



## بررسی رفتار تیرهای فولادی مقاوم‌سازی شده با سیستم کامپوزیت کربن / شیشه توسط نرم‌افزار ANSYS

امیر اشتری لریکی، فریدون ایرانی

- ۱- کارشناس ارشد سازه، استان چهارمحال و بختیاری شهر کرد خیابان یاسر کوچه ۵۲ پلاک ۱۹
- ۲- استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد دانشگاه فردوسی دانشکده مهندسی گروه عمران

irani\_fe@yahoo.com

### خلاصه

ظرفیت باربری خمشی تیرهای فولادی می‌تواند به مقدار چشمگیری با چسباندن پلیمر فیبر کربن مسلح شده (CFRP) به بال کششی آن افزایش یابد. در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS سیستم جدیدی از مقاوم‌سازی (سیستم کامپوزیت کربن/ شیشه) مدل‌سازی شده، و اثر بخشی استفاده از دو نوع مختلف از مواد CFRP؛ فیبر کربن با مدول بالا و مدول بسیار بالا؛ و همچنین دو شکل هندسی ممکن برای سیستم مقاوم‌سازی مقایسه شده است. چهار تیر آسیب دیده مقاوم‌سازی شده‌اند (دو تیر با سیستم مقاوم‌سازی U شکل و دو تیر با سیستم مقاوم‌سازی با شکل تخت). نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که سطح تنش در بال کششی (محل آسیب) تیرهای مقاوم‌سازی شده بین ۴ تا ۱۱ درصد کاهش یافته است. این سیستم جدید مقاوم‌سازی معایب سیستمهای پیشین مانند جداشدگی، بلند شدگی، خوردگی، و شکل‌پذیری کم را حذف کرده است و روش مناسب‌تری برای مقاوم‌سازی خمشی تیرهای فولادی می‌باشد.

کلمات کلیدی: فیبر کربن با مدول بالا، فیبر کربن با مدول بسیار بالا، پلیمر فیبر مسلح شده شیشه، سیستم کامپوزیت کربن / شیشه، مقاوم‌سازی خمشی تیرهای فولادی

### ۱. مقدمه

زوال سازه‌های فولادی علت‌های گوناگونی می‌تواند داشته باشد اما یکی از فاکتورهای محتمل خوردگی می‌باشد [۱]. افزون بر خوردگی، مسائل دیگر نظیر خستگی، افزایش بار بهره‌برداری و عدم نگهداری مناسب [۲ و ۳]، در بسیاری از حالتها ممکن است اعضای اصلی سازه را دچار آسیب کنند که در چنین حالاتی مقاوم‌سازی بسیار اقتصادی‌تر از ساخت مجدد کل سازه می‌باشد [۱].

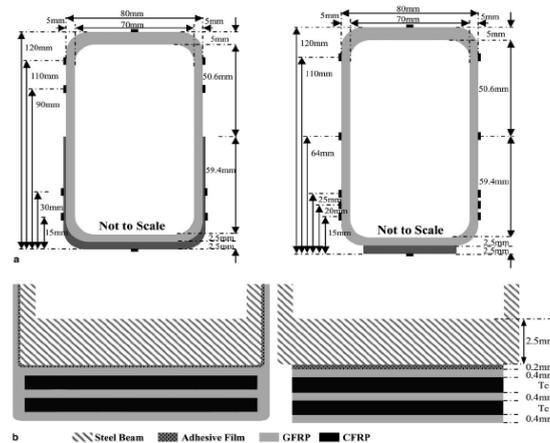
یک روش برای افزایش باربری سازه‌های فولادی جوش دادن یا چسباندن ورقهای فولادی می‌باشد. این روش مشکلات بسیاری را به همراه دارد، نظیر نیاز به تجهیزات بالابر برای جایگذاری ورقهای سنگین فولادی و پیچیدگی فرآیند جوشکاری و چسباندن. از این گذشته جوشکاری می‌تواند باعث تولید تنش‌های پس‌ماند در مواد و بروز مسائل خستگی شود. خواص مکانیکی و خستگی ممتاز پلیمر فیبر مسلح شده‌ی کربن آنرا جایگزین بسیار مناسبی برای مقاوم‌سازی و بهسازی شاه‌تیر فولادی پل‌ها نموده است. کامپوزیت‌های CFRP با مدول بالا مدول الاستیسیته‌ای برابر با فولاد دارند که باعث می‌شود افزایش باربری قابل توجه، پس از تسلیم فولاد رخ دهد. با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP با مدول بسیار بالا که مدول الاستیسیته‌ای بسیار بیشتر از فولاد دارند، می‌توان به افزایش باربری قابل توجهی حتی پیش از تسلیم فولاد دست یافت اما باید خاطر نشان کرد که شکل‌پذیری این الیاف بسیار کم است [۱].

مشکل دیگر به هنگام تماس فولاد و CFRP در حضور یک الکترولیت تشکیل پیل الکتریکی و خوردگی فولاد است. اگر این الکترولیت آب دریا باشد کامپوزیت CFRP نیز تاثیر پذیرفته و سطح آن تاول می‌زند [۴ و ۵]. برای غلبه بر این مشکل می‌توان یک لایه از پلیمر فیبر شیشه مسلح شده (GFRP) بین فولاد و CFRP قرار داد تا از تماس مستقیم این دو ماده جلوگیری شود. مزیت دیگر اینکار بالاتر رفتن مقاومت شکست اتصال می‌باشد [۶]. علت این امر تغییر تدریجی در تنش برشی است، هنگامیکه بار از فولاد و از طریق لایه‌ی چسب و GFRP به کامپوزیت CFRP منتقل می‌شود [۱]. فوتیو و همکارانش [۷] اثر بخشی انتقال تنش بوسیله‌ی اضافه کردن یک لایه GFRP بین دو ماده با سختی بالا که توسط یک پلیمر با سختی کمتر به یکدیگر چسبانده شده‌اند، را اثبات کرده‌اند.

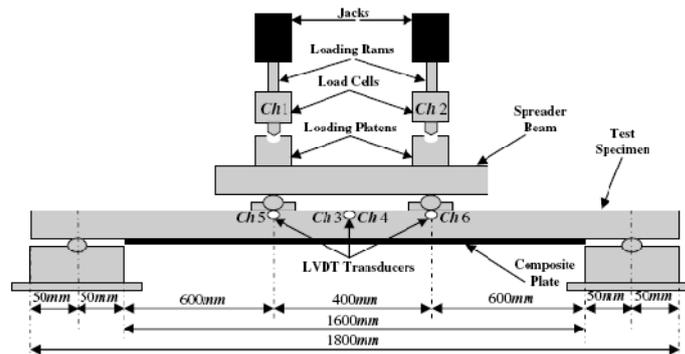
در این مقاله آزمایش انجام شده بوسیله فوتو و همکارانش [۱] توسط نرم افزار اجزای محدود ANSYS مدل سازی شده و نتایج آزمایش و مدل سازی با هم مقایسه شده اند.

## ۲. آزمایش

جهت آزمایش چهار تیر مقاوم سازی شده اند، دو تیر با سیستم بهسازی U شکل که مواد FRP تا تار ختنی تیر بالا آمده است و در دو تیر دیگر مواد FRP تنها به بال کششی تیر چسبانده شده اند. در تمامی تیرها از تعداد لایه های CFRP و GFRP یکسان استفاده شده است، اما در هر یک از شکلهای هندسی تنها از CFRP با مدول بالا (HM-CFRP) و یا CFRP با مدول خیلی بالا (UHM-CFRP) استفاده شده است. برای ایجاد آسیب در تیر فولادی بال کششی آن به نصف ضخامت واقعی آن تراش داده شده است. هدف مقایسه تأثیر دو نوع CFRP با مدول بالا و مدول خیلی بالا و دو نوع هندسه ممکن برای بهسازی می باشد. بدین منظور، سیستم کامپوزیت U شکل با CFRP با مدول خیلی بالا (UHM-CFRP)؛ (تیر ۱)؛ با یک سیستم کامپوزیت U شکل با CFRP با مدول بالا (HM-CFRP)؛ (تیر ۲)؛ مقایسه شد. افزون بر آن، یک سیستم کامپوزیت با ورقه ی تخت (UHM-CFRP)؛ (تیر ۳)؛ با یک سیستم کامپوزیت با ورقه ی تخت (HM-CFRP)؛ (تیر ۴)؛ نیز مقایسه شد. تأثیر شکل های هندسی مختلف با مقایسه سیستم کامپوزیت های U شکل UHM-CFRP؛ (تیر ۱)؛ با یک سیستم کامپوزیت UHM-CFRP با ورقه ی تخت؛ (تیر ۳)؛ و مقایسه سیستم کامپوزیت U شکل HM-CFRP؛ (تیر ۲)؛ با سیستم کامپوزیت HM-CFRP با ورقه ی تخت؛ (تیر ۴)؛ نیز بررسی گردید. شکل ۱-۳ الف و ب نمای شماتیک تیرها و نحوه ی روی هم گذاری مولفه های FRP را بر روی تیر فولادی نشان می دهد. شکل ۲ نموداری از چینش آزمایش را نشان می دهد. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی مواد بکار برده شده در سیستم بهسازی نشان داده شده است. مدول الاستیسیته ی فولاد  $205\text{ GPa}$  و ضریب پواسون آن  $0.3$  می باشد.



شکل ۱ الف- نمای شماتیک تیرها [۱] ب- پی رفت روی هم گذاری لایه های FRP [۱]



شکل ۲- چینش آزمایش تیر [۱]

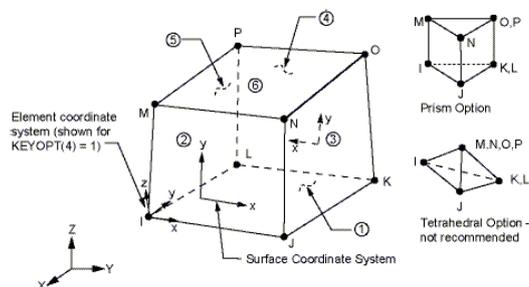
جدول ۱- مشخصات مکانیکی مواد استفاده شده در سیستم بهسازی [۱]

Material	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Ultimate strain (%)	Poisson ratio
UHM-CFRP (unidirectional)	1120	270	0.4	0.32
HM-CFRP (unidirectional)	2110	135	1.6	0.28
GFRP ( $\pm 45^\circ$ to line of action of load)	215	16	1.7	0.15
Film adhesive	32	3.7	0.9	0.37

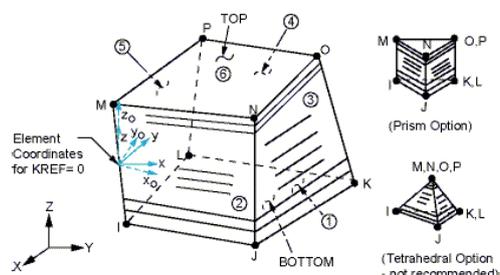
برای آگاهی بیشتر از جزئیات آزمایش به مرجع ۱ مراجعه شود.

### ۳. مدلسازی عددی

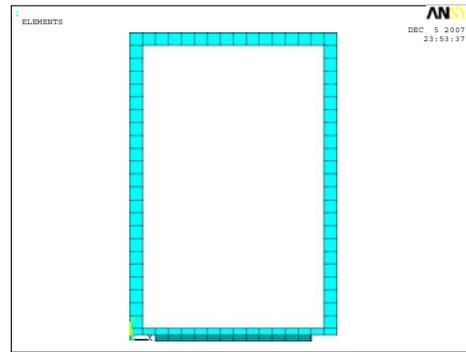
در مدلسازی تیر فولادی از المان سازه‌ای Solid 45 و برای مدلسازی ورقه‌های FRP از المان سازه‌ای Solid 46 استفاده شده است. المان سازه‌ای Solid 45 برای مدلسازی سه‌بعدی سازه‌های جامد بکار می‌رود. این المان به وسیله‌ی هشت گره تعریف می‌شود، که هر گره دارای سه درجه آزادی می‌باشد: جابجایی در جهت‌های گره‌ای X, Y, Z. این المان دارای قابلیت مدلسازی تغییر شکل پلاستیک، خزش، تورم و برآمدگی، سخت شوندگی تنش، خیزهای زیاد، و کرنش‌های زیاد را دارد. المان سازه‌ای Solid 46 نسخه‌ی لایه‌ای المان سازه‌ای Solid 45 می‌باشد، با این ویژگی که دارای قابلیت مدلسازی مواد ناهمسانگرد نیز می‌باشد. این المان برای مدلسازی پوسته‌های ضخیم لایه‌ای و یا جامدات لایه‌ای، طراحی شده است و قابلیت مدلسازی ۲۵۰ لایه را دارد [۸]. شکل ۳ و ۴ به ترتیب هندسه‌ی المان Solid 45 و Solid 46 را نشان می‌دهند. هر المان شبکه دارای بعد ۵ میلی‌متر در راستای عرضی و ۵۰ میلی‌متر در راستای طولی تیر می‌باشد و ضخامت هر المان به اندازه‌ی ضخامت هر لایه از مواد (فولاد یا FRP) می‌باشد. بدین ترتیب شبکه‌ی تیر فولادی دارای ۲۵۸۴ المان، شبکه‌ی CFRP دارای ۷۶۸ المان و شبکه‌ی GFRP دارای ۱۱۵۲ المان در سیستم تخت و ۱۹۸۴ المان در سیستم U شکل می‌باشد. شکل ۵ شبکه‌بندی تیر تقویت شده با سیستم تخت را نشان می‌دهد.



شکل ۳- هندسه‌ی المان سازه‌ای Solid 45 [۸]



شکل ۴- هندسه‌ی المان سازه‌ای Solid 46 [۸]



شکل ۵- شبکه بندی تیر تقویت شده با سیستم تخت

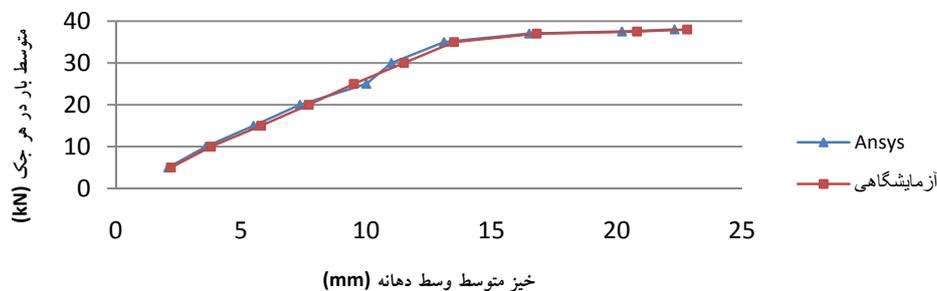
برای پیش بینی شکست در نرم افزار ANSYS سه معیار شکست از پیش تعریف شده وجود دارد که عبارتند از :

- ۱- معیار شکست بر اساس ماکزیمم کرنش
- ۲- معیار شکست بر اساس ماکزیمم تنش
- ۳- معیار شکست Tsai-Wu

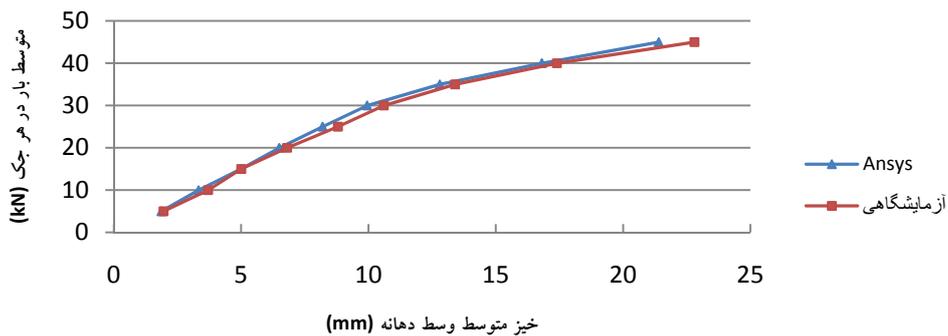
افزون بر معیارهای شکست بالا، یک معیار شکست قابل تعریف بوسیله کاربر (user written) نیز وجود دارد. از آنجا که نمی توان بصورت قطعی مشخص نمود، برای هر ماده ای چه معیار شکستی درست ترین پاسخ را می دهد، پس باید تمامی معیارهای شکست محتمل را امتحان کرده و معیار شکستی را که نزدیک ترین پاسخ را به پاسخ آزمایش دارد برگزید. در این مدل سازی برای کلیه بارهای وارده و در همه ی مدل ها هیچگونه شکستی بر اساس هیچکدام از معیار شکست های تعریف شده، مشاهده نشد.

#### ۴. مقایسه ی نتایج

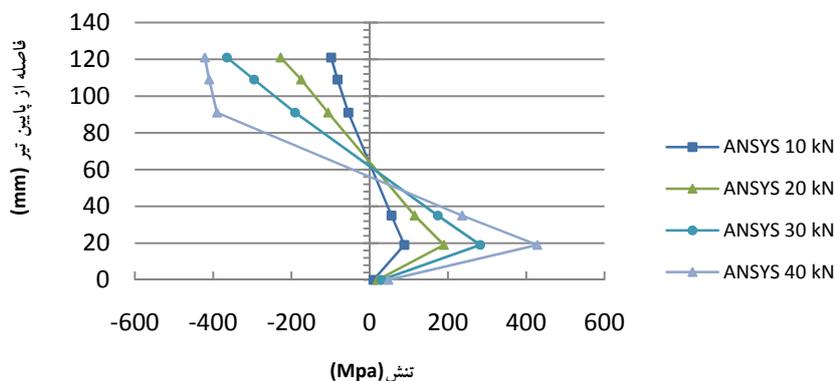
شکل ۶ نمودار بار خیز تیر فولادی را نشان می دهد. شکل ۷ نمودار بار-خیز تیر ۱ را نشان می دهد. در تیر شماره ۱ ضخامت هر لایه از CFRP، ۰/۶ میلی متر می باشد. گسیختگی تیر ۱ در بار ۴۵ kN در هر جک و در کامپوزیت CFRP بویژه در منطقه ی خمش خالص رخ داد، ولی در مدل اجزای محدود ANSYS هیچگونه گسیختگی در هیچ یک از مواد مشاهده نشد. در آزمایش مشاهده شده است که بدلیل استفاده از سیستم U شکل، پس از شکست CFRP نیز تا حدودی عملکرد مرکب بین تیر فولادی و سیستم بهسازی حفظ می شود. بار نهایی مقطع تقویت شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می باشد. شکل ۸ توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۱ را نشان می دهد.



شکل ۶- نمودار بار-خیز تیر فولادی

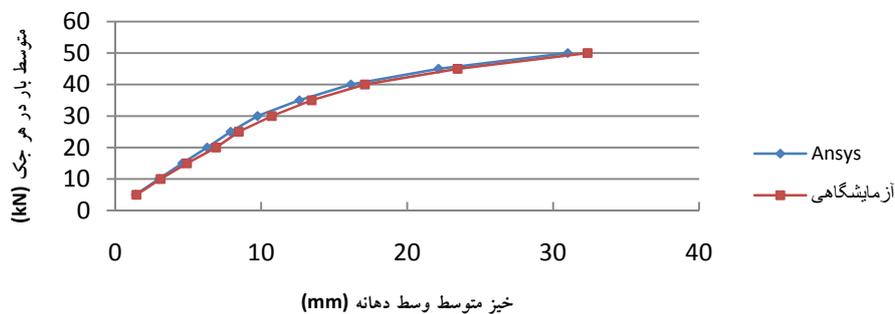


شکل ۷- نمودار بار-خیز تیر ۱

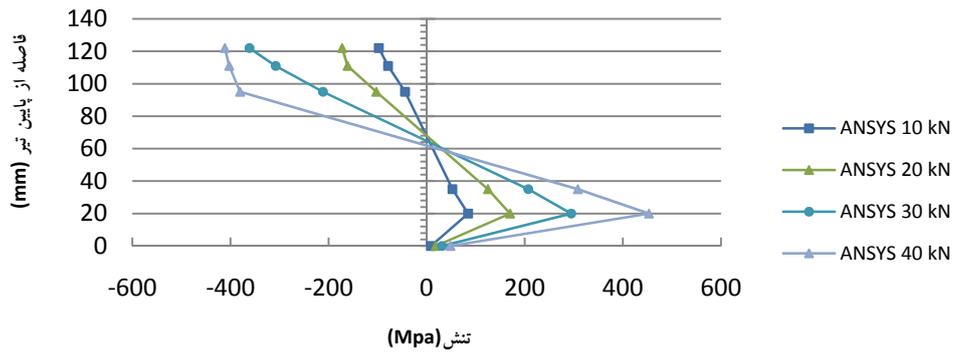


شکل ۸- توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۱

شکل ۹ نمودار بار-خیز تیر ۲ را نشان می‌دهد. در تیر شماره ۲ ضخامت هر لایه از CFRP، ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. در تیر ۲ هیچگونه گسیختگی رخ نداد و آزمایش بدلیل خیز بیش از حد متوقف شد، در مدل اجزای محدود ANSYS نیز هیچگونه گسیختگی در هیچ یک از مواد مشاهده نشد. بار نهایی مقطع تقویت شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم‌سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل ۱۰ توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۲ را نشان می‌دهد.

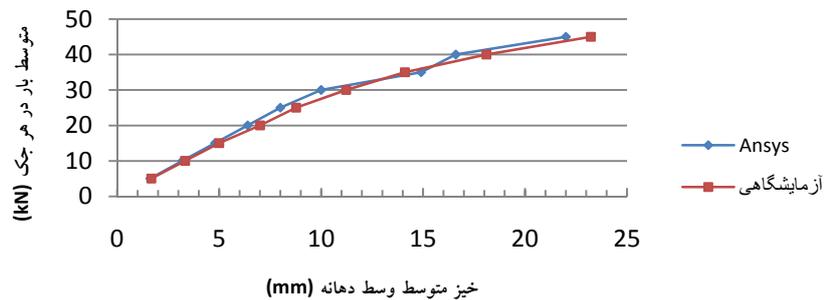


شکل ۹- نمودار بار-خیز تیر ۲

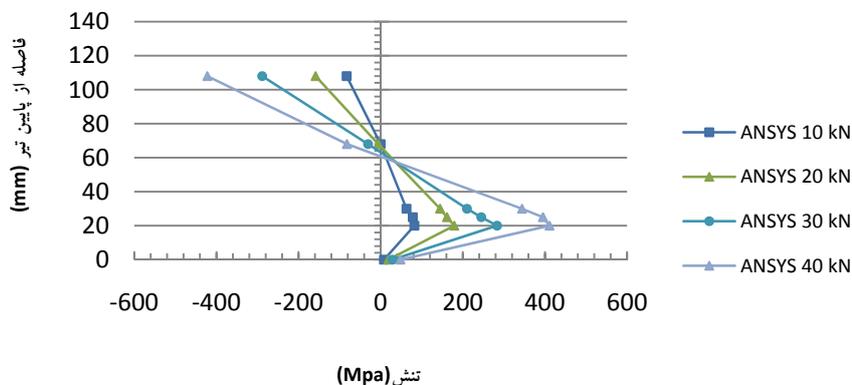


شکل ۱۰- توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۲

شکل ۱۱ نمودار بار-خیز تیر ۳ را نشان می‌دهد. در تیر شماره ۳ ضخامت هر لایه از CFRP،  $0/6$  میلی‌متر می‌باشد. گسیختگی تیر ۳ همانند تیر ۱ در بار  $45 \text{ kN}$  در هر جک و در کامپوزیت CFRP رخ داد، ولی در مدل اجزای محدود ANSYS هیچگونه گسیختگی در هیچ یک از مواد مشاهده نشد. در آزمایش مشاهده شده است که بدلیل استفاده از سیستم U شکل، پس از شکست CFRP نیز تا حدودی عملکرد مرکب بین تیر فولادی و سیستم بهسازی حفظ می‌شود. بار نهایی مقطع تقویت شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم‌سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل ۱۲ توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۳ را نشان می‌دهد.

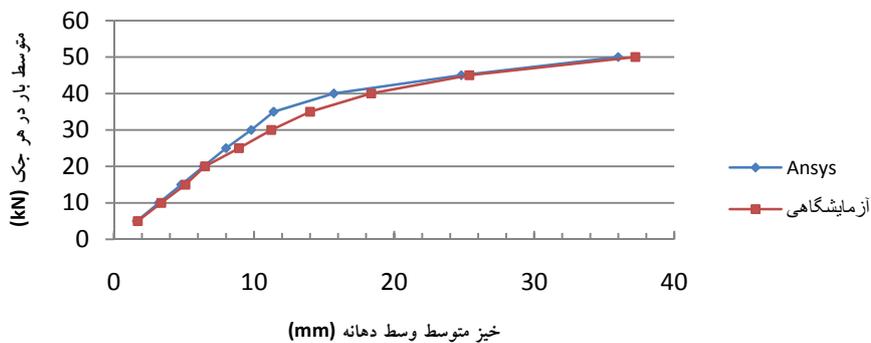


شکل ۱۱- نمودار بار-خیز تیر ۳

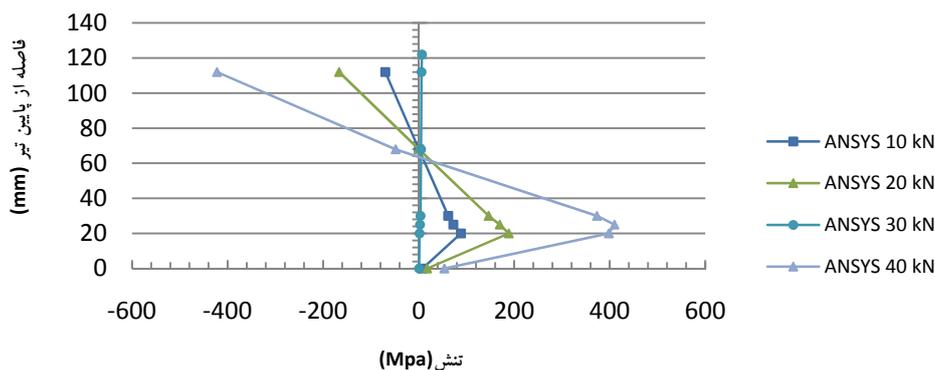


شکل ۱۲- توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۳

شکل ۱۳ نمودار بار-خیز تیر ۴ را نشان می‌دهد. در تیر شماره ۴ ضخامت هر لایه از CFRP، ۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. در تیر ۴ همانند تیر ۲ هیچگونه گسیختگی رخ نداد و آزمایش بدلیل خیز بیش از حد متوقف شد، در مدل اجزای محدود ANSYS نیز هیچگونه گسیختگی در هیچ یک از مواد مشاهده نشد. بار نهایی مقطع تقویت شده از بار تسلیم پلاستیک پروفیل فولادی اولیه (با بال کامل) بیشتر شده است که نشانگر توانایی سیستم مقاوم سازی با FRP در برگرداندن ظرفیت خمشی کامل تیر می‌باشد. شکل ۱۴ توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- نمودار بار-خیز تیر ۴



شکل ۱۴- توزیع تنش در مقطع تیر بهسازی شده شماره ۴

## ۵. نتیجه‌گیری

- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش و مدل‌سازی عددی نتایج زیر حائز اهمیت می‌باشند:
- ۱- استفاده از HM-CFRP باعث شکل پذیرتر شدن تیر، جذب انرژی بیشتر، عدم وقوع شکست در لایه CFRP و افزایش ۱۱ درصدی بار نهایی تیر در مقایسه با استفاده از UHM-CFRP شده است.
  - ۲- استفاده از سیستم بهسازی U شکل باعث شده است که حتی در تیرهایی که در آنها لایه CFRP دچار شکست شده است، تیر تا حدودی عملکرد مرکب خود با سیستم بهسازی را حفظ نماید و شکل پذیری تیر تا حدودی حفظ شود.
  - ۳- با توجه به برآزش بسیار خوب پاسخ‌های مدل اجزای محدود برنامه ANSYS با پاسخ‌های آزمایشگاهی، از مدل‌سازی انجام گرفته مقدار تنش در محل آسیب دیده تیر فولادی (بال کششی) بدست آمد. در تیر بهسازی شده شماره ۱، ۱۰/۴۶٪، تیر شماره ۲، ۷/۳۲٪، تیر شماره ۳، ۷/۹۵٪، و تیر شماره ۴، ۴/۱۸٪، مقدار تنش در بال کششی نسبت به تیر فولادی بهسازی نشده کاهش یافته است.
  - ۴- استفاده از سیستم بهسازی کامپوزیت کربن/ شیشه معایب سیستم‌های پیشین بهسازی همچون جداشدگی، بلند شدگی، و شکل پذیری کم را برطرف کرده است.



- ۵- از بین سیستم های مختلف، سیستم بهسازی با شکل تخت و HM-CFRP در مقایسه با باقی سیستم ها دارای عملکرد بهتری می باشد و از نظر اقتصادی نیز به صرفه تر می باشد.
- ۶- با توجه به برآزش بسیار خوب پاسخ های مدل اجزای محدود ANSYS با پاسخ های آزمایشگاهی، می توان با بکارگیری نوع المانها و سایر موارد ذکر شده در این مقاله، سایر سیستم های مقاوم سازی تیرهای فولادی را نیز با نرم افزار ANSYS مدلسازی نمود و پاسخ های نزدیک به پاسخ های واقعی بدست آورد.

## ۶. مراجع

1. Photiou N.K., Hollaway L.C., Chryssanthopoulos M.K., (2006), "Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system", *Construction and Building Materials*, 20, pp 11–21.
2. Klaiber F.W., Dunker K.F., Wipf T.J., Sanders W.W., (1987), "Methods of strengthening existing highway bridges", Washington, DC: Transport Research Board, NCHRP 293.
3. Tavakkolizadeh M., Saadatmanesh H., (2003), "Strengthening of steel–concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets", *J Struct Eng ASCE*, 129(1), pp 30–40.
4. Turker W.C., Brown R., (1989), "Blister formation on graphite/polymer composites galvanically coupled with steel in seawater", *J Compos Mater*, 23(4), pp389–95.
5. Tavakkolizadeh M., Saadatmanesh H.,(2001), "Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments". *J Compos Construct*, 5(3), pp200–10.
6. Photiou N.K., Hollaway L.C., Chryssanthopoulos M.K., (2004), "Selection of CFRP systems for steel work upgrading", *Proceedings of the innovative materials and technologies for construction and restoration (IMTCR)*, Lecce.
7. Photiou N.K., Hollaway L.C., Chryssanthopoulos M.K., (2004), "An ultra-high modulus carbon/glass fibre composite systems for structural upgrading of steel members", 2nd international conference on FRP composites in civil engineering, Adelaide.
8. ANSYS version 10.0 help documentation