مشخص از شدت حرکت زمین نشان می‌دهند، مانند منحنی‌های IDA به‌دست آورد. مهم‌ترین و پرکاربردترین منحنی‌های شکست، منحنی‌های مربوط به سطح فروریزش کلی سازه هستند. فروریزش در اینجا به معنی حالت حدی نهایی است که در آن ناپایداری دینامیکی جانبی در یک یا چند طبقه از سازه رخ داده است. برای به‌دست آوردن منحنی‌های شکست از پارامتر تقاضای تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ی استفاده شده است. فروریزش سازه بر پایه‌ی ظرفیت متناظر با شاخص شدت به‌دست‌آمده از هر رکورد در زمان ناپایداری کلی دینامیکی به علت زوال سختی با مقاومت و یا آثار $P - \Delta$ است. این مقادیر برای هر رکورد از نقاطی که در آن منحنی‌های IDA به‌صورت خط راست درآمده‌اند، برداشت می‌شود و سپس با اختصاص یک تابع توزیع تجمعی لگ نرمال به‌دست می‌آید. [۱۵]

۱۴. رفتار غیرخطی مدل‌های سازه‌ی

۱۴.۱. بررسی نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی

شکل‌های ۱۷ الی ۱۹، به ترتیب نمودار تاریخچه‌ی زمانی نسبت جابه‌جایی، برش پایه و پاسخ شتاب بیشینه‌ی سازه‌ها با پیکربندی‌های متفاوت به سازه‌ی اصلی را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دستگاه سختی منفی، بهترین عملکرد را در کاهش برش پایه از خود نشان می‌دهد و می‌تواند به میزان قابل توجهی برش پایه‌ی سیستم را کاهش دهد. در مورد کاهش پاسخ شتاب نیز با وجود دستگاه سختی منفی، پاسخ‌های کمتری نسبت به سازه‌ی اصلی و همچنین سازه با وجود میراگر مشاهده می‌شود. در کنترل جابه‌جایی سازه به همراه دستگاه سختی منفی، پاسخی



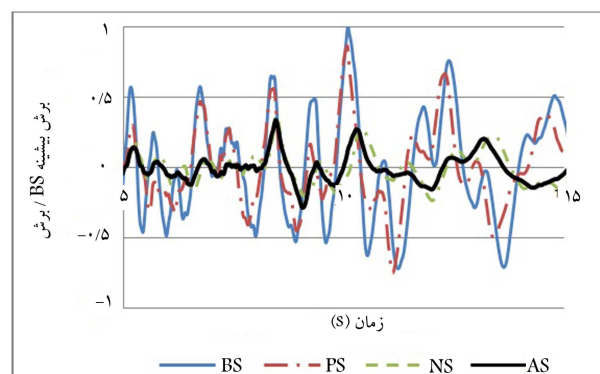
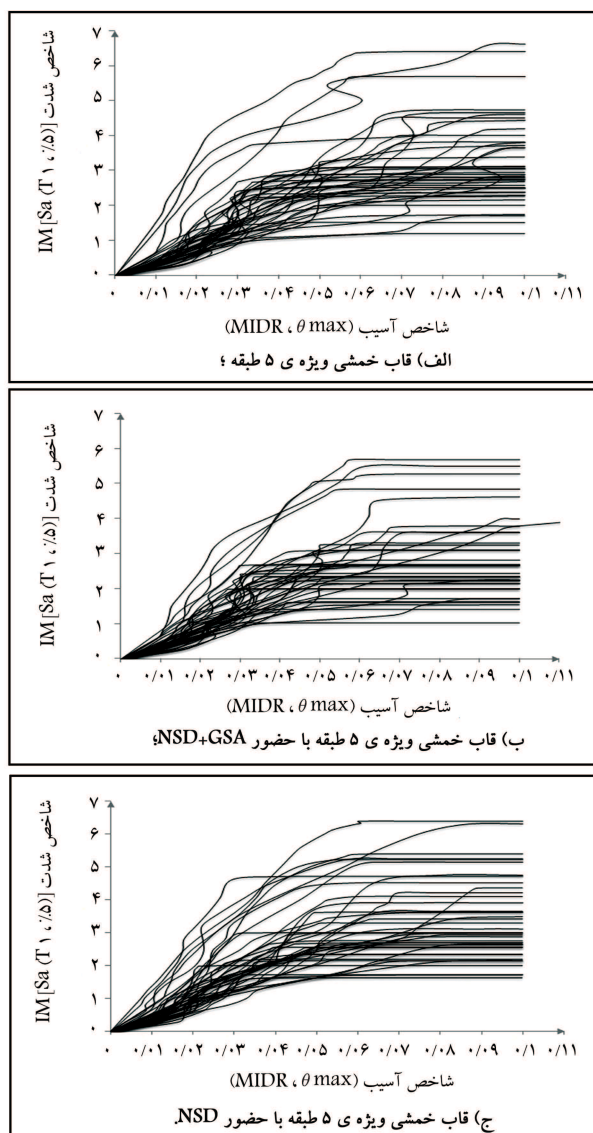
شکل ۱۷. پاسخ نسبی تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی سازه‌ها با پیکربندی‌های مختلف به سازه‌ی پایه در رکورد نورث‌ریج.

۱۱. تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی IDA

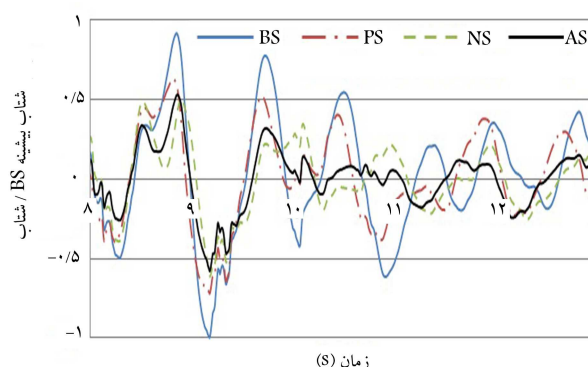
تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)^۸، آنالیزی پارامتریک است که در چند فرم مختلف برای ارزیابی بازدهی کلی سیستم‌های سازه‌ی تحت بارهای لرزه‌ی استفاده می‌شود. در نوشتار حاضر، از مفاهیم بنیادین و الگوریتم تحلیلی از چهارچوب ارائه شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، استفاده شده است. [۱۲] پارامتر معیار شدت (IM)^۹، شتاب طیفی متناظر میرایی ۵٪ در دوره‌ی تناوب مد اول ($Sa(T_1, 5\%)$) و پارامتر معیار خرابی (DM)^{۱۰} نیز بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ی (MIDR)^{۱۱} تعریف می‌شود. شرایط حد خرابی کاهش شیب منحنی آنالیز دینامیکی افزایشی به ۲۰٪ شیب محدوده‌ی ارتجاعی و یا رسیدن مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ی به مقدار ۱۰٪ است. [۱۲]

۱۲. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

در حالت ایده‌آل برای ارزیابی تقاضای لرزه‌ی در سازه به مجموعه‌ی از رکوردها، که در برگرفته‌ی خطر لرزه‌ی با دوره‌های بازگشت‌های مختلف باشند، نیاز است تا شدت محتوای بسامدی و طول مدت زمان زمین‌لرزه‌ی محتمل در محل ساخت‌گاه را نمایندگی کنند. جهت ارزیابی فروریزش از ۲۲ جفت رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور در جدول A-4C مربوط به دستورالعمل FEMA-P695 در بخش حاضر استفاده شده است. مقادیر کمیته، متوسط و پارامترهای مؤثر در زلزله‌های رکوردهای انتخابی در جدول ۸ ارائه شده است. [۱۳]



شکل ۱۸. پاسخ نسبی تاریخچه زمانی برش پایه‌ی سازه‌ها با پیکربندی‌های مختلف به سازه‌ی پایه در رکورد نورث‌ریج.



شکل ۱۹. پاسخ نسبی تاریخچه زمانی شتاب سازه‌ها با پیکربندی‌های مختلف به سازه‌ی پایه در رکورد نورث‌ریج.

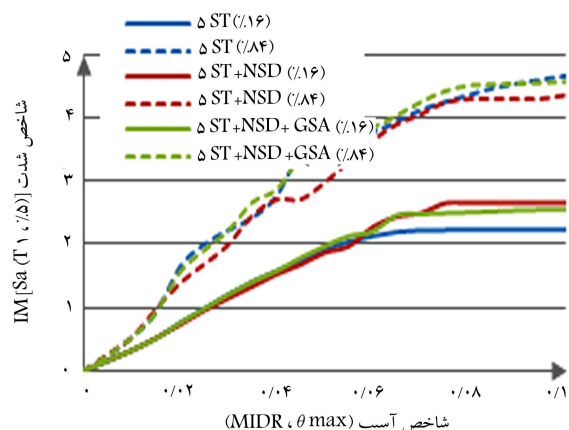
نزدیک به سازه به همراه میراگر به دست می‌آید که با توجه به کاهش قابل ملاحظه‌ی برش پایه و شتاب سازه، امری قابل قبول است.

۲.۱۴. بررسی نمودارهای IDA

در شکل ۲۰، مقایسه‌ی نمودارهای IDA چند رکوردی برای قاب خمشی ویژه ۵ طبقه برای پیکربندی‌های مختلف مشاهده می‌شود. مطابق شکل مذکور، توزیع ابزار سختی منفی در طبقات سازه در هر دو حالت به‌کارگیری و عدم به‌کارگیری GSA در مقایسه با سازه‌ی BS با افزایش شاخص شدت (شتاب طیفی $IM[Sa(T_1, 5\%)]$) همراه است. علت این امر را می‌توان در کاهش مقدار تغییرشکل طبقات سازه در اثر استفاده از ابزار سختی منفی دانست. مقایسه‌ی مجموعه‌ی نمودارها در شکل ۲۰، به پراکندگی بیشتر نمودارهای IDA در سازه‌هایی با سیستم سختی منفی نسبت به سازه‌ی پایه BS اشاره می‌کند. علت این موضوع افزایش سختی و شیب ناحیه‌ی کشسان نمودارها در اثر عملکرد هم‌زمان ابزار سختی منفی و سازه است. همچنین در مقایسه‌ی پارامتر شاخص شدت دو نمودار مذکور، پیکربندی سازه بدون حضور GSA رفتار بهتری را نسبت به پیکربندی سازه با حضور GSA نشان می‌دهد که علت اصلی آن افزایش نیروی سختی منفی تولیدی به‌وسیله‌ی ابزار در اثر حذف GSA است. این موضوع باعث افزایش نسبی شاخص شدت نسبت به پیکربندی سازه با حضور GSA می‌شود.

شکل‌های ۲۱ و ۲۲، میانگین ۱۶ و ۸۴ درصدی نمودارهای IDA سازه‌های ۵ و ۸ طبقه را نشان می‌دهند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که به‌کارگیری ابزار

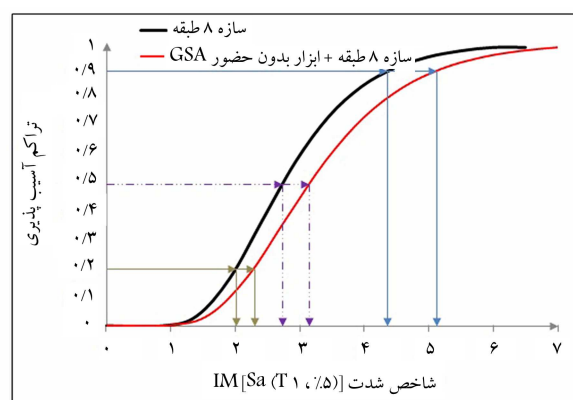
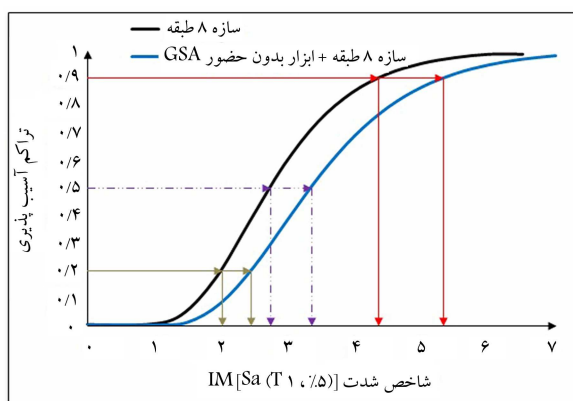
شکل ۲۰. نمودار IDA چند رکوردی برای قاب خمشی ویژه ۵ طبقه برای پیکربندی‌های مختلف.



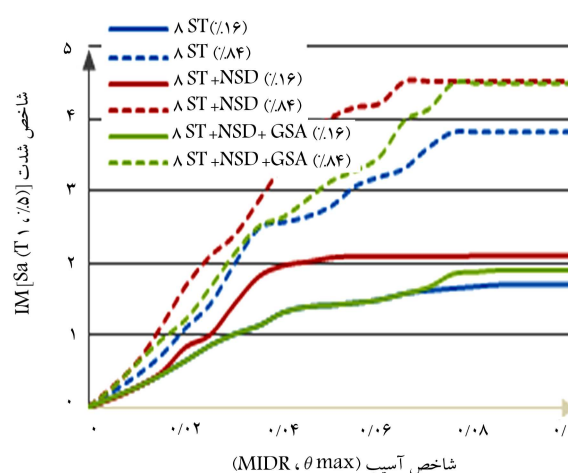
شکل ۲۱. میانگین ۱۶ و ۸۴ درصد منحنی‌های IDA چند رکوردی برای قاب خمشی ۵ طبقه‌ی ویژه برای پیکربندی‌های مختلف.

جدول ۹. مقایسه‌ی مقادیر منحنی‌های شکست در پیکربندی‌های مختلف نسبت به سازه‌ی پایه.

شاخص شدت $IM[Sa(T^1, \%.5)](m/s^2)$						سطح احتمال آسیب
مدل غیر خطی ۸ طبقه			مدل غیرخطی ۵ طبقه			
BS+NSD	BS+(NSD+GSA)	BS	BS+NSD	BS+(NSD+GSA)	BS	
۲,۴۵۱ (٪۲۱,۶)	۲,۲۹۱ (٪۱۴)	۲,۰۱۵	۳,۵۰۲ (٪۳۴,۷)	۳,۱۸۶ (٪۲۲,۵)	۲,۶	۰,۲
۳,۳۵ (٪۲۲,۷)	۳,۱۵ (٪۱۵,۳)	۲,۷۳۱	۴,۵۹۲ (٪۲۷,۱)	۴,۱۸۲ (٪۱۵,۸)	۳,۶۱۲	۰,۵
۵,۳۱ (٪۲۲)	۵,۱۱ (٪۱۷,۴)	۴,۳۵۱	۶,۹۸۸ (٪۱۶,۹)	۶,۳۳۱ (٪۶)	۵,۹۷۹	۰,۹



شکل ۲۳. مقایسه‌ی منحنی‌های شکست مدل غیرخطی سازه‌های ۵ و ۸ طبقه.



شکل ۲۲. میانگین ۱۶ و ۸۴ درصد منحنی‌های IDA چند رکوردی برای قاب خمشی ۸ طبقه‌ی ویژه برای پیکربندی‌های مختلف.

سختی منفی در طبقات و کاهش پیشینه‌ی تغییر مکان نسبی میان طبقه‌ی (MIDR) و در نتیجه افزایش ظرفیت فروریزش سازه را به همراه دارد. نتایج نشان می‌دهد پیکربندی سازه در حضور NSD و بدون GSA، عملکرد بهتری نسبت به پیکربندی سازه با حضور GSA دارد. همان‌طور که مشاهده شد با تشکیل مفاصل خمیری در سازه، تأثیرپذیری ابزار سختی منفی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ی حاضر، به دلیل رفتار نرم‌شوندگی ناشی از به‌کارگیری ابزار سختی منفی، معیار ۱۰٪ جابه‌جایی بین طبقه‌ی مکانیزم حاکم بر فروریزش مدل‌های غیرخطی بوده است.

۱۵. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، با معرفی ابزار سختی منفی (NSD)، عملکرد تطبیقی آن در سازه‌ها توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در مطالعه‌ی حاضر، به ارزیابی اثر NSD در عملکرد لرزه‌ی قاب‌های خمشی فولادی در سطوح عملکردی مختلف از جمله سطح فروریزش پرداخته شده است. در این راستا، ابزار NSD در ترازهای مختلف در یک قاب خمشی ویژه‌ی فولادی ۵ و ۸ طبقه و در محیط نرم‌افزار Sap۲۰۰۰ و OpenSees تحلیل و نتایج آن با قاب خمشی پایه مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

- ابزار سختی منفی در طبقات سازه موجب افزایش شاخص شدت $IM[Sa(T_1, 5\%)]$ (شتاب طیفی) و کاهش احتمال فروریزش و در نتیجه افزایش بازدهی سیستم نسبت به سازه‌ی پایه می‌شود.

۳.۱۴. بررسی منحنی‌های شکست

در بخش حاضر، برای بیان بهتر تأثیر ابزار سختی منفی در رفتار غیرخطی و حد فروریزش سازه‌ها از منحنی‌های شکست استفاده شده است. مطابق با شکل ۲۳، ضعیف‌شدگی ظاهری مدل‌های غیرخطی، نمودارهای شکست را تحت تأثیر قرار داده است، به‌طوری که حساسیت رفتار سازه برای مقادیر مختلف شاخص آسیب قابل ملاحظه‌ی است. برای بیان بهتر این حساسیت، از ۳ سطح احتمال آسیب ۲۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ استفاده شده است. این مقادیر در جدول ۹، برای هر دو مدل غیرخطی برای پیکربندی‌های مختلف دسته‌بندی شده است. در این حالت نیز عملکرد پیکربندی سازه با حضور ابزار سختی منفی بدون GSA بهتر از پیکربندی سازه با حضور GSA است. بهبود شاخص شدت در اثر به‌کارگیری سیستم سختی منفی برای هر دو سازه و برای تمامی سطوح احتمال آسیب به جز یک حالت، بیش از ۱۴٪ به‌دست آمده است.

- ابزار سختی منفی در کاهش جابه‌جایی نسبی را کاهش می‌دهد.
- پیکربندی سازه با حضور NSD بدون GSA، عملکرد مناسب‌تری در کاهش احتمال فروریزش سازه نسبت به سایر پیکربندی‌ها دارد. به‌کارگیری GSA موجب کاهش نیروی تولیدی ابزار سختی منفی می‌شود که این امر باعث کاهش بازدهی ابزار سختی منفی در کنترل تغییرشکل طبقات می‌شود.
- محدوده‌ی رفتار خطی سازه با توزیع ابزار سختی منفی در طبقات نسبت به سازه‌ی پایه افزایش می‌یابد که این امر نشانگر اثر مناسب به‌کارگیری ابزار NSD است.
- در حالت غیرارتجاعی، مقایسه‌ی منحنی‌های پردازش‌شده از نمودارهای IDA در پیکربندی‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که رفتار غیرخطی سازه، بازدهی

پانویس‌ها

1. negative stiffness device
2. pseudo-negative stiffness
3. convex pendulum bearings
4. national science foundation
5. push
6. simulated yielding displacement
7. truss element
8. incremental dynamic analysis
9. intensity measure
10. damage measure
11. maximum interstory drift ratio
12. fragility curve

منابع (References)

1. Symans, M., Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and et al. "Adaptive negative stiffness: A new structural modification approach for seismic protection", *5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, **5**(103), pp 155-167 (2011).
2. Molyneaux, W.G. "Supports for vibration isolation", Aeronautical Research Council, Great Britain (1957).
3. Platus, D.L. "Vibration isolation system", US Patent No.6676101B2, Washington, D.C.: US Patent and Trademark Office (2004).
4. Iemura, H. and Pradono, M.H. "Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge", *Journal of Structural Control*, **10**(19), pp. 187-209 (2003).
5. Iemura, H., Igarashi, A., Pradono, M.H. and et al. "Negative stiffness friction damping for seismically isolated structure", *Structural Control and Health Monitoring*, **10**(12), pp. 775-791 (2006).
6. Iemura, H. and Pradono, M.H. "Advances in the development of pseudo-negative stiffness dampers for seismic response control", *Structural Control and Health Monitoring*, **16**(29), pp. 1545-2255 (2009).
7. Sarlis, A.A.S., Pasala, D.T.R., Reinhorn, A.M. and et al "Seismic response control of structures using a novel adaptive passive negative stiffness device", Technical Report of MCEER-No. 13-0004 (2013).
8. Sarlis, A.A.S., Pasala, D.T.R., Reinhorn, A.M. and et al. "Negative stiffness device for seismic protection of structures", Technical Report of MCEER-No. 13-0005 (2013).
9. Atarry, N., Sarlis, A.A.S., Pasala, D.T.R. and et al. "Seismic production of highway bridges with negative stiffness device", Technical Report of MCEER-No. 13-0013 (2014).
10. Vamvatsikos, D. and Cornell, C.A. "Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**(1), pp. 491-514 (Mar., 2002).
11. Federal Emergency Management Agency-ASCE. FEMA P695, "Quantification of building seismic performance factors", Washington, DC: Federal Emergency Management Agency-ASCE (2009).
12. Yun, S.Y. and Foutch, D.A. "Modeling of steel moment frames for seismic loads", *Journal of Constructional Steel Research*, **58**(5-8), pp. 529-564 (2002).
13. Ibarra, L.F., Medina, R.A. and Krawinkler, H. "Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**(12), pp. 1489-1511, 1489-15119-1511 (2005).
14. Symans, M., Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. and et al. "Adaptive negative stiffness: A new Structural modification approach for seismic protection", *5th World Conference On Structural Control and Monitoring*, **5**(103), pp. 155-167 (2011).
15. Zareian, F. "Simplified performance-based earthquake engineering", Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford CA (2006).