

بررسی آزمایشگاهی اثر اندازه در تیرهای عمیق با بتن سبک

ابوالفضل عربزاده^{۱*} و امین نوری سولا^۲

^۱ دانشیار، گروه آموزشی مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه آموزشی مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Arabzade@modares.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر با پیشرفت روش‌های ساخت، ایده استفاده از مصالح سبک برای کم کردن وزن سازه و بار زلزله مطرح شده است. ترک در بتن سبک از درون سنگدانه‌ها عبور کرده و باعث می‌شود که یک سطح صاف و صیقلی نسبت به بتن معمولی تشکیل شود. این تفاوت در مکانیزم ترک‌خوردگی نسبت به بتن معمولی رفتار کلی اعضای ساخته شده با بتن سبک را تغییر می‌دهد. در این پژوهش رفتار تیرهای عمیق ساخته شده با بتن سبک به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. به همین منظور چهار تیر عمیق با نسبت دهانه برشی به ارتفاع ۰/۵ در آزمایشگاه سازه دانشگاه تربیت مدرس ساخته و نمونه‌ها به صورت استاتیکی بارگذاری شده‌اند. عمق تیرها برابر ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر بودند. در نهایت نتایج با روش خرابای موجود در آیین‌نامه‌های ACI، CSA و EC2 مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع تیر بار نهایی نرمالیزه شده کاهش می‌یابد و مود شکست تغییری نمی‌کند. همچنین روابط آیین‌نامه ACI و EC2 برای تمامی تیرهای تست شده، محافظه‌کارانه می‌باشد؛ ولی نتایج آیین‌نامه CSA برای تیرهای با ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر غیر محافظه‌کارانه است که این امر نیاز به بررسی بیشتر دارد.

کلمات کلیدی: اثر اندازه، بتن سبک، تیر عمیق، مقاومت برشی، روش خرابا

Size Effect in Lightweight Concrete Deep Beam

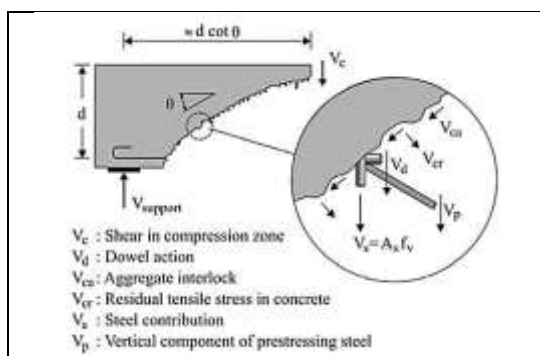
A. Arabzade and A. Noori Soola

Abstract: In recent years with the progress of construction methods, the idea of using lightweight materials for reducing structure weight and earthquake load has been raised up. Crack in lightweight concrete passes through aggregates causing a smooth surface compared with fractured surface of normal concrete. This difference in cracking mechanism changes the overall behavior of members made of lightweight concrete compared to normal concrete. In this study the behavior of lightweight concrete deep beams has been investigated, experimentally. For this purpose four deep beams with shear span to height-ratio of 0.5 have been prepared and loaded in static form in the structural laboratory of Tarbiat Modares University. Beams depth were 30, 45, 60 and 90 centimeters. Finally, the results were compared to truss method available in ACI, CSA and EC2 codes. Results show that by increasing the height of beam, the normalized ultimate load decreases and failure mode doesn't vary and also relations in ACI and EC2 codes are conservative for all tested beams but results of CSA code are non-conservative for beams with 90 centimeters height, indicating more investigation is needed.

Keywords: Size Effect, Lightweight Concrete, Deep Beam, Shear Strength, Truss Method

۱- مقدمه

برشی در طول ترک با استفاده از پارامترهایی که در شکل ۱ نشان داده شده است تحمل می‌شود.



شکل ۱: مکانیزم مقاومت برشی

مطالعات فراوانی برای تعیین سهم مشارکت هر یک از پارامترهای بالا در مقاومت برشی تیرهای بتنی صورت گرفت. آزمایشات نشان داد بعد از تشکیل ترک سهم هر یک از پارامترهای عملکرد شاخه‌ای، قفل‌وبست بین سنگدانه‌ها و ناحیه فشاری بتن در مقاومت برشی بین ۱۵-۲۵٪، ۳۳-۵۰٪ و ۴۰٪-۲۰ متغیر است [۴۳].

مطالعات تحلیلی و تجربی نشان داده است که ظرفیت برشی اعضای بتن مسلح غالباً توسط این پارامترها کنترل می‌شود: مقاومت بتن، اثر اندازه، درصد آرماتور طولی، نسبت دهانه برشی به ارتفاع و نیروی محوری [۵]. با این حال اهمیت هر یک از پارامترها در ظرفیت برشی تیرهای بتنی هنوز در حال بحث و بررسی است. اهمیت عوامل بالا و برخی از نظرات محققین در مقاومت برشی بتن را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد.

۱-۲- مقاومت بتن

به طور معمول اعضای بتنی با مقاومت بتن بالا، مقاومت برشی بیشتری دارند. ترک در بتن توسط تنش‌های اصلی کششی ایجاد می‌شود؛ بنابراین مقاومت کششی بتن در ظرفیت برشی سازه‌ها تأثیر به‌سزایی خواهد داشت و از طرف دیگر مقاومت کششی بتن به مقاومت فشاری آن وابسته است و با هم نسبت مستقیم دارند. این فرضیه در آیین‌نامه‌های طراحی نیز ذکر شده است.

۲-۲- اثر اندازه

استفاده از بتن سبک در سازه‌ها مزیت‌های زیادی دارد. کاهش بار مرده به دلیل وزن مخصوص کم بتن سبک باعث کاهش ابعاد و وزن المان‌های سازه‌ای می‌شود. کاهش ابعاد ستون‌ها و تیرها باعث می‌شود تا فضای بیشتری در دسترس باشد و همچنین کاهش وزن سازه نیروی زلزله را نیز کاهش می‌دهد. از طرف دیگر در المان‌های پیش ساخته کاهش ابعاد و وزن باعث راحتی و ارزان شدن حمل و نقل می‌شود. در سازه‌های دریایی نیز به دلیل راحتی حمل و نقل معمولاً از بتن سبک استفاده می‌شود.

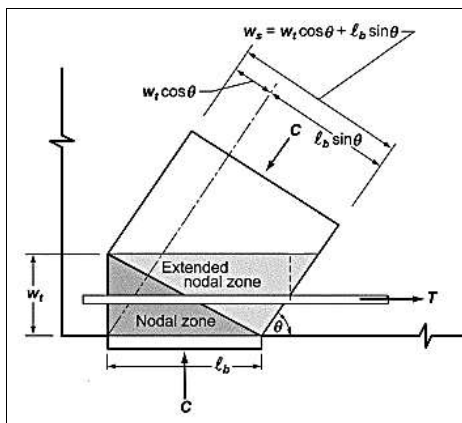
گروهی از تیرها که در المان‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، تیرهای عمیق هستند. تیرهای عمیق اعضای سازه‌ای هستند که به علت هندسه خاص خود و نسبت دهانه به ارتفاع کم، مکانیزم انتقال تنش و کرنش در آنها با تیرهای معمولی متفاوت بوده و این تفاوت سبب می‌شود تا ضوابط جداگانه‌ای برای تحلیل و طراحی این اعضا در آیین‌نامه‌ها لحاظ گردد. در آیین‌نامه ACI تیر عمیق به عضو اطلاق می‌شود که نسبت دهانه برشی به ارتفاع کمتر از ۲ باشد.

فرو ریختن بخش‌هایی از یک انبار مهمات نیروی هوایی آمریکا در سال ۱۹۵۵ اولین نمود پدیده اثر اندازه است؛ اما در آن زمان هنوز این پدیده ناشناخته بود. این حادثه به علت گسیختگی برشی تیرهای بتن مسلح با عمق ۹۱۴ میلی‌متر و نسبت آرماتور طولی $\rho = 0.0045$ روی داد. این تیرها که در محل گسیختگی فاقد آرماتور برشی بودند در تنش برشی به اندازه ۵ MPa گسیخته شدند. Kani برای اولین بار اهمیت اثر اندازه در مقاومت برشی را معرفی کرد [۱]. او به وضوح نشان داد که با افزایش عمق تیر، تنش برشی گسیختگی کاهش می‌یابد. وضوح این فرضیه که با افزایش عمق در مقاطع با درصد آرماتور کم ظرفیت تنش برشی کم می‌شود، با آزمایشات گسترده‌ای که در ژاپن انجام شد، بیشتر گشت [۲]. آنها مشاهده کردند که با افزایش عمق مقطع و یا کاهش حداکثر اندازه دانه، تنش برشی در گسیختگی کم می‌شود.

۲- مکانیزم انتقال برش

در تیرهای بتنی فاقد آرماتور برشی به محض تشکیل ترک قطری تیر به صورت ناگهانی گسیخته می‌شود. با این حال تنش برشی اسمی در لحظه تشکیل ترک نمی‌تواند با استفاده از تئوری الاستیک به دست آید. بعد از تشکیل ترک قطری، تنش

در ۳۰ سال گذشته تحقیقات گسترده‌ای برای بهبود مدل خرپا به گونه‌ای انجام شده که آن را 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 پیش تنیده 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.



شکل ۲: ارتفاع گره w_t [۱۱]

بر اساس مدل خرپا مقاومت برشی تیرهای عمیق بدون آرماتور برشی با توجه به مقاومت اعضای فشاری تعیین می‌شود که مقاومت این اعضا از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در این رابطه b_w عرض تیر و w_s عرض پایه‌های فشاری می‌باشد که بر اساس آیین‌نامه ACI با رابطه ۲ به دست می‌آید:

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

در این رابطه l_b عرض ورق‌های بارگذاری است که معمولاً در تیرها برای بارگذاری و جلوگیری از لهیدگی از ورق‌های فولادی استفاده می‌شود. ارتفاع گره w_t (محل تلاقی اعضای فشاری و کششی) است که بر اساس رابطه ۳ به دست می‌آید.

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

کافی آزمایشاتی بر روی ۴ سری تیر بدون خاموت انجام داد. این تیرها دارای مقاومت بتن و درصد آرماتور یکسان و عمق‌های ۱۵، ۳۰، ۶۱ و ۱۲۱ سانتی‌متر بودند. وی نتیجه گرفت که با افزایش عمق تیر، مقاومت برشی کاهش می‌یابد [۶]. Shioya و همکاران نیز بر اساس آزمایشاتی که بر روی تیرهای با عمق ۱۰ تا ۳۰۵ سانتی‌متر انجام دادند، به همین نتیجه رسیدند. برای توضیح این پدیده Reineck و Collins و همکاران فرض کردند که عرض ترک در لحظه گسیختگی با عمق تیر متناسب است [۷ و ۸]. از آنجا که با افزایش عرض ترک، نیروی برشی که توسط سطح ناصاف و قفل‌بست بین دانه‌ای انتقال می‌یابد، کم می‌شود؛ بنابراین تیرهای با عمق زیاد دارای ظرفیت برشی کمتری هستند. Bazant برای توضیح اثر اندازه تئوری انرژی شکست آزاد شده را پیشنهاد داد [۹].

۳-۲- درصد آرماتور طولی

کافی با آزمایشی بر روی ۱۳۳ تیر بدون خاموت انجام داد، به این نتیجه رسید که تأثیر درصد آرماتور طولی در مقاومت برشی قابل توجه است. امروزه ثابت شده است که درصد آرماتور طولی ارتفاع ناحیه فشاری، کرنش کششی بتن (یا عرض ترک) را کنترل می‌کند. افزایش درصد آرماتور طولی باعث افزایش ارتفاع ناحیه فشاری و کوچک شدن عرض ترک و در نتیجه افزایش مقاومت برشی می‌شود [۱].

۴-۲- نسبت دهانه برشی به ارتفاع

تأثیر نسبت دهانه برشی به ارتفاع در مقاومت برش توسط Ferguson مورد بررسی قرار گرفت. Clarck و بعد از آن Ferguson در سال ۱۹۵۳ نشان دادند که برای تیرهای مشابه وقتی که نسبت دهانه برشی به ارتفاع از ۲/۳۵ به ۱/۱۷ تغییر می‌کند، تنش برشی در لحظه گسیختگی ۲۲۵٪ تغییر می‌کند [۱۰].

۵-۲- بار محوری

نیروی محوری کششی باعث کاهش مقاومت برشی بتن می‌شود و نیروی فشاری افزایش مقاومت برشی را در پی دارد. نیروی کششی باعث کاهش ارتفاع ناحیه فشاری بتن و افزایش عرض ترک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی می‌گردد.

۳- ضوابط آیین‌نامه‌های موجود برای مدل خرپایی

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 حالی که در آیین‌نامه ACI مقاومت بتن به صورت کاهش یافته f'_c می‌باشد.

۳-۳-۳ آیین‌نامه اروپا (EN 1992-1-1) Eurocode2 [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 خرپایی 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.

$$\sigma_{Rd,max} = f_{cd} \quad (۹)$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0.6v f_{cd} \quad (۱۰)$$

$$v = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (۱۱)$$

در این روابط f_{ck} مقاومت مشخصه فشاری بتن، f_{cd} مقاومت فشاری بتن برای طراحی $\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ و ضریب اطمینان معادل ۱/۵ می‌باشد. مقاومت طراحی در گره‌ها نیز به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_{Rd,max} = K_1 v f_{cd} \quad \text{برای گره CCC}$$

$$\sigma_{Rd,max} = K_2 v f_{cd} \quad \text{برای گره CCT}$$

$$\sigma_{Rd,max} = K_3 v f_{cd} \quad \text{برای گره CTT}$$

مقادیر $K_1=1$ ، $K_2=0.85$ و $K_3=0.75$ می‌باشد. برای بتن سبک مقاومت فشاری بتن، $0.4 + \frac{0.6\rho}{2200}$ ضرب می‌شود که ρ وزن مخصوص بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

۴- مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق جهت بررسی بیشتر اثر اندازه در تیرهای عمیق بدون آرماتور برشی و ساخته شده با بتن سبک، چهار تیر عمیق دو سر ساده با ارتفاع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر با نسبت a/h (دهانه برشی به ارتفاع) برابر با ۰/۵ ساخته شد. بارگذاری همه نمونه‌ها به صورت بار متمرکز استاتیکی دو نقطه‌ای انجام شد.

در این رابطه h ارتفاع تیر و d ارتفاع مؤثر است. θ نیز بیانگر زاویه بین عضو فشاری و عضو کششی می‌باشد که از رابطه ۴ برای محاسبه θ استفاده می‌شود:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{jd}{a} \right) \quad (۴)$$

۱-۳-۲ آیین‌نامه ACI 318-11 [۱۱]

ضوابط مربوط به مدل خرپایی با عنوان ضمیمه A به نسخه‌های آیین‌نامه ACI 318 از سال ۲۰۰۲ به بعد اضافه گردیده است. در رابطه ۱ مقاومت فشاری مؤثر بتن (f_{ce}) مدل خرپایی طبق آیین‌نامه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_{ce} = 0.85 \beta_s \lambda f'_c \quad (۵)$$

f'_c مقاومت فشاری بتن (براساس آزمایش نمونه استوانه‌ای استاندارد)، f_{ce} مقاومت فشاری مؤثر بتن، ضریب β_s نیز در واقع ضریب کاهش مقاومت بتن می‌باشد که براساس شکل و حجم هندسی اعضای فشاری تعریف می‌شود برای تیرهای بدون خاموت ۰/۶ می‌باشد. برای بتن معمولی $\lambda=1$ ، برای بتن سبک با ماسه $\lambda=0.85$ می‌باشد.

۲-۳ آیین‌نامه کانادا CSA [۱۲]

مطابق آیین‌نامه کانادا CSA A23.3-04 مقاومت اعضای فشاری با استفاده از تنش فشاری مؤثر بتن f_{ce} تعیین می‌شود که از معادله ۶ به دست می‌آید. براساس نظریه اصلاح شده میدان فشاری محاسبه می‌شود:

$$f_{ce} = \frac{f'_c \lambda}{0.8 + 17 \varepsilon_1} \leq 0.85 f'_c \lambda \quad (۶)$$

ε_1 کرنش اصلی کششی موجود در اعضای فشاری است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + (\varepsilon_s + 0.002) \cot^2 \alpha_s \quad (۷)$$

α_s زاویه بین محور عضو فشاری و عضو کششی، ε_s کرنش کششی فولاد (عضو کششی) ε_1 کرنش کششی اصلی و f'_c مقاومت مشخصه بتن است. پارامتر λ نیز برای در نظر گرفتن نوع بتن می‌باشد که آیین‌نامه برای بتن معمولی $\lambda=1$ ، برای بتن سبک با ماسه $\lambda=0.85$ و برای بتن تماماً سبک $\lambda=0.75$ را پیشنهاد می‌کند. در تیرهای دو سر ساده برای تعیین ε_s می‌توان از رابطه ۸ استفاده کرد [۱۳]:

$$\varepsilon_s = \frac{0.75 \lambda f'_c W_t b_w}{E_s A_s} \leq \varepsilon_y \quad (۸)$$

در این رابطه E_s و ε_y کرنش تسلیم و مدول الاستیسیته آرماتورهای طولی می‌باشند.

بررسی آزمایشگاهی اثر اندازه در ...

مقدار آرماتور طولی در تمامی نمونه‌ها برابر ۱٪ در نظر گرفته شد. بارگذاری نمونه‌ها به صورت دو بار نقطه‌ای صورت گرفت که فاصله دو بار نقطه‌ای در تمام نمونه‌ها برابر ۴۰ سانتی‌متر بود. هندسه نمونه‌ها و جزئیات آنها به طور کامل در شکل ۳ و جدول ۳ ذکر شده است.

۵- نتایج آزمایش

۵-۱- مد گسیختگی

با کاهش نسبت ظرفیت برشی به ظرفیت خمشی، ظرفیت برشی عضو بتن مسلح قادر به مقابله با تنش‌های برشی به وجود 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 که اکثراً به طور آنی و با صدای مهیبی شبیه انفجار بروز می‌نماید. در شکل ۴ نمونه‌هایی از شکست برشی نشان داده شده است. 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. به طور کلی مد گسیختگی مستقل از ارتفاع است.

۴-۱- مشخصات مصالح

جهت ساخت بتن، ابتدا از آزمایشات مربوط به سنگدانه‌ها (درصد جذب رطوبت و دانه‌بندی) انجام شد. سپس با توجه به وضعیت دانه‌بندی موجود و پس از چند بار سعی و خطا از طرح اختلاط مطابق جدول ۱ استفاده شد. در ساخت بتن سبک از سبکدانه لیاپور و ماسه استفاده شد همچنین برای تأمین روانی بتن از فوق روان کننده استفاده شد. مشخصات مربوط به سبکدانه و ماسه مصرفی در جدول ۲ آورده شده است.

۴-۲- جزئیات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۴ 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 بسته است. همچنین شکل این اعضا تحت تأثیر ورق‌های تکیه‌گاهی می‌باشند. با توجه به دلایل 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 از یک سری آرماتورهایی به قطر ۶ میلی‌متر به صورت قفسه استفاده شد.

جدول ۱: طرح اختلاط بتن سبک برای یک متر مکعب

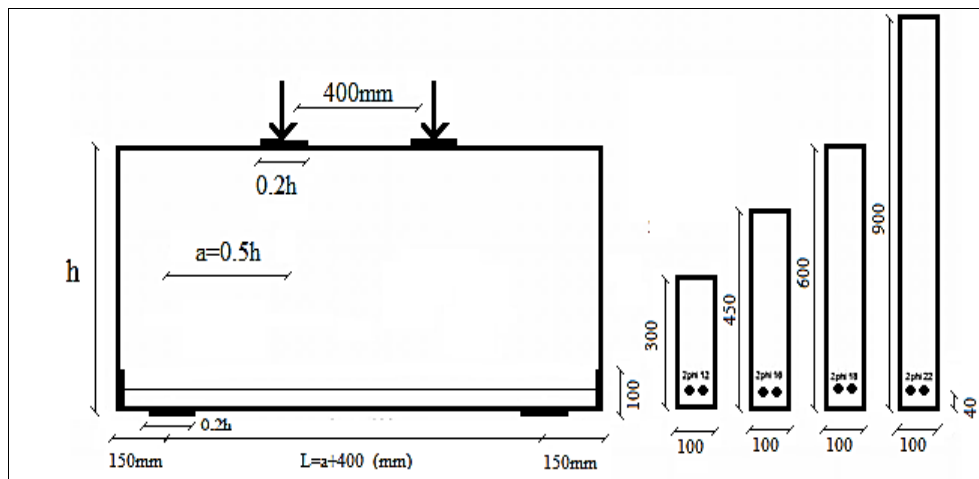
نوع بتن	نسبت آب به سیمان	آب	سیمان	درشت‌دانه (شن یا لیاپور)	ماسه	فوق روان کننده	وزن مخصوص	اسلامپ
بتن سبک	۰/۳۵	۱۶۱kg	۴۶۰kg	۵۲۸kg	۷۰۶kg	٪۲	۱۸۵۵ kg/m ³	۸۰

جدول ۲: مشخصات سنگدانه‌ها

نوع سنگدانه	وزن مخصوص دانه‌ای kg/m ³	وزن مخصوص توده‌ای kg/m ³	درصد جذب آب
سبکدانه (لیاپور)	۱۲۷۰	۷۷۱	۷/۴
ماسه	۲۱۸۰	۱۵۵۸	۸/۲

جدول ۳: مشخصات و جزئیات نمونه‌ها

نمونه	عرض تیر mm	ارتفاع mm	عمق مؤثر mm	عرض ورق بارگذاری mm	مساحت آرماتور mm ²	درصد آرماتور	a/h	a/d	f _c '
L30-0.5	۱۰۰	۳۰۰	۲۵۴	۶۰	۲۲۶/۱۹	۰/۸۹	۰/۵	۰/۵۹	۴۴/۴
L45-0.5	۱۰۰	۴۵۰	۴۰۲	۹۰	۴۰۲/۱۲	۱	۰/۵	۰/۵۶	۴۴/۴
L60-0.5	۱۰۰	۶۰۰	۵۵۱	۱۲۰	۵۰۸/۹۳	۰/۹۲	۰/۵	۰/۵۴۵	۴۶/۸
L90-0.5	۱۰۰	۹۰۰	۸۴۹	۱۸۰	۷۶۰/۲۶	۰/۸۹	۰/۵	۰/۵۳	۴۶/۳



شکل ۳: هندسه نمونه‌ها

در شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۴ نشان داده شده است که در آن $\eta_n = \frac{V_n}{b_w h f'_c}$ مقاومت اولین ترک خمشی، V_d مقاومت برشی ترک قطری و V_n مقاومت برشی نهایی است. همان طور که ملاحظه می‌شود وقتی که ارتفاع تیر از ۳۰۰ به ۹۰۰ میلی-متر افزایش می‌یابد، نیروی برشی نرمالیزه شده مقاومت نهایی به اندازه ۵۰٪ کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش مقاومت برشی در تیرهای عمیق با بتن سبک با $h^{-0.626}$ متناسب است.

نسبت بار ترک خوردگی برشی به مقاومت نهایی (V_d/V_n) عدد کوچکی است (بین ۰/۲ تا ۰/۴۵) که این نکته نشان می‌دهد تیرهای عمیق بعد از ترک قطری دارای ظرفیت تحمل بار بیشتری هستند. مقاومت ترک قطری و مقاومت اولین ترک خمشی تقریباً به اندازه تیر بستگی ندارد و همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود تقریباً به صورت 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 توضیح داده شد (آیین‌نامه ACI، آیین‌نامه CSA، آیین‌نامه EC2)، مقایسه شد. توزیع نسبت مقاومت برشی اندازه‌گیری شده به مقاومت پیش‌بینی شده $\gamma = \frac{(V_n)_{pre}}{(V_n)_{Exp}}$ برای تیرهای عمیق با بتن سبک در مقابل ارتفاع برای تمامی روش‌ها در شکل ۸ رسم شده است. میانگین و انحراف از معیار در بالای هر نمودار ذکر شده است.

۲-۵ الگوی تشکیل ترک‌ها

نحوه گسترش ترک‌ها و شکل گسیختگی برای تیرهای عمیق با بتن سبک در شکل ۵ 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.

اولین ترک در ناحیه خمش خالص (بین دو نقطه بارگذاری) بود که معمولاً در نیروی معادل با ۱۵٪ تا ۳۵٪ مقاومت برشی نهایی 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 مطابق جدول ۴ 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.

۳-۵ بار گسیختگی

نیروی برشی نرمالیزه شده اولین ترک خمشی

$$\eta_{fl} = \frac{V_{fl}}{b_w h f'_c}$$

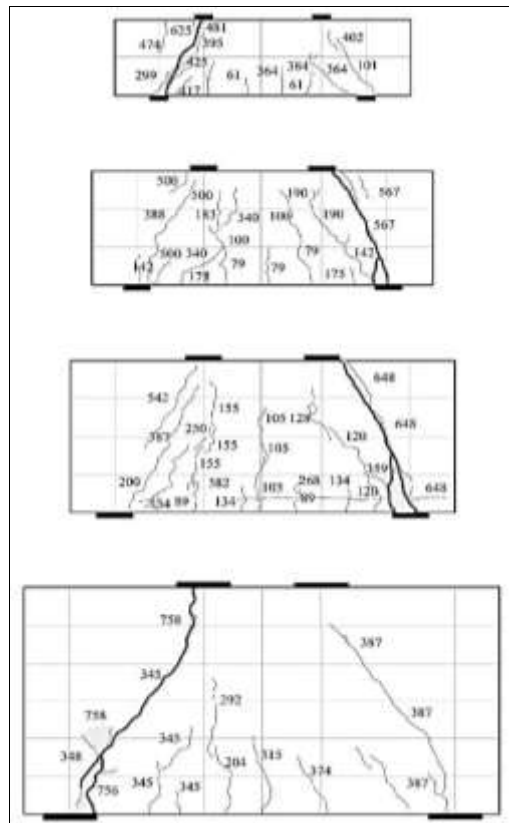
نیروی برشی نرمالیزه شده ترک برشی (قطری)

$$\eta_d = \frac{V_d}{b_w h f'_c}$$

و نیروی برشی نرمالیزه شده مقاومت نهایی



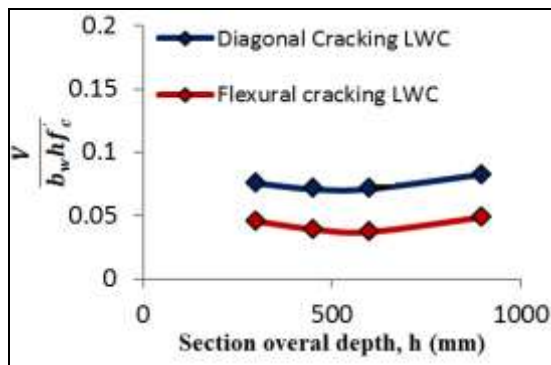
شکل ۴: شکست برشی نمونه‌ها



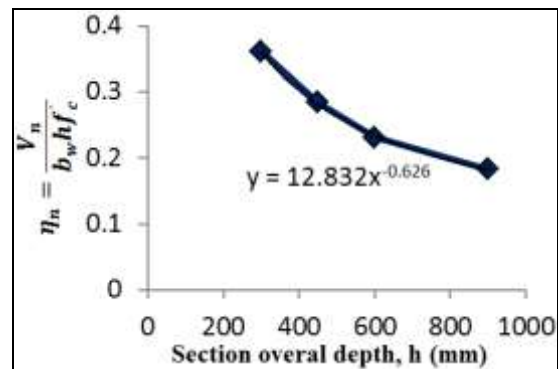
شکل ۵: نحوه گسترش ترک‌ها در تیرهای عمیق بابتن سبک

جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایشات و مقایسه با نتایج پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه‌ها

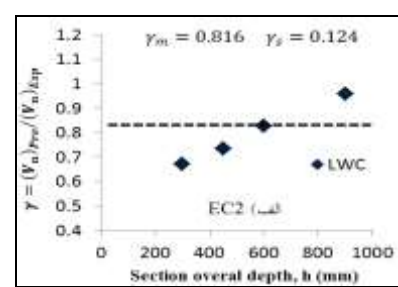
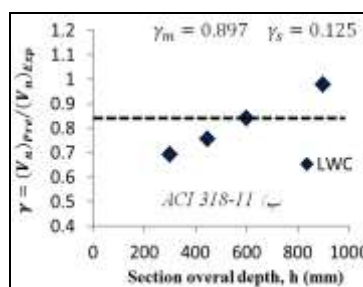
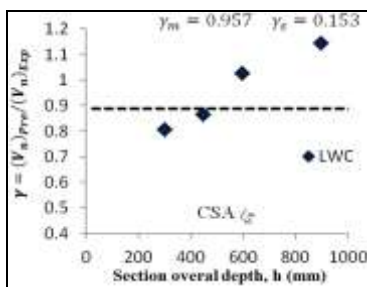
نام نمونه	مقاومت برشی V_{exp} (kN)			مقاومت برشی نرمالیزه شده $\eta = V/b_w h f'_c$			مقاومت برشی پیش‌بینی شده V_{pre} (kN)			$\gamma = (V_n)_{pre} / (V_n)_{exp}$				
	$2V_{fl}$	$2V_d$	$2V_n$	η_{fl}	η_d	η_n	ACI 318-11	EC2	CSA	ACI 318-11	EC2	CSA		
L-30-0.5	۶۱	۱۰۱	۴۸۱	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۳۶	۳۲۲	۳۳۱/۵	۳۸۶/۹	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۱۰		
L-45-0.5	۷۹	۱۴۲	۵۶۷	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۲۸	۴۱۵/۸	۴۲۸/۴	۴۸۸	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۰۶		
L-60-0.5	۱۰۵	۲۰۰	۶۴۸	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۲۵	۵۳۵/۸	۵۴۵/۶	۶۶۲/۵	۰/۸۲۷	۰/۸۴	۱/۰۲		
L-90-0.5	۲۰۴	۳۴۵	۷۵۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۸	۷۲۵/۶	۷۴۰/۷	۸۶۴/۸	۰/۹۵۷	۰/۹۷	۱/۰۴		
میانگین												۰/۸۹۷	۰/۸۱	۰/۱۵
انحراف از معیار												۰/۱۲۵	۰/۱۲	۰/۰۵



شکل ۷: نیروی برشی نرمالیزه شده ترک خمشی و قطری در برابر ارتفاع



شکل ۶: نیروی برشی نرمالیزه شده مقاومت نهایی در برابر ارتفاع



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

نتایج حاصل از بررسی اثر اندازه در تیرهای عمیق با بتن سبک به شرح ذیل می‌باشد:

۱. با افزایش ارتفاع تیر مد گسیختگی تغییر نمی‌کند؛ به بیان دیگر مد گسیختگی تیرهای تست شده مستقل از ارتفاع است.
۲. گسیختگی به صورت ترد و ناگهانی اتفاق می‌افتد که بیشتر به دلیل نبود آرماتور برشی می‌باشد.
۳. الگوی تشکیل ترک‌ها بیشتر تحت تأثیر ارتفاع تیرها است.
۴. نسبت مقاومت اولین ترک قطری به مقاومت نهایی با افزایش ارتفاع در تیرهای عمیق با بتن سبک و بتن معمولی افزایش می‌یابد.
۵. نسبت بار ترک‌خوردگی قطری (ترک برشی) به مقاومت نهایی، عدد کوچکی است که نشان می‌دهد تیرهای عمیق بعد از ترک قطری دارای ظرفیت تحمل بار بیشتری هستند.
۶. نیروی اولین ترک خمشی نرمالیزه شده و اولین ترک قطری نرمالیزه شده تقریباً به اندازه تیر بستگی ندارد.

در روش آیین‌نامه CSA بعد از محاسبه مشخص شد که آرماتورهای طولی تسلیم می‌شوند؛ به همین دلیل در محاسبه کرنش کششی (ϵ_s) از کرنش نقطه تسلیم فولادها استفاده شد ($\epsilon_s = \epsilon_y$). همان‌طور که شکل نشان می‌دهد نتایج در تمام روش‌ها برای بتن‌های سبک تقریباً یکسان و نزدیک به هم می‌باشد. تمام روش‌ها برای ارتفاع‌های کوچکتر $h \leq 600mm$ محافظه کارانه بوده و دارای حاشیه امنیت مناسبی هستند؛ هرچند این حاشیه امنیت با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. نتایج آیین‌نامه ACI و EC2 تقریباً یکسان بوده و در تمام تیرها محافظه کارانه است؛ در تیرهای کوچکتر $h = 300mm$ دارای حاشیه امنیت زیاد بوده و با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد، به طوری که در $h = 900mm$ مقاومت اندازه‌گیری شده با مقاومت به دست آمده از آیین‌نامه تقریباً یکسان است. نتایج آیین‌نامه CSA برای تیرهای با ارتفاع بیشتر ($h \geq 600mm$) غیر محافظه کارانه است.

۷- نتیجه‌گیری

- [5] ACI 445R-99,. Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete. Joint ACIASCE Committee 445, **1999**
- [6] Kani, G.,. How safe are our large reinforced concrete beams. ACI Journal, Vol. 64, No.3, pp. 128-141, **1967**.
- [7] Collins, M.P., and Mitchell, D., A Rational Approach to shear design-The 1984 Canadian Code Provisions. ACI Journal, Proceedings. Vol. 83, No.6, pp. 925-933, **1986**.
- [8] Reineck, K.H.,. Ultimate shear force of structural concrete members without transverse Reinforcement Derived from Mechanical Model. ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 5, pp. 592-602, **1991**.
- [9] Bazant Z.P., Scaling of Quasi-Brittle Fracture: Asymptotic Analysis. Intenational Journal of Fracture, Vol. 83, No. 1, pp. 19-40, **1997**.
- [10] Vu Hong Nghiep, Shear Design of Straight and Haunched Concrete Beams without Stirrups. PhD Thesis, Hamburg University, **2011**.
- [11] ACI 318-11, Bulding Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Michigan, **2011**.
- [12] CSA A23.3-94, Design of concrete structures. Canadian Stanadards Association, Toronto, Canada, **1994**.
- [13] Keun-Hyeok Yang, Tests on Lightweight Concrete Deep Beams. ACI Structural Journal, Vol. 107, No. 6, pp. 663-670, **2010**.
- [14] EN 1992-1-1.2004, Design of Concrete Structures. British Standards Institution, London, UK, **2004**.

۷. با افزایش ارتفاع، مقاومت برشی نرمالیزه شده کاهش می‌یابد. وقتی که ارتفاع تیر از ۳۰ سانتی‌متر به ۹۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد مقاومت برشی نرمالیزه شده برای هر دو گروه از تیرها تقریباً به اندازه ۵۰٪ کاهش می‌یابد.
۸. نتایج همه آیین‌نامه‌ها برای تیرها با ارتفاع کم (۳۰ سانتی‌متر) محافظه کارانه است.
۹. در همه آیین‌نامه‌ها با افزایش ارتفاع تیر از حاشیه ایمنی کاسته می‌شود.
۱۰. نتایج آیین‌نامه‌های ACI 318-11, EC2 در تمامی تیرهای تست شده محافظه کارانه است.
۱۱. نتایج آیین‌نامه CSA برای تیرهای با ارتفاع بیشتر (۹۰ سانتی‌متر) غیر محافظه کارانه می‌باشد که این موضوع نیاز به بررسی بیشتر دارد.

مراجع

- [1] Kani, G.,. Basic facts concerning shear failure. ACI Journal, Vol. 63, No.6, pp675-692, **1966**.
- [2] Shioya, T., Iguro, M., Nojiri, Y., Akiayma, H. and Okada, T., Shear strenght of large reinforced concret beams, Fracture Mechanics: Application to concrete., SP-118, ACI, Detroit, pp. 259-279, **1989**.
- [3] Kim, J., Park, Y.,. Prediction of shear strenght of reinforced concrete beams without web reinforcement. ACI Materials Journal, Vol. 93, No.3, pp. 213-222, **1996**.
- [4] Ziara, M.M., The influence of confining the compression zone in the design of structural concrete. Heriot-Watt University, **1993**.