

## بررسی مقاومت برشی و مدل سازی تیرهای عمیق بتنی

حمید اسکندری<sup>۱\*</sup>، مرتضی طیبی‌نیا<sup>۲</sup>، مهران شریعت<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

۲- عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

### خلاصه

رفتار تیرهای عمیق به طور قابل ملاحظه ای متفاوت از تیرهای معمولی می‌باشد و با توجه به کاربرد فراوان آن در سازه‌های بتن‌آرمه و پل‌ها و ساختمان‌های بلند، اهمیت بررسی آن بیش از پیش مشخص می‌گردد. در این تحقیق ظرفیت برشی و نیز ظرفیت بار گسیختگی تیرهای عمیق بتنی مستطیلی به روش اعضای خرپایی (STM) محاسبه و نتایج حاصل با مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی موجود و با استفاده از آیین‌نامه‌های ACI و AASHTO مقایسه شده است. استفاده از روش عددی اجزا محدود برای آنالیز این تیرها استفاده شده است که نتایج بدست آمده تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد و تاییدی برای روش STM جهت بررسی تیرهای عمیق می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** تیرهای عمیق بتنی مستطیلی، روش STM، مقاومت برشی، بار گسیختگی، آنالیز اجزای محدود.

### ۱. مقدمه

عضو بتنی مسلح که دهانه کل یا دهانه برشی آن نسبت به ارتفاع آن کوچک است تیر عمیق نامیده می‌شود. نمونه‌ای از کاربردهای تیرهای عمیق در پل‌ها، ساختمان‌های بلند، سازه‌های دریایی، فونداسیون و شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققان زیادی موضوعات مختلفی را در ارتباط با تیرهای عمیق مورد مطالعه قرار داده‌اند. در دهه‌های اخیر تیرهای عمیق بتنی توسط فرمول‌ها و روابط تجربی یا تخمین‌های ساده طراحی می‌شدند [۱]. تخمین مقاومت و ظرفیت تیرهای عمیق به دلیل پیچیدگی این عضو بتنی، معمولاً به سختی صورت می‌گیرد. چند دهه اخیر مدل STM به عنوان روشی رایج در طراحی تیرها جز خصوصیات طراحی آیین‌نامه آمریکا است، مانند انجمن بزرگراه‌ها و حمل و نقل آمریکا (AASHTO LRFD 2008) [۲] و انجمن بتن آمریکا (ACI 318-08) [۳]. در آیین‌نامه‌های AASHTO و ACI تیرهایی به عنوان تیر عمیق در نظر گرفته شده که نسبت دهانه برشی به عمق موثر ( $a/d$ ) کمتر یا برابر ۲ باشد [۴]. بر این اساس مدل STM توسط دو آیین‌نامه AASHTO LRFD و ACI 318-08 ارائه شده است. تعدادی از محققین فاکتورهای مختلفی از تیرهای عمیق مثل انواع بارهای وارده [۵]، آرماتورهای طولی و عرضی [۶] و تاثیر همزمان آرماتورهای طولی و عرضی در بار گسیختگی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ونگ و همکارش [۷] برای پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتنی یک مدل اصلاح شده (MSTM) برای تیرهای پیش‌تنیده ساده

\* ۰۵۱۴۴۰۱۳۳۸۶

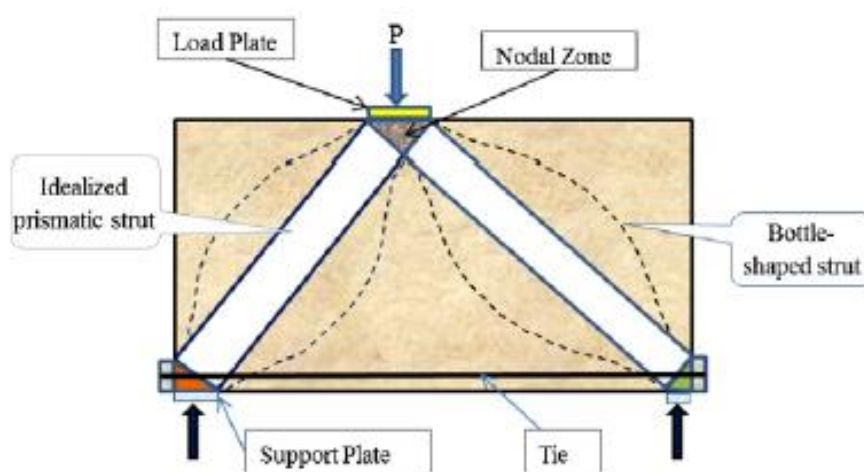
Email: Hamidsttu@yahoo.com

ارائه نموده است. با توجه به خیز دو نقطه میان طول تیر، کرنش جان، کرنش کششی آرماتورها و کرنش سطحی تیر عمیق با تکیه‌گاه ساده برای بتن با مقاومت بالای خودمتراکم (HSSCC) در آزمایشگاه انجام شده است [۸]. تاثیر  $a/d$  و طول مهار روی مقاومت **Strut** و مکانیسم انتقال بار در نتایج آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. رفتار تیرهای عمیق در مقایسه با تیرهای کم عمق مانند رفتار قوسی در برابر رفتار خمشی است. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده، مقاومت برشی با افزایش ارتفاع تیر عمیق افزایش می‌یابد [۱۰]. در پیش‌بینی مقاومت برشی تیرهای عمیق روش **STM** در پیوست آیین نامه **ACI318-02** به صورت محافظه کارانه‌ای ارائه شده است و در بین روش‌های مختلف طراحی کمترین انحراف معیار را دارد. همچنین تحقیق در مورد جایگزینی اتصال قلابی (توسط آیین نامه **ACI**) در انتهای ناحیه لنگر مثبت با مهار مکانیکی فولادی و همچنین تخمین رفتار برشی تیر عمیق صورت گرفته است [۱۱]. علاوه بر این ارزیابی رفتار و مقاومت تیرهای عمیق بتنی بر اساس نتایج آزمایشگاهی چهار نمونه یکسان از تیر انجام شده است. نتایج حاصل از روش **STM** برای تیرهای عمیق با تکیه‌گاه پیوسته با نتایج آزمایشگاهی تطبیق بهتری را نشان می‌دهد [۱۲]. تحقیقات بسیاری در مورد استفاده از روش **STM** در تیرهای عمیق ارائه شده است. اما هیچ یک از آنها پیش‌بینی و مقایسه بین بارهای بحرانی تیر توسط دو آیین نامه و مدل‌سازی اجزای محدود غیر خطی و نتایج آزمایشگاهی انجام نگرفته است. در روش **STM** از آیین نامه **ACI** و **AASHTO** استفاده شده است. به دلیل رفتار غیر خطی تیرهای عمیق از مدل‌سازی غیر خطی توسط نرم‌افزار **ABAQUS** انجام شده است.

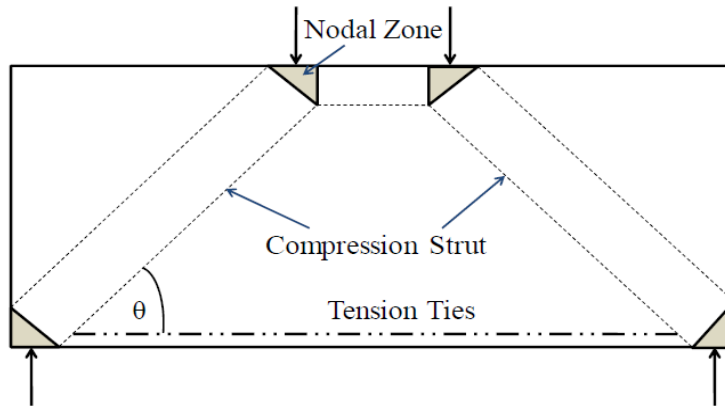
هدف از این تحقیق بررسی تیرهای عمیق تحت بار بحرانی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انجام شده است. داده‌های اولیه برای مقایسه از مطالعات پیشین استخراج شده است. و در ادامه پیشنهاد و انتخاب استاندارد بهتر برای طراحی که انطباق بهتری با نتایج آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود داشته باشد ارائه شده است.

## ۲. روش **STM**

روش **STM** که بر اساس منطق خرپا عمل می‌کند، برای آنالیز و طراحی سازه‌های خطی و غیر خطی استفاده می‌شود. این روش بر اساس انتقال هر تنش در سازه از یک نقطه به نقطه دیگر در یک مسیر سازگار استوار است. مدل **STM** از سه جز که معرف جنبه خاصی از سازه است، تشکیل شده است این اجزا عبارتند از **Strut** و **Tie** که در گره‌ها به هم متصل شده‌اند و در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است [۱۳].

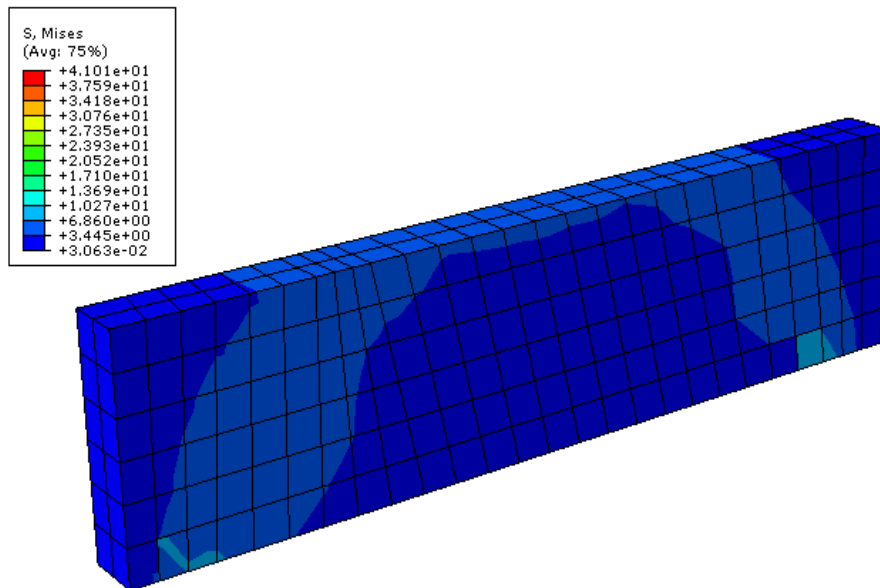


شکل ۱ - اعضای روش **STM** در تیر عمیق تحت بار نقطه‌ای

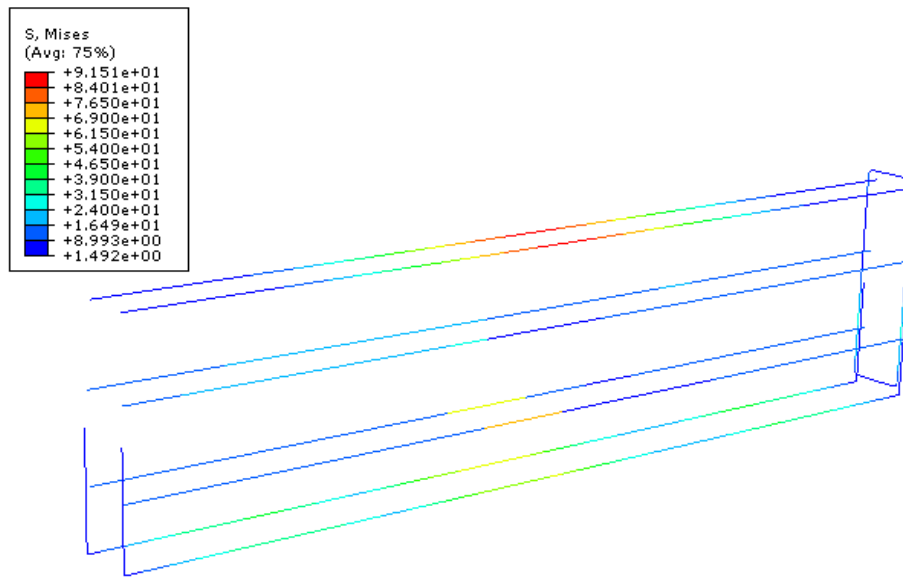


شکل ۲ - اعضای خرپا در روش STM

مسیر تنش در تیر عمیق مدلسازی شده در بتن و آرماتورها که تحت دو بار اعمالی است به ترتیب در اشکال (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳ - مسیر تنش در تیر عمیق



شکل ۴ - تأثیر تنش در آرماتورهای تیر عمیق در روش STM

مدل STM در آیین‌نامه‌های استاندارد کانادا برای طراحی سازه‌های بتنی (CAN-A23.3-M84 1984) [۱۴]، ACI، AASHTO LRFD و آیین‌نامه استرالیا AS3600 [۱۵] معرفی شده است. در دو بخش زیر STM توسط دو آیین‌نامه ACI و AASHTO [۱۶] معرفی شده است.

#### ۱-۲. مدل STM توسط آیین‌نامه ACI

آیین‌نامه ACI روش STM را برای طراحی تیرهای عمیق به صورت زیر ارائه می‌دهد:

فرمول مقاومت موثر Strut به صورت زیر است:

$$f_{cu} = 0.85\beta_s f_c \quad (1)$$

فرمول مقاومت موثر Node به صورت زیر است:

$$f_{cu} = 0.85\beta_n f_c \quad (2)$$

مقاومت T<sub>ie</sub>، F<sub>nt</sub> با عبارت زیر به دست می‌آید:

$$F_{nt} = A_{st} f_y \quad (3)$$

نیروی برشی V<sub>cu</sub> اعمالی باید شرط زیر را ارضا کند:

$$V_u \leq \phi(10\sqrt{f_c}bd) \quad (4)$$

ظرفیت برشی تنش در بتن تیرهای عمیق نسبت به تیرهای معمولی بزرگتر می‌باشد. حداکثر این مقدار در ذیل آمده است:

$$V_c \leq 6\sqrt{f_c}bd \quad (5)$$

مقاومت برشی بتن مقطع به صورت زیر است:

$$V_c = 0.83\sqrt{f_c}bd \quad (\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

هنگامی که V<sub>u</sub> از مقدار V<sub>c</sub> تجاوز کند، مقطع تیر نیاز به آرماتور برشی دارد. این مقدار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_s = \frac{\left[ \frac{A_v}{s_v} \left( \frac{1 + \frac{l_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_h} \left( \frac{11 - \frac{l_n}{d}}{12} \right) \right] f_y d}{4.45} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (7)$$

$$A_{v_{min}} = 0.0025 b s_v \quad (8)$$

$$A_{vh_{min}} = 0.0015 b s_h \quad (9)$$

## ۲-۲. مدل STM توسط آیین‌نامه AASHTO

آیین‌نامه AASHTO روش STM را بر پایه تئوری Collins et al. (1986) معرفی می‌کند. ظرفیت فشاری Strut ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi F_{ns} = \phi f_{cu} A_{cs} \quad (10)$$

که در آن  $f_{cu}$  مقاومت فشاری بتن در Strut،  $A_{cs}$  سطح مقطع بتن در Strut و  $\phi$  ضریب کاهش می‌باشد. مقاومت فشاری بتن در Strut ها به صورت زیر است:

$$f_{cu} = \frac{f'_c}{0.8 + 170 \varepsilon_1} \quad (11)$$

در اینجا  $\varepsilon_1$  کرنش اصلی کششی در Strut نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_s + 0.002}{\tan^2 \theta} \quad (12)$$

$\varepsilon_g$  کرنش کششی در بتن در جهت Tie و  $\theta$  کوچکترین زاویه بین Strut مایل و Tie افقی می‌باشد. مقاومت Tie از فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$F_{nt} = \phi f_y A_{st} \quad (13)$$

آیین‌نامه AASHTO تنش فشاری بتن در نقاط گره‌ای از مقادیر زیر نباید تجاوز کند.

- (i)  $0.85 \phi_c f'_c$  گره‌ای که به Strut و سطح اعمال بارگذاری منتهی می‌شود.
- (ii)  $0.75 \phi_c f'_c$  گره‌ای که به Tie منتهی می‌شود.
- (iii)  $0.85 \phi_c f'_c$  گره‌ای که به Tie با بیش از یک جهت منتهی می‌شود.

$\phi_c$  ضریب مقاومت بتن که ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود.

## ۳. داده‌های آزمایشگاهی

برای آنالیز داده‌ها و تعیین ظرفیت برشی تیرهای عمیق از داده‌های آزمایشگاهی محققین پیشین استفاده شده است. در جدول (۱) جزئیات ساخت تیرها از ابعاد تیر تا سطح آرماتورهای مورد استفاده مقطع تیر و همچنین فاصله آن‌ها نیز در آورده شده است.



جدول ۱- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی

| d<br>(mm) | b<br>(mm) | L<br>(mm) | a<br>(mm) | f <sub>c</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | A <sub>s</sub><br>(mm <sup>2</sup> ) | A <sub>sv</sub><br>(mm <sup>2</sup> ) | S <sub>v</sub><br>(mm) | A <sub>sh</sub><br>(mm <sup>2</sup> ) | S <sub>h</sub><br>(mm) | Researcher   |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------|
| 313       | 80        | 1050      | 350       | 25.9                                   | 314                                  | 56.2                                  | 150                    | 0                                     | -                      | Zhang et al. |
| 454       | 115       | 1500      | 500       | 27.4                                   | 688                                  | 56.2                                  | 150                    | 0                                     | -                      |              |
| 642       | 160       | 2100      | 700       | 28.3                                   | 1257                                 | 100                                   | 150                    | 0                                     | -                      |              |
| 904       | 230       | 3000      | 1000      | 28.7                                   | 2502                                 | 157                                   | 150                    | 0                                     | -                      |              |
| 581       | 155       | 1220      | 610       | 29.4                                   | 400                                  | 25.1                                  | 102                    | 75.38                                 | 150                    | Brena et al. |
| 405       | 152       | 1215      | 607.5     | 32.7                                   | 400                                  | 25.1                                  | 102                    | 50.25                                 | 150                    |              |
| 303       | 155       | 1212      | 606       | 34.7                                   | 400                                  | 25.1                                  | 102                    | 25.1                                  | 127                    |              |
| 200       | 150       | 930       | 465       | 60                                     | 750                                  | 0                                     | -                      | 0                                     | -                      | Appa Rao     |
| 450       | 150       | 1680      | 840       | 60                                     | 1500                                 | 0                                     | -                      | 0                                     | -                      |              |
| 700       | 150       | 2430      | 1215      | 60                                     | 2250                                 | 0                                     | -                      | 0                                     | -                      |              |

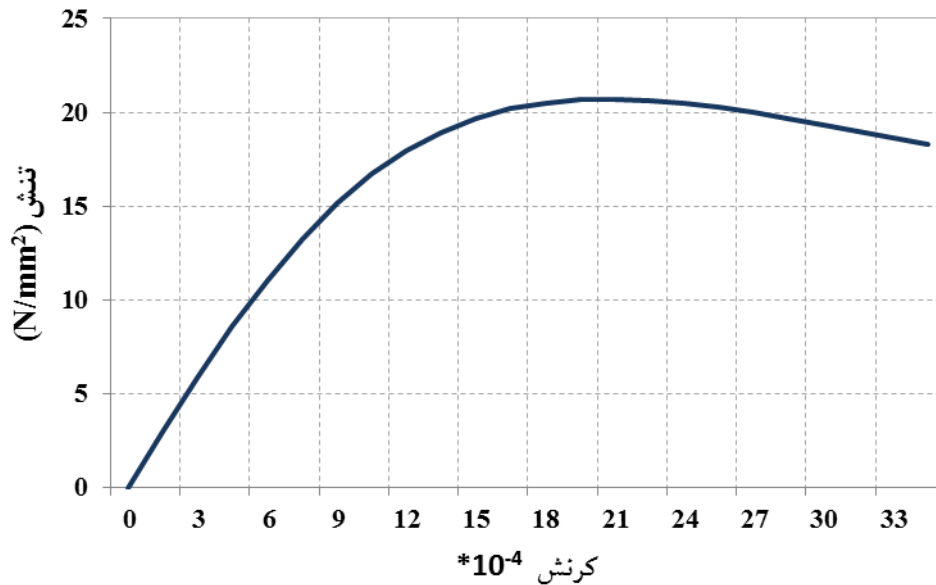
که در آن d و b ارتفاع موثر و عرض تیر، a دهانه برشی تیر، A<sub>s</sub> سطح مقطع میلگردهای طولی، A<sub>sv</sub> سطح مقطع میلگردهای عرضی برشی و A<sub>sh</sub> سطح مقطع میلگردهای طولی برشی می‌باشد.

#### ۴- مدلسازی اجزا محدود (FEM):

ایجاد یک مدل اجزا محدود برای تیرهای عمیق جهت مقایسه با روش‌های جهت معرفی بهترین روش و استاندارد که به واقعیت نزدیک باشد، نیازی اساسی است. هدف کلی مدلسازی در نرم‌افزار ABAQUS، تولید مدل اجزا محدودی است که پاسخ سازه‌ای تیرهای عمیقی که در گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند را به طور ساده و دقیق‌تری بیان کند. جهت معرفی منحنی تنش کرنش بتن مورد استفاده در ABAQUS از تخمین‌های تحلیلی در نتایج قبلی استفاده می‌کنیم. یکی از این تخمین‌ها منحنی تودچینی [۱۷] می‌باشد که بر اساس فرمول (۱۴) محاسبه و ترسیم می‌گردد. برای تیر عمیقی با مقاومت فشاری ۲۳ N/mm<sup>2</sup>، نمودار (۵) به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$f_c = \frac{1.8 * f'_c * \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2} \quad (14)$$

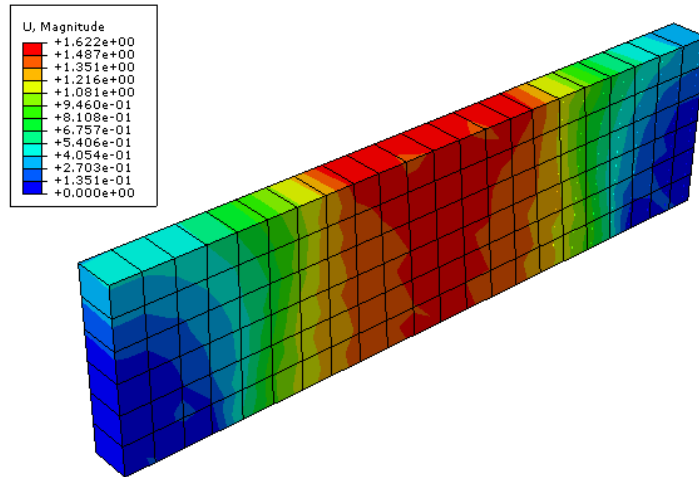
$$\epsilon_0 = \frac{1.8 * f'_c}{E_c} \quad (15)$$



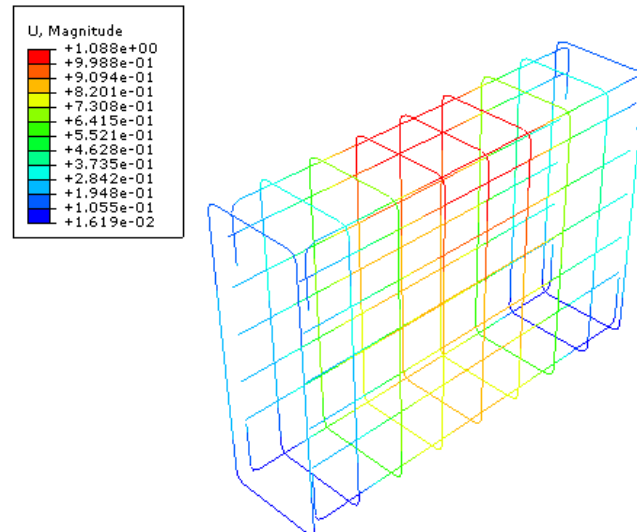
شکل ۵ - تخمین تحلیلی منحنی تنش - کرنش بتن توسط تودچینی

در این مرحله مدلسازی غیرخطی نمونه‌های گذشته به کمک روشهای اجزا محدود تحت بار استاتیکی انجام شده و تحلیل می‌گردد [۱۸]. جهت مقایسه بهتر نتایج به دست آمده از روش STM بر اساس آیین‌نامه‌های ACI و AASHTO با کارهای آزمایشگاهی، نمونه‌ها با روش اجزای محدود غیرخطی توسط نرم‌افزار ABAQUS مدلسازی شده است. با بررسی و مقایسه ظرفیت‌های به دست آمده برای تیرهای عمیق، نشان می‌دهد که روش STM که بر اساس آیین‌نامه ACI می‌باشد نتایج واقع‌گرایانه‌تری نسبت به آیین‌نامه AASHTO دارد [۱۹].

نمونه‌ای از مدلسازی اجزا محدود تیرهای آزمایشگاهی مدل Zhang با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به مقدار خیز نشان داده شده در طول تیر همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر میزان خیز در وسط تیر بوده و با نزدیک شدن به تکیه‌گاه‌ها از میزان آن کاسته می‌شود. همچنین میزان خیز در عمق تیر با افزایش ارتفاع تیر از تکیه‌گاه‌ها، خیز افزایش می‌یابد. بنابراین حداکثر میزان خیز در وسط تیر و در محل اعمال بار می‌باشد. در مدل FEM از تحقیقات Brena میزان جابجایی آرماتورها در طول تیر در نقاط تکیه‌گاهی کمترین مقدار خود را دارند و با نزدیک شدن به وسط دهانه از تکیه‌گاه‌ها میزان جابجایی افزایش یافته، تا جایی که حداکثر میزان جابجایی در نقاط میانی تیر و نزدیک به محل اعمال بار می‌باشد (شکل ۷). مدل تیر عمیق Appa Rao تنها شامل آرماتورهای طولی و با مقاومت فشاری بتن یکسان با سه ارتفاع متغیر می‌باشد. با توجه به مدل توزیع تنش در آرماتورهای طولی تیر میزان تنش با دور شدن از تکیه‌گاه‌ها کاهش یافته است و همچنین در نواحی اعمال بار مقدار تنش افزایش یافته و با دور شدن از این نواحی از مقدار تنش کاسته شده است که این تغییرات در شکل (۸) نشان داده شده است.

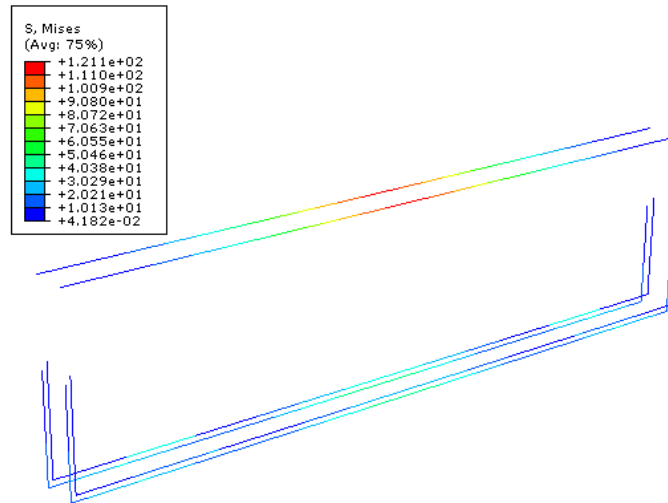


شکل ۶- نمونه ای از مدلسازی تیر آزمایشگاهی Zhang et al.



شکل ۷- نمونه ای از مدلسازی آرماتورهای طولی و عرضی تیر آزمایشگاهی Brena.





شکل ۸ - توزیع تنش در آرماتورهای طولی تیر آزمایشگاهی Appa Rao.

#### ۵- مقایسه نتایج

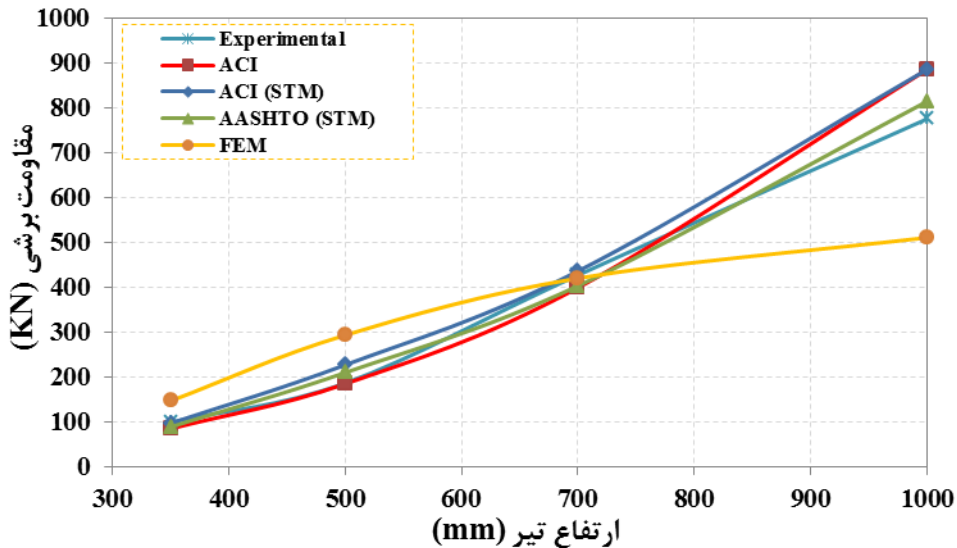
نتایج داده های آزمایشگاهی با توجه به استانداردهای ACI و AASHTO و با در نظر گرفتن محدودیت های هر کدام مورد محاسبه قرار گرفته و برای صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه های موجود از مدل FEM غیرخطی استفاده شده است. نتایج ظرفیت برشی تیرهای عمیق در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- محاسبه ظرفیت برشی تیرهای عمیق

| $V_{exp}$ (KN) | $V_{stm}$ (ACI) (KN) | $V_{ACI}$ (KN) | $V_{stm}$ (ASHTO) (KN) | $V_{FEM}$ (KN) | Researcher   |
|----------------|----------------------|----------------|------------------------|----------------|--------------|
| 99.5           | 97                   | 85             | 89                     | 147            |              |
| 186.5          | 227                  | 185            | 210                    | 293.2          | Zhang et al. |
| 427            | 436                  | 399            | 403                    | 420            |              |
| 775            | 885                  | 885            | 814                    | 510.6          |              |
| 338.5          | 237                  | 740            | 118                    | 207            |              |
| 229.5          | 166                  | 463            | 83                     | 154            | Brena et al. |
| 156.5          | 124                  | 358            | 62                     | 103            |              |
| 100            | 126                  | 145            | 126                    | 95             |              |
| 160            | 314                  | 325            | 312                    | 180            | G. Appa Rao  |
| 280            | 507                  | 506            | 482                    | 356            |              |

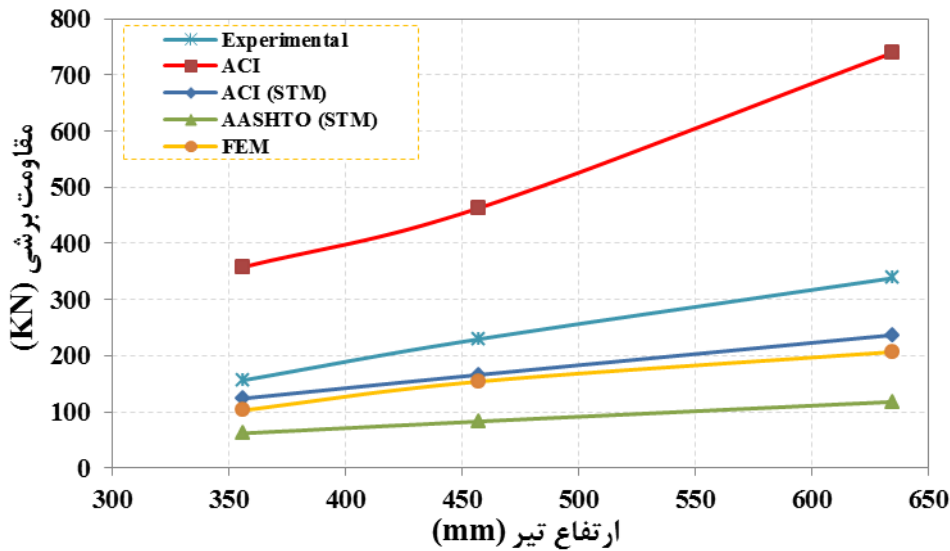
جهت مقایسه و بررسی پیش بینی های انجام شده نمودارهای ذیل ترسیم گردیده است. با بررسی نتایج آزمایشگاهی Zhang همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود، مقاومت برشی بدست آمده از روابط ACI تا ارتفاع تیر ۸۰۰ میلیمتر بیشترین انطباق را با نتایج آزمایشگاهی دارد اما با افزایش ارتفاع از این مقدار روابط STM با آیین نامه AASHTO دقت بالاتری را نشان می دهد. آیین نامه ACI به روش STM از ارتفاع مقطع تیر از ۸۰۰ میلیمتر به بالا نسبت به سایر روش های مورد بررسی مقاومت برشی بیشتری را برای ظرفیت تیر ارائه می دهد. این در حالی است که نتایج روش FEM در بازه ارتفاعی ۳۵۰ تا ۸۰۰ میلیمتر مقادیر بیشتر و برای ارتفاع های بیشتر مقادیر کمتری را برای ظرفیت تیرهای عمیق

ارائه می‌دهد. تمامی روش‌های آیین‌نامه‌ای و همچنین روش عددی FEM در ارتفاع تیر برابر ۸۰۰ میلیمتر تقریباً ظرفیت برشی یکسانی را برای مقطع مورد نظر مشخص می‌کند.



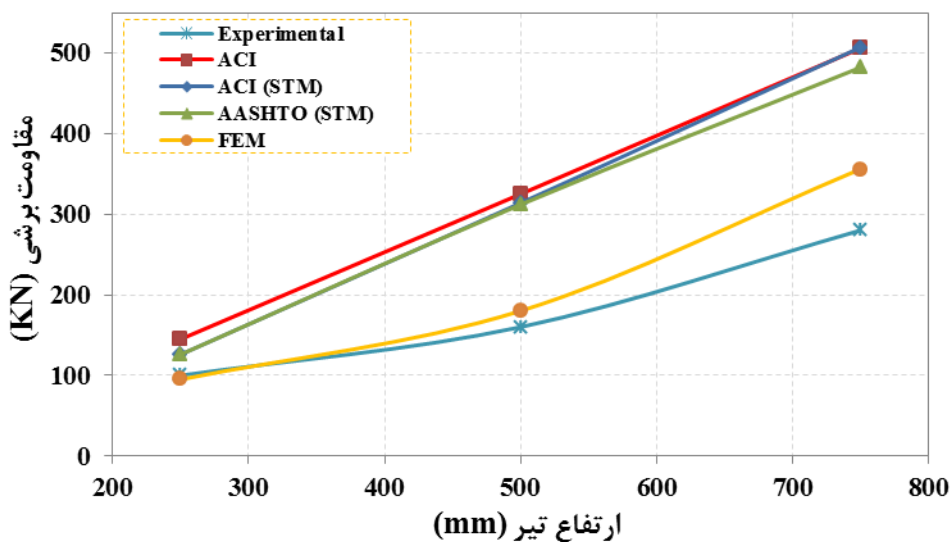
شکل ۹ - مقایسه مقاومت برشی توسط روابط آیین‌نامه‌ای با نتایج آزمایشگاهی (Zhang et al.) و FEM

با توجه به شکل (۱۰) کاملاً مشخص است که ظرفیت برشی محاسبه شده توسط روابط آیین‌نامه‌ای ACI اختلاف چشم‌گیری با نتایج آزمایشگاهی دارد. به علاوه روابط AASHTO به روش STM مقادیر خیلی کمتری را برای ظرفیت برشی ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از دو روش STM با آیین‌نامه ACI و روش FEM مقادیری کمتر از مقادیر آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. با این حال برای تیرهایی با ارتفاع تیر ۴۵۷ میلیمتر بیشترین همخوانی با نتایج آزمایشگاهی را در بر دارد. در حالت کلی برای داده‌های آزمایشگاهی Brena با افزایش ارتفاع تیر اختلاف بین مقادیر ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ها و روش FEM افزایش یافته است.



شکل ۱۰- مقایسه مقاومت برشی توسط روابط آیین نامه ای با نتایج آزمایشگاهی (Berena et al.) و FEM

مقایسه بین ظرفیت برشی تیر عمیق با استفاده از روابط آیین‌نامه‌ای و مدلسازی FEM با نتایج آزمایشگاهی Appa Rao در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تا ارتفاع تیر ۵۰۰ میلیمتر نتایج ظرفیت مقاومت برشی برای داده‌های آزمایشگاهی و روش FEM تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد که تا این ارتفاع تقریباً با نتایج آزمایشگاهی منطبق بوده و از این ارتفاع به بعد مقدار مقاومت برشی به صورت غیر خطی از مقادیر آزمایشگاهی فاصله گرفته و مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. هر سه روش دیگر ارائه شده با افزایش ارتفاع تیر مقادیر مقاومت برشی به صورت خطی افزایش یافته و مقدار بیشتری را به نسبت روش FEM برای ارتفاع‌های مختلف تیر تعیین نموده‌اند.



شکل ۱۱ - مقایسه مقاومت برشی توسط روابط آیین نامه ای با نتایج آزمایشگاهی (Appa Rao) و FEM

## ۶. نتیجه‌گیری

در این بررسی ظرفیت مقاومت برشی تیرهای عمیق با نتایج آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل‌های انجام شده با استفاده از روش STM و آیین‌نامه‌های ACI و AASHTO و برای صحت‌سنجی نتایج از روش مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. برای این امر مقاومت برشی ۱۲ تیر عمیق بتنی محاسبه گردیده است. با توجه به بررسی نتایج آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتیجه‌گیری‌های نهایی زیر را مطرح نمود: مد گسیختگی (برشی یا خمشی) در تیرهای عمیق به ابعاد تیر و درصد آرماتورهای برشی و خمشی موجود بستگی دارد.

در روش STM ظرفیت به دست آمده تخمین مناسب‌تر و واقع‌گرایانه‌تری به نتایج آزمایشگاهی نسبت به روش آیین‌نامه‌ای دارد. در بحث مقایسه آیین‌نامه‌ای در این روش ظرفیت به دست آمده نتایج نسبتاً یکسانی دارند ولی نتایج ACI نسبت به AASHTO به ظرفیت حاصل از نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌باشد.

تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌سازی اجزا محدود و همچنین استفاده از آیین‌نامه‌های مختلف نشان می‌دهد که در اکثر موارد در ابعاد و مشخصات واقعی تیرهای عمیق، ظرفیت خمشی به جای ظرفیت برشی تعیین‌کننده می‌باشد به عبارتی در اینگونه موارد ترک‌های مایل در عناصر مورب فشاری تیر به وجود می‌آید.

آرماتورهای طولی برشی همانند آرماتورهای عرضی برشی یا خاموت‌ها نقش بسزایی در ظرفیت برشی تیرهای عمیق دارند. با افزایش سطح مقطع آرماتورهای برشی یا کاهش فاصله عرضی آن‌ها به افزایش ظرفیت برشی تیر عمیق منجر می‌شود.

مد گسیختگی در تیرهای عمیق به ابعاد تیر و درصد آرماتورهای برشی و خمشی بستگی دارد، با این توصیف که با افزایش آرماتورهای طولی خمشی تیر ظرفیت خمشی تیر بالا رفته و احتمال اینکه تیر دچار گسیختگی برشی شود بیشتر می‌شود. به عبارتی با کاهش آرماتورهای طولی خمشی، تیر دچار گسیختگی خمشی می‌شود.

## ۱۲. مراجع

1. Islam, S.M.S., *Automated Design of Reinforced Concrete Deep Beams*. 2012.
2. AASHTO, L., *LRFD bridge design specifications*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1998.
3. Committee, A., A.C. Institute, and I.O.f. Standardization. *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. 2008. American Concrete Institute.
4. Madan, S., G.R. Kumar, and S. Singh, *Steel fibers as replacement of web reinforcement for RCC deep beams in shear*. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 2007. 8(5): p. 479-489.
5. Kim, H., M. Lee, and Y. Shin, *Structural Behaviors of Deep RC Beams under Combined Axial and Bending Force*. Procedia Engineering, 2011. 14: p. 2212-2218.
6. Tan, K., C. Tang, and K. Tong, *A direct method for deep beams with web reinforcement*. Magazine of concrete research, 2003. 55(1): p. 53-63.
7. Wang, G.-L. and S.-P. Meng, *Modified strut-and-tie model for prestressed concrete deep beams*. Engineering Structures, 2008. 30(12): p. 3489-3496.

8. Mohammadhassani, M., et al., *Ductility and performance assessment of high strength self compacting concrete (HSSCC) deep beams: An experimental investigation*. Nuclear Engineering and Design, 2012. 250: p. 116-124.
9. Aguilar, G., et al., *Experimental evaluation of design procedures for shear strength of deep reinforced concrete beams*. ACI Structural Journal, 2002. 99(4).
10. Brena, S.F. and N.C. Roy, *Evaluation of load transfer and strut strength of deep beams with short longitudinal bar anchorages*. ACI Structural Journal, 2009. 106(5).
11. SEO, S.-Y., S.-J. YOON, and W.-J. LEE, *structural behavior of r/c deep beam with headed longitudinal reinforcements*. 2004.
12. Zhang, N. and K.-H. Tan, *Direct strut-and-tie model for single span and continuous deep beams*. Engineering Structures, 2007. 29(11): p. 2987-3001.
13. Arabzadeh, A., R. Aghayari, and A.R. Rahai, *Investigation of experimental and analytical shear strength of reinforced concrete deep beams*. International Journal of Civil Engineering, 2011. 9(3): p. 207-214.
14. Association, C.S., *Code for the design of concrete structures for buildings*. 1977: CSA.
15. AS, A.S., *Concrete structures*. AS3600-2001. Sydney (Australia): Standards Australia, 2001.
16. Shuraim, A.B., *Behavior and shear design provisions of reinforced concrete D-region beams*. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2013. 25(1): p. 65-74.
17. Todeschini, C.E., A.C. Bianchini, and C.E. Kesler. *Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels*. in *ACI Journal Proceedings*. 1964. ACI.
18. Salamy, M.R., H. Kobayashi, and S. Unjoh, *Experimental and analytical study on RC deep beams*. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 2005. 6(5): p. 409-421.
19. Mansur, M., K.-H. Tan, and W. Weng. *analysis of reinforced concrete beams with circular openings using strut-and-tie model*. in *Structural Engineering, Mechanics, and Computation: Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Mechanics, and Computation, 2-4 April 2001, Cape Town, South Africa*. 2001. Elsevier.