

بررسی عددی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دو سر ساده دارای بازشو

ابوالفضل عربزاده^۱، محمد جواد ظهره وند^۲

۱-دانشیار- گروه سازه- دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه- دانشگاه تربیت مدرس

arabzadeh@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۷/۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۲/۲۶]

چکیده- به طور کلی تیرهای عمیق به عنوان شاه تیرهای حمال و سرپوش شمع‌ها و همچنین در دیوارهای ساختمان‌های بلند کاربرد دارند. برای اجرای سرویس‌های اساسی مثل کانال‌های هوا، دسترسی به کابل‌های شبکه‌های الکتریکی و کامپیوتری، تاسیسات مکانیکی و یا رفت و آمد از اتاقی به اتاق دیگر، در جان تیرهای عمیق بتن مسلح بازشو طراحی می‌کنند. در این مقاله به بررسی رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح دو سر ساده دارای بازشو با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته شده است. برای مدل‌سازی نمونه‌ها از نرم افزار **Abaqus** استفاده شده است. ۲۴ تیر عمیق دارای بازشو مدل و پارامترهای اندازه‌ی بازشو، محل بازشو، چیدمان آرماتور جان بررسی شده است. در تمام این تیرها ارتفاع و ضخامت ثابت و به ترتیب ۷۵۰ mm و ۱۰۰ mm است. بارگذاری تیرها به صورت بار متمرکز دو نقطه‌ای و متقارن است. تیرهای دارای بازشوی بزرگتر مقاومت کمتری نشان می‌دهند و محل بازشو تأثیر زیادی روی رفتار و مقاومت نهایی تیرها ندارد. بیشترین تأثیر روی رفتار و بار نهایی با تغییر چیدمان آرماتور جان ایجاد می‌شود که به ترتیب چیدمان مورب، شبکه‌ای، قائم و افقی منجر به افزایش بیشتر بار نهایی می‌شوند. به گونه‌ای که مقاومت چیدمان مورب آرماتور به‌طور متوسط ۱/۶۷ برابر چیدمان افقی است. همچنین برای شبیه سازی تیرهای عمیق موجود در سازه‌های واقعی ۱۲ تیر عمیق با ارتفاع ۲۰۰۰ mm و دهانه‌ی خالص ۳۰۰۰ mm و ضخامت ۲۲۰ mm مدل شدند. بازشو در این تیرها دارای ابعاد ۳۵۰×۲۰۰ mm است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که برای تیرهای عمیق با این ابعاد نیز به ترتیب چیدمان مورب، شبکه‌ای، قائم و افقی بیشترین تأثیر را در افزایش بار نهایی دارند و محل بازشو در ارتفاع تیر عمیق تأثیر زیادی روی مقاومت نهایی ندارد.

واژگان کلیدی: تیر عمیق، بتن مسلح، بازشو، اجزاء محدود، بار نهایی.

۱- مقدمه

آیین‌نامه بتن ایران از تیر عمیق با عنوان اعضای خمشی با ارتفاع زیاد یا تیر تیغه‌ها نام برده است. طبق این آیین‌نامه ضوابط اعضای خمشی با ارتفاع زیاد برای تیرهایی قابل کاربرد است که دارای شرایط زیر است [۱]:

۱- نسبت طول دهانه‌ی آزاد به ارتفاع مؤثر، L_n/d ،

در آنها کمتر از چهار باشد.

۲- بار روی تیر در وجه فشاری، مقابل وجهی که روی تکیه‌گاه می‌نشیند، وارد آید به گونه‌ای که امکان به‌وجود آمدن دستک‌های فشاری از سمت بار به سمت تکیه‌گاه موجود باشد.

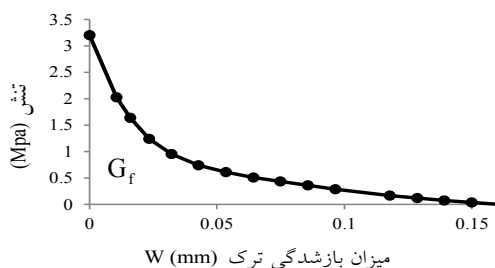
تیرهای عمیق به عنوان شاه تیرهای حمال^۱ به کار

۱. Transfer girders

طبق نتایج رینهاردت بهترین منحنی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی برای مقادیر زیر حاصل می‌شود.

$$c_1 = 3, \quad c_2 = 6.93, \quad W_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t} \quad (2)$$

که G_f مقدار انرژی لازم برای شکل‌گیری واحد سطح ترک است، که به عنوان مشخصات مصالح در نظر گرفته می‌شود و برابر مساحت زیر نمودار $\sigma_n = F(W)$ است.



شکل ۱ نمودار تنش-بازشدگی ترک [۵]

مقدار G_f برای بتن معمولی (مقاومت فشاری حدود ۲۰ مگاپاسکال) برابر 0.04 N/mm و برای بتن با مقاومت بالا (مقاومت فشاری حدود ۴۰ مگاپاسکال) برابر 0.12 N/mm است.

۲-۲ رفتار تک محوری بتن در فشار

در این پژوهش برای رفتار فشاری تک محوری بتن از مدل ارایه شده توسط مندر و همکاران (۱۹۸۴) [۶] مطابق روابط ۳ تا ۷ استفاده شده است. برای بارگذاری یکنوا^۱ (مونوتونیک) و نرخ کرنش کم، تنش تک محوری فشاری f_c به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (3)$$

می‌روند که بار را از ستون‌های بالایی گرفته و به ستون‌های تکیه‌گاهی انتقال می‌دهند. این شاه‌تیرها در محل‌هایی که حذف تعدادی ستون لازم است، مثل ورودی پارکینگ‌ها قرار می‌گیرند. [۲ و ۳]. برای اجرای سرویس‌های اساسی مثل کانال‌های هوا، دسترسی به کابل‌های شبکه‌های الکتریکی و کامپیوتری، تاسیسات مکانیکی و یا رفت و آمد از اتاقی به اتاق دیگر، در جان تیرهای عمیق بتن مسلح بازشوهایی را اجرا می‌کنند. این بازشوها مسیر انتقال نیروهای فشاری از محل اعمال بار به تکیه‌گاه را قطع کرده و باعث به هم ریختگی آن می‌شوند و موجب کاهش شدیدی در مقاومت نهایی تیرهای عمیق می‌شوند [۴].

در این پژوهش به بررسی رفتار تیرهای عمیق دارای بازشو با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته شده است. هدف اصلی عبارتند از: بررسی اثر محل بازشو، اندازه‌ی بازشو، چیدمان آرماتور جان. برای مدلسازی نمونه‌ها از مدل پلاستیک-آسیب نرم‌افزار Abaqus استفاده شده است، که در ادامه پارامترهای این مدل بررسی می‌شود.

۲- مشخصات مصالح

۲-۱ رفتار تک محوری بتن در کشش

بتن یک مصالح ناهمگن متشکل از سنگدانه‌ها و چسب سیمان است که به صورت ذاتی در کشش ضعیف است. مقاومت کششی بتن در محدوده‌ی ۸ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است. با کشش تک محوری رابطه تنش-کرنش تا مقاومت کششی σ_{t0} خطی الاستیک است. بعد از ترک خوردگی این رابطه غیر خطی می‌شود. در این پژوهش از رابطه‌ی ارایه شده به وسیله‌ی رینهاردت و همکاران (۱۹۸۶) [۵] استفاده شده است.

$$\frac{\sigma_n}{f_t} = \left[1 + \left(c_1 \frac{W}{W_c} \right)^3 \right] \exp \left(-c_2 \frac{W}{W_c} \right) - \quad (1)$$

$$\frac{W}{W_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2)$$

اعمال کند.

تغییر سطح تسلیم در حین بارگذاری (یا سخت شدگی) به وسیله دو متغیر $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ و $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ کنترل می‌شود. این سطح تسلیم به صورت عبارات‌های تنش موثر بیان می‌شود:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^{pl}) \langle \hat{\sigma}_{\max} \rangle - \gamma \langle -\hat{\sigma}_{\max} \rangle) \quad (۸)$$

$$-\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}) = 0$$

α و β و γ ثابت‌های بدون بعد هستند. و همچنین داریم:

$$\bar{p} = -\frac{1}{3} \text{trace}(\bar{\sigma}), \quad \bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}} (\bar{S} : \bar{S}) = \sqrt{3J_2} \quad (۹)$$

$\bar{p}$ فشار هیدرواستاتیک موثر و $\bar{q}$ تنش موثر معادل میسر است.

$\hat{\sigma}_{\max}$ مقدار جبری بیشینه مقدار ویژه (تنش اصلی) تانسور $\bar{\sigma}$ است. تابع $\beta(\tilde{\epsilon}^{pl})$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl})} (1-\alpha) - (1+\alpha) \quad (۱۰)$$

که $\bar{\sigma}_c$ و $\bar{\sigma}_t$ به ترتیب تنش‌های فشاری و کششی مؤثر هستند. در فشار دو محوری یعنی $\hat{\sigma}_{\max} = 0$ معادله تسلیم به شرط تسلیم دراکر-پراگر تبدیل می‌شود.

ضریب α به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\sigma_{bo} - \sigma_{co}}{2\sigma_{bo} - \sigma_{co}} \quad (۱۱)$$

مقدار آزمایشگاهی σ_{bo}/σ_{co} در محدوده ۱/۱ تا

$$X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (۴)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (۵)$$

که f_c مقاومت فشاری بتن محصور، ϵ_c کرنش بتن و f'_{co} مقاومت بتن غیر محصور با کرنش مربوطه ϵ_{co} است.

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (۶)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (۷)$$

در حالتی که شرایط محصورشدگی نداریم $f'_{cc} = f'_{co}$ ، بنابراین $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}$ خواهد شد.

۳-۲- مدل پلاستیسیته بتن

مدل پلاستیک-آسیب نرم‌افزار Abaqus بر پایه‌ی مدل ارایه شده به وسیله لوبلینر (۱۹۸۹) [۷] و اصلاح شده به وسیله لی و فنوس (۱۹۹۸) [۸] قرار دارد. تحت فشار محصور کننده کم بتن رفتار ترد از خود نشان می‌دهد و مکانیزم اصلی گسیختگی در این مدل ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری است. اما وقتی فشار محصور کننده به اندازه‌ای زیاد باشد تا از نفوذ ترک جلوگیری کند، رفتار ترد بتن حذف می‌شود. مدلسازی رفتار بتن تحت فشار هیدرواستاتیک بالا از حیطه‌ی مدل پلاستیک-آسیب نرم‌افزار Abaqus خارج است. در ادامه به شرح این مدل پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱- شرط تسلیم

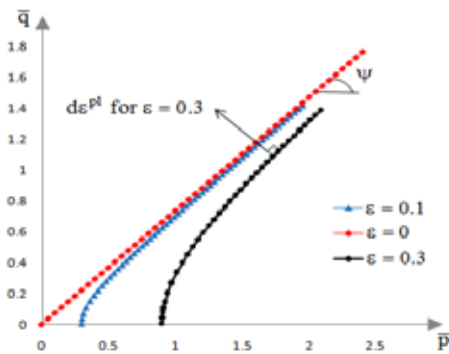
مدل پلاستیک-آسیب بتن در نرم‌افزار Abaqus شرط تسلیمی را استفاده می‌کند که به وسیله لوبلینر و همکاران (۱۹۸۹) [۷] ارایه شد و اصلاحات آن به وسیله لی و فنوس (۱۹۸۹) [۸] انجام شد تا تکامل‌های متفاوت مقاومت در فشار و کشش را

۲-۳-۲- جریان پلاستیک

مدل پلاستیک-آسیب نرم‌افزار Abaqus از قانون جریان غیروابسته استفاده می‌کند، تا اتساع (افزایش حجم) را کنترل کند. تابع پتانسیل جریان پلاستیک، تابع هذلولی دراکر-پراگر است. معادله این تابع به صورت زیر است:

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi = 0 \quad (13)$$

با توجه به شکل ۳ این تابع را تعریف می‌کنیم.



شکل ۳ تابع پتانسیل برای خروج از مرکزیت‌های متفاوت

ψ زاویه‌ی اتساع است که در صفحه‌ی $\bar{p}-\bar{q}$ در فشار محصور کننده‌ی بالا اندازه‌گیری می‌شود. در واقع مجانب این هذلولی تابع خطی دراکر-پراگر است. و $\tan \psi$ شیب این مجانب است. هر چه این شیب بیشتر باشد در فشار محصور کننده بالا اتساع بیشتری داریم.

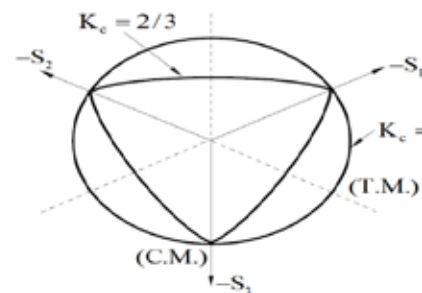
ϵ خروج از مرکزیت نام دارد و نرخ‌ی را تعریف می‌کند که تابع به مجانب نزدیک می‌شود. وقتی $\epsilon = 0$ است تابع هذلولی به تابع خطی تبدیل می‌شود. مقدار پیش فرض خروج از مرکزیت $0/1$ است و با این مقدار در محدوده‌ی وسیعی از مقادیر فشار محصور کننده مقدار زاویه اتساع تقریباً ثابت است. مقدار ϵ بسیار کمتر از پیش فرض، در فشار هیدرواستاتیک کم منجر به مسئله‌ی همگرایی می‌شود. چون این مقدار در تابع پتانسیل در محل

$1/16$ قرار دارد. بنابراین α بین $0/08$ تا $0/12$ قرار خواهد گرفت. که σ_{b0} تنش تسلیم فشاری دو محوری و σ_{c0} تنش تسلیم فشاری تک محوری است. ضریب γ فقط در فشار سه محوری وارد تابع تسلیم می‌شود، یعنی در حالت تنشی که $\hat{\sigma}_{\max} < 0$. این ضریب به وسیله‌ی مقایسه‌ی شرایط تسلیم در نصف‌النهارهای فشاری و کششی تعیین می‌شود. نصف‌النهار کششی (TM) به عنوان حالت‌هایی از تنش که شرط $\hat{\sigma}_{\max} = \hat{\sigma}_1 > \hat{\sigma}_2 = \hat{\sigma}_3$ را ارضا می‌کنند و نصف‌النهار فشاری (CM) به عنوان حالت‌هایی از تنش که شرط $\hat{\sigma}_{\max} = \hat{\sigma}_1 = \hat{\sigma}_2 > \hat{\sigma}_3$ را ارضا می‌کنند، تعریف می‌شوند. $\hat{\sigma}_1$ و $\hat{\sigma}_2$ و $\hat{\sigma}_3$ مقادیر ویژه (تنش‌های اصلی) تانسور تنش موثر هستند. اگر برای هر مقدار فشار هیدرواستاتیک

$\bar{p}$ تعریف کنیم $K_c = \frac{\bar{q}_{(TM)}}{\bar{q}_{(CM)}}$ ، با شرط $\hat{\sigma}_{\max} < 0$ خواهیم داشت:

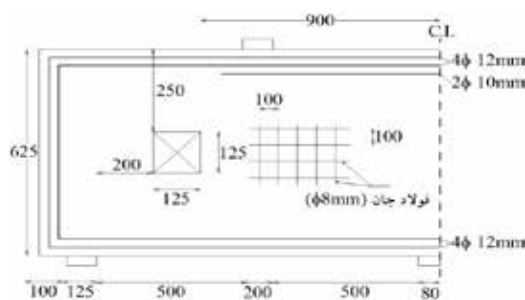
$$K_c = \frac{\gamma + 3}{2\gamma + 3} \quad (12)$$

که یک مقدار ثابت و مطابق با نتایج آزمایشگاهی لوبلینر است. بنابراین نصف‌النهارها به شکل خط راست هستند. بر خلاف ادعای اوتوسن (۱۹۹۷) [۸] که می‌گوید K_c از $0/5$ در فشار هیدرواستاتیک کم افزایش می‌یابد و در فشار هیدرواستاتیک بالا همواره کمتر از 1 می‌ماند، بسیاری از اطلاعات آزمایشگاهی با خط مستقیم بهتر هم‌خوانی دارند [۸]. شکل ۲ سطح تسلیم به کار رفته در نرم‌افزار Abaqus را در صفحه‌ی انحراف آور نشان می‌دهد.

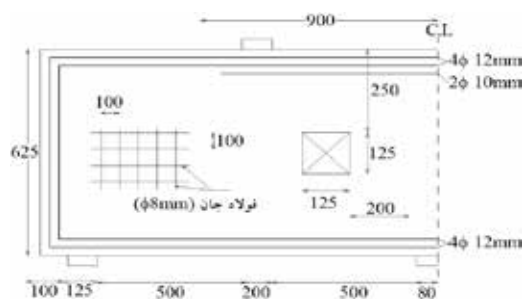


شکل ۲ سطح تسلیم در صفحه‌ی انحراف آور [۹]

پس در این قسمت دو تیر عمیق پیوسته دارای بازشو از مجموعه تیرهایی که به وسیله ریشی و آشور آزمایش شدند [۱۳]، مدل شدند. و مود شکست و نمودار بار-تغییر مکان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. هندسه‌ی این تیرها در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است (تمام ابعاد به میلی‌متر است). مشخصات فولاد این تیرها در جدول ۱ و مشخصات بتن در جدول ۲ بنابر مرجع [۱۳] آمده است.



شکل ۵ هندسه‌ی تیر AES [۱۳]



شکل ۶ هندسه‌ی تیر AIS [۱۳]

جدول ۱ مشخصات بتن تیرهای عمیق پیوسته

Beam N.	$f_{cu} (N/mm^2)$	$f'_c (N/mm^2)$	$f_r (N/mm^2)$
AES	۳۳٫۱	۲۶٫۵	۳٫۴
AIS	۲۶	۲۰٫۸	۳٫۵

تقاطع محور $\bar{p}$ ، ایجاد انحنا محلی زیاد می‌کند. همچنین پیوسته و هموار بودن این تابع، اطمینان می‌دهد که جهت جریان پلاستیک همواره به صورت یکتا تعریف می‌شود [۱۰، ۱۱، ۱۲].

۳- مشخصات مصالح فولادی

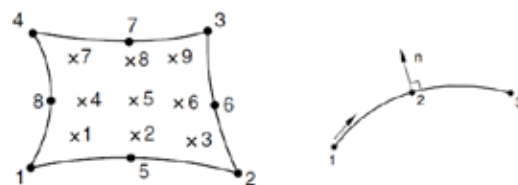
آرماتور فولادی به وسیله‌ی مدل پلاستیسیته‌ی کلاسیک فلزات موجود در Abaqus شبیه سازی شده است.

مشخصات اصلی این مدل عبارتند از:

- ۱- به کارگیری ضابطه‌ی تسلیم فن میسز.
- ۲- رفتار پلاستیک کامل، سخت شدگی ایزوتروپ یا سخت شدگی کینماتیک.
- ۳- قانون جریان وابسته با استفاده از شرط تسلیم فن میسز.

۴- مشخصات اجزاء محدود

در این پژوهش برای مدل‌سازی بتن از المان ۸ گرهی دو بعدی تنش مسطح که دارای ۹ نقطه انتگرال‌گیری است استفاده شده است. برای فولاد از المان خرپای یک بعدی سه گرهی استفاده شده است. این المان فقط نیروی محوری را انتقال می‌دهد. لازم به توضیح است که در مدل‌سازی اندرکنش بین فولاد و بتن از لغزش آرماتور در بتن چشم‌پوشی شده است.



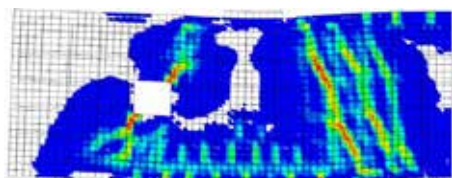
الف) المان خرپای دو بعدی ب) المان دو بعدی تنش مسطح

شکل ۴ المان‌های اجزاء محدود

۵- تایید درستی مدل‌سازی

قبل از ساخت مدل‌های اصلی و تحلیل آنها به وسیله نرم‌افزار لازم است که از درستی مدل‌سازی و فرضیات در نظر گرفته شده اطمینان حاصل کرد.

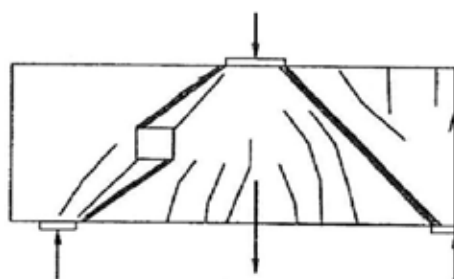
محدوده پلاستیک شده است و بتن در آنجا ترک خورده است. همان گونه که مشاهده می شود از نظر مود شکست و نمودار رفتاری انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.



الف) آسیب دیدگی کششی (خروجی نرم افزار)



ب) کرنش پلاستیک بیشینه (خروجی نرم افزار)



ج) مود شکست تیر در آزمایشگاه [۱۳]

شکل ۹ مود شکست تیر AES

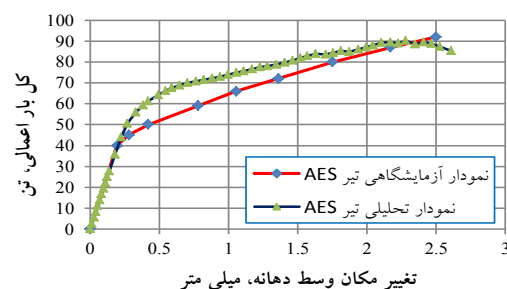
۶- مدل های المان محدود

در این مقاله رفتار تیرهای عمیق دارای بازشو بررسی شده است. تیرها در دو گروه با ابعاد مختلف مدل شدند. گروه اول دارای ارتفاع ۷۵۰ mm و دهانه ۲۰۰۰ mm خالص ۱۵۰۰ mm و گروه دوم دارای ارتفاع ۳۵۰۰ mm و دهانه خالص ۳۵۰۰ mm هستند.

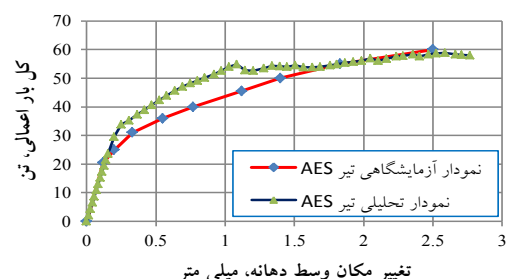
جدول ۲ مشخصات میلگرد تیرهای عمیق پیوسته

	آرماتور طولی اصلی		آرماتور جان	
	پایین	بالا	افقی	عمودی
نام تیر	f_y (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)
AES و AIS	۵۱۰	۵۹۰	۴۰۰	۴۰۰

در اشکال ۷ و ۸ نمودارهای بار-تغییر مکان این دو تیر نشان داده شده است.

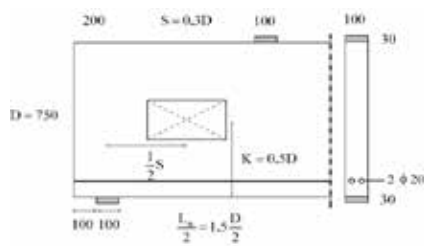


شکل ۷ نمودار بار-تغییر مکان تیر AES

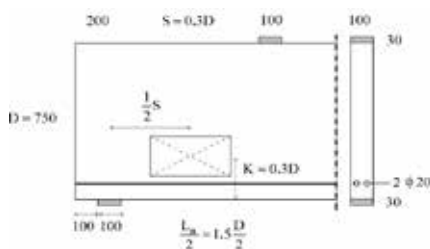


شکل ۸ نمودار بار-تغییر مکان تیر AIS

در شکل ۹ مود شکست تیر AES و در شکل ۱۰ مود شکست تیر AIS نشان داده شده است. در این شکل ها جهت عمود بر بردارهای کرنش پلاستیک بیشینه نشان دهنده جهت ترک خوردگی است. و آسیب دیدگی کششی نیز نواحی را نشان می دهد که کرنش کششی بتن از حد الاستیک گذشته و وارد



الف) محل بازشو در مرکز



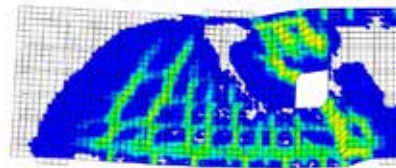
الف) محل بازشو در پایین

شکل ۱۱ هندسی کلی تیرهای مدل شده

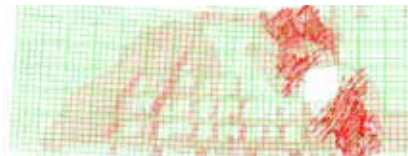
در تیرهای مدل شده دو نوع بازشو از نظر اندازه مورد استفاده قرار گرفته است. بازشوی کوچک طول ۲۲۵ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm و بازشوی بزرگ طول ۳۵۰ mm و ارتفاع ۱۹۰ mm دارد. مقدار و آرایش آرماتورهای طولی اصلی همه‌ی تیرها یکسان است و از نظر آرایش و مقدار آرماتور جان به چهار گروه ۱، ۲، ۳ و ۴ تقسیم شده‌اند. گروه ۱ چیدمان افقی، گروه ۲ چیدمان قائم، گروه ۳ چیدمان شبکه و گروه ۴ چیدمان مورب است. بنابراین اسم‌گذاری مدل‌های المان محدود متشکل از سه قسمت خواهد بود. بخش اول اندازه‌ی بازشو (S و L) را نشان می‌دهد، بخش دوم نشان دهنده‌ی محل بازشو در ارتفاع تیر عمیق است (T برای بالا، M برای وسط و B برای پایین) و در نهایت قسمت سوم نشانگر نوع چیدمان آرماتور جان است (۱، ۲، ۳ و ۴).

۲-۱-۶- مشخصات مصالح

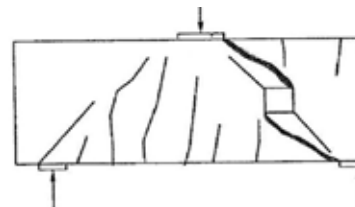
در تمام تیرها مقاومت فشاری بتن $36/8$ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته بتن $28511/6$ مگاپاسکال و مقاومت کششی $3/94$ مگاپاسکال است. و تمام آرماتورها تنش



الف) آسیب دیدگی کششی (خروجی نرم افزار)



ب) کرنش پلاستیک بیشینه (خروجی نرم افزار)



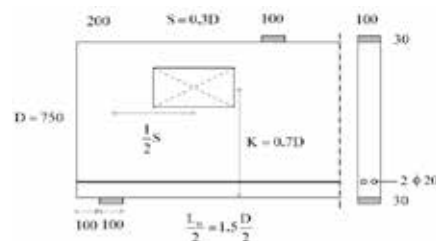
ج) مود شکست تیر در آزمایشگاه [۱۳]

شکل ۱۰ مود شکست تیر AIS

۶-۱- تیرهای عمیق دارای بازشو گروه اول

۶-۱-۱- هندسی مدل‌های المان محدود

در این بخش مدل‌های المان محدود متشکل از ۲۴ تیر عمیق است. ارتفاع و ضخامت تمام تیرها یکسان و به ترتیب ۷۵۰ mm و ۱۰۰ mm است. هندسه کلی این تیرها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. پارامتر K محل بازشو در ارتفاع را تعیین می‌کند. تمام تیرها دارای فولاد خمشی اصلی 20ϕ و فولاد جان 10ϕ است.



الف) محل بازشو در بالا

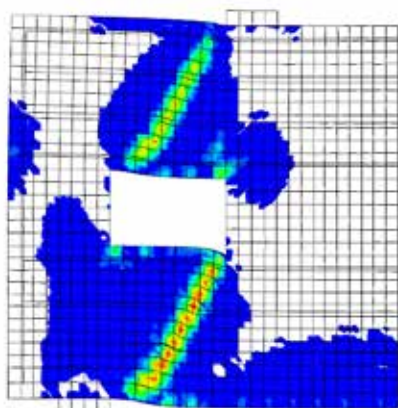
۶-۱-۳-۲- مود شکست

دو مود گسیختگی در تحلیل‌های گروه اول مشاهده شد:

۱- گسیختگی ناشی از ترک‌های قطری جان.

۲- لهیدگی.

در بیشتر مدل‌ها گسیختگی ناشی از ترک‌های قطری جان جان است که در بالا و پایین بازشو شکل می‌گیرند، که گوشه‌ی بازشو را به تکیه‌گاه یا محل اعمال بار وصل می‌کنند. در شکل ۱۴ پارامتر آسیب‌دیدگی کششی برای تیر S-M-۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که می‌بینیم دو ترک قطری اصلی گوشه‌ی بازشو را به محل تکیه‌گاه و محل اعمال بار وصل کرده‌اند و در آخر منجر به شکست شده‌اند. بنابراین همان‌گونه که در بخش ۶-۱-۳-۴ روی نمودارها نشان داده خواهد شد رفتار تیرهایی که فقط آرماتور افقی دارند ترد و مقاومت نهایی آنها کم است. اما با تغییر نوع آرماتور از پیشروی این ترک‌های قطری جلوگیری شده و فرایند ترک‌خوردگی در محل‌های دیگری شروع می‌شود و رفتار تیر نرم‌تر و مقاومت نهایی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۵ مود شکست تیر S-M-۳ نشان داده شده است. که این تیر دارای آرماتور نوع ۳ یعنی آرماتور شبکه‌ای است.



شکل ۱۴ مود شکست تیر S-M-۱ نشان داده شده به وسیله‌ی آسیب دیدگی کششی

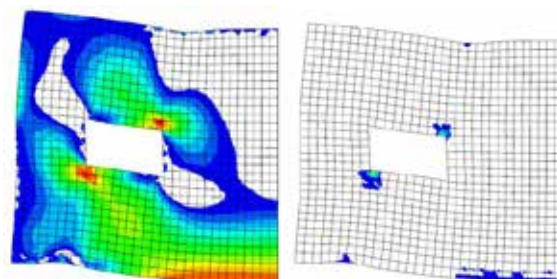
تسلیم ۴۳۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال دارند.

۶-۱-۳-۳- نتایج

در این قسمت نتایج تحلیل مدل‌ها به وسیله‌ی نرم‌افزار آورده شده است و سعی بر توضیح و تفسیر آن‌ها خواهد بود. مواردی که بررسی خواهند شد عبارتند از: اولین ترک خوردگی، مود شکست تیرها، مقایسه بارهای گسیختگی و نمودارهای بار تغییر-مکان.

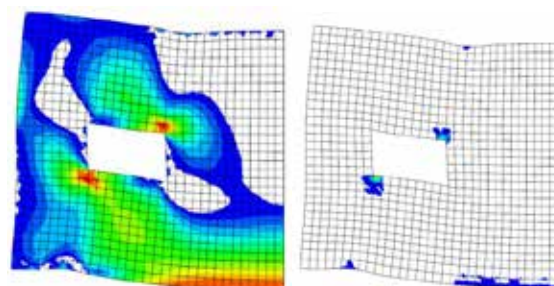
۶-۱-۳-۱- اولین ترک خوردگی

در تمامی تیرها اولین ترک‌ها در گوشه‌های بازشو ایجاد شدند. اولین ترک‌خوردگی در تیر S-M-۳ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. هم‌زمان با گسترش این ترک‌ها، ترک‌های خمشی در وسط دهانه ایجاد شدند. در شکل ۱۳ شکل‌گیری ترک‌های خمشی این تیر نشان داده شده است.



الف) کانتور تنش کششی ب) آسیب دیدگی کششی

شکل ۱۲ اولین ترک‌خوردگی در تیر S-M-۳

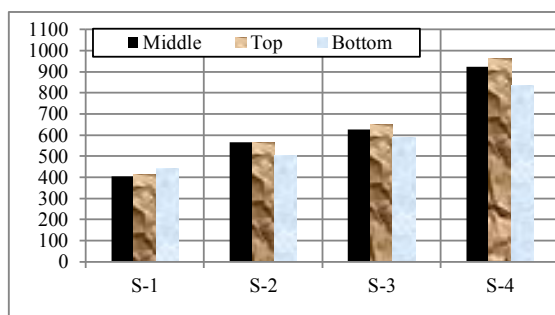


الف) کانتور تنش کششی ب) آسیب دیدگی کششی

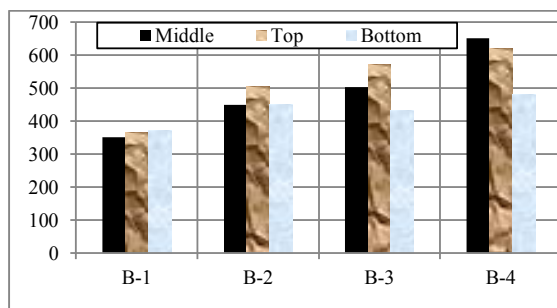
شکل ۱۳ ایجاد اولین ترک‌های خمشی در تیر S-M-۳

۶-۱-۳-۳- مقایسه ی بارهای گسیختگی

در شکل ۱۷ و ۱۸ تاثیر محل بازشو روی مقاومت نهایی بررسی شده است. همان گونه که دیده می شود محل بازشو تاثیر زیادی روی مقاومت نهایی ندارد. در حالت بازشوی کوچک بیشترین اختلاف ۱۳٪ و کمترین اختلاف ۰/۳٪ است و در حالت بازشوی بزرگ بیشترین اختلاف ۲۶٪ و کمترین اختلاف ۰/۳٪ است. ولی در کل نمی توان قانون خاصی برای تغییر مقاومت با تغییر محل بازشو در نظر گرفت.

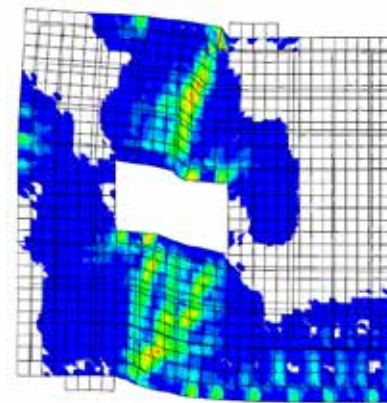


شکل ۱۷ تاثیر محل بازشو روی مقاومت تیرهای با بازشوی کوچک



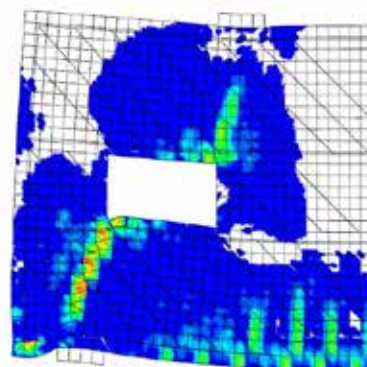
شکل ۱۸ تاثیر محل بازشو روی مقاومت تیرهای با بازشوی بزرگ

با مراجعه به شکل ۱۹ می توان اثر چیدمان آرماتور جان و اثر اندازه ی بازشو را دید. با افزایش اندازه ی بازشو ظرفیت تمام تیرها کاهش یافته است. که این کاهش بیشینه ۴۲٪ و کمینه ۱۰٪ است. چیدمان آرماتور تاثیر زیادی روی مقاومت نهایی دارد. که به ترتیب چیدمان افقی، قائم، شبکه و مورب باعث بیشترین افزایش در مقاومت نهایی می شوند.

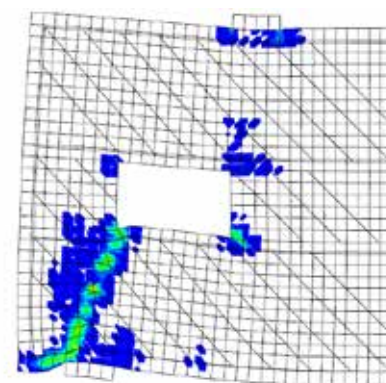


شکل ۱۵ مود شکست تیر S-M-۳

در شکل ۱۶ یک نمونه لهیدگی محل تکیه گاه نشان داده شده است.

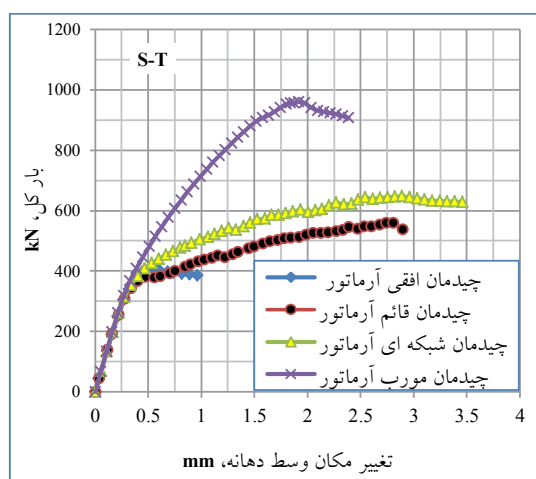


الف) آسیب دیدگی کششی

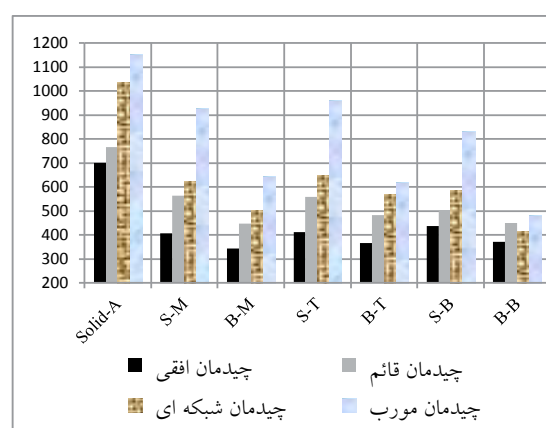


ب) آسیب دیدگی فشاری (خردشدگی بتن)

شکل ۱۶ مود شکست تیر S-M-۳



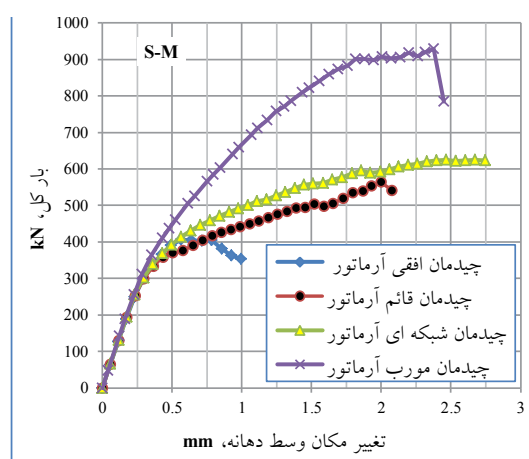
شکل ۲۱ نمودار بار-تغییر مکان تیرهای گروه S-T



شکل ۱۹ مقایسه تاثیر چیدمان آرماتور روی مقاومت نهایی

۶-۳-۴- رفتار بار تغییر مکان

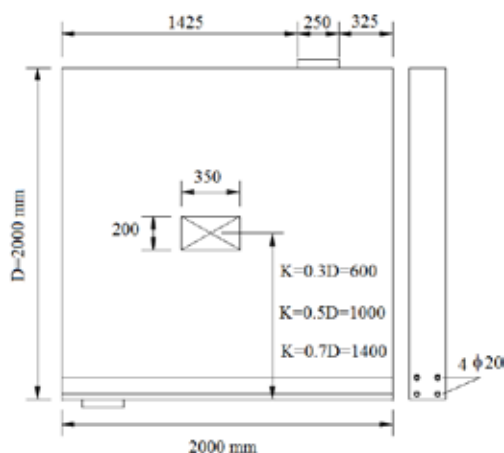
چند نمودار بار تغییر مکان برای نمونه در اشکال ۲۰ و ۲۱ آمده است. همان گونه که دیده می شود نوع چیدمان آرماتور جان تاثیر زیادی روی شکل پذیری و مقاومت این تیرها دارد.



شکل ۲۰ نمودار بار-تغییر مکان تیرهای گروه S-M

K نشان دهندهی محل بازشو است. مقدار و آرایش آرماتورهای طولی اصلی همه ی تیرها یکسان است و از نظر آرایش و مقدار آرماتور جان به چهار گروه ۱، ۲، ۳ و ۴ تقسیم شده اند. گروه ۱ چیدمان افقی، گروه ۲ چیدمان قائم، گروه ۳ چیدمان شبکه ای و گروه ۴ چیدمان مورب است. بنابراین اسم گذاری مدل های المان محدود متشکل از دو قسمت خواهد بود. بخش اول نشان دهندهی محل بازشو در ارتفاع تیر عمیق است (T برای بالا، M برای وسط و B برای پایین) و در قسمت دوم نشانگر نوع چیدمان آرماتور جان است (۱، ۲، ۳ و ۴).

تمام تیرها دارای فولاد خمشی اصلی ۳۴ و فولاد جان ۱۸ هستند. با انتخاب این مقادیر درصد فولاد نسبی در تیرهای عمیق با ابعاد کوچک و بزرگ برابر می شود.



شکل ۲۲ هندسه ی تیرهای عمیق بتن مسلح با ابعاد بزرگ دارای بازشو

۶-۲- تیرهای عمیق دارای بازشو گروه دوم

۶-۲-۱- هندسه ی مدل های المان محدود

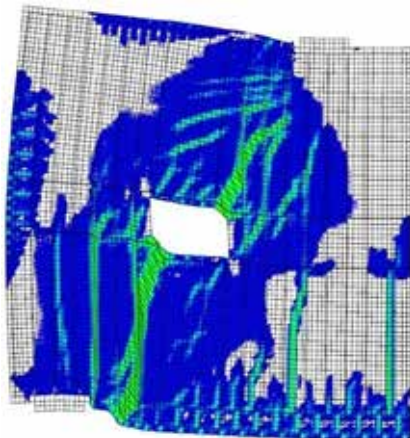
برای شبیه سازی تیرهای عمیق موجود در سازه های واقعی ۱۲ تیر عمیق بزرگ با ارتفاع ۲۰۰۰ mm و دهانه ی خالص ۳۵۰۰ mm و ضخامت ۲۲۰ mm مدل شدند. هندسه ی کلی این تیرها در شکل ۲۲ نشان داده شده است. در این قسمت نیز بازشو در سه محل بالا، پایین و وسط تعبیه شده است. پارامتر

۶-۲-۲- مشخصات مصالح

مشخصات مصالح بتنی و فولادی تیرهای این بخش مانند تیرهای بخش قبل که دارای ابعاد کوچک بودند، است. یعنی مقاومت فشاری بتن $۲۸۵۱۱/۶$ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته بتن $۲۸۵۱۱/۶$ مگاپاسکال و مقاومت کششی $۳/۹۴$ مگاپاسکال است. و تمام آرماتورها تنش تسلیم ۴۳۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال دارند.

۶-۲-۳- بررسی نتایج

در این بخش مود شکست تیرها، بارهای گسیختگی و نمودار رفتاری بار-تغییر مکان تیرها بررسی خواهند شد.



شکل ۲۳ مود شکست برشی در تیر عمیق با آرماتور قائم

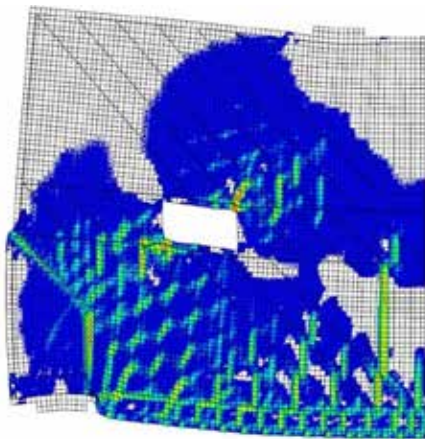
۶-۲-۳-۱- مود شکست تیرهای با گروه دوم

سه مود گسیختگی در تحلیل‌های گروه دوم مشاهده شد:

۱- گسیختگی ناشی از ترک‌های قطری جان.

۲- لهیدگی.

۳- شکست خمشی.

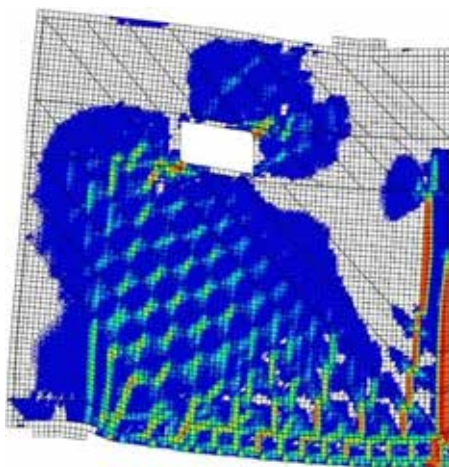


شکل ۲۴ لهیدگی تکیه‌گاه در تیر عمیق با آرماتور مورب

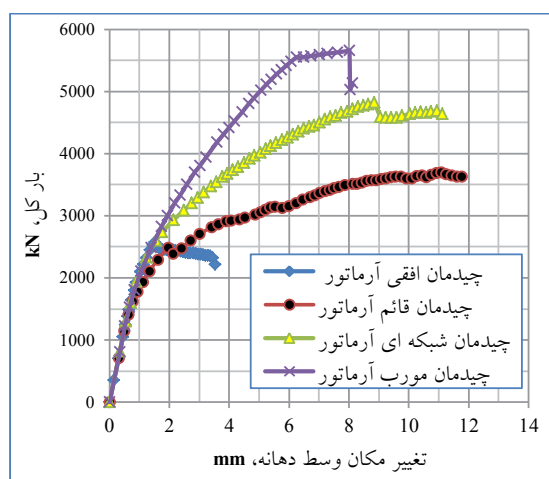
همان‌گونه که در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ دیده می‌شود مود شکست برشی و لهیدگی این تیرها مانند تیرهای گروه اول با ابعاد کوچک است. اما در این تیرها مود گسیختگی خمشی نیز ایجاد می‌شود. علت این نوع از شکست این است که نسبت دهانه‌ی برش به عمق در این تیرها بیشتر از تیرهای گروه اول است. در تیرهای گروه اول این نسبت $۰/۴۳$ و در تیرهای گروه دوم $۰/۶۵$ است. لذا لنگر خمشی در وسط دهانه‌ی این تیرها بیشتر است. در حالت چیدمان مورب آرماتورها که ظرفیت برشی تیر بسیار بالا است دو مود گسیختگی لهیدگی تکیه‌گاه و شکست خمشی رخ می‌دهد. در شکل ۲۵ یک نمونه از شکست خمشی تیرهای عمیق با ابعاد بزرگ دارای بازشو نشان داده شده است.

۶-۲-۳-۲- مقایسه بارهای گسیختگی

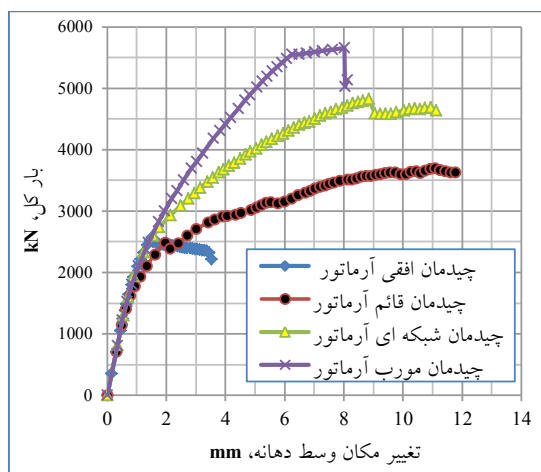
در شکل ۲۶ تاثیر محل بازشو روی مقاومت نهایی بررسی شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود مانند تیرهای عمیق با ابعاد کوچک محل بازشو تاثیر زیادی روی مقاومت نهایی ندارد. بیشترین اختلاف $۷/۳\%$ و کمترین اختلاف $۰/۴۷\%$ است.



شکل ۲۵ شکست خمشی در تیر عمیق با آرماتور مورب



شکل ۲۸ نمودار بار-تغییر مکان برای حالت بازشو در وسط

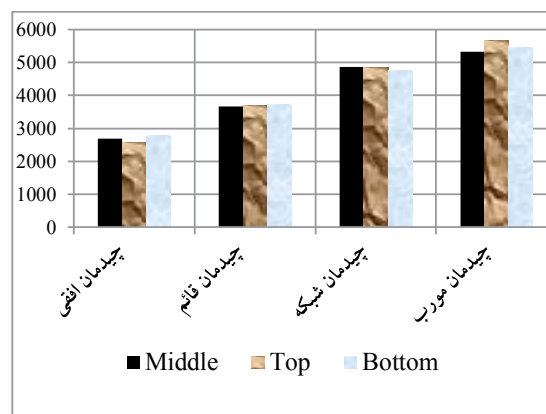


شکل ۲۹ نمودار بار-تغییر مکان برای حالت بازشو در بالا

۷- نتیجه گیری

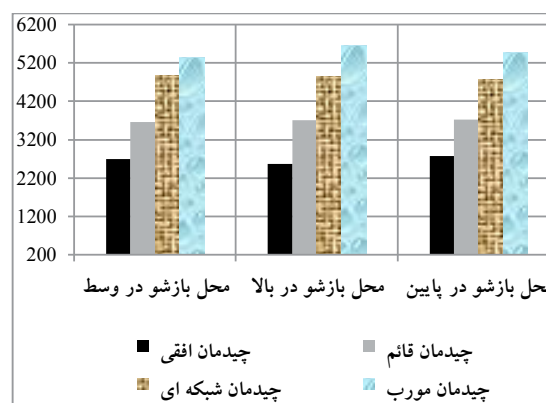
از مدلسازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده نتایج کلی زیر حاصل شد:

- ۱- اولین ترک‌ها در تمامی تیرها در گوشه‌های بازشو رخ می‌دهند و با ادامه بارگذاری به طرف محل اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها گسترش پیدا می‌کند.
- ۲- دو مود گسیختگی در تحلیل‌های گروه اول که ارتفاع ۷۵۰ mm و دهانه‌ی خالص ۱۵۰۰ mm داشتند، مشاهده شد: گسیختگی ناشی از ترک‌های قطری جان و لهدگی.
- ۳- سه مود گسیختگی در تحلیل‌های گروه دوم که



شکل ۳۰ تاثیر محل بازشو روی مقاومت تیرهای با ابعاد بزرگ

با مراجعه به شکل ۲۷ می‌توان اثر چیدمان آرماتور جان را دید. چیدمان آرماتور تاثیر زیادی روی مقاومت نهایی و شکل‌پذیری دارد. به ترتیب چیدمان افقی، قائم، شبکه و مورب باعث بیشترین افزایش در مقاومت نهایی می‌شوند. که این نتیجه در حالت تیرهای عمیق با ابعاد کوچک نیز گرفته شد.



شکل ۳۱ مقایسه تاثیر چیدمان آرماتور روی مقاومت نهایی تیرهای با ابعاد بزرگ

۶-۳-۳-۲- رفتار بار تغییر مکان

در اشکال ۲۸ و ۲۹ دو نمونه نمودار بار-تغییر مکان آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود چیدمان افقی مقاومت و شکل‌پذیری کمی دارد. که با تغییر چیدمان به حالت قائم، شبکه‌ای یا مورب این شکل‌پذیری و مقاومت کم برطرف شده است.

[۳] عربزاده، ابوالفضل؛ غلامی، مصطفی؛ «تحلیل غیر خطی تیرهای عمیق بتن مسلح دو سر ساده»؛ مجله عمران مدرس، ۱۳۸۶، شماره ۲۹، صفحه‌ی ۱-۹.

[4] K. H. Tan, K. Tong and C. Y. Tang, "Consistent Strut-and-Tie Modeling of Deep Beams with Web Opening", Magazine of Concrete Research, 2003, Vol55, No.1.

[5] Zihai, Shi, 2009, "Crack Analysis in Structural Concrete", Elsevier Ltd.

[6] J. B. Mander, et al. "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol114, No8, August 1988.

[7] J. Lubliner, "A Plastic-Damage Model For Concrete". Int. J. Solid Structures, Vol25, No3. PP 299-326, 1989.

[8] J. Lee, G. L. Fenves, "Plastic-Damage model for cyclic loading of concrete structures", Journal of engineering mechanics, vol. 124, No. 8, August 1998, P. 892-900.

[9] ABAQUS Analysis user's manual, version 6.9.1.

[10] Shailendra, K and Sudhirkumar, V. B, "Concrete Fracture Models and Applications", Springer-Verlag Berlin, 2011.

[11] S. K. Jain, "Introduction Theories of Plasticity", 1989. Printed by Blacksburg, Virginia.

[12] W. F. Chen and D. J. Han, "Plasticity For Structural Engineers", Springer-Verlag New York Inc, 1988.

[13] Ashour, A. F and G. Rishi, "Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams with Web Openings", ACI Structural Journal, 2000, Vol.97, No.3, PP. 418-426.

ارتفاع ۲۰۰۰ mm و دهانه‌ی خالص ۳۵۰۰ mm داشتند، مشاهده شد: گسیختگی ناشی از ترک‌های قطری جان، شکست خمشی و لهیدگی.

۴- در تیرهایی که در آنها آرماتور مایل جان بکار رفته است به علت مقاومت برشی بالا احتمال شکست خمشی و یا لهیدگی زیاد است. که شکست خمشی فقط در تیرهای عمیق با ابعاد بزرگ (ارتفاع ۲۰۰۰ میلی متر و دهانه‌ی خالص ۳۵۰ mm رخ می‌دهد.

۵- تیرهای دارای آرماتور قائم نسبت به تیرهای دارای آرماتور افقی مقاومت نهایی بیشتری دارند.

۶- محل بازشو تأثیر کمی روی مقاومت نهایی دارد. برای تیرهای گروه اول بیشینه اختلاف ۱۳٪ و برای تیرهای گروه دوم ۷/۳٪ است.

۷- با افزایش ابعاد بازشو مقاومت تیرهای عمیق بتن مسلح دارای بازشو کاهش می‌یابد. بیشینه این کاهش ۴۳٪ و کمینه آن ۱۰٪ است.

۸- به ترتیب بیشترین افزایش مقاومت را چیدمان آرماتور جان مورب، شبکه، قائم و افقی نسبت به حالت بدون آرماتور جان دارند. به گونه‌ای که در تیرهای عمیق کوچک مقاومت چیدمان مورب آرماتور به‌طور متوسط ۱/۶۷ برابر چیدمان افقی است. و در تیرهای عمیق بزرگ این عدد ۲/۰۵ است.

۹- برای جلوگیری از گسترش ترک‌های قطری که در نهایت منجر به شکست می‌شوند، چیدمان آرماتور جان مورب و قائم بسیار موثر هستند.

۸- منابع

[۱] آیین‌نامه بتن ایران «آبا»، تجدید نظر اول، چاپ ششم، ۱۳۸۲.

[۲] عربزاده، ابوالفضل؛ «رفتار برشی و خمشی تیرهای عمیق پیوسته بتن مسلح»؛ مجله عمران مدرس، ۱۳۸۱، شماره ۸، صفحه‌ی ۲۵-۳۴.