



Effect of Carbon Nanotubes on the Critical Buckling Load of Composite Reinforced Aluminum Columns: an Experimental Approach

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Raeisi ¹ M. MSc,
Shaterzadeh ^{*1} A. PhD,
Hosseini Farrash ² S.M. PhD,

How to cite this article

Raeisi M., Shaterzadeh A., Hosseini Farrash S.M., Effect of Carbon Nanotubes on the Critical Buckling Load of Composite Reinforced Aluminum Columns: An experimental Approach. Modares Mechanical Engineering. 2020, 20(12):2679-2688

¹Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran,

²Mechanics of Composite Materials Laboratory (MCM Lab.), Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Correspondence

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Postal Code: 3619995161.

Phone: +98 (23) 32392205

Fax: +98 (23) 32392209

a_shaterzadeh@shahroodut.ac.ir

Article History

Received: July 22, 2020

Accepted: October 19, 2020

ePublished: December 8, 2020

ABSTRACT

An experimental study is presented on the critical buckling load of aluminum columns reinforced with glass/epoxy composite belts containing carbon nanotubes (CNTs) in this paper. The columns with solid circular cross-section are subjected to axial pressure load. Aluminum column specimens are reinforced with glass/epoxy and CNT/glass/epoxy. CNTs with 0.25, 0.5, and 1 weight percent are dispersed into the epoxy resin. Three layers of composite belts are wrapped around the columns. Glass fibers are placed along the column axes in each layer. The columns are tested under fixed end boundary condition using Instron hydraulic universal testing machine. Pressure load with respect to the end shortening is plotted for each specimen. To achieve the average value of the critical buckling load, four specimens are examined for each composite belt material. Results show that when 0.5% CNT/glass/epoxy composite belt is used to reinforce the column, the critical buckling load of the column increases by 45% with respect to the column with glass/epoxy composite belt. The proper dispersion of CNTs into the matrix material along with appropriate adhesion between the nanocomposite belt and the aluminum column leads to the increase of buckling load. To validate the results, buckling analysis of aluminum column reinforced with glass/epoxy composite belt was done in Abaqus finite element software. Finite element simulation confirms the experimental results obtained.

Keywords Buckling; Aluminum Column; Composite Belt; Carbon Nanotube

CITATION LINKS

[1] Herakovitch CT. Mechanics of fibrous composites [2] Technology of the 1990s: advanced materials and predictive design [3] A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [4] A Versatile Fibre Metal Laminate (FML) Concept [5] a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites [6] Airframe Structural Design [7] Engineering mechanics of composite materials [8] Evaluation of the effect of adding carbon nanotubes on the effective mechanical properties... [9] Compressive behavior of CFRP-steel composite tubed steel-reinforced columns... [10] Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy... [11] Steel columns strengthened /reinforced by prestressed CFRP strips... [12] Mechanical, thermo-mechanical and thermal characteristics of multi-walled carbon nanotubes... [13] Three-phase carbon fiber amine functionalized carbon nanotubes epoxy composite... [14] Improving buckling resistance of hollow structural steel columns strengthened with polymer-mortar [15] Buckling and postbuckling of dielectric composite beam reinforced with Graphene Platelets [16] A new design model for adhesive joints used to bond FRP laminates to steel beams- Part A [17] A new design model for adhesive joints used to bond FRP laminates to steel beams: Part B [18] Effect of MoO₃/carbon nanotubes on friction and wear performance of glass fabric-reinforced epoxy composites... [19] The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics... [20] Experimental study on the effect of amine functionalized carbon nanotubes... [21] Dynamic Characteristics of Functionalized Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Composites... [22] Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior... [23] Temperature dependence of mechanical and thermal expansion properties of T300/5208 graphite/epoxy [24] ASTM Committee D-30 on Composite Materials...

بررسی تجربی اثر نانولوله‌های کربنی بر بار بحرانی کمانش ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمریند کامپوزیتی

محمد رئیسی BSc

دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

علیرضا شاطرزاده PhD

دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

سید مهدی حسینی فراش PhD

آزمایشگاه مکانیک مواد مرکب، دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در این پژوهش اثر افزودن درصد‌های مختلف نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی بر بار بحرانی کمانش ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. ستونها دارای مقطع دایره‌ای توپر بوده و بار فشاری به صورت محوری به نمونه‌ها اعمال شده است. به منظور دستیابی به مقدار بیشینه بار بحرانی، مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی همگن‌سازی شد. تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی به صورت سه لایه، و زاویه الیاف در تمامی لایه‌ها هم‌جهت با راستای محور ستون در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در شرایط دو سر گیردار به یک دستگاه یونیورسال هیدرولیک اینسترون بسته شد و نمودارهای نیروی فشاری بر حسب جابجایی در راستای محوری برای هر نمونه ترسیم گردید. از هرجنس کمریند کامپوزیتی تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین نتایج برای بار بحرانی کمانش تعیین گردید. نتایج حاکی از آن است که افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی در کمریند کامپوزیتی می‌تواند بار بحرانی کمانش ستون را در حدود ۴۵ درصد نسبت به نمونه دارای کمریند کامپوزیتی فاقد نانولوله کربنی افزایش دهد. این افزایش را می‌توان ناشی از پراکندگی مناسب نانولوله‌های کربنی درون ماده و زمینه و ایجاد چسبندگی مناسب بین کمریند نانوکامپوزیتی و ستون آلومینیومی دانست. همچنین به منظور راستی آزمایی نتایج آزمایش، نمونه ستون آلومینیومی با کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شد و کمانش استاتیکی آن شبیه‌سازی گردید. نتایج شبیه‌سازی، تطابق خوبی را در تخمین بار بحرانی کمانش با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: کمانش، ستون آلومینیومی، کمریند کامپوزیتی، نانولوله کربنی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸

*نویسنده مسئول: a_shaterzadeh@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

مواد کامپوزیت یا مواد مرکب همواره توسط بشر برای تولید محصولات با کارایی بهتر مورد استفاده قرار گرفته است و گستره کاربرد این مواد از تقویت سفال‌ها توسط موی حیوانات و یا الیاف طبیعی در قرون قبل از میلاد تا جایگزینی فلزات سنگین با

پلیمرهای تقویت شده با الیاف با کارایی بالا می‌باشد^[1]. یکی از رایج‌ترین و عمومی‌ترین نوع کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است. این کامپوزیت‌ها بیش از ۹۵ درصد مصرف جهانی را شامل می‌شوند. کامپوزیت‌های زمینه پلیمری شامل زمینه‌ای از جنس پلیمر (رزین) هستند که به فاز توزیع شده تقویت کننده متصل شده است^[2].

مواد ماتریس در کامپوزیت‌ها، الیاف تقویت کننده را احاطه کرده تا نیروها را به الیاف یا از الیاف به الیاف دیگر منتقل نمایند و همچنین الیاف را از صدمات مکانیکی و محیطی حفظ می‌کنند. خواص شیمیایی و خواص حرارتی ماده کامپوزیت بوسیله ماتریس کنترل می‌شود^[3]. یکی از بهترین روش‌های بهبود خواص مکانیکی انواع کامپوزیت‌ها استفاده از الیافهای متفاوت است. چینش الیافها را می‌توان به دو صورت تک جهته و چند جهته با قرار گیری در جهات مختلف انجام داد. استفاده از الیاف تک جهته در تقویت سازه‌های مختلف به دلیل مشکل بودن انجام لایه‌گذاری در زوایای متفاوت کاری دشوار است، لذا برای بهبود خواص از ترکیب چند الیاف استفاده می‌شود^[4].

نانو لوله‌ها یکی از مستحکمترین مواد به شمار می‌روند و از این نظر بهترین ذراتی هستند که از ساختار گرافیت ساخته شده‌اند. از مهمترین ویژگیهای شناخته شده گرافیت مدول لایه‌ای (در امتداد صفحه گرافیت) در حدود ۱/۰۶Tpa است^[5]. نانو لوله‌های کربنی به دو دسته نانو لوله‌های کربنی تک دیواره و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره تقسیم می‌شوند. در دسته اول، نانو لوله‌ها شامل فقط یک صفحه گرافن پیچیده شده هستند. به همین دلیل به این نانو لوله‌ها، نانو لوله‌های کربنی تک دیواره گفته می‌شود. نانو لوله‌های کربنی چند دیواره شامل بیش از یک صفحه گرافنی لوله شده هستند. فاصله بین لایه‌های گرافن در نانو لوله‌های کربنی چند دیواره، به علت نیروی دافعه اتمی نمی‌تواند کمتر از ۰/۳۴ نانومتر باشد^[6]. نانو لوله‌های کربن یکی از تقویت کننده‌های نانو مقیاس جدید است که در مقادیر کم می‌تواند خواص پلیمر را به طرز چشمگیری تغییر دهد^[7].

بسیاری از محققان اثر استفاده از کامپوزیت‌های مختلف را در تقویت بار قابل تحمل ستون‌ها بررسی کرده‌اند. نی و همکاران^[8] به مطالعه بر روی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیک و نانو لوله‌های کربنی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن ترکیبی نانو لوله کربنی و ذرات سرامیک به رزین کامپوزیت زمینه آلومینیومی خواص مکانیکی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به برتری استفاده از کامپوزیت‌های هیبریدی مبتنی بر فلز در کاربردهای مهندسی مختلف در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی مبتنی بر فلز اشاره کرد. وانگ و همکاران^[9] ۱۴ نمونه از ستون‌های فولادی تقویت شده با کامپوزیت شیشه و سطح مقطع مختلف را مورد بررسی قرار دادند. ایشان بیان کردند که در ستونها با مقطع دایره‌ای با تغییر

نتایج نشان داد که مقدار استفاده از نانوگرافن دارای حد بحرانی است و اثر قابل توجهی در بهبود کمناش دارد. در پژوهش انجام شده توسط هاقانی و همکاران^[16,17]، تمرکز پژوهش بر روی تقویت سازه‌های فولادی با پوشش کامپوزیتی و بازگرداندن ظرفیت‌های فولاد به ستون و بهبود عمر خستگی آن‌ها است. این تحقیق شامل دو بخش است که در بخش اول طرح‌های جدید برای اتصال چسب به سطح ستون فلزی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دوم با آزمون‌های شبه‌استاتیک بر روی ستون‌های پوشیده شده با کامپوزیت کربن/اپوکسی برخی از معیارهای شکست ارزیابی شد. از مهمترین نتایج به دست آمده می‌توان به اندازه‌گیری دقیق از میزان شکست در سازه اشاره کرد. همچنین مدل ارائه شده در مقاله اول مطابقت بسیار زیادی با نتایج آزمایش بخش دوم داشت که نشان‌دهنده دقت بالای مدل پیشنهادی بود. یوشین هی و همکاران^[18] تأثیر نانولوله‌های کربن بر اصطکاک و عملکرد سایش کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. از نتایج مهم این پژوهش بهبود مقاومت کامپوزیت‌های تقویت شده حاوی نانولوله‌های کربنی تا چهار برابر در مقایسه با نمونه‌های فاقد نانولوله‌های کربنی بود. حسینی فراش و همکاران^[19] در تحقیقی تأثیر استفاده از نانولوله‌های کربنی را بر فرکانسهای طبیعی و خواص میرایی تیرها و صفحات کامپوزیت هیبریدی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین مطالعه تجربی اثر نانو لوله‌های کربنی عامل دار آمین بر روی خواص ترمومکانیکی و ارتعاشی نانوکامپوزیت‌ها توسط ایشان انجام شد^[20,21] صابرمیش و همکاران^[22] به روش تجربی، اثر افزودن نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت کننده به ماده زمینه کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی را بر بار بحرانی کمناش ورقهای کامپوزیتی تحت بار گذاری فشاری بررسی کردند. مرور مقالات نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر استفاده از انواع تقویت‌کننده‌های نانوساختار به دلیل خواص و شکل ساختاری آنها بسیار قابل توجه محققین قرار گرفته است. همچنین تحقیقات اندکی به صورت تجربی در زمینه تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره در تقویت ستونهای فلزی با کمر بند کامپوزیتی انجام شده است. در مقاله حاضر چهار نمونه کمر بند کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/اپوکسی که حاوی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، درصد وزنی از نانولوله کربنی بودند جهت تقویت ستون آلومینیمی توپر با مقطع دایره‌ای مورد استفاده قرار گرفت. پس از همگن‌سازی نانولوله‌های کربنی درون رزین اپوکسی، الیاف شیشه به این مخلوط آغشته و به صورت یک کمر بند سه لایه به دور ستون‌ها پیچیده شد. ستون‌های تقویت شده تحت بار فشاری قرار گرفتند و تأثیر افزودن درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی درون رزین اپوکسی بر بار بحرانی کمناش این ستونها بررسی گردید.

زاویه بین لایه‌های الیاف کامپوزیتی، ظرفیت باربری نهایی در آنها افزایش می‌یابد در حالی که این بهینه سازی در ستونها با مقطع مربعی بل مشاهده نیست. عمر و همکاران^[10] اثر افزودن نانوذره رس در تقویت کامپوزیت‌های شیشه را بررسی کردند. در این تحقیق با تغییر زاویه الیاف شیشه و درصد نانوذره رس به این نتیجه رسیدند که بارهای محوری و کمناش جانبی در زاویه ۰ و ۹۰ و مقدار ۰/۱ درصد وزنی از نانوذره رس به بهبود ۸/۸٪ منجر می‌شود. همچنین از نتایج مهم این پژوهش افزایش بیشتر از مقدار ۰/۱ درصد نانو ذره رس بود که تأثیری بر روند بهبود نداشت و سبب ضعیف شدن تنش سطحی بین ذرات نانو و رزین میشد. فینگ و همکاران^[11] برای تقویت ستونهای فولادی یک روش جدید با استفاده از نوارهای پلیمر تقویت شده فیبر کربنی پیش ساخته شده پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری نمونه تقویت شده دو برابر بیشتر از نمونه بدون تقویت آن است و رشد ترک در نمونه‌های تقویت شده بسیار کاهش پیدا می‌کند. سزگین و همکاران^[12] تأثیر افزودن انواع مختلف نانو لوله‌های کربنی چند دیواره بر خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های پلی استر تقویت شده را مورد مطالعه قرار دادند. کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه چهار لایه و با روش قالبگیری انتقال رزین به کمک شرایط خلاء ساخته شدند. نتایج نشان داد که افزودن انواع مختلف نانولوله‌های کربنی چند دیواره تأثیر فزاینده‌ای بر خواص مکانیکی و حرارتی سازه‌های کامپوزیتی دارد. شارما و همکاران^[13] به بحث در مورد پراکندگی نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف کربن و اثر عملکرد در خواص مکانیکی پرداختند. اثر حضور ۱ درصد وزنی نانو لوله کربنی چند دیواره در رزین اپوکسی منجر به افزایش قابل توجه مدول یانگ، مقاومت برشی بین لایه‌های و مدول خمشی کامپوزیت کربن شد. همچنین با افزودن ۱/۵ درصد نانو لوله کربن روند کلی بهبود خواص مکانیکی، کاهش یافت. السید و همکاران^[14]، ۱۳ نمونه از ستون‌های فولادی توخالی با مقطع مربعی که سه ستون با طول کوتاه و ده ستون با طول بلند بود را مورد آزمایش قرار دادند. در این پژوهش ستونها با ماده پلیمری تقویت شدند و مقاومت و کمناش آنها تحت فشار محوری بررسی شد. از نتایج این پژوهش تجربی کاهش انحراف محوری و جانبی ستونها و افزایش ظرفیت باربری نهایی آنها بود. از دیگر نتایج میتوان به افزایش مقاومت محوری ستونهای تقویت شده کوتاه تا ۶ درصد و ستونهای تقویت شده بلند تا ۷۶ درصد اشاره کرد. همچنین استحکام ستونها در برابر جابجایی جانبی بهبود یافته و اثرات ماده تقویتی در ستونهای با طول بلند بهتر از ستونهای کوتاهتر دیده شد. وانگ و همکاران^[15] کمناش و پس‌کمناش تیرهای کامپوزیتی تقویت شده با نانوگرافن را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آنها معادلات دیفرانسیل حاکم بر تیر کامپوزیتی را از طریق تئوری تیر تیموشنکو، رابطه کرنش جابجایی غیر خطی و اصل کار مجازی به دست آوردند.

۲- مواد و روش تحقیق

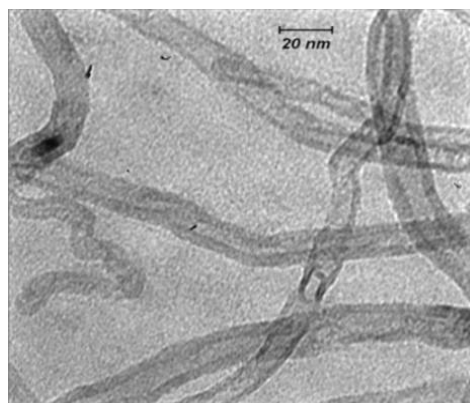
۱-۲- مواد اولیه

رزین اپوکسی آر-ال-۶۲۰ به همراه سخت کننده ۵۲۰ به عنوان ماده زمینه برای ساخت کمر بند کامپوزیتی و الیاف شیشه تک جهت ۴۰۰ گرمی به عنوان الیاف تقویت کننده تهیه گردید. همچنین جهت بررسی تغییرات تقویت ستون، از نانولوله کربنی چند دیواره با قطر بین ۱۰ تا ۲۰ نانومتر و درصد خلوص ۹۸٪ استفاده شد. جهت اطمینان از صحت ساختار نانولوله‌های کربنی خریداری شده، عکسهایی توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از آنها تهیه شد که در شکل ۱ آورده شده است. ستون‌های آلومینیومی از آلیاژ ۷۰۷۵ با طول ۴۰ سانتیمتر و قطر ۱۰ میلی‌متر نیز تهیه شد.

۲-۲- آماده سازی ماده زمینه جهت ساخت کمر بند کامپوزیتی

جهت ساخت کمر بندهای کامپوزیتی از ماده زمینه اپوکسی و اپوکسی/ نانولوله کربنی استفاده شد. در صورت استفاده از ماده زمینه اپوکسی، کافیت رزین اپوکسی و ماده سخت کننده به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۲۰ با یکدیگر کاملاً مخلوط شوند. در فرآیند ساخت هر کمر بند کامپوزیتی مقدار ۳۳/۴ گرم رزین اپوکسی مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت ماده زمینه اپوکسی/ نانولوله کربنی، ابتدا مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم توزین شده و درون رزین اپوکسی اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۲۰ دقیقه درون حمام آلتراسونیک قرار گرفت تا توزیع نانولوله‌های کربنی درون رزین به کیفیت و پراکندگی مطلوب برسد. حمام آلتراسونیک مدل پارسونیک ساخت ایران با توان ۷۰ وات و فرکانس ۳۰ هرتز جهت همگن سازی مورد استفاده قرار گرفت.

سپس ماده سخت کننده به نسبت وزنی ذکر شده به مخلوط اضافه شده و به مدت ۸ دقیقه توسط همزن مکانیکی به صورت پیوسته هم زده شد. با توجه به اینکه پس از افزودن نانولوله‌های کربنی به رزین اپوکسی، غلظت رزین بالا می‌رود باید همزنی به‌طور کامل انجام شده تا از رسیدن ماده سخت کننده به تمام قسمت‌های رزین اطمینان حاصل شود.



شکل ۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانولوله‌های کربنی [19]

۲-۳- ساخت ستونهای آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی

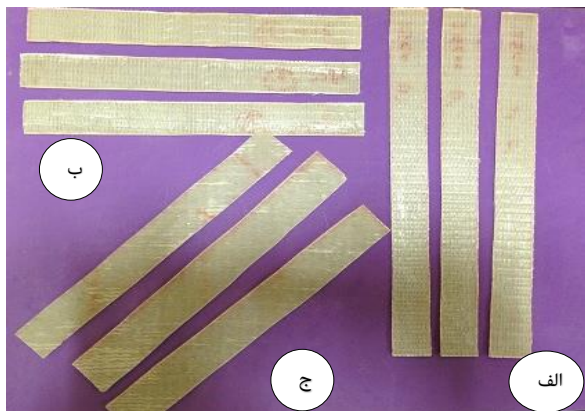
در این بخش از کار تعداد ۱۲ نمونه ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی ساخته شد. نمونه‌ها شامل چهار جنس کمر بند کامپوزیتی هستند که از هر جنس تعداد سه نمونه ساخته شد. کمر بندهای کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/ اپوکسی، الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۰/۲۵ درصد نانولوله کربنی، الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۰/۵ درصد نانولوله کربنی و الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی، ساخته شدند. برای ساخت کمر بند کامپوزیتی در ابتدا با محاسبه محیط ستون با مقطع دایره، الیاف با ابعاد ۹/۴۲×۳۰ سانتیمتر برش زده شد. همچنین سطح ستون‌های آلومینیومی جهت چسبندگی به کمر بند کامپوزیتی سمباده کاری گردید. پس از آماده سازی ماده زمینه به روشی که در قسمت قبل گفته شد، الیاف شیشه به ماده زمینه آغشته شده و به کمک دستگاه لایه‌پیچی دستی به دور ستون‌های آلومینیومی پیچانده شد. تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی به صورت سه لایه و زاویه الیاف در تمامی لایه‌ها هم‌جهت با راستای محور ستون (صفر درجه) در نظر گرفته شد. ستونهای تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی به مدت ۱۲ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا فرآیند پخت آنها تکمیل شود. در نهایت جهت صاف و یک‌دست شدن سطح کامپوزیت از سنباده استفاده شد. با توجه به مشخصات دستگاه آزمون فشار و اخذ نتایج بهتر، ۳۰ سانتیمتر از طول ستون با کمر بند کامپوزیتی پیچانده و ۵ سانتیمتر از دو طرف ستون جهت قرارگیری بهتر در فکها بدون تقویت کننده در نظر گرفته شد. به طور کلی ۱۲ نمونه و از هر درصد نانو ذره به تعداد ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۲ به عنوان نمونه، نمایی از ستونهای تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی آورده شده است.

۲-۴- آزمون کماتش تحت اثر بار محوری

به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بر رفتار فشاری ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی،



شکل ۲) ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی



شکل ۵) نمونه های تهیه شده جهت انجام آزمون کشش ساده، الف: زاویه الیاف صفر درجه (در راستای طول نمونه) ب: زاویه الیاف نود درجه (در راستای عرض نمونه) ج: زاویه الیاف ۴۵ درجه



شکل ۶) نمونه آزمون کشش کامپوزیتی اپوکسی/ الیاف شیشه تحت بارگذاری

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی نتایج آزمون کشش ساده

در شکل ۷ نمونه‌های آزمون کشش ساده کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی پس از آزمون نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌های آزمون در طول سنج مشخس شده دچار شکست شده‌اند که این امر نشان‌دهنده صحت نتایج و نمودارهای اخذ شده است. نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمون کشش که در فاصله کمتر از ۱۰ میلیمتر انتهای نمونه شکسته می‌شوند، به دلیل ایجاد تمرکز تنش در نواحی نزدیک به فکها پذیرفتنی نیستند. نمودارهای تنش برحسب کرنش برای تمامی نمونه‌های آزمون شده در شکل ۸ آورده شده است.

شکل‌های ۸-الف، ۸-ب و ۸-ج نمودارهای تنش-کرنش را به ترتیب برای نمونه‌های کامپوزیتی با چیدمان‌های [۰/۳]، [۰/۳] و [۴۵/۳] نشان می‌دهند. از هر چیدمان، تعداد سه نمونه مورد آزمون قرار گرفته و میانگین نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای تنش-کرنش مقادیر E_1 ، E_2 و E_x محاسبه شدند. E_1

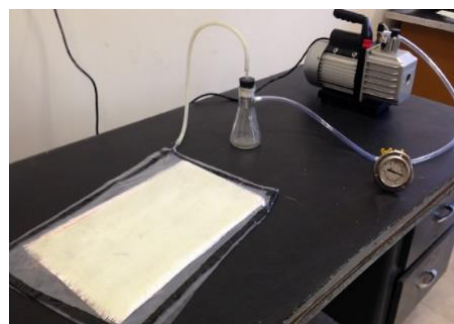
این ستون‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری قرار گرفتند. از دستگاه هیدرولیک اینسترون با قابلیت اعمال نیرو تا ۱۵۰ کیلو نیوتن جهت آزمون کماتش نمونه‌های ستون تقویت شده آلومینیومی استفاده شد. نمونه‌ها در شرایط دوسر گیردار به دستگاه بسته شد. نمودارهای نیروی فشاری بر حسب جابجایی در راستای محوری برای هر نمونه ترسیم گردید. از هر جنس کمر بند کامپوزیتی تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین نتایج برای بار بحرانی کماتش تعیین گردید. نمایی از نمونه ستون آلومینیومی با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی پس از کماتش در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳) ستون تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی پس از کماتش

۲-۵- تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی

در ابتدا به روش لایه‌گذاری دستی یک ورق کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی با ابعاد ۲۵ × ۴۰ سانتی‌متر مطابق شکل ۴ به صورت سه‌لایه و با چیدمان [۰/۳] ساخته شد. سپس جهت آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز آزمون کشش، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه فرز از درون صفحه برش داده شدند (شکل ۵). نمونه‌های کامپوزیتی شامل سه چیدمان [۰/۳]، [۹۰/۳] و [۴۵/۳] هستند و از هر چیدمان تعداد ۳ نمونه ساخته و مورد آزمون کشش ساده قرار گرفتند [23]. سرعت بارگذاری و حرکت عمودی فکها مطابق با استاندارد ASTM D3039، 2 mm/min تنظیم شد [10,24]. شکل ۶ یک نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی را تحت بارگذاری در دستگاه آزمون کشش هیدرولیک اینسترون نشان می‌دهد.



شکل ۴) صفحه کامپوزیتی اپوکسی/ الیاف شیشه با چیدمان [۰/۳] تحت شرایط خلاء

برای محاسبه G_{12} از رابطه (۱) استفاده می‌شود^[۱]:

$$E_x = \frac{E_1}{m^4 + m^2 n^2 \left(-2\nu_{12} + \frac{E_1}{G_{12}} \right) + n^4 \frac{E_1}{E_2}} \quad (۱)$$

که در این رابطه $m = \cos \theta$ و $n = \sin \theta$ که در اینجا θ برابر با ۴۵ درجه است. ضریب پواسون (ν_{12}) برای کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه ۰/۲۷ در نظر گرفته شد^[۱] و مقدار G_{12} برابر ۲/۹۴ گیگاپاسکال تعیین شد.

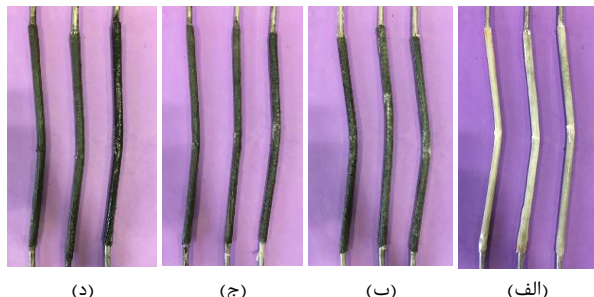
۲-۳- بررسی نتایج آزمون بارگذاری فشاری

آزمایش بارگذاری فشاری محوری برای ستون‌های تقویت شده با کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی و نانولوله کربنی/الیاف شیشه/اپوکسی با درصدهای وزنی مختلف نانولوله کربنی انجام شده است. شکل ۹ تصاویر ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمریندهای کامپوزیتی مختلف را پس از وقوع کمناش نشان می‌دهد.

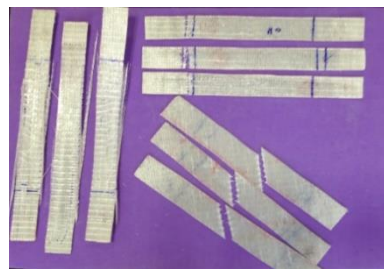
نتایج آزمون کمناش به صورت نمودارهای نیرو-جابجایی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانگونه که در تمامی این نمودارها مشاهده می‌شود، بار محوری که توسط ستون تحمل می‌شود شروع به افزایش کرده و این صعود تا رسیدن به مقدار بیشینه بار که همان بار بحرانی کمناش است ادامه دارد. در این مرحله از صعود مشاهده می‌شود که مقدار جابجایی دوسر ستون نسبت به هم (کوتاه‌شدگی) ستون نسبتاً اندک است.

با ادامه بارگذاری، رفتار پس از کمناش ستون ملاحظه می‌شود. در این مرحله، ستون ناپایدار شده و بدون اینکه قابلیت تحمل بار ستون افزایش یابد، ازدیاد شدید مقدار کوتاه‌شدگی تا رسیدن به نقطه شکست مشاهده می‌شود.

به کمک تحلیل نمودارهای بار-جابجایی حاصل از آزمایش، مقادیر بار بحرانی کمناش برای تمامی نمونه‌ها به همراه مقدار میانگین آنها و مقدار انحراف از استاندارد، که بیانگر پراکندگی اطلاعات استخراج شده از سه نمونه با جنس مشابه نسبت به مقدار میانگین است در جدول ۲ آورده شده است.

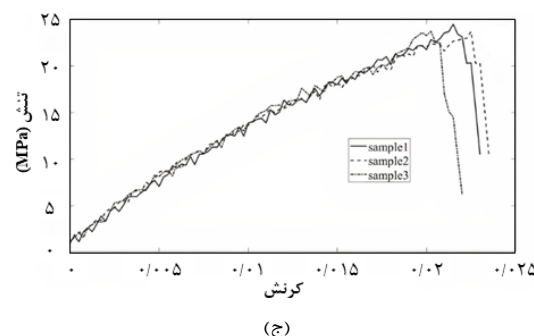
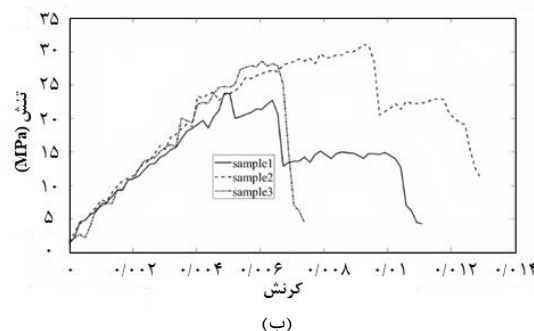
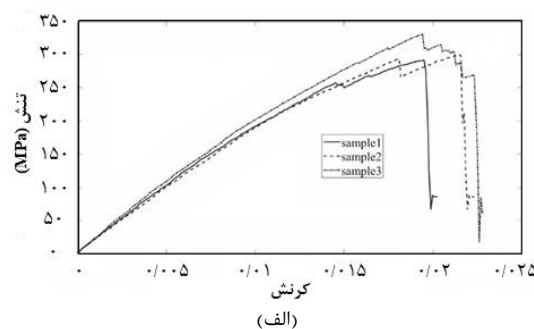


شکل ۹ تصویر ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمریند کامپوزیتی پس از کمناش، الف: کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی، ب: کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی حاوی ۰/۲۵ درصد نانولوله کربنی، ج: کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی حاوی ۰/۵ درصد نانولوله کربنی، د: کمریند کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی



شکل ۷ نمونه‌های آزمون شده کشش ساده کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه

و E_2 به ترتیب مدول یانگ نمونه‌های کامپوزیتی در راستای الیاف و در راستای عمود بر الیاف است. همچنین E_x مدول یانگ استخراج شده از نمودارهای مربوط به نمونه‌های [۴۵۳] است. میانگین نتایج در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۸ نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، الف: سه نمونه با چیدمان [۰۳]، ب: سه نمونه با چیدمان [۴۵۳]، ج: سه نمونه با چیدمان [۹۰۳]

جدول ۱ میانگین مدول یانگهای حاصل از آزمون کشش برای کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی

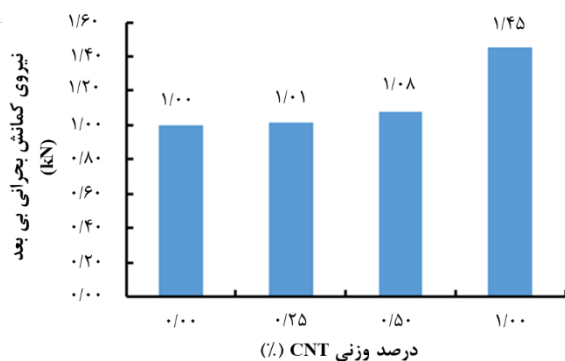
E_x (GPa)	E_2 (GPa)	E_1 (GPa)
۵/۹۳	۳/۱۸	۲۲/۰۳

جدول ۲) مقادیر بار بحرانی کمناش ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی درصد مختلف از نانو ذره کربن

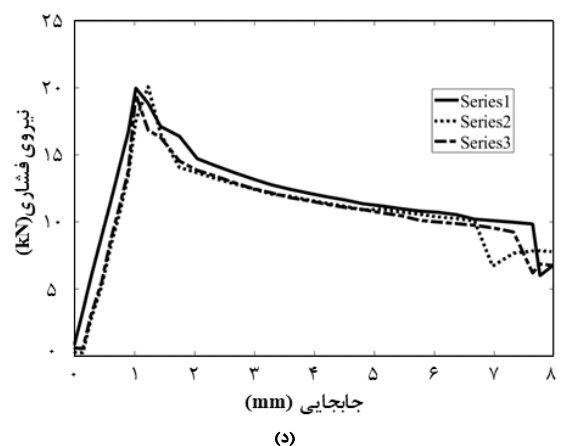
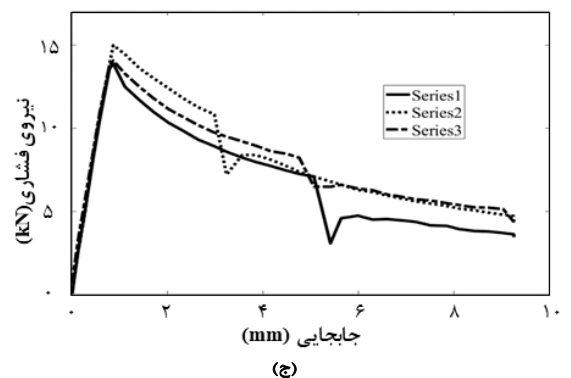
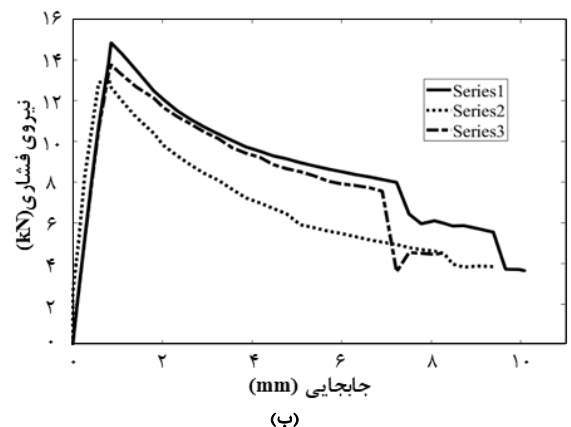
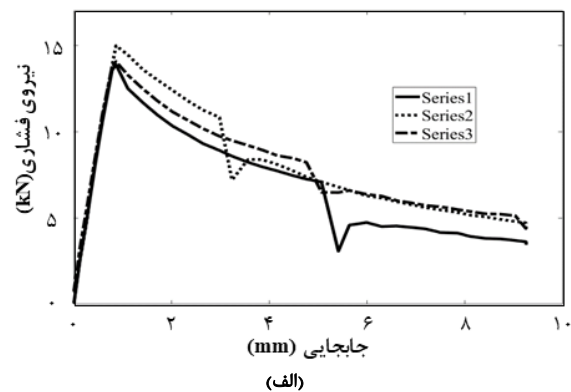
درصد نانولوله کربنی	$P_{cr}(KN)$ نمونه اول	$P_{cr}(KN)$ نمونه دوم	$P_{cr}(KN)$ نمونه سوم	$P_{cr}(KN)$ میانگین
۰	۱۴/۰۶	۱۲/۴۹	۱۴/۴۴	۱۳/۶۶±۱
۰/۲۵	۱۳/۰۵	۱۴/۸۲	۱۳/۷۳	۱۳/۸۶±۰/۹
۰/۵	۱۴/۶۷	۱۶/۰۲	۱۳/۴۹	۱۴/۷۶±۱/۳
۱	۱۹/۹۸	۲۰/۰۹	۱۹/۴۹	۱۹/۸۵±۰/۳

همچنین، برای بررسی بهتر درصد تغییرات بار بحرانی کمناش در اثر افزودن نانولوله کربنی با درصدهای وزنی مختلف درون رزین اپوکسی، بار بحرانی هر نمونه بدون بعد شد. برای بدون بعد کردن بار بحرانی هر نمونه، مقدار آن بر مقدار بار بحرانی ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی تقسیم شد. نمودار میله‌ای حاصل در شکل ۱۱ آورده شده است.

با توجه به شکل ۱۱، افزودن مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی کمر بند کامپوزیتی، بار بحرانی کمناش را به ترتیب به مقدار ۱ و ۸ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، بیشترین مقدار بار بحرانی کمناش مربوط به ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی مقدار یک درصد وزنی نانولوله کربنی می‌باشد. این نمونه حداکثر بار فشاری ۱۹/۸۵ کیلونیوتن را قبل از ناپایدار شدن تحمل می‌کند که این عدد افزایش ۴۵ درصدی را نسبت به بار بحرانی کمناش ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج می‌توان گفت که وجود نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی کمر بند کامپوزیتی، باعث افزایش بار بحرانی کمناش ستون می‌شود و مقدار این افزایش وابستگی زیادی به درصد نانولوله کربنی موجود درون رزین دارد. افزایش قابل توجه بار بحرانی کمناش در صورت استفاده از مقدار مناسبی نانولوله کربنی را می‌توان ناشی از سه عامل اصلی دانست:



شکل ۱۱) بار بحرانی بدون بعد برای ستون‌های آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی مقادیر مختلف نانولوله کربنی



شکل ۱۰) نمودارهای نیروی فشاری بر حسب جابجایی برای ستون‌های تقویت شده با کمر بندهای کامپوزیتی مختلف، الف: کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی، ب: کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۰/۲۵ درصد نانولوله کربنی، ج: کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۰/۵ درصد نانولوله کربنی، د: کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی

مطابق این نمودار، مقدار بار بحرانی برای تعداد المان‌های ۲۷۱۴۴ و بیشتر، عددی تقریباً ثابت است بنابراین تعداد المان‌ها در مدل همین عدد در نظر گرفته شد. در شکل ۱۳، نتایج حاصل از تحلیل المان محدود مشاهده می‌شود. جدول ۳ که نیروی بحرانی کمناش (P_{cr}) به دست آمده از مدل اجزای محدود و روش تجربی در آن آورده شده است انطباق بسیار خوب روش عددی و تجربی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

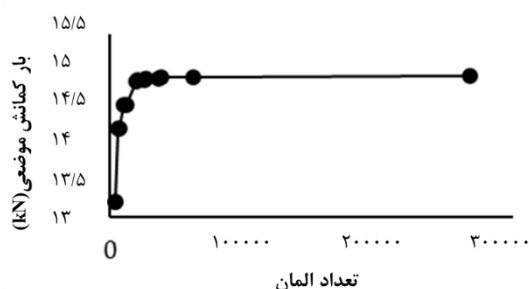
در این پژوهش اثر افزودن درصد‌های مختلف نانولوله کربنی درون رزین اپوکسی بر افزایش بار بحرانی کمناش ستونهای آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی به کمک انجام آزمون کمناش تحت بار فشاری محوری به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در صورت افزودن یک درصد وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی، مقدار بار بحرانی کمناش مربوط به ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی ۴۵ درصد افزایش را نسبت به بار بحرانی کمناش ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی فاقد نانولوله کربنی نشان می‌دهد. افزایش مدول الاستیک ماده زمینه به همراه ازدیاد

عامل اول تقویت ماده زمینه در اثر وجود نانولوله کربنی است. توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی درون ماده زمینه باعث افزایش مدول الاستیک ماده زمینه می‌شود. همچنین نانولوله‌های کربنی به صورت رشته‌های مقاومی درون رزین قرار گرفته و می‌توانند مانع از حرکت لایه‌های رزین بر روی یکدیگر در لحظه کمناش شوند. عامل دوم می‌تواند چسبندگی بهتر رزین حاوی نانولوله کربنی به الیاف شیشه باشد. سطح مؤثر بالای نانولوله‌های کربنی باعث ایجاد پیوندهای قوی بین نانولوله‌های کربنی با رزین و الیاف شده و به نظر می‌رسد این عامل تحمل الیاف شیشه موجود در رزین را در برابر بارهای فشاری افزایش می‌دهد. عامل سوم افزایش چسبندگی بین کمر بند کامپوزیتی و ستون آلومینیومی در حضور نانولوله کربنی است. در واقع می‌توان گفت وجود مقدار مؤثری از نانولوله کربنی درون ماده زمینه، باعث تحمل بهتر بار توسط کمر بند کامپوزیتی شده و بار بحرانی کمناش را افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به شکل ۱۰-د مشاهده می‌شود برای نمونه ستون آلومینیومی تقویت شده با کمر بند کامپوزیتی الیاف شیشه/ اپوکسی حاوی مقدار یک درصد وزنی نانولوله کربنی، نیروی فشاری پس از عبور نقطه بحرانی، با شیبی ملایم‌تر افت پیدا می‌کند که تأثیر وجود نانولوله‌های کربنی در کمر بند کامپوزیتی را در رفتار پس از کمناش به خوبی نشان می‌دهد.

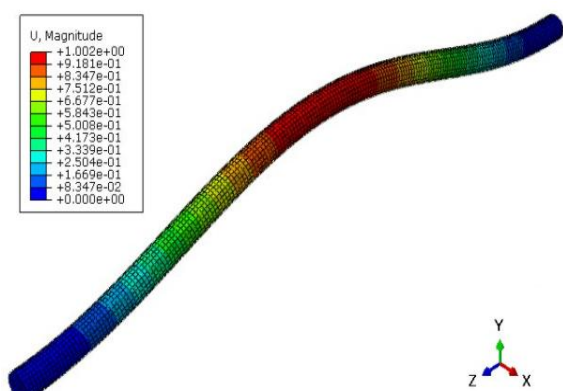
۳-۳- اعتبارسنجی نتایج

در این بخش جهت اعتبار سنجی نتایج حاصل از آزمون تجربی، بار بحرانی کمناش نمونه ستون آلومینیومی فاقد کمر بند کامپوزیتی و نمونه ستون آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت الیاف شیشه/ اپوکسی به روش المان محدود تعیین شده است.

خواص مکانیکی تعیین شده در قسمت ۳-۱ به عنوان پارامترهای ورودی نرم‌افزار آباکوس در نظر گرفته شد. در فرآیند مدلسازی کمر بند کامپوزیتی به صورت یک استوانه توخالی طراحی شد و در بخش تعامل سطوح پس از سوار کردن روی ستون آلومینیومی، به آن چسب زده شدند. همچنین شرایط مرزی به صورت دو سر گیردار و مشابه شرایط آزمایشگاهی اعمال شد. برای شبکه‌بندی ستون آلومینیومی از المان C3D8R با هشت گره و سه درجه آزادی در هر گره استفاده شد. همچنین، شبکه‌بندی کمر بند کامپوزیتی، با المان پوسته‌ای S4R با چهار گره و شش درجه آزادی در هر گره انجام شد. در تعیین گام‌های محاسباتی پس از مشخص کردن تعداد مودها و دستور بررسی کمناش به نرم افزار، دو روش مش‌بندی به ترتیب با نام‌های مش‌بندی خودکار و مش‌بندی دستی اعمال شد. برای اعمال مش‌بندی منظم روی مدل‌ها، در دو قسمت انتهایی ستون از عملیات قسمت‌بندی استفاده شد. به منظور دستیابی به مناسبترین شبکه‌بندی، مدل ساخته شده در نرم‌افزار با تعداد المانهای مختلفی اجرا شد و مطابق شکل ۱۲ نمودار بار بحرانی کمناش بر حسب تعداد المان‌ها رسم گردید.



شکل ۱۲) نمودار همگرایی نتایج بر حسب تعداد المانهای مدل



شکل ۱۳) مدلسازی آباکوس کمناش ستون آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت شیشه/ اپوکسی

- [7] Daniel IM, Ishai O, Daniel IM, Daniel I. Engineering mechanics of composite materials. New York: Oxford university press; 1994.
- [8] Nie C, Wang H, He J. Evaluation of the effect of adding carbon nanotubes on the effective mechanical properties of ceramic particulate aluminum matrix composites. *Mechanics of Materials*. 2020;142:103276.
- [9] Wang J, Cheng L, Yang J. Compressive behavior of CFRP-steel composite tubed steel-reinforced columns with high-strength concrete. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018;150:354-370.
- [10] Bozkurt ÖY, Bulut M, Erklığ A, Faydh WA. Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nano-clayparticles. *Composites Part B: Engineering*. 2019;158:82-91.
- [11] Feng P, Hu L. Steel columns strengthened/reinforced by prestressed CFRP strips: concepts and behaviors under axial compressive loads. *Composite Structures*. 2019; 217:150-164.
- [12] Sezgin H, Mishra R, Militky J, Berk Berkalp O. Mechanical, thermo-mechanical and thermal characteristics of multi-walled carbon nanotubes-added textile-reinforced composites. *Journal of Industrial Textiles*. 2020; 50(5):692-715.
- [13] Sharma K, Shukla M. Three-phase carbon fiber amine functionalized carbon nanotubes epoxy composite: processing, characterisation, and multiscale modeling. *Journal of Nanomaterials*. 2014; 2014.
- [14] El-Sayed KM, Debaiky AS, Khalil NN, El-Shenawy IM. Improving buckling resistance of hollow structural steel columns strengthened with polymer-mortar. *Thin-Walled Structures*. 2019; 137:515-526.
- [15] Wang Y, Feng C, Santiuste C, Zhao Z, Yang J. Buckling and postbuckling of dielectric composite beam reinforced with Graphene Platelets (GPLs). *Aerospace Science and Technology*. 2019; 91:208-218.
- [16] Haghani R, Al-Emrani M. A new design model for adhesive joints used to bond FRP laminates to steel beams-Part A: Background and theory. *Construction and Building Materials*. 2012; 34:486-493.
- [17] Haghani R, Al-Emrani M. A new design model for adhesive joints used to bond FRP laminates to steel beams: Part B: Experimental verification. *Construction and Building Materials*. 2012; 30:686-694.
- [18] He Y, Wu D, Zhou M, Liu H, Zhang L, Chen Q, Yao B, Yao D, Jiang D, Liu C, Guo Z. Effect of MoO₃/carbon nanotubes on friction and wear performance of glass fabric-reinforced epoxy composites under dry sliding. *Applied Surface Science*. 2020; 506:144946.
- [19] Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J. The effect of carbon nanotube dispersion on the dynamic characteristics of unidirectional hybrid composites: An experimental approach. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 122:1-8.
- [20] Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J. Experimental study on the effect of amine functionalized carbon nanotubes on the thermomechanical properties of CNT/Epoxy nanocomposites, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 2018; 5(1): 41-48.
- [21] Hosseini Farrash SM, Shariati M, Rezaeepazhand J. Dynamic Characteristics of Functionalized Carbon

جدول ۳) مقایسه نتایج تجربی و عددی بار بحرانی کماتش برای ستون آلومینیومی و ستون آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت شیشه/اپوکسی با مش بندی دستی و خودکار

نوع نمونه	تجربی $P_{cr}(KN)$	عددی $P_{cr}(KN)$	درصد اختلاف
ستون بدون کمر بند	۱۰/۱۵	۱۱/۳۲	۱۱/۵۲
ستون با کمر بند مش بندی دستی	۱۴/۱۹	۱۴/۸۹	۴/۹
ستون با کمر بند مش بندی خودکار	۱۴/۱۹	۱۵/۳	۷/۸

چسبندگی بین کمر بند کامپوزیتی و ستون آلومینیومی در حضور نانولوله کربنی را می‌توان از علت‌های اصلی در افزایش بار بحرانی کماتش ستون‌های تقویت شده دانست.

تشکر و قدردانی: تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی حاصل فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج برعهده آنها است.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: هیچگونه تعارض منافی با سازمانها و اشخاص وجود ندارد.

سهم نویسندگان: محمد رئیسی (نویسنده اول): پژوهشگر اصلی و نگارنده مقاله ۵۰٪، علیرضا شاطرزاده (نویسنده دوم): روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/ ویرایش‌گر مقاله/ تحلیلگر ۲۵٪، سید مهدی حسینی فراش (نویسنده سوم): روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/ ویرایش‌گر مقاله/ تحلیلگر ۲۵٪

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط دانشگاه صنعتی شاهرود تأمین گردیده است.

منابع

- [1] Herakovitch CT. *Mechanics of fibrous composites*; 1998.
- [2] Ashby MF. *Technology of the 1990s: advanced materials and predictive design*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1987;322(1567):393-407.
- [3] Dhand V, Mittal G, Rhee KY, Park SJ, Hui D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2015;73:166-80.
- [4] Wanhil RJH. GLARE: A Versatile Fibre Metal Laminate (FML) Concept. *Aerospace materials and material technologies*. 2017; 291-307.
- [5] Coleman JN, Khan U, Blau WJ, Gun'ko YK. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*. 2006;44(9):1624-1652.
- [6] Chun M, Niu Y. *Airframe Structural Design*. Lockheed Aeronautical Systems Company Burbank. California; 1988.

Nanotube Reinforced Epoxy Composites: An Experimental Approach. Journal of Solid Mechanics. 2020;12(2):358-365.

[22] Ghannad M, Hosseini Farrash SM, Sabermanesh HR, Effect of adding carbon nanotubes into the matrix material on the buckling behavior of glass/epoxy composite plates: An experimental study, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 2020. [Accepted, in Persian]

[23] Hyer MW, Herakovich CT, Milkovich SM, Short Jr JS. Temperature dependence of mechanical and thermal expansion properties of T300/5208 graphite/epoxy. Composites. 1983; 14(3):276-80.

[24] ASTM Committee D-30 on Composite Materials. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International; 2008.