

## اثر ارتفاع در مقاومت برشی تیرهای عمیق بدون آرماتور برشی با بتن معمولی و سبک

ابوالفضل عربزاده<sup>۱\*</sup>، امین نوری سول<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه سازه، دانشگاه تربیت مدرس  
<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۳-۰۶-۱۸  
بازنگری: ۱۳۹۴-۱۱-۰۹  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

### کلمات کلیدی:

تیر عمق  
اثر اندازه  
بتن سبک  
روش خرپایی  
ظرفیت برشی

**خلاصه:** یکی از پارامترهای مهم در تعیین ظرفیت برشی تیرها، ارتفاع تیر می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر ارتفاع در مقاومت برشی تیرهای عمیق با بتن سبک و مقایسه با بتن معمولی دو سری تیر که شامل ۸ تیر عمیق با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ بود ساخته شد. سری اول شامل ۴ تیر به ارتفاع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر بود که در ساخت آنها از بتن معمولی استفاده شد نمونه‌های سری دوم نیز شبیه سری اول بود با این تفاوت که در ساخت آنها از گسیختگی مستقل از ارتفاع و نوع بتن می‌باشد. الگوی گسترش ترک‌ها بیشتر تحت تأثیر ارتفاع است و تقریباً مستقل از نوع بتن می‌باشد. مقاومت برشی نرمالیزه شده در هر دو گروه از تیرها با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با روش‌های خرپایی موجود در آیین‌نامه‌ها نشان می‌دهد که تمام روش‌ها در تیرهای با ارتفاع کم محافظه‌کارانه بوده و با افزایش ارتفاع از حاشیه ایمنی کاسته می‌شود. نتایج آیین‌نامه CSA در مورد تیرها با ارتفاع ۹۰ cm غیر محافظه‌کارانه است که این امر نیاز به تحقیق بیشتری دارد.

### ۱- مقدمه

یکی از اعضای سازه‌های بتنی تیرها می‌باشند که با توجه به نسبت دهانه به ارتفاع، به دو دسته تیرهای کم عمق (معمولی) با نسبت زیاد دهانه برشی به ارتفاع و تیرهای عمیق با نسبت کم دهانه به ارتفاع ( $\frac{1}{4} < \frac{h}{l}$ ) تقسیم‌بندی می‌شوند. نمونه‌های تیر عمیق را می‌توان در مخازن و سیلوهای بتن مسلح، دیوارهای برشی، دال‌های تا شده (پلیسه‌ای) و ساختمان‌های بلند مشاهده کرد. در سکوی دریایی از فونداسیون‌های جعبه‌ای (کیسون) که دیواره آن به صورت تیر عمیق می‌باشد استفاده می‌گردد [۱]. در ساختمان‌های بلند نیز به منظور بیشتر کردن فاصله بین ستون‌ها در یک طبقه خاص از تیر عمیق استفاده می‌شود. در آیین‌نامه‌ی ACI-318-11 تیر عمیق به عضو اطلاق می‌شود که در یک وجه بارگذاری شده و در وجه مقابل روی تکیه‌گاه قرار گرفته باشد و علاوه بر این، یکی از دو شرایط زیر را ارضا نماید [۲]:

۱. طول دهانه آزاد<sup>۱</sup> ( $L_n$ ) مساوی و یا کمتر از چهار برابر عمق

کلی باشد.

۲. بارهای متمرکز در فاصله‌ی کمتر از دو برابر عمق از لبه‌ی

تکیه‌گاه قرار داشته باشد.

کشور ایران یکی از مناطق زلزله‌خیز محسوب می‌شود و بحث سبک‌سازی جهت افزایش مقاومت در برابر زلزله از اهمیت بخصوصی برخوردار است. استفاده از بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در سازه‌ها، همواره دارای مشکل وزن زیاد بوده است.

بتن‌های سبک سازه‌ای، بتن‌هایی هستند که علی‌رغم دارا بودن چگالی کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگاپاسکال دارند. ساخت این بتن‌ها صرفاً با استفاده از سنگدانه‌های مقاوم و سبک امکان‌پذیر است. بیشترین مقاومت بتن با سبکدانه وقتی حاصل می‌شود که از سبکدانه‌های سازه‌ای که مقاومت

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: arabzade@modares.ac.ir

1 Clear span



آن برابر یا بیشتر از مقاومت ملات سیمان باشد برای سبک‌سازی بتن استفاده گردد.

Kani براساس آزمایشاتی که بر روی ۴ سری تیر بدون خاموت که دارای مقاومت بتن و درصد آرماتور یکسان و عمق‌های ۱۵، ۳۰، ۶۱، ۱۲۱ سانتی‌متر انجام داد نتیجه گرفت که با افزایش عمق تیر مقاومت برشی کاهش می‌یابد [۳]. Shioya و همکاران نیز براساس آزمایشاتی که بر روی تیرها با عمق ۱۰ تا ۳۰۵ سانتی‌متر انجام دادند به همین نتیجه رسیدند [۴]. برای توضیح این پدیده Reineck و Collins و همکاران فرض کردند که عرض ترک در لحظه گسیختگی با عمق تیر متناسب است [۵و۶]. از آنجاییکه با افزایش عرض ترک نیروی برشی که توسط سطح ناصاف و قفل‌وبست بین دانه‌ای انتقال می‌یابد، کاهش می‌یابد بنابراین تیرها با عمق زیاد دارای ظرفیت برشی کمتری هستند. Bazant برای توضیح اثر اندازه تئوری انرژی شکست آزاد شده را پیشنهاد داد [۷].

Yang و همکاران نشان دادند که در نسبت‌های دهانه برشی به عمق کم شدت پدیده اثر اندازه به دلیل رفتار ترد اعضای فشاری<sup>۱</sup> بیشتر می‌شود [۸و۹]. Tang و Cheng نشان دادند که پدیده اثر اندازه باید در روش خرپا<sup>۲</sup> برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای عمیق در نظر گرفته شود [۱۰].

به‌طور کلی انتقال قسمت عمده‌ای از نیروی برشی به تکیه‌گاه‌ها توسط قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها صورت می‌گیرد. عرض ترک‌ها، اندازه سنگدانه‌ها و مقاومت بتن از جمله پارامترهای تأثیرگذار در این پدیده هستند. این اثر وقتی عرض ترک کمتر باشد می‌تواند تأثیر بیشتری داشته باشد. از آنجاییکه عرض ترک متناسب با تنش در آرماتور است که به درصد آرماتور طولی بستگی دارد، با افزایش درصد میلگرد طولی اثر قفل‌وبست بین دانه‌ها بیشتر می‌شود [۱۱]. به‌دلیل اینکه اثر اندازه تحت تأثیر قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها است و در بتن سبک ترک از بین سنگدانه عبور می‌کند، همچنان جای بحث دارد که اثر اندازه به چه نحوی در تیرهای عمیقی که در ساخت آنها از بتن سبک استفاده شده در نظر گرفته شود.

## ۲- هدف از تحقیق

در سال‌های اخیر با پیشرفت روش‌های ساخت ایده‌ی استفاده از

1 strut  
2 Strut-and-tie

تیرهای عمیق ساخته شده با بتن سبک مطرح شده است، این عمل باید با شناخت کامل از رفتار بتن سبک صورت پذیرد. چون اکثر کارهای تحقیقاتی و عملی روی بتن معمولی صورت گرفته است این امر هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. ضمن اینکه اخیراً مدل‌های خرپایی برای تحلیل و طراحی تیرهای عمیق در آیین‌نامه‌ها استفاده می‌شوند که صحت آنها برای بتن سبک باید مورد بررسی قرار گیرد. اهداف این تحقیق به‌صورت زیر می‌باشد:

۱. بررسی اثر اندازه‌ی نمونه در مقاومت برشی تیرهای عمیق با بتن سبک و بتن معمولی
۲. بررسی تأثیر ارتفاع در مد گسیختگی تیرهای عمیق با بتن سبک و معمولی
۳. مقایسه رفتار تیرهای عمیق با بتن سبک و معمولی
۴. بازنگری مکانیزم انتقال برش و مدهای گسیختگی برای تیرهای عمیق بتنی دوسر ساده بدون خاموت
۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روش خرپای آیین‌نامه‌های ACI، EC۲ و CSA
۶. بررسی صحت روش‌های ارائه شده برای تیرهای عمیق با بتن سبک

## ۳- روش خرپا

در ۳۰ سال گذشته تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود مدل خرپا بگونه‌ای انجام شده که آن به ابزار مفیدی برای طراحان تبدیل کرده است. مدل خرپا یک قالب مفهومی ساده و ایمن برای بررسی مکانیسم انتقال بار در اعضای بتن مسلح عمیق فراهم می‌کند. مدلسازی خرپایی یکی از روشهای طراحی سازه‌های بتن مسلح معمولی و پیش‌تنیده است که با تبدیل حالات پیچیده تنش به مجموعه‌ای از مسیرهای ساده تنش باعث ساده‌سازی انواع سازه‌های بتنی پیچیده می‌گردد. اعضای دو نیرویی یا خرپایی که نیروهای فشاری را انتقال می‌دهند، عضو فشاری، اعضای انتقال دهنده نیروهای کششی، عضو کششی و محل تلاقی اعضای کششی و فشاری نیز گره نامیده می‌شود. به مجموعه اعضای فشاری، کششی و گره‌ها، مدل یا مکانیسم خرپایی گفته می‌شود. ظرفیت سازه پیچیده جایگزین شده با مدل خرپایی، به راحتی با تحلیل استاتیکی مدل خرپای جایگزین قابل محاسبه خواهد بود.

آیین نامه ACI 318 از سال ۲۰۰۲ به بعد اضافه گردیده است.

در رابطه ۱ مقاومت فشاری مؤثر بتن ( $f_{ce}$ ) مدل خرابایی طبق

آیین نامه به صورت زیر بیان می شود:

$$f_{ce} = 0.85\beta_s\lambda f'_c \quad (5)$$

$f'_c$  مقاومت فشاری بتن (براساس آزمایش نمونه استوانه‌ای

استاندارد)،  $f_{ce}$  مقاومت فشاری مؤثر بتن، ضریب  $\beta_s$  نیز در واقع ضریب کاهش مقاومت بتن می باشد که براساس شکل و حجم هندسی

اعضای فشاری تعریف می شود که برای تیرهای بدون خاموت  $0.6/\lambda$  می باشد. برای بتن معمولی  $\lambda=1$ ، برای بتن سبک با ماسه  $\lambda=0.85$  می باشد.

### ۲-۳- آیین نامه کانادا CSA [۱۲]

مطابق آیین نامه کانادا CSA A23.3-04 مقاومت اعضای فشاری

با استفاده از تنش فشاری مؤثر بتن  $f_{ce}$  تعیین می شود که از معادله ۶ به دست می آید. براساس نظریه اصلاح شده میدان فشاری محاسبه می شود.

$$f_{ce} = \frac{f'_c\lambda}{0.8+17\varepsilon_1} \leq 0.85f'_c\lambda \quad (6)$$

$\varepsilon_1$  کرنش اصلی کششی موجود در اعضای فشاری می باشد که با

استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + (\varepsilon_s + 0.002) \cot^2 \alpha_s \quad (7)$$

$\alpha_s$  زاویه بین محور عضو فشاری و عضو کششی،  $\varepsilon_s$  کرنش

کششی فولاد (عضو کششی)  $\varepsilon_1$  کرنش کششی اصلی و  $f'_c$  مقاومت مشخصه بتن می باشد. پارامتر  $\lambda$  نیز برای در نظر گرفتن نوع بتن می باشد، در آیین نامه برای بتن معمولی  $\lambda=1$ ، برای بتن سبک با ماسه

$\lambda=0.85$  و برای بتن تماماً سبک  $\lambda=0.75$  را پیشنهاد شده است.

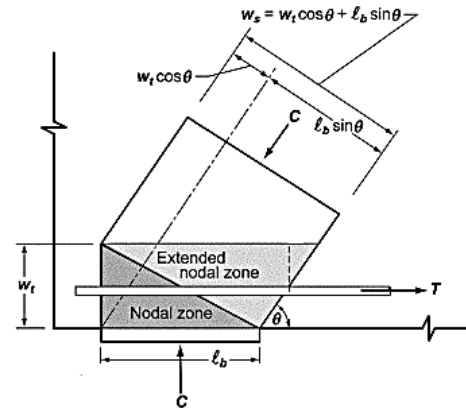
در تیرهای دو سر ساده برای تعیین  $\varepsilon_s$  می توان از فرمول زیر

استفاده کرد [۱۳].

$$\varepsilon_s = \frac{0.75\lambda f'_c W_t b_w}{E_s A_s} \leq \varepsilon_y \quad (8)$$

در صورتیکه  $\varepsilon_y$  و  $E_s$  کرنش تسلیم و مدول الاستیسیته

آرماتورهای طولی می باشند.



شکل ۱. ارتفاع گره  $w_t$  [۲]  
Fig. 1. node Height  $w_t$

براساس مدل خرپا مقاومت برشی تیرهای عمیق بدون آرماتور

برشی با توجه به مقاومت اعضای فشاری تعیین می شود که مقاومت

این اعضا از رابطه زیر به دست می آید.

$$v_n = f_{ce} b_w w_s \sin \theta \quad (1)$$

در صورتیکه  $b_w$  عرض تیر می باشد.

$w_s$  عرض مؤثر پایه های فشاری می باشد که براساس آیین نامه

ACI با توجه به رابطه زیر بدست می آید.

$$w_s = w_t \cos \theta + l_b \sin \theta \quad (2)$$

در صورتیکه  $l_b$  عرض ورقهای بارگذاری است که معمولاً در تیرها

برای بارگذاری و جلوگیری از لهیدگی از ورقهای فولادی استفاده

می شود. ارتفاع گره (محل تلاقی اعضای فشاری و کششی)

می باشد که طبق آیین نامه براساس رابطه زیر به دست می آید.

$$w_t = 2 \times (h - d) \quad (3)$$

در صورتیکه  $h$  ارتفاع تیر و  $d$  ارتفاع مؤثر می باشد.

و همچنین  $\theta$  زاویه بین عضو فشاری و عضو کششی می باشد که

می توان از رابطه زیر برای محاسبه  $\theta$  استفاده کرد.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{jd}{a} \right) \quad (4)$$

### ۱-۳- آیین نامه ACI 318-11 [۲]

ضوابط مربوط به مدل خرابایی با عنوان ضمیمه A به نسخه های

در گره‌ها به صورت زیر تعیین می‌شود

برای گره CCT  $\sigma_{Rd,max} = K_1 v f_{cd}$  برای گره CCC  $\sigma_{Rd,max} = K_2 v f_{cd}$  برای گره CTT  $\sigma_{Rd,max} = K_3 v f_{cd}$  که با توجه به آیین‌نامه مقادیر فاکتور  $k$  بصورت مقابل تعیین می‌شوند.  $k_1=1$ ،  $k_2=0.75$ ،  $k_3=0.85$  برای بتن سبک مقاومت فشاری بتن،  $0.4 + \frac{0.6\rho}{2200}$  ضرب می‌شود که  $\rho$  وزن مخصوص بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

### ۳-۴- مدل تان و همکاران [۱۰]

مدل خرابایی Tan و Cheng که اثر اندازه را نیز در نظر می‌گیرد بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$V_n = \frac{1}{\frac{\sin 2\theta_s}{f_t A_c} + \frac{1}{v f_c A_{str} \sin \theta_s}} \quad (12)$$

در صورتیکه  $A_c (= b_w h)$  سطح مقطع تیر،  $A_{str} (= b_w w_s)$  سطح مقطع عضو فشاری،  $f_t$  مقاومت کششی مؤثر بتن در عضو فشاری و  $\psi (= \xi, \zeta)$  فاکتوری که برای اعمال اثر اندازه در مقاومت عضو فشاری در نظر گرفته می‌شود.

با در نظر گرفتن اثر آرماتورهای طولی و آرماتورهای برشی  $f_t$  بصورت رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$f_t = \frac{2A_{s,y} \sin \theta_s}{A_c / (\sin \theta_s)} + \sum \frac{2A_{w,y} w \sin(\theta_s + \theta_w)}{A_c / (\sin \theta_s)} \cdot \frac{d_w}{d} + 0.5 \sqrt{f_c'} \quad (13)$$

در آیین‌نامه کانادا نیز مشابه ACI مقاومت حداکثر گره‌ها با توجه به تیپ‌بندی آنها (CCT, CCC یا CTT) تعریف شده، با این تفاوت که مقاومت نهایی گره‌ها از ضرب ضرائب ارائه شده در مقاومت فشاری کامل بتن  $f_c'$  به دست می‌آید در حالیکه در آیین‌نامه ACI مقاومت بتن به صورت کاهش یافته  $f_c' / 0.85$  می‌باشد.

### ۳-۳- آیین‌نامه اروپا (Eurocode2 (EN 1992-1-1) [۱۴]

قسمت ۶ آیین‌نامه اروپا (EN 1992-1-1) Eurocode2 در مورد نواحی از تیرها که نمی‌توان از روش برنولی استفاده کرد و در مورد روش تشابه خرابایی صحبت می‌کند.

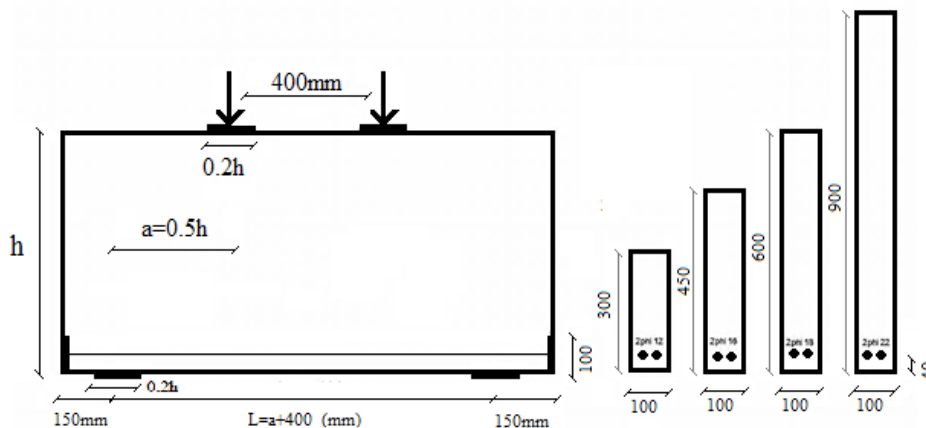
در این آیین‌نامه مقاومت اعضای بتنی فشاری با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ به دست می‌آید. معادله ۹ در طراحی مقاومت اعضای فشاری بدون تنش کششی عرضی استفاده می‌شود. معادله ۱۰ برای طراحی مقاومت اعضای فشاری در ناحیه فشاری ترک خورده همراه با تنش کششی عرضی استفاده می‌شود.

$$\sigma_{Rd,max} = f_{cd} \quad (9)$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0.6 v f_{cd} \quad (10)$$

$$v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (11)$$

$f_{ck}$  = مقاومت مشخصه فشاری بتن،  $f_{cd}$  = مقاومت فشاری بتن برای طراحی  $\gamma_c / f_{ck}$ ، ضریب اطمینان ۱/۵. مقاومت طراحی



شکل ۲. هندسه نمونه‌های ساخته شده  
Fig. 2. Geometry of made samples

شکل این اعضا تحت تأثیر ورق‌های تکیه‌گاهی می‌باشد. با توجه به دلیل ذکر شده و همچنین تحقیقات پیشین که نشان می‌داد که عرض ورق‌ها یکی از پارامترهای مهم در مقاومت برشی تیرها می‌باشند، عرض ورق‌های تکیه‌گاهی با افزایش ارتفاع تیر افزایش یافت و ۰/۲ ارتفاع تیر در نظر گرفته شد. در زیر نقاط بارگذاری به منظور افزایش مقاومت و جلوگیری از شکست موضعی تیرها، از یک سری آرماتورهایی به قطر ۶ mm به صورت قفسه استفاده شد. جهت جلوگیری از خرابی خمشی مقدار آرماتورهای طولی در تمامی تیرها برابر ۱٪ در نظر گرفته شد. در انتهای آرماتورها به منظور تأمین طول مهاری و همچنین تنظیم موقعیت دقیق آرماتورها از ورق‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰ cm به صورت مهار مکانیکی استفاده شد؛ به این صورت که میلگردها پس از قرار گرفتن در موقعیت خود به ورق جوش داده شدند. نمونه‌ها با توجه به بتن مصرفی به دو دسته کلی تقسیم شدند:

الف) سری N: شامل ۴ نمونه با ارتفاع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتیمتر که در ساخت آنها از بتن معمولی استفاده شد.  
ب) سری L: شامل ۴ نمونه با ارتفاع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتیمتر که در ساخت آنها از بتن سبک استفاده شد.  
مشخصات کامل نمونه‌ها در جدول ۱ ذکر شده است.

#### ۲-۴- مشخصات مصالح

در ساخت بتن سبک از بتن با سبکدانه و ماسه استفاده شد سبکدانه‌های استفاده شده از نوع لیاپور بودند که ماده اصلی برای تولید این سبکدانه شیل می‌باشد که از شرکت عمران پارس سیرجان [۱۶] تهیه شد. بزرگترین اندازه سنگدانه در هر دو نوع بتن ۱۰ میلیمتر و مدول نرمی ماسه نیز ۳/۳۵ می‌باشد. مشخصات مربوط به سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. طرح اختلاط بتن سبک و بتن معمولی به نحوی انتخاب شدند که مقاومت فشاری یکسانی داشته باشند. طرح اختلاط بتن سبک و معمولی مطابق جدول ۴ می‌باشد. در ساخت بتن سبک از فوق روان کننده استفاده شد. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ ساخت کارخانه داراب می‌باشد. میلگردهای مورد استفاده از نوع میلگردهای آجدار با قطرهای ۱۲، ۱۶، ۱۸ و ۲۲ بودند که مشخصات آنها در جدول ۳ ذکر شده است.

که در آن  $f_{yw}$  و  $f_y$  به ترتیب تنش تسلیم آرماتورهای طولی و آرماتورهای برشی،  $\theta_w$  زاویه بین آرماتور برشی با آرماتورهای طولی در محل برخورد با عضو فشاری و  $d_w$  فاصله سطح بالای تیر با محل برخورد آرماتور برشی با خط وسط عضو فشاری می‌باشد.

#### ۵-۳- عربزاده و همکاران [۱۵]

در سال ۲۰۰۹، عربزاده و همکاران یک روش جدید بر مبنای STM 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 بتن مسلح توسط دو مقاومت مستقل از هم ایجاد می‌شود.

در رابطه ارائه شده فرض شده که برش در تیرهای مورد مطالعه کنترل کننده است و مقاومت برشی نهایی از نوشتن رابطه تعادل در امتداد ترک قطری به دست آمده و مقاومت برشی نهایی مجموع مقاومت ایجاد شده توسط عضو فشاری و آرماتورهای جان در نظر گرفته شده است.  
رابطه ارائه شده برای محاسبه مقاومت برشی تیر عمیق بتن مسلح بر مبنای روش STM پیشنهادی به صورت زیر است:

$$V_u = \frac{f_c^{0.7}}{0.7 + 0.15\left(\frac{a}{d}\right)^2} A_{srt} \sin\theta + 0.09 \rho_p^{0.35} A_{wp} \cos\theta \quad (14)$$

که در آن  $f_c'$  مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای  $a$  طول دهانه برشی،  $A_{srt}$  سطح مقطع عضو فشاری و  $A_{wp}$  مساحت آرماتورهای برشی معادل متعامد بوده و برابر است با:

$$A_{wp} = A_v \cos\theta + A_h \sin\theta = \rho_p A_{str(t)} \quad (15)$$

#### ۴- برنامه آزمایشگاهی

##### ۴-۱- جزئیات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۸ مورد تیر عمیق با تکیه‌گاه‌های ساده و نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ بودند. مقاومت برشی تیرهای عمیق به مقاومت اعضای فشاری بستگی دارد که مقاومت این اعضا نیز به شکل آنها بستگی دارند و همچنین

جدول ۱. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

Table 1. Details of samples

نام نمونه	عرض تیر (m)	ارتفاع تیر (mm)	عمق مؤثر (mm)	طول کل تیر (mm)	طول دهانه برشی (mm)	مساحت آرماتور ( $mm^2$ )	درصد آرماتور $\rho_s$ (%)	عرض ورق بارگذاری (mm)	نسبت دهانه برشی به ارتفاع $a/h$	نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر $a/d$	مقاومت فشاری بتن MPa
N-30-0.5	100	300	254	1000	150	226/194	0/89	60	0/5	0/59	49/3
N-45-0.5	100	450	402	1150	225	402/123	1	90	0/5	0/56	49/3
N-60-0.5	100	600	551	1300	300	508/938	0/92	120	0/5	0/545	47/8
N-90-0.5	100	900	849	1600	450	708/265	0/895	180	0/5	0/53	45/2
L-30-0.5	100	300	254	1000	150	226/194	0/89	60	0/5	0/59	44/4
L-45-0.5	100	450	402	1150	225	402/123	1	90	0/5	0/56	44/4
L-60-0.5	100	600	551	1300	300	508/938	0/92	120	0/5	0/545	46/8
L-90-0.5	100	900	849	1600	450	708/265	0/895	180	0/5	0/53	46/3

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی مصرف شده

Table 3. Mechanical specifications of steel bars

شماره میلگرد	تنش تسلیم ( $f_y$ ) MPa	کرنش نهایی ( $\epsilon_u$ ) (%)
$\phi 12$	498	0/26
$\phi 16$	585	0/31
$\phi 18$	578	0/29
$\phi 22$	612	0/33

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی

Table 2. Specifications of aggregates

نوع سنگدانه	وزن مخصوص دانه‌ای $kg/m^3$	وزن مخصوص توده‌ای $kg/m^3$	درصد جذب آب	بزرگترین اندازه سنگدانه mm
سبکدانه (لیاپور)	1270	771	7/4	10
شن	2260	1274	5/8	10
ماسه	2180	1558	8/2	5

جدول ۴. طرح اختلاط بتن سبک و معمولی برای واحد حجم بتن

Table 4. normal and lightweight concrete mixing proportions

نوع بتن	نسبت آب به سیمان	آب $kg$	سیمان $kg$	درشت‌دانه (شن یا لیاپور) $kg$	ماسه $kg$	فوق روان کننده	وزن مخصوص $kg/m^3$	مقاومت فشاری ( $f_c$ ) MPa	مقاومت شکافتگی MPa	مقاومت خمشی MPa	مدول ارتجاعی MPa
بتن معمولی	0/47	210	447	954	705	-	2316	47/8	4/1	4/9	32820
بتن سبک	0/35	161	460	528	706	2%	1855	46/8	3/7	4/4	25690

### ۳-۴ آزمایشات

عضو بتن مسلح قادر به مقابله با تنش‌های برشی بوجود آمده نبوده و در اثر بازشدگی بیش از حد ترک‌های برشی تیر عمیق گسیخته خواهد شد. چنین شکستی بسیار ترد بوده و ناگهانی اتفاق می‌افتد. براساس مشاهدات آزمایشگاهی، ترد بودن شکست برشی بیشتر متأثر از عدم وجود خاموت و مقاومت بتن می‌باشد.

شکست همه نمونه‌ها برشی بود به این صورت که در بار نهایی عرض ترک قطری که بین نقطه بارگذاری و تکیه‌گاه ایجاد شده بود گسترش پیدا کرده و باعث گسیختگی تیر می‌شد. در یکی از نمونه‌ها (N-90-0.5) در بار نهایی همزمان با شکست برشی کاور بتن نیز کنده شد. سطح ترک در بتن سبک نسبت به بتن معمولی صافتر بود که این دلیل گذر ترک از میان سنگدانه‌ها بود. با افزایش ارتفاع مقاومت برشی تیر بیشتر می‌شد ولی تاثیری در مد گسیختگی نداشت. بطور کلی مد گسیختگی مستقل از نوع بتن و ارتفاع است. در شکل ۴ شکست برشی تیرها نشان داده شده است.

### ۲-۵ نمودار بار-تغییر مکان

نمودار بار-تغییر مکان وسط تیر برای نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع تغییر مکان مرکز تیر نیز زیاد می‌شود که این برای هر دو گروه از تیرها قابل مشاهده است. سختی اولیه تیرها فقط به نوع بتن بستگی دارد علاوه بر این گسترش ترک‌های خمشی در ناحیه خمش خالص تأثیر بسیار کمی در سختی تیرهای تست شده دارد.

### ۲-۵ الگوی تشکیل ترک‌ها

نحوه گسترش ترک‌ها و شکل گسیختگی برای تیرهای عمیق با

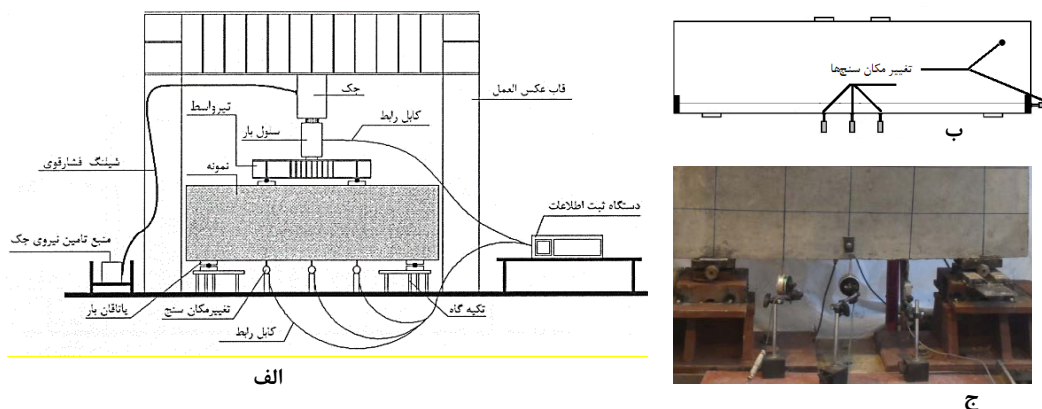
انجام کامل آزمایش روی هر نمونه شامل آماده کردن دستگاه بارگذاری، نصب نمونه، اتصال کابل‌های تغییر مکان سنج‌ها و سلول بار به دستگاه ثبت داده، بارگذاری و جداسازی نمونه بود. پس از نصب نمونه در محل مربوطه و قرار گرفتن ورق‌های بارگذاری بر روی یاتاقان‌ها تغییر مکان سنج‌ها در محل‌های تعیین شده نصب و سیم‌های مربوط به آنها و سلول بار به بخش ورودی دستگاه ثبت داده متصل می‌شدند. علاوه بر جابجایی سنج‌هایی که در زیر نمونه برای ثبت تغییر مکان‌های مرکز تیر و زیر نقاط بارگذاری کار گذاشته شده بودند برای کنترل پایداری نمونه از دو تغییر مکان سنج دیگر نیز در راستای عمود بر وجه قائم نمونه و عمود بر سطح قائم نمونه استفاده شد که تا در صورت ثبت تغییر مکان‌های زیاد از سوی آنها، جهت تأمین پایداری نمونه روند بارگذاری اضطراراً قطع شود. البته با توجه به دقت زیادی که در سوار نمودن نمونه‌ها و کنترل امتداد شاقولی و تراز افقی آن می‌شد، مشکلی از لحاظ ناپایداری نمونه‌ها ملاحظه نگردید. محل قرارگیری تغییر مکان سنج‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

بارگذاری به صورت استاتیکی و با سرعت ثابت تا رسیدن به خرابی نهایی انجام گرفت. برای کنترل سرعت بارگذاری از دو روش استفاده شد. در روش اول سرعت جابجایی زیر نقطه بارگذاری (سرعت باز شدن جک) کنترل شد. در روش دوم نیز سرعت بار وارده کنترل شد که تقریباً برابر بود.  $0.25 \text{ kN/s}$ .

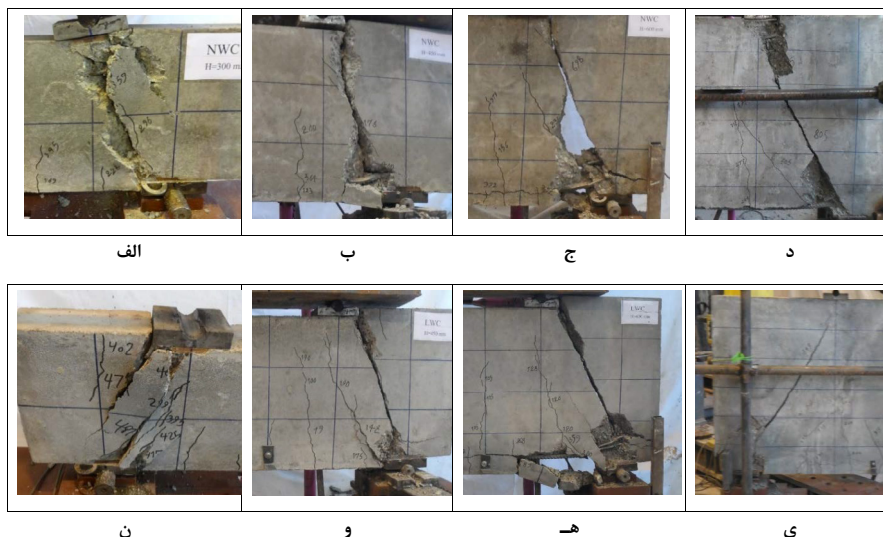
### ۵- نتایج آزمایش و تحلیل نمونه‌ها

#### ۱-۵ مد گسیختگی

با کاهش نسبت ظرفیت برشی به ظرفیت خمشی، ظرفیت برشی



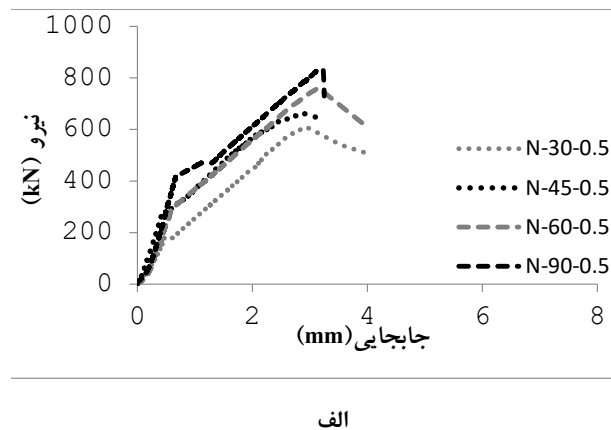
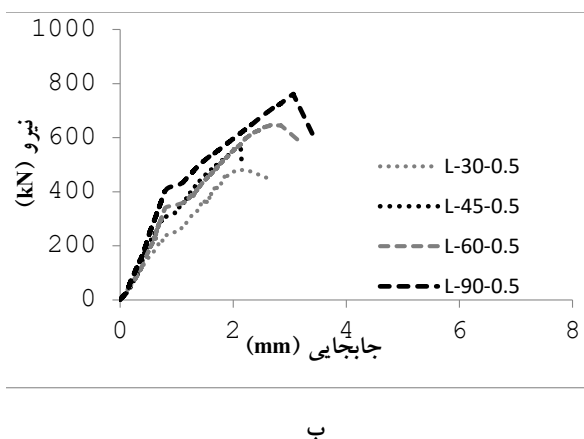
شکل ۳. الف) نمای کلی دستگاه بارگذاری ب و ج) محل نصب تغییر مکان سنج‌ها  
Fig. 3. a) Overview of the loading device b) location of Linear Displacement Sensor



شکل ۴. مد گسیختگی تیرهای عمیق الف) N-30-0.5 ب) N-45-0.5 ج) N-60-0.5 د) N-90-0.5 ن) L-30-0.5

و) L-45-0.5 ه) L-60-0.5 ی) L-90-0.5

Fig. 4. failure mode Deep beams a)N-30-0.5 b)N-45-0.5 c)N-60-0.5 d)N-90-0.5 e)L-30-0.5 f)L-45-0.5 g)L-60-0.5 h)L-90-0.5



شکل ۵. نمودار بار-تغییر مکان الف) تیرهای عمیق با بتن معمولی الف) تیرهای عمیق با بتن سبک

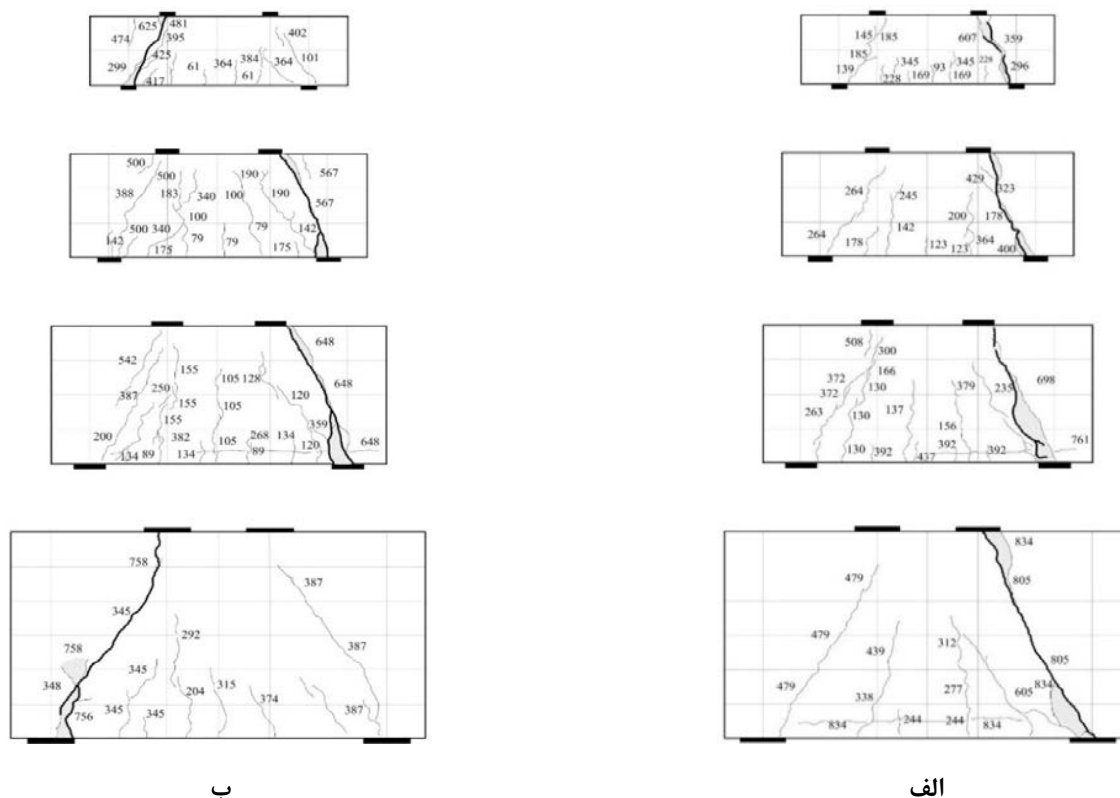
Fig. 5. Force - Displacement diagram a) Deep beams with normal concrete b) Deep beams with lightweight concrete

تشکیل می‌شود بلافاصله پس از تشکیل ترک خمشی در حدود ۲۰ تا ۵۰٪ مقاومت برشی نهایی در ناحیه بین نقطه بارگذاری و تکیه‌گاه صرف‌نظر از نوع بتن ترک قطری تشکیل می‌شود. نسبت مقاومت اولین ترک قطری به مقاومت نهایی با افزایش ارتفاع، در تیرهای عمیق با بتن سبک و بتن معمولی مطابق جدول ۵ افزایش می‌یابد. با افزایش بار ترک‌های خمشی و برشی زیادی تشکیل می‌شود و ترک‌های قطری بین

نقاط بارگذاری و تکیه‌گاه گسترش می‌یابد و در نهایت در اثر بازشدگی بیش از حد ترک‌های برشی، تیر عمیق به صورت ناگهانی گسیخته می‌شود.

بتن معمولی و بتن سبک در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل گسیختگی در تمام تیرهای آزمایش شده به این ترتیب است که ترک‌های قطری در داخل دهانه برشی و بین نقاط بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها تشکیل می‌شود و با افزایش عرض این ترک‌ها تیر در نهایت گسیخته می‌شود. الگوی توسعه ترک‌ها بیشتر تحت تأثیر ارتفاع تیرها است و تأثیر ارتفاع در تشکیل و گسترش ترک‌ها در تیرهای عمیق با بتن سبک شبیه تیرهای عمیق با بتن معمولی است. اولین ترک در ناحیه خمش خالص (بین دو نقطه بارگذاری) بود که معمولاً در نیروی معادل با ۱۵ تا ۳۵٪ مقاومت برشی نهایی





شکل ۶. الگوی گسترش ترک در الف) تیرهای عمیق با بتن معمولی ب) تیرهای عمیق با بتن سبک

Fig. 6. Pattern of crack propagation a) Deep beams with normal concrete b) Deep beams with lightweight concrete

معمولی و بتن سبک کاهش می‌یابد. بطور کلی بتن سبک تردی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. خرد شدن سنگدانه‌های سبک و عبور ترک از میان سنگدانه‌ها باعث می‌شود که نیروی برشی که توسط اثر قفل‌وبست بین سنگدانه‌های تحمل می‌شود کاهش می‌یابد که این عامل می‌تواند دلیل رفتار ترد بتن سبک نسبت به بتن معمولی باشد؛ که با افزایش ارتفاع این رفتار شدیدتر می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود نشان می‌دهد کاهش نیروی برشی نرمالیزه شده در تیرهای عمیق با بتن معمولی با  $h^{-0.617}$  و در تیرهای عمیق با بتن سبک با  $h^{-0.626}$  متناسب است که این نشان می‌دهد اثر اندازه در تیرهای عمیق با بتن سبک نسبت به بتن معمولی بیشتر است.

در هر دو گروه از تیرها نسبت بار ترک خوردگی برشی به مقاومت نهایی  $(\frac{V_d}{V_n})$  عدد کوچکی است ( برای بتن سبک بین ۰/۲ تا ۰/۴۵ و برای بتن معمولی بین ۰/۲۳ تا ۰/۵۷ ) که این نشان دهنده این است که تیرهای عمیق بعد از ترک قطری دارای ظرفیت تحمل بار بیشتری هستند.

مقاومت ترک قطری و مقاومت اولین ترک خمشی تقریباً به اندازه

گسترش ترک‌های قطری باعث افزایش بیشتر تغییر شکل وسط دهانه تیر می‌شود. بار وارده به تیر بعد از تشکیل و گسترش ترک قطری که در نهایت باعث باز شدن بیش از حد ترک‌های قطری و گسیختگی می‌شود، به شدت کاهش می‌یابد.

#### ۴-۵ نیروی برشی نرمالیزه شده

نیروی برشی نرمالیزه شده اولین ترک خمشی  $\eta_n = \frac{V_n}{b_w h f_c}$ ، نیروی برشی نرمالیزه شده ترک برشی (قطری)  $\eta_d = \frac{V_d}{b_w h f_c}$  و نیروی برشی نرمالیزه شده مقاومت نهایی  $\eta_n = \frac{V_n}{b_w h f_c}$  در شکل ۷ و جدول ۵ نشان داده شده است که در آن  $V_n$  مقاومت اولین ترک خمشی،  $V_d$  مقاومت برشی ترک قطری و  $V_n$  مقاومت برشی نهایی است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است نیروی برشی نرمالیزه شده برای بتن سبک پایین‌تر از بتن معمولی قرار دارد. وقتی که ارتفاع افزایش می‌یابد نیروی برشی نرمالیزه شده نیز کاهش می‌یابد که شدت این کاهش در تیرهای عمیق با بتن سبک نسبت به بتن معمولی بیشتر است. وقتی که ارتفاع از ۳۰۰ میلیمتر به ۹۰۰ میلیمتر افزایش می‌یابد نیروی برشی نرمالیزه شده  $\eta_n$  به اندازه ۵۰٪ برای بتن

جدول ۵. خلاصه نتایج آزمایشات و مقایسه با نتایج مقاومت برشی پیشبینی شده توسط آیین‌نامه‌ها و روش‌های تحلیل

Table 5. Test results

نام نمونه	مقاومت برشی (kN) $V_{exp}$			مقاومت برشی نرمالیزه شده $\eta_n = \frac{V_n}{b_w h f'_c}$			مقاومت برشی پیش‌بینی شده (kN) $V_{pre}$					$\gamma = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{exp}}$				
	$2V_{fl}$	$2V_d$	$2V_n$	$\eta_{fl}$	$\eta_d$	$\eta_n$	ACI 318-11	EC2	CSA	Tan (modify)	Arabzade 2009	ACI 318-11	EC2	CSA	Tan and Cheng	Arabzade 2009
N-30-0.5	93	139	607	0/06	0/09	0/41	420/6	396/7	505/4	346/8	340/4	0/693	0/65	0/83	0/57	0/56
N-45-0.5	123	178	661	0/05	0/08	0/29	543/3	512/6	638/3	529	442/8	0/821	0/77	0/96	0/8	0/67
N-60-0.5	137	235	761	0/05	0/08	0/26	643/9	612/2	796	643/5	513/6	0/846	0/80	1/04	0/845	0/698
N-90-0.5	244	479	834	0/06	0/11	0/20	833/3	802/6	993/2	861/8	701/8	0/999	0/96	1/19	1/033	0/841
L-30-0.5	61	101	481	0/05	0/08	0/36	322	331/5	386/9	326/5	282/3	0/67	0/69	0/80	0/677	0/587
L-45-0.5	79	142	567	0/04	0/07	0/28	415/8	428/4	488/6	489/1	367/3	0/73	0/75	0/86	0/862	0/647
L-60-0.5	105	200	648	0/04	0/07	0/25	535/8	545/6	662/5	590	467/4	0/827	0/84	1/02	0/91	0/72
L-90-0.5	204	345	758	0/05	0/08	0/18	725/6	740/7	864/8	781/7	637	0/957	0/97	1/14	1/031	0/84
میانگین (بتن معمولی)											0/84	0/79	1	0/812	0/692	
انحراف از معیار (بتن معمولی)											0/126	0/12	0/15	0/190	0/115	
میانگین (بتن سبک)											0/897	0/81	0/95	0/87	0/7	
انحراف از معیار (بتن سبک)											0/125	0/12	0/15	0/146	0/109	

روش عربزاده و روش Tan and Cheng برای بتن سبک طبق آیین‌نامه‌ها ضریب  $\lambda=0/85$  در مقاومت فشاری نمونه‌ها ( $f'_c$ ) اعمال شد.

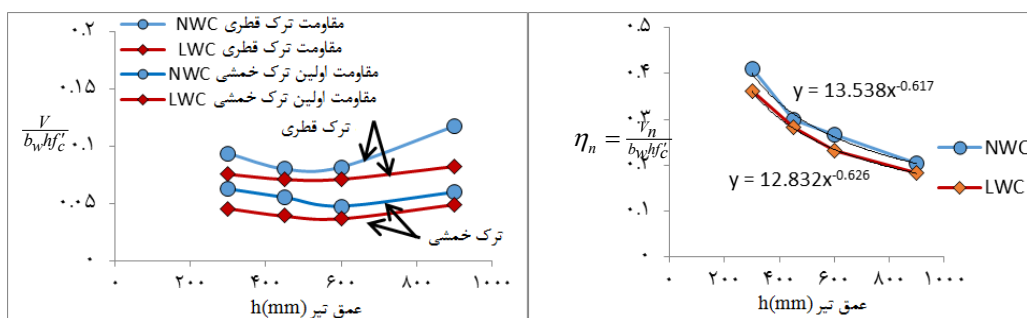
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود نتایج در تمام روش‌ها برای بتن‌های سبک و بتن معمولی تقریباً یکسان و نزدیک به هم می‌باشد. تمام روش‌ها برای ارتفاع‌های کوچکتر ( $h \leq 60mm$ ) محافظه کارانه بوده و دارای حاشیه امنیت مناسبی هستند هرچند این حاشیه امنیت با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. نتایج آیین‌نامه ACI و EC2 و روش عربزاده برای هر دو گروه از تیرها تقریباً یکسان بوده و در تمام تیرها محافظه کارانه هستند؛ در تیرهای کوچکتر  $h = 300 mm$  دارای حاشیه امنیت زیاد بوده و با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد بطوریکه در  $h = 900 mm$  مقاومت اندازه‌گیری شده با مقاومت به‌دست آمده از آیین‌نامه تقریباً یکسان است. آیین‌نامه CSA برای تیرهای با ارتفاع بیشتر ( $h \geq 60mm$ ) غیر محافظه کارانه است. در تمامی روش‌های ذکر شده نتایج حاصل برای بتن سبک با

تیر بستگی ندارد و همان‌طور که در شکل ۷ ب دیده می‌شود برای بتن سبک و معمولی نمودار تقریباً به‌صورت یک خط صاف است.

۶- مقایسه مقاومت برشی اندازه‌گیری شده با نتایج آیین‌نامه‌ها

نتایج حاصل از آزمایش برای هر دو گروه از تیرها با روابط آیین‌نامه‌ها که ذکر شد (آیین‌نامه ACI، آیین‌نامه CSA، آیین‌نامه EC2، روش Tan and Cheng و روش عربزاده ۲۰۰۹) مقایسه شد. توزیع نسبت مقاومت برشی اندازه‌گیری شده به مقاومت پیش‌بینی شده ( $\gamma = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{exp}}$ ) برای تیرهای عمق با بتن سبک و بتن معمولی در مقابل ارتفاع برای تمامی روش‌ها در شکل ۸ رسم شده است. میانگین و انحراف از معیار برای هر دو گروه از تیرها (بتن سبک و معمولی) در بالای هر نمودار ذکر شده است.

در روش آیین‌نامه CSA بعد از محاسبه مشخص شد که آرماتورهای طولی تسلیم می‌شوند به همین دلیل در محاسبه کرنش کششی ( $\epsilon_s$ ) از کرنش نقطه تسلیم فولادها استفاده شد ( $\epsilon_s = \epsilon_y$ ).

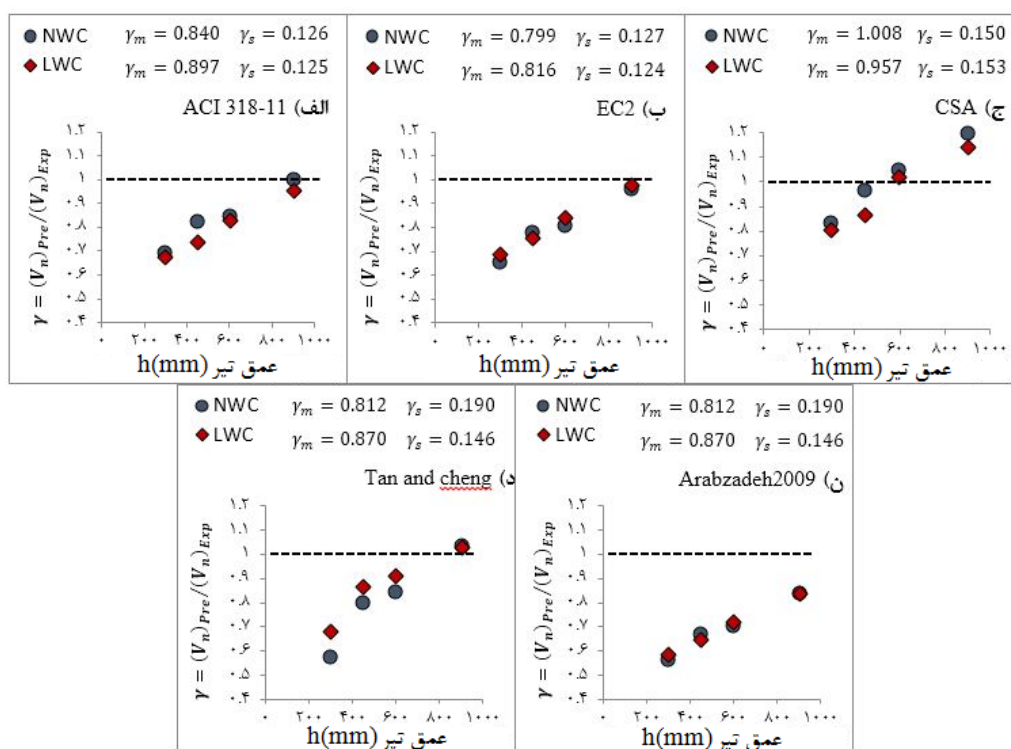


ب

الف

شکل ۷. نیروی برشی نرمالیزه شده در برابر ارتفاع (الف) مقاومت نهایی (ب) اولین ترک خمشی و قطری

Fig. 7. Normalized shear strength-height diagram a) Ultimate resistance b) Flexural and diagonal crack resistan



شکل ۸. نسبت مقاومت برشی اندازه‌گیری شده به مقاومت پیش‌بینی شده ( $\gamma = \frac{(V_n)_{Pre}}{(V_n)_{Exp}}$ ) در مقابل ارتفاع

Fig. 8. Measured shear strength to predicted shear strength versus height

### ۷- طراحی تیرهای عمیق

با توجه به اینکه در آیین‌نامه بتن ایران (آبا) روش صریحی برای طراحی تیرهای عمیق ذکر نشده و بیان شده که می‌توان برای طراحی از روش‌ها و آیین‌نامه‌های معتبر استفاده کرد لذا در این مقاله نتایج حاصل از آزمایش با نتایج روش خرپا آیین‌نامه‌های معتبر و چند روش تازه مقایسه شد. نتایج نشان داد که در همه آیین‌نامه‌ها و روش‌های بررسی شده،

بتن معمولی یکسان است. در مورد تیرهای آزمایش شده نتایج روش عربزاده ۲۰۰۹ کمترین میانگین و انحراف از معیار را دارد که نشان می‌دهد این روش با اینکه محافظه کارانه است ولی دارای کمترین پراکندگی در نتایج می‌باشد. نتایج روش آیین‌نامه CSA بیشترین میانگین را دارد که نشان می‌دهد روش آیین‌نامه CSA در مورد تیرهای آزمایش شده غیرمحافظه کارانه بوده که این امر نیاز به بررسی بیشتر دارد.

است که این نشان می‌دهد اثر اندازه در تیرهای عمیق با بتن سبک نسبت به بتن معمولی بیشتر است. البته نتایج تقریباً به هم نزدیک هستند که این بدلیل نوع سنگدانه‌های مصرفی می‌باشد.

۱۰. ابعاد صفحات بارگذاری تأثیر زیادی در مقاومت برشی تیرهای عمیق دارد ولی تغییر ابعاد صفحات بارگذاری متناسب با ارتفاع نمی‌تواند مانع از بروز اثر اندازه شود.

۱۱. نتایج آیین‌نامه‌های ACI، CSA و EC2 و روش‌های بررسی شده برای تیرها با ارتفاع کم (۳۰ cm) و برای هر دو گروه از تیرها محافظه کارانه است.

۱۲. در آیین‌نامه‌های ACI، CSA و EC2 با افزایش ارتفاع تیر از حاشیه ایمنی کاسته می‌شود.

۱۳. نتایج آیین‌نامه‌های ACI 318-11، EC2 و روش عربزاده در تمامی تیرهای آزمایش شده و در هر دو سری از تیرها محافظه کارانه می‌باشد.

۱۴. نتایج آیین‌نامه CSA برای تیرهای با ارتفاع بیشتر (۹۰ cm) و در هر دو گروه از تیرها غیر محافظه کارانه می‌باشد (به میزان ۱۴ درصد مقاومت را بیشتر پیشبینی کرده) که این موضوع نیاز به بررسی بیشتر دارد.

۱۵. در آیین‌نامه EC2 چون در محاسبه ضریب مقاومت مؤثر بتن برای بتن سبک از وزن مخصوص بتن سبک استفاده می‌کند، به همین دلیل نتایج بتن سبک و بتن معمولی به هم نزدیک هستند.

۱۶. با توجه به میانگین و انحراف از معیار نتایج روش عربزاده ۲۰۰۹ محافظه‌کارترین و کمترین پراکندگی را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

## ۸- مراجع

- [1] A.Arabzadeh, 2001. Analysis of some experimental results of simply supported deep beams using truss analogy method. Iranian Journal of Science & Technology, Vol. 25, No. 1, pp. 115-128.
- [2] ACI 318-11, 2011. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Michigan.
- [3] Kani, G., 1967. How safe are our large reinforced concrete beams. ACI Journal, Vol. 64(3), pp. 128-141.
- [4] Shioya, T., Iguro, M., Nojiri, Y., Akiayma, H. and Okada, T., 1989. Shear strength of large reinforced concrete

تأثیر نوع بتن در روابط در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج برای اینکه تیر عمیق طراحی شده با ارتفاع‌های مختلف دارای حاشیه امنیت کافی باشد توصیه می‌شود برای طراحی از روش آیین‌نامه EC2 و روش دکتر عربزاده که توضیح داده شد استفاده شود.

## ۸ - نتیجه‌گیری

از نتایج آزمایشات و تحلیل‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت:

۱. با افزایش ارتفاع تیر مد گسیختگی تغییر نمی‌کند، به بیان دیگر مد گسیختگی تیرهای آزمایش شده مستقل از ارتفاع و نوع بتن می‌باشد.

۲. گسیختگی در هر دو گروه از تیرها به صورت ترد و ناگهانی اتفاق می‌افتد که بیشتر بدلیل نبود آرماتور برشی می‌باشد.

۳. مسیر گسیختگی در تیرهای عمیق با بتن سبک هموارتر از تیرهای عمیق با بتن معمولی است. که این امر بدلیل مقاومت کم سبکدانه‌ها و عبور ترک از بین سنگدانه‌ها می‌باشد.

۴. الگوی تشکیل ترک‌ها بیشتر تحت تأثیر ارتفاع تیرها است و تأثیر ارتفاع در تشکیل و گسترش ترک‌ها در تیرهای عمیق با بتن سبک شبیه تیرهای عمیق با بتن معمولی است.

۵. نسبت مقاومت اولین ترک قطری به مقاومت نهایی با افزایش ارتفاع در تیرهای عمیق با بتن سبک و بتن معمولی افزایش می‌یابد (حدوداً دو برابر می‌شود).

۶. در هر دو گروه از تیرها نسبت بار ترک‌خوردگی قطری (ترک برشی) به مقاومت نهایی عدد کوچکی است ( برای بتن سبک بین ۰/۲ تا ۰/۴۵ و برای بتن معمولی بین ۰/۲۳ تا ۰/۵۷ ) که این نشان دهنده این است که تیرهای عمیق بعد از ترک قطری دارای ظرفیت تحمل بار بیشتری هستند.

۷. در هر دو گروه از تیرها نیروی اولین ترک خمشی نرمالیزه شده و اولین ترک قطری نرمالیزه شده به اندازه تیر بستگی ندارد.

۸. با افزایش ارتفاع، مقاومت برشی نرمالیزه شده کاهش می‌یابد. وقتی که ارتفاع تیر از ۳۰ cm به ۹۰ cm افزایش می‌یابد مقاومت برشی نرمالیزه شده برای هر دو گروه از تیرها تقریباً به اندازه ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

۹. کاهش مقاومت برشی نرمالیزه شده در تیرهای عمیق با بتن معمولی با  $h^{0.617}$  و در تیرهای عمیق با بتن سبک با  $h^{0.626}$  متناسب

- [10] Tan, K. H., and Cheng, G. H., "Size Effect on Shear Strength of Deep Beams: Investigating with Strut-and-Tie Models," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 132, No. 5, 2006, pp. 673-685.
- [11] Sherwood, E., Bentz, E., & Collins, M., 2007. Effect of aggregate size on beam-shear strength of thick slabs. *ACI structural Journal*, Vol. 107(2), pp. 180-190
- [12] CSA A23.3-94, 1994. Design of concrete structures. Canadian Standards Association, Toronto, Canada.
- [13] Keun-Hyeok Yang, 2010. Tests on Lightweight Concrete Deep Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 107, No. 6, pp. 663-670.
- [14] EN 1992-1-1:2004, 2004. Design of Concrete Structures. British Standards Institution, London, UK
- [15] 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, September 2009, p.p. 141-153.
- [16] Pars Sirjan Civil Company [www.omranpars.com](http://www.omranpars.com)
- beams, *Fracture Mechanics: Application to concrete.*, SP-118, ACI, Detroit, 259-279
- [5] Collins, M.P., and Mitchell, D., 1986. A Rational Approach to shear design-The 1984 Canadian Code Provisions. *ACI Journal, Proceedings*. Vol. 83, No.6, pp. 925-933
- [6] Reineck, K.H., 1991. Ultimate shear force of structural concrete members without transverse Reinforcement Derived from Mechanical Model. *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, pp. 592-602
- [7] Bazant Z.P., 1997. Scaling of Quasi-Brittle Fracture: Asymptotic Analysis. *International Journal of Fracture*, Vol. 83, No. 1, pp. 19-40.
- [8] Yang, K. H.; Chung, H. S.; Eun, H. C.; and Lee, E. T., "Shear Characteristics of High-Strength Concrete Deep Beams without Shear Reinforcement," *Engineering Structures*, V. 25, No. 8, 2003, pp. 1343-1352.
- [9] Yang, K. H.; Chung, H. S.; and Ashour, A. F., "Influence of Section Depth on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams," *Magazine of Concrete Research*, V. 59, No. 8, 2007, pp. 575-586.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Arabzadeh, A. Noori Soola, Height effect on shear strength of deep beams without Shear Reinforcement with normal and lightweight concrete, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 2501-2514.

DOI: [10.22060/ceej.2019.8777.4779](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.8777.4779)



