

DOI: 10.48303/bese.2024.2019448.1148

## نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

در تحلیل و طراحی‌های متعارف تیرهای بتن آرمه مطابق با اکثر آیین‌نامه‌ها، طراحی برای خمش و برش، بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی میان آنها انجام می‌شود. جهت برآورد یک دیدگاه دقیق از رفتار تیرهای بتن آرمه می‌بایستی حتماً اثرات اندرکنشی میان برش و خمش نیز در نظر گرفته شود. در این پژوهش با روشی ابتکاری، تعداد ۲۷ تیر بتن آرمه دو سر مفصل برش-کنترل، مورد آنالیز و ارزیابی توالی خرابی با احتساب اندرکنش برش-خمشی قرار گرفته و دوران برشی مفصل پلاستیک بحرانی هر یک از تیرها محاسبه شد. اساس کار به این صورت است که در ابتدا برای هر یک از تیرها نرخ افزایش بار برش-خمشی محاسبه شده و پس از تحلیل به روش میدان فشاری اصلاح شده MCFT، منحنی کامل رفتاری برشی و خمشی تیر به دست آمد. مقادیر دوران پلاستیک برشی مربوط به مفصل بحرانی هر یک از تیرهای مدل شده، بر اساس متغیرهای طول تیر، فواصل تنگ‌ها و مقاومت فشاری بتن محاسبه شد. در تیرهای با طول کوتاه، افزایش مقاومت فشاری بتن و کاهش فواصل میان تنگ‌ها موجب دوران پلاستیک برشی بیشتری شده، اما در تیرهای با طول بلندتر به دلیل رفتار خمشی تیر، افزایش فواصل میان تنگ‌ها موجب دوران پلاستیک برشی بیشتری شد. با توجه به نتایج پژوهش، مقادیر پیشنهادی برای دوران پلاستیک برشی تیرهای بتن آرمه با طبقه‌بندی مشخص ارائه گردید که می‌تواند در تحلیل‌های غیرخطی به روش مفصل پلاستیک و پروژه‌های مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** اندرکنش برش-خمشی، فایبر گسترده، تئوری میدان فشاری اصلاح شده، توالی خرابی، دوران پلاستیک برشی.

## بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرهای بتن آرمه برش کنترل با احتساب اندرکنش برش - خمش

محمد مهدی صادقی (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، mm.sadeghi@razi.ac.ir

حمید توپچی نژاد

دانشیار مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

## ۱- مقدمه

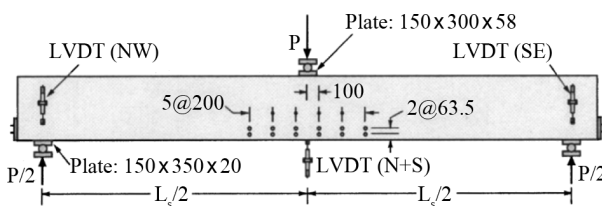
المان می‌بایستی علاوه بر محاسبه نیروهای موجود، اثرات اندرکنشی میان آنها نیز لحاظ شود (Ali Pormenon, 2016; Fehenberger et al., 2020; Picón et al., 2023; Sae-Long et al., 2020). تلاش خمشی در یک مقطع تیر بتن آرمه می‌تواند روی ظرفیت برشی آن تأثیرگذار باشد و برعکس. مدل فایبر زمانی از دقت کافی برخوردار خواهد بود که اندرکنش بین V-M-P را به درستی شبیه‌سازی کند. نرم‌افزار Response2000 (Bentz & Collins, 2000) یکی از نرم‌افزارهای کاربرپسندی است که برای مقاطع محدودی این محاسبات را انجام می‌دهد.

عدم اطمینان به برش در تیرهای بتن آرمه به دلیل ماهیت ترد بتن در رفتار برشی موجب عدم استفاده از شکل‌پذیری برشی تیرها در تحلیل‌های خطی و در نظر گرفتن حاشیه ایمنی زیادی برای شکل‌پذیری برشی این تیرها در تحلیل‌های غیرخطی به روش مفصل پلاستیک شده است (ASCE, 2017). نیروی محوری و نیروی برشی در رفتار خمشی یک المان بتنی تأثیر عمده‌ای دارند. تلاش محوری و تلاش برشی می‌توانند یک مقدار ثابت به دلیل بارهای ثقلی و... داشته و یک مقدار متغیر افزایش یافته یا کاهش یافته به دلیل زلزله داشته باشند. جهت بررسی دقیق رفتار یک

نسبت طول خالص تیر به ارتفاع آن بزرگ تر از عدد ۴ باشد، تیر عمیق محسوب نمی‌شود (ACI, 2019)

خمش تیر در فاز الاستیک یا الاستوپلاستیک باشد و وارد ناحیه پلاستیک نگردد (Karthik & Mander, 2011; Mander et al., 1988)، این مورد نیز به علت عدم توانایی نرم‌افزار Response2000 در شبیه‌سازی اثرات محصورشدگی بتن می‌باشد که در فاز پلاستیک رفتاری، بسیار اثرگذار است.

برای صحت‌سنجی این روش، از نتایج آزمایشگاهی تیرهای تورتو (Vecchio & Shim, 2004) استفاده شده است. بارگذاری تیرها از نوع متمرکز، در وسط دهانه بوده و تکیه‌گاه تیرها مفصلی می‌باشند. جزئیات شرایط آزمایشگاهی در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): جزئیات آزمایش تیرهای تورتو در مقاله (Vecchio & Shim, 2004).

تیر صحت‌سنجی شده با نام A2 دارای عرض ۳۰۵ میلی‌متر و ارتفاع مؤثر ۴۵۷ میلی‌متر و طول دهانه ۴۵۷۰ میلی‌متر، پنج آرماتور در ردیف پایین تیر (سه آرماتور با سایز ۲۹/۹ میلی‌متر و دو آرماتور با سایز ۲۵/۲ میلی‌متر) و سه آرماتور در ردیف بالای تیر (با سایز ۱۱/۳ میلی‌متر)، تنگ با سایز ۶/۴ میلی‌متر و فواصل ۲۱۰ میلی‌متر، با مقاومت فشاری بتن ۲۵/۹ مگاپاسکال می‌باشد (Vecchio & Shim, 2004). در ابتدا با تقسیم‌بندی کل طول تیر به فواصل عمق مؤثر مقطع و مدل‌سازی جداگانه هر یک از این مقاطع با توجه به نرخ تغییرات بارگذاری برش - خمش مطابق توضیحات بخش ۲-۴ این مقاله، تحلیل به روش میدان فشاری اصلاح شده در نرم‌افزار Response2000 برای مقطع انجام شد و منحنی‌های رفتاری برشی و خمشی محاسبه شده در نرم‌افزار SAP2000 به صورت مفصل پلاستیک در طول تیر معرفی شد

استاندارد لرزه‌ای ASCE 41-17 در جدول ۱۰-۷ مقادیری را به‌عنوان دوران پلاستیک برشی برای استفاده در تحلیل غیرخطی تیرهای بتن آرمه برش کنترل ارائه داده است که برحسب یک تقسیم‌بندی واحد (صرفاً فاصله تنگ‌ها از یکدیگر) و حاشیه اطمینان بالایی می‌باشد، در صورتی که با ارائه یک طبقه‌بندی واقع‌بینانه‌تر، در صورت لزوم می‌توان در تحلیل‌های غیرخطی و پروژه‌های مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای، از شکل‌پذیری برشی نیز جهت اغای نیاز لرزه‌ای بهره‌مند شد (Tahenni et al., 2021). در این مقاله به‌صورت ابتکاری با استفاده از تئوری میدان فشاری اصلاح شده (Agarwal et al., 2021; Feng et al., 2021; Jiang et al., 2023; Sattari et al., 2019; Wu et al., 2022)، دوران پلاستیک برشی تعداد ۲۷ تیر بتن آرمه دو سر مفصل که اولویت تسلیم و گسیختگی در آنها با برش می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است (Cladera et al., 2015; Kolozvari et al., 2015; Mari et al., 2014; Vecchio & Shim, 2004; Vecchio & Collins, 1986).

## ۲- نرم‌افزارهای مورد استفاده

نرم‌افزارهایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته عبارتند از: ۱- Response2000-v1.0.5، ۲- Excel 2016 و ۳- SAP2000 v20.

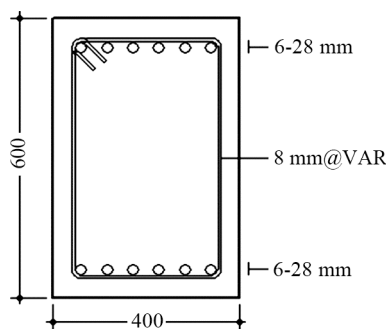
## ۳- فرضیات و صحت‌سنجی روش ابتکاری

فرضیات صورت گرفته در این روش عبارتند از:

- رفتار همه‌ی تیرها برش کنترل باشد (Bazant & Planas, 2019; Subramanian, 2014)
- تیر «عمیق» محسوب نگردد، زیرا تیرهای عمیق از تئوری اولر-برنولی پیروی نکرده و تئوری تیموشنکو بر آنان استوار است و نرم‌افزار Response2000 توانایی شبیه‌سازی آنها را ندارد. (مطابق آیین‌نامه ACI318-19 در صورتی که

جدول (۱): جزئیات مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)، فواصل تنگ‌ها (میلی‌متر) و طول تیرها (میلی‌متر).

C20-C25-C30 (مگاپاسکال)			
$L = 5380$	$L = 4304$	$L = 3228$	$S < d/2$ (۱۹۰ میلی‌متر)
میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر	
$L = 5380$	$L = 4304$	$L = 3228$	$S = d/2$ (۲۶۹ میلی‌متر)
میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر	
$L = 5380$	$L = 4304$	$L = 3228$	$S > d/2$ (۳۴۸ میلی‌متر)
میلی‌متر	میلی‌متر	میلی‌متر	



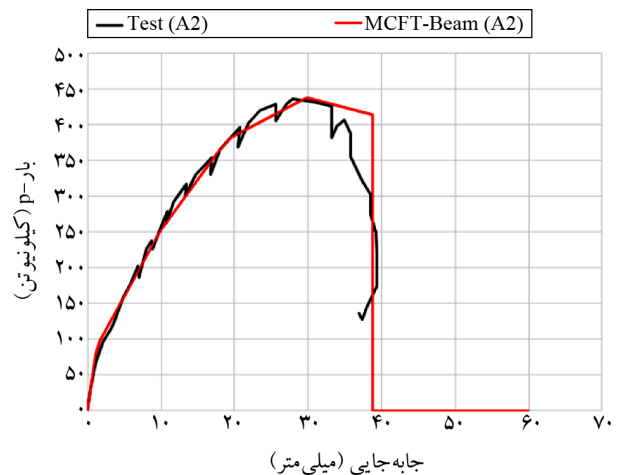
شکل (۳): مقطع تمامی تیرها.

ردیف پایین تیر (بخش کششی)، و آرماتورهای عرضی دارای قطر ۸ میلی‌متر با فواصل متغیر مطابق جدول (۱) است. پوشش خالص بتن روی آرماتورها ۴۰ میلی‌متر و پوشش بتن تا مرکز آرماتورهای طولی برابر ۶۲ میلی‌متر می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن متغیر و مطابق جدول (۱) است. مدول الاستیسیته آرماتورهای طولی و عرضی  $2 \times 10^5$  مگاپاسکال و این مقدار برای بتن وابسته به مقاومت فشاری آن از رابطه  $E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$  (ACI, 2019) محاسبه می‌شود. تنش تسلیم و تنش کششی نهایی برای آرماتورهای طولی به ترتیب برابر ۴۲۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال و برای آرماتورهای عرضی ۳۴۰ و ۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در ادامه، روند اجرای پژوهش برای یکی از ۲۷ تیر این مقاله، به عنوان نمونه ذکر خواهد شد.

#### ۴-۲- معرفی جزئیات نمونه

خلاصه‌ای از روند پژوهش برای تیر با طول ۳۲۲۸ میلی‌متر، فاصله‌ی تنگ‌ها ۱۹۰ میلی‌متر و مقاومت بتن ۲۰ مگاپاسکال همراه

که معادل با تحلیل فایبر گسترده المان می‌باشد. مقدار خمش در تیر A2 در محدوده جاری شدن و رفتار کلی تیر، برش کنترل بود. سپس منحنی ظرفیت خروجی تحلیل تیر با نتایج حاصل از آزمایش آن مطابق شکل (۲) مقایسه شد که دارای تطابق مناسبی می‌باشند. اثرات اندرکنشی میان برش و خمش به روش میدان فشاری اصلاح شده با معرفی نسبت‌های افزایش بار میان آنها به نرم‌افزار Response2000، در تحلیل مقطع لحاظ می‌شود.



جابه‌جایی (میلی‌متر)

شکل (۲): نتایج آزمایش و تحلیل با روش ابتکاری برای تیر A2 از مقاله (Vecchio & Shim, 2004).

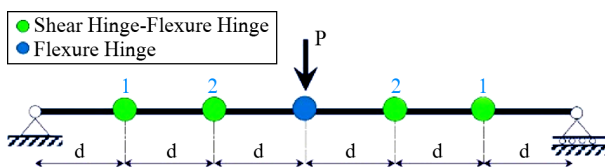
#### ۴- مدل سازی تیرها

##### ۴-۱- مشخصات مقطع، طول و مصالح تیرها

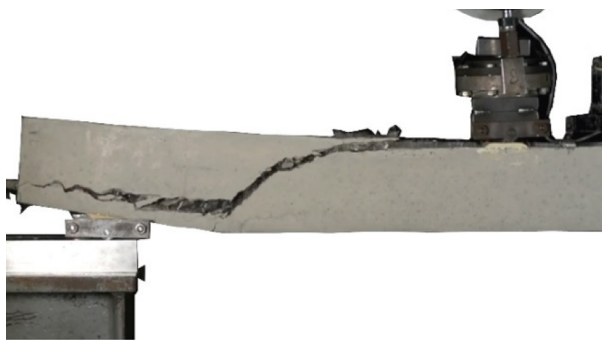
در این مقاله نتایج آنالیز ۲۷ تیر بتن آرمه برش کنترل با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات مقطع، در تمامی تیرها یکسان بوده و پارامترهای متغیر در آنها مطابق جدول (۱) عبارتند از مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ( $f'_c$ )، فواصل تنگ‌ها از یکدیگر ( $S$ ) و طول تیر ( $L$ ). طول تیرها جهت اختصاص مفاصل به فاصله‌ی عمق مؤثر مقطع ( $d = 538$  میلی‌متر)، به صورت ضرایبی از آن انتخاب شده‌اند.

مقطع مشخص شده در شکل (۳) و همچنین مشخصات مصالح، برای تمامی ۲۷ تیر یکسان می‌باشد. تیرها دارای ابعاد  $400 \times 600$  میلی‌متر و عمق مؤثر ۵۳۸ میلی‌متر می‌باشند. آرماتورگذاری طولی به صورت شش آرماتور سایز ۲۸ میلی‌متر در بالای تیر (بخش فشاری) و شش آرماتور سایز ۲۸ میلی‌متر در

دقیقاً بر روی مفاصل برشی اختصاص داده شدند. مطابق با آیین نامه بتن آمریکا مفصل بحرانی برشی به فاصله عمق مؤثر از بار متمرکز در نظر گرفته می شود، زیرا شروع ترک مایل برشی در مقطع در این فاصله از بار متمرکز رخ می دهد (ACI, 2019). شکل (۶) نحوه شکل گیری و گسترش ترک مایل برشی و وضعیت آن نسبت به موقعیت بار متمرکز را نشان می دهد.



شکل (۵): موقعیت اختصاص مفاصل و فواصل آنها از یکدیگر در طول تیر (d: عمق مقطع تیر). (مفاصل سبزرنگ: برشی و خمشی، مفصل آبی رنگ: خمشی).



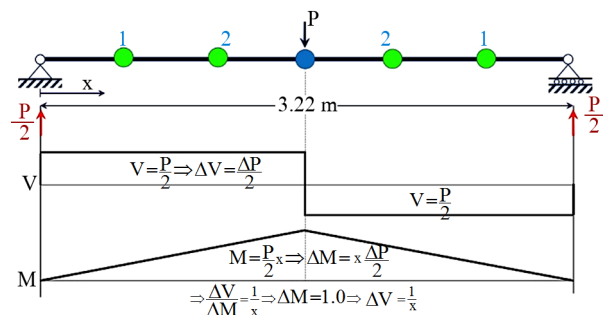
شکل (۶): رشد ترک مایل برشی در تیر.

برای سایر تیرهای این مقاله نیز با توجه به طول آنها، در فواصل عمق مؤثر مقطع مطابق توضیحات قبلی، مفصل اختصاص داده شد و مقادیر افزایش بار برش به خمش مربوطه، با توجه به فاصله از تکیه گاه محاسبه شدند (فایبر گسترده<sup>۳</sup>). ضمناً در این روش، از ضرایب اصلاح سختی (ضرایب ترک خوردگی) استفاده نمی شود؛ زیرا با استفاده از نرم افزار Response2000 رفتار کامل مقطع شامل ترک خوردگی، تسلیم و مقاومت نهایی در طول تیر اختصاص می یابد. شکل (۵) نمایی از موقعیت مفاصل اختصاص داده شده در طول تیر را نشان می دهد.

## ۵- تحلیل به روش میدان فشاری اصلاح شده

تئوری میدان فشاری اصلاح شده MCFT یک مدل کلی برای

با سایر مشخصات عنوان شده در بند ۲-۱ به شرح زیر می باشد. در ابتدا مطابق شکل (۴) با توجه به دیاگرام برش و خمش در تیر نمونه، وضعیت «افزایش بار<sup>۲</sup>» برش و خمش با استفاده از مشتق گیری، در طول تیر محاسبه شد (افزایش بار به این معناست که نرم افزار در طول تحلیل، مقادیر هم زمان خمش و برش را با چه نرخ تغییراتی به تیر بارگذاری کند).



شکل (۴): عملیات مشتق گیری (Δ) و تعیین Increment Loads

همان طور که از شکل (۴) مشخص است، مقدار برش در طول تیر، تنها به بار متمرکز، و تغییرات خمش علاوه بر مقدار بار به فاصله مقطع از تکیه گاه نیز وابسته است. با تقسیم مقادیر افزایش بار برش بر افزایش بار خمش (ΔV / ΔM) و ساده سازی آن و نیز در صورتی که مقدار افزایش بار خمش را برابر ۱ فرض کنیم، نسبت افزایش بار برش به خمش برابر با معکوس فاصله مقطع مورد نظر از تکیه گاه خواهد بود که مقدار نسبت مذکور می بایستی وابسته به فاصله از تکیه گاه، به عنوان پارامتر «افزایش بار» برای لحاظ نمودن اثر اندرکنش برش و خمش به نرم افزار Response2000 معرفی گردد.

تعداد مفاصلی که با توجه به طول و دیاگرام برش و خمش تیر، به آن اختصاص داده می شود، چهار مفصل برشی و پنج مفصل خمشی است. مطابق شکل (۵)، دو مفصل برشی به فاصله عمق مؤثر مقطع و دو برابر عمق مؤثر از تکیه گاه در سمت چپ دهانه تیر (فواصل ۵۳۸ و ۱۰۷۶ میلی متر) و به همین ترتیب دو مفصل دیگر نیز در سمت راست دهانه تیر اختصاص داده شد و با توجه به اینکه حداکثر خمش به علت شرایط تکیه گاهی در وسط دهانه رخ می دهد، یک مفصل خمشی در وسط دهانه و بقیه مفاصل خمشی

Increment Loads for "Shear Hinge 2":

$$x = 1076 \text{ mm} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta M} = \frac{1}{x} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta M} = \quad (2)$$

$$\frac{1}{1.076} \stackrel{\Delta M=1}{\Rightarrow} \Delta V = 0.93$$

که در این روابط، پارامتر  $(\Delta V)$  «افزایش بار برش» و پارامتر  $(\Delta M)$  «افزایش بار خمش» و  $(X)$  برابر با «فاصله مفصل تا تکیه گاه» می باشد. از آنجایی که مقدار افزایش بار خمش مطابق واحد نرم افزار برابر با یک کیلونیوتن-متر فرض شد، در نتیجه پارامتر طول نیز با واحد «متر» در روابط (۱) و (۲) جاگذاری و به نرم افزار Response2000 معرفی شده است. در واقع اثرات برش روی خمش مقطع، هنگامی که خمش در ناحیه الاستیک یا الاستوپلاستیک باشد ناچیز و قابل صرف نظر کردن می باشد که این مورد با توجه به شکل (۲) از نتایج صحت سنجی نیز پیداست.

پس از تحلیل مقاطع به روش میدان فشاری اصلاح شده (Agarwal et al., 2021; Feng et al., 2021; Jiang et al., 2022; Sattari et al., 2019; Wu et al., 2023)، منحنی های رفتاری زیر محاسبه شدند. در شکل های (۷) و (۸) منحنی رفتاری برشی مفاصل ۱ و ۲ ترسیم شده است که در آنها، محور قائم نمودار نیروی برشی با واحد کیلونیوتن، و محور افقی نمودار کرنش برشی با واحد میلی متر بر متر می باشد. در شکل (۹) نیز منحنی لنگر خمشی-انحناء تیر رسم شده که محور قائم آن لنگر خمشی با واحد کیلونیوتن متر و محور افقی نمایانگر انحناء مقطع با واحد رادیان بر کیلومتر می باشد.



شکل (۲): منحنی رفتاری نیروی برشی (کیلونیوتن)-کرنش برشی (میلی متر بر متر) برای مفصل برشی شماره ۱.

رفتار بار-تغییر شکل دو بعدی بتن مسلح ترک خورده تحت برش است. این مدل بتن را با در نظر گرفتن تنش های آن در جهت های اصلی جمع شده با تنش های تقویت کننده که فقط محوری فرض می شود، مدل می کند. رفتار تنش-کرنش بتن در اصل از آزمایش های Vecchio برگرفته شده است و از آن زمان با حدود ۲۵۰ آزمایش انجام شده بر روی دو دستگاه بزرگ آزمایشگاهی با هدف ویژه در دانشگاه تورنتو تأیید شده است. ماشین های مشابه در ژاپن و ایالات متحده ساخته شده اند که تأیید بیشتری از کیفیت پیش بینی های این روش ارائه می کنند. مهم ترین فرض در مدل MCFT این است که بتن ترک خورده در بتن مسلح را می توان به عنوان یک ماده جدید با رفتار تنش-کرنش تعریف شده تجربی در نظر گرفت. برای مثال، این رفتار می تواند با منحنی تنش-کرنش سستی یک استوانه متفاوت باشد. کرنش هایی که برای این روابط تنش-کرنش استفاده می شوند، کرنش های متوسط هستند، یعنی اثرات ترکیبی کرنش های موضعی در ترک ها، کرنش های بین ترک ها، لغزش آرماتورها با بتن اطراف آن و لغزش ترک را با هم ترکیب می کنند. تنش های محاسبه شده نیز تنش های متوسطی هستند، زیرا به طور ضمنی شامل تنش های بین ترک ها، تنش های موجود در ترک، برش مشترک روی ترک ها و اثر شاخه های آرماتورهای طولی (رشد ترک و برش روی آرماتور طولی) می باشند. برای اینکه استفاده از این تنش ها و کرنش های متوسط یک فرض معقول باشد، فواصل مورد استفاده در تعیین رفتار متوسط، باید شامل چند ترک باشد (Vecchio & Collins, 1986). اثرات اندرکنشی میان برش و خمش با معرفی مقادیر «افزایش بار» به نرم افزار Response2000، در گام های تحلیل مقطع لحاظ می گردد. پس از مدل سازی مقطع تیر و مشخصات مصالح در نرم افزار Response2000 مقادیر افزایش بار برای هر مقطع محاسبه شد. برای مفاصل برشی شماره ۱ و ۲ شکل (۵) داریم:

Increment Loads for "Shear Hinge 1":

$$x = 538 \text{ mm} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta M} = \frac{1}{x} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta M} = \quad (1)$$

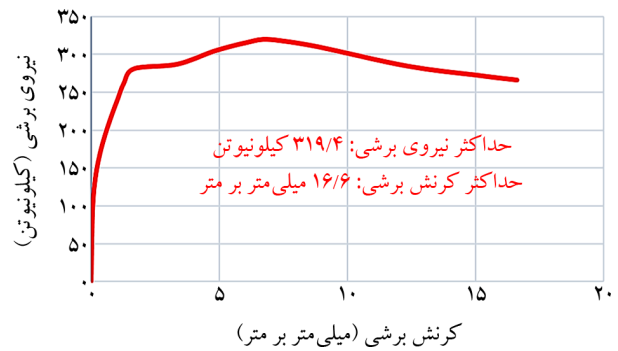
$$\frac{1}{0.538} \stackrel{\Delta M=1}{\Rightarrow} \Delta V = 1.86$$

و آیین نامه‌ها، طول مفصل پلاستیک برشی یک و نیم برابر عمق مؤثر تیر و طول مفصل پلاستیک خمشی برابر عمق مؤثر تیر در نظر گرفته شده است (ASCE, 2017; ACI, 2019). نمودار ترسیم شده برای مفاصل برشی با مشخص کردن ۵ نقطه شامل مبدأ مختصات، ترک خوردگی، جاری شدن، مقاومت نهایی و تغییر شکل نهایی چندخطی شد. برای نمودار چندخطی شده مفاصل خمشی به دلیل این که رفتار تیرها برش کنترل می‌باشد، صرفاً مدل - سازی بخش الاستیک و الاستوپلاستیک و بخش اندکی از ناحیه پلاستیک رفتاری کفایت می‌نماید. شکل (۱۰) نمودار چندخطی شده مفاصل برشی شماره ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.

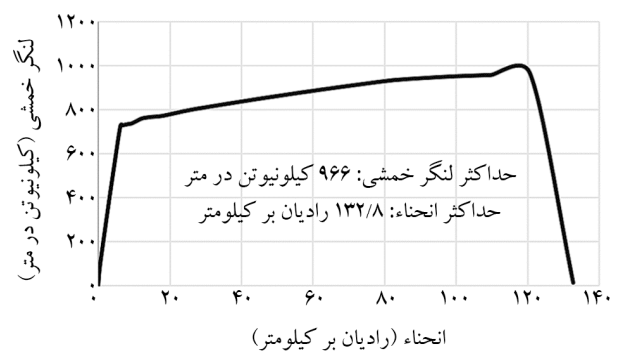
مقادیر مربوط به مختصات هر کدام از نقاط مشخص شده، بر اعداد مربوط به نقطه ترک خوردگی تقسیم شده و در قالب جداول (۲) تا (۴) به بخش تنظیمات دستی مفاصل پلاستیک نرم افزار SAP2000 انتقال داده شدند. در صورتی که مقدار خمش در تیر موجب ورود به ناحیه پلاستیک نشود، می‌توان صرفاً بخش الاستیک و الاستوپلاستیک منحنی لنگر- انحناء را چندخطی و به نرم افزار SAP2000 معرفی نمود (Pokhrel & Bandelt, 2019).

جدول (۲): جدول نهایی دوران مفصل پلاستیک برشی شماره ۱.

SAP2000		
	Stress/SF	Strain/SF
A	0	0
B	1	0
C	1.643769647	8.119205298
D	1.872835625	46.61589404
E	1.537351087	113.1721854



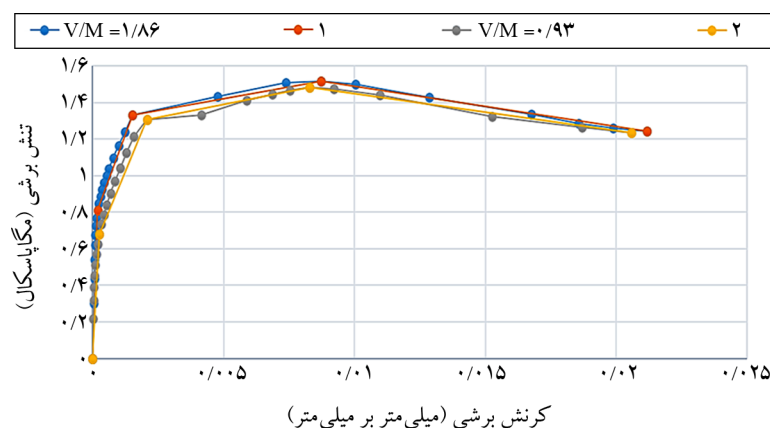
شکل (۸): منحنی رفتاری نیروی برشی (کیلونیوتن) - کرنش برشی (میلی متر بر متر) برای مفصل برشی شماره ۲.



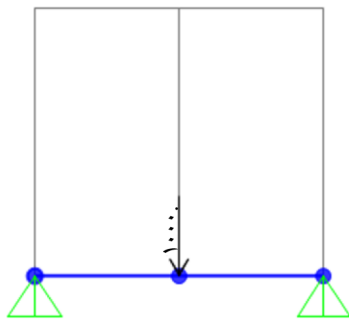
شکل (۹): منحنی رفتاری لنگر خمشی (کیلونیوتن در متر) - انحناء (رادیان بر کیلومتر) برای همه مفاصل خمشی.

## ۶- آماده سازی نتایج تحلیل به روش میدان فشاری اصلاح شده

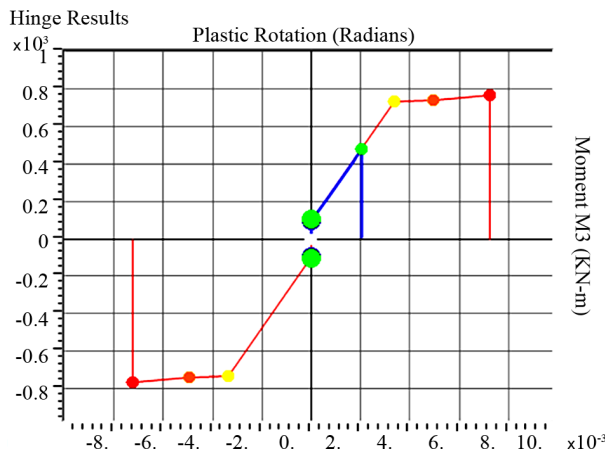
در مفاصل برشی شماره ۱ و ۲، منحنی های رفتاری با محور قائم تنش برشی متوسط با واحد مگاپاسکال (ACI, 2019) و محور افقی کرنش برشی بر حسب رادیان، و برای مفاصل خمشی نیز نمودار لنگر خمشی - انحناء ترسیم شدند. مطابق با مقالات معتبر



شکل (۱۰): نمودار چندخطی شده مفاصل برشی شماره ۱ و ۲ در نرم افزار Excel.



شکل (۱۱): اختصاص بار متمرکز با مقدار دلخواه به وسط دهانه تیر.



شکل (۱۲): مفصل خمشی وسط دهانه در SAP2000 که وارد ناحیه پلاستیک نشده است.

با توجه به دیانگرم خمش در تیرهای دو سرمفصل که در آن، حداکثر خمش در وسط دهانه رخ می‌دهد، در رابطه با مفاصل خمشی که روی مفاصل برشی شماره ۱ و ۲ اختصاص داده شده‌اند، با بررسی توالی خرابی مشخص شد که مقدار خمش در این نقاط کمتر از وسط دهانه می‌باشد.

نکته مهم، عدم تشکیل مفصل پلاستیک خمشی است. به عبارت بهتر آرماتورهای طولی تحتانی این تیر امکان تسلیم در این شرایط را نخواهند داشت.

به دلیل گسیختگی تیر در ناحیه مفصل برشی شماره ۲، مفصل خمشی وسط دهانه (که متحمل بیشترین مقدار خمش است) با ورود به ناحیه الاستوپلاستیک و قبل از تسلیم، به صورت آبی به مقاومت صفر افت پیدا می‌کند؛ بنابراین امکان تسلیم خمشی برای این تیر وجود نداشته و رفتار خمشی این تیر در محدوده ارتجاعی خواهد بود.

جدول (۳): جدول نهایی دوران مفصل پلاستیک برشی شماره ۲.

SAP2000		
	Stress/SF	Strain/SF
A	0	0
B	1	0
C	1.918719969	8.038461538
D	2.182962087	32.16346154
E	1.816593648	79.85576923

جدول (۴): جدول نهایی دوران مفاصل خمشی.

SAP2000		
	Moment/SF	Curvature/SF
A	0	0
B	1	0
C	7.317831706	11.41560799
D	7.378911252	16.71324864
E	7.655239677	24.47005445

## ۷- تحلیل المان تیر در نرم‌افزار SAP2000 و ارزیابی آسیب پذیری

پس از مدل‌سازی المان تیر در نرم‌افزار SAP2000، در صفحه مربوط به تنظیمات دستی مفاصل پلاستیک، برای هر مفصل اعداد مربوط به ترک خوردگی در بخش تنش-کرنش تسلیم وارد شد. در واقع این بخش مربوط به مقادیر تنش و کرنش «تسلیم» می‌باشد؛ اما از آنجایی که نرم‌افزار از اعداد وارد شده در این قسمت، صرفاً جهت مشخص نمودن سایر نقاط روی نمودار رفتاری استفاده می‌کند (ضریب مقیاس)؛ لذا برای نرم‌افزار تفاوتی ندارد که مقادیر ترک خوردگی وارد می‌شود یا مقادیر تسلیم. سپس اعداد محاسبه شده در جداول (۲) تا (۴) برای مفاصل برشی و خمشی به صورت مجزا و بر حسب واحدهای مشخص شده، در پنجره مفاصل پلاستیک دستی نرم‌افزار معرفی شدند. تنظیمات آنالیز استاتیکی غیرخطی (بار افزون<sup>۴</sup>) با اعمال یک بار متمرکز مطابق شکل (۱۱) به وسط دهانه انجام و با اجرای تحلیل، به بررسی توالی خرابی تیر نمونه پرداخته شد.

مهم‌ترین بخش ارزیابی آسیب‌پذیری، کنترل توالی خرابی در المان‌ها و کل سازه است. بارگذاری استاتیکی این تیر در گام‌های مختلف انجام شده است تا شکست برشی رخ دهد. شکل (۱۲) رفتار مفصل پلاستیک خمشی در وسط دهانه تیر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۴) شکست برشی در محل مفصل شماره ۲ که به فاصله عمق مؤثر مقطع از محل بار متمرکز می‌باشد، رخ می‌دهد. به دلیل شکست برشی در محل مفصل برشی شماره ۲، شاهد افت نیروی برشی آنی در محل مفاصل برشی شماره ۱ هستیم. با تفاسیر فوق، توالی خرابی در این تیر به ترتیب زیر خواهد بود: با وجود اینکه مقاومت برشی مطابق استاندارد ACI318-19 در تمام طول تیر ثابت است، اما به دلیل اثر اندرکنشی میان برش و خمش، مفصل پلاستیک برشی شماره ۲، ضعیف‌ترین مقطع (مقطع بحرانی) می‌باشد.

ترک خوردگی برشی در محل مفصل برشی شماره ۱ اتفاق می‌افتد، اما به مقاومت برشی نهایی نمی‌رسد. ترک خوردگی خمشی در محل وسط دهانه تیر رخ می‌دهد ولی به دلیل مساحت بسیار زیاد در آرماتورهای کششی تیر، امکان تسلیم خمشی وجود نداشته و قبل از تسلیم خمشی، مقطع تیر در محل مفصل شماره ۲ دچار انهدام برشی می‌شود؛ بنابراین رفتار تیر برش کنترل بوده و مفصل برشی شماره ۲، مفصل بحرانی می‌باشد (مفصل بحرانی مفصلی است که اولویت تسلیم و گسیختگی با آن است) (Cladera et al., 2015; Tahenni et al., 2021).

## ۸- ارزیابی عددی

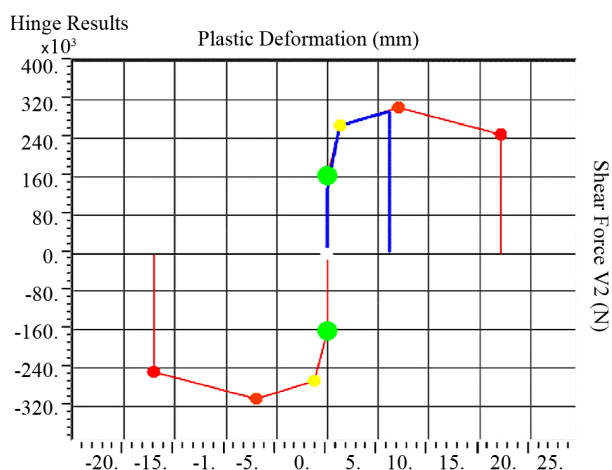
پس از حصول اطمینان از برش کنترل بودن رفتار تیرها و مشخص شدن مفصل بحرانی، مطابق شکل (۱۵) عملیات دو خطی کردن منحنی نیروی برشی - کرنش برشی در سه نقطه شامل مبدأ، تسلیم و کرنش نهایی (کرنش نهایی نقطه‌ی نهایی روی منحنی در راستای محور افقی است که می‌بایستی مقدار برش در آن نقطه از ۸۰ درصد ماکزیمم برش کمتر نباشد) انجام شد (ASCE, 2017).

از تفاضل کرنش نهایی با کرنش تسلیم، مقدار کرنش پلاستیک با ضرب در عدد  $10^{-3}$  به منظور تبدیل واحد کرنش به رادیان، محاسبه شد.

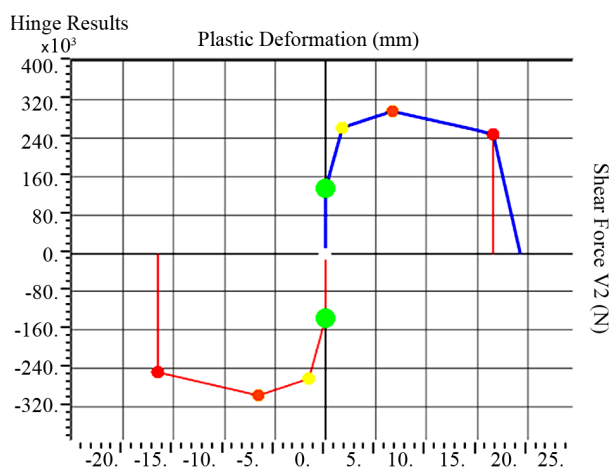
$$\text{Shear Plastic Rotation: } (\Delta_u - \Delta_y) \times 10^{-3} \Rightarrow \quad (3)$$

$$(16.61 - 1.67) \times 10^{-3} = 0.0149 \text{ rad}$$

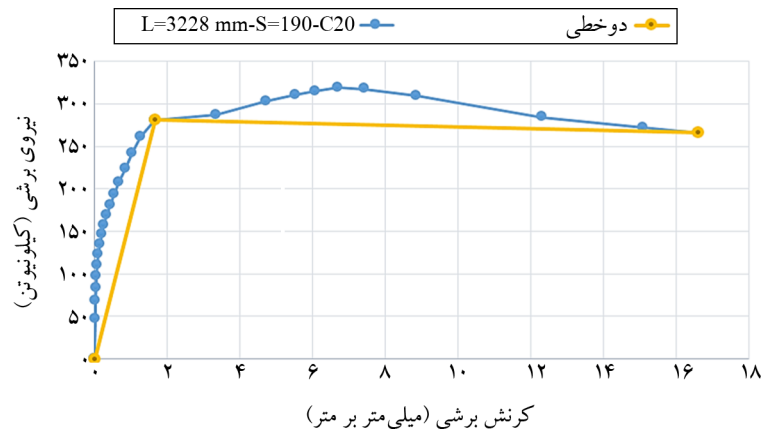
مطابق شکل (۱۲) رفتار مفصل پلاستیک خمشی تیر نشان می‌دهد که در سایر مفاصل پلاستیک تعریف شده گسیختگی رخ داده است؛ چون قبل از رسیدن به نقطه جاری شدن خمشی، افت نیروی قابل ملاحظه به وجود آمده است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) منحنی ظرفیت مفاصل پلاستیک برشی شماره ۱ و ۲ را نشان می‌دهند. با وجود مقطع کاملاً ثابت در طول تیر، محل مفصل برشی شماره ۲ نسبت به مفصل برشی شماره ۱ متحمل خمش بیشتری می‌باشد؛ بنابراین مطابق با روش MCFT مقاومت برشی در نقطه ۲ کمتر از نقطه ۱ است. این کاهش مقاومت میان مفاصل برشی، در سایر تیرهای پژوهش که طول بلندتری دارند، نسبتاً بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۳): منحنی مربوط به مفصل برشی شماره ۱ در نرم‌افزار SAP2000.



شکل (۱۴): منحنی مربوط به مفصل برشی شماره ۲ در نرم‌افزار SAP2000، (مفصل بحرانی).



شکل (۱۵): نمودار دو خطی شده رفتار مفصل بحرانی تیر، برای محاسبه دوران پلاستیک برشی.

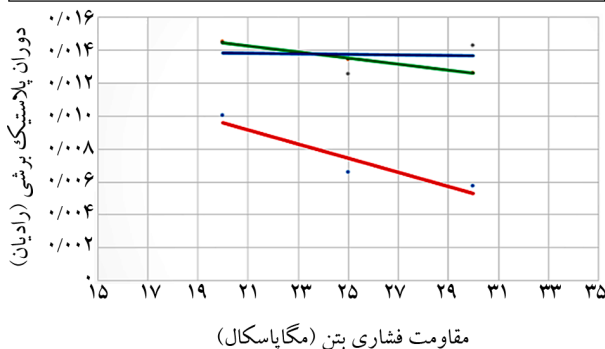
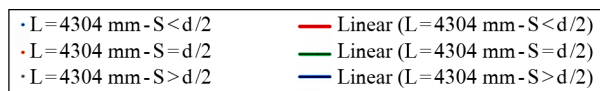
اینکه این تیرها به دلیل طول کوتاه‌شان برش بیشتری جذب کرده و خمش در آنها کمتر است، بنابراین بخش اعظمی از مساحت بتن می‌تواند در برش سرویس دهد و بتن اصطلاحاً در برش قوی تر است. در این حالت هنگامی که فواصل میان تنگ‌ها کم باشد، با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقدار دوران پلاستیک برشی به دلیل تقویت قطر فشاری بتن افزایش خواهد یافت. در واقع در این حالت هرچقدر هم که فواصل میان تنگ‌ها کمتر باشد با افزایش مقاومت فشاری، بتن می‌تواند تنگ‌ها را جاری نموده و تحت کشش بیشتری قرار دهد و در نتیجه دوران پلاستیک برشی بیشتری را سبب شود؛ اما در این تیرهای با طول کوتاه (کمتر از شش برابر عمق مؤثر تا مرز تیر عمیق)، اگر فواصل میان تنگ‌ها بیشتر شود، چون بتن تحت خمش کمتری قرار دارد و بهتر می‌تواند در برش سرویس‌دهی نماید،

در رابطه (۳)، پارامترهای  $\Delta_u$  و  $\Delta_v$  به ترتیب «کرنش نهایی» و «کرنش تسلیم» هستند. بنابراین مقدار دوران پلاستیک مفصل بحرانی تیر نمونه برابر با  $0.149$  رادیان می‌باشد.

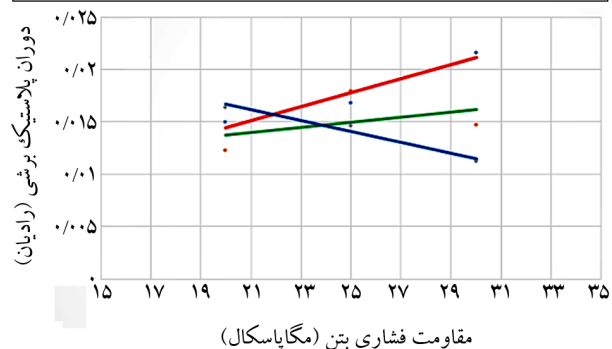
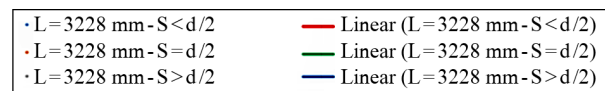
#### ۸- تفسیر نتایج و پیشنهادها

پس از آنالیز ۲۷ تیر این پژوهش و محاسبه مقادیر دوران‌های پلاستیک برشی، نتایج حاصل با رگرسیون‌گیری خطی از نمودارها ترسیم و تفسیر شد:

در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) محور قائم نمودارها دوران پلاستیک برشی تیر برحسب رادیان و محور افقی مقاومت فشاری بتن با واحد مگاپاسکال است. در شکل (۱۶) پرواضح است برای تیرهای برش کنترل با طول کمتر از شش برابر عمق مؤثر تیر (در صورتی که تیر عمیق محسوب نشود)، با توجه به



شکل (۱۷): رگرسیون خطی برای تیر با طول ۴۳۰۴ میلی‌متر.



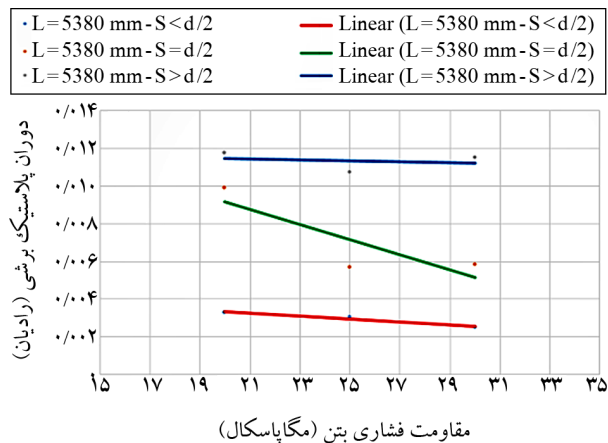
شکل (۱۶): رگرسیون خطی برای تیر با طول ۳۲۲۸ میلی‌متر.

فواصل زیاد)، با افزایش مقاومت فشاری بتن، دوران پلاستیک نیز تقریباً زیاد می‌شود؛ زیرا با افزایش فواصل میان تنگ‌ها، فشار ناشی از برش روی بتن، کاهش یافته و موجب توانایی بیشتر بتن در تسلیم برشی تنگ‌های با فواصل زیاد می‌گردد.

در شکل (۱۸) برای طول ده برابر عمق مؤثر تیر که بلندترین طول تیر در این پژوهش می‌باشد، کاملاً مشخص است که به علت طول زیاد تیر و خمش بیشتری که در این حالت به تیر وارد می‌شود، مقدار مقاومت برشی نسبت به حالات قبلی کاهش بیشتری داشته و همین موضوع سبب حساسیت بیشتر رفتار تیر به فواصل کم میان تنگ‌ها و در نتیجه کاهش دوران پلاستیک برشی می‌شود؛ زیرا در این حالت اولاً بتن تحت خمش بیشتری است و ثانیاً با کاهش فواصل میان تنگ‌ها نیز، فشار ناشی از برش بیشتری به بتن وارد می‌شود؛ اما در این حالت با افزایش فواصل میان تنگ‌ها، فشار ناشی از برش کمتری در اثر کشش ناشی از برش تنگ‌ها، به بتن وارد می‌شود و همچنین می‌توان با افزایش مقاومت فشاری بتن، توانایی آن را در تسلیم تنگ‌های با فواصل زیاد و بالا بردن ظرفیت دوران پلاستیک برشی، افزایش داد. در ادامه، سه رگرسیون خطی دیگر نیز ترسیم و تفسیر شده است.

برای سهولت در انتقال مطالب، تیرهای با طول شش برابر عمق مؤثر تیر با عنوان «تیر کوتاه» و تیرهای با طول هشت برابر عمق مؤثر و ده برابر عمق مؤثر تیر به ترتیب با عنوان «تیر متوسط و بلند» خطاب می‌شود.

در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) محور قائم نمودار دوران پلاستیک برشی بر حسب رادیان و محور افقی فواصل میان تنگ‌ها با واحد میلی‌متر است. با توجه به شکل (۱۹) در حالتی که مقاومت فشاری بتن ۲۰ مگاپاسکال است، چنانچه طول تیر کوتاه باشد، سختی خمشی بیشتر بوده و بتن در برش سرویس‌دهی بیشتری خواهد داشت؛ به همین دلیل در صورتی که فاصله تنگ‌ها کم باشد مقدار دوران پلاستیک برشی بیشتری به دست می‌آید. اگر در همین حالت فواصل میان تنگ‌ها مقداری افزایش داده شود، بتن کشش بیشتری روی تنگ‌ها انداخته و دوران پلاستیک



شکل (۱۸): رگرسیون خطی برای تیر با طول ۵۳۸۰ میلی‌متر.

طبیعتاً مقدار دوران پلاستیک نیز کمتر می‌شود؛ چراکه در این حالت از نظر مقاومت بتن در برش، مشکلی وجود نداشته و تنها پارامتر مهم، تنگ‌ها و فاصله بین آنها می‌باشد، اما چون فواصل تنگ‌ها زیاد هستند پس عملاً افزایش مقاومت فشاری بتن تأثیری در افزایش دوران پلاستیک نخواهد داشت و شاهد سیر نزولی ناشی از افزایش مقاومت فشاری بتن در نمودار خواهیم بود.

در شکل (۱۷) برای طول تیرهای بیشتر از هشت برابر عمق مؤثر تیر، شاهد رفتار متفاوتی خواهیم بود. در این تیرها به علت طول بیشتر، سختی خمشی کاهش پیدا کرده و مقدار خمش بیشتر می‌شود؛ بنابراین نسبت به حالت قبل، مقدار مساحت بیشتری از بتن تحت خمش قرار گرفته و مقاومت برشی کمتر می‌شود. پس در این حالت با کمتر کردن فواصل میان تنگ‌ها، در واقع بتن فشار بیشتری را متحمل شده که موجب عملکرد ضعیف آن می‌شود و ممکن است بتن در این حالت توانایی تسلیم تنگ‌ها را نداشته باشد و اگر هم تسلیم نماید، نمی‌تواند آنها را به حداکثر ظرفیت کششی و دوران پلاستیک برساند و زودتر از تنگ‌ها دچار انهدام می‌شود. در این حالت هرچه قدر فواصل میان تنگ‌ها بیشتر شود، کشش موجود در آنها، فشار ناشی از برش کمتری روی بتن انداخته و همین موضوع سبب می‌شود از ظرفیت کششی تنگ‌ها استفاده شده و مقطع دوران پلاستیک برشی بیشتری از خود نشان دهد (به علت فشار کمتر روی بتن) و همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت (تنگ با

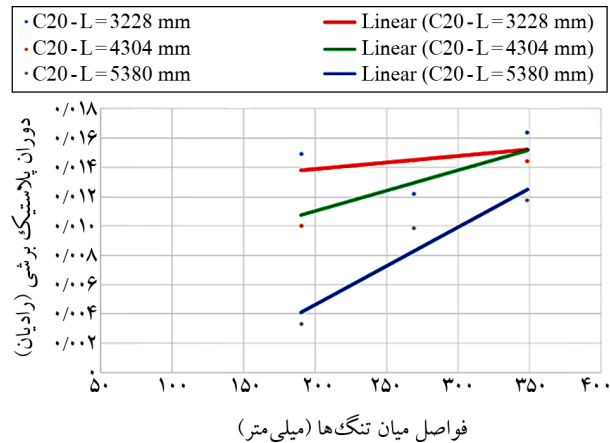
اما برای تیرهای متوسط و بلند، به علت کاهش سختی خمشی و افزایش مقدار خمش در بتن، کاهش فاصله میان تنگ‌ها موجب فشار ناشی از برش بیشتری روی بتن شده و در این حالت به علت اینکه بتن هم‌زمان تحت خمش نسبتاً بیشتری نیز می‌باشد، زودتر دچار انهدام می‌شود؛ بنابراین در این حالت اگر فاصله میان تنگ‌ها کم باشد، دوران پلاستیک برشی هم کاهش یافته و هرچقدر فاصله میان تنگ‌ها بیشتر شود به دلیل اعمال فشار ناشی از برش کمتر از سوی تنگ‌ها روی بتن، دوران پلاستیک برشی افزایش می‌یابد.

مطابق شکل (۲۰) اگر مقاومت فشاری بتن به ۲۵ مگاپاسکال افزایش یافته و طول تیر کوتاه باشد، چون مقاومت فشاری بتن نسبت به حالت قبل بیشتر شده است، با کاهش فواصل میان تنگ‌ها دوران پلاستیک برشی بیشتر می‌شود؛ چراکه اولاً به دلیل طول کوتاه تیر، مقدار خمش کمتری به آن وارد می‌شود و ثانیاً مقدار مقاومت فشاری بتن نیز بیشتر می‌باشد. در واقع اگر فواصل میان تنگ‌ها کمتر از نصف عمق مؤثر تیر باشد، بتن به راحتی می‌تواند آن‌ها را تسلیم نماید. افزایش فواصل میان تنگ‌ها در این حالت موجب کاهش دوران پلاستیک برشی تیر می‌گردد.

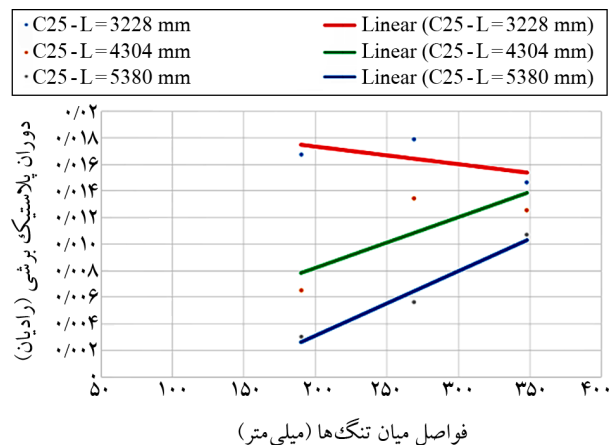
اگر در همین حالت، طول تیر متوسط یا بلند باشد، به دلیل اعمال خمش بیشتر روی بتن، برش نسبت به حالت قبلی (تیر با طول کوتاه) ضعیف‌تر شده و با کاهش فواصل میان تنگ‌ها، بتن تحت فشار زیاد و هم‌زمان خمش و برش قرار گرفته و نمی‌تواند تنگ‌ها را متحمل کشش زیادی نموده و دوران پلاستیک برشی را افزایش دهد و زودتر منهدم می‌شود. اگر در همین حالت فواصل میان تنگ‌ها را افزایش دهیم، مقدار دوران پلاستیک برشی نیز نسبتاً افزایش خواهد یافت؛ چون بتن متحمل فشار ناشی از برش کمتری شده و توانایی بیشتری در جاری نمودن تنگ‌ها و اعمال کشش و دوران پلاستیک برشی دارد.

با توجه به شکل (۲۱) در حالتی که مقاومت فشاری بتن ۳۰ مگاپاسکال بوده و طول تیر نیز کوتاه می‌باشد، واضح است که به دلیل طول کوتاه تیر، بتن تحت خمش کمتری می‌باشد و مقدار مقاومت فشاری آن نیز بیشتر شده است، بنابراین فواصل

برشی بیشتری رخ می‌دهد. از طرفی چون رده بتن ۲۰ مگاپاسکال بوده و مقاومت آن نسبتاً بالا نیست، مشخص است که با افزایش فاصله تنگ‌ها در تیر کوتاه، مقدار دوران پلاستیک برشی دارای روند صعودی با شیب اندک است.



شکل (۱۹): رگرسیون خطی برای تیر با مقاومت بتن ۲۰ مگاپاسکال.



شکل (۲۰): رگرسیون خطی برای تیر با مقاومت بتن ۲۵ مگاپاسکال.



شکل (۲۱): رگرسیون خطی برای تیر با مقاومت بتن ۳۰ مگاپاسکال.

میان تنگ‌ها با مقدار دوران پلاستیک برشی رابطه معکوس دارد. هر چه فواصل میان تنگ‌ها کاهش یابد، چون مشکلی از نظر مقاومت بتن در برش وجود ندارد، مقدار دوران پلاستیک برشی بسیار بیشتر شده و برعکس هرچقدر فواصل میان تنگ‌ها را افزایش دهیم مقدار دوران پلاستیک برشی کمتر می‌شود. در این حالت با افزایش طول تیر، به علت اعمال خمش بیشتر روی آن، برای دست یافتن به دوران پلاستیک برشی بیشتر، می‌بایستی فواصل میان تنگ‌ها بیشتر شود.

با توجه به نتایج پژوهش، مقادیر میانگین منهای یک انحراف معیار از نتایج برای دوران پلاستیک برشی تیرها، مطابق جدول (۵) پیشنهاد می‌گردد.

جدول (۵): زاویه‌ی دوران پلاستیک برشی (رادیان).

For C20-C25-C30		
$L \leq 6d$	$S < d/2$	$a = 0.014$
	$S = d/2$	$a = 0.012$
	$S > d/2$	$a = 0.01$
For C20-C25-C30		
$L = 10d$	$S < d/2$	$a = 0$
	$S = d/2$	$a = 0.003$
	$S > d/2$	$a = 0.01$
For C20-C25-C30		
$L = 12d$	$S < d/2$	$a = 0$
	$S = d/2$	$a = 0$
	$S > d/2$	$a = 0.008$
For C20-C25-C30		
$L > 12d$	$S < d/2$	$a = 0$
	$S = d/2$	$a = 0$
	$S > d/2$	$a = 0.003$

در جدول (۵):

- رفتار تیر باید برش کنترل باشد؛ یعنی اولویت تسلیم و انهدام در تیر، با برش باشد.
- جدول فوق، براساس هر سه رده مقاومتی بتن ۲۰، ۲۵ و ۳۰ مگاپاسکال تنظیم شده است.
- پارامتر (L) طول تیر به میلی‌متر می‌باشد.
- پارامتر (S) فواصل میان تنگ‌ها به میلی‌متر است.
- پارامتر (d) عمق مؤثر مقطع تیر می‌باشد.
- پارامتر (a) مقدار زاویه‌ی دوران پلاستیک برشی تیرها بر حسب رادیان است.
- توجه شود که مطابق با استاندارد ACI318-19، تیر «عمیق»

محسوب نگردد.

- برای طول‌های تیر مابین مقادیر جدول، می‌توان از درون یابی خطی استفاده نمود.

## ۹- نتیجه‌گیری

در تحلیل و طراحی‌های متعارف تیرهای بتن آرمه مطابق با اکثر استانداردها، طراحی برای خمش و برش، بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی میان آنها انجام می‌شود. در این پژوهش تعداد ۲۷ تیر بتن آرمه برش کنترل مورد ارزیابی آسیب‌پذیری با احتساب اندرکنش برش و خمش به روش MCFT قرار گرفت. با شناخت دقیق‌تر رفتار تیرها و در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان نیروها در تحلیل و طراحی، می‌توان در برخی پروژه‌های مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای هنگام مواجه شدن با تیرهای برش کنترل، در عوض تقویت تیر برای تغییر رفتار آن به رفتار خمشی، از ظرفیت شکل‌پذیری و اتلاف انرژی برشی در صورت کفایت برای طرح مورد نظر استفاده نمود و از این طریق هزینه‌ها را تا حدودی کاهش داد.

در تیرهای با طول کوتاه در صورتی که تیر عمیق محسوب نشوند، فواصل میان تنگ‌ها با مقدار دوران پلاستیک برشی رابطه معکوس داشته و در تیرهای با طول بلندتر ارتباط بین پارامترهای مذکور، مستقیم خواهد بود.

در تیرهای با طول کوتاه، فواصل کمتر میان تنگ‌ها، دوران پلاستیک برشی بیشتری و فواصل بیشتر میان تنگ‌ها دوران پلاستیک برشی کمتری را سبب می‌شود و در تیرهای با طول بلندتر، فواصل کمتر میان تنگ‌ها، دوران پلاستیک برشی کمتر و فواصل بیشتر میان تنگ‌ها موجب دوران پلاستیک برشی بیشتری می‌شود. بیشترین مقدار دوران پلاستیک برشی در تیر بتن آرمه هنگامی رخ می‌دهد که طول تیر کوتاه و فواصل میان آرماتورهای عرضی کم باشد.

افزایش مقاومت فشاری بتن نیز موجب بالا رفتن مقدار دوران پلاستیک برشی در تیر می‌شود. در تیرهای با طول کوتاه با افزایش اندک در مقاومت فشاری بتن، مقدار دوران پلاستیک برشی بیشتر شده و در تیرهای با طول متوسط و بلند، این افزایش

Jiang, Q., Yan, S., Yang, Y., Wang, Z., Liu, S., Wu, Y., Li, J., & Zhu, C. (2023). Calculation of shear capacity of recycled concrete beams with web reinforcement based on modified compression field theory. *Thermal Science*, 27(3 Part A), 2135-2143.

Karthik, M. M., & Mander, J. B. (2011). Stress-block parameters for unconfined and confined concrete based on a unified stress-strain model. *Journal of Structural Engineering*, 137(2), 270-273.

Kolozvari, K., Tran, T.A., Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2015). Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. II: Experimental validation. *Journal of Structural Engineering*, 141(5), 04014136.

Mander, J.B., Priestley, M.J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.

Mari, A., Cladera, A., Bairán, J., Oller, E., & Ribas, C. (2014). Shear-flexural strength mechanical model for the design and assessment of reinforced concrete beams subjected to point or distributed loads. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 8, 337-353.

Picón, C.P., Massone, L.M., & López, C.N. (2023). A shear-flexure interaction model for column elements with biaxial loading. *Engineering Structures*, 293, 116636.

Pokhrel, M., & Bandelt, M.J. (2019). Plastic hinge behavior and rotation capacity in reinforced ductile concrete flexural members. *Engineering Structures*, 200, 109699.

Pormenon, A., Mirzaei, M., & Aghayari, R. (2016). Investigation of shear-moment interaction in reinforced concrete beams. *The Second National Conference on Structural Engineering of Iran*, Tehran. <https://civilica.com/doc/535704>

Sae-Long, W., Limkatanyu, S., Hansapinyo, C., Imjai, T., & Kwon, M. (2020). Forced-based shear-flexure-interaction frame element for nonlinear analysis of non-ductile reinforced concrete columns. *Journal of Applied and Computational Mechanics*.

Sattari, M., Banan, M.R., & Banan, M.R. (2019). Evaluation of shear strength of RC beams without shear reinforcement using modified compression field theory. *Iranian Journal of Science and Technology*,

مقاومت فشاری برای افزایش دوران پلاستیک برشی، می‌بایستی تغییر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

## تقدیر و تشکر

از جناب آقای مهندس جواد قدرتی ینگجه بابت تمامی دلسوزی‌ها و راهنمایی‌های بی‌کم‌وکاست، نهایت تشکر را داریم؛ چراکه حضور ایشان موجبات پیمودن این مسیر را فراهم ساخت.

## References

## مراجع

Agarwal, A., Foster, S.J., & Stewart, M.G. (2021). Model error and reliability of reinforced concrete beams in shear designed according to the Modified Compression Field Theory. *Structural Concrete*, 22(6), 3711-3726.

ACI (2019). *ACI Standard-Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19)*. The American Concrete Institute.

ASCE (2017). *ASCE/SEI 41-17-Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. The American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>

Bentz, E., & Collins, M.P. (2000). RESPONSE-2000: load-deformation response of reinforced concrete sections. <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/inter4/inte4.shtml>. [Accessed 10 September 2015].

Bazant, Z.P., & Planas, J. (2019). *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. Routledge.

Cladera, A., Mari, A., Ribas, C., Bairán, J., & Oller, E. (2015). Predicting the shear-flexural strength of slender reinforced concrete T and I shaped beams. *Engineering Structures*, 101, 386-398.

Fehenberger, T., Millar, D.S., Koike-Akino, T., Kojima, K., Parsons, K., & Griesser, H. (2020). Analysis of nonlinear fiber interactions for finite-length constant-composition sequences. *Journal of Lightwave Technology*, 38(2), 457-465.

Feng, W., Feng, H., Zhou, Z., & Shi, X. (2021). Analysis of the shear capacity of ultrahigh performance concrete beams based on the modified compression field theory. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 5569733.

*Transactions of Civil Engineering*, 43, 463-477.

Subramanian, N. (2014). *Design of Reinforced Concrete Structures Illustrated Edition* (Illustrated edition ed). Oxford University Press.

Tahenni, T., Bouziadi, F., Boulekbache, B., & Amziane, S. (2021). Experimental and nonlinear finite element analysis of shear behaviour of reinforced concrete beams. *Structures*.

Vecchio, F., & Shim, W. (2004). Experimental and analytical reexamination of classic concrete beam tests. *Journal of Structural Engineering*, 130(3), 460-469.

Vecchio, F.J., & Collins, M.P. (1986). The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI J.*, 83(2), 219-231.

Wu, L., Huang, T., Tong, Y., & Liang, S. (2022). A modified compression field theory based analytical model of RC slab-column joint without punching shear reinforcement. *Buildings*, 12(2), 226.

#### واژه نامه

Modified Compression Field Theory (MCFT)	۱- تئوری میدان فشاری اصلاح شده
Increment Loads	۲- افزایش بار
Distributed Fiber Hinge	۳- فایبر گسترده
PushOver	۴- بار افزون

## Investigation of Effective Parameters on the Behavior of Shear Control Reinforced Concrete Beams Including Shear-Flexure Interaction

Mohammad Mehdi Sadeghi<sup>1\*</sup> and Hamid Toopchinezhad<sup>2</sup>

1. Ph.D. Candidate, Structural Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran,  
\*Corresponding Author, email: mm.sadeghi@razi.ac.ir
2. Associate Professor, Structural Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

In conventional analysis and design of reinforced concrete beams in accordance with most codes, the design for flexure and shear is done separately and without considering the interaction effects between them. Uncertainty about shear in reinforced concrete beams due to the brittle nature of concrete in shear behavior causes the shear ductility of beams not to be used in linear analyzes and considering a large safety margin for the shear ductility of these beams in non-linear analyses using the plastic hinge method. Axial force and shear force have a significant impact on the flexural behavior of a concrete element. Axial force and shear force can be either constant due to gravity loads and... or variable due to seismic loads. The seismic standard ASCE 41-17 in Table 7-10 provides values as the shear plastic rotation for use in the nonlinear analysis of shear-controlled reinforced concrete beams, based on a single division (only the distance between the stirrups) and a high margin of confidence. By providing a more realistic classification, if necessary, shear ductility can also be utilized in non-linear analyses and seismic retrofitting and rehabilitation projects to meet seismic requirements. In this paper, by an innovative method, 27 reinforced concrete beams with simply-supported and shear-control are analyzed and evaluated for damage sequences in Response2000, Excel, SAP2000 software, taking into account the shear-flexure interaction, and the critical shear plastic hinge rotation values of each one of the beams was calculated. The fiber model will be accurate enough when it correctly simulates the interaction between V-M-P. Response2000 software is one of the user-friendly software that performs these calculations for limited sections. The basis of the work is that at first for each beam, the rate of increment loads of shear-flexure is calculated and after fiber analysis, the complete shear and flexural behavior curve of the beam is obtained. After ensuring that the shear behavior of the beams is controlled by shear, the values of the shear plastic rotation related to the critical hinge of each of the modeled beams have been calculated and graphed based on the beam length variables, stirrup distances and the compressive strength of the concrete. The shorter the length of the beam, due to the increase in moment stiffness, it is possible to use stirrups with shorter intervals for more shear plastic rotation. In this case, increasing the compressive strength of concrete also helps to increase the shear plastic rotation. In short-length beams, if they are not considered deep beams, the distances between the stirrups have an inverse relationship with the amount of shear plastic rotation, and in longer-length beams, the relationship between the mentioned parameters will be direct. The longer the length of the beam becomes, because the concrete of the beam must also serve in moment in addition to shear, it does not have enough strength to yield and tensile the stirrups with close distances, and in such a situation, by increasing the distance between the stirrups, the shear plastic rotation can be relatively increased. The maximum amount of shear plastic rotation in reinforced concrete beam occurs when the length of the beam is short and the distances between the transverse reinforcements are small. Increasing the compressive strength of concrete also increases the amount of shear plastic rotation in the beam. In short-length beams, with a small increase in the compressive strength of the concrete, the amount of shear plastic rotation increases, and in medium and long beams, this increase in compressive strength to increase the shear plastic rotation requires a significant change. According to the results of the research, values for the shear plastic rotation of RC beams were presented that can be used in nonlinear analyzes by the plastic hinge method and seismic retrofitting projects.

**Keywords:** Shear-Flexure Interaction, Modified Compression Field Theory (MCFT), Distributed Fiber Hinge, Damage Sequence, Shear Plastic Rotation.