مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره نوزدهم، شماره ٦، سال ۱۳۹۸



# بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش به روش NSM همراه با مطالعات موردی

امیر شمالی\*۱، داود مستوفی نژاد۲، محمد رضا اصفهانی<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته دکترای مهندسی عمران و سازه، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۲-استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۳-استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

a.shomali@pa.iut.ac.ir

تاريخ دريافت: ٩٧/٦/٢٤ تاريخ پذيرش: ٩٨/٧/٣٠

## چکیدہ

این مقاله، عملکرد تیرهای بتن مسلح تقویت شده در برش را به روش آزمایشگاهی بررسی کرده و به کمک تحلیل اجزای محدود شبیه سازی میکند. سپس با انجام تحلیلهای موردی، تاثیر استفاده از بتن با مقادیر متفاوت مقاومت فشاری و نسبتهای متفاوت آرماتورهای عرضی را بررسی میکند. در بخش آزمایشگاهی ٤ نمونه تیر بتن مسلح به دو گروه با و بدون خاموت تقسیم شده و در آن اثر استفاده از نوارهای پلیمری تقویت شده با الیاف کربن به روش نصب در نزدیک سطح تحقیق میشود. برای این منظور، تیرهایی با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰۰ میلی متر ساخته شده و تحت بار استاتیکی قرار گرفتند و منحنیهای بار- تغییر مکان وسط دهانه و چگونگی گسیختگی آنها مقایسه شدند. شیارهای استفاده شده در تکنیک، مجموعههایی از دو شیار هستند که در فواصل منظم در دهانههای برشی ایجاد شدهاند. نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد که استفاده از روش باعث افزایش ظرفیت برشی به میزان ٤١ درصد و ٢٩ درصد به ترتیب در تیرهای با و بدون خاموت میشود. به علاوه، شبیهسازی نمونههای آزمایشگاهی با مدلکردن احتمال جدا شدگی نوارهای کامپوزیتی با استفاده از المان چسبنده نشان میدهد که با کنونهای آزمایشگاهی مهماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. هم چنین تحلیلهای اجزای محدود موردی نشان می دهد که با کنی، احتی اجرا شدگی نوارهای بیشتر است و با افزایش درصد آرماتورهای برشی، کرنش محوری نوارهای کاهش مقاومت فشاری بتن، احتمال جدا شدگی نوارهای بیشتر است و با افزایش درصد آرماتورهای برشی، کرنش محوری نوارهای کاهش بیدا می کند.

**واژگان کلیدی:** تقویت برشی به روش نصب در نزدیک سطح، پلیمر تقویت شده با الیاف کربن، تحلیل اجزای محدود، خاموت، مقاومت فشاری بتن

#### ۱-مقدمه

در دهههای اخیر، پژوهشهای زیادی برای بررسی اثر متغیرهای مختلف موثر بر پاسخ برشی تیر بتنی با استفاده از پلیمرهای تقويت شده با الياف تک يا چند جهته، انجام گرفته است -1]. [2 ویژگی های ارزشمند مواد مرکب مانند نسبت خوب مقاومت به وزن، روش نصب ساده و سريع و مقاومت در برابر خوردگي باعث كاربرد روزافزون اين مصالح شده است [2]. تقويت برشي تیرهای بتن مسلح با چسبان*د*ن صفحات یا نوارهای FRP به صورت دور پیچ کامل مقطع، چسباندن به شکل U و یا نصب بر پهلوهای تیر در زوایای مختلف نسبت به محور طولی، امکانپذیر است [3]. نتایج رضایت بخش آزمایشگاهی و تحليلي ثابت مي كند كه روش نصب خارجي، EBR، مي تواند به عنوان راه حل قابل قبول در تقویت برشی و خمشی اعضای بتن مسلح به کار گرفته شود. ریتا و همکاران با چسباندن نوارهای CFRP بر سطوح جانبی تیرهای بتن مسلح، مود گسیختگی ترد برشی را تبدیل به مود خمشی شکل پذیر کردند. نقطه ضعف روش مذكور، احتمال جداشدگی نوارهای چسبیده به وجوه جانبی آن است [4]. روشهای دیگری مانند شیوه نصب در نزدیک سطح NSM۳ و یا روش هایی که با مهار نوار كامپوزيتي مانع از جدا شدگي آن ها از سطح بتن مي شوند، می توانند به عنوان جایگزین روش EBR به کار روند [5-6]. به تازگی با تلاش پژوهشگران، روش شیار زنی برای تقویت برشی، خمشی و فشاری اعضای بتن آرمه پیشنهاد شده است که می تواند احتمال بروز پدیده ی جدا شدگی را حذف کند -7] .9]

در تکنیک NSM، به کمک ابزار مناسب، شیارهایی بر وجوه جانبی اعضای بتنی ایجاد شده و نوار یا میل گردهای FRP با ابعاد و طول مشخص درون این شیارها که از قبل با رزین یا ملات مناسب پر شدهاند، چسبانده می شود و از آسیب-های مکانیکی یا اثر آتش در امان می مانند [11-11].

ریزو و لورنزیس با استفاده از روش های EBR و NSM و EBR نسبت به ترمیم تیرهای بتن مسلح اقدام کردند که نتایج پژوهش آنها به ترتیب، افزایش ۱٦ و ۲۵ درصد در بار نهایی را در مقایسه با نمونه کنترلی، نشان میدهد. این پژوهشگران، هم چنین، جدا شدگی مواد مرکب را در هر دو روش مشاهده کردند [12]. به علاوه، دیاس و باروس نشان دادند که سیستم NSM سبب افزایش بیشتر ظرفیت باربری بعد از تشکیل ترکهای برشی شده و نوارهای CFRP مقادیر بالاتری از کرنش ماکزیمم را تجربه میکنند [13].

المسری و همکاران نظر دادند که بتن اطراف هر یک از نوارهای تقویتی در روش NSM لزوما قادر به تحمل تنشهایی که به آن وارد می شود نبوده و ممکن است در عرض تیر به صورت کشش در سطحی نیمه مخروطی بشکند [14].

کونتال و همکاران با ساخت تیرهای بتن مسلح پیشتنیده، آنها را با طرحهای مختلفی از شیوه تقویت برشی NSM تقویت کرده و تحت آزمایش بارگذاری قرار دادند. نتایج این پژوهش تایید میکند که استفاده از لایههای CFRP با زاویه نصب ٤٥ درجه نسبت به زاویه نصب ۹۰ درجه، در بهبود سختی و شکل پذیری بسیار موثر هستند [15].

لی و چنگ با مطالعه دادههای موجود آزمایشگاهی، معادلاتی برای تخمین کرنش موثر در نوار یا میلگردهای CFRP ارائه دادند. این پژوهشگران همچنین با هدف طرح اولیه نمونهها، ابعاد بهینهای برای شیارها بر اساس رفتار پیوستگی سطح تماس، پیشنهاد دادند [16].

در پژوهش دیگر مفیدی و همکاران نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی روی تیرهای بتن مسلح T شکل تقویت شده با میلگرد FRP به روش NSM را ارائه کردند. نتایج نشان می-دهد که حضور خاموتها در نمونه، سهم برشی میل گردهای CFRP را در تحمل بار کاهش نمیدهد. آنها همچنین با ارائه مدلی مناسب برای محاسبه میزان کرنش موثر در میل گرد یا

<sup>1.</sup>Fiber Reinforced Polymer

<sup>2.</sup>Externally Bonded Reinforcement

<sup>3.</sup>Near Surface Mounted

بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده...

نوارهای CFRP، مودهای محتمل گسیختگی تیر تقویت شده در برش به وسیله سیستم NSM را پیش بینی کردند [17].

چن و همکاران با استفاده از معادلات هوردجیک؛ و ساینزه برای شبیهسازی رفتار کششی و فشاری بتن و نیز به کار بردن مدل پیوستگی-لغزش لو و همکاران برای تعریف رفتار جزء چسبنده، نسبت به تحلیل عددی تیر بتن مسلح تقویت شده با مواد مرکب اقدام کردند. نتایج پژوهش آنها نشان میدهد که چسبندگی کامل بین بتن و FRP منجر به تخمین بیشتر میزان واقعی ظرفیت نهایی تیر بتن مسلح میشود [21-18].

سید و همکاران با استفاده از مدل مبتنی بر کرنش موثر نسبت به شبیه سازی عددی نمونههای آزمایشگاهی تقویت شده با روش NSM اقدام کردند. این پژوهشگران دریافتند که مشخصات هندسی نمونه، مقاومت فشاری بتن، ویژگیهای مواد مرکب و نسبت ارتفاع به عرض شیار از عوامل مهم تعیین کننده پارگی یا جدا شدگی نوارهای CFRP هستند [22].

ابیدات و همکاران با استفاده از مقاومت کششی بتن و سختی برشی چسب، نسبت به تعیین ویژگیهای سطح تماس FRP و بتن اقدام کردند. تحلیل اجزای محدودی که توسط این پژوهشگران روی نمونههای ساخته شده از بتن مسلح این پژوهشگران دهنده تخمین مناسب بار نهایی و توزیع مناسب کرنش در FRP در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی است [23-24].

در این پژوهش، از ٤ نمونه تیر بتن مسلح ساخته شده، یک نمونه دارای خاموت و یک نمونه فاقد خاموت توسط نوارهای CFRP به روش NSM تقویت برشی می شوند. سپس نمونههای تقویت شده و کنترلی به منظور بررسی اثر حضور میل گردهای عرضی در این شیوه تقویتی تحت بارگذاری چهار نقطهای قرار می گیرند. مدل سازی نمونهها نیز با استفاده از مفهوم جدا شدگی و به کار بردن جزء چسبنده انجام می گیرد. با بررسی نتایج عددی، شیوه پیشنهادی مدل سازی، درستی آزمایی می شود. در ادامه نیز با توجه به عمل کرد مناسبی که روش پیشنهادی دارد، از آن در مطالعه موردی

برای بررسی تاثیر تغییرات مقاومت فشاری بتن و تغییرات نسبت آرماتورهای عرضی بر رفتار برشی تیر، استفاده می شود.

# ۲-برنامه ی آزمایشگاهی

در این پژوهش، ٤ نمونه تیر بتنی با مقطع مستطیلی و به ابعاد ۲۰۰×۳۰۰×۲۰۰ میلیمتر با استفاده از بتن آماده به مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۰ مگا پاسکال ریخته می شوند. برای اطمینان از عدم وقوع گسیختگی خمشی، نمونه ها مطابق ضوابط ACI 318-14 طراحي شدهاند [25]. تمامي نمونهها داراي ٣ عدد میل گرد به قطر ۲۰ میلیمتر در پایین و ۲ عدد میل گرد به قطر ۱۲ میلی متر در بالا هستند. از میان ٤ نمونه ساخته شده، ۲ نمونه دارای خاموت به قطر ۲ میلیمتر (فواصل ۱۹۰ میلیمتری) و ۲ نمونه فاقد خاموت، است. تنش تسلیم میل گردهای طولی حدود ۲۰۰ مگا پاسکال و تنش تسلیم خاموتها حدود ۲٤۰ مگا پاسکال است. به منظور بررسی اثر حضور خاموتها بر چگونگی خرابی و ظرفیت نهایی تیرهای تقویت شده به روش NSM، یک نمونه دارای خاموت و یک نمونه فاقد خاموت توسط نوارهای CFRP تقویت برشی می-شوند. برای این منظور شیارهایی به عرض ۳ میلی متر و عمق ۱۰ میلیمتر در دهانههای برشی و بر وجوه جانبی دو طرف تیر ایجاد میشود. شیارها به صورت مجموعههای دوتایی ایجاد می شوند. فاصله مرکز تا مرکز هر جفت شیار (دو شیار موازی) از هم ۱۳۰ میلیمتر است. هر جفت شیار شامل دو شیار است که فاصله مرکز تا مرکزشان از یک دیگر، ۲۰ میلی متر است.

شکل (۱) موقعیت شیارها را بر پهلوی تیر و چگونگی چسباندن نوارهای کامپوزیتی را در طول تیر نشان میدهد. شیارها سپس با رزین مناسب پر شده و یک لایه از نوارهای CFRP به عرض ۳۵ میلیمتر و طول ۳۰۰ میلیمتر پس از آغشته شدن به چسب، تا شده و درون شیارها قرار می گیرند. مطابق کاتولوگ سازنده، ضخامت و مقاومت کششی الیاف خشک کامپوزیتی به ترتیب ۱۱/۰ میلی متر و ۲۰۰۶ مگا

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

پاسکال است. دو تیر تقویت شده پس از یک هفته، تحت بارگذاری ٤ نقطهای قرار گرفته و مقادیر بار نهایی و خیز وسط دهانه آنها توسط سلول بار و LVDT سنجیده می شود. مقادیر اندازه گیری شده با نتایج حاصل از نمونه های کنترلی مقایسه شده تا میزان افزایش ظرفیت باربری و تغییرات در سازوکار گسیختگی بررسی شود. مشخصات کلی نمونه های ساخته شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

**شکل ۱**. موقعیت شیارها و آماده سازی نمونهها الف) موقعیت شیارها بر پهلوی تیر ب) چگونگی چسباندن نوارها در شیار



ب)

جدول ١. مشخصات نمونهها

$f_{\rm c}^{\prime}$ (MPa)	Label	Tension Bar	Compression Bar	Stirrup
33.5	B1-Control	3D20	2D12	-
32 31.5	B2-Control B3-NSM	3D20 3D20	2D12 2D12	6-190 mm -
31	B4-NSM	3D20	2D12	6-190 mm

1. Linear Variable Differential Transformer

در نمونههای کنترلی، ابتدا ترکهای خمشی در بار حدود ۲۰ کیلو نیوتن در ناحیه با لنگر ثابت در تیر بروز میکند. سپس در بار بیش از ۱۰۰ کیلو نیوتن، ترک قطری در وسط ارتفاع دهانه برشی ظاهر شد و به سمت محل اعمال بار و تکیهگاه پیش رفت. ترک قطری در نهایت با توجه به نسبت دهانه برشی به عمق موثر مقطع (a/d)، با رسیدن به تراز آرماتورهای تحتانی، در امتداد آن به سمت تکیه گاه حرکت کرده و سبب گسیختگی برشی- کششی نمونه کنترلی شد. شکل (۲.الف و ب) چگونگی گسیختگی نمونههای B1 و B2 را نشان میدهد. در نمونه تقویت شده B3 و B4، ابتدا ترکهای خمشی در محدوده ی میانی تیر ایجاد می شوند. با افزایش بیش تر بار، ضمن آن که در میانه ارتفاع دهانه برشی ترکهای موربی با زاویه ی حدود ٤٥ درجه ظاهر میشوند، رشد ترکهای خمشی متوقف می شود. پس از آن، به دلیل تمرکز تنش در مجاورت شیارها (حدود ۱۵۰ میلیمتر از تکیهگاه سمت چپ در نمونه B3)، ترکهای قائمی بالا آمده و با ترک مورب موجود، برخورد میکند. با عریض تر شدن ترک قطری، نوار CFRP به صورت انفجاری یاره شده و موجب گسيختگي تير مي شود.

در نمونهی B4، ترک اصلی مورب از نقطه اعمال بار حرکت کرده و در مسیر خود به سمت تکیهگاه، چهارمین نوار از تکیه گاه سمت چپ را پاره کرده و موجب گسیختگی در نمونه میشود. شکل (۳. الف و ب) چگونگی گسیختگی نمونههای تقویتی را نشان میدهد. در جدول (۲) میزان بار نهایی و خیز میانی تیرهای تقویت شده و کنترلی به منظور مقایسه افزایش ظرفیت باربری ارائه شده است. با توجه به این مقایسه افزایش ظرفیت باربری ارائه شده است. با توجه به این نمونه ی تقویت شده فاقد خاموت نسبت به نمونه کنترلی به ترتیب ۲۹ و ۲۷ درصد افزایش داشته است. همچنین بار نهایی و خیز میانی نمونه تقویت شده دارای خاموت نسبت به نمونهی کنترلی نظیرش به ترتیب ٤١ و ۳۳ درصد افزایش یافته است. این موضوع نشان میدهد که عمل کرد برشی نوارهای CFRP در حضور خاموتها کاهش پیدا کرده است. به منظور درک

117

بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده...

بهتر رفتار نمونه ا در شکل (٤) نمودارهای بار – جابه جایی نمونه های تقویت شده و کنترلی نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها دیده می شود که در مراحل اولیه بارگذاری و تا قبل از بروز ترک های خمشی، سختی اولیه نمونه های فاقد خاموت و نیز سختی اولیه نمونه های دارای خاموت، تقریبا یکسان است. با افزایش بیش تر بار و تا لحظه گسیختگی، سختی کلی نمونه تقویت شده دارای خاموت، به میزان اند کی بیش تر جابه جایی نمونه های تقویت شده فاقد خاموت است. منحنی های بار – طرفیت خود به صورت نسبتا قائم سقوط می کنند که این موضوع نشان دهنده گسیختگی ترد نمونه ها است.

**شکل ۲**. چگونگی گسیختگی نمونههای کنترلی. الف)B1 و ب) B2





**شکل ۳.** چگونگی گسیختگی نمونههای تقویت شده. الف)B3 و ب) B4



**جدول ۲**. خلاصه نتایج آزمایشگاهی

	reak Load (KN)	Deflection (mm)	Failure
B1-Control	125	4.8	Shear Failure
B2-Control	187	5.8	Shear Failure
B3-NSM	212	8.3	Rupture of CFRP
B4-NSM	260	7.8	Rupture of CFRP



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 Mid-Span Deflection (mm)

## ٤-مدل سازی اجزا محدود

به منظور شبیهسازی رفتار برشی تیرهای تقویت شده با روش NSM، مدل اجزای محدود سه بعدی نمونههای تقویت شده B3 و B4 با بهکار بردن نرمافزار ABAQUS از طریق مدل پلاستیسیتهی آسیب بتن، ایجاد می شود. رفتار بتن در فشار بر

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

اساس رابطهی تنش – کرنش غیر خطیها گنستاد اصلاح شده تعریف میشود که دارای شاخههای صعودی و نزولی است؛ بتن در ناحیه صعودی تا حد ۲/۰ مقاومت فشاری، رفتاری خطی و الاستیک دارد و در شاخه نزولی، تا حد ۸۵/۰ مقاومت فشاری، خطی فرض میشود. رفتار کششی بتن نیز، ترک خوردگی و سخت شدگی کششی را در نظر میگیرد. مقاومت ترک خوردگی بتن بر اساس مدول گسیختگی بتن تعیین شده و تنش کششی آن در کرنشی برابر با ۱۰ برابر کرنش ترک

آرماتورهای طولی و عرضی با توجه به رفتار الاستو – پلاستیک فولاد، (تا حد تسلیم به صورت خطی و پس از آن دارای تنش ثابت)، در مدل شبیه سازی می شوند [۲۳]. هم چنین، خصوصیات مکانیکی نوارهای CFRP چسبیده در شیار با فرض رفتار کششی الاستیک خطی تا لحظه ی پارگی، معرفی می شوند. تنش حداکثر در امتداد نوارها با تعیین نقطه ی پارگی بر روی منحنی تنش –کرنش آن تعیین خواهد شد. مدل لغزش بر روی منحنی تنش –کرنش آن تعیین خواهد شد. مدل لغزش (۵) نمایش داده شده، به منظور شبیه سازی احتمال جدا شدگی در تحلیل به کار می رود. در مدل مذکور، رفتار چسب با رابطه ی دو خطی که بین تنش های برشی و تغییر مکان نسبی ما بین ورق CFRP و چسب به وجود می آید، شبیه سازی شده و ایرای سطح زیر منحنی مزبور، بیان گر میزان انرژی شکست است



شکل ٥. مدل دو خطي تنش پيوستگي- لغزش ارائه شده توسط لو[ ٢١]

1.Modified Hognestad

مدلسازی نوارهای CFRP با لحاظ کردن رفتار ارتوتروپیک آن با استفاده از اجزای پوسته ای انجام میگیرد. ویژگیهای جزء چسبنده نیز که بین دو سطح متفاوت واقع می-شود، در سه جهت و با توجه به روابط خطی زیر به نرم افزار شود، در سه جهت و با توجه به روابط خطی زیر به نرم افزار معرفی میشود [26]:  $t_n = k_{nn} \, \delta_n$  $t_n = k_{ss} \, \delta_s$  $t_r = k_{tt} \, \delta_t$ (--))

که در آن  $\delta_s$ ,  $\delta_s$  و  $\delta_t$  به ترتیب معرف تغییر مکانهای نسبی در جهت عمود و دو جهت موازی نوار هستند.  $t_s$  و  $t_s$  و  $t_s$  در روابط (۱) بیانگر تنش قایم و تنش های برشی ایجاد شده به واسطه باز شدگی ترک برشی هستند. مقدار  $k_{ss}$  نیز بیان گر شیب منحنی تنش برشی چسب جابه جایی تا قبل از جدا شدگی برای قرارگیری الیاف است و توسط رابطه زیر تعیین می شود [21]:

$$k_{ss} = k_{tt} = \frac{\iota_{max}}{s_0} \tag{(1)}$$

در معادله بالا،  $au_{max}$  و S<sub>0</sub> به ترتیب تنش برشی ماکزیمم در سطح تماس و لغزش آستانهی جدا شدگی است که توسط روابط زیر قابل محاسبه هستند [21]:

$$\tau_{max} = 1.5\beta_w f_t \tag{(r)}$$

$$\frac{3_0}{0.0195\beta_w f_t} \tag{(1)}$$

$$\beta_{w} = \sqrt{\frac{2.25 - \frac{b_{p}}{b_{c}}}{1.25 + \frac{b_{p}}{b_{c}}}}$$
(0)

نسبت عرض  $\frac{b_p}{b_c}$  مقاومت کششی بتن و  $f_c$ در روابط بالا، ورق کامپوزیتی به عرض مقطع تیر یا بلوک بتنی است. از آن جایی که در جهت عمود بر الیاف در صفحهی نوار تنش های برشی کمی ایجاد می شود، رفتار آن مشابه جهت الیاف (s) فرض می شود. برای جهت عمود بر نوار (n)، رفتار چسب مطابق با مطالعات انجام شده توسط کورونادو بر اساس ویژگی های بتن تعیین می شود. این به معنای آن است که مقدار  $k_{nn}$ 

119

برای تعریف جدا شدگی لازم است دو مجموعه داده به نرم افزار معرفی شود. دسته اول معیار شروع جدا شدگی را مشخص کرده و دومین دسته، گسترش و تکمیل فرآیند جدا شدگی را تعیین میکند. معادلات زیر، شرایطی را که منجر به شروع جدا شدگی میشوند را تعریف میکند [26]:

- $\frac{\langle t_n \rangle}{2} = 1$ (٦-الف)  $t_n^0$
- $\frac{\langle t_t \rangle}{t_t^0} = 1$  $\frac{\langle t_s \rangle}{t_s^0} = 1$ (٦-پ)

(٦-ب)

معادلات بالا به این موضوع دلالت دارد که جداشدگی در هر جهت وقتى أغاز مي شود كه فقط تنش اعمال شده در أن جهت از میزان معرفی شده به نرم افزار فراتر رفته باشد. در معادلات بالا، <>، پرانتز ماکالی، است که به صورت زیر قابل تعریف است [26]:

 $\langle t_i \rangle = (t_i + |t_i|)/2$ (٦-ت)

بر اساس مدل لو [21] مقادیر  $t_s^0$  و  $t_s^0$  معادل تنش برشی ماکزیمم خواهد بود و مقدار  $t_n^0$  مساوی با تنش ترک خوردگی بتن در نظر گرفته می شود.

در این پژوهش، پس از شروع جدا شدگی نوار، برای اندازهگیری سختی کاهش یافته از پارامتر کار انجام شده توسط تنشهای برشی، بهره گرفته می شود. در این صورت، سختی المانها متناسب با کار انجام شده توسط تنش های برشی تا ميزان انرژي شكست كاهش مي يابند. براي اين منظور لازم است تا انرژی شکست به صورت مستقل برای جهات مختلف توسط روابط زير به نرم افزار معرفي شود [21, 28]:

$$\begin{split} G_n &= (0.047 \, {d_a}^2 - 0.5 \, {d_a} + 26) (\frac{f_c}{10})^{0.7} (\forall) \\ G_s &= G_t = 0.308 \beta_w^2 \sqrt{f_t} \end{split} \tag{A}$$

در رابطه (۷)، مقدار  $d_a$  باتوجه به اندازه بزرگترین سنگدانه بر اساس آییننامهی CEB-FIP 1990 به مقدار ۲۰ میلیمتر انتخاب شده است.  $G_i$  در روابط بالا انرژی شکست در واحد سطح است [28].

# ٥-درستی آزمایی روش پیشنهادی برای مدل سازی سطح تماس

به منظور بررسی اعتبار مدل پیشنهادی، دو نمونه تقویت شده با روش NSM که در بالا آزمایش شدهاند (B3 و B4)، به كمك نرمافزار تحليل اجزاى محدود غيرخطى ABAQUS مدلسازي مي شوند [26]. با توجه به تقارن موجود در وضعيت تکیهگاهها و بار اعمالی، تنها نیمی از طول تیر شبیه سازی می شود. حل معادلات غیرخطی با استفاده از روش نیوتن-رافسون انجام خواهد شد. مشبندي بتن با استفاده از المانهاي مکعبی ۲۵×۲۵×۲۵ میلیمتری انجام میشود. برای چسب و نوار CFRP نيز از همان اندازه مش بتن استفاده خواهد شد. مشبندی جسم بتن با کمک اجزای سه بعدی که دارای سه درجه آزادی در هر گره بوده و قادرند تغییر شکلهای برشی و خمشي لازم را شبيهسازي كنند (C3D8R)، ايجاد مي شود. هم-چنین به منظور شبیهسازی آرماتورهای مدفون در بتن از اجزای خرپایی که مستقیما به بتن متصل شدهاند و هیچ گونه جابهجایی ندارند (T3D2)، استفاده شده است.

پارامتر ویسکوزیته و زاویه اتساع بتن به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۳۱ درجه فرض شدهاند. ویسکوزیته با سعی و خطا و زاویه اتساع با توجه به توصیه راهنمای نرمافزار [26] در نظر گرفته شدند. ویژگیهای نوار لایه CFRP با توجه به نتایج ارائه شده توسط سازنده مواد مرکب، مطابق جدول (۳) است و توسط المان پوسته (S4R) در مدل وارد می شود. در این جدول E<sub>1</sub> و به ترتيب مدول الاستيسيته لايه كامپوزيت أغشته به چسب  $\sigma_{u1}$ و مقاومت نهایی لایه هستند. برای لایه چسب ما بین نوار کامپوزیت و بتن از المان (COH3D8) بهره گرفته می شود. شکل (٦ و ٧) چگونگی گسترش ترکها در پایان تحلیل اجزای محدود را نشان میدهد که با الگوی نهایی ترکها در نمونههای آزمایشگاهی مشابهت زیادی دارد. خرابی بتن در نرمافزار ABAQUS توسط شاخص كرنش اصلى پلاستيك استخراج می شود. منحنی های بار – جابه جایی وسط دهانه برای نمونه های

1.Mackulay Bracket

آزمایشگاهی و تحلیلی در شکل (۸) با یک دیگر مقایسه شده-اند. از آن جا که در مدل عددی امکان هیچگونه لغزشی بین صفحات بارگذاري و ميل گردها با بتن در نظر گرفته نشده است، نمودارهای حاصل از تحلیل اجزای محدود، سختی نسبتا بیشتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیشبینی می کنند. با توجه به این نمودارها، تحلیل اجزای محدود به طور میانگین حدود ۷ درصد مقادیر ظرفیت برشی نمونهها را بیشتر تخمین میزند. شکل (۹) منحنی تغییرات کرنش محوری الیاف را بر اساس بار اعمالی برای نمونه B3 نشان می دهد. با در نظر گرفتن مقدار ۱۱۰۰۰ میکرو استرین برای کرنش پارگی الیاف جدول (٣)، مي توان نتيجه گرفت که مدل پيشنهادي، گسسيختگي را به درستی بر اساس پارگی CFRP پیش بینی کرده است. با توجه به شکل (۱۰) دیده می شود که در نمونه B4 که در آن از خاموت استفاده شده است، کرنش محوری نوارها از توزیع بهتری نسبت به نمونهی B3 برخوردار است و تمامی نوارها به دلیل تشکیل بازوی فشاری، در بتن دهانه برشی، در تحمل كرنش ها نقش دارند.

 جدول ۳.مشخصات مكانيكى نوارهاى كامپوزيتى

 Material's property
  $E_1(MPa)^a$   $E_2(MPa)$   $v_{12}$   $\sigma_{u1}(MPa)$  

 CFRP Strip
 26000
 4500
 0.3
 305

 a Laminate thickness= 1mm

 B3
 نمكل ٦. چگونگى گسيختگى نمونه تقويت شده B3

 سكل ٦. چگونگى گسيختگى نمونه تقويت شده يونه

 بدانها مورد محموله محموله







شکل ۸ مقایسه نمودارهای بار-جابهجایی تیرهای تقویت شده



شکل ۱۰. کرنش محوری الیاف برای نمونه B4



#### ۲-مطالعات موردی

در این قسمت به منظور پرهیز از ساخت نمونههای جدید و جلوگیری از هزینههای آزمایشگاهی و همچنین بررسی سایر مولفههای موثر بر عمل کرد نمونهها به منظور توسعه مدلهای جدید رفتاری، از مطالعات پارامتری بهره گرفته می شود. برای این منظور تاثیر استفاده از بتن با مقاومتهای مختلف و تغییر فاصله قرارگیری خاموتها در دهانه برشی بررسی می شود. در مطالعه موردی نخست، مدلسازی نمونهها با بتن دارای مقاومتهای فشاری ۲۰، ۳۰ و ۵۰ مگا پاسکال انجام می گیرد. مشخصات هندسی و جزئیات این نمونهها کاملا مشابه نمونه B3 است. در مطالعه موردی دوم، امیر شمالی و همکاران

میل گردهای عرضی به قطر ۲ میلیمتر در فواصل ۱۹۰، ۱۳۰ و ۲۵ میلیمتر، در هندسه مدل تعریف میشوند. سایر مشخصات نمونهها در این مطالعه موردی مانند نمونه B4 است. ویژگیهای جزء چسبنده شامل ظرفیت برشی و سختی آن توسط ویژگیهای بتن و هندسه نمونه و نوار CFRP در نرم افزار اعمال میشود. مشربندی نمونهها مانند قبل انجام گرفته و تحلیل بر اساس کنترل تغییر مکان آغاز میشود.

بررسی نتایج مطالعه موردی اول نشان میدهد که دو نمونه دارای مقاومت فشاری ۳۰ و ۵۰ مگا پاسکال در اثر پارگی نوارهای CFRP با رسيدن كرنش لايه كاميوزيت به ١١٠٠٠ ميكرو استرين، گسيخته شدهاند، اما نمونه ساخته شده با مقاومت ۲۰ مگا یاسکال با رسیدن تنش برشى لايه چسب به بيشترين مقدار (٣/٨٢ مگا ياسكال)، منهدم شده است. این موضوع نشان میدهد که افزایش مقاومت فشاری بتن موجب می شود که تنش اعمالی برچسب، به عمق بتن منتقل شده و از بروز جدا شدگی زود رس ممانعت شود. شکل (۱۱) تغییرات تنش برشی لایه چسب را برای سومین مجموعه نوارها از تکیهگاه سمت چپ (واقع در ششمین شیار) که به بیش ترین مقدار تنش برشی رسیده است را نشان میدهد. این نمودار نشان میدهد که جدا شدگی روی مسير ترک برشي عبوري در فاصله حدود ۷۰ ميلي متري از يايين تير، آغاز شده است. در شکل (۱۲) اثر مقاومت فشاری بتن بر بار وارد شده بر حسب کرنش محوری در لایههای CFRP رسم شده است. با توجه به این شکل دیده می شود که در لحظه جدا شدگی، بیشینه کرنش محوری در CFRP حدود ۹۰۰۰ میکرو استرین بوده است. در شکل (۱۳) منحنی بار- جابهجایی برای نمونههای دارای مقادیر مختلف مقاومت فشاري رسم شده است. با توجه به این نمودارها دیده می شود که با افزایش مقاومت فشاری، میزان بار و خیز بیشینه نمونهها افزایش می یابد. با توجه به این نمودار دیده می شود که با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۰ به ۵۰ مگا پاسکال ( ۲/۵ برابر)، ظرفيت برشى نمونه تحليل شده فقط حدود ٦٠ درصد افزايش داشته است. همچنین، بررسی نمودارها نشان میدهد که با افزایش مقاومت فشاري بتن، سختي نمونهها اندكي افزايش مي يابد.

**شکل ۱۱.** تغییرات تنش برشی در امتداد نوار واقع در ششمین شیار از تکیهگاه سمت چپ برای نمونه با مقاومت ۲۰ مگا پاسکال



کرنش محوری الیاف در مطالعه موردی اول



**شکل۱۳.** منحنی بار - جابهجایی برای نمونههای تقویت شده دارای مقاومت فشاری متفاوت در مطالعه موردی اول



تحلیل اجزای محدود برای مطالعه موردی دوم نشان می دهد که با کاهش فاصله خاموتها به ۱۳۰ و **٦٥** میلی متر، هیچ یک از دو مود پارگی یا جدا شدگی نوارها علت اصلی انهدام تیر نبودند و این دو نمونه در اثر باز شدن بیش از حد ترک-های خمشی و رسیدن آن به وجه فشاری تیر، گسیخته شدند.

در شکل های (۱۶ و ۱۵) گسیختگی نهایی دو نمونه دارای میل گرد عرضی در فواصل ۱۳۰ و ٦٥ میلیمتر توسط پارامتر كرنش حداكثر يلاستيك (PE) نشان داد شده است. با توجه به این شکل ها دیده می شود که قسمت زیادی از ارتفاع مقطع در اثر باز شدن ترک، کارایی خود را از دست دادهاند. برای بررسی سطح کرنش محوری الیاف CFRP در لحظه نهایی باربری، نمودارهای بار برحسب کرنش محوری لایهی کامپوزیتی برای نسبتهای متفاوت آرماتور عرضی در شکل (١٦) نشان داده شده است. بررسی این نمودارها نشان می-دهد که با کاهش فاصله خاموتها، بیشینه کرنش نوار CFRPكاهش يافته است. همچنين اين نمودارها نشان مي-دهد که در مراحل اولیه بارگذاری نوارهای CFRP هیچ گونه کرنشی را تحمل نمیکنند. در شکل (۱۹) دیده میشود که میزان کرنش در منحنی مربوط به نمونه دارای خاموت به فواصل ٦٥ میلیمتر در انتهای تحلیل، کمی عقب میرود، که این موضوع می تواند ناشی از جدا شدن موضعی نوار درون شیار باشد که سبب کاهش انتقال برش بین هسته بتنی و نوار

در شکل (۱۷) منحنی بار– جابهجایی برای درصدهای مختلف آرماتور عرضی نشان داده شده است. بررسی این منحنی ها نشان می دهد که که افزایش درصد آرماتورهای عرضي منجر به افزايش خيز نهايي نمونهها مي گردد و اين موضوع بیان گر افزایش شکل پذیری نمونه است. به علاوه، با افزایش نسبت آرماتورهای عرضی و به دلیل فشار محصور كنندگي بيش تر، سختي كلي نمونهها اندكي افزايش مييابد. همچنین به منظور مطالعه تغییرات کرنش خاموتها، منحنی تغییرات کرنش آنها بر اساس بار وارد شده برای سه نسبت مختلف آرماتور عرضی در شکل (۱۸) ترسیم شده است. بررسی این شکل نشان میدهد که با توجه به ویژگیهای مكانيكي خاموتها ( $\varepsilon_v = 0.0013$ )، تسليم براي نمونه دارای خاموت به فاصله ٦٥ میلیمتر در بار بالاتری (۲۳۵ کیلو نیوتن) نسبت به دو نمونه دیگراتفاق افتاده است و از آن جا که میزان کرنش بعد از حد تسلیم برای این نمونه مقدار کمی بوده است، خاموتهای آن نتوانستهاند به میزان

CFRP شده است.

کافی در جذب انرژی شرکت کنند و شکل پذیری به واسطه-ی تسلیم آرماتورهای خمشی بوده است. شکل (۱۸) هم-چنین نشان می دهد که در مراحل اولیه بارگذاری، خاموتها هیچ نقشی در تحمل تنشها ندارند و پس از تشکیل ترک-های برشی، به تدریج در باربری مشارکت میکنند.

شکل ۱٤. چگونگی گسیختگی نمونه دارای خاموت به فاصله S=130 mm در مطالعه موردی دوم



شکل ۱۵. چگونگی گسیختگی نمونه دارای خاموت به فاصله S=65 mm در مطالعه موردی دوم





50

۳- نتایج مطالعات موردی نشان میدهد که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مود گسیختگی نمونههای تقویت شده از حالت جدا شدگی لایه CFRP به حالت پارگی، تغییر کرده است؛ همچنین، افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش بار نهایی و خیز متناظر آن در نمونهها شد.
٤- نتایج مطالعات پارامتری نشان میدهد که با افزایش نسبت آرماتورهای عرضی، بیشینه کرنش نوارهای CFRP کاهش پیدا میکند. همچنین، استفاده از نسبت بیشتر خاموت، از تعریض ترک قطری جلوگیری کرده است و هیچ کدام از مودهای پارگی یا جدا شدگی رخ ندادند.

## ۸- مراجع

- Mofidi, A. and Chaallal, O. (2014), "Effect of steel stirrups on shear resistance gain due to externally bonded fiber sheets", ACI Struct. J., 111(2), 353-362.
- [2] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L. (2002), *FRP Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons, USA.
- [3] Chen, J.F. and Teng, J.G. (2003), "Shear capacity of FRP- strengthened RC beam: FRP de-bonding", *Constr. Build.Mater.*, **17** (1), 27-41.
- [4] Rita, S.Y., Wong, F. and Vecchio, J. (2003), "Towards modeling of reinforced concrete members with externally bonded fiber-reinforced polymer composites", ACI Struct. J., 100 (1), 47-55.
- [5] De Lorenzis, L. and Teng, J.G. (2007), "Nearsurface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures", *Compos. :Part B Eng.*, **38** (2), 119-143.
- [6] Galal, K. and Mofidi, A. (2010), "Shear strengthening of RC T- beams using mechanically anchored un-bonded dry carbon fiber sheets", J. Perform. Constr. Facil., 24 (1): 31-39.
- [7] Mostofinejad, D. and Mahmoudabadi, E. (2010), "Grooving as an alternative of surface preparation to postpone de-bonding of FRP lamination in concrete beams", *J. Compos. Constr.*, 14 (6), 804-811.
- [8] Mostofinejad, D. and Shameli, SM. (2013), "Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone de-bonding of FRP sheets in strengthened concrete beams", *Constr. Build. Mater.*, 38, 751-758.
- [9] Mostofinejad, D. and Tabatabaei Kashani, A. (2013), "Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on de-bonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams", *Compos. Part B Eng.*, 45, 1704-1713.
- [10] Akter Hosen, Md., Zamin Jumaat, M., Saiful Islam, A. B. M., Abdus Salam, Md. and Hung Mo, K.

**شکل۱۷.** منحنی بار –جابهجایی برای نمونههای تقویت شده دارای نسبتهای متفاوت آرماتور عرضی برای مطالعه موردی دوم



**شکل ۱**۸. تاثیر نسبت آرماتورهای عرضی روی بار وارد شده بر حس



## ۷-نتايج

در این پژوهش ابتدا ٤ نمونه بتن مسلح ساخته شدند و با توجه به وجود یا عدم وجود خاموت در آنها توسط روش NSM تقویت برشی شدند. نمونههای تقویت شده سپس توسط تحلیل اجزای محدود درستی آزمایی شدند. مطالعات موردی با توجه به تغییر در مقاومت فشاری بتن و نسبت آرماتورهای عرضی انجام گرفت. مهمترین نتایج این پژوهش به صورت زیر ارائه می شود:

- ۱- استفاده از روش NSM باعث افزایش ظرفیت برشی نمونه تقویت شده به میزان ٤۱ درصد و ٦٩ درصد به ترتیب در تیرهای با و بدون خاموت می شود. نتایج نشان می دهد که سختی نمونه ها به این روش تقویتی حساس نیست.
- ۲- نتایج تحلیل اجزای محدود نشان میدهد که در صورت استفاده از خاموت در نمونه تقویت شده، کرنش محوری حداکثر در نوارها، توزیع یکنواخت تری دارند.

strengthened with FRP", *Construction and Building Materials*, **32**, 13-26.

- [19] Hordijk, DA. (1991), "Local approach to fatigue of concrete", Ph.D. Dissertation; Delft University of Technology, The Netherlands.
- [20] Saenz, LP. (1964), "Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete-by Desayi, P. and Krishan, S.", ACI Structural Journal, 61, 1229-35.
- [21] Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P. and Jiang, J.J. (2005), "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete", *Engineering structures*, 27(6), pp. 920-937.
- [22] Sayed, A.M., Wang, X. and Wu, Z. (2014), "Finite element modelling of shear capacity of RC beams strengthened with FRP sheets by considering different failure modes", *Construction and Building Materials*, 59, 169-179.
- [23] Obaidat, Y.T., Heyden, S. and Dahlblom, O. (2010), "The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modeling retrofitted RC beams with FEM", *Composite Structures*, 92, 1931-8.
- [24] Obaidat, Y.T., Heyden, S. and Dahlblom, O. (2013), "Evaluation of parameters of bond action between FRP and concrete", *J. Compos. Constr.*, 17, 626-635.
- [25] ACI 318R-4 (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute; Farmington Hills, Michigan, USA.
- [26] ABAQUS 6.13. (2013), *ABAQUS/theory user manual*, Dassault Systemes, Providence, RI, USA.
- [27] Coronado, C. (2006), "Characterization modeling and size effect of concrete-epoxy interfaces", PhD Thesis; Pennsylvania State University, USA.
- [28] CEB-FIP (1990), International Recommandations for the Design and Construction of Concrete Structures, CEB-FIP model code 1990; Design code, Paris.

(2017), "Side-nsmcomposite technique for flexural strengthening of RC beams", *Computers and Concrete*, **20** (4), 439-448.

- [11] Ramezanpour, M., Morshed, R. and Eslami, A. (2018), "Experimental investigation on optimal shear strengthening of RC beams using NSM GFRP bars", *Structural Engineering and Mechanics*, 67 (1), 45-52.
- [12] De Lorenzis, L. and Rizzo, A. (2009), "Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP Reinforcement", *Constr. Build. Mater.*, 23, 1555-1567.
- [13] Dias, S.J.E., Barros, J.A.O. (2012), "NSM shear strengthening technique with CFRP laminates applied in high-strength concrete beams with or without pre-cracking", *Composites: Part B*, 43, 290–301.
- [14] Almassri, B., Barros, J.A.O., Al Mahmoud, F., Francois, R. (2015), "A FEM-based model to study the behaviour of corroded RC beams shear-repaired by NSM CFRP rods technique", *Composite Structures*, 131, 731-741.
- [15] Kuntal, V.S., Chellapandian, M, and Prakash, S.S. (2017), "Efficient near surface mounted CFRP shear trengthening of high strength pre-stressed concrete beams – An experimental study", *Compos. Struct.*, **180**, 16-28.
- [16] Lee, D., Cheng, L. (2013) "Bond of NSM systems in concrete strengthening – Examining design issues of strength, groove detailing and bond-dependent coefficient", *Constr. Build. Mater.*, 47, 1512-22.
- [17] Mofidi, A., Chaallal, O. and Cheng, L. (2016), "Investigation of near surface-mounted method for shear rehabilitation of reinforced concrete beams using fiber reinforced-polymer composites". J. Compos. Constr., 20 (2), 201-214.
- [18] Chen, G.M., Chen, J.F. and Teng, J.G. (2012), "On the finite element modelling of RC beams shear-

# Analytical and experimental investigation of the RC beams shear-strengthened with NSM Method along with Case studies

#### 

#### 

#### Abstract

This paper examines the structural behavior of the reinforced concrete beams strengthened in shear experimentally and simulates using finite element analysis. Then, the effect of employing concrete with different compressive strengths and different ratios of transverse reinforcements is studied using the case analyses. In the experimental part, four reinforced concrete beams are divided into two series of with and without internal steel reinforcements and the effect of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates is investigated by near-surface mounted (NSM) technique as the shear strengthening method. For this purpose, rectangular beams with the dimensions 2000×300×200 mm are designed and monolithically tested in four point loading test up to failure and the load-displacement curves of the mid-span as well as their failure modes are compared with each other. All the beams were reinforced with 3 steel tension bars of 20 mm at the bottom and 2 steel compression bars of 12 mm at the top with end hooks. If stirrups are applicable, 6 mm diameter steel closed hoops spaced at designated distances, are applied. For strengthening using the NSM method, thin slots with 8 mm width and 10 mm depth are made on lateral faces of concrete cover. In order to install composite laminates, the CFRP strips after impregnating with strong epoxy resin are folded and embedded in these grooves. After curing the specimens, all the beams are subjected to a 2000 kN capacity hydraulic jack with the loading rate of 2.5 kN/Min. The ready-mix commercially concrete was delivered to the structural laboratory for casting the specimens with 28-day concrete strength of 30 MPa. The ACI code formulations were used for calculating the shear capacity of the beams before their casting and a suitable span to depth ratio was selected to inhibit deep beam failure. The experimental results indicate that using NSM technique enhances the shear capacity up to 41% and 69% in the beams with and without stirrups, respectively. Test results show that the NSM shear strengthened specimens failed by CFRP laminate rupture. Moreover, simulation of the test specimens by modeling the probability of FRP de-bonding using interface element and orthotropic behavior of laminates shows that the results of the proposed model are consistent with experimental results. In the numerical part, two case studies are carried out; in the first case analysis, three concrete compressive strengths of 20, 30 and 50 MPa are selected and in the second one, three steel stirrup spacing of 65, 130 and 190 mm are applied. Numerical case analyses show that as the compressive strength of concrete decreases, the failure mode the probability of de-bonding increases and as the stirrup percentage increases, the axial strain of CFRP laminates decreases. Numerical case analysis clarifies that by decreasing the distance of internal shear reinforcements from 195 mm to 65 mm, the maximum axial strain of CFRP laminate decreases about 45%. Load-deflection curves in the case analysis also show that by increasing the transverse steel ratio, ultimate displacement enhances and deformability capacity improves.

Keywords: NSM shear strengthening, CFRP, Finite element method, Concrete strength, Stirrup