

کاهش مقاومت برشی بر اثر تغییر مکان جانبی ستون استوانه‌ای بتن مسلح

مصطفی برقی^{۱*}، احسان اله لگزیان^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵

mostafabarghi@yahoo.com

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۷)

چکیده - انهدام برشی، یکی از علل خرابی ستون‌های بتن آرمه بر اثر بار زلزله و بارهای تناوبی است. در این تحقیق عوامل مختلف مؤثر در این نوع انهدام بررسی می‌شود. مدل‌های گوناگونی که توسط محققان و مؤسسات تحقیقاتی برای محاسبه کاهش مقاومت برشی مقاطع ستون‌ها ارائه شده، مطالعه شده و سپس مدل جدیدی ارائه می‌شود. این تحقیق بر اساس نتایج ۱۰۲ آزمایش بارگذاری تناوبی بر روی ستون‌هایی با مقطع دایره‌ای انجام شده است. این نتایج از بانک اطلاعاتی مؤسسه تحقیقاتی زلزله‌شناسی پاسیفیک برداشت شده است. در مدل پیشنهادی ابتدا نوع انهدام ستون تعیین و سپس درصد کاهش مقاومت برشی آن با توجه به شکل‌پذیری ستون تخمین زده می‌شود.

کلید واژگان: انهدام برشی، کاهش مقاومت برشی، بارگذاری تناوبی، ستون‌های بتن آرمه، خرابی ستون‌ها.

۱- مقدمه

اگر نیروی برشی وارد بر ستون از ظرفیت برشی مقطع ستون بیشتر باشد، انهدام برشی قبل از تسلیم خمشی و به‌صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. اگر نیروی برشی وارد بر ستون از مقاومت برشی کاهش یافته مقطع ستون بیشتر شود، انهدام برشی یا انهدام خمشی برشی احتمال دارد. تعیین مقدار کاهش مقاومت برشی مقطع در هنگام بارگذاری، نقشی اساسی در تعیین موقع انهدام و نوع آن دارد. در این تحقیق مهمترین مدل‌های تعیین مقاومت برشی مقطع ستون‌ها و روند کاهش آن در موقع بارگذاری، مطالعه و بررسی می‌شود. محدودیت‌های این مدل‌ها نیز بحث شده و با استفاده از نتایج تعداد زیادی نمونه آزمایش شده، مدل مناسب‌تری ارائه شده است.

در طراحی سازه‌های بتن‌آرمه سعی می‌شود از انهدام برشی که به‌صورت ترد و ناگهانی است جلوگیری شود، اما مطالعات آزمایشگاهی نشان داده بسیاری از ستون‌های موجود بر اثر بارهای تناوبی در معرض انهدام برشی قرار دارند [۱].

موضوع انهدام برشی و علل آن در ارزیابی و تحلیل خسارت سازه‌های موجود و اصلاح روش‌های طراحی و اجرا کاربرد مهمی دارد. هنگامی که سازه بارگذاری می‌شود، اگر نیروی برشی ایجاد شده در مقطعی از مقاومت برشی موجود بیشتر شود، انهدام برشی اتفاق می‌افتد. انهدام برشی ستون‌ها را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود:

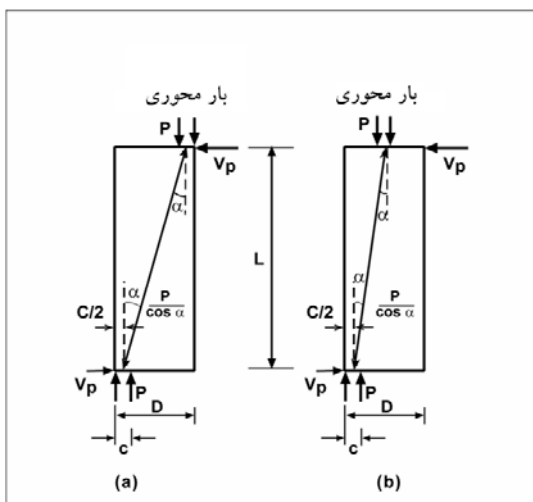
انهدام برشی قبل از تسلیم خمشی، انهدام برشی پس از تسلیم خمشی و انهدام خمشی برشی پس از تسلیم خمشی.

برای تعیین K دو حالت در نظر گرفته می‌شود. یکی آنکه ستون در معرض خمش تک‌محوری قرار داشته باشد و دیگری آنکه در معرض خمش دو محوری قرار گیرد. سطح مؤثر برشی (A_e) برابر 0.8 سطح کل مقطع (A_{gross}) برای ستون‌های با مقطع دایره یا مستطیل می‌باشد. حد بالای $K\sqrt{f'_c}$ ، با واحد نیوتن - میلی‌متر برابر $0.29\sqrt{f'_c} MPa$ و با واحد پوند - اینچ برابر $3.5\sqrt{f'_c} psi$ است. V_p اثر بار محوری در ظرفیت برشی مقطع است (شکل ۲). نیروی محوری فشاری مقاومت برشی ستون را با عمل قوسی افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت برشی بر اثر مؤلفه افقی فشار قطری ستون رخ می‌دهد. این مؤلفه به‌طور مستقیم در مقابل نیروی برشی مقاومت می‌کند.

$$V_p = P \tan \alpha = \frac{D-C}{2a} \times P \quad (3)$$

در این مدل، V_p با افزایش تغییر شکل ستون کاهش نمی‌یابد. V_s سهم میل‌گردهای عرضی در افزایش مقاومت برشی ستون است. مشارکت میل‌گردهای عرضی در ظرفیت برشی مقطع بر اساس سازوکار خرابی انجام می‌شود.

سهم مقاومت میل‌گردهای عرضی در ستون‌هایی با مقطع دایره‌ای از رابطه (۴) و برای ستون‌هایی با مقطع مستطیل از رابطه (۵) به‌دست می‌آید:



شکل ۲ مشارکت نیروی محوری در مقاومت برشی ستون‌ها

۲- مدل‌های تعیین مقاومت برشی ستون‌ها

ظرفیت برشی مقطع ستون شامل مقاومت برشی بتن، میل‌گردهای عرضی و اثر بار محوری است. در بارگذاری دوره‌ای با افزایش تعداد و عرض ترکها و تضعیف عملکرد قفل و بست دانه‌ای، مقاومت برشی بتن کم می‌شود، همچنین با کاهش تنش چسبندگی که در مکانیسم خرابی مورد نیاز است از مقاومت برشی میل‌گردهای عرضی کاسته می‌شود. مدل‌های ارائه شده در این زمینه، بر اساس مقدار شکل‌پذیری ستون، کاهش ظرفیت برشی آن را به دست می‌دهند.

مهمترین مدل‌های تعیین مقاومت برشی مقطع ستون‌ها و کاهش آن به شرح زیر است:

(الف) مدل کاهش مقاومت برشی پرستلی [1996]

(ب) مدل کاهش مقاومت برشی سیزن [2002]

(ج) مدل مقاومت برشی ACI 318-2005

(د) مدل کاهش مقاومت برشی FEMA 273

(ه) مدل مقاومت برشی آبا (آیین‌نامه بتن ایران)

۲-۱- مدل کاهش مقاومت برشی پرستلی، [۲]

بر اساس این مدل ظرفیت برشی مقطع ستون از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_n = V_c + V_p + V_s \quad (1)$$

V_c سهم بتن در ظرفیت برشی مقطع بوده و مقدار آن به تغییر شکل ستون بستگی دارد:

$$V_c = K \sqrt{f'_c} \times A_e \quad (2)$$

در این رابطه K ضریبی است که کاهش مقدار مقاومت بتن را با توجه به میزان تغییر شکل جانبی ستون مشخص می‌سازد. f'_c مقاومت فشاری بتن و A_e سطح مقطع مؤثر برشی است (شکل ۱).



شکل ۱ کاهش مقاومت برشی بتن با شکل‌پذیری

(مدل پرستلی) [۲]

فرض بر این است که مقاومت برشی بتن بر اثر افزایش ترک‌ها و تضعیف مکانیسم قفل و بست دانه‌ای کاهش می‌یابد، درحالی‌که مقاومت برشی میل‌گردها بر اثر کاهش ظرفیت تنش چسبندگی که در مکانیسم خرابی مورد نیاز است کاهش می‌یابد.

مدل سیزن بر اساس نتایج آزمایش‌های دوره‌ای بر روی ستون‌هایی با مقطع مربع یا مستطیل ارائه شده و ضریب کاهش مقاومت بتن و میل‌گردهای فولادی یعنی K را با توجه به شکل‌پذیری به دست می‌دهد. نمونه‌های مورد مطالعه نامبرده نسبت دهانه برشی ℓ/d بزرگتر از ۲ و کوچکتر از ۴ داشته و نسبت تنش برشی به جذر مقاومت برشی بتن (نمادی از مقاومت برشی بتن) در محدوده ۲ تا ۹ پوند بر اینچ مربع بوده است. این شامل محدوده نسبتاً کوچکی از ستون‌های با انهدام خمشی برشی بوده و برای سایر موارد قابل تعمیم نیست. در مطالعات سیزن، موقع انهدام، زمانی در نظر گرفته شده که مقاومت برشی مقطع ۲۰٪ افت کند.

۲-۳- مدل مقاومت برشی ACI 318-2005 [۴]

آیین‌نامه ساختمانی ACI 318-2005، مقاومت برشی ستون‌هایی که نیروی محوری آنها بزرگتر از $A_g f'_c / 20$ باشد را از روابط (۷) تا (۹) تعیین می‌کند:

$$V_n = V_c + V_s \quad (7)$$

$$V_c = 2 \left(1 + \frac{P}{2000 A_g} \right) f_c b_w d \quad (8)$$

$$V_s = \frac{A_{sv} f_y d}{S} \quad (9)$$

این روابط در سیستم پوند اینچ معتبر است. مطالعات آزمایشگاهی Mohel et al, 1992 [۵] نشان داده که برای ستون‌هایی که میل‌گردهای عرضی کافی دارند، معادلات ACI 318-2005 محافظه‌کارانه است. اما این نتیجه‌گیری برای ستون‌هایی که خاموت کمی دارند قابل تعمیم نیست.

مدل ACI 318-2005 کاهش مقاومت برشی مقطع

ستون را در طول بارگذاری منظور نمی‌کند.

$$V_s = \frac{\pi}{2} \times \frac{A_{sh} \times F_{yh} \times D'}{S} \text{Cot}30 \quad (4)$$

$$V_s = \frac{A_v \times F_{yh} \times D'}{S} \text{Cot}30 \quad (5)$$

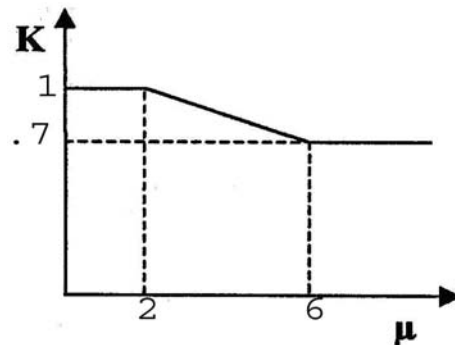
کاهش مقاومت برشی مقطع ستون در ارتباط با شکل‌پذیری جانبی آن است. مطالعات آزمایشگاهی پریستلی مسأله خرابی برشی بعضی از ستون‌ها را که قبل از رسیدن به ظرفیت خمشی اتفاق می‌افتد، روشن کرد [۲]. این مدل بر اساس آزمایش‌هایی بر روی ستون‌هایی با مقطع دایره‌ای ارائه شده و ضریب K کاهش مقاومت برشی را فقط برای بتن در نظر می‌گیرد. در انتهای آزمایش‌ها نمونه‌ها بر اثر گسیختگی برشی منهدم شده‌اند.

۲-۲- مدل کاهش مقاومت برشی سیزن، [۳]

مدل سیزن مانند مدل پریستلی مقاومت برشی ستون را به تقاضای شکل‌پذیری تغییر مکانی مربوط می‌سازد. بر اساس این مدل، مقاومت برشی از دو قسمت تشکیل می‌شود: مقاومت برشی که توسط بتن ایجاد می‌شود (V_c) و مقاومت برشی که توسط میل‌گردهای عرضی با مدل خرابی ۴۵ درجه ایجاد می‌شود (V_s).

$$V_n = K(V_c + V_s) = \frac{K \times 6\sqrt{f'_c}}{l/d} \sqrt{1 + \frac{P}{6\sqrt{f'_c} A_g}} \times 0.8A_g + K \times \frac{A_s f_y d}{S} \quad (6)$$

ضریب K کاهش مقاومت برشی را بر حسب افزایش شکل‌پذیری تغییر مکانی نشان می‌دهد (شکل ۳). در این مدل ضریب کاهش مقاومت برشی هم بر V_c و هم بر V_s اثر می‌کند.



شکل ۳ کاهش مقاومت برشی با شکل‌پذیری تغییر مکانی

(مدل سیزن) [۳]

استفاده شود، به دلیل آنکه زمان انهدام را به موقع نشان نمی‌دهد، دقت نتایج کاهش می‌یابد.

۲-۵-۲- مدل آیین‌نامه بتن ایران (آبا) برای تعیین مقاومت برشی

مقاومت برشی مقطع (V_r) ترکیبی از مقاومت برشی بتن (V_c) و مقاومت برشی فولاد عرضی (V_s) است:

$$V_r = V_c + V_s \quad (11)$$

۲-۵-۱- مقاومت برشی تأمین شده توسط بتن برای اعضای که تحت اثر برش و خمش قرار دارند

$$V_c = 0.2 \varphi_c \sqrt{f_{cc}} \quad (12)$$

مقاومت برشی بتن برای اعضای که تحت اثر برش، خمش و فشار محوری قرار دارند از رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$V_c = v_c \left(1 + \frac{N_u}{12 A_g}\right) b_w d \quad (13)$$

نیروهای برشی مقاوم نهائی بتن V_c را می‌توان با جزئیات دقیق‌تری مطابق بندهای ۱۲-۳-۲ و ۱۲-۳-۲ آیین‌نامه آبا محاسبه نمود.

۲-۵-۲- مقاومت برشی تأمین شده توسط میل‌گردهای عرضی

اگر از میلگردهای عرضی عمود بر محور عضو استفاده شود، مقاومت برشی از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$V_s = \varphi_s A_v f_y \# d/s \quad (14)$$

اگر از میلگردهای عرضی مایل استفاده شود، مقاومت برشی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_s = \varphi_s A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d/s \quad (15)$$

در مدل آبا نظیر مدل *ACI 318-2005* کاهش مقاومت برشی در طول بارگذاری مشخص نمی‌شود. پارامترها در روابط آبا در آخر مقاله توضیح داده شده است و واحد آن‌ها در سیستم بین‌المللی واحدها است.

۳- مشخصات بانک اطلاعاتی مورد استفاده

در این تحقیق [۷]

مشخصات کامل ستون‌ها و تاریخچه تغییر مکان‌ها و نیروها در مورد ۱۰۲ ستون بتن آرمه با مقطع دایره‌ای در این

۲-۴- مدل کاهش مقاومت برشی FEMA 273؛ [۶]

سازمان مدیریت بحران آمریکا (*FEMA*) راهنمای بهسازی ساختمانها را منتشر کرده است. در این راهنما روشی برای ارزیابی مقاومت برشی ستون‌ها ارائه شده که بیشتر بر آزمایش‌های انجام شده بر روی ستون‌هایی متکی است که به‌طور نسبی میل‌گردهای عرضی قابل ملاحظه‌ای دارند. بر اساس توصیه *FEMA 273* مشارکت بتن در مقاومت برشی ستون‌ها بر اساس تقاضای شکل‌پذیری از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید:

$$V_c = 3.5 \left(K + \frac{P}{2000 A_g} \right) \sqrt{f'_c} b d \quad (10)$$

برای شکل‌پذیری ستون کمتر از دو $K=1$ و برای سایر مقادیر شکل‌پذیری $K=0$ منظور می‌گردد.

مشارکت میل‌گردهای جانبی از رابطه $V_s = \frac{A_{sw} f_y d}{S}$ به‌دست می‌آید. پارامترها در سیستم پوند اینچ فرض می‌شود. در نواحی تسلیم ستون، مشارکت میل‌گردهای جانبی موقعی در نظر گرفته می‌شود که $S \leq d/2$ و خاموت‌ها قلاب‌هایی داشته باشند که در هسته بتن فرو رفته باشند.

مدل *FEMA 273* در مقایسه با مدل *ACI 318-2005* محافظه‌کارانه است، به‌ویژه برای مواردی که تقاضای شکل‌پذیری تغییر مکانی از ۲ بیشتر باشد، زیرا در این صورت $K=0$ در نظر گرفته می‌شود. در این مدل ضریب کاهش مقاومت برشی (K) فقط در مورد مقاومت بتن صرف‌نظر از اثر بارهای محوری اعمال می‌شود. تحقیقات نشان داده که میانگین نسبت مقاومت برشی ستون‌هایی که در آزمایشگاه اندازه گرفته شده نسبت به مقاومت برشی محاسبه شده با این مدل برابر $4/73$ و انحراف معیار آن برابر $2/77$ است. این مدل به‌دلیل آنکه از بعضی مقاومت‌ها علی‌رغم وجود آنها در جهت ضریب اطمینان چشم‌پوشی می‌کند، نسبت به مدل‌های دیگر مقاومت برشی را به‌صورت محافظه‌کارانه‌تری محاسبه می‌کند، به بیان دیگر مقدار آن را کمتر از مقاومت برشی واقعی در نظر می‌گیرد. اگر از این مدل در تعیین نشانه خسارت

۴- روش تحقیق

با استفاده از مشخصات و نتایج ۱۰۲ آزمایش بارگذاری ستون‌های بتن آرمه که در [۷] ارائه شده، مطالعات به شرح زیر انجام شده است.

۱- ابتدا ستون‌ها بر اساس نوع انهدام به سه گروه مشخص با انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی تقسیم شد.

۲- منحنی‌های هیستریزس با استفاده از تاریخچه نیروها و تغییر مکان‌ها برای تمامی آزمایش‌ها ترسیم شد.

۳- تغییر مکان تسلیم بر اساس فرض سیزن برای هر ستون بدست آمد.

۴- تغییر مکان نهایی هر ستون یک بار در موقع انهدام و بار دیگر بر اساس فرض تغییر مکان نظیر حالتی که ۲۰٪ مقاومت برشی ستون کاهش یابد (فرض سیزن) تعیین شد.

۵- شکل‌پذیری ($\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$) با استفاده از دو تعریف بند (۴) برای هر ستون محاسبه شد.

۶- با مشخص بودن نیروی جانبی حداکثر وارد شده بر هر ستون (V_{test}) و حداقل مقاومت برشی ستون در انتهای آزمایش (V_{min}) درصد کاهش مقاومت برشی از رابطه
$$\frac{(V_{max} - V_{min})}{V_{max}} \times 100$$
 به دست آمد.

۷- میانگین و انحراف معیار، شکل‌پذیری و درصد کاهش مقاومت برشی مقطع ستون‌ها برای کل نمونه‌ها در سه گروه ذکر شده در بند یک تعیین شد.

۸- بر اساس نتایج بند (۷) و میانگین درصد کاهش مقاومت برشی ستون‌ها سه مدل مشخص برای تعیین روند کاهش مقاومت برشی مقطع ستون‌ها تحت اثر باردوره‌ای پیشنهاد شد.

۹- نسبت‌ها و پارامترهایی که در بحث نوع انهدام حائز اهمیت هستند برای کلیه ستون‌ها محاسبه شد. این پارامترها شامل نسبت‌های دهانه برشی $\frac{l}{d}$ ، نیروی محوری نرمال شده $\frac{P}{Agf'_c}$ ، نسبت تنش برشی به جذر

بانک موجود بوده است. آزمایش بارگذاری بر روی این ستون‌ها به صورت دوره‌ای همراه با بار محوری ثابت تا انهدام ستون‌ها ادامه یافته است. نوع انهدام ستون‌ها به سه گروه برشی، خمشی و خمشی برشی تقسیم‌بندی شده و تغییرات تغییر شکل جانبی، نیروهای وارد شده و منحنی‌های هیستریزس مربوط به هر آزمایش با استفاده از این اطلاعات ترسیم شده است.

تغییر شکل جانبی هر ستون به صورت ضربی از تغییر شکل متناظر در حالت تسلیم با بارگذاری جانبی به صورت دوره‌ای بوده که پس از دو تا پنج دوره مشابه به تدریج افزایش یافته و نهایتاً به انهدام ستون منجر شده است.

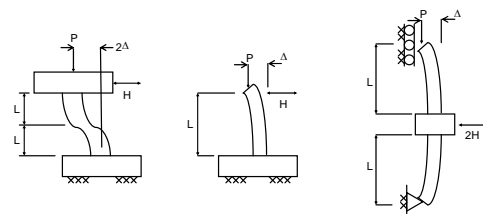
تغییر شکل تسلیم در مورد مقطع بتنی معمولاً به صورت قراردادی تعریف می‌شود. با توجه به موقعیت تکیه‌گاهها و محل اعمال بار جانبی، ستون‌ها به سه گروه تقسیم شده:

۱- نمونه‌های طره‌ای ساده

۲- نمونه‌های دو طرف بسته

۳- نمونه‌های دارای دو انحنا

در مورد نمونه‌های طره‌ای ساده، نیروها و تغییر شکل‌های موجود در بانک اطلاعاتی همان است که توسط محققان اصلی گزارش شده است. در نمونه‌های دو طرف بسته، نیروهای جانبی گزارش شده نصف نیروهایی است که در وسط ستون اعمال شده و تغییر شکل‌های جانبی همان تغییر شکل نسبی وسط ستون نسبت به نقاط انتهایی است. در مورد نمونه‌های با دو انحنا، نیروهای جانبی گزارش شده همان است که بر تیرهای دو طرف نمونه اعمال شده و تغییر شکل‌های جانبی نصف تغییر مکان نسبی دو طرف ستون نسبت به هم است. در شکل (۴) سه حالت فوق نشان داده شده است:



شکل ۴ حالت‌های مختلف تکیه‌گاهی ستون‌ها

۵- بررسی نتایج آزمایش‌ها و مقایسه آنها با مدل سیزن

۱- میانگین درصد کاهش مقاومت برشی برای سه گروه ستون‌ها با انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی به ترتیب ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۷٪ به دست آمد.

۲- میانگین درصد کاهش مقاومت برشی در گروه با انهدام خمشی با مدل سیزن هماهنگی نسبی داشت. لازم است توضیح دهیم که ستون‌های مورد مطالعه سیزن انهدام خمشی داشته‌اند.

۳- درصد کاهش مقاومت برشی در ستون‌های با انهدام برشی با مدل سیزن که درصد کاهش را حداکثر ۳۰٪ معرفی می‌کند، تطابقی نداشت و ۵۷٪ اختلاف نشان داد.

۴- بر اساس توضیحات بند (۳) استفاده از مدل سیزن در ستون‌های با انهدام برشی از دقت کافی و مورد قبول برخوردار نیست.

۵- میانگین ضریب شکل‌پذیری (μ_1) با فرض سیزن در مورد تغییر شکل تسلیم و نهائی برای سه گروه به ترتیب برابر ۶/۱۱، ۲/۸۲ و ۱/۹ به دست آمد.

$$\text{مقاومت فشاری بتن } v = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{bd} \sqrt{f'_c} \text{ درصد}$$

آرماتور طولی (ρ) و درصد آرماتورهای عرضی (ρ') است. زوال مقاومت برشی با استفاده از نتایج آزمایش‌ها به عنوان نمونه برای ستون‌های با انهدام برشی در جدول (۱) ارائه شده است.

در این جدول V_{\max} نیروی برشی حداکثر وارد شده بر نمونه، V_{\min} نیروی برشی حداقل (پس از زوال مقاومت برشی ستون)، Δy تغییر شکل تسلیم (شکل ۶)،

$$\Delta u \text{ تغییر مکان نهایی و } \mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \text{ شکل‌پذیری تغییر}$$

مکانی ستون‌های مورد مطالعه می‌باشد. نظر به اینکه براساس میانگین نتایج مدل پیشنهادی ارائه شده است انحراف معیار نتایج آزمایشگاهی نسبت به میانگین (مدل پیشنهادی) همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است برابر ۱۴/۶ درصد می‌باشد.

جدول ۱ نمونه‌ای از مشخصات ستون‌ها با انهدام برشی

نوع انهدام: برشی Shear

شماره آزمایش	قطر (mm)	طول (mm)	f'_c (Mpa)	P (kN)	V_{\max} (kN)	V_{\min} (kN)	Δy	μ_1	μ_2	درصد زوال
۲۷۰	۴۰۰	۸۰۰	۳۰/۶	۰	۲۸۹/۱۷	۱۸۳/۵۶	۹/۷۱	۱/۷۵	۱/۸۶	۳۶/۵۲
۲۷۲	۴۰۰	۶۰۰	۳۰/۱	۰	۳۹۱/۶۵	۱۹۰/۰۹	۹/۰۰	۱/۲۲	۱/۶۹	۵۱/۴۶
۲۷۳	۴۰۰	۸۰۰	۲۹/۵	۰	۲۸۰/۶۶	۹۱/۳۹۸	۱۱/۳۴	۲/۶۹	۲/۸۳	۶۷/۴۳
۲۸۲	۴۰۰	۸۰۰	۳۳/۴	۴۲۰	۳۵۲/۲۸	۸۱/۵۳۶	۸/۲۹	۱/۸۹	۳/۷۹	۷۶/۸۵
۲۸۴	۴۰۰	۶۰۰	۳۵	۴۴۰	۵۰۴/۸۲	۸۸/۶۷۵	۹/۰۰	۱/۷۰	۳/۰۷	۸۲/۴۳
۲۸۵	۴۰۰	۶۰۰	۳۴/۴	۴۳۲	۴۳۷/۴۵	۵۹/۳۸۴	۵/۷۱	۱/۷۹	۴/۶۱	۸۶/۴۲
۲۸۶	۴۰۰	۷۰۰	۳۶/۷	۸۰۷	۴۸۶/۶۴	۱۱۸/۶۱	۸/۲۹	۱/۶۴	۳/۸۶	۷۵/۶۳
۲۸۸	۴۰۰	۸۰۰	۳۰/۹	۰	۲۸۴/۸۳	۸۴/۱۲	۶/۹۳	۱/۹۱	۴/۹۶	۷۰/۴۷
۲۹۱	۴۰۰	۶۰۰	۳۲/۸	۰	۲۳۹/۲۶	۶۲/۳۵۵	۳/۰۰	۲/۴۳	۶/۴۱	۷۳/۹۴
۴۱۵	۶۰۹/۶	۱۲۱۹/۲	۲۶/۸	۱۸/۸	۳۳۱/۱	۱۳۹/۴	۵/۸۶	۱/۹۱	۲/۰۷	۵۷/۹۰
۴۱۶	۶۰۹/۶	۱۲۱۹/۲	۳۱/۲	۱۸/۸	۳۲۶/۳	۱۲۵/۹	۵/۲۹	۲/۰۱	۲/۱۳	۶۱/۴۲
درصد کاهش مقاومت = $\frac{(V_{\max} - V_{\min})}{V_{\min}} \times 100$							میانگین	۱/۹۰	۳/۳۹	۶۷/۳۲
							انحراف معیار	۰/۳۹	۱/۵۰	۱۴/۶۰

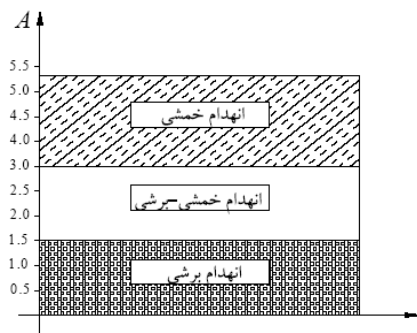
مؤلفان این مقاله در تحقیقی که با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی ۱۰۲ ستون بتن آرمه انجام شد، حدودی را برای سه نوع انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی پیشنهاد کردند. اگر ظرفیت برشی اولیه ستون قبل از بارگذاری (V_n) و ظرفیت خمشی آن (M_n) و نسبت دهانه برشی (l/d) مشخص باشد، برای پیش‌بینی نوع انهدام، ابتدا پارامتر A با استفاده از رابطه (۱۶) تعیین و سپس از طبقه‌بندی شکل (۵) برای تعیین نوع انهدام ستون استفاده می‌شود. رابطه (۱۶) بر اساس مهم‌ترین عوامل فیزیکی موثر در نوع انهدام ستون‌ها پیشنهاد شده است.

$$V_n = \text{ظرفیت برشی مقطع}$$

$$M_n = \text{ظرفیت خمشی مقطع}$$

$$d = \text{عمق موثر مقطع}$$

$$A = \frac{V_n}{2} \times \frac{l}{M_n} \times \frac{l}{d} \quad (16)$$



شکل ۵ حدود پارامتر A برای تشخیص نوع انهدام

۶-۱- نوآوری این تحقیق و مزیت‌های مدل‌های پیشنهادی

- ۱- در این تحقیق سه گروه ستون به تفکیک و با نوع انهدام مشخص مورد مطالعه قرار گرفت که در تحقیقات قبلی به این شکل با مسأله برخورد نشده است.
- ۲- قبل از بررسی در صد کاهش مقاومت برشی نوع انهدام ستون تخمین زده می‌شود.
- ۳- به دلیل تمرکز بر ستون‌هایی با نوع انهدام مشخص و نیز مطالعه تعداد بیشتری از آن‌ها عملاً روند کاهش مقاومت برشی مقطع ستون‌ها با دقت بیشتری مشخص می‌شود.
- ۴- مدل‌های پیشنهادی برای هر سه نوع انهدام به تفکیک قابل استفاده است.

۶- میانگین ضریب شکل‌پذیری μ با فرض آنکه تغییر شکل نهایی در انتهای آزمایش است، به ترتیب برابر ۶/۶۸، ۳/۳۴ و ۳/۳۹ به دست آمد.

۷- اختلاف نتایج مربوط به بند (۵) و (۶) به ترتیب برابر ۸/۵٪، ۱۵٪ و ۱۶٪ به دست آمد.

۸- از بند (۷) می‌توان استنباط کرد که استفاده از فرض سیزن برای انهدام‌های خمشی و خمشی برشی به واقعیت نزدیک است اما در مورد انهدام‌های برشی برای تعیین شکل‌پذیری از دقت کمتری برخوردار است.

۹- یکی از دلایل عدم تطابق مدل سیزن با نتایج آزمایش‌های دارای انهدام برشی آن است که ستون‌های مورد مطالعه دارای انهدام خمشی برشی بوده و نسبت دهانه برشی l/d بزرگتر از ۲ داشته‌اند.

۱۰- مقایسه روند کاهش مقاومت برشی ستون‌ها نشان داد که با کوچک شدن نسبت دهانه برشی یعنی l/d و بزرگ شدن نسبت تنش برشی به جذر مقاومت فشاری بتن یعنی $\frac{v}{\sqrt{f'_c}}$ و کم شدن درصد خاموت‌ها، روند کاهش مقاومت تسریع می‌شود.

۱۱- در ستون‌های با انهدام برشی روند کاهش مقاومت برشی سریع‌تر است.

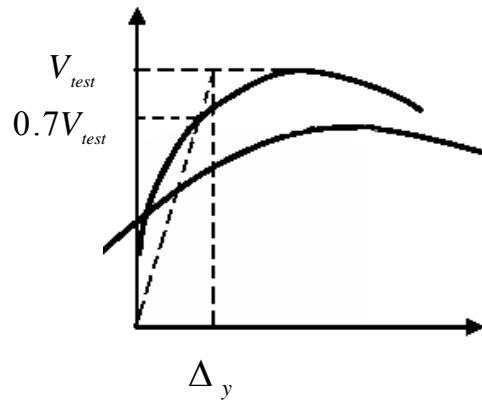
۶-۲ مدل‌های پیشنهادی

در مدل‌های پیشنهادی ستون‌ها بر اساس نوع انهدام، تفکیک شد و برای هر گروه روند کاهش مقاومت برشی متفاوتی پیشنهاد شد، (شکل ۷).

در این مدل‌ها روند کاهش مقاومت برشی با شکل‌پذیری جانبی ستون مرتبط شده است. حداکثر درصد کاهش مقاومت برشی در سه گروه با انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی به ترتیب برابر ۴۵٪، ۵۰٪، ۷۰٪ و شکل‌پذیری جانبی نظیر به ترتیب برابر ۶/۷، ۴/۶ و ۳/۵ پیشنهاد شد. این موارد در شکل (۷) نشان داده شده است. ابتدا لازم است نوع انهدام ستون پیش‌بینی شود و سپس از یکی از سه مدل معرفی شده در این تحقیق برای تشخیص روند کاهش مقاومت برشی ستون استفاده شود.

۴- در مورد انهدام برشی ستون‌های بتن آرمه، روش برابر قراردادن لحظه انهدام با موقعی که مقاومت عضو ۲۰٪ افت می‌کند (روش سیزن)، نیاز به تجدید نظر دارد، زیرا در این حالت روند کاهش مقاومت سریع‌تر است.

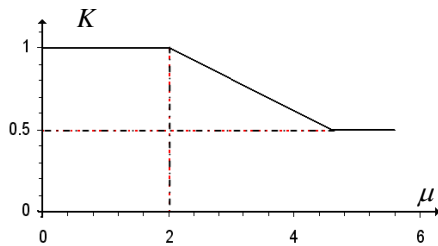
۵- مدل‌هایی که در طراحی برای برش بسیار محافظه‌کارانه محسوب می‌شوند، در تحلیل خسارت از دقت نتایج خواهند کاست؛ زیرا با استفاده از آنها لحظه انهدام به موقع تشخیص داده نمی‌شود.



شکل ۶ روش به کار رفته در تخمین تغییر مکان تسلیم

۷- نتیجه‌گیری

- ۱- انهدام ستون‌های بتن آرمه تحت اثر بار دوره‌ای به سه گروه مشخص خمشی، خمشی برشی و برشی تقسیم شد.
- ۲- برای هر گروه مدل کاهش مقاومت برشی جداگانه‌ای تعیین و پیشنهاد شد (شکل ۷).



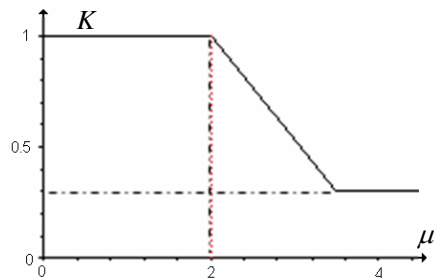
شکل ۷ ب- مدل‌های کاهش مقاومت برشی ستون‌های

با انهدام خمشی برشی

$$0 < \mu < 2 \rightarrow k = 1$$

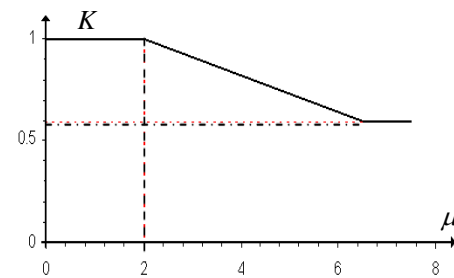
$$2 < \mu < 4.6 \rightarrow k = \frac{36}{26} - \frac{5}{26} \mu$$

$$\mu > 4.6 \rightarrow k = 0.5$$



شکل ۷ ج- مدل‌های کاهش مقاومت برشی ستون‌های

با انهدام برشی μ



شکل ۷ الف - مدل‌های کاهش مقاومت برشی ستون‌های

با انهدام خمشی

$$0 < \mu < 2 \rightarrow k = 1$$

$$2 < \mu < 6.5 \rightarrow k = \frac{53}{45} - \frac{4}{45} \mu$$

$$\mu > 6.5 \rightarrow k = 0.6$$

- ۳- پدیده کاهش مقاومت برشی مقطع ستون‌ها با کم شدن نسبت دهانه برشی و درصد آرماتورهای عرضی و بزرگ شدن نسبت تنش برشی به مقاومت برشی بتن تسریع می‌شود.

۸- فهرست علائم

f_c	مقاومت فشاری بتن	D	قطر مقطع
d	عمق مؤثر مقطع	C	عمق منطقه فشاری مقطع
b_w	عرض مقطع ستون	$a=L$	برای ستون یک طرف گیردار
f_y	مقاومت تسلیم میلگردهای عرضی	$a=L/2$	برای ستون با لنگرهای خمشی مثبت و منفی
A_{sw}	سطح مقطع میلگردهای عرضی		در دو طرف ستون
P	نیروی محوری	D'	فاصله خارجی میلگردهای عرضی
S	فاصله بین میلگردهای عرضی	A_{sh}	سطح مقطع میلگردهای عرضی به صورت حلقه یا مارپیچ
b_w	پهنای جان یا قطر مقطع مدور (میلی متر)	A_v	سطح مقطع کل میلگردهای عرضی در هر لایه
d	فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح آرماتور کششی طولی	F_{yh}	مقاومت تسلیم میلگردهای عرضی
ϕ_c	ضریب جزئی ایمنی بتن	S	فاصله میلگردهای عرضی در طول عضو
A_g	مساحت کل مقطع به میلی متر مربع	V_c	مشارکت بتن در مقاومت برشی
A_v	سطح مقطع آرماتور برشی	V_n	مقاومت برشی اسمی ستون
ϕ_s	ضریب جزئی ایمنی فولاد	V_s	مشارکت میلگردهای عرضی در مقاومت برشی
N_u	نیروی محور نهایی	A_g	سطح مقطع کلی بتن

۹- منابع

- [5] Lynn, A. C., Moehle, J. P., Mahin, S. A., and Holmes, W. T., "Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete - Recent Research", Journal of Prestressed Concrete Institute, V. 17, No.2., 1996.
- [6] FEMA 273, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington DC, October 1997.
- [7] Reserches at the University of Washinton, "Column Data Base", National, Science Foundation Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 1999.
- [1] Umemura, H. and Endo. T., "Report by Umemura Lab", Tokyo University, December, 1970.
- [2] Prestley, M. J. N., Verma, R., and Xiao, Yan, "Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 120, No. ST8, August 1994.
- [3] Sezen, H., "Evaluation and Testing of Existing Reinforced Concrete Columns", CE 299 Report, Dept. of Civil and Environmental Engineering, UC Berkeley, 2000.
- [4] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (318-2005) and Commentary (318R-2005)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.