

ارزیابی شاخص خرابی و کاهش مقاومت قاب خمشی بتن آرمه با استفاده از روش سطح پاسخ

Research Note

علی خیرالدین (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی جهان (استادیار)

گروه مهندسی صنایع، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

علیرضا یطرف* (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار سازه، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. اما بررسی هم‌زمان این پارامترها نیاز به تحلیل آماری مناسب دارد. در این نوشتار، تأثیر هم‌زمان نسبت ابعاد ستون‌ها، آرماتور طولی، خاموت‌ها و ضریب محصورشدگی بتن در رفتار غیرخطی یک ساختمان قاب خمشی بتن آرمه ۵ طبقه، تحت جابه‌جایی رفت و برگشتی با استفاده از نرم‌افزار غیرخطی IDARC تحلیل و با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بررسی جداگانه‌ی عوامل، به دلیل حذف اثرات متقابل، نتیجه‌ی مطلوبی به دست نمی‌دهد. در محدوده‌ی رفتار خطی، شاخص خرابی تابعی از نسبت ابعاد ستون، آرماتور طولی، و ضریب محصورشدگی است. اما در محدوده‌ی رفتار غیرخطی، فقط تابعی از آرماتور طولی و نسبت ابعاد ستون است. نسبت ابعاد ستون، آرماتور طولی و ضریب محصورشدگی در میزان تغییرات سختی جانبی سازه تأثیرگذارند، ولی فاصله‌ی خاموت‌ها تأثیری در آن ندارد. روابط به دست آمده، قابلیت تخمین شاخص خرابی را به طراح سازه می‌دهد.

واژگان کلیدی: رفتار غیرخطی، شاخص خرابی، قاب خمشی بتن آرمه، بارگذاری رفت و برگشتی، روش سطح پاسخ.

۱. مقدمه

تغییر ضوابط آیین‌نامه‌های طراحی ایجاب می‌کند که رفتار سازه‌های بتن آرمه، که براساس آیین‌نامه‌های پیشین طراحی شده‌اند و الزامات ویرایش جدید آیین‌نامه را برآورده نمی‌کنند، مجدداً مورد بررسی قرار گیرد. از سویی محدودیت‌های معماری، تمایل به استفاده از ستون‌های با عرض کم (مستطیلی) را نسبت به ستون‌های مربعی افزایش داده است. به همین دلیل در سال‌های اخیر، بررسی عوامل فوق بر عملکرد لرزه‌ی سازه‌های بتن آرمه، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است.^[۱-۵]

پژوهش‌های انجام‌شده درخصوص رفتار لرزه‌ی قاب‌های بتن آرمه، عمدتاً تأثیر یک یا دو عامل را در رفتار لرزه‌ی قاب بررسی کرده و تأثیر تداخلی عوامل مختلف را بر هم به‌طور جامع بررسی نکرده‌اند. از جمله‌ی این موارد می‌توان به پژوهشی در سال ۲۰۰۳ اشاره کرد، که در آن نشان داده شده است که افزودن سنجاک یا خاموت لوزی به خاموت مربعی، میزان استهلاک انرژی را کاهش می‌دهد، ولی تنش

تسلیم آرماتور خاموت، تأثیر چندانی در میزان استهلاک انرژی ندارد.^[۶] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال به مقایسه‌ی رفتار ستون‌ها در قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری کم و متوسط تحت بارگذاری رفت و برگشتی پرداخته و نشان داده شده است که در جابه‌جایی جانبی کمتر از ۱٪ ارتفاع، میزان استهلاک انرژی در ستون‌های قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط بیشتر از قاب خمشی با شکل‌پذیری کم است.^[۷] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۵ نیز به بررسی تأثیر طول مهار آرماتور ستون پرداخته و نشان داده شده است که پوشش آرماتور، نقش اساسی در پاسخ سازه در ناحیه‌ی پس از تسلیم ایفا می‌کند.^[۸] در پژوهش‌های ذکرشده، تأثیر نسبت ابعاد ستون و میزان آرماتور طولی آن در رفتار لرزه‌ی سازه بررسی نشده است. پژوهشگران دیگری نیز (۲۰۰۵) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر میزان آرماتور طولی تیرها و همچنین میزان مهار جانبی آنها در پاسخ اتصال تیر به ستون به بارگذاری رفت و برگشتی پرداخته و با ترسیم منحنی هیستریزس پاسخ برش پایه بر حسب جابه‌جایی جانبی، کاهش سختی سازه نسبت به سختی اولیه در هر گام بارگذاری را به دست آورده‌اند. بررسی ایشان نشان داده است که در جابه‌جایی جانبی بیش از ۱٫۵٪ ارتفاع، سختی سازه به شدت کاهش می‌یابد و

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۷، پذیرش ۱۳۹۳/۴/۱۶

در این پژوهش، نیز برای در نظر گرفتن اثر هم‌زمان عوامل مؤثر در رفتار لرزه‌ی قاب خمشی بتن‌آرمه، از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار آماری $\text{Design Expert } V_7^{\circ}$ استفاده شده است. عواملی که در این نوشتار مطالعه شده‌اند، عبارت‌اند از: نسبت طول به عرض ستون‌ها، (برای بررسی تأثیر ابعاد ستون‌های مستطیلی در رفتار سازه) میزان آرماتور طولی موجود در ستون‌ها، فاصله‌ی خاموت‌ها و میزان محصورشدگی آرماتورهای طولی توسط خاموت‌ها. نتیجه‌ی این پژوهش، تعیین تأثیر عوامل فوق در شاخص خرابی و میزان کاهش سختی سازه تحت بار رفت و برگشتی است.

۲. فرایند و روش تحلیل

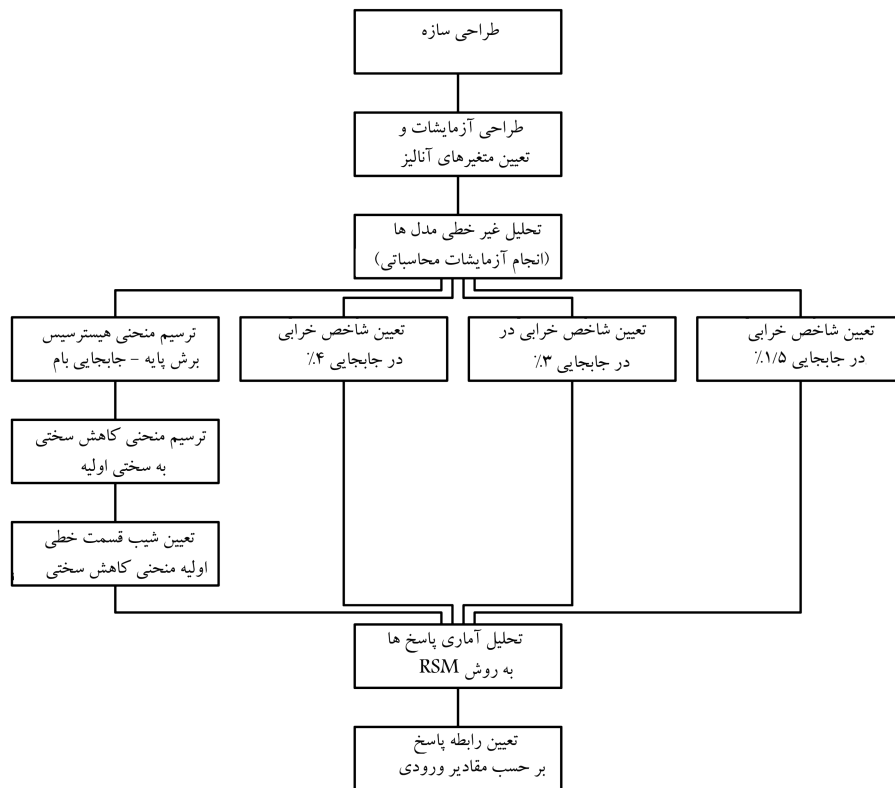
۱.۲. فرایند تحلیل

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ی ساختمان‌های قاب خمشی بتن‌آرمه، یک الگوریتم تحلیل مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. در ابتدا مدل‌های اولیه بر مبنای آیین‌نامه‌ی ۴-۳-۲۳/۳-۰۴، CSA A^[۱۱] و سپس آزمایش‌های مورد نیاز به روش RSM با نرم‌افزار $\text{Design Expert } V_7^{\circ}$ طراحی شده‌اند (مجموعاً ۲۵ آزمایش محاسباتی). سپس ۲۵ مدل، منطبق بر آزمایش‌های طراحی شده برای برنامه‌ی غیرخطی IDARC-2D Version 5/5 آماده و آنالیز غیرخطی تحت بار رفت و برگشتی روی آن‌ها انجام شده است. بار رفت و برگشتی مطابق شکل ۲، به طبقه‌ی بام مدل اعمال شده است.^[۱۲] با استفاده از نتایج این تحلیل‌ها، پاسخ‌های لرزه‌ی مدل‌ها به دست آمده است.

تحلیل آماری نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار $\text{Design Expert } V_7^{\circ}$ انجام شده و با استفاده از نتایج آن، رابطه‌ی برای هر یک از مقادیر شاخص خرابی

منحنی هیستریزیس به حالت فشرده و گلوبی تبدیل می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی رفتار غیرشکل‌پذیر است و این نتیجه به دست آمده است که این مسئله ناشی از ضعف سازه به دلیل محصورشدگی ناکافی گره اتصال، پس از بخدادن ترک‌های گسترده در اتصال است.^[۹]

در کلیه‌ی پژوهش‌های معرفی‌شده، تأثیر ۱ یا ۲ عامل در رفتار سازه بررسی شده است. ثابت در نظر گرفتن سایر عوامل تأثیرگذار باعث می‌شود که تأثیر متقابل عوامل در رفتار سازه قابل تشخیص نباشد، حال آنکه در دنیای رقابتی امروز، روش‌های کارآمدتری برای آزمون و ارزیابی هم‌زمان عوامل متعدد مورد نیاز است. استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها در این راستا، و برای پرهیز از سعی و خطا، شناسایی هدفمند مسیرهای بهبود می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود.^[۱۰] این نوشتار به چگونگی استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، که از روش‌های شناخته‌شده‌ی طراحی آزمایش‌هاست، در جهت افزایش کارآمدی مدل‌سازی عددی، آنالیز حساسیت متغیرها، و تحلیل تأثیر متقابل عوامل با هدف ایجاد یک سیستم مناسب پشتیبان تصمیم‌گیری می‌پردازد. مشکل اصلی در انجام شبیه‌سازی‌های غیرساختاریافته، صرف‌نظر از حجم بالای آزمایش‌های عددی (تحلیل ۴ عامل که هر یک در ۵ سطح تعریف شده‌اند، نیاز به انجام $5^4 = 625$ آزمایش دارد)، تجزیه و تحلیل نتایج و شناسایی هدفمند متغیرهای تأثیرگذار است. روش‌های طراحی آزمایش‌ها که در ابتدا برای استفاده در مهندسی کشاورزی ابداع شده است، امروزه در حد وسیعی در علوم فیزیک، مهندسی، پزشکی و جامعه‌شناسی، برای ارزیابی سیستم‌ها کاربرد دارد.^[۱۱] روش‌های طراحی آزمایش‌ها در کاهش هدفمند تعداد آزمایش‌ها (به عنوان مثال تحلیل ۴ عامل، هر کدام در ۵ سطح، فقط با ۲۵ آزمایش در روش RSM)، باعث شده است که در سال‌های اخیر، این روش‌ها در پژوهش‌های مختلف پیرامون سازه‌های بتن‌آرمه به کرات مورد استفاده قرار گیرند.^[۱۲-۲۰]



شکل ۱. الگوریتم تحلیل.

جدول ۱. مشخصات تیرها در مدل‌ها.

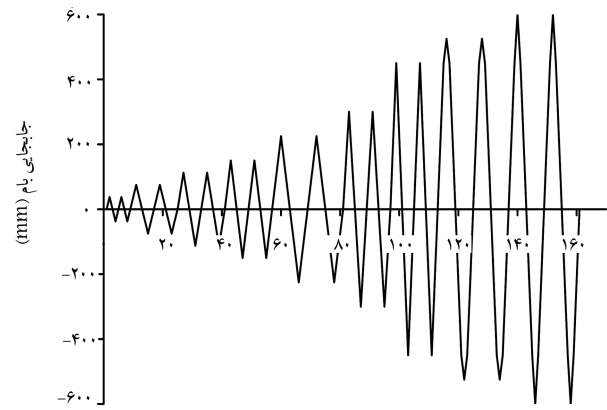
| طبقه | ارتفاع (cm) | عرض (cm) | آرماتور طولی بالا (cm) | آرماتور طولی پایین (cm) | فاصله‌ی خاموت از نمره ۸ (cm) |
|------|-------------|----------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| ۱ | ۴۰ | ۴۵ | ۲۰ | ۱۰ | ۷٫۵ |
| ۲ | ۴۰ | ۴۵ | ۲۲ | ۱۱ | ۷٫۵ |
| ۳ | ۴۰ | ۴۰ | ۲۰ | ۱۰ | ۷٫۵ |
| ۴ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۶ | ۸ | ۷٫۵ |
| ۵ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۱ | ۷ | ۷٫۵ |

نسبت فاصله‌ی خاموت موجود به فاصله‌ی خاموت مورد نیاز (۱۲٫۵ cm)، برابر با $Sp/Sp = ۰٫۸, ۰٫۹, ۱٫۰, ۱٫۱, ۱٫۲$ و ضریب محصورشدگی بتن ستون نیز در ۵ حالت $CEFF = ۰٫۵, ۰٫۶۲۵, ۰٫۷۵, ۰٫۸۷۵, ۱$ گرفته است. این ضریب برای مقاطع مستطیلی، در پژوهشی در سال ۱۹۸۸ ارائه شده و تابعی از فاصله‌ی خاموت‌ها، تعداد قلاب‌های خاموت، فاصله‌ی عرضی قلاب‌ها، مساحت داخل خاموت‌ها (مساحت محصورشدگی) و چگالی آرماتور طولی است.^[۲۴] مقدار $۰٫۷۵$ ، نشان‌دهنده‌ی مقطع با خاموت مستطیلی و مقدار $۱٫۰$ ، نشان‌دهنده‌ی مقطع با ترکیب خاموت مستطیلی و لوزی است. برای مدل‌سازی بتن از منحنی تنش - کرنش هوگنستاد استفاده شده است. کرنش متناظر با f'_c برابر با $۰٫۰۰۲$ و کرنش نهایی برابر با $۰٫۰۰۳۵$ در نظر گرفته شده است. منحنی تنش - کرنش فولاد به صورت ۳ خطی (با در نظر گرفتن سخت‌شدگی مجدد) در نظر گرفته شده است. مقاومت نهایی، $۱/۴$ برابر تنش تسلیم و کرنش متناظر با شروع سخت‌شدگی مجدد برابر با $۰٫۰۰۳$ در نظر گرفته شده است. از مدل هیستریک پارک،^[۲۵] برای کلیه‌ی المان‌ها استفاده شده است. در این مدل، از اثر گویویی شدن صرف‌نظر شده و کاهش سختی و مقاومت در حد متوسط تعریف شده است.

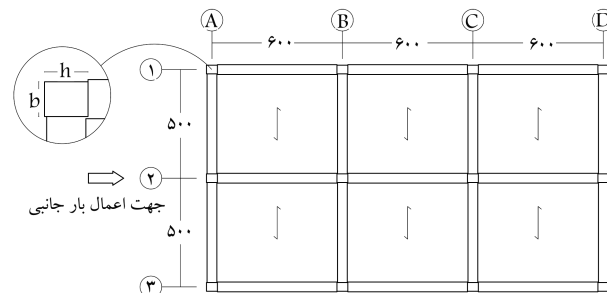
۳.۲. طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ

طراحی آزمایش‌ها شامل یک سری تغییرات آگاهانه در متغیرهای ورودی سیستم و تحلیل خروجی‌هاست. این روش‌های آماری هم برای آزمایش‌های فیزیکی و هم برای مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای قابل استفاده هستند. از روش سطح پاسخ معمولاً بعد از غربالگری عوامل و شناسایی عوامل مهم‌تر، به منظور ایجاد یک مدل ریاضی و با هدف پیش‌بینی و یا بهینه‌سازی اهداف استفاده می‌شود. جزئیات بیشتر راجع به روش سطح پاسخ، در تحقیقات سال ۲۰۰۹،^[۲۶] یافت می‌شود.

روش سطح پاسخ (RSM)، یک روش آماری برای تعیین رابطه‌ی بین چندین کمیت ورودی و یک یا چند کمیت پاسخ است. ایده‌ی اصلی این روش بر استفاده از یک سری آزمایش‌های طراحی شده برای حصول به مقدار پاسخ بهینه استوار است. مزیت این روش در کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز است. اما آزمایش‌ها به گونه‌ی انتخاب می‌شوند که خطای ناشی از کاهش تعداد آزمایش‌ها به مقدار کمینه برسد. در این مطالعه، به منظور طراحی مدل‌سازی‌ها و تجزیه و تحلیل آماری نتایج از نرم‌افزار Design Expert ۷٫۰، که یک برنامه‌ی قدرتمند برای طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج است، استفاده شده است. ۲۵ مدل پیشنهادی آن، طبق روش سطح پاسخ در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول مذکور، عامل ۱ یا A معرف نسبت طول به عرض ستون است، که شامل مقادیر ۰٫۵ تا ۱٫۵ است. عامل ۲ یا B ضریب محصورشدگی بتن است، که مقادیر ۰٫۵ تا ۱ به آن اختصاص داده شده است. عامل ۳ یا C نسبت آرماتور طولی موجود به آرماتور طولی مورد نیاز



شکل ۲. تاریخچه‌ی بارگذاری [۸].



شکل ۳. هندسه‌ی سازه.

در جابه‌جایی‌های جانبی ۱٫۵٪، ۳٪، ۴٪ و نیز کاهش سختی سازه بر حسب پارامترهای ورودی شامل: میزان آرماتور طولی، میزان خاموت، فاصله‌ی خاموت‌ها و میزان محصورشدگی به دست آمده است.

۲.۲. مشخصات مدل‌ها

با توجه به اینکه طیف وسیعی از ساختمان‌های با ارتفاع متوسط شامل ۵ طبقه هستند، لذا سازه‌ی مورد بررسی، یک ساختمان قاب خمشی ۳ دهانه‌ی ۵ طبقه با شکل‌پذیری متوسط است (شکل ۳). طول دهانه‌ی تیرها برابر با ۶ متر، فاصله‌ی قاب‌ها ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر است. این سازه منطبق بر آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های بتنی CSA A۲۳٫۳-۰۴ طراحی شده است.^[۲۱] در کلیه‌ی مدل‌ها، تیرهای قاب‌های جانبی، تحت بارگسترده‌ی دیوار و کف، مجموعاً برابر با $۲/۴ \text{ T/m}$ و قاب میانی تحت بارگسترده‌ی $۳/۵ \text{ T/m}$ قرار دارد. بارگذاری زلزله بر مبنای ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران، برای منطقه با زلزله‌خیزی شدید و بر روی خاک تیپ ۲ انجام شده است.^[۲۳] ضریب برش پایه برابر با $۰٫۰۹۶ = C$ است. مقاومت ۲۸ روزی بتن برابر با $f'_c = ۲۵ \text{ kg/cm}^۲$ و تنش تسلیم فولاد مصرفی، شامل آرماتور طولی و خاموت در تیرها و ستون‌ها برابر با $f_y = ۴۰۰۰ \text{ kg/cm}^۲$ در نظر گرفته شده است. مشخصات تیرها در کلیه‌ی مدل‌ها یکسان و مطابق جدول ۱ است.

برای ابعاد ستون‌ها، ۵ حالت با ممان اینرسی یکسان در نظر گرفته شده است (سختی کشسان کلیه‌ی مدل‌ها یکسان است). مشخصات کلیه‌ی ستون‌ها در جدول ۲ شرح داده شده است. دوره‌ی تناوب نخست کلیه‌ی مدل‌ها $T = ۱٫۱۷ \text{ Sec}$ است. علاوه بر ۵ حالت نسبت طول به عرض ستون، در این بررسی ۵ حالت نسبت آرماتور طولی موجود به آرماتور طولی مورد نیاز، برابر با $As/As_0 = ۰٫۸, ۰٫۹, ۱٫۰, ۱٫۱, ۱٫۲$ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین

جدول ۲. مشخصات ستون‌ها در مدل‌های مختلف.

| شماره خاموت | $h/b = ۱٫۵$ | | | $h/b = ۱٫۲۵$ | | | $h/b = ۱٫۰$ | | | $h/b = ۰٫۷۵$ | | | $h/b = ۰٫۵$ | | | طبقه موتور |
|----------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|--------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|---------------|
| | طول (cm) | عرض (cm) | آرماتور (cm ^۲) | طول (cm) | عرض (cm) | آرماتور (cm ^۲) | طول (cm) | عرض (cm) | آرماتور (cm ^۲) | طول (cm) | عرض (cm) | آرماتور (cm ^۲) | طول (cm) | عرض (cm) | آرماتور (cm ^۲) | |
| T8@۱۲٫۵ | ۲۳ | ۳۳٫۲ | ۴۹٫۸ | ۲۵ | ۳۸٫۱ | ۴۷٫۶ | ۲۵ | ۴۵ | ۴۵ | ۲۸ | ۵۵٫۸ | ۴۱٫۹ | ۳۰ | ۷۵٫۱ | ۳۷٫۸ | ۱ |
| | ۱۰ | ۳۳٫۲ | ۴۹٫۸ | ۱۲ | ۳۸٫۱ | ۴۷٫۶ | ۱۲ | ۴۵ | ۴۵ | ۱۴ | ۵۵٫۸ | ۴۱٫۹ | ۱۶ | ۷۵٫۱ | ۳۷٫۸ | ۲ |
| | ۱۰ | ۲۹٫۵ | ۴۴٫۳ | ۱۱ | ۳۳٫۸ | ۴۲٫۳ | ۱۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۲ | ۴۹٫۶ | ۳۷٫۲ | ۱۶ | ۶۷٫۳ | ۳۳٫۶ | ۳ |
| | ۱۰ | ۲۹٫۵ | ۴۴٫۳ | ۱۱ | ۳۳٫۸ | ۴۲٫۳ | ۱۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۲ | ۴۹٫۶ | ۳۷٫۲ | ۱۶ | ۶۷٫۳ | ۳۳٫۶ | ۴ |
| | ۱۰ | ۲۹٫۵ | ۴۴٫۳ | ۱۱ | ۳۳٫۸ | ۴۲٫۳ | ۱۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۲ | ۴۹٫۶ | ۳۷٫۲ | ۱۶ | ۶۷٫۳ | ۳۳٫۶ | ۵ |
| T8@۱۲٫۵ | ۳۰ | ۳۳٫۲ | ۴۹٫۸ | ۲۵ | ۳۸٫۱ | ۴۷٫۶ | ۲۹ | ۴۵ | ۴۵ | ۳۰ | ۵۵٫۸ | ۴۱٫۹ | ۳۳ | ۷۵٫۱ | ۳۷٫۸ | ۱ |
| | ۱۵ | ۳۳٫۲ | ۴۹٫۸ | ۱۵ | ۳۸٫۱ | ۴۷٫۶ | ۱۷ | ۴۵ | ۴۵ | ۱۸ | ۵۵٫۸ | ۴۱٫۹ | ۲۰ | ۷۵٫۱ | ۳۷٫۸ | ۲ |
| | ۱۲ | ۲۹٫۵ | ۴۴٫۳ | ۱۲ | ۳۳٫۸ | ۴۲٫۳ | ۱۴ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۵ | ۴۹٫۶ | ۳۷٫۲ | ۱۷ | ۶۷٫۳ | ۳۳٫۶ | ۳ |
| | ۱۱ | ۲۹٫۵ | ۴۴٫۳ | ۱۰ | ۳۳٫۸ | ۴۲٫۳ | ۱۲ | ۴۰ | ۴۰ | ۱۳ | ۴۹٫۶ | ۳۷٫۲ | ۱۴ | ۶۷٫۳ | ۳۳٫۶ | ۴ |
| | ۸ | ۲۹٫۵ | ۴۴٫۳ | ۸ | ۳۳٫۸ | ۴۲٫۳ | ۸ | ۴۰ | ۴۰ | ۹ | ۴۹٫۶ | ۳۷٫۲ | ۱۱ | ۶۷٫۳ | ۳۳٫۶ | ۵ |

جدول ۳. آنالیزهای لازم طبق روش سطح پاسخ.

| ردیف | عامل ۱ $A : h/b$ | عامل ۲ $B : Co$ | عامل ۳ $C : long.$ | عامل ۴ $D : Spc.$ |
|------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| ۱ | ۰٫۷۵ | ۰٫۸۷۵ | ۱٫۱ | ۱٫۱ |
| ۲ | ۰٫۵ | ۰٫۷۵ | ۱ | ۱ |
| ۳ | ۰٫۷۵ | ۰٫۸۷۵ | ۰٫۹ | ۱٫۱ |
| ۴ | ۱٫۵ | ۰٫۷۵ | ۱ | ۱ |
| ۵ | ۱ | ۰٫۷۵ | ۱ | ۱ |
| ۶ | ۱ | ۰٫۷۵ | ۱ | ۰٫۸ |
| ۷ | ۱٫۲۵ | ۰٫۶۲۵ | ۱٫۱ | ۰٫۹ |
| ۸ | ۱ | ۰٫۷۵ | ۰٫۸ | ۱ |
| ۹ | ۱٫۲۵ | ۰٫۸۷۵ | ۰٫۹ | ۰٫۹ |
| ۱۰ | ۱٫۲۵ | ۰٫۸۷۵ | ۱٫۱ | ۱٫۱ |
| ۱۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| ۱۲ | ۰٫۷۵ | ۰٫۶۲۵ | ۰٫۹ | ۰٫۹ |
| ۱۳ | ۰٫۷۵ | ۰٫۸۷۵ | ۰٫۹ | ۰٫۹ |
| ۱۴ | ۰٫۷۵ | ۰٫۶۲۵ | ۱٫۱ | ۰٫۹ |
| ۱۵ | ۱ | ۰٫۷۵ | ۱٫۲ | ۱ |
| ۱۶ | ۱ | ۰٫۶۲۵ | ۱ | ۱ |
| ۱۷ | ۰٫۷۵ | ۰٫۸۷۵ | ۱٫۱ | ۰٫۹ |
| ۱۸ | ۰٫۷۵ | ۰٫۶۲۵ | ۱٫۱ | ۱٫۱ |
| ۱۹ | ۰٫۷۵ | ۰٫۶۲۵ | ۰٫۹ | ۱٫۱ |
| ۲۰ | ۱٫۲۵ | ۰٫۶۲۵ | ۰٫۹ | ۱٫۱ |
| ۲۱ | ۱٫۲۵ | ۰٫۶۲۵ | ۱٫۱ | ۱٫۱ |
| ۲۲ | ۱ | ۰٫۷۵ | ۱ | ۱٫۲ |
| ۲۳ | ۱٫۲۵ | ۰٫۸۷۵ | ۰٫۹ | ۱٫۱ |
| ۲۴ | ۱٫۲۵ | ۰٫۶۲۵ | ۰٫۹ | ۰٫۹ |
| ۲۵ | ۱٫۲۵ | ۰٫۸۷۵ | ۱٫۱ | ۰٫۹ |

طبق جدول ۲ است، که مقادیر ۰٫۸ تا ۱٫۲ را در بر می‌گیرد. عامل ۴ یا D نسبت فاصله‌ی خاموت موجود به فاصله‌ی خاموت لازم طبق جدول ۲ است، که این متغیر نیز بین ۰٫۸ تا ۱٫۲ تغییر می‌کند.

۴.۲. تحلیل غیرخطی

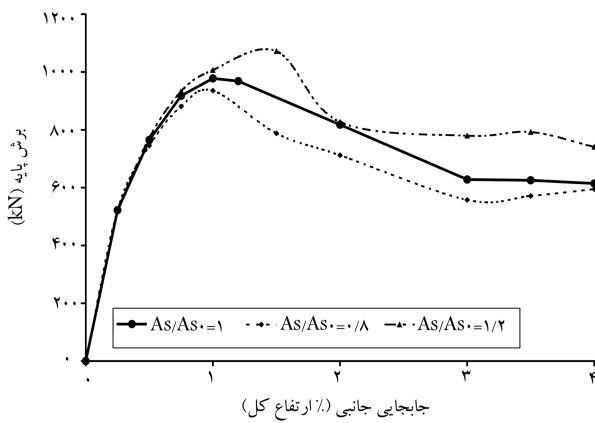
در این پژوهش برای انجام تحلیل غیرخطی از برنامه‌ی رایانه‌ی IDARC که نخستین بار در سال ۱۹۸۷ برای آنالیز غیرخطی سازه‌ها تدوین و سپس در سال‌های بعد توسعه داده شده، استفاده شده است. نرم‌افزار مذکور به‌طور ویژه در مدل‌سازی رفتار غیرخطی سازه‌های بتن‌آرمه کارآمد است و از ویژگی‌های آن، توانمندی در محاسبه‌ی شاخص خرابی پارک و انگ است.^[۲۵] در ویرایش چهارم این نرم‌افزار، براساس آخرین دستاوردهای پژوهش‌های آزمایشگاهی اصلاحات زیادی انجام شده است و به همین دلیل، نتایج آن انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.^[۲۲] ۲۵ مدل معرفی شده در جدول ۳، با نرم‌افزار IDARC مدل‌سازی و تحت بار ثقلی و جابه‌جایی جانبی رفت و برگشتی مطابق شکل ۳، آنالیز غیرخطی روی آنها انجام شده است.

۳. نتایج تحلیل سازه‌ی

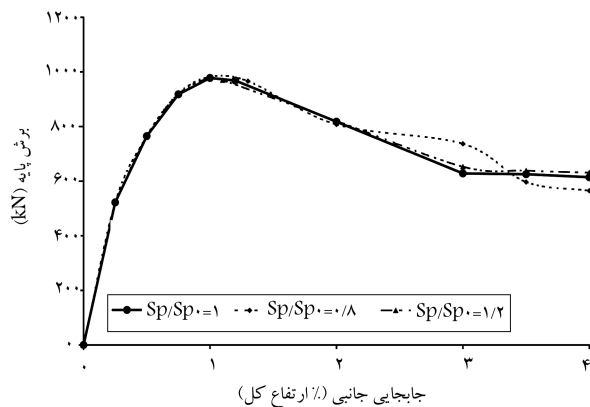
۱.۳. منحنی برش پایه بر حسب جابه‌جایی طبقه‌ی آخر

برای کلیه‌ی مدل‌ها، منحنی هیستریزس برش پایه بر حسب جابه‌جایی طبقه‌ی آخر ترسیم و پوش آن به دست آمده است، که یک نمونه از آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۵ الی ۸، پوش منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان بام برای مقایسه‌ی هر یک از عوامل ۴ گانه به تنهایی ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، هم با افزایش نسبت طول به عرض و هم با کاهش نسبت طول به عرض، نسبت به حالت مربع‌شکل چرخه‌های هیستریزس بزرگ‌تری تشکیل



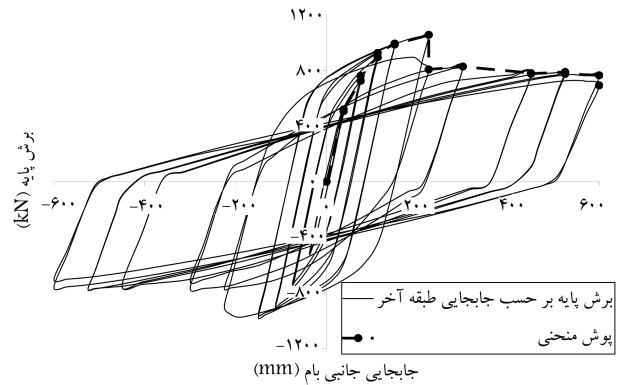
شکل ۷. پوش منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان بام برای نسبت‌های مختلف آرماتور طولی.



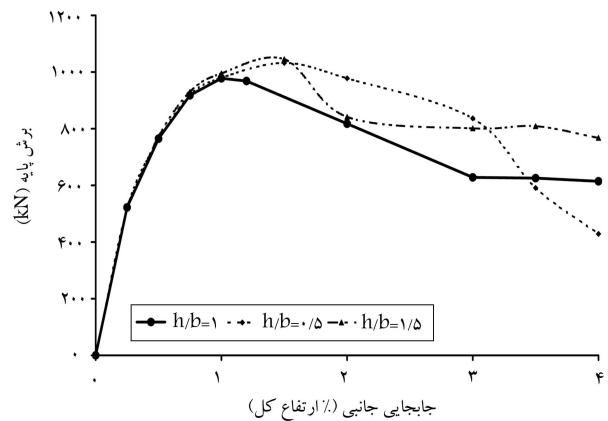
شکل ۸. پوش منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان بام برای نسبت‌های مختلف فاصله‌ی خاموت‌ها.

بازوی لنگر آرماتورهای طولی ستون‌ها در این نمونه‌هاست، که باعث افزایش مقاومت خمشی ستون‌های مذکور می‌شود. در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که اگرچه با کاهش ضریب محصورشدگی، حلقه‌های هیستریزس بزرگ‌تری حاصل می‌شود، لیکن پوش منحنی‌های هیستریزس در جابه‌جایی‌های بیشتر از ۳/۵٪، تقریباً بر هم منطبق هستند. در واقع در اثر افزایش جابه‌جایی جانبی، به دلیل ترک‌خوردگی گسترده در بتن، عملاً نقش محصورکنندگی کاهش می‌یابد. اما در جابه‌جایی‌های کمتر از ۳/۵٪، تأثیر مثبت محصورشدگی در استهلاک انرژی قابل مشاهده است. در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که افزایش آرماتور طولی باعث بزرگ‌تر شدن چرخه‌های هیستریزس و بهبود رفتار سازه شده است. چرا که با افزایش میزان آرماتور طولی، ظرفیت محوری و خمشی ستون‌ها افزایش می‌یابد و ایجاد مفصل خمیری به تأخیر می‌افتد. همچنین همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، پوش منحنی هیستریزس با تغییر فاصله‌ی خاموت‌ها، تغییر چندانی نکرده است؛ به عبارتی تغییر در فاصله‌ی خاموت‌های ستون‌ها در محدوده‌ی مورد بررسی، اثر محسوسی در رفتار سازه ندارد.

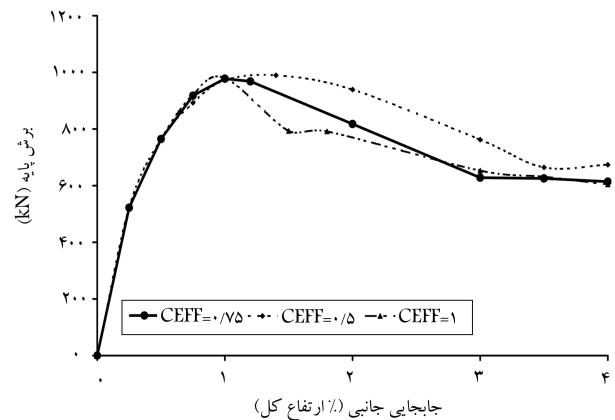
از شکل‌های ۵ الی ۸ مشخص می‌شود که هر یک از عوامل، تأثیر متفاوتی در منحنی هیستریزس برش پایه بر حسب جابه‌جایی طبقه‌ی آخر دارند. لذا برای بررسی اثر متقابل عوامل فوق در رفتار سازه، باید از تحلیل آماری استفاده شود، که در ادامه به آن پرداخته شده است.



شکل ۴. منحنی برش پایه بر حسب جابه‌جایی طبقه‌ی آخر برای مدل با مشخصات: $h/b = 0.75$, $CEFF = 0.75$, $As/As_0 = 1.1$, $Sp/Sp_0 = 1.1$

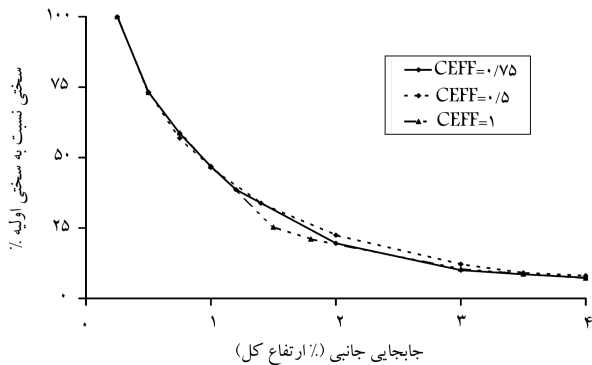


شکل ۵. پوش منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان بام برای نسبت‌های مختلف طول به عرض ستون.

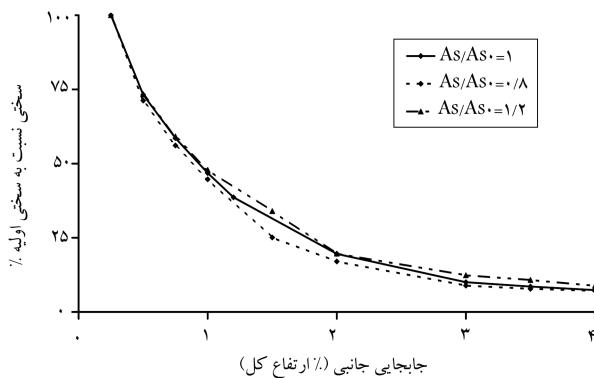


شکل ۶. پوش منحنی برش پایه بر حسب تغییرمکان بام برای نسبت‌های مختلف ضریب محصورشدگی.

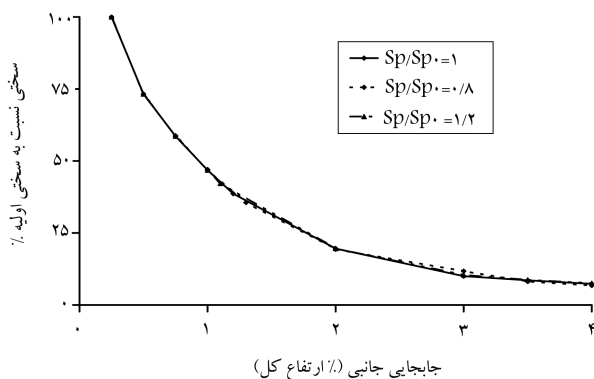
شده و رفتار سازه بهبود یافته است. البته درخصوص نسبت طول به عرض کوچک‌تر از واحد، به جهت برابری ممان اینرسی در کلیه‌ی مدل‌ها، مساحت ستون‌ها بیشتر است، که همین امر باعث بهبود رفتار شده است. همچنین در حالت $h/b = 0.75$ پس از جابه‌جایی ۳٪، سختی سازه به سرعت کاهش یافته است؛ ولی در حالت $h/b = 1.5$ چنین مسئله‌ی رخ نداده است. بنابراین برای مدل با $h/b = 1.5$ علی‌رغم مساحت کمتر، بهترین رفتار حاصل شده است. این مسئله ناشی از افزایش



شکل ۱۱. منحنی کاهش سختی برای نسبت‌های مختلف ضریب محصورشدگی.



شکل ۱۲. منحنی کاهش سختی برای نسبت‌های مختلف آرما تور طولی.



شکل ۱۳. منحنی کاهش سختی برای نسبت‌های مختلف فاصله‌ی خاموت‌ها.

بررسی، تأثیر چندانی در چگونگی کاهش سختی نداشته است. این نتایج با نتایج منحنی‌های پوش انطباق دارد.

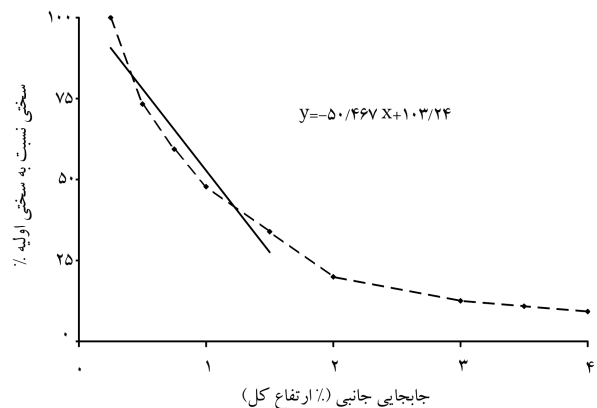
۳.۳. شاخص خرابی

شاخص خرابی کل، برای کلیه مدل‌ها طی ۳ مرحله در جابه‌جایی ۱/۵، ۳ و ۴ درصد ارتفاع کل توسط نرم‌افزار IDARC اندازه‌گیری شده است (جدول ۴). این شاخص خرابی که در پژوهشی در سال ۱۹۸۵ ارائه شده است، اثرات تغییرمکان جانبی و میزان انرژی مستهلک‌شده در انتهای اعضاء را مطابق رابطه‌ی ۱ در نظر می‌گیرد: [۲۵]

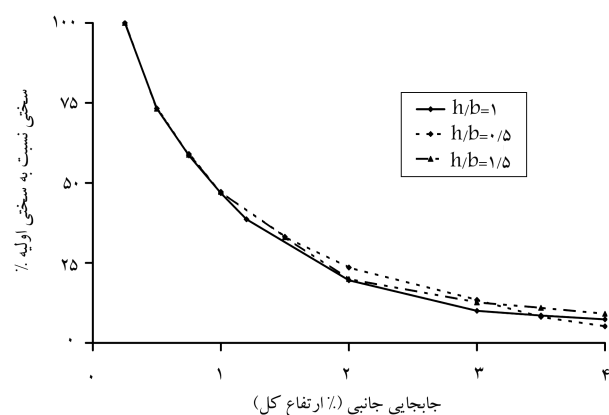
۲.۳. منحنی تغییرات سختی مدل نسبت به سختی اولیه

تغییرات نسبت سختی مدل به سختی اولیه، در هرگام بارگذاری برای کلیه مدل‌ها از روی منحنی هیستریزس برش پایه بر حسب جابه‌جایی طبقه‌ی آخر تعیین و منحنی آن بر حسب تغییرمکان نسبی طبقه‌ی آخر ترسیم شده است. لازم به ذکر است که با توجه به یکسان بودن ممان اینرسی ستون‌ها و تیرها در کلیه مدل‌ها، سختی اولیه‌ی کلیه مدل‌ها یکسان است. همچنین به منظور بررسی آماری چگونگی کاهش سختی در مدل‌ها، شیب قسمت خطی اولیه (محدوده‌ی تغییرمکان نسبی از ۰٪ تا ۱/۵٪ ارتفاع) با برازش خطی به دست آمده است. یک نمونه از این منحنی در شکل ۹ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳، منحنی‌های تغییر سختی به سختی اولیه بر حسب تغییرمکان نسبی رسم شده است. در کلیه این منحنی‌ها، پس از جابه‌جایی ۱/۵٪ سختی سازه به شدت کاهش یافته و به حدود ۳۰٪ سختی اولیه رسیده است، که با نتایج پژوهش هوآنگ و یون مشابه است، [۶] و این به معنای اعتبار مدل شبیه‌سازی است. در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت طول به عرض، نرخ کاهش سختی روند نزولی داشته است. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تغییرات ضریب محصورشدگی تأثیر چندانی در چگونگی کاهش سختی ندارد. در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان آرما تور طولی، نرخ کاهش سختی کاهش یافته است. در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود که تغییرات فاصله‌ی خاموت‌ها در محدوده‌ی مورد



شکل ۹. منحنی تغییرات سختی به سختی اولیه برای مدل با مشخصات: $h/b = 0.75$, $CEFF = 0.875$, $As/As_0 = 1$, $Sp/Sp_0 = 1$



شکل ۱۰. منحنی کاهش سختی برای نسبت‌های مختلف طول به عرض ستون.

جدول ۴. پاسخ‌های به دست آمده از آنالیز غیرخطی معرفی شده به نرم افزار برای تحلیل آماری.

| ردیف | پاسخ ۱ $DI_{Drift} = \%/۱,۵$ | پاسخ ۲ $DI_{Drift} = \%/۳$ | پاسخ ۳ $DI_{Drift} = \%/۴$ | پاسخ ۴ $Stiff. Degr$ |
|------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| ۱ | ۰,۱۸۲ | ۰,۳۷۳ | ۰,۵۰۷ | ۵۰,۴۶۷ |
| ۲ | ۰,۱۴۴ | ۰,۳۶۳ | ۰,۴۷۶ | ۵۱,۱۱۳ |
| ۳ | ۰,۲۱ | ۰,۵۳۶ | ۰,۷۵۹ | ۵۶,۰۱۷ |
| ۴ | ۰,۱۵۱ | ۰,۴۱ | ۰,۶۰۷ | ۵۱,۱۶۷ |
| ۵ | ۰,۱۷۴ | ۰,۴۷۵ | ۰,۷۴۶ | ۶۲,۴۷۲ |
| ۶ | ۰,۱۷۶ | ۰,۴۹۷ | ۰,۷۱۲ | ۵۹,۲۷۷ |
| ۷ | ۰,۱۶۴ | ۰,۳۱۳ | ۰,۴۲۵ | ۵۰,۳۰۳ |
| ۸ | ۰,۲۷۶ | ۰,۵۷۲ | ۰,۸۰۱ | ۵۶,۹۴۱ |
| ۹ | ۰,۱۹۳ | ۰,۴۵۳ | ۰,۵۹۱ | ۵۵,۸۵۱ |
| ۱۰ | ۰,۱۶۶ | ۰,۳۰۷ | ۰,۴۴۱ | ۵۰,۴۵ |
| ۱۱ | ۰,۱۷۶ | ۰,۴۴۵ | ۰,۷۵۶ | ۵۷,۰۲۸ |
| ۱۲ | ۰,۲۱۶ | ۰,۵۰۳ | ۰,۷۰۱ | ۵۳,۸ |
| ۱۳ | ۰,۲۳۳ | ۰,۵۷ | ۰,۸۰۶ | ۵۲,۹۵۱ |
| ۱۴ | ۰,۱۴ | ۰,۳۶۵ | ۰,۵۶ | ۴۹,۹۸ |
| ۱۵ | ۰,۱۷ | ۰,۳۴۲ | ۰,۴۷۹ | ۵۰,۴۰۵ |
| ۱۶ | ۰,۱۵۸ | ۰,۴۴۵ | ۰,۶۵۴ | ۵۵,۴۵۶ |
| ۱۷ | ۰,۱۷۷ | ۰,۳۴۱ | ۰,۴۶۷ | ۵۰,۳۹۲ |
| ۱۸ | ۰,۱۵۳ | ۰,۳۵۸ | ۰,۴۵۴ | ۵۰,۰۹۸ |
| ۱۹ | ۰,۲ | ۰,۳۹۵ | ۰,۷۱۲ | ۵۳,۲۵ |
| ۲۰ | ۰,۱۸۳ | ۰,۴۴۳ | ۰,۶۰۹ | ۵۳,۸۵۸ |
| ۲۱ | ۰,۱۶۱ | ۰,۳ | ۰,۴۶ | ۵۰,۳۷۵ |
| ۲۲ | ۰,۱۸۴ | ۰,۴۹۱ | ۰,۷۵۲ | ۶۵,۳۳۳ |
| ۲۳ | ۰,۲۰۱ | ۰,۴۸۵ | ۰,۶۳۶ | ۵۵,۹۷۷ |
| ۲۴ | ۰,۱۹۹ | ۰,۴۹۵ | ۰,۶۳۱ | ۵۵,۷۸۲ |
| ۲۵ | ۰,۱۶۷ | ۰,۳۲۴ | ۰,۴۶۱ | ۵۰,۳۵۲ |

متقابل عوامل از روش آماری سطح پاسخ استفاده و این نتایج حاصل شده است.

$$DI = \frac{d_m}{d_u} + \frac{\beta}{V_y d_u} \int dE_h \quad (۱)$$

که در آن، d_u ظرفیت تغییرشکل تحت بارگذاری یکنواخت، d_m تغییر مکان تحت بارگذاری دینامیکی، V_y مقاومت تسلیم، dE_h انرژی مستهلک شده و β یک ضریب بی‌بعد مثبت است.

۱.۴. تخمین شاخص خرابی در جابه‌جایی $\%/۱,۵$

با استفاده از نتایج آنالیز، برای تعیین رابطه‌ی بین شاخص خرابی در جابه‌جایی جانبی $\%/۱,۵$ ، با عوامل تأثیرگذار در آن، منحنی درجه دو شامل جملات اصلی A, B, C, D ، توان دوم A^2, B^2, C^2, D^2 و جملات اثر متقابل AC, AB, AD, BC, BD, CD برای مدل‌سازی در نرم‌افزار Design Expert تعریف و تحلیل واریانس با سطح معنی‌داری $\alpha = ۰,۱$ انجام شده است، که نتایج آن مطابق جدول ۵ است.

۴. نتایج تحلیل آماری

مقادیر شاخص خرابی و شیب منحنی کاهش سختی نسبی به‌عنوان پاسخ در تحلیل RSM تعریف شده‌اند، که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور بررسی اثر

جدول ۵. نتیجه‌ی اولیه‌ی آزمون ANOVA برای شاخص خرابی در جابه‌جایی ۱/۵٪.

| P-value Prob>F | F-value | Mean square | df | Sum of squares | source |
|----------------|----------|-------------|----|----------------|----------------|
| ۰/۰۰۰۱ | ۱۲/۷۸ | ۱/۴۶۲E-۳ | ۱۴ | ۰/۰۲۰ | model |
| ۰/۳۰۸۸ | ۱/۱۵ | ۱/۳۱۶E-۴ | ۱ | ۱/۳۱۶E-۴ | A : h/b |
| ۰/۰۲۹۸ | ۶/۴۱ | ۷/۳۳۸E-۴ | ۱ | ۷/۳۳۸E-۴ | B : co |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۹۳/۹۳ | ۰/۰۱۱ | ۱ | ۰/۰۱۱ | C : long. |
| ۰/۷۹۸۳ | ۰/۰۶۹ | ۷/۸۸۱E-۶ | ۱ | ۷/۸۸۱E-۶ | D : spc. |
| ۰/۱۱۳۶ | ۳/۰۱ | ۳/۴۴۱E-۴ | ۱ | ۳/۴۴۱E-۴ | AB |
| ۰/۱۳۰۸ | ۲/۷۱ | ۳/۰۹۹E-۴ | ۱ | ۳/۰۹۹E-۴ | AC |
| ۰/۷۸۵۰ | ۰/۰۷۹ | ۸/۹۸۴E-۶ | ۱ | ۸/۹۸۴E-۶ | AD |
| ۰/۱۵۸۹ | ۳ | ۲/۶۵۲E-۴ | ۱ | ۲/۶۵۲E-۴ | BC |
| ۰/۹۸۵۴ | ۳/۵۰۱E-۴ | ۴/۰۰۶E-۸ | ۱ | ۴/۰۰۶E-۸ | BD |
| ۰/۱۷۱۸ | ۲/۱۷ | ۲/۴۷۹E-۴ | ۱ | ۲/۴۷۹E-۴ | CD |
| ۰/۰۷۹۱ | ۳/۸۲ | ۴/۳۷۳E-۴ | ۱ | ۴/۳۷۳E-۴ | A ^۲ |
| ۰/۸۲۹۳ | ۰/۰۴۹ | ۵/۶۰۸E-۶ | ۱ | ۵/۶۰۸E-۶ | B ^۲ |
| ۰/۰۰۰۶ | ۲۴/۰۶ | ۲/۷۵۳E-۳ | ۱ | ۲/۷۵۳E-۳ | C ^۲ |
| ۰/۳۹۸۸ | ۰/۷۸ | ۸/۸۸۹E-۵ | ۱ | ۸/۸۸۹E-۵ | D ^۲ |
| | | ۱/۱۴۴E-۴ | ۱۰ | ۱/۱۴۴E-۳ | Residual |
| | | | ۲۴ | ۰/۰۲۲ | Cor Total |

جدول ۶. نتیجه‌ی آزمون نهایی ANOVA برای شاخص خرابی در جابه‌جایی ۱/۵٪.

| P-value Prob>F | F value | Mean square | df | Sum of squares | source |
|----------------|---------|-------------|----|----------------|----------------|
| < ۰/۰۰۰۱ | ۳۰/۳۸ | ۳/۸۴۲E-۳ | ۵ | ۰/۰۱۹ | model |
| ۰/۳۰۹۶ | ۰/۰۹ | ۱/۳۷۹E-۴ | ۱ | ۱/۳۷۹E-۴ | A : h/b |
| ۰/۰۱۱۵ | ۷/۸۲ | ۹/۸۹۷E-۴ | ۱ | ۹/۸۹۷E-۴ | B : co |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۹۶/۸۱ | ۰/۰۱۲ | ۱ | ۰/۰۱۲ | C : long. |
| ۰/۰۱۳۱ | ۷/۴۹ | ۹/۴۶۹E-۴ | ۱ | ۹/۴۶۹E-۴ | A ^۲ |
| < ۰/۰۰۰۱ | ۳۱/۰۶ | ۳/۲۹۲E-۳ | ۱ | ۳/۲۹۲E-۳ | C ^۲ |
| | | ۱/۲۶۵E-۴ | ۱۹ | ۲/۴۰۳E-۳ | Residual |
| | | | ۲۴ | ۰/۰۲۲ | Cor Total |

با استفاده از نتایج آنالیز، شاخص خرابی در جابه‌جایی ۱/۵٪ بر حسب پارامترهای ورودی به صورت رابطه‌ی ۲ تخمین زده شده است:

$$\begin{aligned}
 \text{Damage Index}_{\text{Drift}=1/5} &= 1/58903 + 0/19585 \frac{h}{b} \\
 &+ 0/043539 \text{CEFF} - 2/185306 \frac{As}{As_0} \\
 &- 0/10272 \left(\frac{h}{b}\right)^2 + 1/31352 \left(\frac{As}{As_0}\right)^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

که در آن، مقدار Adjusted R^۲ برابر با ۰/۸۶ است. به عبارتی ۸۶٪ تغییرات در

از جدول ۵ ملاحظه می‌شود که مقادیر P برای جملات A، AC، AB، D، B^۲ و D^۲ بزرگ‌تر از ۰/۱ است و لذا در سطح معنی‌داری ۰/۱ α = مهم تشخیص داده نشده‌اند.

لذا در گام دوم، جملات فوق از تابع پاسخ حذف و مجدداً تحلیل واریانس انجام و مقادیر P بررسی شده‌اند. البته با توجه به تشخیص تأثیرگذار بودن توان دوم A (یعنی A^۲) در مدل نهایی، به جهت رعایت اصول مدل‌سازی، جمله‌ی A نیز در مدل ریاضی حفظ شده است؛ هر چند که p-value آن بیش از ۰/۱ است. در نهایت، مدل قابل قبول، مطابق جدول ۶ به دست آمده است.

جدول ۷. نتیجه‌ی آزمون ANOVA برای شاخص خرابی در جابه‌جایی ۳٪.

| P-value Prob>F | F value | Mean square | df | Sum of squares | source |
|----------------|---------|-------------|----|----------------|-----------|
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۳۷٫۵۱ | ۰٫۱۳ | ۱ | ۰٫۱۳ | model |
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۷۳٫۵۱ | ۰٫۱۳ | ۱ | ۰٫۱۳ | C : long. |
| | | ۱٫۷۵۴E - ۳ | ۲۳ | ۰٫۴۰ | Residual |
| | | | ۲۴ | ۰٫۱۷ | Cor Total |

جدول ۸. نتیجه‌ی آزمون ANOVA برای شاخص خرابی در جابه‌جایی ۴٪.

| P-value Prob>F | F value | Mean square | df | Sum of squares | source |
|----------------|---------|-------------|----|----------------|----------------|
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۱۶٫۷۶ | ۰٫۰۹۲ | ۳ | ۰٫۲۸ | model |
| ۰٫۲۲۸۰ | ۱٫۵۴ | ۸٫۴۳۷E - ۳ | ۱ | ۸٫۴۳۷E - ۳ | A : h/b |
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۴۰٫۷۹ | ۰٫۲۲ | ۱ | ۰٫۲۲ | C : long. |
| ۰٫۰۱۰۲ | ۷٫۹۷ | ۰٫۰۴۴ | ۱ | ۰٫۰۴۴ | A ^۲ |
| | | ۵٫۴۷۰E - ۳ | ۲۱ | ۰٫۱۱ | Residual |
| | | | ۲۴ | ۰٫۳۹ | Cor Total |

$$Damage\ Index_{Drift=\%3} = ۰٫۹۰۲۱۵ + ۰٫۶۱۲۱۲ \frac{h}{b}$$

$$- ۰٫۷۳۲۹۲ \frac{As}{As_0} - ۰٫۳۳۳۳۱ \left(\frac{h}{b}\right)^2$$

$$Adjusted\ R^2 = ۰٫۸۳ \quad (3)$$

۳.۴. تخمین شاخص خرابی در جابه‌جایی ۴٪

با استفاده از نتایج آنالیز آزمون ANOVA انجام شده است، که نتایج نهایی آن در جدول ۸ ارائه شده است.

با استفاده از نتایج آنالیز، رابطه‌ی شاخص خرابی در جابه‌جایی ۴٪ بر حسب پارامترهای ورودی عبارت از رابطه‌ی ۴ است:

$$Damage\ Index_{Drift=\%4} = ۱٫۰۱۸۸۸ + ۱٫۲۶۲۰۳ \frac{h}{b}$$

$$- ۰٫۹۶۴۱۷ \frac{As}{As_0} - ۰٫۶۶۸۵۱ \left(\frac{h}{b}\right)^2$$

$$Adjusted\ R^2 = ۰٫۶۶ \quad (4)$$

۴.۴. تخمین شیب کاهش سختی سازه

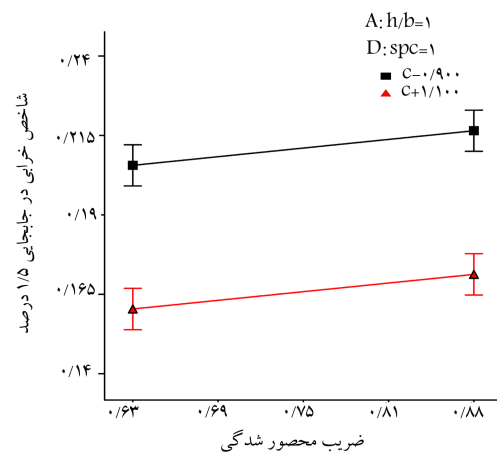
با استفاده از نتایج آنالیز، نتایج آزمایش ANOVA در جدول ۹ ارائه شده است. با استفاده از نتایج آنالیز، رابطه‌ی شیب کاهش سختی سازه بر حسب پارامترهای ورودی به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$\frac{1}{\sqrt{Stiffness\ Degradeation}} = ۰٫۴۳۸۱۲ - ۰٫۱۰۷۵۶ \frac{h}{b}$$

$$- ۰٫۱۴۸۹۳CEFF - ۰٫۴۲۲۵۱ \frac{As}{As_0} + ۰٫۰۵۳۴۳۳ \left(\frac{h}{b}\right)^2$$

$$- ۰٫۰۹۴۷۱۲(CEFF)^2 + ۰٫۲۲۶۰۱ \left(\frac{As}{As_0}\right)^2$$

$$Adjusted\ R^2 = ۰٫۷۱ \quad (5)$$



شکل ۱۴. نمایش مفهوم آثار متقابل نسبت آرمانور طولی و ضریب محصورشدگی در شاخص خرابی در جابه‌جایی ۱٫۵٪.

شاخص خرابی با جابه‌جایی ۱٫۵٪ با فرمول ارائه شده، قابل پیش‌بینی است. نزدیک به ۱ بودن عدد مذکور، نشان‌دهنده‌ی عدم تأثیرپذیری یا تأثیرپذیری کم این پارامتر از سایر عوامل (متغیرهای بررسی‌نشده) است. به عنوان یک نمونه از اثر داخلی عوامل، تأثیر نسبت آرمانور طولی و ضریب محصورشدگی در شاخص خرابی در جابه‌جایی ۱٫۵٪، در شکل ۱۴ ترسیم شده است.

۲.۴. تخمین شاخص خرابی در جابه‌جایی ۳٪

با استفاده از نتایج آنالیز، مشابه بخش قبل، آزمون ANOVA انجام شده است، که نتایج نهایی آن در جدول ۷ ارائه شده است. با استفاده از نتایج آنالیز، برای تخمین شاخص خرابی در جابه‌جایی ۳٪ بر حسب پارامترهای ورودی از رابطه‌ی ۳ استفاده شده است:

جدول ۹. نتیجه‌ی آزمایش ANOVA برای شیب کاهش سختی سازه.

| P-value Prob>F | F value | Mean square | df | Sum of squares | source |
|----------------|---------|-------------|----|----------------|----------------|
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۱۰٫۷۶ | ۷٫۵۴۶E - ۵ | ۶ | ۴٫۵۲۷E - ۴ | model |
| ۰٫۷۵۳۸ | ۰٫۱۰ | ۷٫۱۱۵E - ۷ | ۱ | ۷٫۱۱۵E - ۷ | A : h/b |
| ۰٫۱۱۲۴ | ۲٫۷۹ | ۱٫۹۵۵E - ۵ | ۱ | ۱٫۹۵۵E - ۵ | B : co |
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۲۸٫۶۹ | ۲٫۰۱۳E - ۴ | ۱ | ۲٫۰۱۳E - ۴ | C : long. |
| < ۰٫۰۰۰۰۱ | ۳۳٫۲۲ | ۲٫۳۳۰E - ۴ | ۱ | ۲٫۳۳۰E - ۴ | A ^۲ |
| ۰٫۰۰۰۰۴ | ۱۰٫۵۷ | ۷٫۴۱۵E - ۵ | ۱ | ۷٫۴۱۵E - ۵ | B ^۲ |
| ۰٫۰۰۰۰۸ | ۱۶٫۱۷ | ۱٫۱۳۴E - ۴ | ۱ | ۱٫۱۳۴E - ۴ | C ^۲ |
| | | ۷٫۰۱۵E - ۶ | ۱۸ | ۱٫۲۶۳E - ۴ | Residual |
| | | | ۲۴ | ۵٫۷۹۰E - ۴ | Cor Total |

به‌عنوان یک نمونه، اثر تداخلی نسبت طول به عرض و ضریب محصورشدگی بتن در کاهش سختی در شکل ۱۵ ترسیم شده است، که در آن محورهای افقی، نسبت طول به عرض ستون و ضریب محصورشدگی بتن و محور قائم، شیب منحنی تغییرات سختی است.

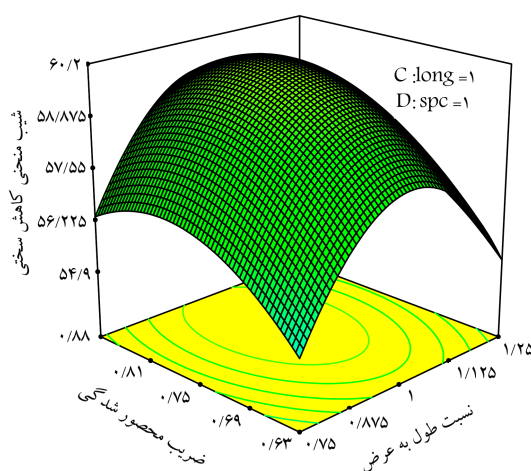
۵. مقایسه‌ی نتایج و تفسیر

رابطه‌ی به‌دست‌آمده برای تخمین شاخص خرابی در جابه‌جایی جانبی ۱٫۵٪ ارتفاع سازه (رابطه‌ی ۲)، که نشان‌دهنده‌ی رفتار خطی سازه است و طی آن تعداد مفاصل خمیری ایجادشده در اعضاء ناچیز است، به پارامترهای نسبت طول به عرض ستون، ضریب محصورشدگی و میزان آرماتور طولی بستگی دارد، ولی به فاصله‌ی خاموت‌ها در ستون بستگی ندارد. رابطه‌ی مذکور نشان می‌دهد که افزایش ضریب محصورشدگی، باعث افزایش شاخص خرابی می‌شود. در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ نیز محققان به نتیجه‌ی مشابهی دست یافته‌اند.^[۷]

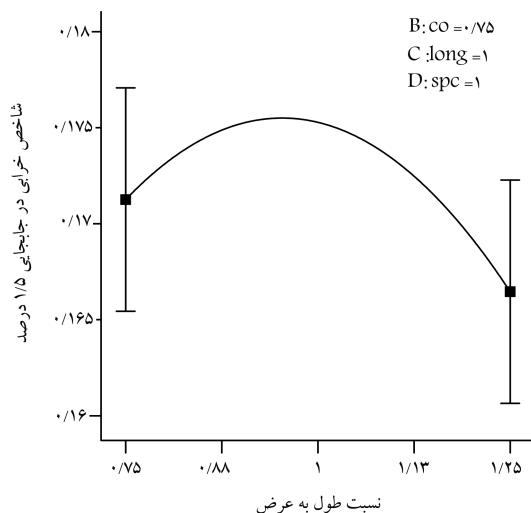
همچنین رابطه‌ی ۲ نشان می‌دهد که با افزایش یا کاهش نسبت طول به عرض ستون، نسبت به عدد ۱ (مربع)، شاخص خرابی کاهش می‌یابد (شکل ۱۶). باید توجه داشت که به دلیل یکسان‌بودن ممان اینرسی ستون‌ها در کلیه‌ی مدل‌ها، در حالت‌های با نسبت طول به عرض کوچک‌تر از ۱، مساحت ستون‌ها بیشتر است و کاهش شاخص خرابی به همین دلیل است. لذا مدل‌های با نسبت طول به عرض بزرگ‌تر از ۱، علی‌رغم مساحت کمتر، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند. همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، این مسئله ناشی از افزایش بازوی لنگر آرماتورهاست.

اما در جابه‌جایی‌های جانبی ۳٪ و ۴٪ ارتفاع، شاخص خرابی فقط تابع میزان آرماتور طولی و نسبت ابعاد ستون است، و فاصله‌ی خاموت‌ها و ضریب محصورشدگی در شاخص خرابی تأثیری ندارند. همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، گسترش ترک در بتن اثر محصورشدگی را کاهش می‌دهد. روابط مشخص می‌کنند که با افزایش میزان آرماتور طولی، شاخص خرابی کاهش می‌یابد.

از سوی دیگر رابطه‌ی به‌دست‌آمده برای تخمین کاهش سختی نشان می‌دهد که معکوس مجذور کاهش سختی با نسبت طول به عرض ستون، ضریب محصورشدگی و میزان آرماتور طولی موجود در ستون رابطه داشته و فاصله‌ی خاموت‌های ستون‌ها



شکل ۱۵. اثر توأم غیرخطی نسبت طول به عرض و ضریب محصورشدگی در شیب منحنی تغییرات سختی.



شکل ۱۶. تغییرات شاخص خرابی در جابه‌جایی ۱٫۵٪ در اثر تغییرات نسبت طول به عرض.

ستون، میزان آرماتور طولی و ضریب محصورشدگی است. با افزایش آرماتور طولی، شاخص خرابی کاهش می‌یابد، ولی با افزایش ضریب محصورشدگی شاخص خرابی افزایش می‌یابد.

ج) در محدوده‌ی رفتار غیرخطی، شاخص خرابی فقط تابعی از میزان آرماتور طولی و نسبت ابعاد ستون است و تأثیر سایر عوامل ناچیز است. با افزایش آرماتور طولی، شاخص خرابی کاهش می‌یابد.

د) نسبت طول به عرض ستون، میزان آرماتور طولی ستون و ضریب محصورشدگی در میزان تغییرات سختی تأثیرگذارند، ولی فاصله‌ی خاموت‌های ستون‌ها تأثیری در آن ندارد.

از آنجایی که به‌طور معمول در طراحی سازه‌های با ارتفاع متوسط از آنالیز غیرخطی استفاده نمی‌شود، لذا روابط ارائه‌شده در این پژوهش به طراح سازه کمک می‌کند که پیش‌بینی اولیه‌ی مناسبی از شاخص خرابی سازه در محدوده‌ی غیرخطی به‌دست آورد.

پانویس

1. response surface method (RSM)

منابع (References)

1. Tena-Colunga, A., Correa-Arizmendi, H., Luna-Arroyo, J.L. and Gatica-Aviles, G. "Seismic behavior of code-designed medium rise special moment-resisting frame RC buildings in soft soils of Mexico city", *Engineering Structures*, **30**(12), pp. 3681-3707 (2008).
2. Benavent-Climent, A. and Zahran, R. "An energy-based procedure for the assessment of seismic capacity of existing frames: Application to RC wide beam systems in Spain", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(5), pp. 354-367 (2010).
3. Mehanny, S.S.F. and El Howary, H.A. "Assessment of RC moment frame buildings in moderate seismic zones: Evaluation of egyptian seismic code implications and system configuration effects", *Engineering Structures*, **32**(8), pp. 2394-2406 (2010).
4. Karayannis, C.G., Fawata, M.J. and Kakaletsis, D.J. "Seismic behaviour of infilled and pilotis RC frame structures with beam-column joint degradation effect", *Engineering Structures*, **33**(10), pp. 2821-2831 (2011).
5. Duan, H. and Hueste, M.B.D. "Seismic performance of a reinforced concrete frame building in China", *Engineering Structures*, **41**, pp. 77-89 (2012).
6. Hwang, S.K. and Yun, H.D. "Effects of transverse reinforcement on flexural behaviour of high strength concrete columns", *Engineering Structures*, **26**(1), pp. 1-12 (2004).
7. Han, S.W. and Jee, N.Y. "Seismic behaviors of columns in ordinary and intermediate moment resisting concrete frames", *Engineering Structures*, **27**(6), pp. 951-962 (2005).

تأثیری در آن ندارد. این نتایج با نتایج به‌دست‌آمده از بررسی شاخص خرابی در انطباق است.

در کلیه‌ی روابط به‌دست‌آمده برای شاخص‌های خرابی و نیز کاهش سختی ملاحظه می‌شود که فاصله‌ی خاموت‌های ستون، تأثیری در پاسخ سازه ندارند. دلیل این مسئله، تشکیل عموم مفاصل خمیری در تیرهاست.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که:

الف) روش تحلیل آماری سطح پاسخ، روش کارآمدی برای تحلیل نتایج است، خصوصاً اینکه امکان بررسی تأثیرات متقابل عوامل فراهم می‌شود.

ب) در محدوده‌ی رفتار خطی، شاخص خرابی تابعی از نسبت طول به عرض

8. Fabbrocino, G., Verderame, G.M. and Manfredi, G. "Experimental behaviour of anchored smooth rebars in old type reinforced concrete buildings", *Engineering Structures*, **27**(10), pp. 1575-1585 (2005).
9. Yin, H., Irawan, P., Pan, T.C. and Lim, C.H. "Behavior of full scale lightly reinforced concrete interior beam-column joints under reversed cyclic loading", *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, **2**, pp. 985-992 (2001).
10. Kleijnen, J.P. "An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis", *European Journal of Operational Research*, **164**(2), pp. 287-300 (2005).
11. Nowak, A.S. and Cho, T. "Prediction of the combination of failure modes for an arch bridge system", *Journal of Constructional Steel Research*, **63**(12), pp. 1561-1569 (2007).
12. Gayton, N., Bourinet, J.M. and Lemaire, M. "CQ2RS: A new statistical approach to the response surface method for reliability analysis", *Structural Safety*, **25**(1), pp. 99-121 (2003).
13. Cho, T. "Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method", *Construction and Building Materials*, **21**(12), pp. 2031-2040 (2007).
14. Wong, S.M., Hobbs, R.E. and Onof, C. "An adaptive response surface method for reliability analysis of structures with multiple loading sequences", *Structural Safety*, **27**(4), pp. 287-308 (2005).
15. Bouazizia, M.L., Ghanmia, S. and Bouhaddib, N. "Multi-objective optimization in dynamics of the structures with nonlinear behavior: Contributions of the meta models", *Finite Elements in Analysis and Design*, **45**(10), pp. 612-623 (2009).
16. Buratti, N., Ferracuti, B. and Savoia, M. "Response surface with random factors for seismic fragility of reinforced concrete frames", *Structural Safety*, **32**(1), pp. 42-51 (2010).

17. Long, N. and Lee, M. "Dividing wall column structure design using response surface methodology", *Computers and Chemical Engineering*, **37**, pp. 119-124 (2012).
18. Su, C. and Zheng, C. "Probabilistic fracture mechanics analysis of linear-elastic cracked structures by spline fictitious boundary element method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **36**(12), pp. 1828-1837 (2012).
19. Kallias, A.N. and Rafiq, M.I. "Performance assessment of corroding RC beams using response surface methodology", *Engineering Structures*, **49**, pp. 671-685 (2013).
20. Naceur, H., Shiri, H., Coutellier, D. and Batoz, J.L. "On the modeling and design of composite multilayered structures using solid-shell finite element model", *Finite Elements in Analysis and Design*, **70-71**, pp. 1-14 (2013).
21. *Design of Concrete Structures (CSA A23.3-04)*, Canadian Standards Association (2004).
22. Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C. and Madan, A., *IDARC 2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo (1996).
23. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800-05 (3rd Edition) (2005).
24. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, **114**(8), pp. 1804-1826 (1988).
25. Park, Y.J. and Ang, H.S. "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", *ASCE, J. Struct. Eng.*, **111**(4), pp. 722-739 (1985).
26. Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, 704 p. (2009).