



Compressive strengthening of steel columns with local corrosion using CFRP

O. Yousefi¹, A. A. Hedayat^{1,2*}, K. Narmashiri³, A. Karbakhsh¹

¹Department of Civil Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

²Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran

³Department of Civil Engineering, Zahedan Branch, Islamic Azad University, Zahedan, Iran

ABSTRACT: Steel structures are damaged for a variety of reasons including accidental loads, corrosion and reduced strength which need to be repaired and improved. In this investigation, local corrosion was applied to the steel circular columns and the effects of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) for strengthening have been studied. 19 specimens of steel Circular Hollow Section (CHS) column with the same height and damage dimensions under compressive load were analyzed by ABAQUS software which six cases of them were performed experimentally. In laboratory cases, progressive corrosion was used to create damage to the specimens. In order to improve the accuracy of the analysis, a combined method was used to study the post-buckling of the plastic zone. For this purpose, the specimens were first subjected to elastic buckling analysis and then Riks non-linear analysis with global and local imperfections was conducted. The results showed that the corrosion reduces the bearing capacity and rigidity of the steel columns and complete destruction of the corroded area reduced the load bearing capacity by 40% for the column with corrosion in the middle and by 21% for the damage close to the base, which shows the former is more critical. Strengthening of columns retrofitted with carbon fibers restored ultimate load reduction by 33% and had a positive effect on controlling fractures and reducing stresses in the damaged area

Review History:

Received: Apr. 25, 2021

Revised: Jul. 08, 2021

Accepted: Jul. 28, 2021

Available Online: Aug. 05, 2021

Keywords:

Strengthening

Corrosion

Steel column

Column buckling

CFRP

1- Introduction

Most structural members that have lost their useful life due to corrosion or other factors need repair. Much research has been done on retrofitting with new materials and methods. Fiber Reinforced Polymer (FRP) is relatively new and not yet widely used; however, extensive research has been conducted on them. Tao et al. [1] strengthened nine short concrete-filled square and circular columns with CFRP jackets to experimentally study how CFRP fibers increased the bearing capacity and found out that an increase in the number of layers will increase the ultimate load more in circular columns than in square ones. Haider and Zhao [2] retrofitted short columns with CFRP fibers transversely and longitudinally and observed that the fiber direction affected the yielding capacity and the onset of buckling. Sivasankar et al. [3] studied the fracture modes, stress-strain behavior and ultimate bearing capacity of short CFRP-reinforced steel columns and showed that an increase in load could tear the CFRP fibers. Ghaemdoust et al. [4] studied short square damaged steel columns with horizontal and vertical defects located at the corner and center of the column, Karimian et al. [5] investigated short circular defective steel

columns strengthened with CFRP. These studies showed that defects reduced the bearing capacity and increased the axial deformation and local buckling in steel columns. As mentioned before, most previous works have studied the behavior of short columns strengthened with the CFRP; the behavior of corroded slender steel columns, where global buckling is quite vital, has been less attended to. Hence, 19 defective slender columns were prepared with and without CFRP strengthening and subjected to corrosion at different locations, and the effects of such parameters as the location, defect severity and CFRP wrapping on their behavior were investigated both experimentally and numerically.

2- Materials and Method

To study the effects of corrosion and strengthening techniques on the behavior of corroded columns, this research did experimental tests and numerical analyses on 19 slender steel column specimens, which one was undamaged for controlling purposes. The geometrical and material properties of the selected steel column are listed in Table 1.

This study has used four CFRP layers (SikaWrap@230-C) with elasticity modulus, Poisson ratio and thickness

*Corresponding author's email: Amirahmad1356@yahoo.com



Table 1. Properties of the CHS steel column

D (mm)	t (mm)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	ϵ %
88	2.06	265	325	11

equal to 230000 MPa, 1.7 and 0.129 mm, respectively, to strengthen the corroded columns.

The Sikadur®330- epoxy used in this study is recommended by the CFRP producer and has an elasticity modulus and tensile strength equal to 4300 and 30 MPa, respectively. It is commonly used for SikaWrap®230-C CFRP where the mixing ratio of the resin and harder parts is 1:4.

Corrosion was applied to the different locations of the column height. A 12-v, 30-amp, regulated DC power supply transmitted a constant 5-amp current to each phase wire by putting a resistor in its path, and the current was applied to four 5-mm thick rods installed with a weak weld at the same distance from the center of the damage to create a constant phase current for uniform damage around the desired area. The zero wire was attached to a stainless screw inside a 5% sodium chloride solution, the percent concentration of which was adopted from Malumbela et al. [6].

To achieve a good column-fiber bond, the specimens were sand blasted on the outer surface to eliminate the corrosion, then acetone was used to clean all the contamination from the steel and CFRP surfaces and, finally, CFRP sheets were wrapped around the specimens and kept at room temperature for seven days (as the fiber manufacturer had recommended). To measure the axial deformation, an LVDT was installed under the hydraulic jack and some more were placed around mid-height to measure the deformation because slender circular columns have large global buckling. Since the buckling direction is not predictable, all the specimens were tested for vertical displacements and a 16-channel Data logger system was used to store the data. The column base was fixed by a 30 mm wide, 10 mm thick plate welded to the bottom steel plate to keep column ends unwelded and prevent the laboratory system from destructive displacements; a similar system with no loading disruption was also used to restrain the column loading edge.

To study the structural behavior and Von-Mises stresses at the CHS thickness, especially at the damaged zone, all the specimens were numerically modeled by the finite element (FE) method (with both non-linear geometric and material analyses) where each model was created with reduced integration using 10-node solid elements (C3D10R); all models were first imperfed and then subjected to non-linear analyses. Imperfections were both local and global; for the former, the columns were first analyzed for elastic buckling and then the first two modes with imperfection values of $t/10$ and $t/100$ (t = section thickness) were combined to create the imperfect model.

3- Results and Discussion

Load-displacement curves of the specimens were investigated and results showed that for corrosion with 50% damage (lost 1 mm of its thickness), load bearing capacity was reduced by 13.7 and 6.22% for the mid-height and near-the-support damage, respectively, which indicates that the corrosion is more critical in the middle. For 100% damage, the surface of the damaged area was completely destroyed, thus reducing the ultimate load for damage in the middle was 40% and for the damage close to the supports was 21%. To compensate for this reduction, CFRP sheets (2 transverse and 2 longitudinal layers) increased the load bearing capacity up to 45% compared to the non-strengthened corroded specimen. The initial failure in the control column was global buckling with significant mid-height local deformations; as loading continued to enter the plastic area, the column experienced a mid-height local buckling and a secondary failure. For 50% damage, the stress increased in the vicinity of the corrosion zone and local buckling emerged. For 100% corrosion, since corrosion destroys the damaged area, failure occurs more quickly and the area shrinks. It is noteworthy that the global buckling occurs in all columns. For columns wrapped with CFRP sheets, compressive loading led to concentrate stresses in CFRP fibers. Rapture failure occurred in CFRP sheets after stresses exceeded their elastic limit. They reduced the mid-height column stresses significantly and delayed the local buckling at the damage zone.

4- Conclusions

The results showed columns with mid-height defects experienced significantly lower load bearing capacity than others. Results concluded that a reason for this greater reduction could be the concentration of the column's global and local buckling in the same area.

For the control column, global buckling (with emphasis on the mid-height damage) was the failure mode, but for non-strengthened damaged specimens, it was both global and local buckling (in the form of overlapped notch edges). It is worth noting that slenderness was the reason for the global buckling of all the columns. The global buckling failure of near-the-support damage was in the direction of the damage location, but for the mid-height damage, it was in the opposite direction. CFRP strengthening postponed the local buckling and reduced the stress intensity in the damage location. In strengthened specimens, stress concentration was around the damaged area leading, finally, to a rupture failure due to the damage deflection gained by continued loading.

References

- [1] Z. Tao, L.-H. Han, J.-P. Zhuang, Using CFRP to strengthen concrete-filled steel tubular columns: stub column tests, in: Fourth International Conference on Advances in Steel Structures, Elsevier, 2005, pp. 701-706.
- [2] J. Haedir, X.-L. Zhao, Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns, Journal of Constructional Steel Research, 67(3) (2011) 497-509.
- [3] S. Sivasankar, T. Thilakranjith, M. Sundarraja, Axial Behavior of CFRP Jacketed HSS Tubular Members- An Experimental Investigation, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 61(413) (2012) 1729-1737.
- [4] M.R. Ghaemdoost, K. Narmashiri, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP, Construction and Building Materials, 126 (2016) 1002-1011.
- [5] M. Karimian, K. Narmashiri, M. Shahraki, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP, Journal of Constructional Steel Research, 138 (2017) 555-564.
- [6] G. Malumbela, M. Alexander, P. Moyo, Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load, Construction and Building Materials, 24(6) (2010) 1051-1059.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

O. Yousefi, A. A. Hedayat, K. Narmashiri, A. Karbakhsh, *Compressive strengthening of steel columns with local corrosion using CFRP*, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 367-370.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19919.7290](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19919.7290)





مقاوم‌سازی فشاری ستون فولادی دایروی با خوردگی موضعی توسط CFRP

امید یوسفی^۱، امیراحمد هدایت^{۲*}، کامبیز نرماشیری^۳، علی کاربخش^۱

۱- گروه عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران
۲- گروه عمران، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران
۳- گروه عمران، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:

مقاوم‌سازی
خوردگی
ستون فولادی
کمانش ستون
CFRP

خلاصه: سازه‌های فولادی به دلایل متعدد مانند وارد شدن بارهای تصادفی، خوردگی و کاهش مقاومت دچار آسیب می‌شوند که نیاز به ترمیم و بهسازی دارند. در این تحقیق به ستون‌های دایروی شکل فولادی، آسیب به صورت خوردگی موضعی اعمال شد و تأثیر استفاده از الیاف پلیمری تقویت شده به فیبر کربن برای مقاوم‌سازی مطالعه شد. تعداد ۱۹ ستون دایروی شکل فولادی با ارتفاع و ابعاد آسیب یکسان تحت بار فشاری با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند که از این تعداد ۶ نمونه به صورت آزمایشگاهی تحلیل شدند. در نمونه‌های آزمایشگاهی، از خوردگی پیش رونده برای ایجاد آسیب در نمونه‌ها استفاده شد و در تحلیل نرم‌افزاری برای بالا بردن دقت تحلیل از روش ترکیبی برای مطالعه کمانش‌های ناحیه خمیری بعد از کمانش اولیه استفاده شد. به این ترتیب ابتدا نمونه‌ها تحت تحلیل کمانشی قرار گرفته و در ادامه از روش تحلیل غیرخطی ریکس با در نظر گرفتن ناکاملی به صورت کلی و موضعی برای تحلیل نمونه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که ستون‌های دارای خوردگی دچار کاهش ظرفیت باربری و سختی شدند و تخریب کامل ناحیه آسیب دیده ظرفیت باربری را برای ستون با آسیب میانه به میزان ۴۰٪ و برای ستون با آسیب نزدیک به تکیه‌گاه به میزان ۲۱٪ کاهش داد، که نشان دهنده بحرانی‌تر بودن آسیب در میانه‌ی ستون است. استفاده از الیاف کربنی توانست کاهش باربری را به میزان ۲۳٪ جبران کند و تأثیر مناسبی را در کنترل گسیختگی‌ها و کاهش تنش‌ها در محل آسیب‌دیده نشان داد.

و همکاران درباره رفتار سازه‌ای تیر دارای خوردگی تحت بار ثابت انجام دادند نتایج به طور واضحی نشان داد که تغییر شکل تیرها با افزایش میزان خوردگی افزایش می‌یابد [۲]. یکی از رایج‌ترین روش‌های تقویت سازه‌های فولادی استفاده از ورق‌های فولادی است. با توجه به اینکه ورق‌های فولادی دارای بار مرده زیاد، اشتباهات ناشی از جوشکاری و عوارض ناشی از خوردگی است استفاده از ماده جایگزینی که مشکلات ذکر شده را مرتفع نماید اجتناب‌ناپذیر است. به همین منظور در سال‌های اخیر مطالعات فراوانی بر روی پلیمر مسلح شده به فیبر^۱ انجام شده است که از آن به توان به جای ورق‌های فولادی استفاده کرد. FRP به دلیل خواص تقویتی که دارد از قبیل مقاومت کششی بالا، وزن کم، مدول الاستیسیته بالا، نداشتن عوارضی چون خوردگی، راحتی جابه‌جایی و نصب، به عنوان اولین گزینه به منظور جایگزینی ورق‌های فولادی برای مقاوم‌سازی و تقویت لرزه‌ای مدنظر قرار می‌گیرد.

۱- مقدمه

امروزه در دنیا بسیاری از سازه‌های زیربنایی که در گذشته ساخته شده‌اند به دلایل مختلف از قبیل تغییر کاربری، مسائل خوردگی و خطاهای طراحی فاقد مقاومت و شکل‌پذیری لازم در برابر بارهای اعمالی تشخیص داده می‌شوند، از آنجایی که جایگزینی سازه‌ها وقت و هزینه زیادی می‌طلبد مقاوم‌سازی یک راه حل قابل قبول برای بهبود ظرفیت تحمل بار و افزایش عمر بهره‌برداری شده است. خوردگی فولاد به طور گسترده‌ای به عنوان دلیل اصلی زوال و خرابی زودرس در اعضای فلزی پذیرفته شده است و عمدتاً عرشه‌ها و پایه‌های پل‌ها در معرض آسیب دیدگی ناشی از خوردگی هستند. مالمبلا و همکاران، مطالعه‌ای را به صورت آزمایشگاهی بر رفتار سازه‌ای تیرهای بتنی دارای خوردگی انجام دادند. خوردگی بر بال میلگردهای کششی اعمال شد و از نسبت ۵ درصد محلول سدیم کلرید برای ایجاد خوردگی استفاده شد آن‌ها دریافتند که کرنش‌های طولی، عمق تار خنثی و مقدار تحمل بار به میزان خوردگی وابسته است [۱]. در تحقیق دیگری که بالیم

1 Fiber Reinforced Polymer

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Amirahmad1356@yahoo.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



استفاده از الیاف پلیمری مسلح شده به فیبر کربن^۱ برای مقاومسازی ستون‌های فولادی دایروی شکل، پر شده با بتن توسط ژو و همکاران انجام شد در این تحقیق ستون‌ها به صورت نرم‌افزاری تحت بارگذاری فشاری مطالعه شدند و نتایج نشان داد که استفاده از الیاف CFRP باعث افزایش بار نهایی در نمونه‌های مقاومسازی شده می‌شود [۳].

در نظر گرفتن عواملی نظیر تعداد لایه‌ها و فاصله نوارهای الیاف کربنی مطالعه‌ای بود که توسط ساندراراجا و همکاران بر روی عضو قوطی شکل انجام شد، آن‌ها دریافتند که استفاده از الیاف به صورت عرضی و طولی باعث افزایش بیشتر در سختی و ظرفیت باربری در مقایسه با استفاده از الیاف به صورت طولی می‌شود [۴].

مطالعه‌ی روش‌های نصب ورق‌های کربنی به منظور کنترل رفتار کماتشی در مقاطع فولادی توسط هریس و همکاران انجام شد. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش تعداد لایه‌ها منجر به افزایش استحکام و بهبود عملکرد اعضاء فولادی خواهد شد و انتخاب و جهت‌گیری مناسب الیاف کربنی تأثیر قابل توجه در مقاومسازی مقاطع فولادی دارد [۵]. پرابو و همکاران، الیاف کربنی را با در نظر گرفتن ضخامت و فاصله نوارها به دور مقطع فولادی پر شده با بتن پیچیدند و به بررسی آزمایشگاهی رفتار تنش-کرنش و مدهای شکست نمونه‌های مقاومسازی شده با الیاف کربنی به صورت عرضی پرداختند، در این تحقیق مشاهده شد زمانی که فاصله نوارهای پلیمری کربن زیاد می‌شود کماتش در قسمت بدون الیاف رخ می‌دهد و تعداد لایه‌های بیشتر تأثیر بهتری در کنترل تغییر شکل محوری دارد [۶].

بررسی تقویت لوله‌های فولادی دایره‌ای با مقاومت بسیار بالا که با جوش لب‌به‌لب متصل شده بودند توسط جیاو و همکاران انجام شد، آن‌ها از فولاد با مقاومت بالا و سه نوع از رزین‌های اپوکسی با برش‌های مختلف برای تقویت استفاده کردند. مطالعه برای تعیین مقاومت برشی لبه بین الیاف کربنی و فولاد انجام شد. نمونه‌ها تحت تنش محوری قرار گرفتند و سه نوع مد گسیختگی شامل گسیختگی چسب، پارگی الیاف کربنی و گسیختگی ترکیبی مشاهده شد [۷]. تاو و همکاران، به بررسی ژاکت‌های الیاف کربنی در مقاومسازی ستون‌های قوطی شکل و دایروی شکل کوتاه پر شده با بتن پرداختند. تعداد ۹ ستون کوتاه با مقاطع دایروی و قوطی شکل به صورت آزمایشگاهی مطالعه گردید و تأثیر استفاده از الیاف کربنی در افزایش ظرفیت باربری مشاهده شد. افزایش تعداد لایه‌ها در افزایش ظرفیت باربری مؤثر بود و این افزایش در ستون‌های دایروی نسبت به قوطی شکل بیشتر بود [۸].

مقاومسازی با الیاف کربنی به صورت عرضی و طولی در ستون کوتاه در

آزمایشگاه توسط هایدرو ژائو انجام شد و این روش باعث افزایش ظرفیت تسلیم و به تأخیر انداختن کماتش در ستون شد [۹]. همچنین بررسی مدهای کماتش، رفتار تنش-کرنش و ظرفیت باربری نهایی ستون قوطی شکل فولادی کوتاه مقاومسازی شده با الیاف کربنی توسط سیواسنکر و همکاران انجام شد که نشان داد با افزایش بار، الیاف کربنی در ستون احاطه شده دچار پارگی می‌شوند [۱۰].

هی و همکاران، رفتار ستون دایروی فولادی پر شده با بتن معمولی، بتن بازیافتی و مقاومسازی شده با الیاف کربنی تحت فشار را مطالعه کردند، در آن بررسی استفاده از الیاف کربنی باعث افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری شد و استفاده از این مصالح به صورت نیمه دور پیچ دارای کرنش فشاری محوری کمتر نسبت به دور پیچ کامل شد [۱۱]. کالاواگوتا و همکاران، در مطالعه‌ای بر روی ستون کانال شکل لبه‌دار مقاومسازی شده با الیاف کربنی تحت بار محوری مشاهده کردند که در مقطع کاملاً مقاومسازی شده تا ۱۶/۷۵ درصد و در نمونه مقاومسازی شده در جان تا ۱۰/۲۶ درصد ظرفیت باربری افزایش یافته است؛ به دلیل لایه لایه شدن و جدا شدن الیاف کربنی، کاهش ظرفیت و شکست ناگهانی ملاحظه گردید و همچنین آماده‌سازی سطح و دما دو عامل مهم برای دست یافتن به چسبندگی مناسب بین فولاد و الیاف می‌باشند [۱۲].

شهرکی و همکاران، مطالعه‌ای را بر روی ستون‌های فلزی دارای نقص انجام دادند آن‌ها از پروفیل قوطی با مقطع ۴۰×۴۰ میلی‌متر مربع با ارتفاع ۲۵۰۰ میلی‌متر استفاده کردند و دریافتند که وجود آسیب باعث کاهش ظرفیت باربری ستون می‌شود و استفاده از CFRP باعث کاهش تنش‌ها در اطراف نقص می‌شود [۱۳]. کیتخا، مطالعه‌ای را بر روی ارزیابی عملکرد سازه‌ای اعضای فولادی قوطی شکل آسیب دیده و مقاومسازی شده با الیاف CFRP تحت ترکیب بار خمش، پیچش و بار موضعی انجام داد. نتایج نشان داد که آسیب باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود و در طول بارگذاری مقدار تنش‌ها در ناحیه آسیب دیده افزایش می‌یابد [۱۴]. ونگ و همکاران، مطالعه‌ای را بر روی ستون‌های فولادی دایروی و پر شده با بتن انجام دادند و در این تحقیق ستون‌های مقاومسازی شده با CFRP، تحت ترکیب بار فشاری-خمشی-پیچشی قرار گرفتند و رفتار سازه‌ای و حالت‌های شکست نمونه‌ها بررسی شد، همچنین رابطه طراحی و تعیین ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها تحت این ترکیب بار ارائه شد [۱۵]. مقاومسازی تیر با آسیب اولیه به صورت یک طرفه و دو طرفه بر روی بال کششی توسط یوسفی و همکاران به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مطالعه شد. آسیب دو طرفه

نتایج مطالعه نشان داد که وجود خوردگی در میانه ستون باعث کاهش شدید باربری ستون شد و استفاده از الیاف کربنی توانست به طور مناسب کاهش باربری را جبران و کماتش‌های محل آسیب را کنترل کند.

۲- مشخصات مصالح و نمونه‌ها

در این پژوهش تعداد ۱۹ ستون مورد بررسی قرار گرفتند که ۶ نمونه به صورت مدل‌سازی و آزمایشگاهی تحلیل شدند و ۱۳ نمونه از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶، مطالعه شدند.

۲-۱- مشخصات فولاد انتخابی

به منظور مطالعه‌ی رفتار ستون خورده شده، از ستون فولادی با قطر ۸۸ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰۰ میلی‌متر با مقاومت نهایی ۳۲۲ مگاپاسکال، کرنش نهایی ۰/۱۰٪ و مدول الاستیسیته ۲۱۶ مگاپاسکال استفاده شد. سه نمونه‌ی دمبلی شکل از مقطع ستون توسط دستگاه CNC برش و برای انجام آزمایش کشش آماده شد. شکل ۱ مراحل برش نمونه‌ها و انجام آزمایش کششی برای آن‌ها را نشان می‌دهد. در جدول ۱ مقادیر آزمایش کشش برای سه دمبل و میانگین مقادیر ارائه شده است. قابل توجه است که دو عدد از دمبل‌ها (شماره‌ی ۱ و ۳) مربوط به ناحیه خوردگی است.

۲-۲- مشخصات الیاف CFRP

جهت تقویت ستون دایروی فلزی دارای خوردگی تحت بار فشاری، از الیاف کربنی CFRP با مدول الاستیسیته ۲۳۸۰۰۰ مگاپاسکال و ضخامت نوار، ۰/۱۲۹ میلی‌متر و نسبت پواسون ۰/۱۷ استفاده شده است. شکل ۲، منحنی تنش-کرنش این مواد است که رفتار الاستیک خطی تا مرحله‌ی گسیختگی را بدون هیچ نقطه‌ی جاری شدن مشخص نشان می‌دهد، به همین دلیل تنها کافی است خصوصیات مکانیکی کشسان این مواد در نرم‌افزار داده شود. خصوصیات الیاف کربنی در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۳- خصوصیات چسب

چسب، مسیر انتقال برش بین سطح فولاد و مواد کامپوزیت را تأمین و عملکرد همسان کامپوزیت و ستون را سبب می‌شود. نوارهای CFRP تقویتی با استفاده از اپوکسی مخصوص به ضریب ارتجاعی ۴۵۰۰ مگاپاسکال به ستون فولادی چسبانده می‌شوند. در جدول ۲ مشخصات چسب مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

باعث کاهش ظرفیت باربری نسبت به آسیب دو طرفه شد همچنین آسیب یک طرفه علاوه بر کاهش باربری نهایی، کماتش کلی تیر را نیز سبب شد و افزایش داد؛ مقاومت‌سازی با الیاف کاهش باربری را جبران کرد و در کاهش کماتش تیر نیز مؤثر بود [۱۶]. قائم دوست و همکاران، تحقیقی را در مورد ستون‌های کوتاه قوطی شکل فولادی با آسیب اولیه انجام دادند که در آن آسیب به صورت افقی و قائم در گوشه و مرکز ستون در نظر گرفته شد [۱۷].

کریمیان و همکاران مطالعه‌ای را در مورد مقاومت‌سازی ستون‌های دایروی شکل فولادی کوتاه دارای آسیب توسط الیاف کربنی انجام دادند، آن‌ها دریافتند که وجود آسیب باعث کاهش ظرفیت باربری ستون‌های فولادی خواهد شد و آسیب‌های ایجاد شده باعث افزایش تغییر شکل‌های محوری و کماتش موضعی در ستون می‌شود [۱۸].

شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در ستون‌های آسیب دیده توسط یوسفی و همکاران مطالعه شد، در تحقیقی که به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری بر روی ۱۰ نمونه ستون دایره‌ای انجام دادند، آسیب را تنها به پایه و میانه ستون اعمال کردند، آن‌ها دریافتند که آسیب باعث کاهش شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در ستون‌های آسیب دیده می‌شود و استفاده از الیاف کربنی می‌تواند رفتار سازه‌ای ستون آسیب دیده را بهبود بخشد [۱۹].

در دهه‌ی اخیر مطالعات زیادی در مورد مقاومت‌سازی اعضای فولادی با الیاف کربنی انجام شده است، در اکثر تحقیقات گذشته ستون‌ها یا بدون آسیب بررسی شدند یا اینکه آسیب با ایجاد برش در ناحیه خاص مطالعه شده است در صورتی که خوردگی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل زوال اعضای فولادی نه تنها بر هندسه عضو، بلکه بر مواد ناحیه خورده شده نیز تأثیر می‌گذارد که این امر انگیزه‌ای شد برای این تحقیق تا با استفاده از سیستم خوردگی پیش رونده در آزمایشگاه بر روی ستون‌ها خوردگی ایجاد شود و رفتار سازه‌ای ستون و حالت‌های کماتش آن مورد بررسی قرار گیرد، در نهایت استفاده از الیاف کربنی جهت مقاومت‌سازی ستون‌های خورده شده مطالعه گردد. در این مطالعه تعداد ۱۹ نمونه ستون دایروی شکل مورد بررسی قرار گرفتند که از این تعداد ۶ نمونه به صورت آزمایشگاهی و تئوری با نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ و مابقی تنها به صورت نرم‌افزاری تحلیل شدند. به ستون‌ها آسیب به صورت خوردگی با درصد مختلف ۵۰٪، ۱۰۰٪ و در موقعیت‌های مختلفی از طول ستون اعمال شد و یک ستون به عنوان ستون سالم و بدون خوردگی برای مقایسه در نظر گرفته شد. برای بررسی اثربخشی استفاده از الیاف CFRP، ستون‌های با آسیب ۱۰۰ درصد مقاومت‌سازی شدند.



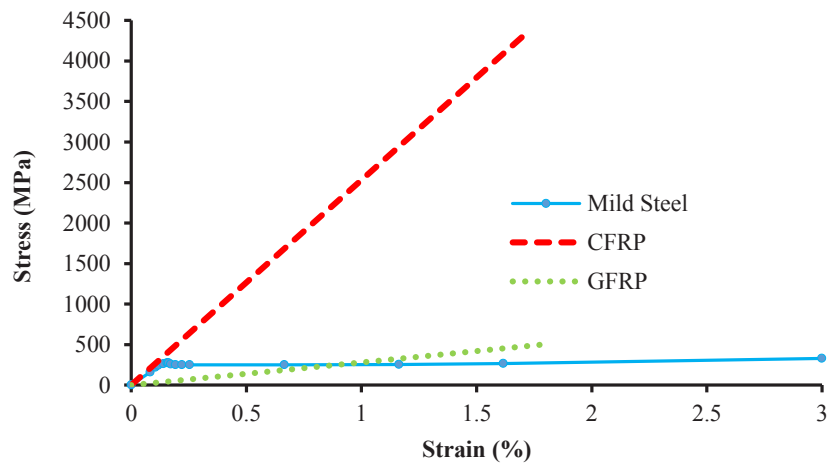
شکل ۱. مراحل برش نمونه‌ها و انجام آزمایش کششی: الف) برش لوله فولادی با دستگاه CNC، ب) دمبل‌های آماده شده، ج) انجام آزمایش کشش

Fig. 1. Steps of cutting samples and tensile test: a) Cutting steel pipe with CNC machine, b) Prepared dumbbells, c) Performing tensile test

جدول ۱. ابعاد ستون فولادی دایره‌ای شکل توخالی و نتایج آزمایش کشش

Table 1. Dimensions of steel circular hollow section column and tensile test results

شماره آزمایش کشش	قطر ستون (میلی‌متر)	ضخامت ستون (میلی‌متر)	ارتفاع ستون (میلی‌متر)	ضریب ارتجاعی (گیگاپاسکال)	تنش جاری شدن (مگاپاسکال)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (%)
۱	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۶۳	۳۲۳	۱۱/۰۱
۲	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۷۶	۳۳۲	۱۱/۳
۳	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۶۱	۳۲۲	۱۰/۷
میانگین مقادیر	۸۸	۲/۰۶	۳۰۰۰	۲۱۶	۲۶۵	۳۲۵	۱۱/۰۰۳



شکل ۲. نمودار تنش-کرنش الیاف پلیمری در مقایسه با فولاد معمولی [۲۰]

Fig. 2. Stress-Strain diagram of FRP compared to mild steel [20]

جدول ۲. خواص چسب و الیاف کربنی

Table 2. Properties of adhesive and carbon fibers

مواد	ضخامت (میلی‌متر)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	ضریب ارتجاعی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی (%)
الیاف CFRP [۲۱] (SikaWrap®-230 C)	۰/۱۲۹	۴۳۰۰	۲۳۰۰۰۰	۱/۷
چسب [۲۲] (Sikadur_-330)	۰/۸۷۱	۳۰	۴۵۰۰	۰/۹

۲-۴- مشخصات نمونه‌ها

(۲ لایه عرضی و ۲ لایه طولی) مقاومت‌سازی شده است. مشخصات هندسی ستون دایروی شکل توخالی و مشخصات خوردگی آن‌ها در شکل ۳ قابل مشاهده است و همچنین در جدول ۳ نمونه‌های انجام شده در این پژوهش ارائه شده است.

در این تحقیق به منظور بررسی درصد آسیب و روش‌های مقاوم‌سازی، ۶ نمونه ستون به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری و ۱۳ نمونه تنها به صورت مدل‌سازی مطالعه شدند. نمونه بدون آسیب به عنوان نمونه کنترل و ۱۹ نمونه ستون با درصد مختلف آسیب در طول ستون، که برخی از آن‌ها توسط الیاف کربنی مقاوم‌سازی شده‌اند بررسی شدند. نام‌گذاری ستون‌ها با توجه به آسیب، موقعیت آن و نحوه‌ی مدل‌سازی انجام شد. ستون‌های آسیب دیده با حرف D شروع می‌شوند که عدد بعد آن موقعیت آسیب نسبت به پایه ستون است. به عنوان مثال در ستون D-90-100%-2T2L، ستون با خوردگی ۱۰۰٪ در فاصله ۹۰ میلی‌متری از تکیه‌گاه است که با ۴ لایه الیاف

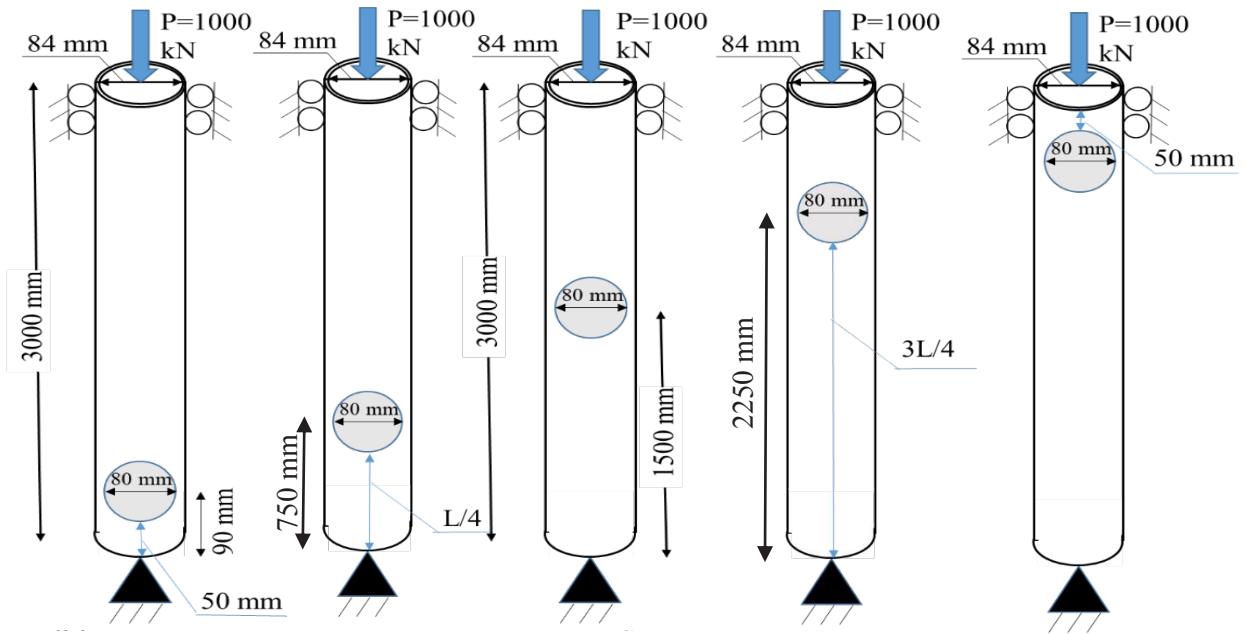
۳- آزمایش‌های تجربی و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، لوله‌های فولادی به قطعاتی به طول ۳۰۰۰ میلی‌متر برش داده شدند. سپس با استفاده از سیستم اعمال خوردگی پیش‌رونده برای ایجاد آسیب در موقعیت‌های مورد مطالعه استفاده شد.

جدول ۳. مشخصات نمونه‌ها

Table 3. Specimen Specifications

شماره	نمونه	طول و تعداد الیاف کربنی	درصد خوردگی	موقعیت اعمال خوردگی	نوع تحلیل
۱	Control	ندارد	ندارد	ندارد	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۲	D-90-50%	ندارد	۵۰	نزدیک تکیه‌گاه	نرم‌افزاری
۳	D-90-100%	ندارد	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۴	D-90-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۵	D-750-50%	ندارد	۵۰	L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۶	D-750-100%	ندارد	۱۰۰	L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۷	D-750-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۸	D-1500-50%	ندارد	۵۰	میانه ستون	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۹	D-1500-50%-1T1L	۲ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۵۰	میانه ستون	نرم‌افزاری
۱۰	D-1500-100%	ندارد	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۱۱	D-1500-100%-1T1L	۲ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری
۱۲	D-1500-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری و آزمایشگاهی
۱۳	D-1500-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۴۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	میانه ستون	نرم‌افزاری
۱۴	D-2250-50%	ندارد	۵۰	3L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۱۵	D-2250-100%	ندارد	۱۰۰	3L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۱۶	D-2250-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	3L/4 طول ستون	نرم‌افزاری
۱۷	D-2910-50%	ندارد	۵۰	نزدیک نقطه بارگذاری	نرم‌افزاری
۱۸	D-2910-100%	ندارد	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	نرم‌افزاری
۱۹	D-2910-100%-2T2L	۴ لایه به طول ۲۰۰ میلی‌متر	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	نرم‌افزاری



شکل ۳. مدل هندسی، موقعیت آسیب و شرایط تکیه گاهی

Fig. 3. Geometric model, damage position and support conditions

تأثیر خوردگی بر خواص مقطع فلزی در ناحیه‌ی آسیب دیده است. در این مطالعه از خوردگی موضعی برای اعمال آسیب بر نمونه‌ها استفاده شده است و عملکرد سازه‌ای آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

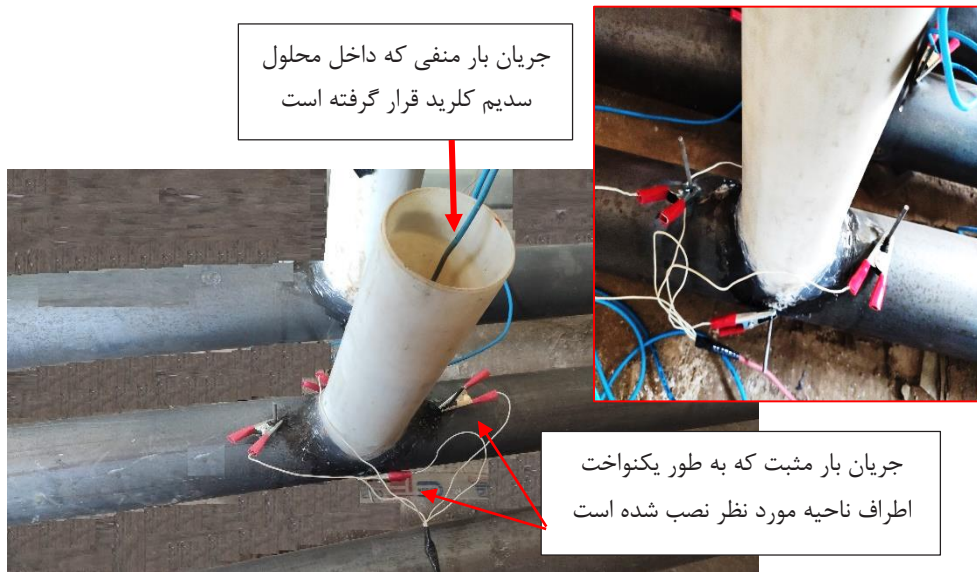
۳-۱-۱- فرآیند اعمال خوردگی

برای اعمال خوردگی از مبدل جریان الکتریسیته به ۱۲ ولت و محلول آب با سدیم کلرید به نسبت ۵٪ با توجه به مطالعه مالومبلا و همکاران استفاده شد [۱]. محلول سدیم کلرید در داخل لوله‌های پلاستیکی به قطر ۸۰ میلی‌متر که با استفاده از چسب ضد آب در محل‌های تعیین شده (محل اعمال خوردگی موضعی) نصب شدند ریخته شد. برای اعمال جریان یکنواخت بار مثبت در اطراف محل مورد نظر و به فاصله ثابت نسبت به مرکز اعمال خوردگی، چهار عدد میخ با ضخامت ۳ میلی‌متر نصب شدند، به دلیل آنکه اگر بار مثبت به یک نقطه اعمال می‌شد خوردگی بیشتر در نزدیکی وجود محل اتصال بار مثبت به وجود می‌آمد. همچنین جریان بار منفی از طریق محلول به ناحیه اعمال شد.

در شکل ۴ سیستم اعمال خوردگی نشان داده شده است و در شکل ۵ نمونه‌ها بعد از اعمال خوردگی قابل مشاهده هستند. قبل از انجام آزمایش

۳-۱- ایجاد آسیب در نمونه‌ها

به مجموع عواملی که باعث می‌شود عضو فولادی، عملکرد سازه‌ای اولیه که بر اساس آن طراحی شده را نداشته باشد نقص و یا آسیب در مقطع گفته می‌شود. نقص می‌تواند شامل خرابی و یا تغییر شکل در سطح مقطع و یا طول عضو باشد یا تغییر در خواص مواد شامل تغییر در تنش تسلیم آن باشد. خوردگی از مهم‌ترین دلایل خرابی اعضای فولادی است، در فرآیند خوردگی، نه تنها هندسه‌ی مقطع آسیب می‌بیند بلکه خوردگی بر خواص مواد هم تأثیر می‌گذارد. به طور معمول خوردگی در فلزات به صورت سطحی یا موضعی بروز می‌نماید که در خوردگی سطحی، به دلیل اکسیداسیون سطح فلز، خواص فلز شامل تنش تسلیم، تحت تأثیر قرار می‌گیرد در حالی که خوردگی موضعی، کاهش مواد از سطح فلز است که باعث نازک شدن مقطع عضو و در نهایت ایجاد شکاف می‌شود [۲۳]. در این پژوهش با توجه به اینکه خوردگی تا چه میزان بر خواص مواد تأثیر گذاشته است ۲ نمونه از دمبل‌های آزمایش کشش از ناحیه‌ی خوردگی تهیه شدند و آزمایش کشش بر روی آن‌ها انجام شد و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است میزان تنش تسلیم برای آزمایش کشش ۱ و ۳ نسبت به نمونه‌ی ۲ به طور تقریبی ۳ درصد کمتر است که نشان دهنده‌ی



شکل ۴. سیستم اعمال خوردگی بر نمونه‌ها

Fig. 4. Corrosion application system



شکل ۵. نمونه‌ها بعد از اعمال خوردگی

Fig. 5. Samples after applying corrosion



شکل ۶. انجام سندبلاست، تمیز کردن الیاف کربنی و مقاوم‌سازی ستون‌ها

Fig. 6. Sandblasting, cleaning of carbon fibers and strengthening of columns

مقاوم‌سازی لوله فولادی با الیاف کربنی نشان داده شده است. چیدمان الیاف به دور ستون فولادی در شکل ۷ نشان داده شده است.

۳-۳- انجام آزمایش فشار محوری در آزمایشگاه سازه

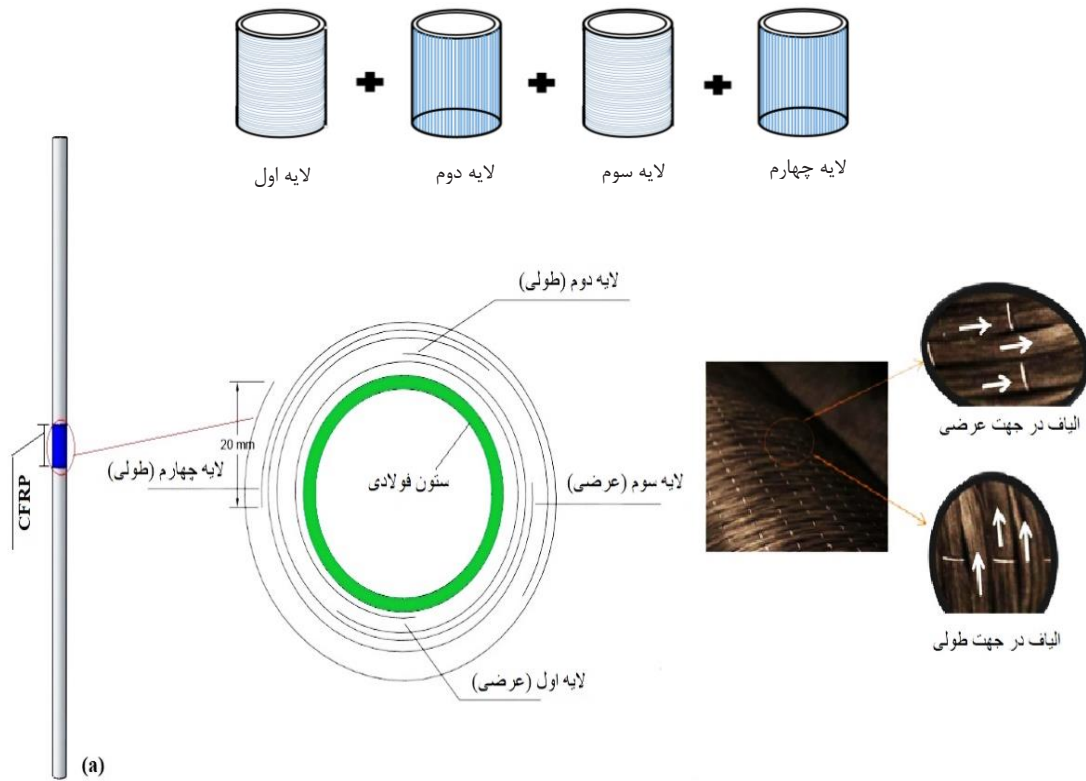
به منظور بررسی ظرفیت باربری و عملکرد ستون‌های دایروی شکل فولادی لاغر دارای آسیب خوردگی و بررسی اثر الیاف CFRP بر مقاوم‌سازی آن‌ها، نمونه‌های آزمایشگاهی پس از آماده‌سازی تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. برای لبه اعمال بار، تکیه‌گاه غلتکی به گونه‌ای آماده شد که ستون داخل آن قرار گرفته و به مرکزیت جک واقع شود. در لبه پایین ستون، به منظور اعمال شرایط مفصلی و جلوگیری از حرکت ستون از پایه، از یک مهار با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و عرض ۳۰ میلی‌متر که به صفحه پایین ستون جوش شده بود استفاده شد. لازم به ذکر است ستون از هر دو لبه بالا و پایین هیچ‌گونه اتصال جوشی ندارد و کاملاً شرایط مفصلی منظور شد. شکل ۸ شرایط تکیه‌گاهی در بالا و پایین ستون را نشان می‌دهد. پس از قرار دادن ستون در محل اعمال بار، نیرو به صورت محوری توسط جک به نمونه‌ها وارد گردید و تغییر مکان به وسیله سه LVDT^۱ اندازه‌گیری شد. نیرو و تغییر

و برای به دست آوردن زمان خوردگی در نمونه‌های اصلی، اعمال خوردگی بر روی نمونه‌های کوچک‌تر انجام گرفت و زمان تقریبی برای وجود آمدن خوردگی در ستون‌های اصلی تعیین گردید. به این ترتیب برای ایجاد خوردگی موضعی ۵۰٪، حدود ۱۲ ساعت و در خوردگی ۱۰۰٪ حدود ۱۸ ساعت از سیستم خوردگی استفاده شد.

۳-۲- نصب الیاف کربنی

به منظور ایجاد سطح تمیز، زبر و عاری از زنگ زدگی جهت چسباندن الیاف به لوله فولادی، لوله‌ها سندبلاست شدند. شکل ۶ مراحل انجام سندبلاست روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با محاسبه طول و عرض الیاف مورد نیاز و در نظر گرفتن ۲۰ میلی‌متر پوشش روی هم، الیاف برش داده شدند. سپس آلودگی‌های سطح فولاد و الیاف با استفاده از دستمال تمیز و استون پاک شدند. برای چسباندن لایه‌های CFRP بر روی لوله فولادی از رزین اپوکسی (Sikadur330) استفاده شده است که این چسب از دو بخش A و B تشکیل شده است که به نسبت ۴ به ۱ مخلوط شدند. پس از آن با استفاده از قلم‌مو رنگ‌آمیزی، لوله فولادی و لایه‌های الیاف به چسب آغشته شدند و بر اساس الگوی مقاوم‌سازی، الیاف به دور لوله پیچانده شدند و بر روی هر لایه از الیاف نیز مجدداً چسب آغشته شد. در شکل ۶ تصویر

1 Linear Variable Differential Transformer



شکل ۷. مقاوم‌سازی ستون دایروی شکل با ۴ لایه الیاف

Fig. 7. Strengthening of a circular column with 4 layers of CFRP

۴-۲- مقاوم‌سازی نمونه‌های نرم‌افزاری

برای مدل‌سازی الیاف کربنی، با توجه به اینکه این الیاف دارای ضریب ارتجاعی بالا در جهت طولی بوده و در جهت عرضی چنین ویژگی را ندارند خواص به صورت مقادیر مهندسی اعمال شدند که برای این کار مقدار ضریب ارتجاعی الیاف که در جدول ۲ بیان شده است به عنوان E_1 و برای مقادیر E_2 و E_3 مقدار ۱۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار، الیاف کربنی و چسب به صورت مواد مرکب^۳ تعریف شدند به طوری که ۸ لایه در نظر گرفته شد که از این میان ۴ لایه برای چسب و ۴ لایه برای الیاف کربنی است (بر اساس دستورالعمل کارخانه مجموع ضخامت یک لایه الیاف کربنی و چسب باید یک میلی‌متر باشد [۲۱])، که با توجه به ضخامت ۰/۱۲۹ میلی‌متر برای لایه‌ی کربنی، ضخامت ۰/۸۷۱ میلی‌متر برای لایه‌ی چسب مدل‌سازی شد. ضخامت‌های لایه‌ی کربنی و چسب در جدول ۲ موجود

مکان توسط دیتالاگر^۱ در سیستم ذخیره شدند در شکل ۸ نحوه‌ی قرارگیری ستون دایروی شکل و محل قرارگیری LVDT نشان داده شده است.

۴-۳- مدل‌سازی ستون‌ها

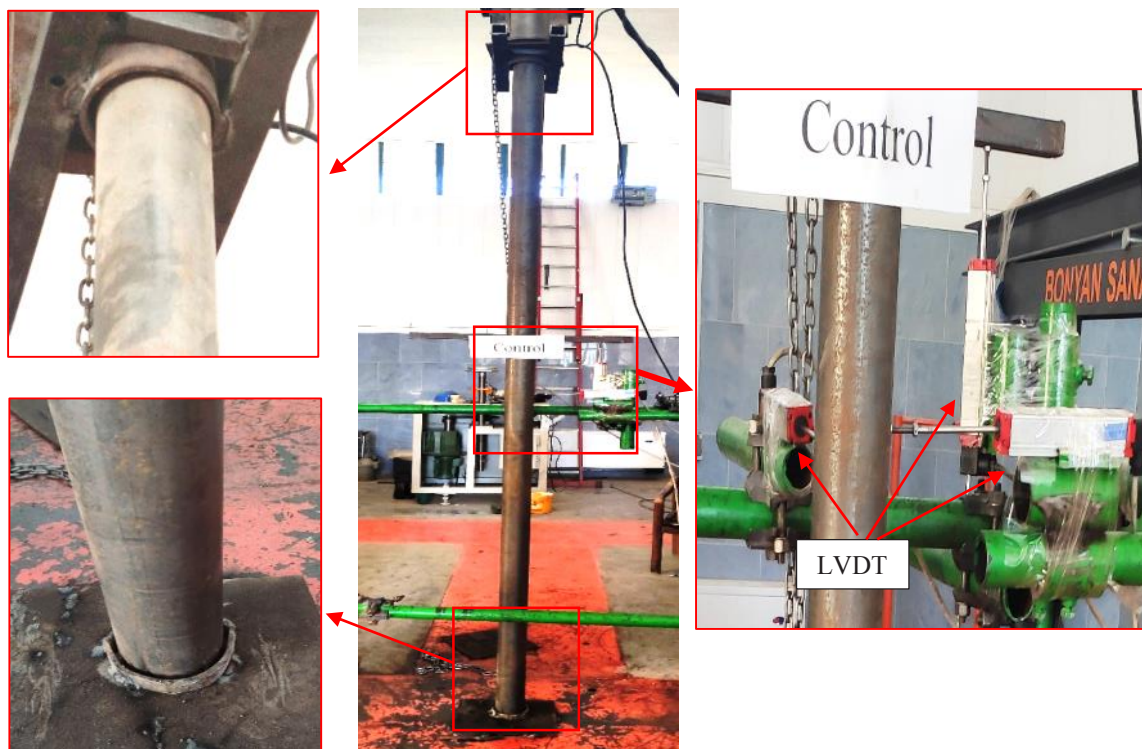
برای مدل‌سازی نمونه‌ها از نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۶ استفاده شد و تحلیل غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد در نظر گرفته شد.

۴-۱- تعریف المان

در مدل‌سازی برای بررسی رفتار سازه‌ای مقاطع دایره‌ای شکل توخالی و وضعیت تنش‌ها در ضخامت مقطع به خصوص در ناحیه آسیب دیده، از المان توپر^۲، ۱۰ گرهی (C3D10) همراه با انتگرال کاهش یافته استفاده شد.

- 1 Data Logger
- 2 Solid

3 Composite



شکل ۸. شرایط تکیه‌گاهی در آزمایشگاه برای بالا و پایین ستون و نصب LVDT جهت اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها

Fig. 8. Laboratory support conditions for top and bottom of the column and LVDT installation

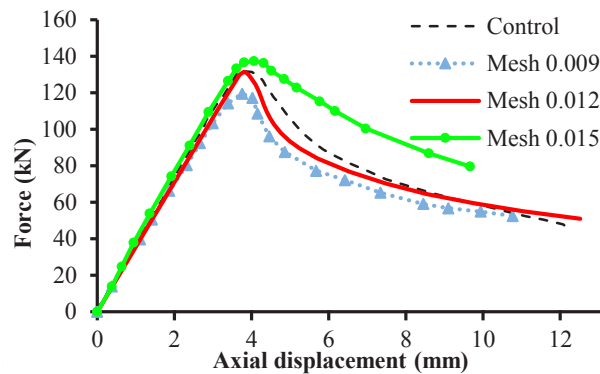
۴-۳- بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

با توجه به شرایط تکیه‌گاهی ستون‌ها در آزمایشگاه، نمونه‌های مدل شده نیز در دو انتها دارای تکیه‌گاه‌های مفصلی می‌باشند. نحوه‌ی مدل کردن شرایط مرزی در حل مسئله و استحصال نتایج مؤثر است و بایستی تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد و بار ۱۰۰۰ کیلونیوتنی به صورت فشار محوری بر سطح مقطع عضو وارد گردید.

۴-۴- ایجاد نقص در نمونه‌ها

برای ایجاد خوردگی در مدل‌های نرم‌افزاری، از ابعاد آسیب نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. به این ترتیب در نمونه‌های آسیب دیده، آسیب دایروی شکل به قطر ۸۰ میلی‌متر اعمال شد که برای آسیب ۵۰٪ با توجه به همین نسبت از ضخامت محل خوردگی کاسته شد و در آسیب ۱۰۰٪ یک حفره به قطر ناحیه آسیب در ستون ایجاد شد. به دلیل آن که خوردگی

است. برای الیاف کربنی لایه اول و سوم با زاویه صفر درجه و برای لایه‌های دوم و چهارم زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. با این روش لایه‌ها یکی در میان به صورت طولی و عرضی مدل شدند، در واقع به دلیل ضریب ارتجاعی پایین در جهت عرضی، در آزمایشگاه نیز الیاف به صورت یکی در میان طولی و عرضی نصب شدند. در نهایت از قید Tie برای نصب چسب و الیاف بر روی ستون استفاده شد. در نرم‌افزار آباکوس روش‌های مختلفی برای اتصال چند قطعه به یکدیگر وجود دارد که استفاده از قید Tie در مطالعه‌ی قائم دوست و همکاران [۱۷] و کریمیان و همکاران [۱۸] برای نصب الیاف کربنی بر روی عضو فولادی در نرم‌افزار استفاده شده است. استفاده از قید Tie، نه تنها باعث اتصال مناسبی بین لایه‌ی چسب و الیاف بر روی عضو فولادی شد بلکه تغییر شکل‌های به وجود آمده بر روی الیاف کربنی، تحت بارگذاری فشاری را نزدیک به نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داد.



شکل ۹. نتایج مقایسه اندازه شبکه‌بندی ستون فولادی (ستون شاهد) با نتایج آزمایشگاهی

Fig. 9. Results of comparing the mesh sizes for control column

امتحان شدند و بهترین اندازه‌ی شبکه برای عضو فولادی، الیاف CFRP و چسب انتخاب شد. نتایج مدل‌سازی با اندازه‌ی شبکه ۱۲ میلی‌متر با نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر بود و این اندازه‌ی شبکه برای سایر نمونه‌ها از این نوع ستون استفاده شد. لازم به ذکر است استفاده از شبکه با اندازه‌ی کوچک‌تر از ۹ میلی‌متر ضمن بالا بردن بسیار زیاد زمان تحلیل از انطباق کافی نسبت به اندازه‌ی شبکه ۱۲ میلی‌متر برخوردار نبود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود شبکه‌بندی تأثیر قابل‌توجهی بر نمودار نیرو-تغییر مکان داشت و اندازه‌ی شبکه‌ی ۱۲ میلی‌متر انطباق خوبی با نمونه‌ی آزمایشگاهی دارد. مقایسه‌ی حالت کمناش نمونه‌ی کنترل به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری انجام شده در این تحقیق در شکل ۱۰ نشان داده شده است، همچنین نمودار صحت سنجی نسبت نیرو به تغییر مکان محوری نمونه‌های با آسیب ۱۰۰٪ در میانه و ستون مقاوم‌سازی شده در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

۵- تفسیر و تحلیل نتایج

برای تحلیل مدل‌ها و مقایسه نتایج از مدل شاهد استفاده شد. بررسی‌ها مبتنی بر مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان قائم ستون دایروی شکل است و هدف بررسی اثر آسیب، وضعیت و محل آن و پوشش CFRP بر ظرفیت تحمل ستون دایروی شکل است. لازم به ذکر است نمونه شاهد فاقد آسیب دیدگی و بدون پوشش CFRP است. جدول ۴ میزان ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها را نمایش می‌دهد.

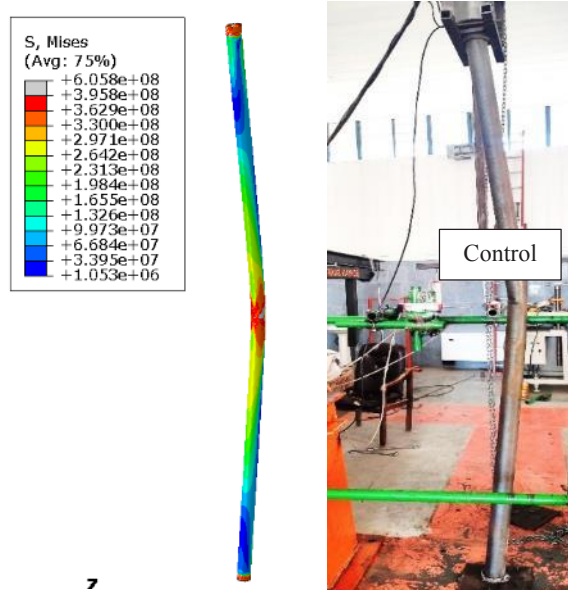
علاوه بر هندسه‌ی مقطع، بر خواص مواد قسمت آسیب دیده تأثیر می‌گذارد و دارای تنش تسلیم کمتری است در مدل‌سازی از مقدار میانگین خواص که در جدول ۱ ارائه شده است استفاده شد. همچنین به دلیل آنکه هیچ قطعه‌ای به شکل صاف و کاملی که در نرم‌افزار مدل می‌شود ساخته نمی‌شود و وجود این ناکاملی‌ها باعث بروز پدیده کمناش در عضو می‌شود، برای ایجاد اندکی تغییر شکل جزئی در مدل‌ها از دستور ناکاملی^۱ در نرم‌افزار استفاده شد.

در نرم‌افزار از تحلیل غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد همراه با ناکاملی برای مدل‌سازی استفاده شد و دو نوع ناکاملی کلی و موضعی به نمونه‌ها اعمال شدند. برای اعمال ناکاملی در نمونه‌ها، ابتدا مدل‌ها تحت تحلیل کمناشی قرار گرفتند و حالت‌های کمناش محاسبه شد، سپس دو مد کمناش اولیه، به صورت ناکاملی کلی و موضعی به مدل اعمال شد. تعیین ناکاملی با استفاده از مطالعه هدایت و همکاران انجام گرفت [۲۴] و مقدار $L/1200$ به عنوان ناکاملی کلی و ۰.۵٪ از ضخامت جداره به عنوان ناکاملی موضعی در تحلیل مدل‌ها استفاده شد، سپس نمونه‌ها تحت آنالیز ریکس تحلیل شدند.

۴-۵ راستی آزمایشی نتایج

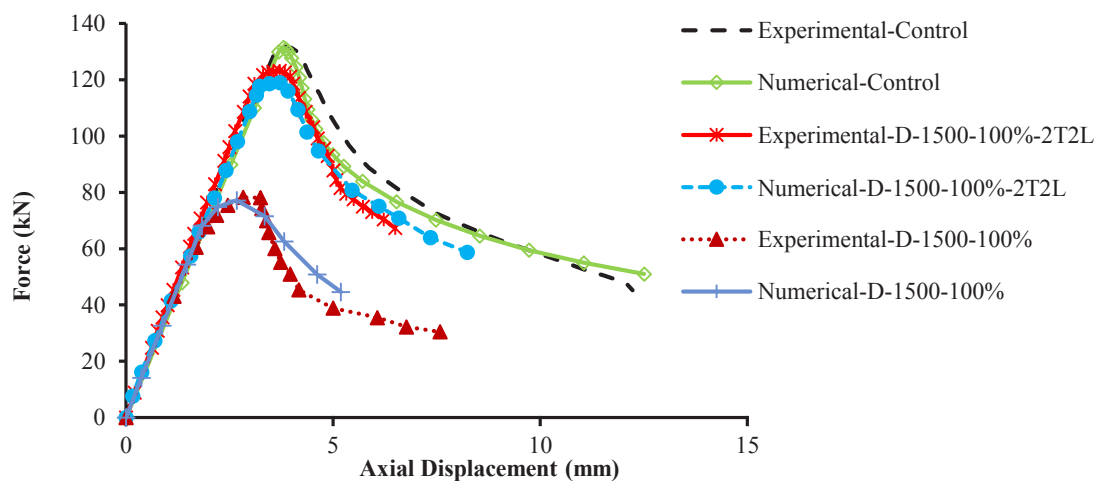
شبیه‌سازی نرم‌افزاری و آزمایشگاهی به منظور تعیین مناسب‌ترین ارتباط بین تنش-کرنش انجام گردید و هدف مشاهده تغییر شکل، بار نهایی و شکست مانند نمونه آزمایشگاهی بود. به جهت کنترل و انتخاب بهترین اندازه شبکه در نرم‌افزار چند نمونه شبکه با اندازه‌های ۱۵، ۱۲ و ۹ میلی‌متر

1 Imperfection



شکل ۱۰. کماتش کلی نمونه شاهد، انجام شده به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی در این تحقیق

Fig. 10. Global buckling of the control column, performed experimentally and modeling in this study



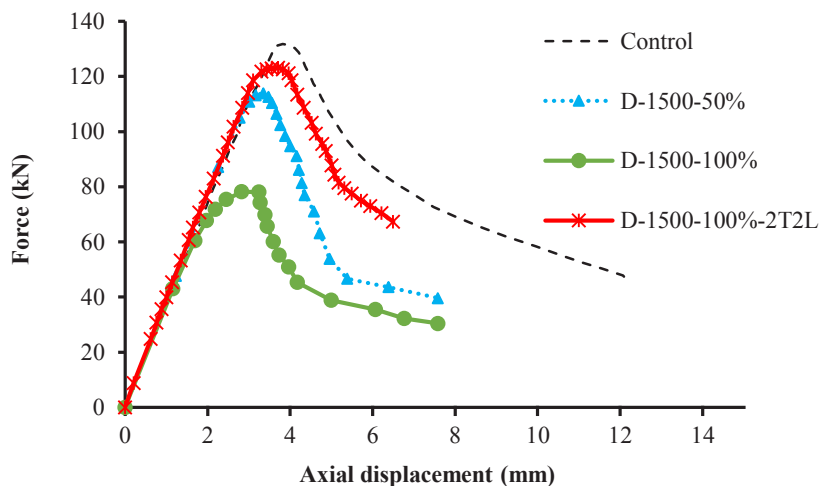
شکل ۱۱. نمودار صحت سنجی نسبت نیرو به تغییر مکان محوری نمونه های نرم افزاری با نتایج آزمایشگاهی برای ستون شاهد، ستون با آسیب ۱۰۰٪ در میانه و ستون مقاوم سازی شده

Fig. 11. Validity diagram of force to axial displacement of numerical and experimental cases, column with 100% damage in the middle and strengthened column

جدول ۴. مشخصات، موقعیت آسیب و ظرفیت باربری نمونه‌ها

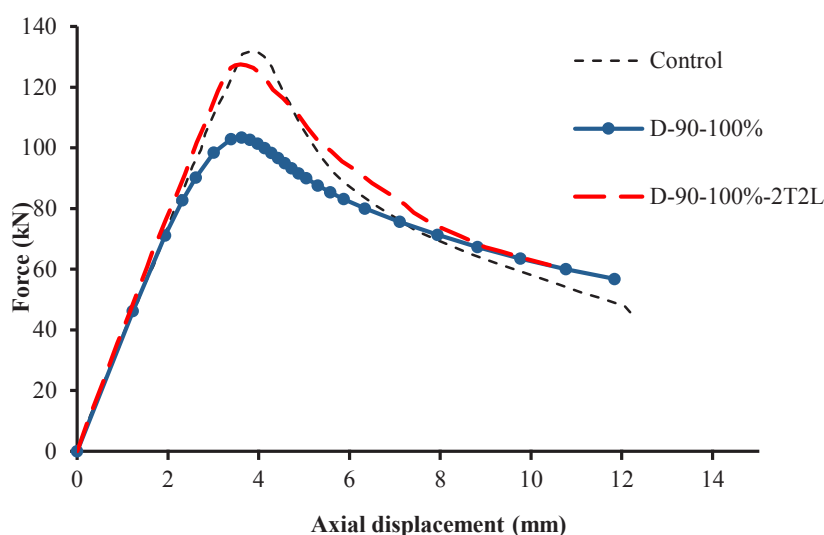
Table 4. Specifications, damage location and load bearing capacity of the specimens

شماره	نمونه	خوردگی		طول الیاف CFRP (میلی‌متر)	ظرفیت باربری			
		درصد خوردگی	موقعیت		نمونه‌های آزمایشگاهی		نمونه‌های نرم‌افزاری	
					مقدار بار (کیلو نیوتن)	افزایش یا کاهش (%)	مقدار بار (کیلو نیوتن)	افزایش یا کاهش (%)
۱	Control	ندارد	ندارد	ندارد	۱۳۲/۰۲	-	۱۳۰/۱	-
۲	D-90-50%	۵۰	نزدیک تکیه‌گاه	-	-	-	۱۲۲	-۶/۲۲
۳	D-90-100%	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	-	۱۰۳/۴	-۲۱/۶۷	۱۰۴	-۲۰
۴	D-90-100%-2T2L	۱۰۰	نزدیک تکیه‌گاه	۲۰۰	۱۲۷/۱	-۳/۸	۱۲۵/۱	-۳/۸۱
۵	D-750-50%	۵۰	L/4 طول ستون	-	-	-	۱۱۸	-۹/۲
۶	D-750-100%	۱۰۰	L/4 طول ستون	-	-	-	۹۱/۶	-۲۹/۵
۷	D-750-100%-2T2L	۱۰۰	L/4 طول ستون	۲۰۰	-	-	۱۲۳	-۴/۶
۸	D-1500-50%	۵۰	میانه ستون	-	۱۱۳/۹	-۱۳/۷	۱۱۴	-۱۲/۳
۹	D-1500-50%-1T1L	۵۰	میانه ستون	۲۰۰	-	-	۱۲۵	-۳/۸
۱۰	D-1500-100%	۱۰۰	میانه ستون	-	۷۸/۲	-۴۰/۷	۸۰/۰۱	-۳۸/۵
۱۱	D-1500-100%-1T1L	۱۰۰	میانه ستون	۲۰۰	-	-	۹۸/۰۲	-۲۴/۶
۱۲	D-1500-100%-2T2L	۱۰۰	میانه ستون	۲۰۰	۱۲۳/۴	-۶/۸	۱۲۰	-۷/۷
۱۳	D-1500-100%-2T2L	۱۰۰	میانه ستون	۴۰۰	-	-	۱۳۸/۹	+۶/۷
۱۴	D-2250-50%	۵۰	3L/4 طول ستون	-	-	-	۱۱۶/۸	-۱۰
۱۵	D-2250-100%	۱۰۰	3L/4 طول ستون	-	-	-	۹۲	-۲۹
۱۶	D-2250-100%-2T2L	۱۰۰	3L/4 طول ستون	۲۰۰	-	-	۱۲۲/۴	-۵/۸
۱۷	D-2910-50%	۵۰	نزدیک نقطه بارگذاری	-	-	-	۱۲۱	-۶/۹
۱۸	D-2910-100%	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	-	-	-	۱۰۳/۴	-۲۰
۱۹	D-2910-100%-2T2L	۱۰۰	نزدیک نقطه بارگذاری	۲۰۰	-	-	۱۲۶	-۳



شکل ۱۲. نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ستون‌های دارای خوردگی در میانه ستون

Fig. 12. Force to axial displacement for corroded columns at the middle of the column

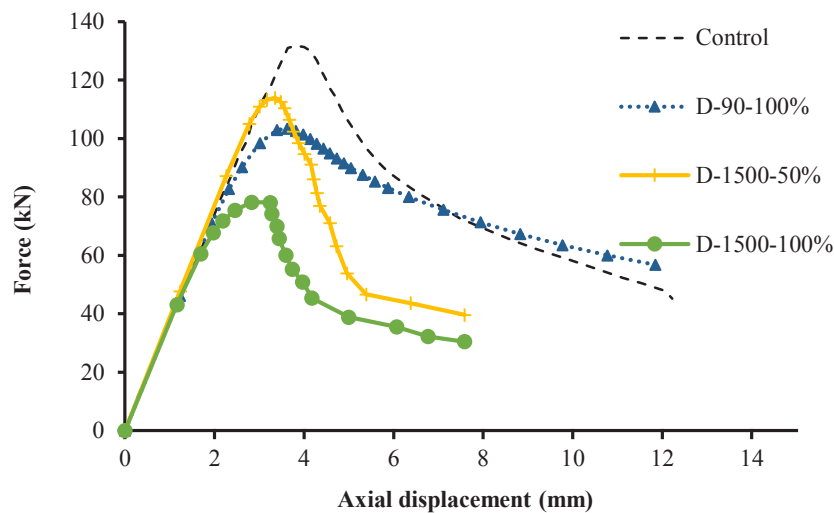


شکل ۱۳. نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ستون‌های دارای خوردگی در پایه ستون

Fig. 13. Force to axial displacement for corroded columns at the base of the column

۵-۱ بررسی ظرفیت باربری نمونه‌ها
نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ۶ نمونه ستون آزمایش شده در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است و جزئیات آن‌ها به همراه حداکثر ظرفیت تحمل بار آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. برای بررسی اثرات آسیب، خوردگی به صورت ۵۰٪ و ۱۰۰٪، در طول ارتفاع به ستون‌ها اعمال شد. در خوردگی ۵۰٪، از ضخامت ناحیه‌ی خورده شده حدود یک میلی‌متر کم شد و ظرفیت باربری برای ستون با آسیب میانه ۱۳/۷ درصد و در تکیه‌گاه ۶/۲۲ درصد کاهش یافت که نشان می‌دهد ظرفیت باربری هر چه آسیب به میانه ستون نزدیک‌تر باشد کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. برای آسیب ۱۰۰٪، سطح ناحیه آسیب دیده کاملاً تخریب شد به این جهت کاهش ظرفیت باربری برای آسیب در میانه ستون ۴۰٪ و برای آسیب نزدیک به تکیه‌گاه ۲۱٪ بود. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که

میلی‌متر کم شد و ظرفیت باربری برای ستون با آسیب میانه ۱۳/۷ درصد و در تکیه‌گاه ۶/۲۲ درصد کاهش یافت که نشان می‌دهد ظرفیت باربری هر چه آسیب به میانه ستون نزدیک‌تر باشد کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. برای آسیب ۱۰۰٪، سطح ناحیه آسیب دیده کاملاً تخریب شد به این جهت کاهش ظرفیت باربری برای آسیب در میانه ستون ۴۰٪ و برای آسیب نزدیک به تکیه‌گاه ۲۱٪ بود. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۱۴. مقایسه نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای ستون‌های دارای خوردگی در میانه نسبت به خوردگی در نزدیک تکیه‌گاه

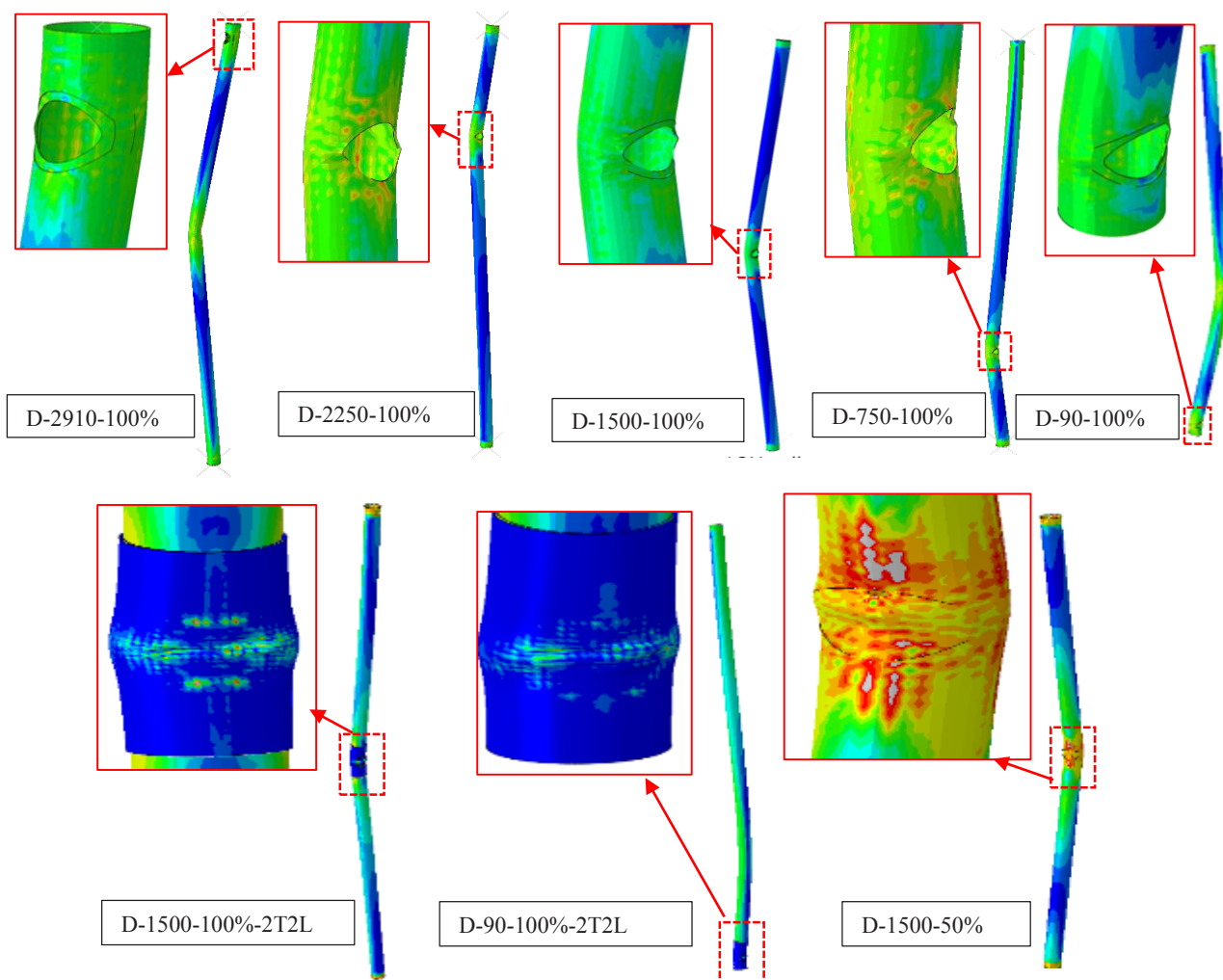
Fig. 14. Force to axial displacement for corroded columns in the middle compare to the corrosion near to the support

۵-۲- حالت‌های شکست نمونه‌ها

حالت‌های شکست ستون‌های انجام شده در این تحقیق در شکل‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. بررسی آزمایشگاهی و نرم‌افزاری ستون‌ها تحت بارگذاری فشاری تا رسیدن به کرنش پلاستیک و ظرفیت باربری نهایی انجام شد. نتایج نشان داد که شکست اولیه در ستون شاهد، کمانش کلی در میانه ستون بود. در ابتدای بارگذاری، ستون تمایل به کمانش کلی در طول ستون داشت و با ادامه بارگذاری و ورود به ناحیه پلاستیکی، ستون دچار خرابی ثانویه به شکل کمانش موضعی در میانه ستون شد (شکل ۱۰). در ستون D-۱۵۰۰-۵۰٪، پس از کمانش کلی، به دلیل کاهش ضخامت و سختی ستون در ناحیه آسیب دیده، کمانش موضعی در این ناحیه به شکل مجاله شدن مشاهده شد (شکل ۱۵ و ۱۶). برای ستون D-۱۵۰۰-۱۰۰٪، از آنجا که افزایش خوردگی باعث تخریب ناحیه آسیب دیده شد، خرابی سریع‌تر اتفاق افتد و ناحیه آسیب دیده تحت بار فشاری به شکل جمع شدگی لبه‌های آسیب مشاهده شد (شکل ۱۷-الف). قابل ذکر است که کمانش کلی برای همه ستون‌های آسیب دیده به جز آن‌هایی که آسیب نزدیک تکیه‌گاه دارند در جهت ناحیه آسیب دیده به وجود آمد در حالی که ستون‌ها با آسیب نزدیک تکیه‌گاه در جهت خلاف ناحیه آسیب دیده دچار کمانش شدند (شکل ۱۸).

خوردگی در میانه ستون مخرب‌تر است و تأثیر بیشتری در کاهش ظرفیت باربری نسبت به آسیب در تکیه‌گاه دارد. یکی از دلایل شدت کاهش در ستون‌های دارای آسیب دیدگی در میانه ستون، واقع شدن کمانش کلی و موضعی حاصل از خوردگی در یک ناحیه (میانه ستون) است. همچنین وجود خوردگی سختی ستون را کاهش می‌دهد و هر چه به میانه ستون نزدیک‌تر باشد ستون با کاهش ناگهانی در ظرفیت باربری روبرو است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشهود است نمودار نیرو به تغییر مکان محوری برای عضو دارای آسیب در میانه، دچار کاهش ناگهانی شده است.

استفاده از لایه‌های CFRP جهت تقویت ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری، کاهش کمانش موضعی و تأخیر در رخ دادن این کمانش شد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تأثیر الیاف بر عضو فشاری دارای خوردگی نشان داده شده است. استفاده از الیاف برای ستون D-901-100%-2T2L ظرفیت باربری را نسبت به نمونه بدون مقاوم‌سازی تا ۴۷٪ افزایش داد و این مقدار برای ستون با آسیب میانه و خوردگی ۱۰۰٪، برابر با ۲۳٪ بود. در نمودارهای نیرو به تغییر مکان می‌توان به خوبی تأثیر استفاده از الیاف CFRP جهت مقاوم‌سازی نمونه‌های دارای خوردگی را در افزایش ظرفیت باربری مشاهده نمود.



شکل ۱۵. کمانش کلی و موضعی برای ستون‌های مدل‌سازی شده

Fig. 15. Global and local buckling for modeled columns

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایشگاه و مدل‌سازی به تحلیل و بررسی اثر آسیب بر ظرفیت باربری و گسیختگی ستون خورده شده پرداخته شد و در ادامه برای مقاوم‌سازی ستون‌های دایروی شکل آسیب دیده از دو و چهار لایه الیاف کربنی استفاده شد. خوردگی به صورت ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به نمونه‌ها اعمال شد. در خوردگی ۱۰۰٪، کل ناحیه مورد نظر دچار تخریب شد و در درجه خوردگی ۵۰٪، ضخامت ناحیه آسیب به اندازه یک میلی‌متر کاهش یافت. در همه ستون‌ها پس از اعمال بارگذاری، کمانش کلی در طول ستون اتفاق افتاد در ستون با خوردگی ۵۰٪، کمانش موضعی به

برای ستون‌های مقاوم‌سازی شده با الیاف CFRP، بارگذاری فشاری منجر به تغییر شکل موضعی در ناحیه خوردگی شد که سبب افزایش تنش‌ها در الیاف CFRP گردید. در ستون‌های D-1500-100%-2T2L و D-90-100%-2T2L از طول ۲۰۰ میلی‌متر الیاف CFRP برای مقاوم‌سازی استفاده شد. استفاده از الیاف، میزان تنش‌ها در ناحیه آسیب دیده را کاهش داد و کمانش موضعی را در ناحیه خوردگی به تأخیر انداخت. حالت شکست برای ستون‌های مقاوم‌سازی شده به صورت کمانش کلی در طول ستون و پارگی الیاف بود. شکل‌های ۱۵، ۱۷-ب و ۱۸ حالت شکست لایه‌های CFRP در ناحیه آسیب‌دیده را نشان می‌دهند.



شکل ۱۶. حالت کمانش ستون با خوردگی ۵۰٪ در میانه انجام شده به صورت آزمایشگاهی

Fig. 16. Failure buckling for column with 50% corrosion at the middle



شکل ۱۷. حالت شکست ستون‌های انجام شده به صورت آزمایشگاهی و آسیب در میانه: الف) با آسیب ۱۰۰٪ و بدون مقاوم‌سازی، ب) با آسیب ۱۰۰٪ و مقاوم‌سازی شده با ۴ لایه الیاف کربنی

Fig. 17. Failure modes of the columns with corrosion at the middle: a) with 100% damage and unstrengthened, b) with 100% damage and strengthened with 4 layers of CFRP



شکل ۱۸. حالت شکست ستون‌های انجام شده در آزمایشگاه و دارای آسیب در پایه

Fig. 18. Failure modes of the columns with damage at the base

و موضعی در یک ناحیه توجیه نمود. همچنین باید توجه کرد که خوردگی و ضریب ارتجاعی و سطح مقطع ستون را تحت تأثیر قرار می‌دهد که باعث جابجایی مرکزیت گرانش شده و باعث مقدار لنگر بیشتر برای میانه ستون می‌شود. خوردگی نه تنها باعث کاهش ظرفیت بار نهایی می‌شود بلکه بر عملکرد سازه‌ای ستون نیز تأثیرگذار است. استفاده از الیاف CFRP باعث تأخیر در وقوع کماتش موضعی ستون می‌شود و با ضریب ارتجاعی بالایی که دارند سطح مقطع تخریب شده را پوشش می‌دهند که در نهایت عملکرد ستون به طور قابل ملاحظه بهبود می‌یابد.

صورت مجاله شدن ناحیه آسیب مشاهده شد در حالی که برای درجات بالاتر خوردگی که ضخامت ناحیه آسیب دچار تخریب شده است، ناحیه آسیب دیده دچار جمع شدگی گردید و در دو لبه‌ی کناری ناحیه مورد نظر کماتش به صورت بیرون آمدگی اتفاق افتاد. نتایج همچنین نشان داد که در درجات بالای خوردگی، زمانی که کل ناحیه آسیب دیده تخریب می‌شود کاهش بار نهایی به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد و موقعیت و مکان آسیب به خصوص اگر میانه ستون باشد بر مقدار کاهش ظرفیت باربری بسیار تأثیرگذار است. شاید بتوان یکی از دلایل مقدار کاهش بیشتر در میانه را با واقع شدن کماتش کلی

- [11] D. He, J. Dong, Q. Wang, X. Chen, Mechanical behaviour of recycled concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP, in: 2011 International Conference on Multimedia Technology, IEEE, 2011, pp. 1110-1113.
- [12] S. Kalavagunta, S. Naganathan, K.N.B. Mustapha, Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections, *Thin-Walled Structures*, 72 (2013) 14-19.
- [13] M. Shahraki, M.R. sohrabi, G. Azizian, K. Narmashiri, Reliability Assessment of CFRP-Strengthened Deficient Steel SHS Columns %J A U T Journal of Civil Engineering, 3(1) (2019) 23-36.
- [14] A.H. Keykha, Structural performance evaluation of deficient steel members strengthened using CFRP under combined tensile, torsional and lateral loading, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100746.
- [15] Y.-H. Wang, Y.-Y. Wang, X.-H. Zhou, R. Deng, Y.-S. Lan, W. Luo, P. Li, Q.-S. Yang, K. Ke, Coupled ultimate capacity of CFRP confined concrete-filled steel tube columns under compression-bending-torsion load, *Structures*, 31 (2021) 558-575.
- [16] O. Yousefi, K. Narmashiri, M.R. Ghaemdoost, Structural behaviors of notched steel beams strengthened using CFRP strips, *Steel and Composite Structures*, 25(1) (2017) 35-43.
- [17] M.R. Ghaemdoost, K. Narmashiri, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP, *Construction and Building Materials*, 126 (2016) 1002-1011.
- [18] M. Karimian, K. Narmashiri, M. Shahraki, O. Yousefi, Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 138 (2017) 555-564.
- [19] O. Yousefi, K. Narmashiri, A.A. Hedayat, A. Karbakhsh, Strengthening of corroded steel CHS columns under axial compressive loads using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 178 (2021) 106496.
- [20] F. Schué, FRP: strengthened RC structures. JG Teng,
- [1] G. Malumbela, M. Alexander, P. Moyo, Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load, *Construction and Building Materials*, 24(6) (2010) 1051-1059.
- [2] Y. Ballim, J.C. Reid, Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams—an experimental critique of current test methods, *Cement and Concrete Composites*, 25(6) (2003) 625-632.
- [3] Y. Xu, H. Tang, J. Chen, Y. Jia, R. Liu, Numerical analysis of CFRP-confined concrete-filled stainless steel tubular stub columns under axial compression, *Journal of Building Engineering*, 37 (2021) 102130.
- [4] M. Sundarraja, S. Sivasankar, Behaviour of CFRP jacketed HSS tubular columns under compression an experimental investigation, *Journal of Structural Engineering*, 39(5) (2013) 574-582.
- [5] K.A. Harries, A.J. Peck, E.J. Abraham, Enhancing stability of structural steel sections using FRP, *Thin-walled structures*, 47(10) (2009) 1092-1101.
- [6] G.G. Prabhu, M. Sundarraja, Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) short columns externally reinforced using CFRP strips composite, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1362-1371.
- [7] H. Jiao, X.-L. Zhao, CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes, *Thin-walled structures*, 42(7) (2004) 963-978.
- [8] Z. Tao, L.-H. Han, J.-P. Zhuang, Using CFRP to strengthen concrete-filled steel tubular columns: stub column tests, in: *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, Elsevier, 2005, pp. 701-706.
- [9] J. Haedir, X.-L. Zhao, Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3) (2011) 497-509.
- [10] S. Sivasankar, T. Thilakranjith, M. Sundarraja, Axial Behavior of CFRP Jacketed HSS Tubular Members- An Experimental Investigation, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 61(413) (2012) 1729-1737.

- [23] M. Secer, E.T. Uzun, Corrosion Damage Analysis of Steel Frames Considering Lateral Torsional Buckling, *Procedia Engineering*, 171 (2017) 1234-1241.
- [24] A.A. Hedayat, Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 30-50.
- JF Chen, ST Smith and L Lam. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2001. pp 245, ISBN 0-471-48706-6, 53(2) (2004) 232-233.
- [21] S.J.S.I. SikaWrap®-230 C, India, Product Data Sheet, (2019).
- [22] S.J.S.D. Sikadur, Ireland, 30 Product Data Sheet, (2017).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

O. Yousefi, A. A. Hedayat, K. Narmashiri, A. Karbakhsh, *Compressive strengthening of steel columns with local corrosion using CFRP*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(5) (2022) 1835-1856.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19919.7290

