

# بررسی اهمیت پارامترهای مؤثر در گسیختگی ستون کوتاه با استفاده از روش‌های همبستگی و یادگیری ماشین

زهرا نوری (کارشناس ارشد)

فریبرز ناطقی الهی\* (استاد)

بزهشکده‌ی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱)  
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۲، ص. ۸۷-۷۷، (ژوئیه)

در نوشتار حاضر، با استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو و با در نظر گرفتن توزیع نرمال برای  $10^\circ$  پارامتر مؤثر در تشکیل ستون کوتاه، یک پایگاه داده متشکل از  $2000/000$  نمونه ایجاد شده است. برای مدل‌سازی قاب خمشی بتنی با در نظر گرفتن رفتار خمشی و برشی ستون، از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده و راستی‌آزمایی مدل از طریق مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته است. سپس با استفاده از تحلیل پوش‌آور بر روی مدل‌ها، نوع مکانیزم شکست ستون، اعم از خمشی و یا برشی تعیین شده است. با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین: تحلیل مؤلفه‌ی اساسی، درخت تصمیم و آزمون F- و همچنین روش‌های تحلیل همبستگی پیرسون و اسپیرمن، میزان اهمیت هر یک از پارامترها بررسی شده است. روش‌های یادگیری ماشین درخت تصمیم و آزمون F و همچنین هر دو روش همبستگی به خوبی قادر به شناسایی میزان اهمیت هر کدام از پارامترها در تشکیل ستون کوتاه هستند. پارامترهای درصد آرماتور برشی ستون و نسبت ارتفاع دیوار به ارتفاع ستون به عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها تعیین شده‌اند.

واژگان کلیدی: ستون کوتاه، تحلیل پوش‌آور، مونت‌کارلو، یادگیری ماشین، تحلیل همبستگی.

Z\_nouri1995@yahoo.com  
Nateghi@iiees.ac.ir

## ۱. مقدمه

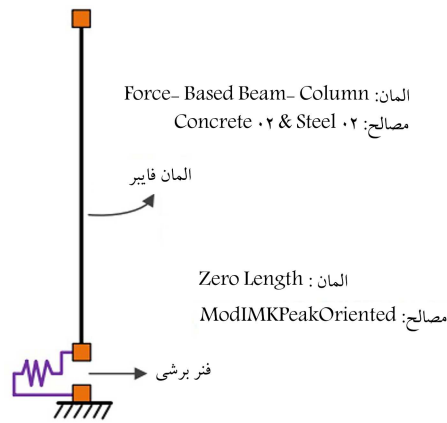
ایجاد ستون کوتاه، مسئله‌ی است که می‌توان به آن از دید مهندسی، معماری و ساخت نگاه کرد. از دید مهندسی می‌توان به برهم‌کنش اعضاء سازه‌ی و غیرسازه‌ی، وجود تیرهای میان‌طبقه و غیره اشاره کرد؛ از منظر معماری، تصمیمات معماری برای جنبه‌های زیباسازی ساختمان، بازشوهای ایجاد شده در قاب‌ها و غیره را نام برد و از نقطه‌نظر ساخت می‌توان به ساخت و ساز در زمین‌های شیب‌دار اشاره کرد. در ستون‌های لاغر تحت بارگذاری جانبی، مفصل خمشی تشکیل می‌شود؛ در حالی که در ستون‌های کوتاه، ستون قبل از آن‌که به ظرفیت خمشی خود برسد، دچار شکست برشی می‌شود. در زلزله‌های پیشین، ستون‌های کوتاه منجر به آسیب و فروریزش در تعداد زیادی از ساختمان‌های بتنی مسلح شده‌اند. به علت شکل‌پذیری پایین و رفتار شکننده‌ی شکست برشی ستون‌ها، باید از مکانیزم گسیختگی اخیر احتراز شود.

مطالعات متعددی در عوامل مؤثر در شکست برشی ستون در ادبیات فنی وجود دارد و مدل‌های مقاومت برشی متفاوتی پیشنهاد شده‌اند، که بر اساس آنها، مقاومت

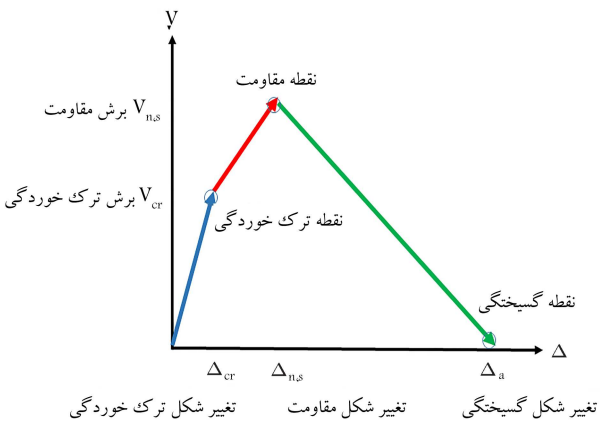
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۷/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۰/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

DOI:10.24200/J30.2022.59055.3021



شکل ۱. مدل ارائه شده جهت مدل‌سازی ستون با در نظر گرفتن رفتار برشی.



شکل ۲. منحنی نیرو- تغییر شکل ارائه شده برای ستون گسیخته شده در برش.

به آن معرفی کرد. قابل ذکر است که با مدل‌سازی یک سیستم تک درجه‌ای آزادی و اختصاص دادن مصالح مورد نظر به آن و در ادامه، با تحلیل بارافزون سیستم، پایش رفتار مصالح، صورت گرفته و با نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۱ مقایسه شده است. در پژوهش حاضر، از یک رابطه‌ی سه‌خطی برای مدل‌سازی رفتار لرزه‌ی ستون‌ها استفاده شده است.

مقادیر مربوط به نقاط کلیدی در شکل ۲ با استفاده از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند:

$$V_{shear} = 0.27\lambda\sqrt{f'_c}bd + \frac{Nd}{4h} \quad (1)$$

$$V_{flexural} = \left[ 0.15\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{h(0.1\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{0.2N}{bh})}{\frac{M}{V} - \frac{h}{4}} \right] bd \quad (2)$$

رابطه ۱، مقاومت ترک‌خوردگی ترک برشی جان و رابطه ۲، مقاومت ترک‌خوردگی ترک برشی خمشی را نشان می‌دهد. مقاومت برشی ترک‌خوردگی، کمیته‌ی دو مقدار اخیر در نظر گرفته می‌شود. در روابط اخیر،  $\lambda$  ضریب نوع بتن،  $f'_c$  مقاومت مشخصه‌ی بتن،  $b$  عرض مقطع ستون،  $d$  عمق مؤثر مقطع ستون،  $N$  نیروی محوری،  $h$  عمق مقطع ستون،  $M$  لنگر مقطع و  $V$  برش مقطع هستند.

تعاریف و مقادیر پارامترهای مورد نیاز در روابط ۱ و ۲ و روابط تکمیلی علاوه بر مبانی موجود در آیین‌نامه‌ی ۱۳-۴۱-ASCE، از مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۴)، لی و هوانگ (۲۰۱۶)، لی و همکاران (۲۰۱۹) و همچنین شن و همکاران (۲۰۲۱)

تغییر شکل برشی در بیشینه‌ی جابه‌جایی، تعیین نقطه‌ی ترک‌خوردگی و نقطه‌ی بیشینه مقاومت و نقطه‌ی شکست ستون‌های کوتاه متوسط، مکانیزم انتقال برش مک‌گریگر را برای ستون‌های ذکر شده پیشنهاد دادند. همچنین به نقش بحرانی آرماتورهای عرضی در مکانیزم انتقال برش اشاره کردند.<sup>[۲]</sup> بهشتی اول و کتابداری (۲۰۱۹)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به تعیین مقاومت برشی ستون کوتاه بتنی مستطیلی پرداختند.<sup>[۸]</sup>

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، موارد مؤثر متعددی در تشکیل ستون کوتاه گزارش شده است، اما با وجود این، تاکنون بررسی جامعی صورت نگرفته و جهت تشخیص سریع ستون کوتاه لازم است تا موارد متعدد مؤثر به طور هم‌زمان بررسی و میزان اهمیت نسبی آنها سنجیده شود. از نتایج حاصل از این کار می‌توان در ایجاد ملاک و معیار برای تشکیل ستون کوتاه و همچنین ارائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی رخداد شکست برشی ستون‌ها استفاده کرد. لذا در مطالعه‌ی حاضر، با در نظر گرفتن ۱۰ پارامتر مؤثر، شامل: اندازه‌ی مقطع ستون ( $h$ )، مقدار آرماتورهای طولی ( $\rho_l$ ) و عرضی ستون ( $\rho_s$ )، طول مؤثر ستون ( $L_c$ )، مقاومت فشاری بتن ( $f'_c$ )، مقاومت تسلیم آرماتور ( $f_y$ )، طول تیر ( $L_b$ )، نسبت نیروی محوری ( $\bar{P}$ )، نسبت ارتفاع دیوار پرکننده به ارتفاع ستون ( $\bar{H}_w$ ) و ضخامت دیوار ( $t_w$ ) به بررسی اهمیت هر یک از آنها در تشکیل پدیده‌ی ستون کوتاه پرداخته شده است. در ابتدا لازم است تا یک مدل‌سازی ایجاد و صحت‌سنجی شود تا در مرحله‌ی بعدی، با استفاده از الگوریتم مونت‌کارلو و در نظر گرفتن توزیع نرمال برای تمامی پارامترها، تعداد ۲۰۰ هزار حالت مدل ایجاد شود. سپس با استفاده از تحلیل‌های پوش‌آور بر روی قاب خمشی بتنی یک دهانه‌ی یک طبقه، نوع شکست در ستون تعیین شده است. در ادامه، تمامی داده‌های مرتبط به پارامترهای مذکور با استفاده از روش مقیاس کردن هم‌وزن شده‌اند. در نهایت با استفاده از داده‌های اصلاح شده به بررسی اهمیت پارامترهای مختلف در تشکیل پدیده‌ی ستون کوتاه پرداخته شده است. این کار با استفاده از چند روش متداول در زمینه‌ی یادگیری ماشین، شامل: تحلیل مؤلفه‌ی اساسی (PCA)،<sup>۴</sup> درخت تصمیم (DT)<sup>۵</sup> و آزمون F (FT)<sup>۶</sup> و همچنین ضرایب همبستگی اسپیرمن<sup>۷</sup> و پیرسون<sup>۸</sup> صورت پذیرفته است. در نوشتار حاضر، از مبانی آماری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین متنوعی استفاده شده است، که خواننده جهت مطالعه‌ی بیشتر به مراجع<sup>[۹-۱۹]</sup> ارجاع داده می‌شود.

## ۲. مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees

نرم‌افزار OpenSees، یک نرم‌افزار اجزاء محدود است، که مجموعه‌ی کاملی از المان‌ها، مصالح و روش‌های مختلف تحلیلی را در بر دارد.<sup>[۲۰]</sup> در شکل ۱، نمایشگر مدل در نظر گرفته شده برای ستون‌ها مشاهده می‌شود. در مدل‌سازی ستون کوتاه از یک فتر برشی و یک المان خمشی، که به صورت سری قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. المان فتر برشی برای در نظر گرفتن رفتار برشی ستون و المان فایبر برای در نظر گرفتن رفتار خمشی استفاده شده‌اند.

جهت اعمال رفتار برشی مذکور به ستون در نرم‌افزار OpenSees، از یک المان ZeroLength استفاده شده است. المان ZeroLength توسط دو نقطه در یک موقعیت مکانی تعریف می‌شود و با توجه به رفتار مورد انتظار آن، باید مصالح غیرخطی مناسب، که بیان‌گر رفتار صحیح المان باشد، را اختصاص داد. مصالح غیرخطی استفاده شده در بخش حاضر از نوع ModIMKPeakOriented هستند، که باید با توجه به پارامترهای مورد نیاز مصالح مذکور، رفتار برشی مدنظر را

جدول ۱. نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده جهت صحت‌سنجی مدل.

مطالعه	اسم نمونه	$L/H$	$B \times H$ (mm)	$L$ (mm)	$\rho_t$ (%)	$s$ (mm)	$\rho_t$ (%)	$f'_c$ (MPa)	$f_{yt}$ (MPa)	$f_{yl}$ (MPa)	$N/Agf'_c$
لی و همکاران <sup>[۱]</sup>	۱DL	۱	۳۰۰ × ۵۰۰	۵۰۰	۳/۱	۱۰۰	۱/۲۷	۲۷/۵	۴۳۰	۴۳۸	۰/۰۹
	۱DH				۳/۱	۱۰۰	۱/۲۷	۲۵/۲	۴۳۰	۴۳۸	۰/۲۹
	۲DL				۳/۱	۱۰۰	۱/۲۷	۲۵/۷	۴۳۰	۴۳۸	۰/۰۹
	۲DH				۳/۱	۱۰۰	۱/۲۷	۲۴/۴	۴۳۰	۴۳۸	۰/۳
	۲NL	۲	۳۰۰ × ۵۰۰	۱۰۰	۳/۱	۲۰۰	۰/۲۴	۲۳/۴	۴۵۸	۴۳۸	۰/۱
	۲NH				۳/۱	۲۰۰	۰/۲۴	۲۵/۵	۴۵۸	۴۳۸	۰/۲۹
لی و همکاران <sup>[۲]</sup>	۳DL				۲/۲۴	۱۰۰	۰/۴۳	۳۴/۵	۴۴۸	۴۷۲	۰/۰۷
	۳NL	۳	۵۰۰ × ۵۰۰	۱۵۰۰	۲/۲۴	۳۰۰	۰/۱	۳۳/۵	۴۴۸	۴۷۲	۰/۰۷
	۳NH				۲/۲۴	۳۰۰	۰/۱	۳۲/۴	۴۴۸	۴۷۲	۰/۲۳
	۴DL	۴	۵۰۰ × ۵۰۰	۲۰۰۰	۲/۲۴	۱۰۰	۰/۴۳	۳۰/۷	۴۴۸	۴۷۲	۰/۰۸
	۴NL				۲/۲۴	۳۰۰	۰/۱	۲۹/۷	۴۴۸	۴۷۲	۰/۰۸
	۳CLH۱۸				۳/۱۲	۴۵۷	۰/۰۷	۲۵/۶	۴۰۰	۳۳۱	۰/۰۹
۳CMH۱۸ <sup>[۲۴]</sup>	۶/۴	۴۵۷ × ۴۵۷	۲۹۴۶	۳/۱۲	۴۵۷	۰/۰۷	۲۷/۶	۴۰۰	۳۳۱	۰/۲۶	
۲CMH۱۸				۱/۱۹	۴۵۷	۰/۰۷	۲۵/۵	۴۰۰	۳۳۱	۰/۲۸	

مقاومت مشخصه‌ی بتن،  $f_{yt}$  مقاومت تسلیم آرماتور طولی،  $f_{yl}$  مقاومت تسلیم آرماتور عرضی،  $N$  نیروی محوری و  $A_g$  سطح مقطع برشی هستند.

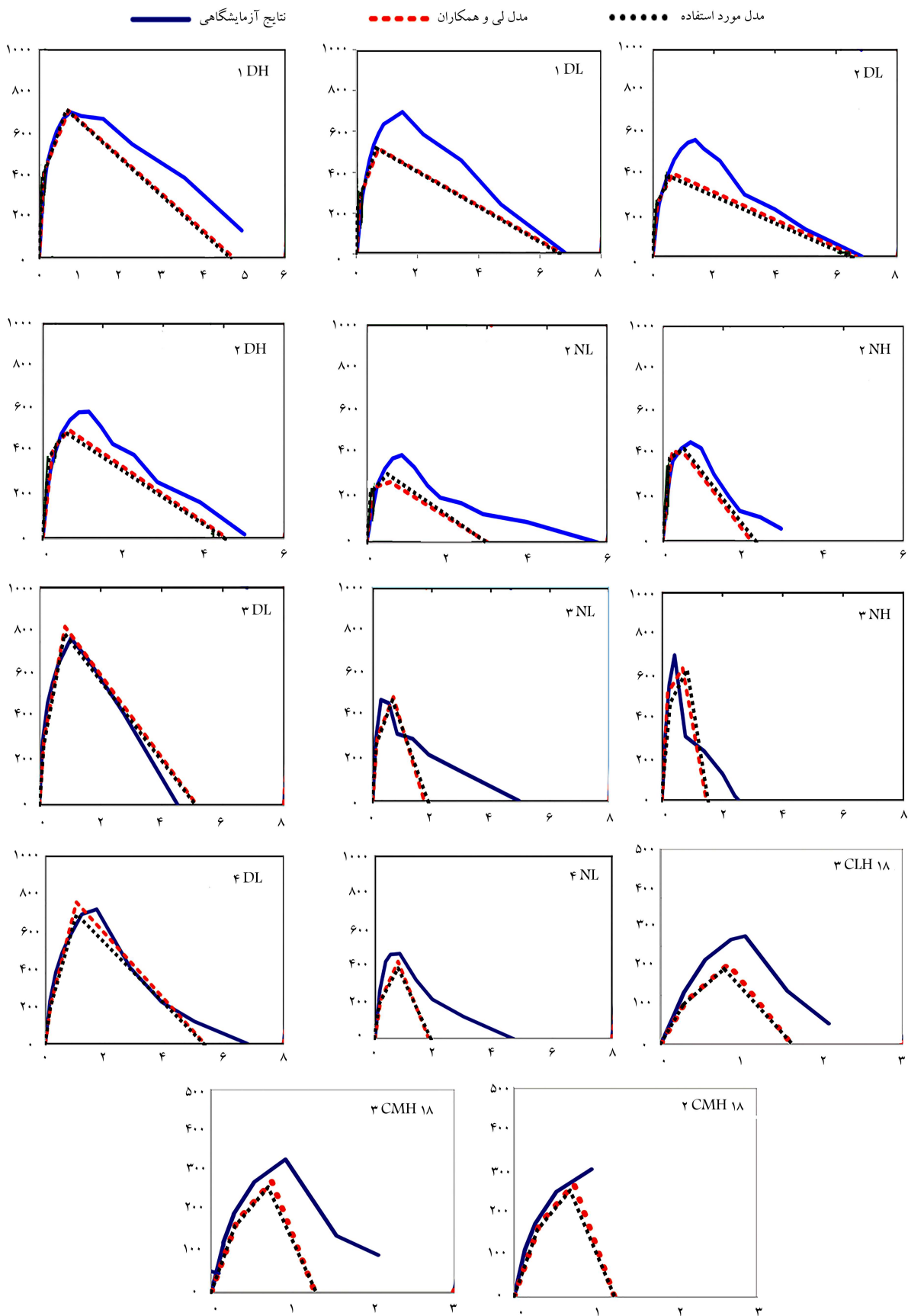
### ۱.۲. مکانیزم پاسخ مدل پیشنهادی

مدل تهیه شده، رفتار برشی ستون‌های کوتاه را توسط یک المان ماکرو نشان می‌دهد. رفتار خمشی و رفتار برشی به صورتی همبسته شده‌اند که معادلات تعادل و شرایط همسازی را ارضا می‌کنند. تحت بارهای جانبی، نیروی برشی هر دو المان با یکدیگر برابر است، ولی مقدار تغییرشکل هر المان با یکدیگر متفاوت خواهد بود. اگر ظرفیت برشی ستون از مقاومت خمشی آن کمتر باشد، ستون در برش گسیخته خواهد شد. در شکل ۵، پاسخ شکست برشی ستون به صورت شماتیک مشاهده می‌شود. قبل از رسیدن ستون به مقاومت برشی خود، پاسخ برشی و پاسخ خمشی به طور هم‌زمان و در یک خط گسترش می‌یابند. زمانی که مقاومت برشی مورد نیاز از ظرفیت برشی تجاوز کند، شکست برشی رخ خواهد داد و پاسخ برشی وارد مرحله‌ی نزولی می‌شود، که میزان قابل توجهی زوال در رفتار آن مشاهده می‌شود و متعاقباً رفتار برشی بر سازه حاکم می‌شود و مقاومت ستون نیز توسط نیروی برشی المان برشی تعیین می‌شود. اگر ظرفیت برشی ستون از مقاومت خمشی آن بیشتر باشد، ستون در خمش گسیخته خواهد شد. در شکل ۶، پاسخ شکست خمشی ستون مشاهده می‌شود. قبل از رسیدن ستون به مقاومت خمشی خود، پاسخ برشی و پاسخ خمشی به طور هم‌زمان و در یک خط گسترش می‌یابند. زمانی که مقاومت برشی مورد نیاز از ظرفیت خمشی تجاوز کند، شکست خمشی رخ خواهد داد و پاسخ خمشی وارد

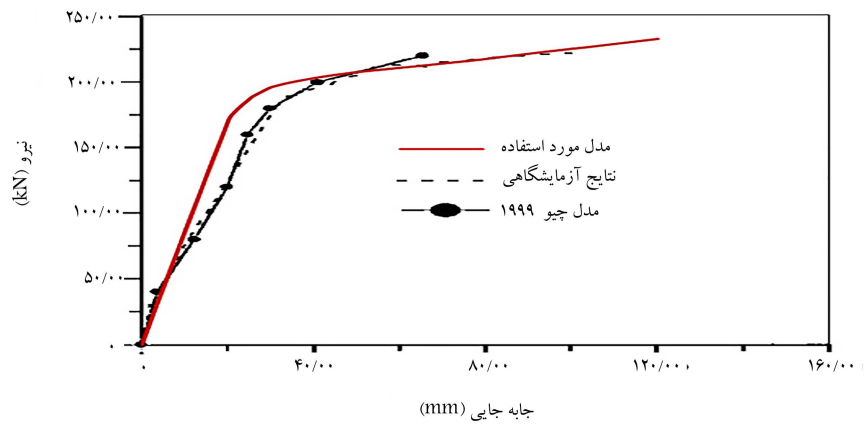
برگرفته شده است.<sup>[۱-۴]</sup> در شکل ۳، تطابق رفتار مصالح اتخاذ شده با مدل‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

برای مدل‌سازی رفتار خمشی ستون در نرم‌افزار OpenSees، از المان Force-BeamColumn، که به یک مقطع فایبر اعمال می‌شود، استفاده شده است. به طور کلی، المان‌ها، نیروهای داخلی و ماتریس سختی خود را محاسبه و به‌روزرسانی می‌کنند. المان ForceBeamColumn جهت انجام فرایند اخیر از توابع درون‌یابی نیروهای داخلی استفاده می‌کند. ورودی توابع مذکور از جنس نیرو است و آنها، نیروهای گره‌ی موجود را به نیروهای داخلی تبدیل می‌کنند. همچنین از مدل ارائه شده توسط مصطفایی و کایاساوا (۲۰۰۴) جهت مدل‌سازی دیوار استفاده شده است.<sup>[۲۱]</sup> به طور کلی مودهای شکست میانقاب به ۴ دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند: (۱) شکست برشی ناشی از لغزش به صورت افقی، (۲) شکست فشاری قطری، (۳) ترک‌خوردگی کششی قطری، که یک شکست کلی محسوب نمی‌شود و (۴) مود شکست کششی ناشی از خمش، که معمولاً مود شکست بحرانی به حساب نمی‌آید. برای مدل‌سازی دیوار میانقاب در نرم‌افزار OpenSees، از المان Truss و مصالح ModIMKPeakOriented استفاده شده است. به منظور راستی‌آزمایی مدل‌سازی قاب از نمونه‌ی آزمایشگاهی چیو<sup>۹</sup> و همکاران (۱۹۹۹) استفاده شده است، که مشخصات هندسی آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود.<sup>[۲۲]</sup> که در آن منحنی بار افزون نشانگر تطابق مدل ایجاد شده با مدل آزمایشگاهی است.

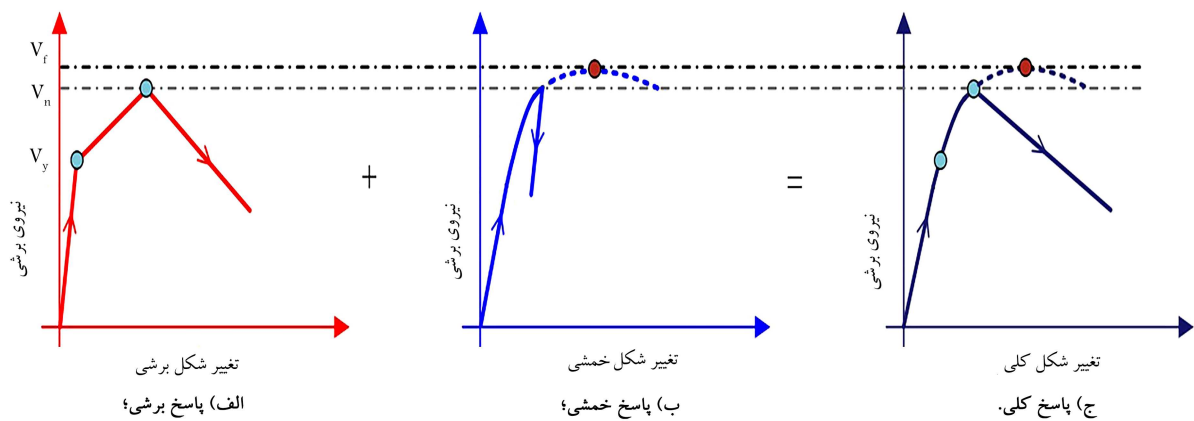
در جدول ۱،  $L$  ارتفاع ستون،  $B$  و  $H$  ابعاد ستون،  $\rho_t$  درصد آرماتورهای طولی،  $\rho_t$  درصد آرماتورهای عرضی،  $s$  فاصله‌ی آرماتورهای عرضی از یکدیگر،  $f'_c$



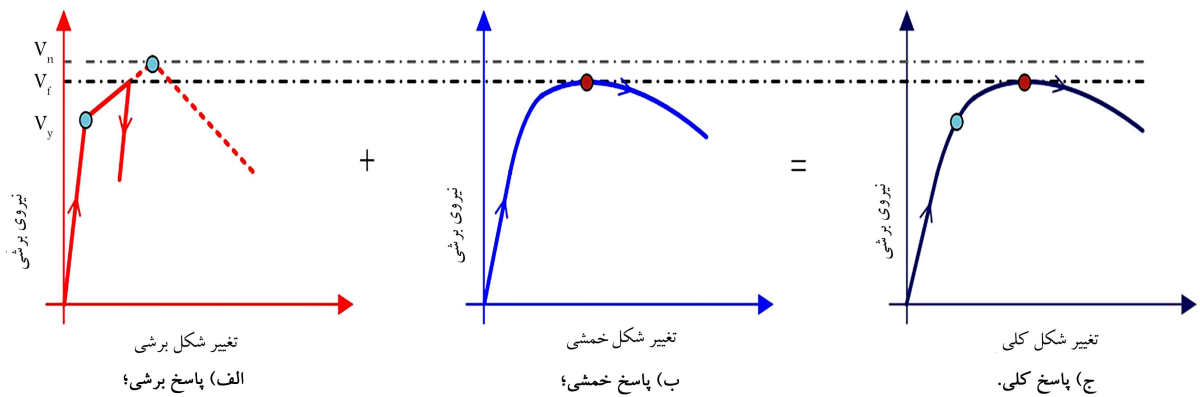
شکل ۳. تطابق رفتار مصالح استفاده شده با مدل‌های آزمایشگاهی (محور قائم بار جانبی بر حسب کیلونیوتن، محور افقی دریفت بر حسب درصد).



شکل ۴. تطابق رفتار قاب مدل سازی شده با مدل های آزمایشگاهی.



شکل ۵. کلیه ی پاسخ ها در مود شکست برشی.



شکل ۶. کلیه ی پاسخ ها در مود شکست خمشی.

خارج از محدوده ی در نظر گرفته شده حذف شدند، تا مقادیر پارامترها در یک بازه ی منطقی قرار بگیرند.

مرحله ی نزولی می شود و متعاقباً رفتار خمشی بر سازه حاکم می شود.

## ۲.۲. ایجاد پایگاه اطلاعاتی گسیختگی خمشی یا برشی ستون

در ابتدا برای ایجاد قاب های تصادفی متشکل از ۱۰ پارامتر انتخابی، پایگاه داده شامل ۲۰۰/۰۰۰ مدل با استفاده از الگوریتم مونت کارلو ایجاد شده است. [۲۵]

اطلاعات آماری مربوط به پارامترها مطابق جدول ۲ منظور شده است.

با توجه به این که در توزیع نرمال نمی توان کمینه و بیشینه ی متصور شد، مقادیر

## ۳.۲. کنترل توزیع پارامترها پس از حذف موارد واگرا شده

با توجه به آن که در انجام تحلیل ها حدود ۵٪ از نمونه ها به دلیل واگرایی مدل حذف شده اند، باید کنترل شود که توزیع مقادیر پارامترها تغییر نکرده باشد. برای بررسی نرمال بودن توزیع پارامترها، از آزمون نمودار چندک چندک استفاده شده است. [۹]

جدول ۲. اطلاعات آماری مربوط به پارامترها.

ردیف	پارامتر	میانگین	انحراف معیار	حد پایین	حد بالا
۱	( $t_w$ )	۰/۲	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۲۵
۲	( $h$ )	۴۲/۵	۸/۵	۲۵	۶۰
۳	( $L_c$ )	۲/۹	۰/۲۹	۲/۴	۳/۴
۴	( $\rho_l$ )	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۳
۵	( $\rho_s$ )	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳۵
۶	( $L_b$ )	۴/۲	۰/۸۴	۲/۴	۶
۷	( $\bar{P}$ )	۰/۴	۰/۱۴	۰/۱	۰/۷
۸	( $\bar{H}_w$ )	۰/۶۵	۰/۱۳	۰/۴	۰/۹
۹	( $f'_c$ )	۲۰/۵	۲/۰۵	۱۶	۲۵
۱۰	( $f_y$ )	۳۷۰	۱۸/۵	۳۴۰	۴۰۰

تصمیم (DT) و آزمون F (FT)، میزان اهمیت پارامترهای مدنظر در تشکیل پدیده‌ی ستون کوتاه، [۲۷، ۲۸] بررسی و خلاصه‌ی نتایج در ادامه ارائه شده است.

### ۱.۲.۳. روش تحلیل مؤلفه‌ی اساسی (PCA)

در ابتدا، با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌ی اساسی، ترتیب اهمیت پارامترها در تشکیل ستون کوتاه مشخص شده است. در شکل ۹ - الف مشاهده می‌شود که با استفاده از روش PCA واریانس پارامترهای مختلف و تقریباً ۷ پارامتر اول، اهمیت تقریباً یکسانی دارند. این موضوع در شکل ۹ - ب نیز مشاهده می‌شود، که مطابق آن با در نظر گرفتن تعداد پارامترهای بیشتر، میزان واریانس جمعی تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا کرده است. به عنوان مثال، برای رسیدن به واریانس جمعی ۹۰ درصدی، باید ۸ پارامتر از ۱۰ پارامتر بررسی شده را لحاظ کرد. لذا می‌توان بدین صورت نتیجه‌گیری کرد که روش PCA قادر به تشخیص کارآمد مؤثرترین پارامترها نخواهد بود و نمی‌توان با استفاده از روش PCA با کاهش تعداد متغیرها به نتایج مناسبی دست پیدا کرد.

### ۲.۲.۳. درخت تصمیم (DT)

در شکل ۱۰ - الف مشاهده می‌شود که با استفاده از روش درخت تصمیم، واریانس پارامترها متفاوت است و تقریباً ۴ پارامتر، اهمیت بالایی نسبت به سایر پارامترها دارند. با مشاهده‌ی نتایج روش درخت تصمیم می‌توان این‌گونه استنباط کرد که مؤثرترین پارامترها در تشکیل ستون کوتاه به ترتیب عبارت‌اند از:

✓ نسبت آرماتور عرضی ستون با ضریب اهمیت ۰/۲۵،

✓ نسبت ارتفاع دیوار به ستون با ضریب اهمیت ۰/۲۱،

✓ ارتفاع مقطع ستون با ضریب اهمیت ۰/۲،

✓ نسبت آرماتور طولی ستون با ضریب اهمیت ۰/۱۲.

سایر پارامترها، همگی ضریب اهمیت کمتر از ۰/۰۵ دارند. کم‌اهمیت‌ترین پارامترها نیز عبارت‌اند از: نسبت بار محوری و تنش تسلیم آرماتور.

در شکل ۱۰ - ب مشاهده می‌شود که شیب نمودار در ابتدا زیاد و سپس کاهش پیدا کرده است، که در واقع بیان‌گر اهمیت بالای پارامترهای ابتدایی و اهمیت خیلی کمتر سایر پارامترهاست. به عنوان مثال، برای رسیدن به واریانس جمعی ۹۰ درصدی، باید ۵ پارامتر از ۱۰ پارامتر مورد بررسی را لحاظ کرد.

### ۳.۲.۳. آزمون F (F-Test)

در شکل ۱۱ - الف مشاهده می‌شود که با استفاده از روش آزمون F، واریانس پارامترها متفاوت است و دو پارامتر، اهمیت نسبتاً بالایی نسبت به سایر پارامترها دارند، که به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از:

✓ نسبت آرماتور عرضی ستون:  $F - \text{value} = ۳۰۰۰۰$

✓ نسبت ارتفاع دیوار به ستون:  $F - \text{value} = ۲۵۰۰۰$

✓ ارتفاع مقطع ستون با:  $F - \text{value} = ۱۲۵۰۰$

✓ نسبت آرماتور طولی ستون با:  $F - \text{value} = ۹۰۰۰$

سایر پارامترها، همگی F-value کمتر از ۵۰۰۰ دارند. کم‌اهمیت‌ترین پارامترها به ترتیب عبارت از تنش تسلیم آرماتور و نسبت بار محوری هستند. در شکل ۱۱ - ب مشاهده می‌شود که شیب نمودار در ابتدا زیاد و سپس کاهش پیدا کرده است، که در واقع بیان‌گر اهمیت بالای پارامترهای ابتدایی و اهمیت خیلی کمتر سایر پارامترهاست. به عنوان مثال، برای رسیدن به واریانس جمعی ۹۰ درصدی، باید ۳ پارامتر از ۱۰ پارامتر مورد بررسی را لحاظ کرد.

در روش آزمون نرمال بودن QQ-Plot، هر چه منحنی به دست آمده به خط نیمساز نمودار نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی تطابق بهتر با توزیع نرمال است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، برای تمامی پارامترها، علی‌رغم حذف شدن برخی از نمونه‌ها به علت واگرایی مدل‌سازی، توزیع داده‌ها دارای تطابق بسیار خوبی با توزیع نرمال هستند.

از آن‌جا که با اتخاذ مقادیر حد پایین و حد بالا برای پارامترهای منتخب مطابق صفر، در واقع از توزیع نرمال بریده شده ۱۰ استفاده شده است، در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی نمودار، منحنی‌های QQ-Plot از خط نیمساز فاصله دارند. نکته‌ی قابل ذکر دیگر این‌که در مورد پارامترهای ضخامت دیوار میانقاب و ارتفاع مقطع ستون، با توجه به این‌که از مقادیر ناپیوسته استفاده شده است، منحنی QQ-Plot به صورت پله‌یی ایجاد شده است. همچنین لازم به ذکر است که به علت پیوسته نبودن مقادیر بعد ستون و ضخامت دیوار، نمودار ایجاد شده به صورت پله‌یی است؛ اما با وجود این، تطابق با توزیع نرمال مشاهده می‌شود.

## ۳. بررسی اهمیت پارامترهای انتخابی

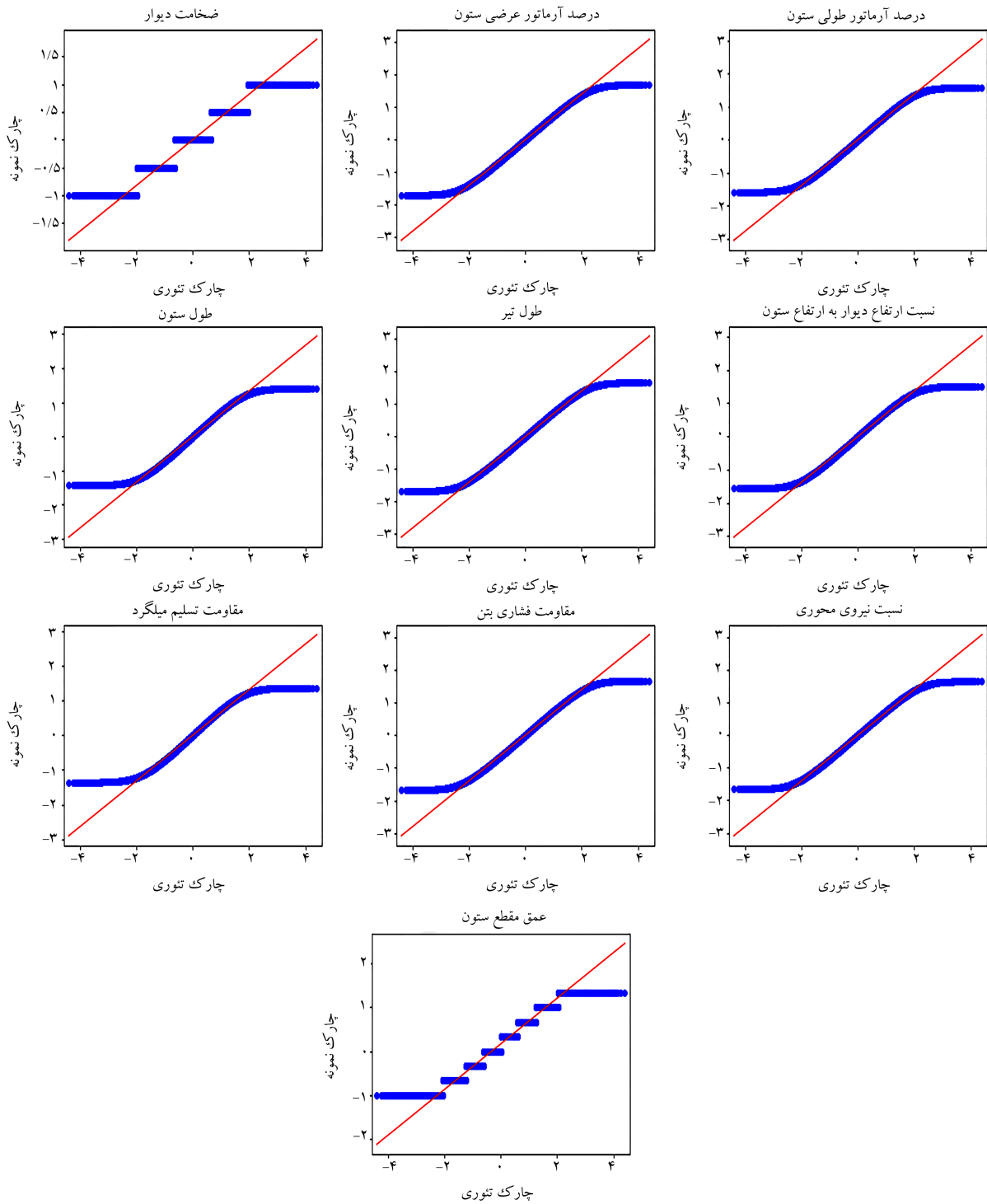
### ۱.۳. مقیاس کردن داده‌های پارامترها

تحلیل مؤلفه‌ی اساسی روی نسخه‌ی نرمال شده‌ی پارامترهای متغیر قابل انجام است. این امر به آن دلیل است که پارامترهای اصلی، مقیاس‌های گوناگونی دارند و واضح است که مقدار واریانس برخی از آنها، اعداد بزرگی خواهد بود. ابتدا باید کلیه‌ی پارامترهای ارائه شده در جدول ۲ نرمال‌سازی شوند، [۱۳] تا در بخش بعدی به درستی از روش‌های یادگیری ماشین و همبستگی استفاده شود. در پژوهش حاضر، از روش مقیاس استوار [۱۱] استفاده شده است. [۲۶] در شکل ۸، دو نمونه از پارامترهای مقیاس شده مشاهده می‌شود، که مطابق آن می‌توان دریافت که با مقیاس کردن، نوع توزیع بدون تغییر باقی مانده است و حال می‌توان از داده‌های اخیر برای تعیین مهم‌ترین پارامتر در تشکیل ستون کوتاه استفاده کرد.

### ۲.۳. بررسی اهمیت پارامترهای مختلف با استفاده از روش‌های

#### یادگیری ماشین

در بخش حاضر، با استفاده از سه روش تحلیل: مؤلفه‌ی اساسی (PCA)، درخت



شکل ۷. کنترل نرمال بودن داده‌های اصلاح شده با استفاده از روش QQ-Plot.

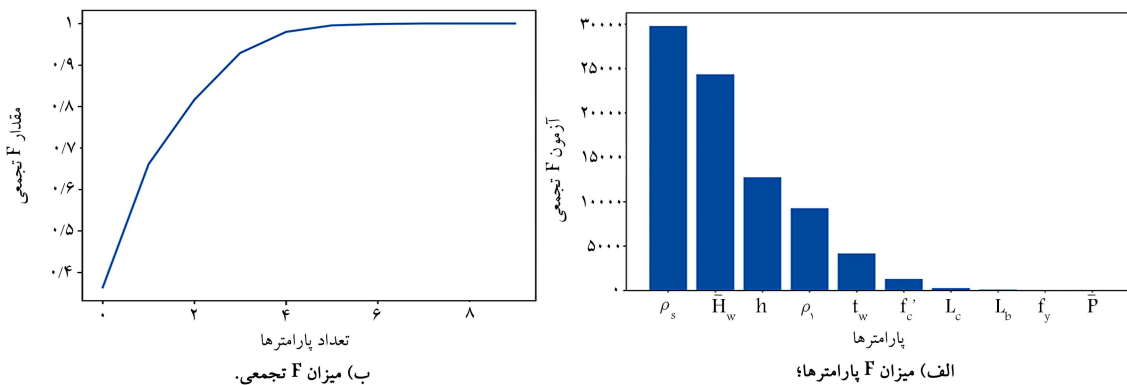
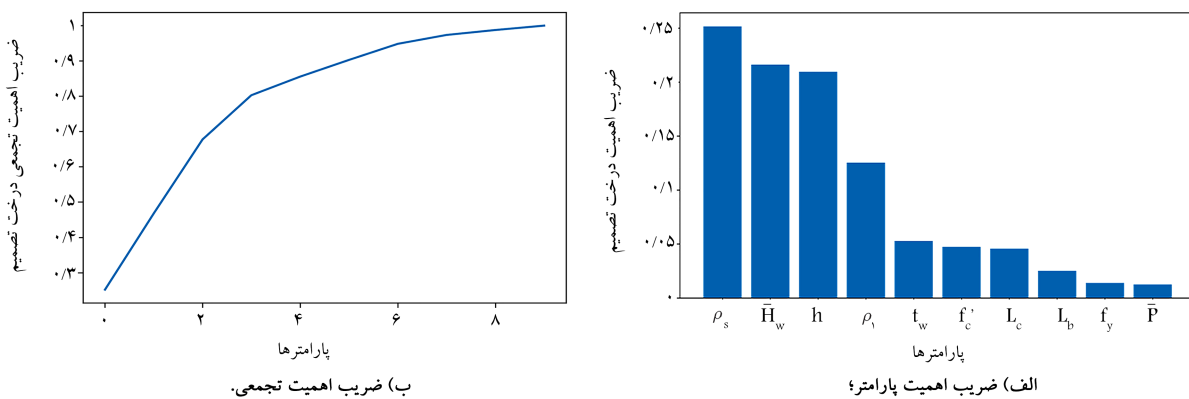
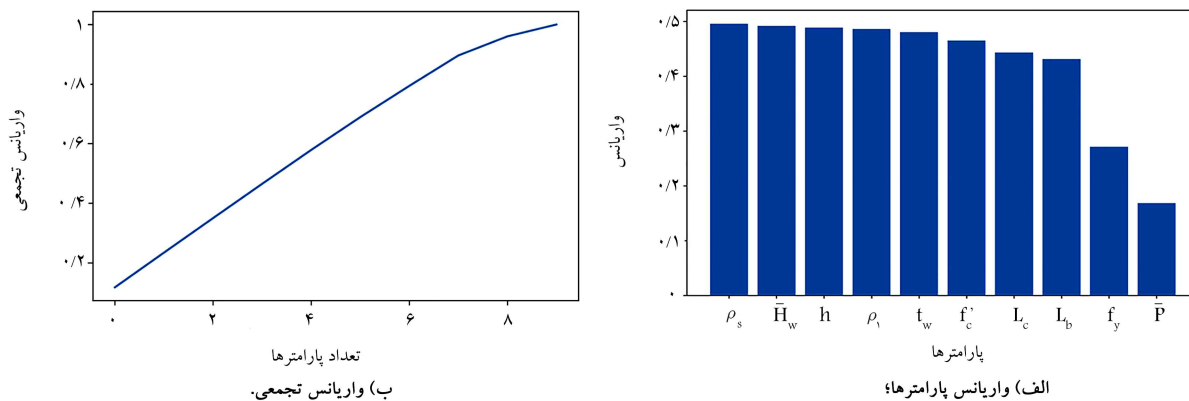
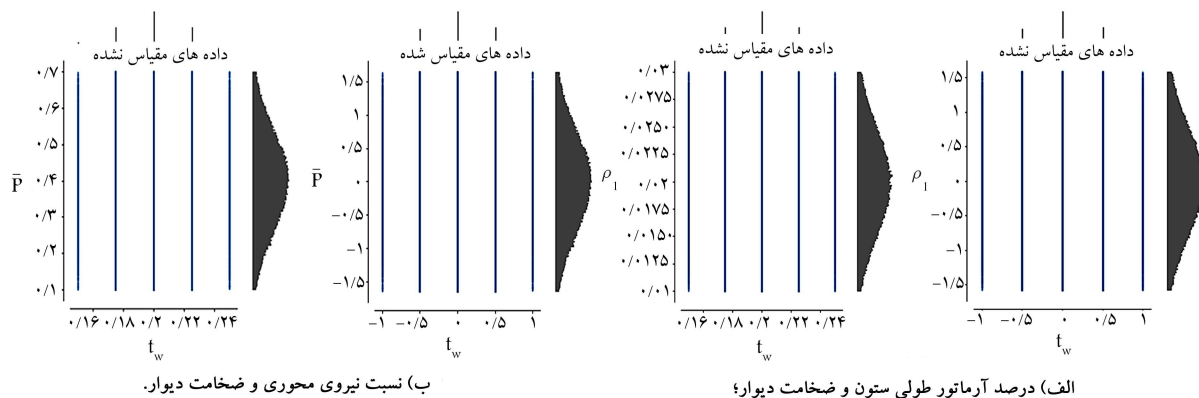
#### ۴. بررسی اهمیت پارامترهای مختلف با استفاده از

#### روش‌های همبستگی

#### ۱.۴. روش همبستگی پیرسون

روش همبستگی پیرسون یک روش تحلیل همبستگی پارامتری است. در تحلیل همبستگی مقدار ۱، نشان‌دهنده انطباق کامل بین رتبه‌ها و مقدار ۰- نیز انطباق

معکوس بین رتبه‌ها را نشان می‌دهد. اگر ضریب همبستگی، مقداری نزدیک صفر شود، مشخص می‌شود که رابطه‌ی خطی بین دو متغیر وجود ندارد. در مقابل، اگر ضریب همبستگی پیرسون مقداری نزدیک یا برابر با ۱ یا -۱ باشد، وجود رابطه‌ی شدید خطی بین دو متغیر تأیید خواهد شد. قطر اصلی ماتریس مذکور برابر ۱ است، زیرا هر ویژگی با خودش طبیعتاً همبستگی بیشینه دارد. اعداد مثبت نشان می‌دهند که با افزایش یک پارامتر، پارامتر دوم نیز افزایش





## ۲.۴. روش همبستگی اسپیرمن

روش همبستگی اسپیرمن، یک روش تحلیل همبستگی ناپارامتری است، که تفسیر نتایج آن نیز مشابه روش همبستگی پیرسون است.<sup>[۱۹]</sup> بررسی نقشه‌ی گرمایی مربوط به همبستگی اسپیرمن در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مؤثرترین پارامترها در تشکیل ستون کوتاه به ترتیب عبارت‌اند از:

- ✓ درصد آرماتورهای عرضی ستون با ضریب همبستگی ۰/۴-،
  - ✓ نسبت ارتفاع دیوار میانقاب به ارتفاع ستون با ضریب همبستگی ۰/۳-،
  - ✓ عمق مقطع ستون با ضریب همبستگی ۰/۳-،
  - ✓ درصد آرماتور طولی ستون با ضریب همبستگی ۰/۲-،
  - ✓ ضخامت دیوار میانقاب با ضریب همبستگی ۰/۱-،
- همچنین کم‌اثرترین پارامترها در تشکیل ستون کوتاه به ترتیب عبارت‌اند از:
- ✓ تنش تسلیم آرماتور به ضریب همبستگی ۰/۰۰۱-،
  - ✓ نسبت نیروی محوری با ضریب همبستگی ۰/۰۰۱-،
  - ✓ طول تیر با ضریب همبستگی ۰/۰۲-.

ارتباط و همبستگی بین تمامی پارامترهای مدنظر، بسیار پایین است و روش همبستگی اسپیرمن نیز تأیید می‌کند که تمامی پارامترها مستقلاً در تشکیل پدیده‌ی ستون کوتاه مؤثر بوده‌اند.

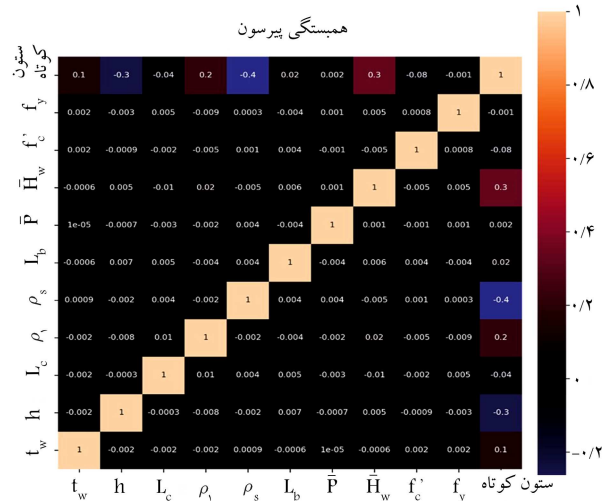
با توجه به این‌که تطابق و همخوانی بسیار مناسبی در هر دو روش همبستگی وجود دارد، اثر پارامترهای مهم بدین صورت خواهد بود:

- ✓ با افزایش درصد آرماتورهای عرضی ستون، احتمال وقوع ستون کوتاه افزایش می‌یابد.
- ✓ با افزایش نسبت ارتفاع دیوار به ستون، احتمال وقوع ستون کوتاه کاهش می‌یابد.
- ✓ با افزایش عمق مقطع ستون، احتمال وقوع ستون کوتاه افزایش می‌یابد.
- ✓ با افزایش درصد آرماتور طولی ستون، احتمال وقوع ستون کوتاه کاهش می‌یابد.
- ✓ با افزایش ضخامت دیوار میانقاب، احتمال وقوع ستون کوتاه افزایش می‌یابد.

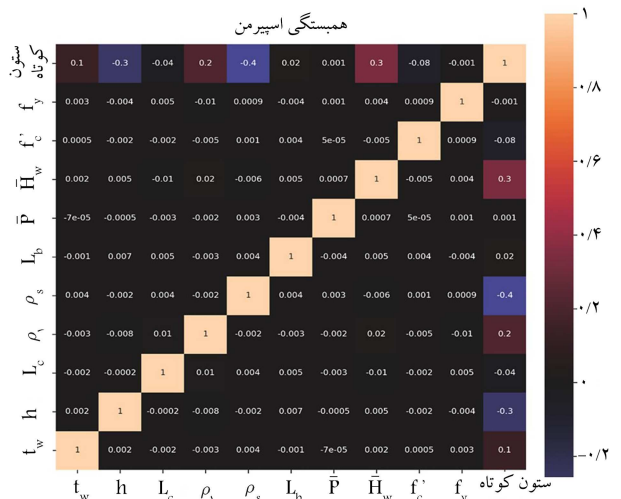
## ۵. نتیجه‌گیری

با وجود اهمیت زیاد ستون کوتاه در ایجاد آسیب و فروریزش ساختمان‌های بتنی در زلزله‌های پیشین، تاکنون میزان اهمیت پارامترهای مؤثر در تشکیل پدیده‌ی ستون کوتاه به صورت جامع مشخص نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، اهمیت پارامترهای مختلف با ایجاد یک پایگاه داده متشکل از ۲۰۰،۰۰۰ مدل قاب بتنی مسلح یک طبقه در نرم‌افزار OpenSees، انجام تحلیل‌های پوش‌آور و تشخیص نوع شکست ستون در هر حالت با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و همبستگی بررسی شده است.

علی‌رغم موفق نبودن روش PCA در تشخیص مناسب میزان اهمیت پارامترها، روش‌های DT و آزمون F و همچنین روش‌های همبستگی پیرسون و اسپیرمن به خوبی قادر به شناسایی مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین پارامترها در شکست برشی ستون هستند. با توجه به تطابق روش‌های مذکور و جمع‌بندی تمامی نتایج، نهایتاً دو پارامتر درصد آرماتور برشی ستون و نسبت ارتفاع دیوار به ارتفاع ستون، به عنوان مهم‌ترین پارامترها معرفی شده‌اند. همچنین پارامتر عمق مقطع ستون و درصد آرماتور طولی ستون پارامترهای اصلی سوم و چهارم هستند.



شکل ۱۲. نقشه‌ی حرارتی برای روش همبستگی پیرسون.



شکل ۱۳. نقشه‌ی حرارتی در روش‌های همبستگی اسپیرمن.

می‌یابد.<sup>[۱۸]</sup> بررسی نقشه‌ی گرمایی ۱۲ مربوط به همبستگی پیرسون در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که مؤثرترین پارامترها در تشکیل ستون کوتاه به ترتیب عبارت‌اند از:

- ✓ درصد آرماتورهای عرضی ستون با ضریب همبستگی ۰/۴-،
  - ✓ نسبت ارتفاع دیوار میانقاب به ارتفاع ستون با ضریب همبستگی ۰/۳-،
  - ✓ عمق مقطع ستون با ضریب همبستگی ۰/۳-،
  - ✓ درصد آرماتور طولی ستون با ضریب همبستگی ۰/۲-،
  - ✓ ضخامت دیوار میانقاب با ضریب همبستگی ۰/۱-،
- و کم‌اثرترین پارامترها در تشکیل ستون کوتاه به ترتیب عبارت‌اند از:
- ✓ تنش تسلیم آرماتور به ضریب همبستگی ۰/۰۰۱-،
  - ✓ نسبت نیروی محوری با ضریب همبستگی ۰/۰۰۲-،
  - ✓ طول تیر با ضریب همبستگی ۰/۰۲-.

همچنین ملاحظه می‌شود که ارتباط و همبستگی بین تمامی پارامترهای مدنظر بسیار پایین است و در واقع بدین صورت می‌توان تفسیر کرد که تمامی پارامترها مستقلاً در تشکیل پدیده‌ی ستون کوتاه اثرگذارند.

تحلیل‌های پیچیده و زمان‌بر به اطلاعات مناسبی در مورد وضعیت ستون دست پیدا کند.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از حمایت مالی پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی در انجام پژوهش حاضر، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

از نتایج پژوهش حاضر می‌توان در کارهای آتی جهت ارائه‌ی مدل‌هایی برای پیش‌بینی سریع رفتار برشی یا خمشی ستون بدون انجام تحلیل یا آزمایش و فقط با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین استفاده کرد، تا بتوان به سادگی نوع شکست ستون را شناسایی کرد.

برای استفاده‌ی بهتر از نتایج پژوهش حاضر، می‌توان در کارهای آتی اقدام به تولید یک نرم‌افزار با رابط کاربری ساده و گرافیکی کرد، تا کاربر به سادگی و بدون انجام

## پانوشته‌ها

1. Li
2. Moretti
3. Jin
4. principal component analysis
5. decision tree
6. F-test
7. Spearman
8. Pearson
9. Chiou
10. truncated normal distribution
11. robust scaling
12. heat map

## منابع (References)

1. Li, Y.-A., Huang, Y.-T. and Hwang, S.-J. "Seismic response of reinforced concrete short columns failed in shear", *ACI Structural Journal*, **111**(4), p. 945-954 (2014).
2. Li, Y.-A. and Hwang, S.-J. "Prediction of lateral load displacement curves for reinforced concrete short columns failed in shear", *Journal of Structural Engineering*, **143**(2), 4016164 (2017).
3. Li, Y.-A., Weng, P.-W. and Hwang, S.-J. "Seismic performance of reinforced concrete intermediate short columns failed in Shear", *ACI Structural Journal*, **116**(3), pp. 195-206 (2019).
4. Shen, W.-C., Hwang, S.-J., Li, Y.-A. and et al. "Force-displacement model for shear-critical reinforced concrete columns", *ACI Structural Journal*, **118**(1), pp. 241-249 (2021).
5. Moretti, M.L. "Behavior and aseismic design of short columns", *Conference: 3<sup>rd</sup> Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey (2002).
6. Moretti, M. and Tassios, T.P. "Behaviour of short columns subjected to cyclic shear displacements: experimental results", *Engineering Structures*, **29**(8), pp. 2018-2029 (2007).
7. Jin, L., Zhang, S., Li, D. and et al. "A combined experimental and numerical analysis on the seismic behavior of short reinforced concrete columns with different structural sizes and axial compression ratios", *International Journal of Damage Mechanics*, **27**(9), pp. 1416-1447 (2018).
8. Beheshti Aval, H. and Ketabdari, S.B. "Estimating shear strength of rectangular short reinforced concrete columns using genetic programming", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **34.2**(4.1), pp. 101-111 (In Persian) (2019).
9. \DJUROVIĆ, Ž.M. and KOVAČEVIĆ, B.D. "QQ-plot approach to robust Kalman filtering", *International Journal of Control*, **61**(4), pp. 837-857 (1995).
10. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A. and et al. "Scikit-learn: machine learning in python," *The Journal of machine Learning research*, **12**(85), pp. 2825-2830 (2011).
11. Salzberg, S.L. "C4. 5: programs for machine learning by j. ross quinlan. morgan kaufmann publishers, inc., 1993", *Kluwer Academic Publishers* (1994).
12. St, L. and Wold, S. "Analysis of variance (ANOVA)", *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, **6**(4), pp. 259-272 (1989).
13. MacQueen, J. and others, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations", *In Proceedings of the 5<sup>th</sup> Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, **1**(14), pp. 281-297 (1967).
14. Bradley, A.P. "The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms", *Pattern Recognition*, **30**(7), pp. 1145-1159 (1997).
15. Gönen, M. "Receiver operating characteristic (ROC) curves", *SAS Users Group International (SUGI)*, **31**, pp. 210-231 (2006).
16. Altman, N.S. "An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression", *The American Statistician*, **46**(3), pp. 175-185 (1992).
17. Jolliffe, I.T. "Principal Component Analysis", *Springer Series in Statistics*, **29** (2002).
18. Benesty, J., Chen, V, Huang, Y. and et al. "Pearson correlation coefficient", *In Noise Reduction in Speech Processing*, Springer, pp. 1-4 (2009).
19. Myers, L. and Sirois, M.J. "Spearman correlation coefficients, differences between", *Encyclopedia of Statistical Sciences*, **12** (2004).

20. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H. and et al. "OpenSees command language manual", *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, **264**, pp. 137-158 (2006).
21. ASCE/SEI 31-41, "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings", Published online: (May 29 2014).
22. Hossein, M. and Kabeyasawa, T. "Effect of infill masonry walls on the seismic response of reinforced concrete buildings subjected to the 2003 Bam earthquake strong motion: a case study of Bam telephone center", *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **79**(3), pp. 133-156 (2004).
23. Chiou, Y.-J., Tzeng, J.-C. and Liou, Y.-W. "Experimental and analytical study of masonry infilled frames", *Journal of Structural Engineering*, **125**(10), pp. 1109-1117 (1999).
24. Lynn, A.C., Moehle, J.P., Mahin, S.A. and et al "Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns", *Earthquake Spectra*, **12**(4), pp. 715-739 (1996).
25. Pouraminian, H. and Ekrannejad, M. "Reliability analysis of concrete arch dam under stage construction and hydrostatic pressure by MCS and RS methods", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **37.2**(3.2), pp. 135-145 (In Persian) (2021).
26. Spence, I. and Lewandowsky, S. "Robust multidimensional scaling", *Psychometrika*, **54**(3), pp. 501-513 (1989).
27. Rokach, L. and Maimon, O. "Top-down induction of decision trees classifiers-a survey", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, **35**(4) pp. 476-487 (2005).
28. Huang, L.-S. and Chen, J. "Analysis of variance, coefficient of determination and F-test for local polynomial regression", *The Annals of Statistics*, **36**(5), pp. 2085-2109 (2008).