

## بررسی پارامترهای مؤثر در مقاومت برشی تیرهای عمیق بتنی بدون آرماتور برشی

ابوالفضل عربزاده

دانشیار گروه سازه، دانشگاه تربیت مدرس

امین نوری سولاً

۱- کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس

### چکیده

بررسی رفتار غیر خطی سازه‌ها به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری و تعیین سطح عملکرد سازه‌های موجود از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل ابعاد تیرهای عمیق و همچنین محدودیت هزینه و زمان و پیچیدگی اعمال شرایط مرزی در آزمایشگاه بهتر است از نرم‌افزار و تحلیل غیرخطی استفاده شود. در این مقاله رفتار تیرهای عمیق با بتن سبک و معمولی و با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ و همچنین ارتفاع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مطالعه و بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی نشان می‌دهد که مقاومت برشی نرمالیزه شده در هر دو گروه از تیرها با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد و این کاهش در تمام نسبت‌های دهانه برشی به ارتفاع دیده می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با روش‌های تحلیل خرابایی موجود در آیین‌نامه‌ها نشان می‌دهد که تمام روش‌ها در تیرهای با ارتفاع کم محافظه‌کارانه بوده و با افزایش ارتفاع از حاشیه ایمنی کاسته می‌شود. در روش آیین‌نامه CSA در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ و در بتن معمولی جواب‌ها غیر محافظه‌کارانه می‌باشد و با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقاومت برشی بیش‌بینی شده توسط روش CSA خیلی بیشتر از مقاومت به‌دست آمده حاصل از تحلیل می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تیر عمیق، تحلیل المان محدود، بتن مسلح، بتن سبک، روش خرابایی، مقاومت برشی.

## ۱- مقدمه

تیرهای عمیق به دلیل کاربرد وسیع در مهندسی عمران از جمله سیلوهای بتن مسلح، دیوارهای برشی، دال‌های تاشده، سازه‌های دریایی و ساختمان‌های بلند مورد توجه محققان می‌باشند [۱].

به دلیل رفتار پیچیده این تیرها تعریف دقیقی که مورد تأیید همه مراجع باشد وجود ندارد. ولی اکثر مراجع نسبت دهانه به عمق تیر کمتر از ۵ را به عنوان تیر عمیق می‌شناسند؛ به طوری که آیین‌نامه‌های اروپایی نسبت  $l/d$  کمتر از ۲/۵ و آیین‌نامه آمریکا این نسبت را ۴ و آیین‌نامه کانادا آن را ۵ در نظر می‌گیرند [۲، ۳، ۴].

کشور ایران یکی از مناطق زلزله‌خیز محسوب می‌شود و بحث سبک‌سازی جهت افزایش مقاومت در برابر زلزله از اهمیت به خصوصی برخوردار است. به دلیل پیشرفت‌هایی که در ساخت بتن صورت پذیرفته، بتن سبک به دلیل اقتصادی بودن در حال حاضر جایگاه ویژه‌ای را پیدا نموده است که استفاده از آن ملزم به شناخت کامل رفتار این نوع بتن می‌باشد.

شمس و عربزاده نیز آزمایشاتی روی تیرهای عمیق با بتن سبک انجام داده و روشی را جهت تحلیل پیشنهاد دادند. همچنین مشاهده نمودند که برای تیرهای ساخته شده از بتن با مصالح دانه‌ای سبک، بار ترک خوردگی مایل، بیشتر از بتن با مصالح دانه‌ای کاملاً سبک است و این اشاره دارد به این مطلب که مقاومت ترک خوردگی مایل تیرهای عمیق با کاهش چگالی بتن کاهش می‌یابد و همچنین مقاومت ترک خوردگی تیر با بتن سبک کمتر از تیر با بتن معمولی است [۵].

Yang، آزمایشاتی روی ۱۶ تیر عمیق با بتن سبک انجام داد. بعضی از نمونه‌ها از بتن سبک با ماسه ساخته شده بودند و بقیه از بتن سبک با دانه‌های سبک ساخته شده بودند. نسبت دهانه‌ی برشی به عمق از ۰/۵ تا ۱، عمق مقطع از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیمتر متغیر، عرض تیر ۱۶۰ میلیمتر و فاصله بین بارهای متمرکز ۵۰۰ میلیمتر بود. آزمایش‌ها نشان دادند که تأثیر اندازه ارتفاع در تیرهای عمیق سبک (LWC) بسیار بیشتر از تیرهای عمیق با بتن معمولی (NWC) است [۶].

Taylor نشان داده است که ۵۰٪ از نیروی برشی اعمالی در تیرهای غیر عمیق از طریق قفل‌شدگی سنگ‌دانه‌ها منتقل می‌شود

[۷]. قفل‌شدگی سنگ‌دانه‌ها وابسته به شکل سنگ‌دانه‌ها، اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها و مقاومت سنگ‌دانه‌هاست. Ashraf F. Ashour و Keun-Hyeok Yang روی ظرفیت قفل‌شدگی تیرهای عمیق با بتن سبک و با دهانه پیوسته مطالعه نمودند [۸]. Yu و Bazant نشان دادند که خاموت‌ها چه اندک و چه زیاد نمی‌توانند مانع تأثیر اندازه به طور کامل شوند؛ اگر چه می‌توانند عرض ترک‌ها را کم کنند و به این ترتیب اثر اندازه را کاهش دهند [۹].

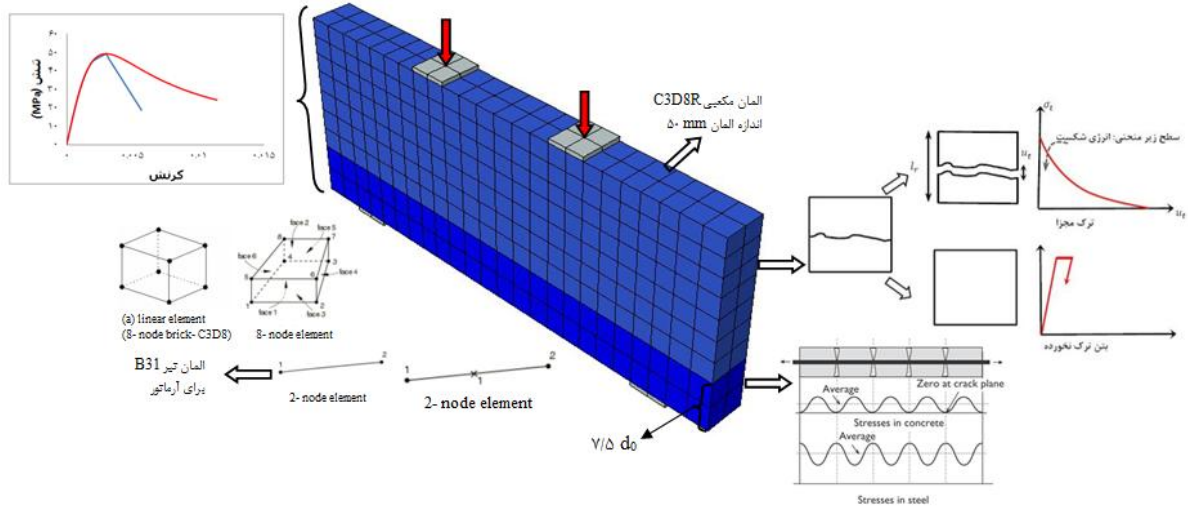
برای منظور نمودن اثر اندازه در طراحی تیرهای عمیق به روش خریایی، نمونه‌ای از مطالعات توسط Tan و Tan, cheng و Zhang انجام شد [۱۰ و ۱۱]. Tan و cheng در مطالعات خود با ساخت ۳۶ نمونه تیر عمیق در آزمایشگاه و مدل عددی به بررسی عواملی مثل هندسه‌ی پایه و قطر آرماتورهای جان روی اثر اندازه پرداختند. آن‌ها بیان نمودند که با توجه به اینکه بتن ترک نخورده در انتقال برش مؤثر است و سهم بتن ترک خورده در انتقال برش ناچیز است، در تیرها عمق مؤثر ثابت نمی‌باشد و با افزایش بار، عمق قسمت ترک نخورده کاهش می‌یابد و این علت اصلی تأثیر اندازه می‌باشد [۱۰].

عربزاده و همکاران یک روش جدید بر مبنای روش خرپا برای تعیین ظرفیت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح دوسر ساده و ضریب ایمنی برای بتن با در نظر گرفتن اثر آرماتورهای جان پیشنهاد نمودند. در این راستا فرض شد که کل نیروی برشی تحمل شده توسط تیر عمیق توسط دو مقاومت مستقل از هم (بتن و آرماتور) ایجاد می‌شود [۱۲].

عربزاده و همکاران به منظور بررسی اثر اندازه در تیرهای عمیق، آزمایش‌هایی بر روی تیرهای عمیق با بتن سبک و معمولی و با ارتفاع‌های مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد هر چه ارتفاع تیر زیاد شود خرپا جواب‌های غیر محافظه کارانه‌تری می‌دهد. [۱۳].

## ۲- هدف و روش انجام تحقیق

اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به منظور شناخت رفتار تیرهای عمیق صورت گرفته است؛ اما با توجه به پیشرفت روش‌های ساخت بتن و استفاده از بتن سبک در ساخت تیرها این امر هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.



شکل ۱- مدل المان محدودی تیر عمیق بتنی

کوچک است تنش‌های کششی مستقیم در عرض ترک را تحمل کند. این تنش‌ها بعضی اوقات تنش‌های چسبنده<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. کاهش در این تنش‌های چسبنده با افزایش عرض ترک، نرم شدگی کششی<sup>۲</sup> نام دارد. برای معرفی رفتار نرم شدگی کرنشی از رابطه‌ی ارائه شده توسط Cornelissen و همکاران استفاده شده است [۱۶].

۳

### ۳- مدل سازی المان محدودی

جهت تحلیل تیرهای بتن آرمه در این تحقیق، از برنامه المان محدود غیر خطی Abaqus استفاده شده است. برای شبیه سازی مصالح بتنی از مدل خمیری-آسیب استفاده شده است. این مدل بر پایه‌ی مدل ارائه شده توسط Lubliner و اصلاح شده به وسیله‌ی Lee و Fenves قرار دارد [۱۴ و ۱۵]. در این مقاله متغیر آسیب را به صورت زیر می‌باشد:

$$d_t = 1 - \frac{f_t}{f_t'} \quad ۱$$

$$d_c = 1 - \frac{f_c}{f_c'} \quad ۲$$

بنابراین تا رسیدن به تنش حداکثر آسیب دیدگی صفر است.

این فرمول رابطه‌ی بین تغییر مکان بازشدگی ترک  $w$  و تنش کششی  $\sigma$  را ارائه می‌دهد. سایر پارامترها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$C_1 = 10, C_2 = 6.93, W_c = 5.14 G_f / f_t$$

که  $f_t$  مقاومت کششی بتن و  $G_f$  مقدار انرژی لازم برای شکل‌گیری واحد سطح ترک است که به عنوان مشخصات مصالح در نظر گرفته می‌شود.

مقدار انرژی شکست  $G_f$  برای بتن معمولی و سبک توسط Walraven به صورت زیر ارائه شده است [۱۷].

$$G_f = 24 + 16 f_{ct} \quad ۴ \text{ برای بتن سبک}$$

$$G_f = 24 + 26 f_{ct} \quad ۵ \text{ برای بتن معمولی}$$

### ۱-۳ مشخصات بتن

#### ۱-۱-۳ رفتار تک محوری بتن در کشش

#### الف) مدل نرم‌شدگی کششی برای بتن غیر مسلح

بتن یک مصالح ناهمگن متشکل از سنگ‌دانه‌ها و چسب سیمان است که به صورت ذاتی در کشش ضعیف است. وقتی بتن غیرمسلح ترک می‌خورد، می‌تواند تا وقتی بازشدگی ترک

روابط مختلفی در زمینه تعیین ارتفاع ناحیه‌ی تحت تأثیر آرماتور ارائه شده است که در این تحقیق از مطالعات انجام شده توسط Vecchio که ارتفاع این ناحیه را به میزان  $(d_0) \sqrt{5}$  قطر آرماتور) در نظر می‌گیرد، استفاده شده است [۱۸].

### ۳-۱-۲ رفتار تک محوری بتن در فشار

آنالیز منطقی و طراحی سازه‌های بتن مسلح بر پایه تعیین روابط تنش- کرنش بتن استوار است. محققان زیادی روابط منحنی تنش- کرنش را به صورت تجربی ارائه کرده‌اند. در این تحقیق از مدل ارائه شده توسط تسیمی [۱۹]، استفاده شده است که رابطه زیر را برای منحنی تنش کرنش ارائه می‌دهد:

$$n^{pq} = \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{E_c V_0}} ; \quad p=3; q=1 \quad 7$$

$$f_c = f'_c \left\{ \frac{n^{pq} \left( \frac{V_c}{V_0} \right)}{n^{pq} - 1 + \left( \frac{V_c}{V_0} \right)^{n^{pq}}} \right\} \quad 8$$

شاخهٔ نزولی:

$$q = \log_n \left( \frac{1}{1 - \frac{f'_c}{E_c V_0}} \right) / p ; \quad p=3 \quad 9$$

$$f_c = f'_c \left\{ \frac{n^{pq} \left( \frac{V_c}{V_0} \right)}{n^{pq} - 1 + \left( \frac{V_c}{V_0} \right)^{n^{pq}}} \right\} \quad 10$$

تسیمی در تعریف رابطه تنش - کرنش که برای بتن معمولی، بتن پرمقاومت و بتن سبک کاربرد دارد از سه متغیر  $n$ ،  $p$  و  $q$  استفاده کرده است. برای شاخه‌ی صعودی با فرض مقادیر ۱ و ۳ برای  $p$  و  $q$  مقدار  $n$  به دست می‌آید و در شاخه‌ی نزولی با فرض ثابت ماندن  $n$  و  $p$  در شاخه‌ی صعودی و نزولی مقدار  $q$  به دست می‌آید.

که در این روابط  $G_f$  بر حسب  $N/m$  و مقاومت کششی ترک خوردگی  $f_{ct}$  بر حسب  $MPa$  می‌باشد. قابل ذکر است که شیب منحنی نرم شدگی در بتن سبک تندتر از بتن معمولی می‌باشد.

### ب) مدل سخت‌شدگی کششی بتن در المان‌های بتن مسلح

بتن در اعضا بتن مسلح می‌تواند بخشی از کشش وارده را حتی پس از ترک خوردگی تحمل کند که این پدیده به نام سخت‌شدگی کششی شناخته می‌شود. به سبب اتصال موجود در سطح تماس بتن و آرماتور، بعد از ترک خوردگی، بتن بین ترک‌ها می‌تواند تنش‌های کششی محلی را انتقال دهد.

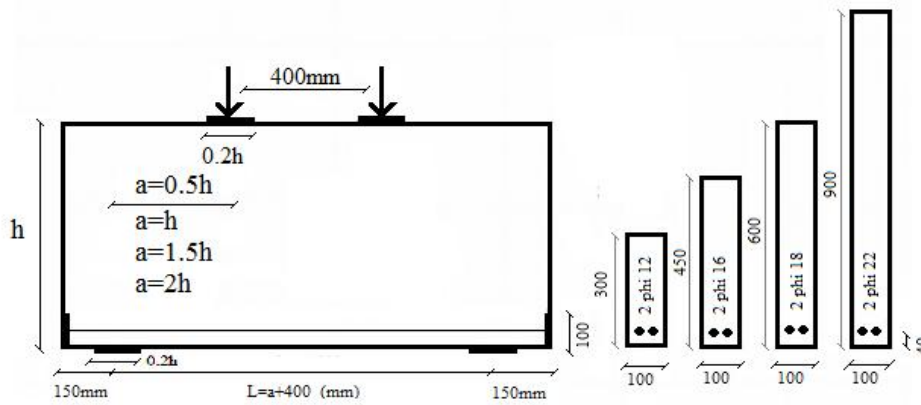
برای معرفی رفتار سخت‌شدگی کششی Collins و Vecchio در سال ۱۹۸۶، Belarbi و HSU در سال ۱۹۹۴ و Collins و MitvHELL در سال ۱۹۹۱ روابطی را ارائه نمودند که در این تحقیق از مدل HSU و Belarbi، که تطابق بهتری بین مدل عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب شده ارائه می‌دهد، استفاده گردید. این مدل رابطه‌ی ۶ را برای مدلسازی این پدیده ارائه داده است [۱۸]:

$$f_1 = \frac{f_t}{(12500v_1)^{0.4}} \quad (MPa) \quad 6$$

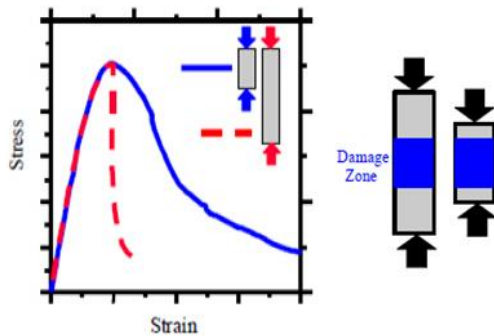
برای تیرهای عمیق با توجه به ارتفاع زیاد مقطع و جاگذاری آرماتورهای کششی در وجه تحتانی مقطع با استفاده از مفهوم منطقه بندی تیر که توسط An و همکاران ارائه شده است، تیر را به دو قسمت بتن خالص<sup>۱</sup> و بتن مسلح<sup>۲</sup> تقسیم می‌کنیم.

در قسمت بتن صفحه‌ای که آرماتور وجود ندارد گسیختگی المان با موضعی شدن یک ترک صورت می‌پذیرد و ما رفتار نرم شدگی کششی بتن<sup>۳</sup> را که رفتار تردی می‌باشد خواهیم داشت. اما در نواحی‌ای که میلگرد وجود دارد تنش‌های چسبندگی بین میلگرد و بتن باعث می‌شود تا سازوکار انتقال تنشها عوض شده و به جای یک ترک شاهد چندین ریز ترک در نمونه باشیم؛ این رفتار با نام سخت‌شدگی کششی<sup>۴</sup> شناخته می‌شود.

Plain Concrete  
RC Zone  
Tension Softening  
Tension Stiffening



شکل ۲- هندسه تیرهای مدل شده



شکل ۳- منحنی تنش - کرنش با توجه به اثر اندازه

اما نکته قابل توجه در معرفی رفتار تنش - کرنش مصالح با منظور نمودن تأثیر اندازه توجه به این مطلب می‌باشد که با افزایش ارتفاع مقطع، ارتفاع قسمت آسیب دیده‌ی نمونه دچار تغییر نمی‌شود و نسبت ارتفاع قسمت آسیب دیده به ارتفاع مقطع با افزایش مقطع دچار کاهش می‌شود (شکل ۳). این اثر موجب می‌شود تا تغییراتی را در رفتار قسمت نزولی منحنی با افزایش ارتفاع داشته باشیم. به عبارتی منحنی تنش-کرنش که به عنوان مشخصه‌ی بتن و برای تبیین رفتار بتن استفاده می‌شود، به اندازه‌ی عضو نیز بستگی دارد [۲۰]

### ۲-۳ فولاد مسلح کننده‌ی بتن

آرماتورها با مدل دو خطی ارتجاعی-خمیری کامل مدل می‌شوند.

برای معرفی این رفتار از مدل ارائه شده توسط Gamino, Borges و Bittencour استفاده می‌شود. رابطه‌ی

ارائه شده به این صورت می‌باشد [۲۱]

$$v = v_0 - \frac{f'_c - \tau}{E} + \frac{v_D L_D}{L} \quad (11)$$

$$v_D = 0.0129 e^{-0.012 f'_c} \quad (12)$$

### ۳-۳ مشخصات المان‌ها در مدل اجزای محدود

برای بتن از المان‌های مکعبی هشت گره‌ای C3D8R استفاده گردید.

برای مدل‌سازی آرماتورها از المان‌های تیری B31 استفاده شد. که المان‌های سه بعدی بوده و برای تیر نازک (رفتار خمشی) مناسب می‌باشند.

با استفاده از مدفون کردن<sup>۱</sup> آرماتورها درون بتن از لغزش بین آرماتور و بتن صرف نظر گردید.

که  $\epsilon_0$  کرنش در اوج تنش بوده و  $L$  طول نمونه و  $L_D$  طول خسارت دیده‌ی نمونه می‌باشد. در مورد طول خسارت دیده، مطابق پیشنهاد Shah این مقدار برابر ۲ تا ۳ برابر عرض نمونه (در اینجا پایه‌های فشاری) در نظر گرفته می‌شود؛ که با انجام تحلیل روی مدل‌ها برای بتن معمولی این پارامتر ۳ برابر عرض پایه‌ها و برای بتن سبک با توجه به رفتار تردتر بتن سبک ۲ برابر عرض پایه‌ها لحاظ گردید. برای محاسبه‌ی عرض پایه‌های فشاری نیز از رابطه‌ی ارائه شده در ACI318-08 استفاده می‌شود. Kosa نشان داد که هندسه‌ی پایه روی اثر اندازه مؤثر است [۲۲].

<sup>1</sup> Embedment

#### ۴- صحت سنجی

می شود نتایج حاصل از روش المان محدود تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

در شکل ۶ نحوه شکست آزمایشگاهی تیرهای N-45-0.5 و L-45-0.5 و همچنین معیار آسیب حاصل از تحلیل المان محدودی تیرها نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود نحوه شکست تیرها با معیار آسیب حاصل از تحلیل تطابق خوبی با هم دارند.

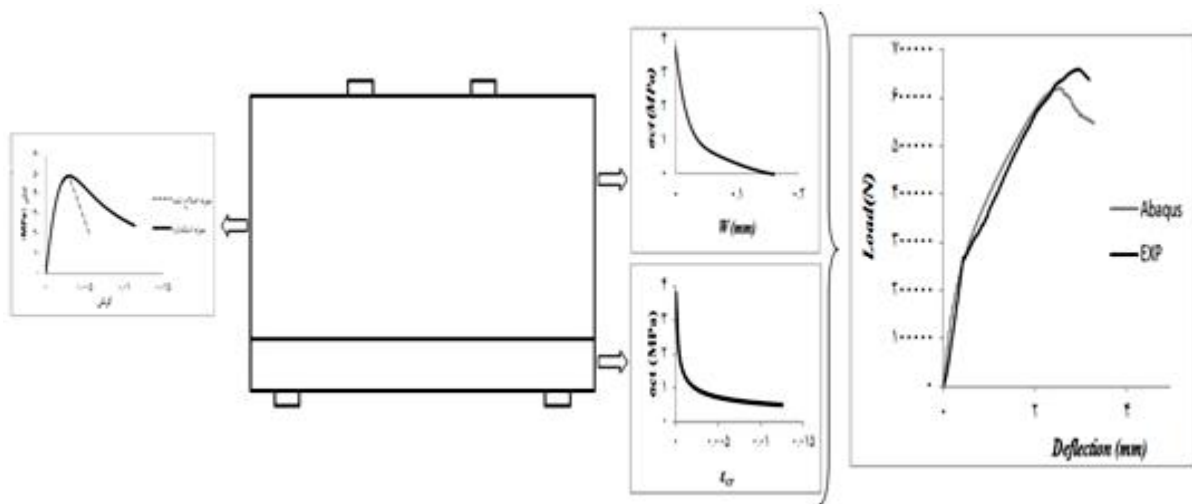
همان طوری که از جدول ۳ پیداست، نتایج تحلیل نرم افزار Abaqus ضمن محافظه کارانه بودن سازگاری بسیار خوبی با نتایج واقعی دارد. ولی نمی تواند به عنوان روش طراحی کاربردی مورد استفاده قرار بگیرد زیرا در مسائل مهندسی روابط طراحی علاوه بر داشتن دقت لازم، بایستی دارای شکل ساده و قابل استفاده برای عموم کاربران نیز باشند که روش اجزای محدود غیرخطی به دلیل وابسته بودن به پارامترهای پیچیده قادر به احراز شرط اخیر نیست.

برای صحت سنجی مدل از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی که توسط عربزاده و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ صورت گرفت استفاده شد. تیرهای آزمایش شده شامل دو سری تیر عمیق با ارتفاع های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی متر با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ بودند که در ساخت سری اول از بتن سبک و در ساخت سری دوم از بتن معمولی استفاده شده است. برای این منظور تمام تیرهای آزمایش شده، مدل شده و نتایج مربوط به مقاومت برشی روش اجزای محدود با نتایج مقاومت برشی آزمایشگاهی مقایسه و در جدول ۳ آورده شده است.

جزئیات مربوط به مدل سازی تیر N-45-0.5 در جدول ۱ آورده شده است. نمودار مربوط به پارامترهای به کار برده شده در مدل سازی و همچنین نمودار بار - تغییر مکان مرکز تیر حاصل از آزمایش و مدل سازی در شکل ۴ آورده شده است. جزئیات مربوط به مدل سازی تیر L-45-0.5 و نمودارهای مربوط به آن نیز در جدول ۲ و شکل ۵ آورده شده است. همان طور که مشاهده

جدول ۱- جزئیات مربوط به مدل سازی تیر N-45-0.5

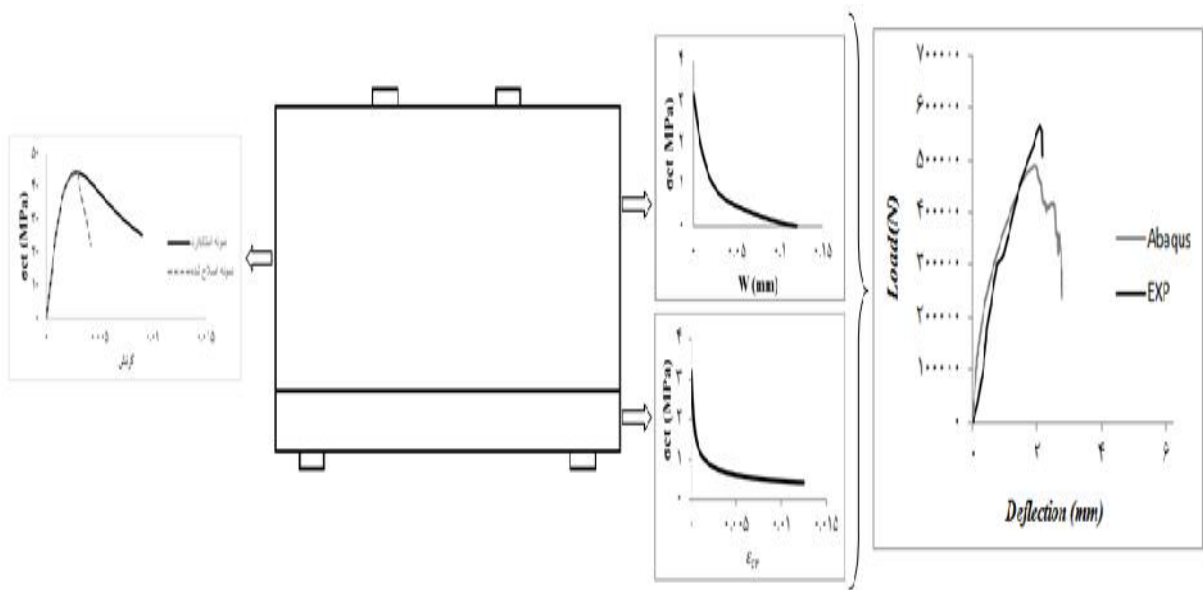
نام نمونه	عمق تیر mm	عرض صفحات بارگذاری mm	آرماتور طولی	$f'_c$ MPa	$f_y$ MPa	$f_t$ MPa	$G_f$ N/mm	$E_c$ MPa
N-45-0.5	۴۵۰	۹۰	۲ Φ ۱۶	۴۹/۳	۵۸۵	۳/۸	۰/۱۲	۳۳۰۰۰



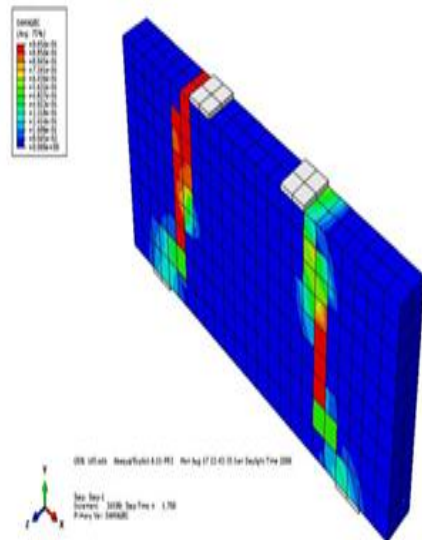
شکل ۴- پارامترهای به کار برده در مدل سازی و منحنی بار تغییر مکان آزمایشگاهی و تحلیلی تیر N-45-0.5

جدول ۲- جزئیات مربوط به مدل سازی تیر L-45-0.5

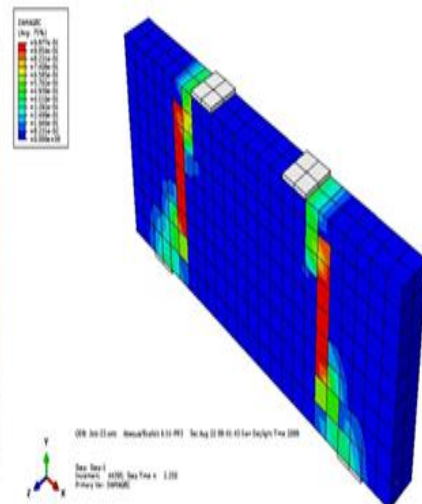
نام نمونه	عمق تیر mm	عرض صفحات بارگذاری mm	آرماتور طولی	$f'_c$ MPa	$f_y$ MPa	$f_t$ MPa	$G_f$ N/mm	$E_c$ MPa
N-45-0.5	۴۵۰	۹۰	۲ Φ ۱۶	۴۴/۴	۵۸۵	۳/۲	۰/۰۷۵	۲۴۰۰۰



شکل ۵- پارامترهای به کار برده در مدل سازی و منحنی بار تغییر مکان آزمایشگاهی و تحلیلی تیر L-45-0.5



الف



ب

شکل ۶- شکست برشی حاصل از آزمایش و تحلیل الف) نمونه (N-45-0.5) ب) نمونه (L-45-0.5)

جدول ۳- مقایسه مقاومت برشی حاصل از تحلیل با نتایج آزمایشگاهی

نمونه	مقاومت برشی روش اجزای محدود $V_{fem}$ (kN)	مقاومت برشی آزمایشگاهی $V_{exp}$ (kN)	$\frac{V_{fem}}{V_{exp}}$
N-30-0.5	۵۴۱/۵	۶۰۷	۰/۸۹۲
N-45-0.5	۶۱۲/۵	۶۶۱	۰/۹۴
N-60-0.5	۷۰۹	۷۶۱	۰/۹۳
N-90-0.5	۹۴۱/۹	۸۳۴	۱/۱۲
L-30-0.5	۴۲۵/۵	۴۸۱	۰/۸۸
L-45-0.5	۴۹۰/۲	۵۶۷	۰/۸۶
L-60-0.5	۶۸۰	۶۴۸	۱/۰۵
L-90-0.5	۸۰۴/۲	۷۵۸	۱/۰۶
میانگین			۰/۹۷
انحراف از معیار			۰/۰۹۷

## ۵- نتایج

•  $Y$  بیانگر نسبت دهانه برشی به ارتفاع کلی مقطع می باشد. مقاومت برشی نهایی تیرها، مقاومت برشی نرمالیزه شده و همچنین نسبت مقاومت پیش‌بینی شده توسط روش‌های خریایی به مقاومت به دست آمده حاصل از تحلیل المان محدودی تیرها در جداول ۴، ۵، ۶ و ۷ آورده شده است.

## ۵-۱ بررسی پارامترهای مؤثر در مقاومت برشی

نیروی برشی نرمالیزه شده مقاومت نهایی  $\lambda = \frac{V_{fem}}{b_w h f'_c}$  برای تیرها با ارتفاع‌های مختلف و نسبت دهانه برشی به ارتفاع مختلف در جداول ۴ تا ۷ و اشکال ۷ و ۸ آورده شده است. با افزایش ارتفاع مقاومت برشی تیرها افزایش می‌یابد ولی برای مقایسه تیرها با هم یک پارامتر بی‌بعد تعریف می‌کنیم و مقاومت برشی نسبت به ارتفاع و عرض تیر و مقاومت بتن بی‌بعد می‌کنیم. نیروی برشی نرمالیزه شده برای بتن سبک پایین‌تر از بتن معمولی قرار دارد که نشان‌دهنده مقاومت برشی کم بتن سبک نسبت به بتن معمولی می‌باشد.

وقتی که ارتفاع تیر افزایش می‌یابد نیروی برشی نرمالیزه شده تیر کاهش می‌یابد؛ به طور مثال در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ وقتی ارتفاع تیر از ۳۰۰ mm به ۹۰۰ mm افزایش می‌یابد نیروی برشی نرمالیزه شده به اندازه ۳۶ درصد در بتن معمولی و ۴۰ درصد در بتن سبک کاهش می‌یابد.

بعد از صحت‌سنجی مدل با نتایج آزمایشگاهی و اطمینان از جواب‌های مدل ساخته شده و بررسی پارامترهایی مانند ارتفاع، نوع بتن و نسبت دهانه برشی به ارتفاع در مقاومت برشی تیرها می‌پردازیم. برای این منظور ۳۲ تیر شامل ۱۶ تیر عمیق با بتن معمولی و ۱۶ تیر عمیق با بتن سبک با ارتفاع‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر و نسبت‌های دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ را مدل کرده و مقاومت برشی نهایی تیرها را به دست می‌آوریم.

هندسه تیرهای مدل شده در شکل ۲ آورده شده است. مقدار آرماتور طولی در تمامی نمونه‌ها برابر ۱٪ در نظر گرفته شد در تیرهای ۳۰ cm از ۱۲  $\Phi$ ، تیرهای ۴۵ cm از ۱۶  $\Phi$ ، تیرهای ۶۰ cm از ۱۸  $\Phi$  و تیرهای ۹۰ cm از ۲۲  $\Phi$  با تنش تسلیم ۵۸۰ MPa استفاده شد. مقاومت فشاری بتن برای هر دو نوع بتن سبک و معمولی برابر ۴۵ MPa و مقاومت کششی برای بتن سبک ۳/۲ MPa و برای بتن معمولی ۳/۷ MPa در نظر گرفته شد. بارگذاری به صورت دو نقطه‌ای بود که در تمامی نمونه‌ها فاصله بین نقاط بارگذاری ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد.

برای نامگذاری نمونه‌ها از فرمت W-X-Y استفاده شد

• W بیانگر نوع بتن است که برای بتن سبک (L) و برای بتن معمولی (N) می‌باشد.

• X بیانگر ارتفاع نمونه بوده که برابر ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر می‌باشد.



جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل با نرم افزار Abaqus و آیین نامه ها برای تیرها با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵

نام نمونه	مقاومت برشی (kN) $V_{fem}$	مقاومت برشی نرمالیزه شده $y = \frac{V_{fem}}{b_w h f'_c}$	$x = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{fem}}$			
			ACI 318-11	EC2	CSA	Tan
N-30-0.5	۵۴۱/۵	۰/۳۶۶	۰/۷۷۶	۰/۷۳۲	۰/۹۳۳	۰/۶۱۴
N-45-0.5	۶۱۲/۵	۰/۲۸	۰/۸۷۴	۰/۸۲۴	۱/۰۲	۰/۸۱
N-60-0.5	۷۰۹	۰/۲۴۷	۰/۹۰۸	۰/۸۶۳	۱/۱۲	۰/۸۷۷
N-90-0.5	۹۴۱/۹	۰/۲۳۱	۰/۸۸۴	۰/۸۵۲	۱/۰۵	۰/۹۱۲
L-30-0.5	۴۲۵/۵	۰/۳۲	۰/۷۵۶	۰/۷۷۹	۰/۹	۰/۷۳۳
L-45-0.5	۴۹۰/۲	۰/۲۴۶	۰/۸۴۸	۰/۸۷۳	۰/۹۹	۰/۹۴۸
L-60-0.5	۶۸۰	۰/۲۴۲	۰/۷۸۸	۰/۸۰۲	۰/۹۷	۰/۸۳۷
L-90-0.5	۸۰۴/۲	۰/۱۹۳	۰/۹۰۴	۰/۹۲۱	۱/۰۷	۰/۹۶۹
میانگین (بتن معمولی)			۰/۸۶	۰/۸۱۸	۱/۰۳۴	۰/۸۰۳
انحراف از معیار (بتن معمولی)			۰/۰۵۷	۰/۰۵۹	۰/۰۷۸	۰/۱۳۳
میانگین (بتن سبک)			۰/۸۲	۰/۸۴۴	۰/۹۸	۰/۸۷۲
انحراف از معیار (بتن سبک)			۰/۰۶۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۸	۰/۱۰۹

جدول ۶- نتایج حاصل از تحلیل با نرم افزار Abaqus و آیین نامه ها برای تیرها با نسبت دهانه

برشی به ارتفاع ۱/۵

نام نمونه	مقاومت برشی (kN) $V_{fem}$	مقاومت برشی نرمالیزه شده $y = \frac{V_{fem}}{b_w h f'_c}$	$x = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{fem}}$			
			ACI 318-11	EC2	CSA	Tan
N-30-1.5	۲۳۳/۶	۰/۱۷۳۱	۰/۹۳	۰/۸۸۹	۰/۳۸۱	۰/۸۰۹
N-45-1.5	۳۱۱	۰/۱۵۳۶	۰/۸۹	۰/۸۵۳	۰/۳۹۴	۰/۸۳۳
N-60-1.5	۳۵۸/۸	۰/۱۴۲۹	۰/۸۴۹	۰/۸۱۶	۰/۴۲۳	۰/۸۰۵
N-90-1.5	۵۵۶/۸	۰/۱۳۷۵	۰/۷۶۲	۰/۷۳۲	۰/۴۶	۰/۷۳۵
L-30-1.5	۲۱۶	۰/۱۶	۰/۸۵۵	۰/۸۷۱	۰/۳۵	۰/۸۰۶
L-45-1.5	۲۳۷/۵	۰/۱۱۷۳	۰/۹۹	۱/۰۱۲	۰/۴۴	۰/۹۹۴
L-60-1.5	۳۰۶/۳	۰/۱۱۳۴	۰/۹۱	۰/۹۳۱	۰/۴۶۴	۰/۹۱۸
L-90-1.5	۳۸۴/۵	۰/۰۹۴۹	۰/۹۳۸	۰/۹۶۱	۰/۴۸	۰/۹۵۶
میانگین (بتن معمولی)			۰/۸۵۸	۰/۸۲۲	۰/۴۱۵	۰/۷۹۵
انحراف از معیار (بتن معمولی)			۰/۰۷۱۷	۰/۰۶۷	۰/۰۳۵	۰/۰۴۲۱
میانگین (بتن سبک)			۰/۹۲۳	۰/۹۴۴	۰/۴۶۵	۰/۹۱۸
انحراف از معیار (بتن سبک)			۰/۰۵۶	۰/۰۵۹	۰/۱۰۷	۰/۰۸۱۲

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل با نرم افزار Abaqus و آیین نامه ها برای تیرها با نسبت دهانه

برشی به ارتفاع ۱

نام نمونه	مقاومت برشی $V_{fem}$ (kN)	مقاومت برشی نرمالیزه شده $y = \frac{V_{fem}}{b_w h f'_c}$	$x = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{fem}}$			
			ACI 318- 11	EC2	CSA	Tan
N-30-1	۳۲۷	۰/۲۴۲	۰/۹۰۲	۰/۸۶۵	۰/۶۲۸	۰/۶۹۸
N-45-1	۳۹۹/۲	۰/۱۹۷	۰/۹۴۸	۰/۹۱	۰/۶۸۸	۰/۸۳۴
N-60-1	۴۶۳/۵	۰/۱۷۱۷	۰/۹۷۹	۰/۹۴	۰/۷۷۸	۰/۸۷۹
N-90-1	۶۳۴/۷	۰/۱۵۶۷	۰/۹۴۷	۰/۹۱۲	۰/۸۸۴	۰/۸۷۴
L-30-1	۲۴۰/۷	۰/۱۷۸۴	۱/۰۴	۱/۰۶۴	۰/۷۲۵	۰/۸۸۹
L-45-1	۲۹۷/۱	۰/۱۴۶۸	۱/۰۸	۱/۱۰۸	۰/۷۸۵	۱/۰۳۵
L-60-1	۳۴۶/۱	۰/۱۲۸۲	۱/۱۱	۱/۱۴۲	۰/۹۰۶	۱/۰۸
L-90-1	۴۹۱/۹	۰/۱۲۱۵	۱/۰۳۹	۱/۰۶	۱/۰۳	۱/۰۲۶
میانگین (بتن معمولی)			۰/۹۴۴	۰/۹۰۷	۰/۷۴۴	۰/۸۲۱
انحراف از معیار (بتن معمولی)			۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۱	۰/۱۱۱	۰/۰۸۴
میانگین (بتن سبک)			۱/۰۶۹	۱/۰۹	۰/۸۶	۱/۰۰۷
انحراف از معیار (بتن سبک)			۰/۰۳۶	۰/۰۳۷۴	۰/۱۳	۰/۰۸۲۶

جدول ۷- نتایج حاصل از تحلیل با نرم افزار Abaqus و آیین نامه ها برای تیرها با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۲

نام نمونه	مقاومت برشی $V_{fem}$ (kN)	مقاومت برشی نرمالیزه شده $y = \frac{V_{fem}}{b_w h f'_c}$	$x = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{fem}}$			
			ACI 318-11	EC2	CSA	Tan
N-30-2	۲۱۳/۱	۰/۱۵۷۹	۰/۷۸۳	۰/۷۴۸	۰/۲۰۳	۰/۷۶۶
N-45-2	۲۷۰/۳	۰/۱۳۳۵	۰/۷۸	۰/۷۴۸	۰/۲۴۴	۰/۷۹۲
N-60-2	۳۲۸/۳	۰/۱۲۱۶	۰/۷۵۲	۰/۷۲۲	۰/۲۴۶	۰/۷۶۵
N-90-2	۴۲۹/۲	۰/۱۰۶	۰/۷۳	۰/۷۰۲	۰/۲۹۵	۰/۷۴۷
L-30-2	۱۸۱/۱	۰/۱۳۴۲	۰/۷۸۴	۰/۷۹۷	۰/۲۰۳	۰/۸۱۶
L-45-2	۲۱۵/۲	۰/۱۰۶۳	۰/۸۳۳	۰/۸۵۰	۰/۲۴	۰/۸۹۳
L-60-2	۲۴۷/۳	۰/۰۹۱۶	۰/۸۴۹	۰/۸۶۸	۰/۲۸۵	۰/۹۰۷
L-90-2	۳۲۲/۱	۰/۰۸۲	۰/۸۰۲	۰/۸۲۲	۰/۳۵	۰/۸۵۷
میانگین (بتن معمولی)			۰/۷۶۱	۰/۷۳	۰/۲۴۲	۰/۷۶۸
انحراف از معیار (بتن معمولی)			۰/۰۲۵۲	۰/۰۲۲	۰/۰۳۹	۰/۰۱۸
میانگین (بتن سبک)			۰/۸۱۷	۰/۸۳۵	۰/۲۷	۰/۸۶۸
انحراف از معیار (بتن سبک)			۰/۰۲۹۴	۰/۰۳۱	۰/۰۶۳	۰/۰۴۰۸

نتایج روش‌های ACI، EC2 و Tan شبیه به هم می‌باشند؛ در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۱ و برای بتن سبک جواب‌ها غیر محافظه‌کارانه می‌باشند و با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع حاشیه ایمنی افزایش پیدا می‌کند. در روش آیین‌نامه CSA در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ و در بتن معمولی جواب‌ها غیر محافظه‌کارانه می‌باشد؛ با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع جواب‌ها خیلی محافظه‌کارانه بوده و حاشیه ایمنی به شدت افزایش می‌یابد به بیان دیگر با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقاومت برشی پیش‌بینی شده توسط روش CSA خیلی بیشتر از مقاومت به‌دست آمده حاصل از تحلیل می‌باشد.

## ۶ - نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی پارامترهای مؤثر در مقاومت برشی تیرهای عمیق بتنی به شرح ذیل می‌باشند:

۱. مقاومت برشی تیرهای عمیق با بتن سبک کمتر از تیرهای عمیق با بتن معمولی می‌باشند.
۲. با افزایش ارتفاع، مقاومت برشی افزایش می‌یابد ولی مقاومت برشی نرمالیزه شده کاهش می‌یابد که این کاهش در هر دو نوع بتن دیده می‌شود. به طور مثال در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ وقتی که ارتفاع تیر از ۳۰cm به ۹۰cm افزایش می‌یابد مقاومت برشی نرمالیزه شده برای هر دو گروه از تیرها تقریباً به اندازه ۴۰٪ کاهش می‌یابد.
۳. با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقاومت برشی در تیرهای عمیق با بتن سبک و بتن معمولی کاسته می‌شود. کاهش مقاومت برشی نرمالیزه شده در تمامی نسبت‌های دهانه برشی به ارتفاع و در هر دو نوع بتن سبک و معمولی ملاحظه می‌شود و با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع از شدت کاهش مقاومت برشی نرمالیزه شده در اثر افزایش ارتفاع کاسته می‌شود.
۴. نتایج تمام آیین‌نامه‌ها و روش‌های بررسی شده برای تیرها با ارتفاع کم و برای هر دو گروه از تیرها محافظه‌کارانه بوده و با افزایش ارتفاع از حاشیه امنیت کاسته می‌شود.
۵. نتایج آیین‌نامه‌های ACI، EC2 و روش Tan برای تیرهای عمیق با بتن سبک و در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۱ غیر محافظه‌کارانه می‌باشد.

با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقاومت برشی در هر دو گروه از تیرهای عمیق با بتن سبک و بتن معمولی کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت برشی نرمالیزه شده با افزایش ارتفاع تیر، در تمام نسبت‌های دهانه برشی به ارتفاع و در هر دو نوع بتن دیده می‌شود؛ ولی میزان این با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع، کاهش می‌یابد؛ به طور مثال در تیرها عمیق با بتن معمولی و در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ وقتی ارتفاع تیر از ۳۰۰ mm به ۹۰۰ mm افزایش می‌یابد مقاومت برشی نرمالیزه شده به اندازه ۳۶ درصد کاهش می‌یابد، که این کاهش در نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۲ برابر ۳۲ درصد می‌باشد.

## ۵-۲ مقایسه مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با نتایج آیین‌نامه‌ها

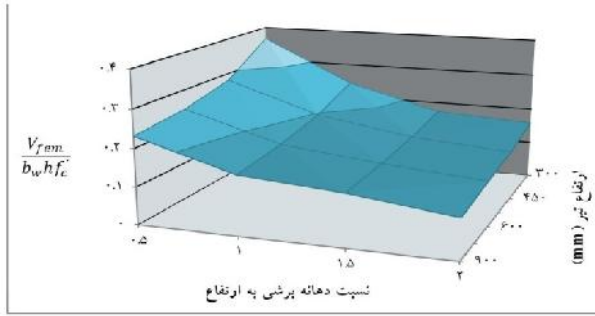
نتایج حاصل از تحلیل المان محدودی تیرها با روابط مدل خرابایی ارائه شده در آیین‌نامه ACI، آیین‌نامه CSA، آیین‌نامه EC2، و روش Tan مقایسه شد.

توزیع نسبت مقاومت برشی بدست آمده حاصل از تحلیل المان محدودی به مقاومت پیش‌بینی شده  $(\chi = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{fem}})$  برای همه تیرهای عمیق و برای تمامی روش‌ها در جداول ۴ تا ۷ آورده شده است. میانگین و انحراف از معیار نیز در جداول مذکور ذکر شده است.

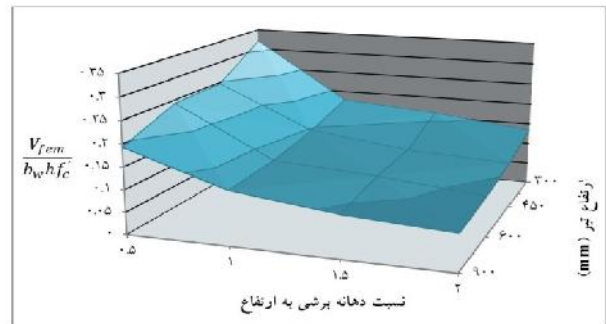
در روش آیین‌نامه CSA بعد از محاسبه مشخص شد که آرماتورهای طولی تسلیم می‌شوند به همین دلیل در محاسبه کرنش کششی  $(v_s)$  از کرنش نقطه تسلیم فولادها استفاده شد  $(v_s = v_y)$ . روش Tan برای بتن‌های معمولی ارائه شده‌اند که برای استفاده در مورد بتن سبک طبق آیین‌نامه‌ها ضریب  $\lambda = 0.85$  در مقاومت فشاری نمونه‌ها  $(f'_c)$  اعمال شد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند نسبت مقاومت پیش‌بینی شده به مقاومت به‌دست آمده حاصل از تحلیل در تمام روش‌ها برای بتن سبک و بتن معمولی تقریباً یکسان و نزدیک به هم می‌باشند. تمام روش‌ها برای ارتفاع‌های کوچکتر محافظه‌کارانه بوده و دارای حاشیه امنیت مناسبی هستند که این حاشیه امنیت با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد.

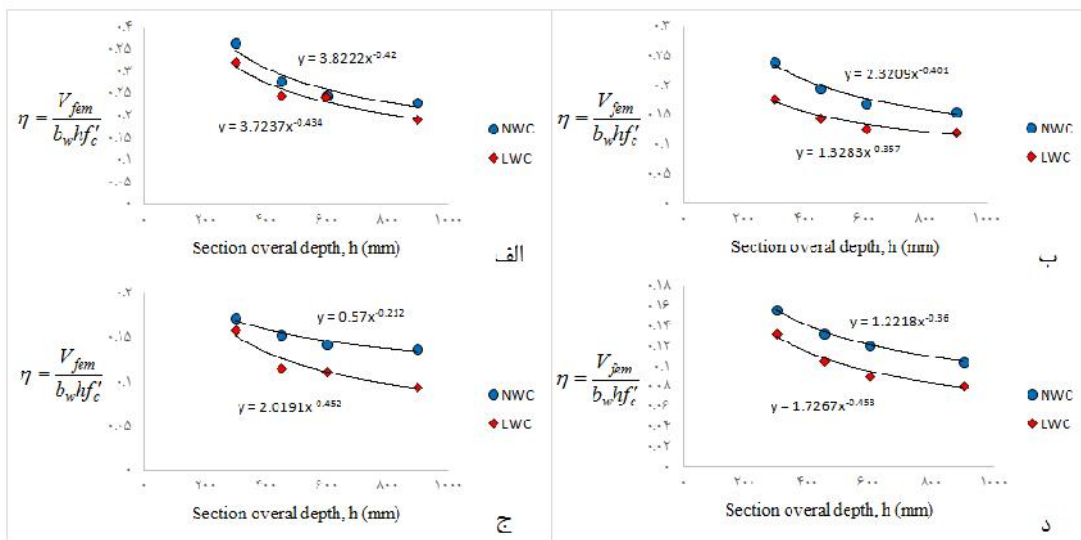
۶. در آیین نامه CSA با افزایش نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقاومت برشی پیش‌بینی شده خیلی بیشتر از مقاومت به دست آمده حاصل از تحلیل می‌باشد.



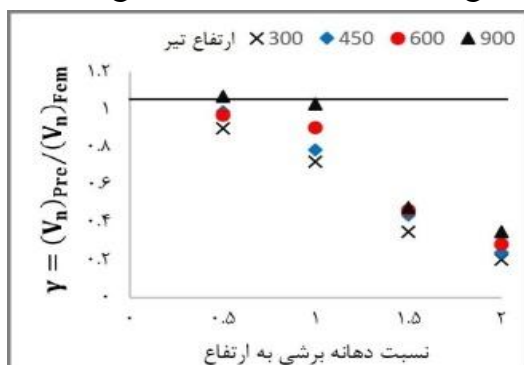
شکل ۸- اثر اندازه در نسبت دهانه برشی به ارتفاع مختلف برای بتن معمولی



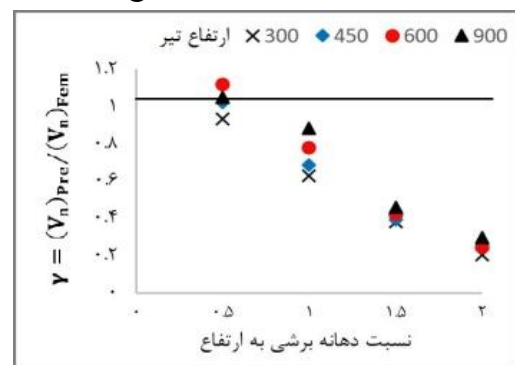
شکل ۷- اثر اندازه در نسبت دهانه برشی به ارتفاع مختلف برای بتن سبک



شکل ۹- نیروی برشی نرمالیزه شده به دست آمده از تحلیل مقاومت نهایی در برابر ارتفاع الف) نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ (ب) نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۱ الف) نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۱/۵ (ج) نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۲



ب



الف

شکل ۱۰- نسبت مقاومت برشی پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه CSA به مقاومت حاصل از تحلیل  $(x = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{fem}})$  برای تیرهای عمیق

الف) با بتن سبک ب) با بتن معمولی برای نسبت دهانه برشی به ارتفاع‌های مختلف

## ۸- مراجع

مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

تربیت مدرس، ۱۳۹۲.

[14]. J.Lublinter. A Plastic-Damage Model for Concrete. Int.J.Solid Structures, Vol. 25, No. 3, pp. 299-326, 1989.

[15]. Lee, B.J and Fenves .G .L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 124, No. 8, 1988.

[16]. Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D.A. and Reinhardt, H.W, 1986. Experiments and theory for the application of fracture mechanics to normal and lightweight concrete, in "Fracture toughness and fracture energy", Elsevier's Publishers 1986.

[17]. Walraven et al. "Structural lightweight concrete: recent research", Delft University of Technology

[18]. Okamura H., Maekawa K.. Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete. Tokyo, Japan: Gihodo-Shuppan, 1991.

[19]. A.A. Tasnimi. Mathematical model for complete stress-strain curve prediction of normal, light-weight and high-strength concretes. Magazine of Concrete Research, Vol. 56, No.1. , 2004.

[20]. Reda M.M. & Shrive N.G.. Fracture Mechanics of Concrete. Fracture of Civil Engineering Materials ENCI617, Fracture of Concrete -Lecture Notes., 2001

[21]. A.L. Gamino, J.U.A. Borges & T.N. Bittencourt, "Size Effect of Concrete Under Uniaxial and Flexural Compression".

[22]. Kenji Kosa, Satoshi Uchida, Tsutomu Nishioka, Hiroshi Kobayashi, "Size Effect on the Shear Strength of RC Deep Beams."

[1]. Subedi, N.K., Vardy, A.E. and khota, N, "Reinforced concrete deep beams- some test results". Magazine of concrete Research, vol. 38, No.137 , December pp.206-219, (1986).

[2]. EN 1992-1-1.2004, 2004. Design of Concrete Structures. British Standards Institution, London, UK.

[3]. ACI 318-11,. Bulding Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Michigan, 2011.

[4]. CSA A23.3-94, Design of concrete structures. Canadian Stanadards Association, Toronto, Canada, 1994.

[۵]. شمس، بهروز. «مقاومت نهایی و رفتار تیرهای عمیق با بتن سبک تحت تأثیر بارگذاری متمرکز از بالا». پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست تربیت مدرس، ۱۳۸۰.

[6]. Keun-Hyeok Yang,. Tests on Lightweight Concrete Deep Beams. ACI Structural Journal, Vol. 107, No. 6, pp. 663-670, 2010.

[7]. Taylor. HPJ,. Investigation of forces carried across cracks in reinforced concrete beams in shear by interlock of aggregate. Cement and Concrete Association, TRA 42.447, p.22, 1970.

[8]. Keun-Hyeok Yang, Ashraf F. Ashour. Aggregate interlock in lightweight concrete countinuous deep beams. Journal of Engineering Structures, doi:10.1016/j.engstruct.2010.09.026 , 2010.

[9]. Qiang Yu, Bazant Z.P. Hon M. ASCE., Can Stirrups Suppress Size Effect on Shear Strength of RC Beams? Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 5, pp. 607-617, 2011.

[10]. Tan K.H. and Cheng G.H. Size Effect on Shear Strength of Deep Beams: Investigation with Strut and Tie Model, Journal of Structural Engineering © ASCE, Vol. 135, No. 5, pp. 685-673, 2006.

[11]. Zhang N. and Tan K.H. Effects of Support Settlement on Continuous Deep Beams and STM Modeling. Journal of Engineering Structure, doi:10.1016/j.engstruct.2009.09.019, 2009.

[12]. Arabzadeh, A., Rahaie, A.R. and Aghayari, R., 2009, "A Simple Strut-and-Tie Model for Prediction of Ultimate Shear Strength of RC Deep Beams", International Journal of Civil Engineering Volume 7, Issue 3, p.p. 141-153, September 2009 .

[۱۳]. نوری سولا، امین. «بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر اندازه در تیرهای عمیق با بتن سبک». پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

## Investigating Effective Parameters in Shear Strength of Deep Beams without Shear Reinforcement

Abolfazl Arabzade

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University

Amin Noori Soola

M.Sc. of Structural Engineering, Tarbiat Modares University

### Abstract

Investigating non-linear behavior of structures in order to evaluating vulnerability and determining performance level of existing structures is very important. Because of deep beams dimensions and also cost and time limitation and complexity of applying boundary conditions in lab, it is better to use software and non-linear analysis. In this paper the behavior of deep beams with lightweight and normal concrete and shear length to height ratio of 0.5, 1, 1.5 and 2 and also height of 30, 45, 60 and 90 centimeters is studied using Abaqus software. Results of non-linear analysis show that normalized shear strength decreases with increase in height in both groups of beams and this decrease can be seen in all shear length to height ratios. Comparing experimental results with truss methods available in codes shows that all methods are conservative in small height beams and safety margin reduces with increase in height. Results are non-conservative in CSA method in shear length to height ratio of 0.5 and in normal concrete, and with increase in shear length to height, predicted shear strength by CSA method is much more than strength obtained from analysis.

**Keywords:** Deep beam, Finite element analysis, Reinforced concrete, Truss method, Shear strength, Abaqus.

---

\* Corresponding author: Amin.noorisoola@modares.ac.ir