مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و دوم، شماره٦، سال ١٤٠١

اثر اندازه بر رفتار تیرهای عمیق بتن‌مسلح تقویت شده با CFRP

ابوالفضل عربزاده[1*]، آرمین علی‌بخشی[2]

۱. دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران–سازه، دانشگاه تربیت مدرس

arabzade@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ١٤٠٠/٩/١١ تاریخ پذیرش: ١٤٠٠/١٢/١٥

چکیده

معمولاً تیرهای دارای نسبت دهانه خالص به ارتفاع کمتر از ٤ به عنوان تیر عمیق بتن مسلح شناخته می‌شوند. اینگونه تیرها دارای کاربرد وسیعی در سازه‌هایی همچون سدها، مخازن، کیسون‌ها، پل‌ها و سازه‌های بلندمرتبه هستند. در این اعضای سازه‌ای به دلیل حاکمیت شکست برشی، همواره طراحی و تحلیل آنها در برابر برش مطرح بوده است؛ بنابراین تقویت و ترمیم اینگونه اعضای سازه‌ای برای بهبود مقاومت برشی همواره حائز اهمیت است و تاکنون روش‌های گوناگونی برای پیشبرد این هدف ابداع شده است. یکی از روش‌های کاربردی، استفاده از الیاف پلیمری CFRP به منظور ترمیم وتقویت تیرهای عمیق است. تحقیقات اخیر نشان دادند که تقویت تیرهای عمیق با نوار یا ورق CFRP می‌تواند منجر به بهبود مقاومت برشی و رفتار تیر عمیق شود. این مقاله به منظور بررسی تأثیر تقویت CFRP بر شدت اثر اندازه تیرهای عمیق انجام گرفته است. بدین منظور با استفاده از روش تحلیل عددی در نرم‌افزار تجاری Abaqus، ٥٣ تیر عمیق تقویت شده با CFRP به وسیله درستی‌آزمایی آزمایش‌های پیشین، مدلسازی و تحلیل شده‌اند. نمونه‌ها تحت بار ٢ نقطه‌ای افزاینده قرار گرفته و در گروه‌های ٤ عضوی با عمق‌های ٤٠٠ mm، ٦٠٠ mm، ٨٠٠mm و ١٠٠٠ mm تقسیم‌بندی شده‌اند. نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیرهای عمیق ٠/٥، ١ و ١/٥ است؛ همچنین مقاومت فشاری بتن نیز از ٢٤/٨ MPa تا ٣٥ MPa متغیر بوده است. به دلیل عدم تأثیر عرض و ضخامت تیر بر شدت اثر اندازه، مقیاس ابعاد تیرها به صورت دوبعدی تغییر کرده است؛ بدین ترتیب عرض تیرها ثابت و معادل ٨٠ mm است. نتایج حاکی از آنست که تقویت تیر عمیق با زاویه‌های ٤٥ یا ٩٠ درجه به وسیله نوار یا ورق CFRP برای کاهش اثر اندازه تیرهای عمیق مناسب بوده است. از طرفی افزایش مقاومت فشاری بتن و ثابت نگه‌داشتن عرض ورق بارگذاری و تکیه‌گاهی منجر به افزایش اثر اندازه تیرهای عمیق شد. همچنین افزایش نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیر می‌تواند در کاهش شدت اثر اندازه تیرهای عمیق تقویت شده با CFRP مؤثر باشد.

واژگان کلیدی: تیر عمیق، الیاف CFRP، بتن‌مسلح، مدلسازی عددی، اثر اندازه

١–مقدمه

بسیاری از زیرساخت‌های عمرانی از جمله سازه‌های مهندسی، برای افزایش مدت زمان بهره‌برداری و طول عمر مفید آنها بازسازی و مرمت می‌شوند تا از تخریب و بازسازی آنها که هزینه‌بر است جلوگیری شود. یکی از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین روش‌های ترمیم و مرمت این گونه سازه‌ها استفاده از الیاف CFRP است. از

جمله اعضای سازه‌ای که بدین وسیله ترمیم و تقویت می‌شوند، می‌توان به تیرهای بتن مسلح عمیق اشاره نمود. تیرهای عمیق به دلیل دارا بودن عمق زیاد و دهانه کوتاه دارای رفتار برشی هستند. تیرهای عمیق نیز دارای ناپیوستگی استاتیکی و یا هندسی هستند؛ در این تیرها بیشتر فاصله بین تکیه‌گاه‌ها و بارهای اعمالی از ۲ برابر ارتفاع تیر کمتر بوده و درنتیجه، کل ناحیه تیر به عنوان ناحیه ناپیوسته تحلیل و طراحی می‌شود. در تیرهای عمیق، اصل سنت ونان[1] که بیانگر توزیع کرنش غیرخطی می‌باشد حاکم است و بدین ترتیب طراحی آنها مانند تیرهای معمولی به صورت مقطعی صورت نمی‌گیرد [1].

از جمله آزمایش‌ها و مطالعات مهم انجام شده روی تیرهای عمیق تقویت شده با الیاف CFRP می‌توان به آزمایش‌های Li و Leung [2] در سال ۲۰۱۵ میلادی اشاره کرد. این آزمایش‌ها روی ۱۲ تیر بتن مسلح دوسرساده با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر متغیر از ۱ تا ۳/۵ بوده است. آنها مشاهده کردند که تقویت تیرها با نوار CFRP منجر به افزایش مقاومت برشی و شکل‌پذیری تیرها شده و نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیر در میزان بهبود مقاومت برشی تیر عمیق اثر می‌گذارند. از طرفی نسبت دهانه تیر به عمق ۲/۵ به عنوان بهینه‌ترین حالت تقویت تیر مشاهده شد. عربزاده و کریمی‌زاده [3] در سال ۲۰۱۹ آزمایش‌هایی را روی ۱۰ نمونه تیر عمیق دارای گشودگی دایروی شکل انجام دادند. این نمونه‌ها به روش EBR[2] و EBROG[3] تقویت شده و زاویه تقویت تیر به ترتیب ٤٥ و ۹۰ درجه بوده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند، تقویت تیر عمیق با زاویه ٤٥ درجه مؤثرتر از زاویه ۹۰ درجه بوده است. با این حال، تیر عمیق در تقویت ٤٥ درجه شکست تردتری را تجربه کرد؛ همچنین افزایش مقاومت برشی در نمونه تقویت شده با روش EBROG بیشتر از روش EBR است.

در این میان، آزمایش‌هایی نیز روی اثر اندازه تیرهای عمیق بتن مسلح انجام گرفته است. اثر اندازه پدیده‌ای است که در آن میزان مقاومت نرمالیزه شده عضو(مقاومت بدون بعد) به ازای افزایش ابعاد و اندازه عضو مذکور کاهش می‌یابد. این پدیده در اعضا با شکست ناگهانی برشی، شدیدتر بوده و نیازمند ملاحظات خاص طراحی هستند. Zhang و Tan[4] در سال ۲۰۰۷ آزمایش‌هایی را روی ۱۱ نمونه تیر عمیق با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ۱/۱ انجام دادند. نمونه‌ها به ۳ گروه تقسیم شده و عمق تیرها از ۳۵۰mm تا ۱۰۰۰mm متغیر بوده است. میزان عرض نمونه‌ها در گروه دوم ثابت و معادل ۸۰mm است. در سایر گروه‌ها عرض تیرها متناسب با افزایش عمق تیر عمیق، تغییر می‌کند. این آزمایش‌ها نشان دادند که عرض تیر در اثر اندازه تیر عمیق بی‌تأثیر است؛ در حالی که وجود آرماتور جان منجر به کاهش اثر اندازه در تیر عمیق شد. همچنین ثابت شد که خروج از مرکزیت اتفاقی ناشی از بارگذاری نمی‌تواند از دلایل تشدید اثر اندازه در تیر عمیق باشد. عربزاده و نوری سولا [5] نیز مطالعات عددی و آزمایشگاهی را روی ۳۲ تیر عمیق ساخته شده با بتن سبک و معمولی انجام دادند که عمق تیرها بین ۳۰۰mm تا ۹۰۰mm متغیر بود. نتایج نشان دادند که اثر اندازه در تیرهای عمیق با بتن سبک بیشتر است و افزایش دهانه برشی تیرعمیق منجر به کاهش اثر اندازه می‌شود.

El-sayed و Shuraim[6] نیز آزمایش‌هایی را روی ۱۲ تیر عمیق با مقاومت فشاری‌های بتن ۳۰MPa، ٤٥MPa و ۷٥MPa انجام دادند. نتایج حاکی از افزایش اثر اندازه تیر عمیق به ازای افزایش مقاومت فشاری بتن بودند. Chen و همکاران [7] نیز بر اساس مطالعات عددی که روی ٥۳ مدل تیر عمیق داشتند نشان دادند، هندسه نواحی فشاری و گرهی که خود نیز وابسته به ابعاد ورق بارگذاری است، بعنوان یکی از عوامل اثر اندازه در رفتار تیر عمیق تاثیر دارد.

۲-هدف و روش انجام تحقیق

مروری بر پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که در بیشتر مطالعات انجام گرفته در زمینه تیرهای عمیق به بررسی دقیق اثر اندازه در رفتار تیرهای عمیق تقویت شده با CFRP اشاره‌ای

۱ Saint venant principle
۲ Externally bonded reinforcement
۳ Externally bonded reinforcement on groove

نشده است. در این مقاله سعی شده است که به وسیله مدلسازی عددی در نرم‌افزار تجاری Abaqus و تحلیل نمونه‌ها، به بررسی اثر اندازه بر رفتار تیرهای عمیق تقویت شده با CFRP پرداخته شود. در گام اول، پارامترهای ورودی نرم افزار بر اساس نتایج درستی‌آزمایی تعدادی از نمونه‌های آزمایش‌های پیشین به دست می‌آیند. برای منظور کردن اثر اندازه در تیر عمیق، قسمت نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری بتن بر اساس هندسه و ابعاد ناحیه فشاری تیر اصلاح می‌شود. این امر منجر به تغییر انرژی شکست بتن نمی‌شود؛ پس منحنی تنش-تغییرمکان فشاری بتن ثابت است. پس از ساختن مدل‌های عددی و تحلیل آنها، خروجی نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های پیشین مقایسه و درستی آزمایی شده تا بدین وسیله از درستی فرضیات مدلسازی اطمینان حاصل شود؛ در مرحله دوم با ساختن مدل‌های تصدیق شده در مقیاس‌ها و اندازه‌های مختلف، می‌توان به بررسی اثر اندازه بر رفتار تیرهای عمیق تقویت شده با CFRP پرداخت. مانند تحقیقات پیشین، به دلیل عدم تأثیر ضخامت تیر بر شدت اثر اندازه، مقیاس نمونه‌های مدلسازی شده به صورت دوبعدی تغییر کرده و عرض تیرها ثابت لحاظ شده است.

۳-شبیه سازی عددی در نرم افزار Abaqus

در این مقاله از روش تحلیل دینامیک صریح[۱] موجود در نرم‌افزار Abaqus برای تحلیل غیرخطی مدل‌های عددی استفاده شده است.در این تحلیل به دلیل عدم وجود تکرار در گام‌های تحلیل سرعت تحلیل افزایش یافته، پس تعداد گام تحلیل افزایش می‌یابد. این روش همچنین می‌تواند برای مدلسازی مسائل شبه استاتیک نیز استفاده شود [8].

۳-۱- شبیه سازی رفتار بتن

برای شبیه‌سازی رفتار بتن، از مدل خرابی خمیری بتن[۲] یا به اختصار CDP استفاده شده است. این مدل که توسط Lubliner ارائه شده است، می‌تواند با لحاظ کردن پارامتر خرابی، رفتار فشاری و کششی بتن تحت بارگذاری چرخه‌ای و افزاینده را شبیه‌سازی کند [8]. علاوه بر تعریف مشخصات مکانیکی بتن اعم از مدول ارتجاعی و نسبت پواسون بایستی پارامترهای مشخصه مدل خرابی خمیر بتن به نرم افزار وارد شود. مقادیر پیشنهادی پارامترهای مذکور در جدول (۱) آمده است. پارامتر ψ زاویه اتساع بتن است و با نسبت کرنش حجمی به کرنش انحرافی خمیری بتن متناسب است. پاسخ تحلیل متأثر از این پارامتر بوده و مقدار آن بر اساس حساسیت سنجی به دست آمده است. پارامتر $\frac{\sigma_{c2}}{\sigma_{c1}}$ نسبت مقاومت فشاری دومحوری به مقاومت فشاری تک‌محوری بتن است که مطابق تحقیقات Kupfer و همکاران معادل ۱/۱٦ است [9]. K_c معادل نسبت بردار تنش انحراف آور کششی به فشاری می‌باشد و معمولاً مقادیر بین ۰,٦۷ تا ۱ را دارد. این پارامتر شکل تابع پتانسیل جریان خمیری را تغییر می‌دهد. e بیانگر خروج از مرکزیت تابع پتانسیل جریان از مجانبش است که مقدار آن معمولاً معادل ۰/۱ است [8]. پارامتر ویسکوزیته نیز زمان آسودگی ویسکو پلاستیک را نشان می‌دهد که به وسیله آن می‌توان به رفع برخی مشکلات همگرایی پرداخت. این پارامتر به دلیل به کارگیری روش تحلیل صریح معادل صفر است. پارامترهای مذکور در تمامی نمونه‌ها ثابت هستند.

جدول ۱. پارامترهای ثابت در مدل خرابی خمیری بتن

ψ	$\frac{\sigma_{c2}}{\sigma_{c1}}$	K_c	e	Viscosity parmeter
45	1.16	0.67	0.1	0

Table. 1. The constant parameters in concrete damaged plasticity model

۳-۱-۱- رفتار فشاری تک محوری بتن

برای تعریف رفتار فشاری از منحنی تنش-کرنش فشاری Lim و Ozbakkaloglu[10] استفاده شده است. این مدل که بر اساس طیف گسترده‌ای از نتایج آزمایش‌های استوانه استاندارد فشاری به دست آمده است، ضمن لحاظ کردن اثر محصورشدگی در بتن، می‌تواند برای تعیین منحنی تنش-کرنش فشاری بتن معمولی، سبک و پرمقاومت نیز استفاده شود. رابطه (۱) قسمت صعودی منحنی تنش-کرنش فشاری بتن را مطابق شکل (۱) ارائه می‌دهد.

۱ Explicit dynamic analysis

۲ Concrete damaged plasticity

$$f_c = \frac{f'_{co}(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}})r}{r-1+(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}})^r} \quad (۱)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - \frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}}} \quad (۲)$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{f'^{\,0.225k_d}_{co}}{1000} k_s k_a \quad (۳)$$

$$E_c = 4400\sqrt{f'_{co}}\,(\frac{\rho_c}{2400})^{1.4} \quad (۴)$$

به شکلی که f'_{co} مقاومت فشاری بتن بوده و ε_{co} میزان کرنش متناظر با حداکثر تنش فشاری است (رابطه ۳). پارامترهای ρ_c و E_c به ترتیب وزن مخصوص و مدول ارتجاعی بتن هستند. K_a و K_s و K_d ثابت‌هایی هستند که بر اساس ابعاد عضو منشوری فشاری به دست می‌آیند. قسمت نزولی منحنی مطابق رابطه(٦) به دست می‌آید. در این رابطه، f_{cres} تنش پسماند بوده و با توجه به محصور نبودن بتن، مقدار آن معادل صفر است [10]. در رابطه (۵) پارامتر ε_{ci} کرنش متناظر با نقطه عطف منحنی است.

$$\varepsilon_{ci} = (2.8\varepsilon_{co}(\frac{f_{cres}}{f'_{co}})f'^{\,-0.12}_{co} + 10\varepsilon_{co}(1-\frac{f_{cres}}{f'_{co}})f'^{\,-0.47}_{co})$$

$$f_c = f'_{co} - \frac{f'_{co}-f_{cres}}{1+(\frac{\varepsilon-\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{ci}-\varepsilon_{co}})^{-2}} \quad (۵)$$

(٦)

شکل ۱. مدل تنش-کرنش فشاری Lim و Ozbakkaloglu[9]

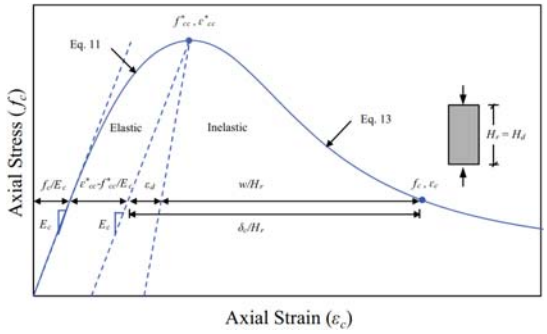


Fig. 1. The compressive stress-strain model of Lim and Ozbakkaloglu[9]

۳-۱-۲- اثر اندازه در منحنی تنش-کرنش فشاری

تحقیقات Zhang و Tan [4] نشان از تأثیر لاغری عضو فشاری در تیر عمیق دارد؛ به عبارت دیگر با افزایش عمق تیر عمیق، طول عضو فشاری افزایش یافته اما تغییری در طول ناحیه خرابی فشاری رخ نمی‌دهد. این نتایج در تحقیقات Jansen و Shah [11] نیز مشاهده می‌شود؛ به طوری که شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری بتن می‌تواند تا حد زیادی به اندازه و هندسه عضو وابسته باشد. تغییر مذکور در شاخه نزولی منحنی مطابق رابطه Lim و Ozbakkaloglu[10] مطابق رابطه (۸) لحاظ می‌شود.

$$\varepsilon_d = 0.02f'^{\,-0.5}_{co}(\frac{f'_{co}-f_c}{f'_{co}})$$

$$\varepsilon = \frac{(f_c-f'_{co})}{E_c}(1-\frac{H_r}{H}) + \varepsilon_{co} + (\varepsilon_c-\varepsilon_{co})\frac{H_r}{H} + \varepsilon_d\frac{(H_d-H_r)}{H} \quad (۷)$$

(۸)

به طوری که ε_d و ε_{co} به ترتیب کرنش غیر ارتجاعی ناحیه خرابی و کرنش متناظر با حداکثر تنش است. H_r و H_d به ترتیب معادل ارتفاع عضو فشاری مرجع و ارتفاع ناحیه خرابی است. میزان ارتفاع ناحیه خرابی می‌تواند حدود ۲ برابر کوچک‌ترین بعد عضو فشاری باشد [10]. شکل (۲) عضو فشاری مذکور در تیر عمیق را نشان می‌دهد.

شکل ۲. هندسه عضو منشوری فشاری در تیر عمیق [12]

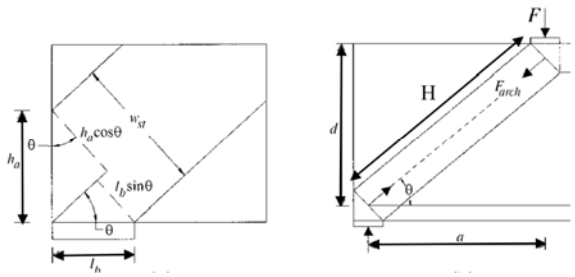


Fig. 2. The geometry of compression member in deep beam[12]

۳-۱-۳- رفتار کششی تک محوری بتن

در این مقاله به دلیل عدم وجود آرماتور جان در تیر، مدل عددی به دو ناحیه با سخت شوندگی کششی در نواحی مسلح شده و نرم شوندگی کششی در سایر نواحی فوقانی تیر تقسیم شده است. برای نرم شوندگی کششی بتن از مدل پیشنهاد شده توسط Cornelissen و همکاران[13] استفاده شده است. این مدل غیر خطی که بر حسب تنش-تغییرمکان تعریف می‌شود، به صورت

رابطه (۹) است.

$$\sigma/f_t = [1+(c_1\frac{w}{w_c})^3]e^{(-c_2\frac{w}{w_c})} - \frac{w}{w_c}(1+c_1{}^3)e^{-c_2} \quad (۹)$$

$$w_c = 5.14\frac{G_f}{f_t} \quad (۱۰)$$

$$G_f = 1.44(\frac{f'_c}{0.051})^{0.46}.(1+\frac{d_a}{11.27})^{0.22}.(\frac{w_a}{c})^{-0.3} \quad (۱۱)$$

به طوری که f_t مقاومت کششی بتن بوده و w_c میزان عرض ترک‌خوردگی در انتهای نرم شوندگی و نزول تنش می‌باشد. مقادیر c_1 و c_2 اعداد ثابتی بوده که به ترتیب معادل ۳ و ٦/۹۳ هستند. G_f انرژی شکست بتن بوده و مطابق رابطه (۱۱) پیشنهادی Bazant و Becq-giraudon [14] محاسبه می‌شود. در رابطه (۱۱) پارامترهای $\frac{w_a}{c}$ و d_a به ترتیب نسبت آب به سیمان و حداکثر قطر سنگدانه بتن هستند.

۳-۱-٤- رفتار سخت‌شوندگی کششی بتن

در ناحیه مسلح شده با آرماتور طولی، به دلیل وجود اندرکنش بین بتن و فولاد، بتن پس از ترک خوردگی به باربرداری ادامه داده و سختی خود را حفظ می‌کند. برای تعریف رفتار سخت‌شوندگی بتن از مدل تنش-کرنش اصلاح شده Nayal و Rasheed [15] استفاده شده است. شاخه نزولی این منحنی مطابق شکل (۳) سه خطی بوده و برای حصول همگرایی حدود ۱۰٪ مقاومت کششی معادل تنش پسماند است.

شکل ۳. مدل سخت‌شوندگی کششی Nayal و Rasheed [15]

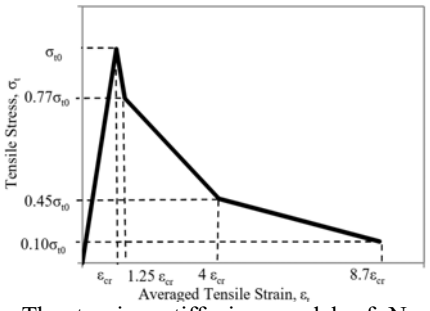


Fig. 3. The tension stiffening model of Nayal and Rasheed[15]

۳-۲- رفتار آرماتور فولادی

در این مقاله منحنی تنش-کرنش فولاد به صورت ارتجاعی خمیری کامل تعریف شد. از طرفی آرماتورها در بتن با تکنیک ناحیه مدفون شده[1] در بتن مقید شده و فرض می‌شود که هیچگونه لغزشی بین بتن و فولاد رخ نمی‌دهد [8].

۳-۳- رفتار CFRP

برای شبیه‌سازی رفتار نوار یا ورق تقویتی، منحنی تنش کرنش زمان شروع شکست CFRP خطی فرض شده است. با وجود یک سویه بودن الیاف در نوار تقویتی، خواص مکانیکی CFRP از قبیل مدول ارتجاعی و نسبت پواسون در حالت ارتجاعی به صورت ارتوتروپیک و مطابق جدول (۲) است [16]. این مشخصات در تمام نمونه‌های مدلسازی شده یکسان است.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح CFRP

E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12}	ν_{23}
165	9.65	5.2	3.4	0.3	0.45

Table. 2. The material properties of CFRP

۳-٤- اندرکنش بتن و CFRP

برای تعریف اندرکنش بین CFRP و بتن در آباکوس، از منحنی‌های تنش‌لغزش استفاده می‌شود. با فرض ناچیز بودن ضخامت چسب، این رفتار با استفاده از اندرکنش از نوع سطح چسبنده[2] مدلسازی می‌شود. این مدل به صورت دو خطی بوده و قادر است آثار همزمان برش در تمام صفحه و تنش نرمال بر صفحه را در جدایش CFRP از بتن لحاظ کند [8]. فاز خطی یا ارتجاعی این مدل را می‌توان در شکل (٤) مشاهده کرد. رابطه (۱۲) سختی ارتجاعی اولیه منحنی تنش لغزش را می‌دهد.

$$k_{nn} = \frac{1}{\frac{t_i}{G_i}+\frac{t_c}{G_c}} \quad (۱۲)$$

k_{nn} مؤلفه ماتریس سختی ارتجاعی چسب است. به طوری که t_i و t_c به ترتیب ضخامت چسب و لایه بتنی زیرین چسب حین جداشدگی هستند و به ترتیب ۱mm و ٥mm فرض می‌شوند. G_i و G_c نیز مدول برشی چسب و بتن مذکور می‌باشند. مطابق شکل

[1] Embedded region

[2] Cohesive surface

(٤)، می‌توان از رابطه (١٣) برای تعیین شروع خرابی چسب استفاده کرد [8]. در این معیار، تنش حداکثر نرمال t_{n0} معادل مقاومت کششی بتن لحاظ شده و تنش‌های حداکثر برشی t_{s0} و t_{t0} را می‌توان حدود ١/٥ MPa فرض کرد [16].

$$\left(\frac{t_n}{t_{n0}}\right)^2+\left(\frac{t_s}{t_{s0}}\right)^2+\left(\frac{t_t}{t_{t0}}\right)^2=1 \qquad (١٣)$$

فرایند خرابی چسب در این تحقیق با استفاده از معیار Benzeggagh و Kenane [17] مطابق رابطه (١٤) است. G_{Ic} انرژی شکست مد اول بوده و معادل انرژی شکست بتن است و G_{IIc} انرژی شکست مد دوم بوده و معادل ٩٠٠N/m در نظر گرفته می‌شود. ضریب η نیز معادل ١/٤٥ است [16]. G_{II} و G_T بر اساس انرژی شکست مد اول و دوم شکست، در هر لحظه از جدایش چسب محاسبه می‌شوند.

$$G_{Ic}+(G_{IIc}-G_{Ic})\{\frac{G_{II}}{G_T}\}^{\eta}=G \qquad (١٤)$$

شکل ٤. مدل تنش-لغزش برای اندرکنش بتن و CFRP [16]

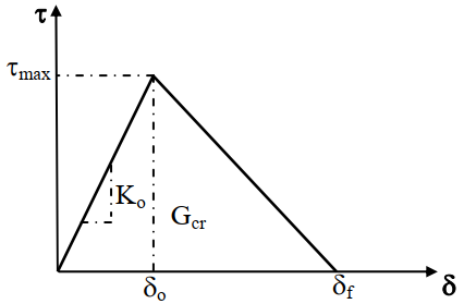


Fig. 4. The stress-slip model for concrete and CFRP interaction [16]

٣-٥- المان‌های مدلسازی عددی

در این مقاله برای مدلسازی بتن از المان هشت‌گرهی آجری با نام اختصاری C3D8R استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی CFRP از المان پوسته‌ای با نام S4R استفاده شده است. برای مدلسازی آرماتورهای فولادی برای شبیه‌سازی بهتر رفتار شاخه‌ای آرماتورها، از المان دو گرهی B31 استفاده شده است [8].

٤-درستی‌آزمایی مدل‌های عددی

برای درستی‌آزمایی مدل‌های عددی، از نتایج سه آزمایش پیشین استفاده شده است که نتایج آن در جدول (٤) آورده شده است. اولین درستی‌آزمایی مربوط به دو نمونه تیر عمیق با عمق‌های ٥٠٠mm و ٧٠٠mm از آزمایش‌های Zhang و Tan[4] است. این دو نمونه تقویت نشده با نام‌های اختصاری 2DB50 و 2DB70 بوده‌اند. دومین درستی‌آزمایی مربوط به آزمایش‌های Obaidat [16] است که شامل تیر تقویت شده با نوار CFRP می‌باشد و این نمونه با نام اختصاری RB 90/300 بوده است. سومین نمونه مربوط به تیر عمیق تقویت شده با زاویه ٤٥ درجه از آزمایش‌های اصغری و همکاران [18] با نام اختصاری CONa-DW(C) است. جدول (٣) مشخصات مصالح نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ٣. مشخصات مصالح نمونه‌های درستی آزمایی شده [16]

Title	E_c (MPa)	f_t (MPa)	f'_{co} (MPa)	G_f (N/m)	Steel rebars
2DB50	25045	2.71	32.4	99.2	2ϕ10 2ϕ13
2DB70	21911	2.37	24.8	87.7	2ϕ13 2ϕ16
RB 90/300	19063	2.61	30	93	2ϕ18
CONa-DW(C)	22000	2.52	25	89	4ϕ16

Table. 3. The material properties of validated specimens [16]

در تمامی نمونه‌ها، اثر اندازه مطابق بخش(٥-٢-٢) در شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری بتن اعمال شده است. بدین منظور، هندسه ناحیه فشاری تیرهای عمیق باید محاسبه شود. شکل (٥) هندسه عضو فشاری یکی از نمونه‌های درستی‌آزمایی را نشان می‌دهد.

شکل ٥. ابعاد محاسبه شده عضو منشوری فشاری در تیر 2DB50

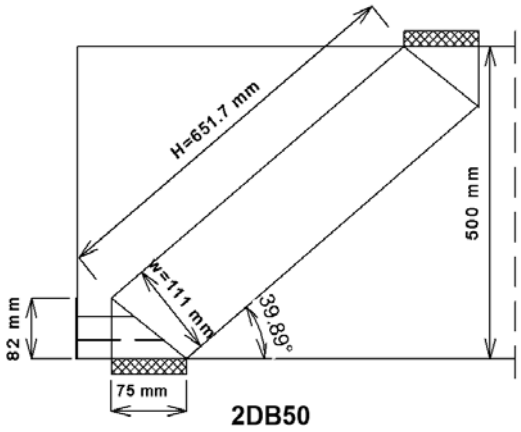


Fig. 5. The calculated dimensions of prismatic compression member in specimen 2DB50

شکل ٦. منحنی تنش کرنش فشاری بتن نمونه 2DB50 با اثر اندازه

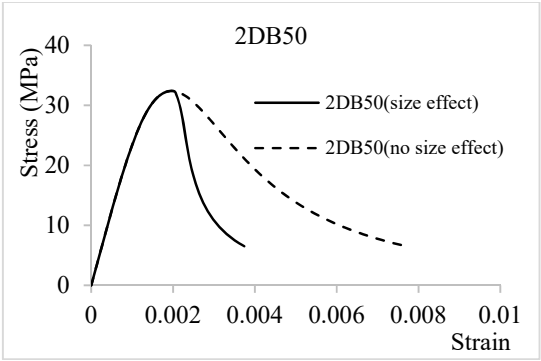
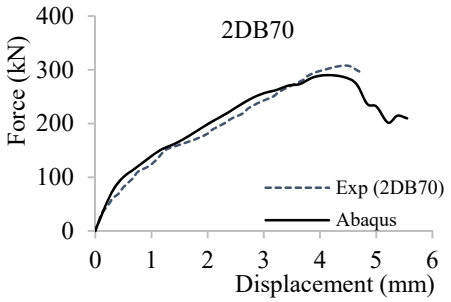


Fig. 6. The compression stress-strain curve of specimen 2DB50 with size effect

همان گونه که در شکل(٦) مشخص است، با اعمال اثر اندازه، شیب ناحیه نزولی افزایش داشته است که این امر ناشی از ثبات طول ناحیه خرابی فشاری با افزایش عمق تیر است. شکل (٧) نشان از هماهنگی میان منحنی نیرو–تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی و نتیجه آزمایش‌های Zhang و Tan [4] دارد.

شکل ٧. منحنی نیرو–تغییرمکان نمونه‌های Zhang و Tan در تحلیل عددی



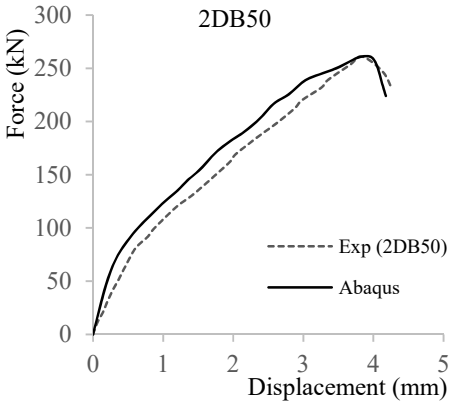


Fig. 7. The force-displacement curves of Zhang and Tan specimens in numerical analysis

مانند شکل (٧) در شکل (٨) نیز منحنی نیرو–تغییرمکان حاصل از تحلیل عددی با نتیجه آزمایش‌ها همخوانی دارد. شکل (٩) خرابی چسب اپوکسی زیر نوار تقویتی را نشان می‌دهد که با نتایج آزمایش‌ها Obaidat [16] هماهنگی دارد. در جدول (٤) پارامترهای V_{exp} و V_{fem} به ترتیب مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی بوده و Δ نیز تغییرمکان نهایی تیر است. میانگین و انحراف از معیار نتایج عددی نیز در جدول (٥) آمده است. با توجه به نتایج، مقادیر حاصل از خروجی عددی کمتر از ١٠٪ با نتایج آزمایش‌ها اختلاف دارند که نشان از درستی فرضیات عددی می‌دهد. برای یافتن بهینه‌ترین اندازه المان‌ها، حساسیت‌سنجی انجام شده و اندازه المان‌های بتن، فولاد و CFRP در تمامی نمونه‌ها معادل ٣٠mm است.

شکل ٨. منحنی نیروتغییرمکان نمونه RB 90/300 در تحلیل عددی

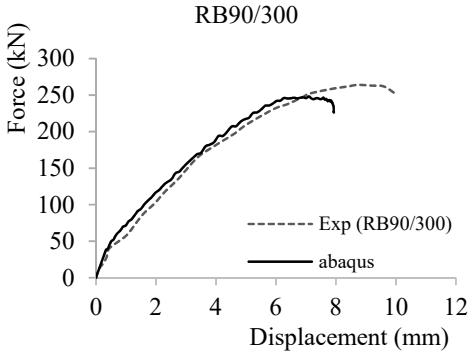


Fig. 8. The force-displacement curves of specimen RB90/300 in numerical analysis

شکل ۹. محل وقوع جداشدگی نوار تقویتی در تیر تقویت شده [16]

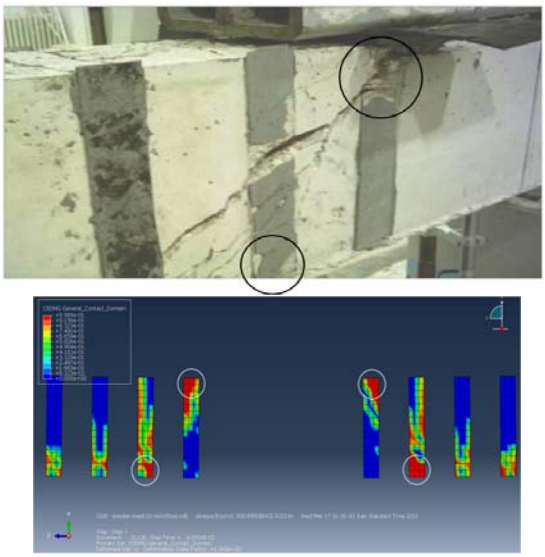


Fig. 9. The location of CFRP strips debonding on the strengthened beam[16]

جدول ٤. مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی

Title	V_{ex} (kN)	V_{fem} (kN)	Δ_{exp} (mm)	Δ_{fem} (mm)
2DB50	271	261	3.84	3.83
2DB70	311	289	4.45	4.06
RB90/300	270	248	8.72	7.09
CONa-DW(C)	528	478	3.11	3.13

Table. 4. The comparison of the numerical analysis and experimental results

جدول ٥. میانگین و انحراف از معیار نتایج تحلیل عددی

Title	$\Delta_{fem}/\Delta_{exp}$	V_{fem}/V_{exp}
2DB50	0.99	0.96
2DB70	0.91	0.93
RB90/300	0.81	0.92
CONa-DW(C)	1.01	0.90
Average	0.93	0.93
Standard deviation	0.091	0.025

Table. 5. The average and standard deviation of numerical analysis results

۵-بررسی اثر اندازه در تیرهای عمیق تقویت شده

با توجه به درستی نتایج تحلیل عددی در بخش درستی‌آزمایی، باید به بررسی اثر اندازه در تیر عمیق تقویت شده پرداخت. برای این منظور تعداد ۵۳ نمونه تیر عمیق تقویت شده با CFRP مطابق نمونه‌های درستی‌آزمایی شده مدل شده است. این نمونه‌ها به گروه‌های ٤ عضوی با عمق‌های ٤٠٠mm، ٦٠٠mm، ٨٠٠mm و ١٠٠٠mm مطابق شکل (١٠) تقسیم می‌شوند. در این بخش همچنین به بررسی اثر پارامترهایی همچون نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر، زاویه تقویت تیر، مقاومت فشاری بتن و عرض ورق بارگذاری بر روی میزان اثر اندازه تیر عمیق پرداختیم. برای این منظور نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیرها شامل مقادیر ٠/٥، ١ و ١/٥ بوده و مقاومت فشاری بتن شامل مقادیر ٢٤/٨MPa، ٣٠MPa و ٣٥MPa است. زاویه تقویت تیر ٤٥ درجه یا ٩٠ درجه و یا فاقد تقویت می‌باشد. چگونگی نامگذاری نمونه‌های مذکور پنج بخشی و به صورت DB-P-S-C-W است. DB نشانگر عمق تیر است. P بیانگر نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیر است؛ S و C به ترتیب نمایانگر زاویه تقویت تیر و مقاومت فشاری بتن می‌باشد. تیرهای دارای حروف SC بیانگر تیرهای فاقد تقویت است. حرف W در صورت وجود، بیانگر نمونه با عرض ورق بارگذاری ثابت ٦٠mm می‌باشد. درصد آرماتورهای طولی در تمامی تیرها معادل ١/٣٪ است. برای بررسی اثر اندازه، از مقاومت برشی نرمالیزه شده $\frac{V_{fem}}{b.h.f'_c}$ استفاده شده است. V_{fem} مقاومت نیرویی تیر است؛ b و h به ترتیب عرض و عمق تیر می‌باشند.

شکل ۱۰. هندسه تیرهای عمیق مدلسازی شده در نرم‌افزار Abaqus

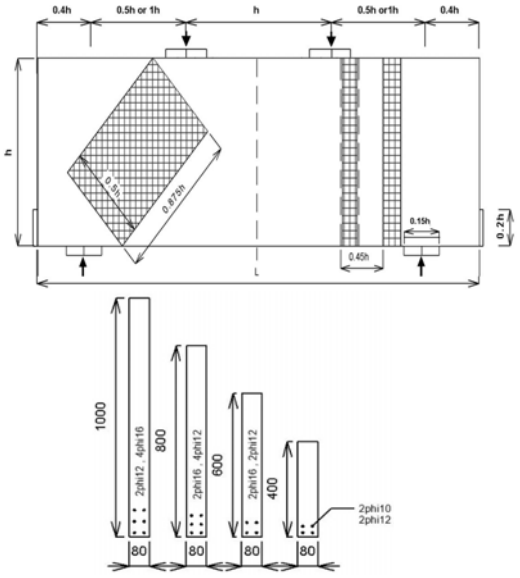


Fig. 10. The geometry of deep beams modelled in Abaqus software

٦- نتایج

٦-١- زاویه تقویت تیر عمیق

با توجه به جدول (٦) نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٩٠ درجه و نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ٠/٥ نسبت به نمونه‌های فاقد تقویت، دارای اثر اندازه کمتری بوده‌اند؛ به طوری که با افزایش عمق تیر DB400-P0.5-S90-C24.8 تا ١٠٠٠mm، مقاومت نرمالیزه شده ١١٪ کاهش یافته است؛ اما با افزایش عمق نمونه فاقد تقویت DB400-P0.5-SC-C24.8، مقاومت نرمالیزه شده ١٦٪ کاهش داشته است. تقویت نمونه‌ها با زاویه ٤٥ درجه مانند تقویت ٩٠ درجه تأثیر مثبتی در کاهش میزان اثر اندازه داشته است. به صورتی که با افزایش عمق تیر DB400-P0.5-S45-C24.8 تا ١٠٠٠mm، مقاومت نرمالیزه شده ١٢٪ کاهش یافته است که این امر نشان از ٤٪ کاهش اثر اندازه دارد. این پدیده در نمونه‌های دارای عرض ورق بارگذاری ثابت نیز قابل مشاهده است .علت این امر را می‌توان افزایش طول پیوند مؤثر[1] نوار تقویتی در تیر دانست؛ این پارامتر می‌تواند باعث افزایش تنش در نوار تقویتی و درنتیجه افزایش اضافه مقاومت برشی تیر شود و به عواملی همچون مدول ارتجاعی، ضخامت، عرض و طول نوار CFRP بستگی دارد [18]. بدین ترتیب با افزایش ابعاد تیر و نوار CFRP، میزان اضافه مقاومت برشی در تیر افزایش می‌یابد. به طوری که تیر تقویت شده DB400-P0.5-S90-C24.8 دارای ٥٪ اضافه مقاومت برشی است؛ اما با افزایش ابعاد تیر، نمونه DB800-P0.5-S90-C24.8 دارای ٢٢٪ اضافه مقاومت است؛ این امر در نهایت باعث کاهش اثر اندازه شده است. از آنجایی که در تقویت ٤٥ درجه، نوار CFRP عمود بر راستای ترک بوده و از بازشدگی ترک برشی ممانعت بیشتری می‌کند، نمونه‌های تقویت شده با این زاویه دارای بیشترین مقاومت برشی و تغییرشکل نهایی بوده و حداکثر ٥٨٪ اضافه مقاومت داشته‌اند.

جدول ٦. نتایج تحلیل عددی نمونه‌های دارای نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ٠/٥

Title of specimen	V_{fem} (kN)	Ultimate Displacement (mm)	Resistance due to CFRP (kN)	$\frac{V}{b.h.f'_c}$
DB400-P0.5-SC-C24.8	232.28	1.13	-	0.290
DB600-P0.5-SC-C24.8	365.97	1.54	-	0.305
DB800-P0.5-SC-C24.8	369.92	1.41	-	0.248
DB1000-P0.5-SC-C24.8	487.08	1.49	-	0.243
DB400-P0.5-S90-C24.8	244.07	1.22	11.79	0.305
DB600-P0.5-S90-C24.8	344.39	1.31	21.58	0.278
DB800-P0.5-S90-C24.8	452.36	1.57	82.44	0.283
DB1000-P0.5-S90-C24.8	541.42	1.79	54.34	0.271
DB400-P0.5-S45-C24.8	353.2	1.31	120.92	0.440
DB600-P0.5-S45-C24.8	501.63	1.97	135.66	0.418
DB800-P0.5-S45-C24.8	747.77	2.11	277.85	0.405
DB1000-P0.5-S45-C24.8	771.89	2.43	284.81	0.386
DB600-P0.5-SC-C24.8-w	266.98	1.03	-	0.222
DB800-P0.5-SC-C24.8-w	290.43	0.91	-	0.181
DB1000-P0.5-SC-C24.8-w	331.15	1.1	-	0.165
DB600-P0.5-S90-C24.8-w	342.54	1.32	75.56	0.285
DB800-P0.5-S90-C24.8-w	389.13	1.47	98.7	0.243
DB1000-P0.5-S90-C24.8-w	423.36	1.59	92.21	0.212
DB600-P0.5-S45-C24.8-w	478.02	1.65	211.04	0.398
DB800-P0.5-S45-C24.8-w	565.65	2.04	275.22	0.353
DB1000-P0.5-S45-C24.8-w	598.52	1.83	267.37	0.299

Table. 6. The numerical analysis results of specimens with shear span to effective depth ratio of 0.5

١ Effective bond length

٦-٢- مقاومت فشاری بتن

در جدول (٨) می‌توان ملاحظه کرد که افزایش مقاومت فشاری بتن، منجر به افزایش اندکی در اثر اندازه تیرهای تقویت شده دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش عمق تیر DB400-P1-S90-C24.8 تا ١٠٠٠mm، میزان کاهش مقاومت نرمالیزه شده حدود ١٠٪ می‌باشد و با افزایش عمق تیر DB400-P1-S90-C35، مقاومت نرمالیزه شده ١٤٪ کاهش یافت. علت این امر را می‌توان در شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری بتن یافت؛ به طوری که با افزایش مقاومت فشاری بتن، شیب قسمت نزولی منحنی تنش کرنش بتن افزایش یافته و اثر اندازه در تیر عمیق تشدید یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت فشاری بتن، میزان اضافه مقاومت برشی ناشی از تقویت CFRP افزایش یافته است؛ به عنوان نمونه DB1000-P1-S90-C24.8-W تنها دارای ٤٦/٤kN اضافه مقاومت است؛ در صورتی که مقدار اضافه مقاومت در تیر DB1000-P1-S90-C35-W حدود ٥٨/٧ kN می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان افزایش مقاومت کششی لایه بتنی زیر نوار CFRP هنگام جدایش توصیف کرد. زیرا برای تعریف مقاومت چسب اپوکسی در نرم افزار از مقاومت کششی بتن استفاده شده است.

٦-٣- نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیر

همان‌گونه که در جداول (٦ و ٧) مشاهده می‌شود، افزایش دهانه برشی در تیرهای با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ٠/٥ و عرض ورق بارگذاری ثابت، سبب شده است که اثر اندازه کاهش یابد. برای نمونه با افزایش عمق نمونه DB400-P0.5-SC-C24.8 تا ١٠٠٠ mm، مقاومت نرمالیزه شده ٤٣٪ کاهش یافت؛ درحالی که با افزایش عمق تیر DB400-P1.5-SC-C24.8 تا ١٠٠٠ mm، مقاومت نرمالیزه ١٧٪ کاهش یافت.

از طرفی با افزایش دهانه برشی، ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٩٠ درجه، CFRP توانایی خود را در کاهش اثر اندازه تیر عمیق به طور تدریجی از دست می‌دهد. برای نمونه در نمونه‌های با عرض ورق بارگذاری ثابت، با افزایش عمق تیر DB400-P0.5-S90-C24.8 تا ١٠٠٠mm، مقاومت نرمالیزه شده ٣٠٪ کاهش یافت که این امر نشانگر ١٣٪ کاهش در اثر اندازه نسبت به نمونه تقویت نشده است. بدین ترتیب در نمونه‌های تقویت شده با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ١، ٦٪ کاهش اثر اندازه مشاهده شده و در نمونه‌هایی با نسبت دهانه برشی به عمق ١/٥، کاهشی در اثر اندازه مشاهده نمی‌شود. این امر می‌تواند ناشی از تغییر زاویه ترک برشی باشد. به طوری که با افزایش دهانه برشی در نمونه با عمق ٤٠٠mm، زاویه ترک برشی نسبت به افق کمتر شده و نوار CFRP از باز شدن ترک ممانعت می‌کند؛ در نتیجه میزان اضافه مقاومت برشی ناشی از CFRP افزایش می‌یابد. این درحالیست که افزایش دهانه تأثیری در اضافه مقاومت نمونه‌های مرتفع تر نداشته است. به عنوان مثال در نمونه DB400-P0.5-S90-C24.8 دارای ٥٪ اضافه مقاومت و نمونه DB400-P1.5-S90-C24.8 دارای ٢٣٪ اضافه مقاومت برشی است.

جدول ٧. نتایج تحلیل عددی نمونه‌های دارای نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ١/٥

Title of specimen	V_{fem} (kN)	Ultimate displacement (mm)	Resistance due to CFRP (kN)	$\frac{V_{fem}}{b.h.f'_c}$
DB400-P1.5-SC-C24.8	147.31	3.33	-	0.184
DB600-P1.5-SC-C24.8-w	204.3	4.09	-	0.170
DB800-P1.5-SC-C24.8-w	220.9	4.14	-	0.138
DB1000-P1.5-SC-C24.8-w	277.75	5.27	-	0.139
DB400-P1.5-S90-C24.8	180.71	4.08	33.4	0.226
DB600-P1.5-S90-C24.8-w	246	5.24	41.7	0.205
DB800-P1.5-S90-C24.8-w	296.5	5.99	75.6	0.185
DB1000-P1.5-S90-C24.8-w	303.55	5.23	25.8	0.152

Table. 8. The numerical analysis results of specimens with shear span to effective depth ratio of 1.5

جدول ٨. نتایج تحلیل عددی نمونه‌های دارای نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ١

Title of specimen	V_{fem} (kN)	Ultimate displacement (mm)	Resistance due to CFRP (kN)	$\frac{V_{fem}}{b.h.f'_c}$
DB400-P1-SC-C24.8	192.15	1.96	-	0.240
DB600-P1-SC-C24.8-w	272.74	2.91	-	0.227
DB800-P1-SC-C24.8-w	318.92	3.29	-	0.199
DB1000-P1-SC-C24.8-w	398.02	3.38	-	0.199
DB400-P1-S90-C24.8	198.69	2.07	6.54	0.248
DB600-P1-S90-C24.8-w	291.50	2.84	18.76	0.243
DB800-P1-S90-C24.8-w	378.39	3.71	59.47	0.236
DB1000-P1-S90-C24.8-w	444.45	3.87	46.45	0.222
DB400-P1-SC-C30	203.38	1.88	-	0.212
DB600-P1-SC-C30-w	287.43	2.61	-	0.200
DB800-P1-SC-C30-w	343.68	2.60	-	0.179
DB1000-P1-SC-C30-w	428.97	4.13	-	0.179
DB400-P1-S90-C30	213.74	2.11	10.36	0.223
DB600-P1-S90-C30-w	335.59	3.09	48.16	0.233
DB800-P1-S90-C30-w	394.60	3.55	50.92	0.205
DB1000-P1-S90-C30-w	467.05	3.74	38.08	0.195
DB400-P1-SC-C35	231.71	2.18	-	0.206
DB600-P1-SC-C35-w	308.02	2.64	-	0.183
DB800-P1-SC-C35-w	369.71	2.82	-	0.165
DB1000-P1-SC-C35-w	449.22	3.63	-	0.160
DB400-P1-S90-C35	235.31	2.22	3.6	0.210
DB600-P1-S90-C35-w	347.70	3.10	39.68	0.206
DB800-P1-S90-C35-w	431.07	3.88	61.36	0.192
DB1000-P1-S90-C35-w	507.90	4.81	58.68	0.181

Table. 7. The numerical analysis results of specimens with shear span to effective depth ratio of 1

٦-٤- عرض ورق بارگذاری و تکیه‌گاهی

در جدول (٦) با ثابت نگه داشتن عرض ورق بارگذاری، ملاحظه می‌شود که در نمونه‌های تقویت شده، میزان اثر اندازه افزایش می‌یابد. برای مثال در نمونه‌های تقویت شده با عرض ورق بارگذاری ثابت، با افزایش عمق تیر DB400-P0.5-S45-C24.8 تا ١٠٠٠mm، مقاومت نرمالیزه شده ٣٢٪ کاهش یافت. در حالی که میزان کاهش مقاومت نرمالیزه شده در نمونه‌های با عرض ورق متغیر حدود ١٢٪ است و این امر نشانگر ٢٠٪ افزایش در اثر اندازه نسبت به نمونه تقویت نشده است. بدین ترتیب در نمونه‌های فاقد تقویت CFRP نیز افزایش اثر اندازه مشاهده شد. علت این امر را می‌توان در تأثیر عرض ورق بارگذاری بر هندسه نواحی فشاری و گرهی تیر عمیق عنوان کرد؛ شکل‌های (١١تا ١٤) نمودار مقاومت نرمالیزه شده نسبت به عمق تیر عمیق آمده است. همچنین برای هر نمودار، یک تابع برازش به صورت توانی ارائه شده است و توان تابع نشانگر قدرت اثر اندازه می‌باشد. محور قائم نمودار، مقاومت نرمالیزه شده بوده و کمیتی بدون بعد است.

شکل ١١. منحنی مقاومت نرمالیزه شده در برابر عمق نمونه‌های فاقد تقویت CFRP

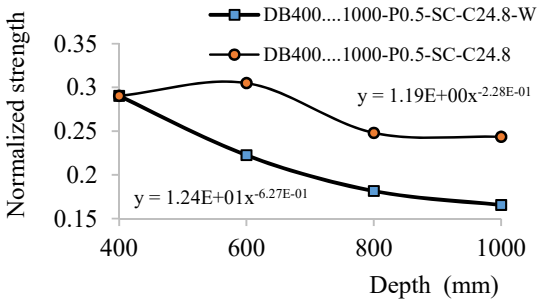


Fig. 11. The normalized strength-depth curve of specimens without CFRP strengthening

شکل ١٢. منحنی مقاومت نرمالیزه شده در برابر عمق نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٩٠ درجه

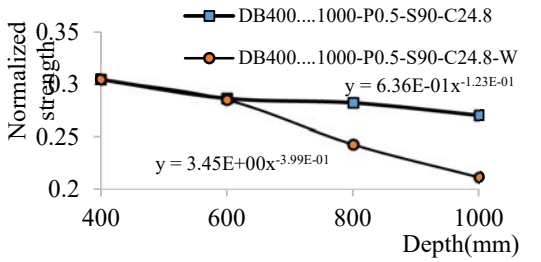


Fig. 12. The normalized strength-depth curve of specimens strengthened with 90-degree angle

شکل ۱۳. منحنی مقاومت نرمالیزه شده در برابر عمق نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٤٥ درجه

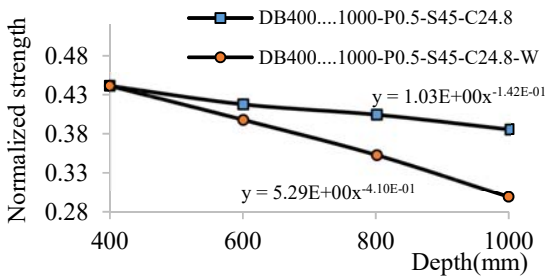


Fig. 13. The normalized strength-depth curve of specimens strengthened with 45-degree angle

شکل ١٤. منحنی مقاومت نرمالیزه شده در برابر عمق تیرهای با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ١

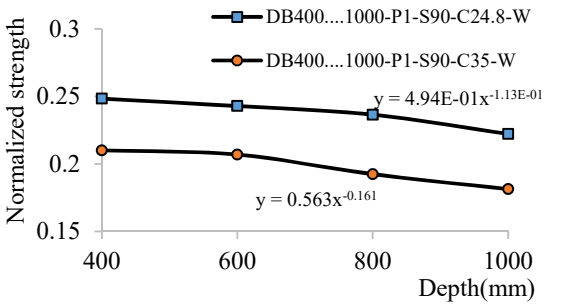
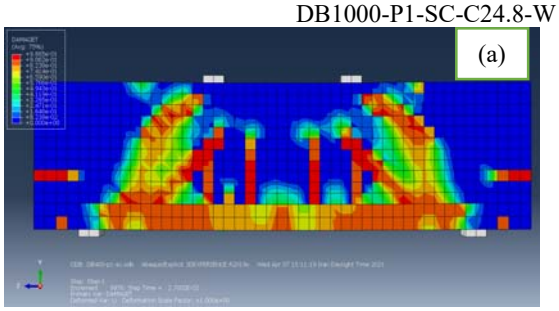


Fig. 14. The normalized strength-depth curve of beams with shear span to effective depth ratio of 1

٦-٥- رفتار تیرهای عمیق

در شکل (١٥) با افزایش عمق تیر عمیق، طول محدوده ترک خوردگی خمشی و برشی در تیر افزایش یافته است. این پدیده در نمونه‌های تقویت شده با CFRP نیز صادق است. مطابق شکل (١٦) مقاومت نیرویی برشی و تغییرمکان تیرهای عمیق با افزایش اندازه تیر افزایش یافت. هچنین نیروی شروع رفتار غیرخطی تیر عمیق با افزایش اندازه تیر افزایش یافته است.

شکل ١٥. خرابی کششی در نمونه a) DB400-P1-SC-C24.8 و b) DB1000-P1-SC-C24.8-W



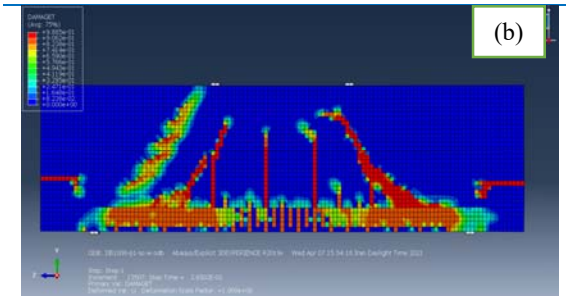


Fig. 15. The tensile damage in specimen a) DB400-P1-SC-C24.8 and b) DB1000-P1-SC-C24.8-W

شکل ١٦. منحنی نیرو-تغییرمکان تیرهای تقویت شده با نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر ٠/٥

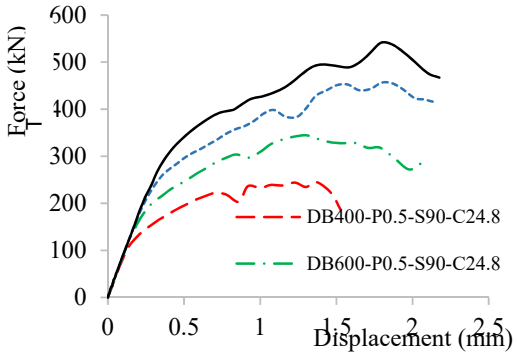


Fig. 16. The force-displacement curve of strengthened beams with shear span to effective depth ratio of 0.5

٧- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر اندازه بر رفتار تیرهای عمیق تقویت شده با CFRP مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار Abaqus برای تحلیل عددی استفاده شد. در گام اول برای اطمینان از فرضیه مدلسازی عددی در تحلیل اجزاء محدود، نتایج عددی حاصل بر اساس نتایج آزمایش‌های پیشین درستی‌آزمایی شد. در گام بعد با داشتن پارامترهای درستی‌آزمایی شده، تعداد ٥٣ مدل تیر عمیق مدلسازی شده و به بررسی اثر اندازه پرداخته شد. در این مقاله همچنین به بررسی پارامترهای مؤثر در میزان اثر اندازه تیرهای عمیق مانند مقاومت فشاری بتن، عرض ورق بارگذاری، نسبت دهانه برشی به عمق مؤثر تیر و زاویه تقویت تیر با CFRP پرداخته شد. در نمودارهای مقاومت نرمالیزه شده در برابر عمق تیر، روابطی حاصل شد که با X^n متناسب است؛ به طوری که X ارتفاع تیر و n نشانگر قدرت اثر اندازه است. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل به صورت خلاصه بیان می‌شود:

١- تقویت نمونه‌ها با CFRP منجر به افزایش مقاومت برشی و همچنین تغییرمکان نهایی شد. از طرفی با افزایش عمق تیر عمیق، مقاومت نیرویی افزایش و مقاومت برشی نرمالیزه شده کاهش یافت.

٢-تقویت تیر عمیق با CFRP، موجب کاهش شدت اثر اندازه شده است؛ اما این اثر به طور کامل خنثی نشد. به طوری که مقاومت نرمالیزه شده نمونه‌های کنترل با نسبت دهانه برشی به عمق ٠/٥ با $X^{-0.228}$ و نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٩٠ درجه با $X^{-0.123}$ متناسب است و این امر می‌تواند ناشی از افزایش طول مهاری مؤثر نوار CFRP به ازای افزایش اندازه تیر باشد.

٣-تقویت تیر عمیق با زاویه ٤٥ درجه نیز منجر به کاهش اثر اندازه شد؛ به طوری که مقاومت نرمالیزه شده نمونه‌های فاقد تقویت با $X^{-0.228}$ و نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٤٥ درجه با $X^{-0.142}$ متناسب است. این امر در نمونه‌های با عرض ورق بارگذاری ثابت نیز صادق است.

٤- با افزایش دهانه برشی در تیر عمیق، اثر اندازه کاهش و تغییرشکل نهایی تیرها افزایش یافت؛ از طرفی به تدریج CFRP توان خود را برای کاهش اثر اندازه تیر عمیق از دست داد.

٥- با افزایش مقاومت فشاری بتن تیر عمیق از ٢٤/٨ MPa تا ٣٥MPa، اثر اندازه تیرهای تقویت شده ٤٪ افزایش پیدا کرد؛ به طوری که مقاومت برشی نرمالیزه شده در نمونه‌های تقویت شده با مقاومت فشاری ٢٤/٨ MPa با $X^{-0.11}$ و نمونه‌های تقویت شده با مقاومت فشاری ٣٥ MPa با $X^{-0.161}$ متناسب است.

٦- مانند تحقیقات پیشین، ثابت نگه داشتن عرض ورق بارگذاری منجر به تشدید اثر اندازه در تیرهای عمیق شده است. به عنوان نمونه مقاومت برشی نرمالیزه شده در نمونه‌های تقویت شده با زاویه ٤٥ درجه و عرض ورق بارگذاری متغیر با $X^{-0.142}$ و نمونه‌های دارای عرض ورق بارگذاری ثابت با $X^{-0.410}$ متناسب است. با این حال استفاده از نوار یا ورق تقویتی موجب کاهش اثر اندازه ناشی از این پارامتر شد.

٨- منابع

[1] ACI Committee. ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA. 2019.

[2] Li W, Leung CK. Shear span–depth ratio effect on behavior of RC beam shear strengthened with full-wrapping FRP strip. Journal of Composites for Construction. 2016 Jun1;20(3):04015067.

[3] Arabzadeh A, Karimizadeh H. Experimental study of RC deep beams with opening and FRP composites installed by means of EBR and EBROG methods. Construction and Building Materials. 2019 May 30; 208:780-91.

[4] Zhang N, Tan KH. Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification. Engineering Structures. 2007 Dec 1;29(12):3241-54.

[5] Arabzade A, Noori Soola A. Investigating Effective Parameters in Shear Strength of Deep Beams without Shear Reinforcement. Concrete Research. 2015 Feb 20;7(2):17-30(In Persian).

[6] El-Sayed AK, Shuraim AB. Size effect on shear resistance of high strength concrete deep beams. Materials and Structures. 2016 May;49(5):1871-82.

[7] Chen H, Yi WJ, Ma ZJ. Shear size effect in simply supported RC deep beams. Engineering Structures. 2019 Mar 1; 182:268-78.

[8] ABAQUS Inc. ABAQUS/Theory User manual, version 6.11, 2011.

[9] Kupfer H, Hilsdorf HK, Rusch H. "Behavior of concrete under biaxial stresses". InJournal proceedings 1969 Aug 1; Vol. 66, No. 8, pp. 656-666.

[10] Lim JC, Ozbakkaloglu T. Stress–strain model for normal- and light-weight concretes under uniaxial and triaxial compression. Construction and Building Materials. 2014 Nov 30; 71:492-509.

[11] Jansen DC, Shah SP. Effect of length on compressive strain softening of concrete. Journal of Engineering Mechanics. 1997 Jan; 123(1): 25-35.

[12] Matamoros AB, Wong KH. "Design of simply supported deep beams using strut-and-tie models". Structural Journal. 2003 Nov 1; 100(6): 704-712.

[13] Cornelissen H, Hordijk D, Reinhardt H. Experimental determination of crack softening characteristics of normal weight and lightweight. Heron. 1986;31(2):45-6.

[14] Bažant ZP, Becq-Giraudon E. Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. Cement and concrete research. 2002 Apr1;32(4):529-56.

[15] Nayal R, Rasheed HA. Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars. Journal of Materials in Civil Engineering. 2006 Dec; 18(6): 831-841.

[16] Obaidat Y. Structural retrofitting of concrete beams using FRP-debonding issues. Lund University; 2011.

[17] Benzeggagh ML, Kenane MJ. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. Composites science and technology. 1996 Jan 1; 56(4): 439-49.

[18] Alsadat Asghari A, Tabrizian Z, Hossein Ali Beigy M, Ghodrati Amiri G, Navayineya B. An experimental study on shear strengthening of RC lightweight deep beams using CFRP. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering. 2014 Aug 1;2(2):9-19.

[19] Monti G, Renzelli M, Luciani P. "FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones". In Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures:(In 2 Volumes) 2003; 183-192.

Size effect on the behavior of reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP

Abolfazl Arabzade[1*], Armin Alibakhshi[2]

*1. Associate professor, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

2. M.Sc. Student, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

*** arabzade@modares.ac.ir**

Abstract:

Deep beams are members considered to have span to depth ratio less than 4. These beams are widely used in different sorts of structures including dams, reservoirs, silos, caissons and high-rise buildings. The cracking mode of deep beams is mainly dependent on their boundary conditions. Due to the rule of shear failure, deep beams are designed against shear. So, strengthening and repairing these beams has always been important to improve shear resistance. One of the applied methods is the use of CFRP fibers for repairing and strengthening deep beams. These fibers can be fabricated in the form of strips, sheets and rebars. Due to the constructional limitations, CFRP strips are frequently installed on the external surface of beams. For this reason, the failure of strengthened beams coincides with debonding of CFRP strips. The former experiments indicate that strengthening deep beams with CFRP strips is useful for improving their behavior. These experiments also indicated that parameters including strengthening angle, shear span to depth ratio and the method of CFRP installation can affect the strength increment due to CFRP. One of the other remarkable parameters that affects the behavior of reinforced concrete beams is size effect. This parameter matters when the geometry of struts and nodal zones remains slender in deep beams. To assess the intensity of size effect in deep beams, the force strength of beam must be normalized based on the compressive strength of concrete and the beams sections area. This study was conducted to investigate the effect of CFRP strengthening on the size effect on deep beams. It was aimed to use explicit dynamic analysis method in Abaqus software so as to model and analyze 53 CFRP-strengthened deep beams with evaluation of previous experiments. In this method, due to the absence of excessive iterations within each analysis step, the number of analysis steps is increased. The so-called method is also appropriate for simulating quasi static models. To reach the purpose of study, the specimens of three different experiments were modeled and analyzed to evaluate the assumptions of numerical modeling. After the evaluation conditions were satisfied, 53 deep beams were modeled in Abaqus software. The specimens were subjected to two incremental point loads and were divided into four-member groups with depths of 400 mm, 600 mm, 800 mm and 1000 mm. The beams shear span to effective depth ratios are 0.5, 1 and 1.5; The compressive strength of concrete also varied from 24.8 MPa to 35 MPa. Since changing the width of deep beams does not affect the intensity of size effect, the beams width was considered constant and equal to 80 mm. The results of the study indicate that strengthening deep beams with CFRP strip or sheet is suitable for reducing the size effect; In addition, increasing compressive strength of concrete and keeping the loading plate constant can amplify size effect of deep beam. Increasing shear span to effective depth ratio of beam caused the size effect to be decreased. Strengthening deep beams with both angles of 45 and 90 degrees was appropriate for decreasing deep beams size effect.

Keywords: Deep beams, numerical modeling, Size effect, CFRP, reinforced concrete