

# بررسی و نقد مدل‌های زوال مقاومت برشی ستون‌های بتن آرمه

رضا عباس‌نیا و مصطفی برقی

**چکیده:** انهدام برشی، یکی از علل خرابی ستون‌های بتن آرمه تحت اثر بار زلزله و بارهای دوره‌ای (cyclic) می‌باشد. در این تحقیق عوامل مختلفی که در این نوع انهدام مؤثر هستند مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. مدل‌های گوناگونی که توسط محققین برای نشان دادن زوال مقاومت برشی مقاطع ستونها ارائه شده‌اند بررسی گردیده و سپس مدل جدیدی در این خصوص ارائه شده است. این تحقیق بر اساس اطلاعات موجود در مورد ۵۶ آزمایش بارگذاری دوره‌ای بر روی ستون‌های با مقطع مستطیل صورت گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** انهدام برشی، زوال مقاومت برشی، بارگذاری دوره‌ای، ستون‌های بتن آرمه، خرابی ستونها

## ۱. مقدمه

در طراحی سازه‌های بتن آرمه سعی می‌شود که از انهدام برشی و انهدام ترد و ناگهانی ستونها جلوگیری شود ولی مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که بسیاری از ستون‌های موجود تحت اثر بارهای دوره‌ای در معرض انهدام برشی قرار دارند [۱].

بحث انهدام برشی و علل آن در ارزیابی و تحلیل خسارت سازه‌های موجود و اصلاح روش‌های طراحی و اجرا کاربرد اساسی دارد. هنگامی که سازه بارگذاری می‌شود، در صورتیکه 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.

در صورتیکه نیروی برشی وارد بر ستون از ظرفیت برشی مقطع ستون بیشتر باشد، انهدام برشی قبل از تسلیم خمشی بصورت ناگهانی اتفاق می‌افتد. اگر نیروی برشی وارد بر ستون از مقاومت برشی کاهش یافته مقطع ستون بیشتر شود، انتظار انهدام برشی و یا انهدام خمشی برشی وجود دارد. تعیین مقدار کاهش مقاومت برشی مقطع در هنگام بارگذاری، نقش اساسی در تعیین موقع انهدام و نوع آن دارد. در این تحقیق مهمترین مدل‌های تعیین مقاومت برشی مقطع ستونها و روند زوال آن در موقع بارگذاری، مورد مطالعه و

بررسی قرار گرفته‌اند. محدودیت‌ها و نقاط ضعف این مدل‌ها مورد بحث واقع شده‌اند و با استفاده از نتایج تعداد قابل ملاحظه‌ای نمونه آزمایش شده مدل مناسب‌تری ارائه شده است.

## ۲. مدل‌های تعیین مقاومت برشی ستون‌ها

ظرفیت برشی مقطع ستون متشکل از مقاومت برشی بتن، میلگردهای عرضی و اثر بار محوری می‌باشد. در هنگام 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 نشان می‌دهد.

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

الف- مدل کاهش مقاومت برشی پریستلی

ب- مدل کاهش مقاومت برشی سیزن

ج- مدل مقاومت برشی ACI 318-99

د- مدل کاهش مقاومت برشی FEMA 273

ه- مدل مقاومت برشی آبا (آیین‌نامه بتن ایران)

### ۲-۱. مدل کاهش مقاومت برشی پریستلی [۲]

بر اساس این مدل ظرفیت برشی مقطع ستون از رابطه ۱ بدست می‌آید:

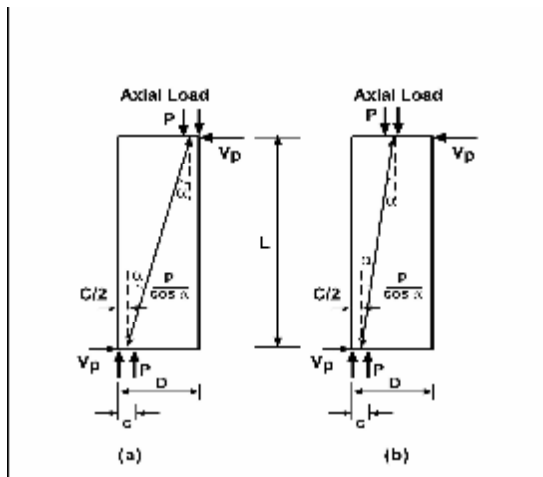
$$V_n = V_C + V_p + V_s \quad (1)$$

$V_C$  سهم بتن در ظرفیت برشی مقطع است و مقدار آن بستگی به تغییر شکل ستون دارد.

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

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۲۰ و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۴/۸/۱۴ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر رضا عباس‌نیا، دانشکده مهندسی عمران، قطب علمی سازه و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران. [abbasnia@iust.ac.ir](mailto:abbasnia@iust.ac.ir)  
مصطفی برقی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. [mostafabarghi@yahoo.com](mailto:mostafabarghi@yahoo.com)



شکل ۲. مشارکت نیروی محوری در مقاومت برشی ستونها

مطالعات آزمایشگاهی پریستلی مسئله خرابی برشی بعضی از ستون‌ها را که قبل از رسیدن آنها به ظرفیت خمشی اتفاق می‌افتد روشن نمود [۳]. این مدل بر اساس آزمایشاتی بر روی ستون‌های با مقطع دایره ارائه شده است و ضریب k کاهش مقاومت برشی را صرفاً برای بتن در نظر می‌گیرد. در انتهای آزمایشات مورد استفاده نمونه‌ها بر اثر گسیختگی برشی منهدم شده‌اند.

۲-۲. مدل کاهش مقاومت برشی سیزن [۳]

مدل سیزن نظیر مدل پریستلی مقاومت برشی ستون را به تقاضای شکل‌پذیری تغییر مکانی مربوط می‌نماید. بر اساس این مدل، مقاومت برشی از دو قسمت تشکیل می‌گردد. مقاومت برشی که توسط بتن ایجاد می‌شود ( $V_C$ ) و مقاومت برشی که توسط میگردهای عرضی با مدل خرابی 45° ایجاد می‌شود ( $V_S$ ).

$$V_n = K(V_C + V_S) = \frac{K \times 6\sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{P}{6\sqrt{f'_c}Ag}} \times 0.8Ag + K \times \frac{A_s f_{yt} d}{S} \quad (6)$$

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 می‌نماید. فرض بر اینست که مقاومت برشی بتن بر اثر افزایش ترکها و تضعیف مکانیسم قفل و بست دانه‌ای کاهش می‌یابد، در حالیکه مقاومت برشی میگردها بر اثر کاهش ظرفیت تنش چسبندگی که در مکانیسم خرابی مورد نیاز است کاهش می‌یابد.

مدل سیزن بر اساس نتایج آزمایش‌های دوره‌ای بر روی ستون‌های با مقطع مربع یا مستطیل ارائه شده و ضریب k کاهش مقاومت بتن و میگردهای فولادی را با توجه به شکل‌پذیری نشان می‌دهد.

نمونه‌های مورد استناد نامبرده در محدوده  $2 < \frac{a}{d} < 4$  و

$$2 < \frac{v}{\sqrt{f'_c}} < 9 (psi) \text{ بوده است که شامل محدوده نسبتاً کوچکی از}$$

در این رابطه K ضریبی است که کاهش مقدار مقاومت بتن را با توجه به میزان تغییر شکل جانبی ستون مشخص می‌نماید.  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن و Ae سطح مقطع مؤثر برشی می‌باشد.



شکل ۱. کاهش مقاومت برشی بتن با شکل‌پذیری (مدل پریستلی)

برای تعیین K دو حالت در نظر گرفته می‌شود. یکی آنکه ستون در معرض خمش تک محوری قرار داشته باشد، دیگر آنکه ستون 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  $K\sqrt{f'_c}$  در سیستم نیوتن-میلیمتر  $0.29\sqrt{f'_c} MPa$  و در سیستم پوند-اینچ  $3.5\sqrt{f'_c} psi$  می‌باشد. اثر بار محوری در ظرفیت برشی مقطع می‌باشد. نیروی محوری فشاری مقاومت برشی ستون را با عمل قوسی افزایش می‌دهد.

افزایش مقاومت برشی بر اثر مؤلفه افقی فشار قطری ستون می‌باشد. این مؤلفه مستقیماً در مقابل نیروی برشی مقاومت می‌کند.

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

در این مدل،  $V_p$  با افزایش تغییر شکل ستون کاهش نمی‌یابد.  $V_S$  سهم میگردهای عرضی در افزایش مقاومت برشی ستون است. مشارکت میگردهای عرضی در ظرفیت برشی مقطع بر اساس مکانیسم خرابی می‌باشد.

سهم مقاومت میگردهای عرضی در ستون‌های با مقطع دایره از رابطه (۴) و برای ستون‌های با مقطع مستطیل از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$V_S = \frac{p}{2} \times \frac{A_{sh} \times F_{yh} \times D'}{S} \times Cotg30 \quad (4)$$

$$V_S = \frac{A_v \times F_{yh} \times D'}{S} \times Cotg30 \quad (5)$$

کاهش مقاومت برشی مقطع ستون در ارتباط با شکل‌پذیری جانبی آن می‌باشد.

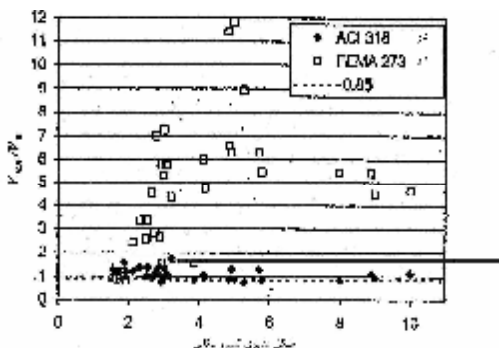
انجام شده بر ستونهایی که بطور نسبی میلگردهای عرضی قابل ملاحظه‌ای دارند، مطرح شده است.

بر اساس توصیه FEMA 273 مشارکت بتن در مقاومت برشی ستونها بر اساس تقاضای شکل‌پذیری از رابطه ۱۰ بدست می‌آید:

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

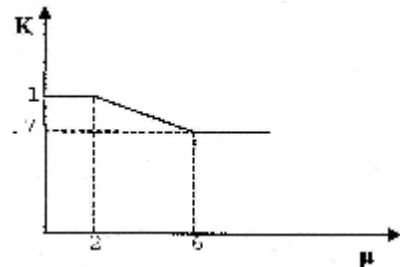
برای شکل‌پذیری کمتر از دو  $K=1$  در نظر گرفته می‌شود و برای سایر مقادیر شکل‌پذیری  $K=0$  منظور می‌شود. مشارکت میلگردهای جانبی از رابطه  $V_s = \frac{A_{sw} f_y d}{S}$  بدست می‌آید. در نواحی تسلیم ستون، مشارکت میلگردهای جانبی موقعی در نظر گرفته می‌شود که  $S \leq d/2$  باشد و خاموت‌ها دارای قلاب‌هایی باشند که در هسته بتن فرو رفته باشند.

مدل FEMA 273 در مقایسه با مدل ACI 318-99 محافظه کارانه است. بخصوص برای مواردی که تقاضای شکل‌پذیری تغییر مکانی از ۲ بیشتر باشد، زیرا در این حالات  $K=0$  در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۵ نسبت مقاومت برشی اندازه گرفته شده در آزمایشات بر مقاومت برشی محاسبه شده ستونها بر اساس ACI 318-99 و FEMA 273 با شکل‌پذیری‌های تغییر مکانی متفاوت ملاحظه می‌شود. در مدل FEMA 273 ضریب کاهش مقاومت برشی (k) فقط در مورد مقاومت بتن صرف نظر از اثر بارهای محوری اعمال می‌شود. تحقیقات نشان داده است که میانگین نسبت مقاومت برشی ستونها که در آزمایشگاه اندازه گرفته شده است نسبت به مقاومت برشی محاسبه شده با مدل FEMA 237،  $4/73$  و انحراف استاندارد آن  $2/77$  می‌باشد. این مدل بدلیل آنکه از بعضی مقاومت‌ها علیرغم وجود آنها در جهت ضریب اطمینان چشم پوشی می‌نماید نسبت به مدل‌های دیگر مقاومت برشی را بصورت محافظه‌کارانه محاسبه می‌نماید، به عبارت دیگر مقدار آن را کمتر از مقاومت برشی واقعی در نظر می‌گیرد. در صورتیکه از این مدل در تعیین نشانه خسارت استفاده شود، بدلیل آنکه زمان انهدام را بموقع نشان نمی‌دهد دقت نتایج کاهش می‌یابد.

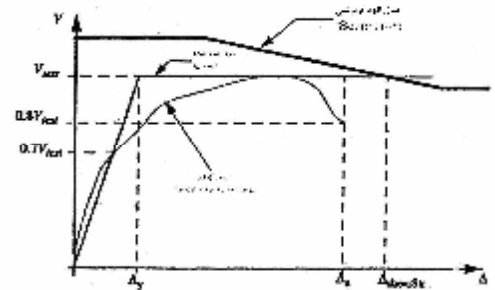


شکل ۵. مقایسه مقاومت اندازه گرفته شده با مقاومت محاسبه شده با مدل ACI318-99 و FEMA273

ستونها با انهدام خمشی برشی بوده است و برای سایر موارد قابل تعمیم نمی‌باشد. در مطالعات سیزن موقع انهدام زمانی در نظر گرفته شده است که مقاومت برشی مقطع ۲۰٪ افت نماید.



شکل ۳. زوال مقاومت برشی با شکل‌پذیری تغییر مکانی (در مدل سیزن)



شکل ۴. مدل سیزن

### ۳-۲. مدل مقاومت برشی ACI 318-99 [۴]

آئین‌نامه ساختمانی ACI 318-99، مقاومت برشی ستونهایی را که نیروی محوری آنها بزرگتر از  $A_g f'_c / 20$  باشد از روابط ۷ تا ۹ تعیین می‌نماید:

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

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

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

مطالعات آزمایشگاهی Mohel et al. [۵] نشان داده است که در مورد ستونهایی که میلگردهای عرضی کافی دارند، معادلات ACI 318-99 محافظه کارانه می‌باشد ولی این نتیجه‌گیری برای ستون‌هایی که خاموت کمی دارند قابل تعمیم نمی‌باشد. مدل ACI 318-99 کاهش مقاومت برشی مقطع ستون را در طول بارگذاری منظور نمی‌نماید.

### ۴-۲. مدل کاهش مقاومت برشی بر اساس FEMA 273 [۶]

آژانس مدیریت بحران آمریکا (FEMA) راهنمای NEHRP را برای بهسازی ساختمانها منتشر نمود. در این راهنما روشی برای ارزیابی مقاومت برشی ستونها ارائه شده است که عمدتاً بر اساس آزمایشات

تغییر شکل تسلیم در مورد مقطع بتنی معمولاً بصورت قراردادی تعریف می‌شود که روشهای مختلف تعیین آن در این مقاله توضیح داده شده است.

به لحاظ موقعیت تکیه‌گاهها و محل اعمال بار جانبی، ستونها به سه گروه تقسیم شده‌اند:

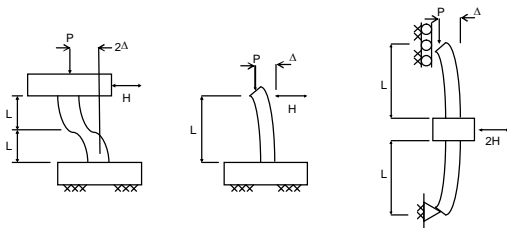
۱- نمونه‌های طره‌ای ساده (Simple Cantilever)

۲- نمونه‌های دو طرف بسته (Double-Ended)

۳- نمونه‌های دارای دو انحنا (Double Curvature)

در مورد نمونه‌های طره‌ای ساده، نیروها و تغییر شکلهای موجود در بانک اطلاعاتی همان است که توسط محققین اصلی گزارش شده است. در نمونه‌های دو طرف بسته، نیروهای جانبی گزارش شده نصف نیروهایی می‌باشد که در وسط ستون اعمال شده است و تغییر شکلهای جانبی همان تغییر شکل نسبی وسط ستون نسبت به نقاط انتهایی می‌باشد.

در خصوص نمونه‌های با دو انحنا، نیروهای جانبی گزارش شده همان است که بر تیرهای دو طرف نمونه اعمال شده است و تغییر شکلهای جانبی نصف تغییر مکان نسبی دو طرف ستون نسبت به هم می‌باشد. در شکل ۶ سه حالت فوق‌الذکر نشان داده شده است:



شکل ۶. حالات مختلف تکیه‌گاهی ستونها

#### ۴. روش تحقیق

با استفاده از مشخصات و نتایج ۵۶ آزمایش بارگذاری ستونهای بتن‌آرمه که در مرجع شماره [۷] ارائه شده، مطالعات به شرح زیر صورت گرفته است.

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

۲- منحنی‌های هیستریزیس با استفاده از تاریخچه نیروها و تغییر مکانها برای کلیه آزمایشات ترسیم شد.

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

۴- تغییر مکان نهائی هر ستون یکبار در موقع انهدام و بار دیگر بر اساس فرض تغییر مکان نظیر حالتی که ۲۰٪ مقاومت برشی ستون کاهش یابد تعیین شد.

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

#### ۲-۵. مدل آیین نامه بتن ایران (آبا) برای تعیین

##### مقاومت برشی

مقاومت برشی مقطع  $(V_r)$  ترکیبی از مقاومت برشی بتن  $(V_c)$  و مقاومت برشی فولاد عرضی  $(V_s)$  می‌باشد.

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

#### ۲-۵-۱. مقاومت برشی تامین شده توسط بتن برای

##### اعضائی که تحت اثر برش و خمش قرار دارند

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

مقاومت برشی بتن برای اعضائی 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 دقیق‌تر مطابق بندهای ۱۲-۳-۱۲ و ۱۲-۲-۳-۱۲ آیین‌نامه آبا محاسبه نمود.

#### ۲-۵-۲. مقاومت برشی تامین شده توسط میلگردهای

##### عرضی

وقتی که از میلگردهای عرضی عمود بر محور عضو استفاده شود، مقاومت برشی آن از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$d/s * V_s = \phi_s A V f_y \quad (14)$$

وقتی که از میلگردهای عرضی مایل استفاده شود، از رابطه ۱۵ مقاومت برشی آن بدست می‌آید:

$$V_s = \phi_s A V f_y (\sin\alpha + \cos\alpha) d/s \quad (15)$$

در مدل آبا نظیر مدل ACI کاهش مقاومت برشی در طول بارگذاری مشخص نمی‌شود.

#### ۳. مشخصات بانک اطلاعاتی (Database) مورد استفاده

##### در این تحقیق [۷]

مشخصات کامل ستونها و تاریخچه تغییر مکانها و نیروها در مورد ۵۶ ستون بتن‌آرمه با مقطع مربع یا مستطیل در این بانک موجود بوده است. آزمایش بارگذاری بر روی این ستونها بصورت دوره‌ای (Cyclic) همراه بار محوری ثابت تا انهدام ستونها ادامه داشته است. نوع انهدام ستونها به سه گروه برشی، خمشی و خمشی برشی تقسیم‌بندی شده است و تغییرات تغییر شکل جانبی، نیروهای وارده و منحنی‌های هیستریزیس مربوط به هر آزمایش با استفاده از این اطلاعات ترسیم شده است.

تغییر شکل جانبی هر ستون بصورت ضربی از تغییر شکل نظیر حالت تسلیم با بارگذاری جانبی بصورت دوره ای بوده است که پس از دو تا پنج دوره مشابه بتدریج افزایش یافته و نهایتاً به انهدام ستون منجر شده است.

۹- نسبت‌ها و پارامترهایی که در بحث انهدام برشی حائز اهمیت هستند برای کلیه ستونها محاسبه شدند. این پارامترها شامل

$$\rho_c = \frac{V_{test}}{bd} \cdot \frac{v}{\sqrt{f_c}} \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{P}{Agf'_c}$$

نسبت‌های طولی ( $\rho$ ) و درصد آرماتورهای عرضی ( $\rho''$ ) می‌باشند. نتایج حاصل در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است.

۱۰- حساسیت نوع انهدام و روند زوال مقاومت برشی ستونها با تغییرات این پارامترها بررسی و ملاحظه شدند.

۶- با مشخص بودن نیروی جانبی حداکثر وارد شده بر هر ستون ( $V_{min}$ ) و حداقل مقاومت برشی ستون در انتهای آزمایش ( $V_{test}$ )

$$\text{درصد زوال مقاومت برشی از رابطه } \frac{V_{test} - V_{min}}{V_{test}} \times 100 \text{ بدست آمد.}$$

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

۸- بر اساس نتایج بند ۷، سه مدل مشخص برای تعیین روند زوال مقاومت برشی مقطع ستونها تحت اثر بار دوره‌ای بدست آمد.

جدول ۱. مشخصات ستونها با انهدام خمشی

شماره آزمایش	L/d	P/(A <sub>g</sub> f' <sub>c</sub> )	V/(f' <sub>c</sub> 0.5)	$\rho''$	V <sub>test</sub> (KN)	V <sub>min</sub>	$\rho$	درصد زوال	du/dy	(du/dy) <sub>1</sub>
۱	۲/۴۱	۰/۲۶	۰/۵۲۹	۰/۰۰۷	۶۵۰	۶۲۰	۰/۰۱۸	۴/۶۲	۶/۲	۶/۲
۱۰	۴/۲۲	۰/۳	۰/۲۷۵	۰/۰۰۳	۲۶۲	۱۹۰	۰/۰۱۵	۲۷/۵	۷/۳	۶
۱۱	۴/۲۲	۰/۲۲۳	۰/۲۶۴	۰/۰۰۷	۲۱۲	۱۳۰	۰/۰۱۵	۳۸/۷	۸/۱	۷/۸
۱۳	۴/۲۲	۰/۵	۰/۳۰۱	۰/۰۰۶	۲۹۰	۱۹۰	۰/۰۱۵	۳۴/۵	۵/۲	۴/۶۸
۱۴	۴/۲۲	۰/۵	۰/۳۰۸	۰/۰۰۳	۳۰۰	۲۳۰	۰/۰۱۵	۲۳/۳	۷/۹	۳/۹
۱۵	۴/۲۲	۰/۷	۰/۳	۰/۰۱۲	۳۰۰	۲۳۰	۰/۰۱۵	۲۳/۳	۶/۲	۵/۳
۱۶	۴/۲۲	۰/۷	۰/۳۱۲	۰/۰۰۷	۳۰۰	۱۸۰	۰/۰۱۵	۴۰	۳/۳۶	۳/۱۹
۱۷	۴/۲۲	۰/۷	۰/۳۲۲	۰/۰۲۲	۳۱۰	۲۶۰	۰/۰۱۵	۱۶/۱	۷/۸	۶/۸۵
۳۱	۴/۴۶	۰/۰۳۲	۰/۱۵۱	۰/۰۰۳	۱۱۰	۱۰۱	۰/۰۱۴	۸/۱۸	۱۱/۴	۱۱/۴
۶۱	۲/۷۱	۰/۲۵۴	۰/۶۴۲	۰/۰۱۶	۲۵۰	۲۰۱	۰/۰۳۸	۱۹/۶	۱۲/۱	۱۲/۱
۱۰۳	۳/۴	۰/۳۱	۰/۴۲۱	۰/۰۰۵	۴۸۰	۳۵۰	۰/۰۱۹	۲۷/۱	۴/۶	۴/۸
۱۰۷	۳/۲۱	۰/۱۳۱	۰/۳۶۳	۰/۰۰۸	۳۴۰	۲۵۵	۰/۰۳۲	۲۵	۶/۲	۶/۲
۱۰۸	۳/۲۱	۰/۱۲۶	۰/۵۰۱	۰/۰۰۸	۳۴۰	۱۰۰	۰/۰۳۲	۷۰/۶	۶/۳	۶/۳
۱۲۱	۵/۴۳	۰/۲	۰/۳۷۹	۰/۰۰۵	۱۷۵	۱۳۰	۰/۶۰۳	۲۵/۷	۳/۳	۳/۳
۱۲۲	۵/۴۳	۰/۳	۰/۳۵۱	۰/۰۰۵	۱۶۵	۹۸	۰/۶۰۳	۴۰/۶	۳/۱	۳/۱
۱۲۳	۵/۴۳	۰/۳	۰/۳۶۸	۰/۰۰۵	۱۶۵	۱۰۰	۰/۶۰۳	۳۹/۴	۳/۷	۳/۶
۱۲۴	۵/۴۳	۰/۲	۰/۴۳۴	۰/۰۰۵	۲۰۵	۱۵۰	۰/۶۰۳	۲۶/۸	۳/۱	۲/۷
۱۲۵	۵/۴۳	۰/۲	۰/۳۴۳	۰/۰۰۸	۱۶۰	۹۰	۰/۶۰۳	۴۳/۸	۵	۳/۲۵
۱۲۶	۵/۴۳	۰/۲	۰/۴۱۵	۰/۰۰۸	۱۹۵	۱۳۵	۰/۶۰۳	۳۰/۸	۵/۱	۲/۹۴
۱۲۷	۵/۴۳	۰/۳	۰/۳۷۳	۰/۰۰۸	۱۷۵	۱۳۵	۰/۶۰۳	۲۲/۹	۶	۳/۳
۱۲۸	۵/۴۳	۰/۳	۰/۳۶۲	۰/۰۰۸	۱۷۰	۱۱۵	۰/۶۰۳	۳۲/۴	۴/۲	۳/۱۲
۱۳۰	۵/۴۳	۰/۲	۰/۳۶۸	۰/۰۱۶	۱۷۰	۱۰۲	۰/۶۰۳	۴۰	۴/۹	۳/۲
Ave:								۳۰	۵/۹۵۷	۵/۱۴۶۸
Stdev:								۱۳/۷	۲/۴۳۷	۲/۶۱۱

$$\rho'' = A_{st} / (B \cdot s)$$

$$\text{درصد زوال مقاومت برشی} = ((V_t - V_{min}) * 100) / V_t$$

جدول ۲. مشخصات ستونها با انهدام خمشی برشی

شماره آزمایش	L/d	P/(A <sub>g</sub> f' <sub>c</sub> )	V/f' <sub>c</sub> <sup>0.5</sup>	ρ''	V <sub>test</sub> (KN)	ρ	درصد زوال	Du/dy	(du/dy) <sub>1</sub>	
۳۳	۲/۲۱	۰/۱۴۳	۰/۴۹۳	۰/۰۰۵	۱۰۱	۰/۰۲۰	۵۲	۴/۹	۴/۲۸	
۳۶	۱/۱۹	۰/۶۹۹	۱/۱۵۲	۰/۰۰۴	۳۶	۰/۰۱۸	۵۱	۱/۷	۱/۷	
۷۵	۳/۲۰	۰/۱۱۷	۰/۱۴۲	۰/۰۰۳	۱۰۱	۰/۰۲۴	۵۸	۴	۴	
۷۶	۳/۲۰	۰/۱۴۷	۰/۴۹۰	۰/۰۰۵	۱۰۴	۰/۰۲۴	۲۲	۳/۶۴	۳/۶۴	
۷۷	۳/۲۰	۰/۱۴۷	۰/۴۶۱	۰/۰۰۵	۹۸	۰/۰۲۴	۶۲	۵/۹	۵/۹	
۷۸	۳/۲۰	۰/۱۱۴	۰/۳۹۰	۰/۰۰۳	۹۴	۰/۰۲۴	۱۱	۳/۹	۳/۶	
۷۹	۳/۲۰	۰/۱۱۴	۰/۴۳۲	۰/۰۰۳	۱۰۴	۰/۰۲۴	۱۹	۴/۲	۴/۲	
۸۱	۳/۲۰	۰/۰۷۱	۰/۳۸۶	۰/۰۰۳	۹۳	۰/۰۲۴	۲۰	۲/۶۳	۲/۵۶	
۸۳	۳/۲۰	۰/۱۱۵	۰/۴۱۲	۰/۰۰۶	۹۹	۰/۰۲۴	۳۸	۵/۸	۵/۸	
۸۴	۳/۱۷	۰/۱۱۵	۰/۴۷۳	۰/۰۱۵	۱۱۵	۰/۰۲۴	۱۰	۳/۵	۳/۵	
۸۵	۳/۱۷	۰/۱۱۵	۰/۴۹۳	۰/۰۱۵	۱۲۰	۰/۰۲۴	۱۱	۴/۲	۴/۲	
۸۶	۳/۱۷	۰/۱۱۵	۰/۴۹۸	۰/۰۰۹	۱۲۱	۰/۰۲۴	۲۱	۴/۲۵	۴/۲۵	
۸۷	۳/۱۷	۰/۱۱۵	۰/۴۹۸	۰/۰۰۹	۱۲۱	۰/۰۲۴	۱۰	۴/۱	۴/۱	
۱۳۸	۳/۶۳	۰/۰۷۳	۰/۲۲۵	۰/۰۰۱	۲۴۰	۰/۰۱۹	۵۸	۵/۳	۴/۵	
۱۴۳	۳/۶۳	۰/۰۷۳	۰/۲۱۸	۰/۰۰۱	۲۳۳	۰/۰۱۹	۶۰	۷/۱	۳/۹	
۱۴۹	۲/۱۸	۰/۰۹۶	۰/۴۹۰	۰/۰۰۷	۲۶۹	۰/۰۲۵	۷۱	۵/۳۳	۵/۳۳	
۱۵۰	۲/۱۸	۰/۱۹۲	۰/۵۹۰	۰/۰۰۷	۳۲۴	۰/۰۲۵	۱۳/۶	۴/۸۵	۴/۸۵	
$\rho'' = A_{st}/(B*s)$ درصد زوال مقاومت برشی = $((V_t - V_{min}) * 100) / V_t$							Ave:	۳۴/۶	۴/۴۲۹	۴/۱۳۵۹
							Stdev:	۲۲/۳	۱/۲۷۵	۱/۰۴۳۵

جدول ۳. مشخصات ستونها با انهدام برشی

شماره آزمایش	L/d	P/(A <sub>g</sub> f' <sub>c</sub> )	V/(f' <sub>c</sub> <sup>0.5</sup> )	ρ''	V <sub>test</sub> (kn)	ρ	درصد زوال	Du/dy	(du/dy) <sub>1</sub>
۳۸	۱/۸۳	۰/۰۷۲	۰/۵۰۰	۰/۰۰۳	۴۷۱	۰/۰۲۷	۲۴	۵/۷	۵/۷
۳۹	۱/۱۲	۰/۸۰۱	۰/۸۰۷	۰/۰۰۶	۸۲	۰/۰۲۲	۷۹	۴	۲
۴۰	۱/۱۲	۰/۸۰۱	۰/۸۹۵	۰/۰۰۶	۹۱	۰/۰۲۲	۷۲	۲/۶	۲/۵
۴۱	۱/۱۲	۰/۸۰۱	۰/۱۲۲	۰/۰۱۰	۱۱۴	۰/۰۲۲	۸۸	۴/۳۳	۳/۸۶
۵۴	۱/۳۷	۰/۱۸۴	۰/۷۸۳	۰/۰۰۲	۱۳۰	۰/۰۳۱	۵۴	۴	۲/۶۲
۵۵	۱/۳۷	۰/۴۴۵	۰/۷۸۶	۰/۰۰۲	۱۳۳	۰/۰۳۱	۴۰	۵/۱۳	۴/۲
۸۰	۳/۲۰	۰/۰۷۱	۰/۳۶۱	۰/۰۰۳	۸۷	۰/۰۲۴	۲۴	۲/۷	۲/۷۳
۹۸	۱/۲۱	۰/۱۶۲	۰/۶۳۱	۰/۰۰۳	۳۲۲	۰/۰۳۰	۸۸	۶	۱/۹
۹۹	۲/۳۳	۰/۱۶۲	۰/۵۵۵	۰/۰۰۲	۲۶۳	۰/۰۳۰	۷۷	۳/۵۴	۲/۱
۱۰۰	۱/۲۱	۰/۲۷۰	۰/۷۳۳	۰/۰۰۶	۴۱۰	۰/۰۳۰	۹۳	۳/۷	۱/۵
۱۰۱	۱/۶۹	۰/۱۰۴	۰/۴۷۴	۰/۰۰۱	۲۱۴	۰/۰۲۴	۷	۲/۲	۲/۹
۱۳۷	۳/۶۵	۰/۰۸۹	۰/۲۹۰	۰/۰۰۱	۲۷۷	۰/۰۳۰	۹۳	۳/۵۳	۱/۸
۱۴۰	۳/۶۵	۰/۲۶۲	۰/۳۳۹	۰/۰۰۱	۳۲۸	۰/۰۳۰	۸۱/۷	۴	۱/۹۲
۱۴۱	۳/۶۵	۰/۲۶۲	۰/۳۶۸	۰/۰۰۲	۳۵۶	۰/۰۳۰	۵۸	۴/۳	۳/۴

ادامه از صفحه ی قبل

۱۴۲	۳/۶۵	۰/۰۸۹	۰/۲۸۲	۰/۰۰۱	۲۷۰	۰/۰۳۰	۹۳	۶	۲/۲۷	
۱۹۹	۳/۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۵۹	۰/۰۰۱	۴۵۰	۰/۰۱۹	۴۱	۳/۶	۳/۵۲	
۲۰۰	۱/۴۱	۰/۰۰۰	۰/۴۰۶	۰/۰۰۱	۶۴۲	۰/۰۱۹	۸۴	۳/۶	۱/۶۹	
$\rho'' = A_{st}/(B*s)$							Ave:	۶۴/۵	۴/۰۵۵	۲/۷۴۱۸
درصد زوال مقاومت برشی $= ((V_t - V_{min}) * 100) / V_t$							Stdev:	۲۸	۱/۱۱۹	۱/۱۰۰۳

### ۶. مدل پیشنهادی

در مدل پیشنهادی ستونها بر اساس نوع انهدام، تفکیک شدند و برای هر گروه روند زوال مقاومت برشی متفاوتی پیشنهاد شد. در این مدل روند زوال مقاومت برشی مرتبط با شکل‌پذیری جانبی ستون شده است. حداکثر درصد زوال مقاومت برشی در سه گروه با انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی بترتیب ۳۰٪، ۳۵٪ و ۶۵٪ و شکل‌پذیری جانبی نظیر بترتیب ۶، ۴/۵ و ۴ پیشنهاد شد. این موارد در شکل ۷ نشان داده شده است. ابتدا لازم است نوع انهدام ستون پیش‌بینی شده سپس از یکی از سه مدل معرفی شده در این تحقیق برای تشخیص روند زوال مقاومت برشی ستون استفاده نمود. مولفین این مقاله در تحقیق دیگر که با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی ۲۵۳ ستون بتن آرمه انجام دادند. حدودی را برای سه نوع انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی پیشنهاد نمودند. اگر ظرفیت برشی اولیه ستون قبل از بارگذاری ( $V_n$ ) و ظرفیت خمشی آن ( $M_n$ ) و نسبت  $l/d$  مشخص باشد برای پیش‌بینی نوع انهدام می‌توان از طبقه‌بندی زیر استفاده نمود:

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

انهدام خمشی:

$$A = 11/3 = \text{میانگین } A$$

$$4/2 = \text{انحراف معیار}$$

انهدام خمشی برشی:

$$A = 2/25 = \text{میانگین } A$$

$$0/96 = \text{انحراف معیار}$$

انهدام برشی:

$$A = 0/9 = \text{میانگین } A$$

$$0/6 = \text{انحراف معیار}$$

قابلیت‌های مدل:

مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های سابق مزایایی دارد؛ از جمله این امتیازها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- روند زوال مقاومت برشی مقطع ستونها را با دقت بیشتری مشخص می‌کند.

۲- محدوده وسیع‌تری از ستونها را در بر می‌گیرد.

### ۵. بررسی نتایج آزمایشات و مقایسه آنها با مدل سیزن

۱- میانگین درصد زوال مقاومت برشی برای سه گروه ستونها با انهدام خمشی، خمشی برشی و برشی بترتیب ۳۰٪، ۳۴٪ و ۶۴/۵٪ بدست آمد.

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

۳- درصد زوال مقاومت برشی در ستونهای با انهدام برشی با مدل سیزن که درصد زوال را حداکثر ۳۰٪ معرفی می‌نماید تطابقی نداشت و ۱۱۹٪ اختلاف نشان داد.

۴- استفاده از مدل سیزن در ستونهای با انهدام برشی از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد.

۵- میانگین ضریب شکل‌پذیری ( $\mu_1$ ) با فرض سیزن در مورد تغییر شکل تسلیم و نهائی برای سه گروه بترتیب ۵/۱۵، ۴/۱۴ و ۲/۷۴ بدست آمد.

۶- میانگین ضریب شکل‌پذیری  $\mu_1$  با فرض آنکه تغییر شکل نهائی در انتهای آزمایش است، بترتیب ۵/۹۶، ۴/۴۳ و ۴/۱۴ بدست آمد.

۷- اختلاف نتایج مربوط به بند ۵ و ۶ بترتیب ۱۰/۶٪، ۶/۷٪ و ۳۲/۶٪ بدست آمد.

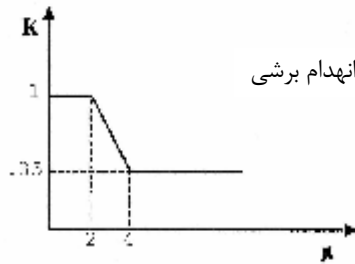
۸- از بند ۷ می‌توان اینطور استنباط نمود که استفاده از فرض سیزن در مورد انهدام‌های خمشی، خمشی برشی به واقعیت نزدیک است ولی در مورد انهدام‌های برشی برای تعیین شکل‌پذیری از دقت کمتری برخوردار است.

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

۱۰- مقایسه روند زوال مقاومت برشی ستونها نشان داد که با کوچک شدن نسبت  $l/d$  و بزرگ شدن نسبت  $v/\sqrt{f_c}$  و کم شدن

درصد خاموت‌ها روند زوال مقاومت تسریع می‌شود.

۱۱- معنی فیزیکی بند ۱۰ آن است که در ستونهای با انهدام برشی روند زوال مقاومت برشی سریع‌تر است.



$$\begin{cases} 0 < m < 2 \rightarrow K = 1 \\ 2 < m < 4 \rightarrow K = 1 - \frac{325}{1000}(m-2) \\ m > 4 \rightarrow K = 0.35 \end{cases}$$

شکل ۷. مدلهای پیشنهادی زوال مقاومت برشی ستونها با نوع انهدام مختلف

### مراجع

- [1] Umemura H., and Endo T., *Report by Umemura Lab*, Tokyo University, December, 1970.
- [2] Priestley 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 (318-99) and Commentary (318R-99)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- [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.

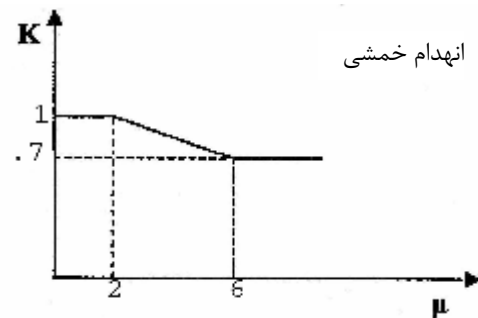
### فهرست علائم

D	قطر مقطع
C	عمق منطقه فشاری مقطع
a=L	برای ستون یک طرف گیردار
a=L/2	برای ستون با لنگرهای خمشی مثبت و منفی در دو طرف ستون
D'	فاصله خارجی میلگردهای عرضی
A <sub>sh</sub>	سطح مقطع میلگردهای عرضی بصورت حلقه یا مارپیچ
A <sub>v</sub>	سطح مقطع کل میلگردهای عرضی در هر لایه
F <sub>yh</sub>	مقاومت تسلیم میلگردهای عرضی

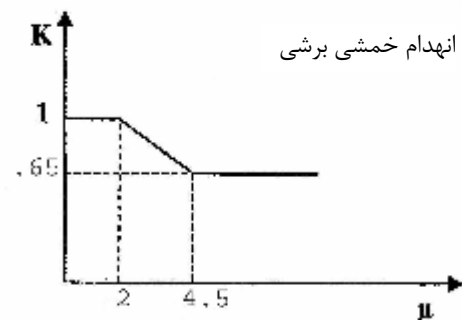
۳- برای هر سه نوع انهدام قابل استفاده است.

### ۷. نتیجه گیری

- انهدام ستونهای بتن آرمه تحت اثر بار دوره‌ای به سه گروه مشخص خمشی، خمشی برشی و برشی تقسیم شد.
- برای هر گروه مدل زوال مقاومت برشی جداگانه‌ای تعیین و پیشنهاد شد.
- پدیده زوال مقاومت برشی مقطع ستونها با کم شدن نسبت  $I/d$  و درصد آرماتورهای عرضی و بزرگ شدن نسبت  $\left( v = \frac{V_{test}}{bd} \right) \frac{v}{\sqrt{f'_c}}$  تحت اثر بارهای دوره‌ای تسریع می‌شود.
- در مورد انهدام برشی ستون‌های بتن آرمه، روش برابر قراردادن لحظه انهدام با موقعی که مقاومت عضو ۲۰٪ افت می‌کند، نیاز به تجدید نظر دارد، زیرا در این حالت روند زوال مقاومت سریع‌تر است.
- مدلهایی که در بحث طراحی برای برش بسیار محافظه‌کارانه محسوب می‌شوند در بحث تحلیل خسارت از دقت نتایج خواهند کاست زیرا با استفاده از آنها لحظه انهدام به موقع تشخیص داده نمی‌شود.



$$\begin{cases} 0 < m < 2 \rightarrow K = 1 \\ 2 < m < 6 \rightarrow K = 1 - \frac{3}{40}(m-2) \\ m > 6 \rightarrow K = 0.7 \end{cases}$$



$$\begin{cases} 0 < m < 2 \rightarrow K = 1 \\ 2 < m < 4.5 \rightarrow K = 1 - \frac{14}{100}(m-2) \\ m > 4.5 \rightarrow K = 0.65 \end{cases}$$



$b_w$	پهنای جان یا قطر مقطع مدور (میلی‌متر)	S	فاصله میلگردهای عرضی در طول عضو
d	فاصله دورترین تار فشاری تا مرکز سطح آرماتور کششی طولی	$V_c$	مشارکت بتن در مقاومت برشی
$\varphi_c$	ضریب جزئی ایمنی بتن	$V_n$	مقاومت برشی اسمی ستون
$A_g$	مساحت کل مقطع به میلی‌متر مربع	$V_s$	مشارکت میلگردهای عرضی در مقاومت برشی
$A_v$	سطح مقطع آرماتور برشی بکار برده شده در طول فاصله S	$A_g$	سطح مقطع کلی بتن
$\varphi_s$	ضریب جزئی ایمنی فولاد	$f_c, f'_c$	مقاومت فشاری بتن
$N_u$	نیروی محور نهائی که همزمان با VU در مقطع اثر می‌کند علامت این نیرو در فشار مثبت و در کشش منفی است. این نیرو آثار ناشی از وارفتگی و جمع شدگی را شامل می‌شود.	d	عمق موثر مقطع
		$b_w$	عرض مقطع ستون
		$f_y$	مقاومت تسلیم میلگردهای عرضی
		$A_{sw}$	سطح مقطع میلگردهای عرضی
		P	نیروی محوری
		S	فاصله بین میلگردهای عرضی