



## Investigation of Bonding Strength of Steel/Stainless Steel Bimetallic Rod

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Shahbeiki E.<sup>1</sup> MSc,  
Fatehi Sichani F.<sup>2</sup> MSc,  
Rahnama S.<sup>\*2</sup> PhD

#### How to cite this article

Shahbeiki E, Fatehi Sichani F, Rahnama S. Investigation of Bonding Strength of Steel/Stainless Steel Bimetallic Rod. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):105-113.

### ABSTRACT

Nowadays, due to mechanical, physical, thermal, electrical, and vibration properties, metallic multilayer rods have specific applications in industry. Bimetallic rods made from layers with two different materials have been considered by manufacturers in recent years for simultaneous use of the properties of several materials in a single work piece, such as high strength, corrosion resistance, wear resistance, and improved stress distribution. In this research, the tensile test was performed on steel wire and stainless steel pipes to obtain the stress-strain curve of each sample. Wire drawing dies have been used to make bimetallic rods. Then, two samples of the bimetallic rod were made by swaging with the reduction ratio of 9.75% and 21%. Samples were cut by wire cut machine after production. For interlayer strength testing, dies were designed based on the punch method. The test results were used to calibrate the parameters of the adhesive element in the software. The simulation was performed, using Ansys 17.0 software. Then the results were compared with experimental results. The effects of reduction ratio, internal diameter, sample length, and clad thickness were investigated. The experimental results were in good agreement with the simulation results. By increasing the reduction ratio, the force required for the separation of the two layers has increased, resulting in increased bonding strength between layers.

**Keywords** Bimetallic Rod; Interlayer Bonding Strength; Experimental Test; Numerical Simulation; Cohesive Zone Element

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Hormozan Higher Education Institute of Birjand, Birjand, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Avini Street, Birjand, South Khorasan, Iran  
Phone: +98 (56) 32202049  
Fax: +98 (56) 32202133  
srahnama@birjand.ac.ir

#### Article History

Received: July 08, 2018  
Accepted: October 03, 2018  
ePublished: January 01, 2019

### CITATION LINKS

[1] Designing hybrid materials [2] Selection strategies for materials and processes [3] Influence of diffusion coefficient on chloride ion penetration of concrete structure [4] Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering [5] Effect of heat treatment on the bending behavior of tri-layered Cu/Al/Cu composite plates [6] Mechanical bonding properties and interfacial morphologies of austenitic stainless steel clad plates [7] Explosive welding of titanium/stainless steel by controlling energetic conditions [8] Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation [9] Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding [10] Prediction of delamination of steel-polymer composites using cohesive zone model and peeling tests [11] Investigation of joint quality of aluminium-1350 and Stw22 steel strips by warm rolling [12] Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips [13] Shear blanking test of a mechanically bonded aluminum/copper composite using experimental and numerical methods [14] Atlas of stress-strain curves [15] Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [16] Fabrication and characterization of cold-swaged multilayered Al-Cu clad composites [17] Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: Mechanical and computational issues [18] ANSYS documentation

## بررسی استحکام بین لایه‌ای مفتول دو لایه فولاد- فولاد ضدزنگ

احسان شاهبیک MSc

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی هرمزان، بیرجند، ایران

فریبرز فاتحی سیجانی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سعید رهنما\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

مفتول‌های دو یا چندلایه به دلیل داشتن خواص مکانیکی، فیزیکی، حرارتی، الکتریکی و ارتعاشی امروزه کاربردهای خاصی را در صنعت یافته‌اند. مفتول‌های دولایه که از لایه‌های فلزی با دو جنس مختلف تشکیل شده‌اند برای بهره‌مندی همزمان از خواص مطلوب چند فلز مانند استحکام زیاد، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر سایش، بهبود توزیع تنش در مقطع یک ماده، طی سال‌های اخیر مورد توجه تولیدکنندگان قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، آزمایش کشش تک‌محوری روی مفتول فولادی و لوله فولاد ضدزنگ انجام شد تا خواص مکانیکی مربوط به هر نمونه به دست آید. برای ساخت مفتول، دوزه‌هایی آماده شدند. سپس دو نمونه مفتول با عبور از دوزه‌ها توسط روش سوئیچ با نسبت کاهش سطح مقطع ۹۱/۷۵٪ و ۲۱٪ ساخته شدند. نمونه‌ها پس از تولید توسط دستگاه وایبرکات برش داده شدند. برای انجام آزمایش استحکام بین لایه‌ای قالب‌هایی براساس طرح پولکرانی طراحی شدند. نتایج آزمایش برای کالیبیر کردن پارامترهای المان چسبنده در نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفتند. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس ۱۷.۰ انجام شد. سپس نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. اثرات کاهش سطح مقطع، قطر داخلی، طول نمونه و ضخامت پوسته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی داشت. با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، نیروی لازم برای جدایش دو لایه افزایش یافته و در نتیجه استحکام چسبندگی بین لایه‌ای افزایش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** مفتول دولایه، استحکام بین لایه‌ای، آزمون تجربی، شبیه‌سازی عددی، المان چسبنده

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۱

\* نویسنده مسئول: srahnama@birjand.ac.ir

### ۱- مقدمه

مواد مرکب دارای ویژگی‌های ساختاری و چنکاره مانند خواص دمایی، الکتریکی، مغناطیسی و غیره هستند. این مواد می‌توانند تقاضای مواد را برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی صنعتی ارایه دهند که نیاز به مواد تک‌لایه با خواص چنکاره دارند<sup>[1, 2]</sup>. مواد مرکب به دلیل خاصیت ساختاری منحصر به فرد آنها به‌ویژه برای کاربردهای خاص مورد توجه قرار گرفتند، در حالی که ترکیبی از صرفه‌جویی در وزن و استحکام بالا مورد نیاز است. بتن دارای قدرت ذاتی و نسبتاً بادوام است. با این حال، اکسیژن و کلرید در بتن نفوذ می‌کند و با مفتول فولاد کربنی تقویت شده تماس برقرار می‌کند که این امر منجر به خوردگی فولاد می‌شود. در نتیجه زنگ‌زدگی آن باعث انبساط می‌شود و فشاری روی بتن ایجاد می‌کند که موجب ترک و پوسته‌پوسته شدن می‌شود. برای غلبه بر مشکل فرسایش فولاد کربنی که منجر به شکست بتن، مشکلات سازه‌ای و تعمیرات پرهزینه می‌شود، می‌توان محیط یا مواد را تغییر داد. در یک محیط قلیایی و اسیدی، محیط تغییر نخواهد کرد. در عوض، تغییر میله‌های تقویت شده فولاد کربنی به یک ماده مقاوم‌تر در برابر خوردگی مانند فولاد ضدزنگ، یک اقدام موثر و مقرون به صرفه برای افزایش طول عمر سازه است. همچنین استفاده

از فولاد ضدزنگ با حذف پوشش‌های مفتول، مهارکننده‌های سیمان و روکش بتن ضخیم‌تر موجب صرفه‌جویی در هزینه می‌شود<sup>[3]</sup>.

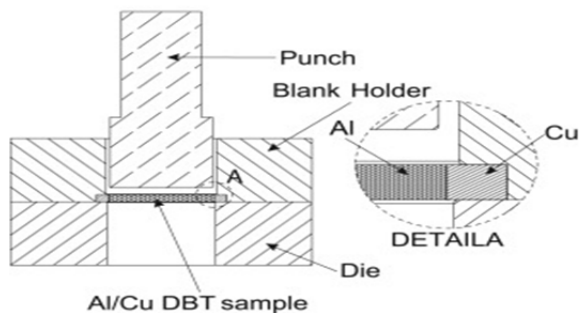
فولادهای ضدزنگ به فولادهایی با مقادیر عناصر آلیاژی بالا گفته می‌شود که توانایی مقاومت به خوردگی در اتمسفرهای خوردنده و دماهای بالا را داشته باشند. بنابراین در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرند که نیاز به مقاومت در برابر خوردگی بالا باشد. امروزه عمر بسیاری از سازه‌های بتنی محدود شده است و بهبود عمر بتن می‌تواند به‌طور مستقیم باعث افزایش طول عمر سازه شود<sup>[4]</sup>.

روش‌های مختلف از جمله اکستروژن، نورد، آبکاری، جوشکاری پوششی و جوشکاری انفجاری برای تولید مواد مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند. بین این روش‌ها، نورد کردن به دلیل هزینه کم و بهره‌وری خوب مفیدترین فرآیند است<sup>[5]</sup>. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید مفتول‌های چندلایه، روش سوئیچ است. از جمله مزایای اصلی فرآیند سوئیچ، سطح با کیفیت بالا و دقت ابعادی است که ضرورت ماشین‌کاری بعدی را از بین می‌برد. اگر چه روش سوئیچ به مدت طولانی شناخته شده، اما با توجه به تکنولوژی تولید مفتول‌های روکش‌دار، توجه کمتری به آن صورت گرفته است. این فرآیند یک کار سرد است که برای کاهش قطر استفاده می‌شود. در این فرآیند، مفتول با نیروی ثابت از دوزه عبور می‌کند که با سرعت ثابت در حال چرخش است. در نتیجه مفتول دولایه با کاهش قطر تولید می‌شود.

دب و همکاران همبستگی بین ریزساختار و خواص مکانیکی در فولاد کم‌کربن با روکش فولاد ضدزنگ را مد نظر قرار دادند که با اتصال نورد گرم ساخته شده است و شکل و ویژگی‌های خط اتصال، خواص کششی، خواص برشی و چقرمگی شکست مواد خام را بررسی کردند. برای ارزیابی کیفیت پیوند صفحات روکش‌دار، آزمایش‌های برشی و ضربه‌ای انجام شد. آزمون‌های برشی برای تعیین کیفیت پیوند توسط استاندارد ASTM A264-09 انجام شد. آنها توسط تست‌های مکانیکی دریافتند که صفحات روکش‌دار تولید شده توسط اتصال نورد گرم سبب ایجاد خواص مکانیکی بهتر می‌شود<sup>[6]</sup>. مانیکاندران و همکاران، تیتانیوم و فولاد ضدزنگ ۳۰۴ را با استفاده از روش جوشکاری انفجاری تولید کردند. محل اتصال با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی، طیف‌سنجی پراکنده انرژی و پراش اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت. افزایش انرژی جنبشی درون خط اتصال باعث افزایش حجم گرداب‌ها می‌شود. با توجه به کاهش انرژی جنبشی، توپوگرافی صاف و موج‌دار برای صفحات ورق نازک به دست آمد و نتایج نشان داد که جوشکاری انفجاری می‌تواند برای پوشاندن تیتانیوم و فولاد ضدزنگ ۳۰۴ مورد استفاده قرار گیرد<sup>[7]</sup>.

پرز-کیروز و همکاران، استفاده از فولاد ضدزنگ برای نوسازی سازه‌های بتنی را بررسی کردند. آنها آزمایش پتانسیل خوردگی را روی نمونه فولادکربنی و فولاد ضدزنگ در مدت ۹۰ روز انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از میله‌های تقویت‌کننده ضدزنگ خطر خوردگی را بهتر از فولاد کربنی کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش خوردگی پتانسیل و خوردگی گالوانیک نشان می‌دهد که میله‌های فولاد ضدزنگ ۳۰۴ مقاومت قابل توجهی در برابر محلول‌های بتونی شبیه‌سازی شده دارند که انتخاب مناسبی برای استفاده در سازه‌های بتنی است. استفاده مناسب از فولاد ضدزنگ در مناطقی که در معرض خوردگی هستند تا حد زیادی عمر سازه‌های بتنی را افزایش می‌دهد<sup>[8]</sup>. حسینی و دانش‌منش مقاومت پیوند چندلایه‌های تیتانیوم/مس/تیتانیوم را بررسی کردند

فشار ۲۰۰ مگاپاسکال تولید شدند. برای تعیین استحکام برشی در خط اتصال سازه مرکب، آزمون پولکرانی پیشنهاد شد. طرح کلی این آزمون در شکل ۱ نشان داده شده است. طبق نتایج عددی، ضخامت، فاصله آزاد و شعاع انحنا اثر قابل توجهی بر استحکام برشی پیوند و مقدار کرنش بیشینه طی آزمایش پولکرانی دارد. همچنین طرح اختصاصی آزمایش پولکرانی به‌عنوان یک روش مناسب برای بررسی استحکام چسبندگی از سازه‌های کامپوزیتی ارائه شد که شامل شکست خط اتصال است [13].



شکل ۱) شماتیک آزمون پولکرانی استفاده‌شده برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خط اتصال

در این پژوهش خواص مکانیکی مفتول فولادی و لوله فولاد ضدزنگ از طریق آزمایش، طبق استاندارد ملی ایران ۱۰۲۷۲ به دست آمد. سپس مفتول فولادی با روکش فولاد ضدزنگ از طریق روش سوئچ با دو نسبت کاهش سطح مقطع ساخته شدند. برای به‌دست‌آوردن استحکام بین‌لایه‌ای، آزمایش پولکرانی طراحی شد. سپس قالب‌های مربوط به آزمایش توسط دستگاه CNC ساخته و نمونه‌ها توسط دستگاه وایپرکات آماده شدند. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ANSYS انجام شد. منحنی تنش-کرنش واقعی به نرم‌افزار وارد شد که از آزمون کشش به دست آمده بود و سپس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شدند. پارامترهای مربوط به المان چسبنده به‌دست‌آمده و اثر هر یک از پارامترها بررسی می‌شود. سپس با پارامترهای حاصل، اثر کاهش سطح مقطع، قطر داخلی و ضخامت پوسته بررسی می‌شود.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

برای تعیین خواص مکانیکی مفتول فولادی و لوله فولاد ضدزنگ از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد که در آن نمونه آزمون تحت بار یکنواخت در امتداد محور مرکزی خود کشیده می‌شود. در این مرحله نقشه‌های مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های مورد آزمایش مطابق با استاندارد ملی ایران ۱۰۲۷۲ آماده شد. برای انجام تست، از دستگاه تست کشش STM-600 استفاده شد. مفتول فولادی با قطر ۶ میلی‌متر و لوله فولاد ضدزنگ با قطر داخلی ۶/۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۸ میلی‌متر تحت آزمایش قرار گرفت. نتایج به‌صورت نمودار تنش-کرنش مهندسی روی فایل اکسل ذخیره می‌شود. داده‌های خروجی دستگاه تست کشش به‌صورت خام است، این داده‌ها باید به منحنی تنش-کرنش حقیقی تبدیل شوند. داده‌ها شامل تغییرات نیروی محوری، تغییر طول، فاصله فک بالا و فک پایین دستگاه و زمان است.

منحنی تنش-کرنش منتج از آزمون کشش برای مفتول فولادی با مقایسه مرجع [14]، فولاد کربنی CS.021AAR مطابق نمودار ۱ و برای لوله فولاد ضدزنگ با مقایسه مرجع [15]، فولاد ضدزنگ از نوع

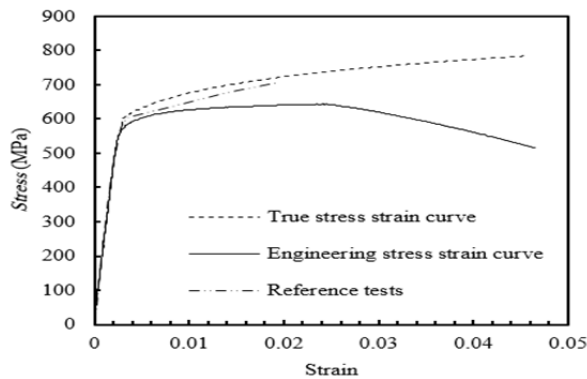
که توسط پیوند نوردی ساخته شده است. آنها از آزمون پوسته‌کنی برای بررسی مقاومت پیوند چندلایه‌ها و از روش تاگوچی برای پیداکردن شرایط بهینه برای به‌حداکثر رساندن مقاومت پیوند مس/تیتانیوم استفاده کردند. شرایط روان‌کاری غلتک، وضعیت مس، دمای نورد، کاهش ضخامت، زمان خنک‌شدن، دمای خنک‌شدن و سرعت نورد، پارامترهای مورد بررسی روی استحکام پیوند بود. تجزیه و تحلیل تاگوچی نشان داد که به‌طور قابل توجهی چهار عامل از هفت عامل مورد مطالعه، در کیفیت پیوند مؤثرند. آنها به این نتیجه رسیدند که درجه حرارت، کاهش ضخامت، دمای خنک‌کردن و سرعت نورد باعث افزایش مقاومت پیوند می‌شود [9].

جانگ و همکاران روی جدایش کامپوزیت‌های فولادی مطالعه کردند. برای مشخص‌کردن خصوصیات چسبندگی از آزمایش‌های لایه‌کنی استفاده شد و آزمایش‌های لایه‌کنی در دو زاویه صورت گرفت، به‌طوری که خواص چسبندگی در هر دو جهت نرمال و مماسی تعیین شد. تغییر شکل مکانیکی طی آزمون لایه‌برداری برای تعیین انرژی شکست (حالت I و II) خط اتصال بین فولاد و پلیمر تجزیه و تحلیل شد که برای شبیه‌سازی رفتار جدایش لایه‌ها از طریق المان محدود چسبنده مورد استفاده قرار گرفت. در نتیجه آنها دریافته‌اند که شکست‌های ناشی از جدایش در کامپوزیت‌های فولادی پلیمری می‌تواند با استفاده از مدل المان چسبنده و آزمون‌های لایه‌کنی پیش‌بینی شوند [10].

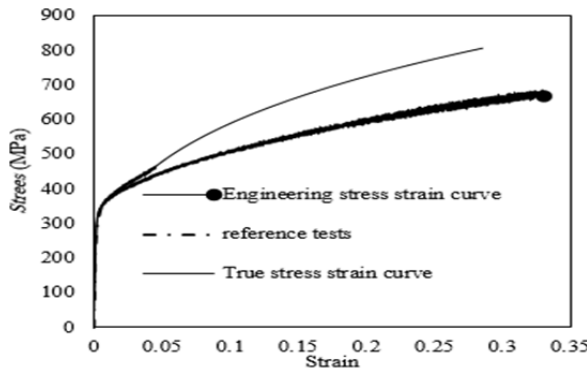
سلطانعلی‌نژاد و حائریان/ردکانی کیفیت اتصال آلومینیوم و فولاد کم‌کربن تولیدشده به روش نورد گرم را بررسی کردند. استحکام پیوند دو فلز توسط آزمایش لایه‌کنی با توجه به متغیرهای تحقیق ارزیابی شد. در این تحقیق از آلومینیوم آنیل‌شده و فولاد کم‌کربن استفاده شده است. به‌منظور بررسی اثر دما و تغییر شکل فرآیند روی کیفیت اتصال و استحکام پیوند فصل مشترک لایه فولادی به آلومینیوم، تسمه‌های دولایه در دماهای ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰°C و کاهش ضخامت‌های ۷ تا ۵۸% نورد شدند. پیش از آزمایش لایه‌کنی، فصل مشترک توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌منظور ارزیابی مکانیزم اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش میزان تغییر شکل (کاهش ضخامت) تسمه‌های دولایه آلومینیوم/فولاد در دماهای ثابت، استحکام پیوند بین دولایه افزایش می‌یابد. همچنین افزایش دمای پیش‌گرم در کاهش ضخامت ثابت باعث افزایش استحکام پیوند می‌شود. با افزایش دما و میزان تغییر شکل لایه‌ها، مناطق اتصال بین دولایه در فصل مشترک اتصال، گسترش و مناطق عدم اتصال و تخلخل‌های بین دولایه کاهش می‌یابد [11].

دانش‌منش و شهابی، اثر پارامترهای فرآیند از جمله کاهش ضخامت، سرعت نورد، ضخامت و استحکام بین‌لایه‌ای و شرایط اصطکاک بر فشار متوسط، طول اتصال پیوند و استحکام پیوند را با استفاده از نمودارهای مربوطه مورد بررسی قرار دادند. در نتیجه، افزایش سرعت نورد، تغییرات قابل توجهی در متوسط فشار تماس ایجاد نمی‌کند، در حالی که افزایش طول پیوند، استحکام لایه‌کنی را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش ضریب اصطکاک نورد نوار منجر به افزایش متوسط فشار تماس، طول اتصال پیوند و استحکام پیوند شد [12].

سایانتان و همکاران چسبندگی مکانیکی ورق‌های آلومینیوم/مس را با استفاده از روش تجربی و عددی توسط آزمایش پولکرانی بررسی و برای ساخت میله‌های مرکب از فرآیند اکستروژن مارپیچی محور متقارن استفاده کردند. نمونه‌های مرکب آلومینیومی با پوشش مس با استفاده از این فرآیند در دمای ۳۰۰°C و با شرایط



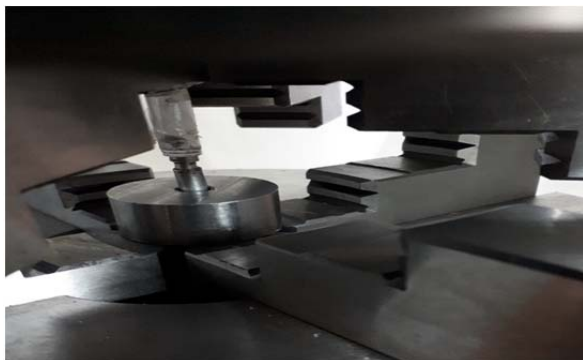
نمودار (۱) منحنی تنش- کرنش مفتول فولادی



نمودار (۲) منحنی تنش- کرنش لوله فولاد ضدزنگ

فرآیند تست پولکرانی به گونه ای است که مفتول دولایه درون یک قالب قرار می گیرد. هسته این مفتول توسط یک سنبه با نیروی فشاری خارج می شود. برای انجام تست از دستگاه تست کشش یونیورسال استفاده شد. این دستگاه شامل سه نظام متحرک در پایین و سه نظام ثابت در بالا است. همچنین یک کامپیوتر به دستگاه متصل است و تنظیمات اولیه و ذخیره نتایج خروجی تست توسط نرم افزار اختصاصی این دستگاه انجام می شود.

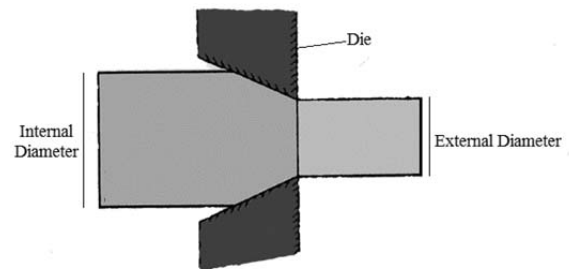
تست پس از سوار کردن نمونه در دستگاه آغاز می شود. برای شروع آزمایش ابتدا فاصله بین فکها طوری تنظیم می شود که هیچ فاصله ای بین سنبه و نمونه وجود نداشته باشد. سپس تنظیمات اولیه توسط نرم افزار به ماشین داده می شود که این تنظیمات شامل فاصله بین فکها به کمک کاغذ نازک، تنظیم سرعت انجام تست و مقدار جابه جایی است. شکل ۵ نحوه قرارگیری قالب و سنبه را در تست پولکرانی نشان می دهد. این آزمایش تا هنگام خارج شدن هسته ادامه می یابد. نتایج تست پولکرانی در هر لحظه توسط کامپیوتری ثبت می شود که به دستگاه متصل است.



شکل (۵) قید و بند متصل بر دستگاه کشش FAMA-TP در حال اجرای آزمایش پولکرانی

فریتی AISI 430 مطابق نمودار ۲ برای استفاده در نرم افزار ANSYS را نشان می دهد. برای کاهش سطح مقطع مفتول دولایه و از بین بردن فضای خالی بین هسته و پوسته، نمونه از دوزه عبور داده می شود. به این منظور مشابه کار کوسیچ و همکاران [16] از فرآیند سوئیچ استفاده شد. شکل ۲، شماتیک دوزه استفاده شده برای فرآیند سوئیچ را نشان می دهد. برای اجرای این فرآیند ابتدا دوزه مربوط به سه نظام بسته و مفتول روی ابزارگیر مقید شد. با ورود مفتول به قالب چرخان، قطر مفتول در طول مورد نیاز کاهش یافت.

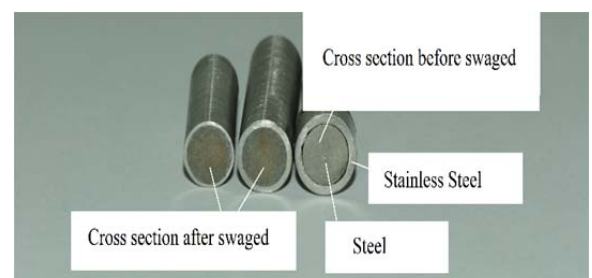
به منظور اجرای فرآیند سوئیچ بر مفتول دولایه و ایجاد چسبندگی بین لایه ها از دستگاه FAMA-HD و برای نگهداری دوزه از مجموعه قید و بند نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شد. با شروع به کار دستگاه، سه نظام شروع به چرخش می کند و مفتول با سرعت ثابت از درون دوزه عبور داده می شود. قطر خروجی دوزه برابر با ۷/۱ میلی متر برای نمونه اول و ۶/۷ میلی متر برای نمونه دوم است. در طول فرآیند از روغن برای خنک کردن و جلوگیری از جوش اصطکاکی استفاده شد. سرعت چرخش دوزه در طول فرآیند برای هر دو نمونه ثابت بود. در نهایت مفتول دولایه برای انجام تست پولکرانی توسط دستگاه وایرکات برش داده شد (شکل ۴). سطح مقطع با کیفیت سطح مناسب و برش دقیق از مزایای استفاده از دستگاه وایرکات هستند.



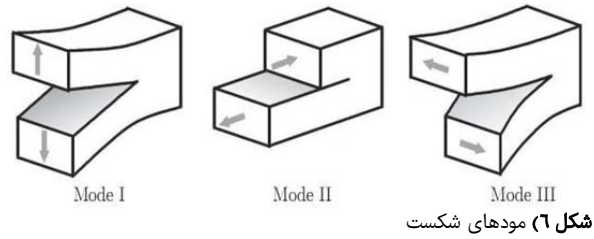
شکل (۲) شماتیک دوزه



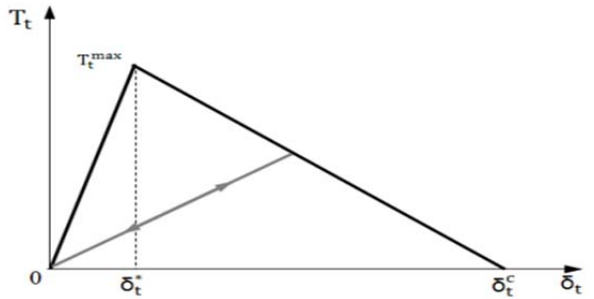
شکل (۳) دستگاه FAMA-HD برای انجام فرآیند سوئیچ



شکل (۴) مفتول دولایه فولاد - فولاد ضدزنگ ساخته شده



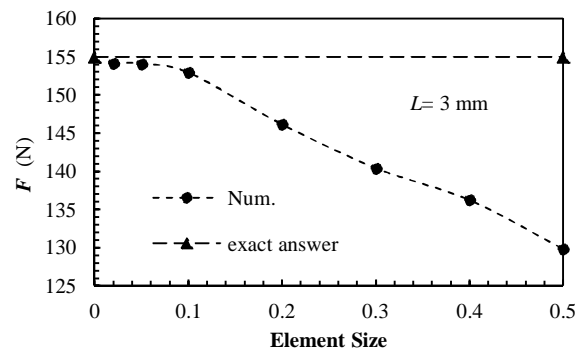
شکل ۶) مدهای شکست



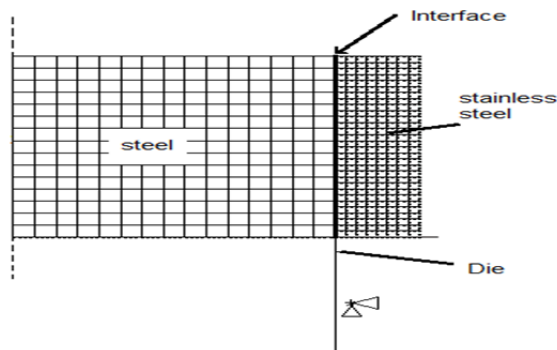
شکل ۷) منحنی دوخطی المان چسبنده در مود II

جدول ۱) پارامترهای المان چسبنده در مود II

پارامتر	علامت	توضیحات
C1	$\sigma_{max}$	کشش نرمال ماکزیمم
C2	$\delta_n^c$	جاب‌جایی پرشی نرمال در اتمام جدایی لایه‌ها
C3	$\tau_{max}$	تنش برشی ماکزیمم
C4	$\delta_t^c$	جاب‌جایی پرشی مماسی در اتمام جدایی لایه‌ها
C5	$\alpha$	نسبت جاب‌جایی پرشی مماسی در ماکزیمم کشش چسبنده مماسی به جاب‌جایی پرشی مماسی در اتمام جدایی لایه‌ها در مود II



نمودار ۳) منحنی سائز المان



شکل ۸) مدل متقارن محوری مفتول دولایه

مدل قالب صلب در تمام جهات، مقید و حل در حالت استاتیکی با در نظر گرفتن تغییر شکل زیاد انجام شد. تعداد مرحله حل ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شد که با انتخاب نرم‌افزار تا ۲۰۰۰۰ مرحله قابل افزایش

### ۳- شبیه‌سازی عددی

شکستگی یا جدایی لایه‌ها در طول خط اتصال نقش مهمی در محدود کردن چقرمگی و شکل‌پذیری مواد چندلایه دارند. جدایی خط اتصال را می‌توان با روش‌های مکانیک شکست مانند روش انتشار گره مدل‌سازی کرد. روش‌هایی که به‌طور مستقیم با ایجاد رابطه بین کشش و جدایش، مکانیزم شکست را به‌طور مستقیم ارایه می‌دهند، هر کدام به نوبه خود انرژی شکست بحرانی را معرفی می‌کنند. این روش، روش المان چسبنده نامیده می‌شود. مدل دوخطی براساس مدل آلفانو و کریسفیلد ارایه شد [17].

تنش‌های برشی و کششی بین‌لایه‌ای به‌صورت سه مود است. شکل ۶ مدهای شکست را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، مود I کشش بین‌لایه‌ای، مود II برش بین‌لایه‌ای و مود III بریدگی بین‌لایه‌ای است. در مود II مدل حالت دوخطی المان چسبنده فرض می‌شود که جدایش سطح مشترک مواد توسط جاب‌جایی پرشی مماسی کنترل شود. شکل ۷ منحنی مود II را نشان می‌دهد [18]. براساس شکل ۷، فرآیند جدایش لایه‌ها به این صورت است که از نقطه آغازین تا رسیدن به کشش مماسی ماکزیمم ( $T_t^{max}$ )، مقدار کشش افزایش پیدا می‌کند و رفتار ماده در حالت الاستیک است. از این نقطه، جدایش لایه‌ها آغاز می‌شود و تا  $\delta_t^c$  ادامه پیدا می‌کند. این زمانی است که جدایش کامل لایه‌ها رخ می‌دهد. بنابراین این مدل توسط سه پارامتر مستقل تعریف می‌شود. این پارامترها شامل کشش مماسی ماکزیمم، شیب اولین خط از منحنی و شیب دوم منحنی هستند. رابطه پیوند بین کشش چسبنده مماسی ( $T_t$ ) و جاب‌جایی پرشی نرمال ( $\delta_t$ ) می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$T_t = K_t \delta_t (1 - D_t) \quad (1)$$

که در آن سختی چسبنده مماسی برابر است با:

$$K_t = \frac{T_t^{max}}{\delta_t^c} \quad (2)$$

و پارامتر آسیب مماسی براساس زیر تعریف می‌شود:

$$D_t = \begin{cases} 0 & \delta_t^{max} \leq \delta_t^* \\ \left( \frac{\delta_t^{max} - \delta_t^*}{\delta_t^{max} - \delta_t^c} \right) \left( \frac{\delta_t^c}{\delta_t^* - \delta_t^c} \right) & \delta_t^* < \delta_t^{max} \leq \delta_t^c \\ 1 & \delta_t^{max} > \delta_t^c \end{cases} \quad (3)$$

تعیین استحکام بین‌لایه‌ای تحلیل عددی به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار تجاری ANSYS 17 و همچنین شبیه‌سازی در حالت متقارن محوری انجام شد. ابعاد مدل شامل ابعاد هندسی هسته، پوسته و قالب مشابه نمونه آزمایش است. مدل‌سازی پوسته و هسته در حالت متقارن محوری و با استفاده از المان PLANE 183 صورت گرفت. برای شبیه‌سازی تماس بین لایه پوسته و قالب از المان TARGE 169 و CONTA 175 و تماس بین هسته و پوسته از المان INTER 203 استفاده شد. قالب به‌صورت خط صلب مدل شده و تماس بین قالب و پوسته از نوع نقطه به سطح و در حالت غیرشکل‌پذیر انتخاب شده است. پارامترهای المان چسبنده و معادل آن برای استفاده در نرم‌افزار مطابق جدول ۱ مشخص شده‌اند.

المان‌های مدل پوسته و هسته از نوع دو بُعدی ۸ گرهی مربعی است. سائز المان‌های بهینه برای شبیه‌سازی فرآیند پولک‌رانی با بررسی اثر تراکم شبکه‌بندی بر منحنی نیروی ماکزیمم به دست آمد (نمودار ۳). اندازه المان بهینه برای هسته و پوسته ۱/۱ میلی‌متر به دست آمد. نوع بارگذاری باید به‌صورتی باشد که هسته از داخل مفتول خارج شود، بنابراین بارگذاری به‌صورت جاب‌جایی در راستای محور تقارن مدل از بالا به پایین همانند شکل ۸ است.



است. برای تعیین نیروی شکل‌دهی از گزینه نیروی عکس‌العمل برای گره مبنا (Pilot Node) قالب استفاده شد. مقدار این نیرو در برابر جابه‌جایی گره‌های پایین مدل و محل اعمال شرط مرزی به دست آمده است.

#### ۴- نتایج و بحث

برای قابل مقایسه‌بودن نتایج تحلیل عددی و آزمایش‌ها، باید شرایط کاملاً یکسان باشد. یکی از این شرایط خواص مکانیکی مواد است. با توجه به مدل‌های مواد المان PLANE 183 که برای شبیه‌سازی هسته و پوسته انتخاب شد، منحنی تنش- کرنش واقعی مواد باید برای نرم‌افزار تعریف شود. بنابراین پس از نمونه‌برداری برای آزمون کشش، منحنی تنش- کرنش واقعی برای فولاد و فولاد ضدزنگ به دست آمد. با استفاده از مدل هالومان برای مواد، منحنی نمایی از داده‌های گذر داده شد و ضرایب استحکام (K) و کارسختی (n) برای فولاد و فولاد ضدزنگ مطابق جدول ۲ به دست آمد.

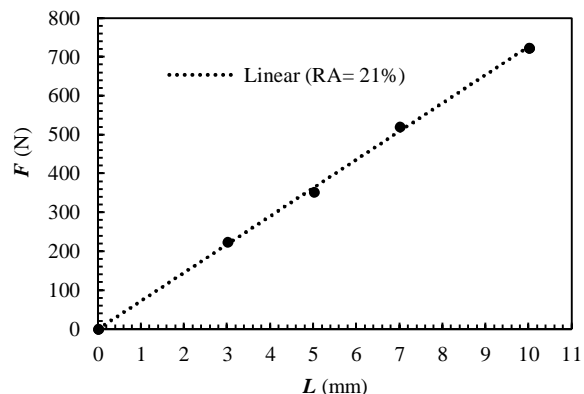
جدول ۲) خواص فولاد و فولاد ضدزنگ منتج از آزمون کشش

ماده	K (MPa)	n	E (GPa)	θ
فولاد	۱۰۵۹	۰/۰۹۷۴۷۵	۲۰۴	۰/۳
فولاد ضدزنگ	۱۱۷۵	۰/۳	۲۰۰	۰/۳

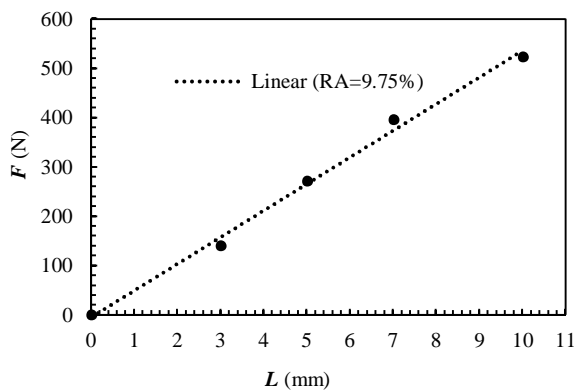
برای بررسی اثر کاهش سطح مقطع (RA)، نمونه‌ها با دو نسبت کاهش سطح مقطع (RA) یکی با ۹/۷۵٪ و دومی با ۲۱٪ آماده و همچنین برای بررسی اثر طول، نمونه‌ها به طول ۳، ۵، ۷ و ۱۰ میلی‌متر جدا شد.

#### ۴-۱- نتایج آزمون پولک‌رانی و شبیه‌سازی

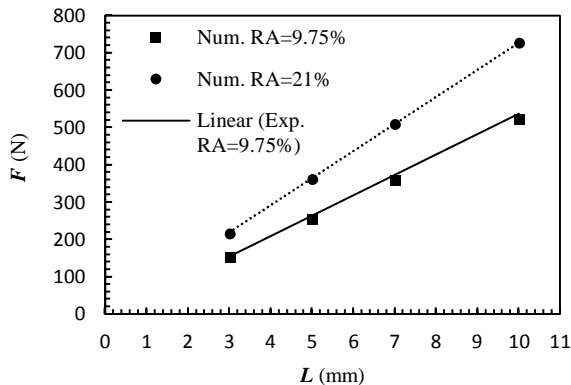
نتایج مربوط به آزمایش برای دو نسبت کاهش سطح مقطع در نمودار ۴ و ۵ نشان داده شدند. در این نمودارها نیروی ماکزیمم جدایش لایه‌ها برای هر نمونه رسم شد. انحراف‌معیار برای نمونه با نسبت کاهش سطح مقطع ۲۱٪ برابر ۲۴۷ و برای نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪ برابر ۱۸۴ براساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمد. سپس ضرایب C3 و C5 براساس نتایج آزمایشگاهی و قوانین مربوط به المان چسبیده به دست آمد. پارامتر C1، در مود II منفی در نظر گرفته می‌شود و تاثیری در منحنی نیرو- جابه‌جایی ندارد. پارامتر C2 و C4 همان جابه‌جایی مماسی کل است که برابر طول نمونه در نظر گرفته می‌شود. این ضرایب در جدول ۳ نشان داده شدند. پس از تعیین این ضرایب، به منظور اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مطابق نمودار ۶، نیروی ماکزیمم جدایش لایه‌ها برای هر نمونه رسم شد.



نمودار ۴) نتایج آزمایشگاهی برای نسبت کاهش سطح مقطع ۲۱٪



نمودار ۵) نتایج آزمایشگاهی برای نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪



نمودار ۶) اعتبارسنجی نتایج آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی

جدول ۳) پارامترهای المان چسبیده در مود II

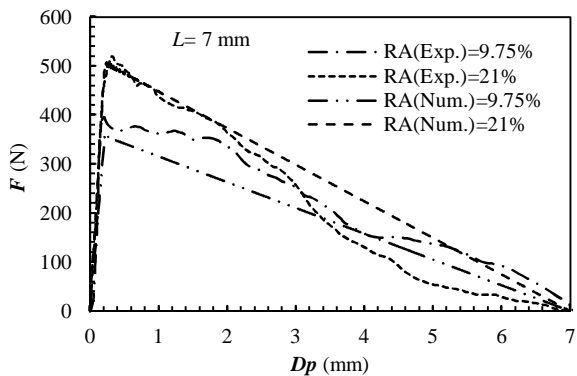
پارامتر	RA=۲۱٪	RA
C1	-۲۵	-۲۵
C2	۳، ۵، ۷، ۱۰	۳، ۵، ۷، ۱۰
C3	۴/۲۵	۲/۸۴
C4	۳، ۵، ۷، ۱۰	۳، ۵، ۷، ۱۰
C5	۰/۳	۰/۳

علت افزایش شیب نمودار، نیروی ماکزیمم جدایش لایه‌ها برای کاهش سطح مقطع ۲۱٪ نسبت به کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪ افزایش ضریب چسبندگی (C3) است. در واقع با افزایش این ضریب، تغییرات نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها، شدیدتر می‌شود.

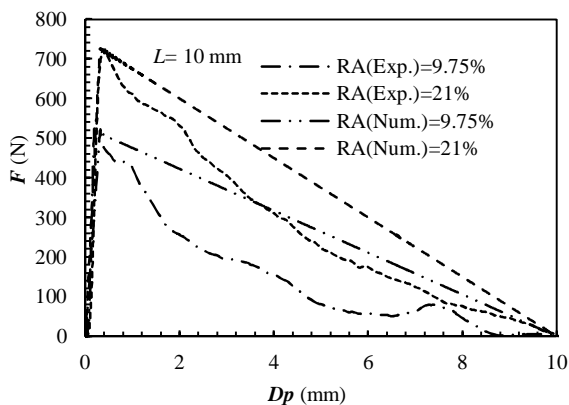
نمودارهای نیرو- جابه‌جایی هر کدام از نمونه‌ها برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی رسم شد. نمودار ۷ منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه با طول ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. برای نمونه با نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪ مقدار نیرو برابر ۱۵۳N و برای نمونه با کاهش سطح مقطع ۲۱٪ مقدار نیرو با ۴۰٪ افزایش، ۲۱۴N به دست آمد. همچنین نمودار ۸، منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه با طول ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. برای نمونه با نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪ مقدار نیرو برابر ۲۵۵N و برای نمونه با کاهش سطح مقطع ۲۱٪ مقدار نیرو با ۴۰٪ افزایش، ۳۵۵N به دست آمد.

نمودار ۹، منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه با طول ۷ میلی‌متر را نشان می‌دهد. برای نمونه با نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪ مقدار نیرو برابر ۳۶۰N و برای نمونه با کاهش سطح مقطع ۲۱٪ مقدار نیرو با ۴۰٪ افزایش، ۵۰۵N به دست آمد.

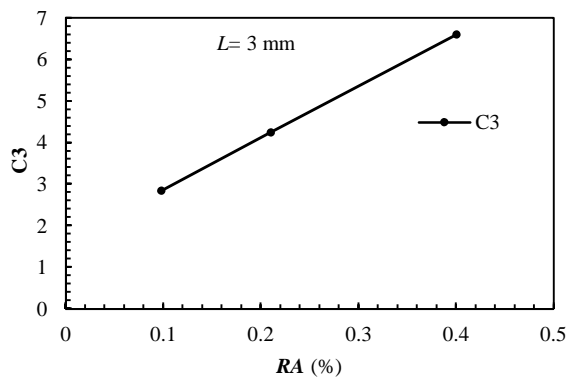
نمودار ۱۰، منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه با طول ۱۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. برای نمونه با نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵٪ مقدار



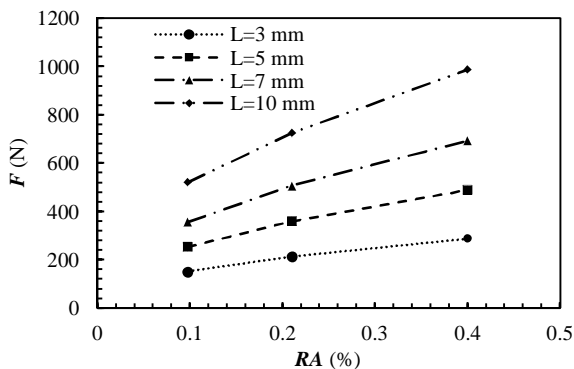
نمودار ۹) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای طول ۷ میلی‌متری



نمودار ۱۰) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای طول ۱۰ میلی‌متری



نمودار ۱۱) منحنی کاهش سطح مقطع- پارامتر C3



نمودار ۱۲) منحنی نسبت کاهش سطح مقطع- نیرو برای طول‌های مختلف

نیرو برابر  $520N$  و برای نمونه با کاهش سطح مقطع ۲۱٪ مقدار نیرو با ۴۰٪ افزایش،  $728N$  به دست آمد.

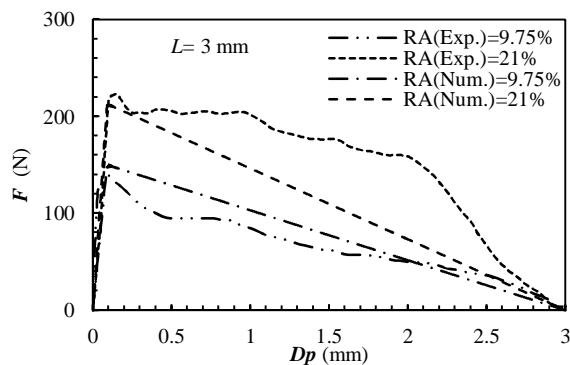
این نمودارها با ۵٪ خطا نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی دارند. همچنین نتایج نشان داد که با به‌دست‌آوردن ضرایب امان چسبنده می‌توان نیروی ماکزیمم جدایش لایه‌ها برای نمونه‌های مختلف را پیش‌بینی کرد. در ادامه با ضرایب به‌دست‌آمده به بررسی اثر کاهش سطح مقطع، طول نمونه، قطر داخلی و ضخامت پوسته می‌پردازیم.

#### ۴-۲- بررسی اثر کاهش سطح مقطع

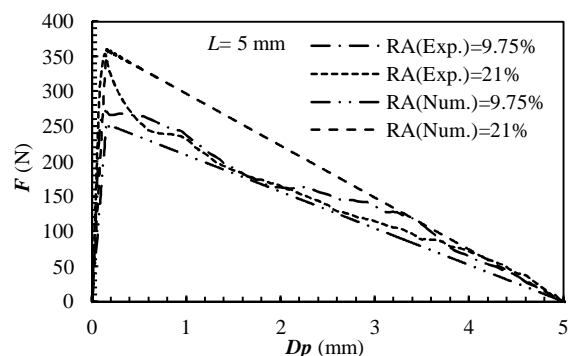
برای بررسی اثر کاهش سطح مقطع توسط پارامترهای به‌دست‌آمده، برای نسبت کاهش سطح مقطع ۴۰٪، مقدار ضریب C3 پیش‌بینی شد. نتایج آزمایش‌های گذشته نشان می‌دهد که استحکام بین‌لایه‌ای ورق‌های دولایه با افزایش میزان تغییر شکل کل (کاهش ضخامت کل) به‌صورت خطی افزایش می‌یابد<sup>[11]</sup>.

با در نظر گرفتن خطی بودن تغییرات ضریب چسبندگی (C3) و نسبت کاهش سطح مقطع، نمودار ۱۱ برای نمونه با طول ۳ میلی‌متر رسم شد. در این نمودار با داشتن ضریب C3 برای نسبت کاهش سطح مقطع ۹/۷۵ و ۲۱٪، مقدار ضریب C3 برای کاهش سطح مقطع ۴۰٪ برابر ۶/۶ به دست آمد.

سیس برای بررسی اثر نسبت کاهش سطح مقطع، نسبت کاهش سطح مقطع- نیرو برای طول‌های مختلف رسم شد. همان طور که در نمودار ۱۲ مشخص است، نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، در مفتول‌های دولایه افزایش می‌یابد. افزایش نسبت کاهش سطح مقطع باعث افزایش ضریب چسبندگی (C3) می‌شود که با توجه به فرمول ۲ باعث افزایش سختی چسبنده می‌شود. در نهایت با توجه به فرمول ۱، افزایش سختی چسبنده باعث افزایش نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها می‌شود. این امر به‌وضوح در نتایج به‌دست‌آمده مشخص است.



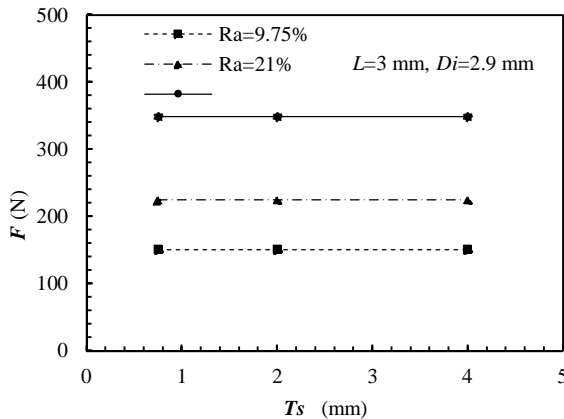
نمودار ۱۳) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای طول ۳ میلی‌متری



نمودار ۱۴) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای طول ۵ میلی‌متری

۳-۴- بررسی اثر طول نمونه

در نمودار ۱۳، اثر طول نمونه بر نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها نشان داده شده و همان طور که در نمودار مشخص است، افزایش طول نمونه باعث افزایش نیروی ماکزیمم می‌شود. نتایج نشان داد که تغییرات نیروی ماکزیمم با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع شدیدتر می‌شود. همچنین توسط ضرایب المان چسبنده به دست آمده می‌توان استحکام بین لایه‌ای برای نمونه‌ها با طول‌های مختلف را به دست آورد.



نمودار ۱۵) منحنی نیرو- ضخامت پوسته برای کاهش سطح مقطع‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

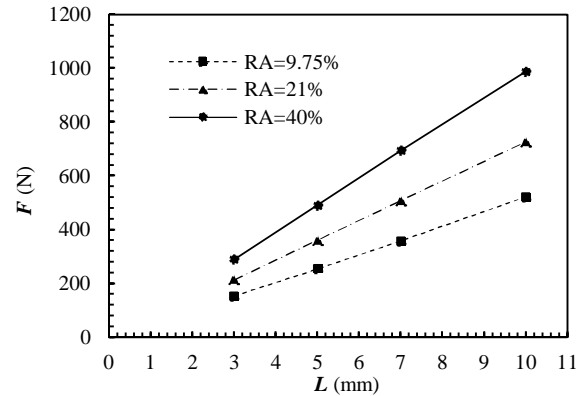
منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی آزمایشات تجربی با شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار ANSYS تطابق خوبی داشت. پارامترهای مربوط به المان چسبنده به دست آمد و استحکام بین لایه‌ای برای هر نمونه مشخص شد. با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع، نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن خطی بودن تغییرات ضریب C3 و نسبت کاهش سطح مقطع، مقدار ضریب C3 برای کاهش سطح مقطع ۴۰٪ برابر ۶/۶ به دست آمد. همواره با افزایش طول نمونه، نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها افزایش می‌یابد. تغییرات نیروی ماکزیمم نسبت به طول نمونه با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع شدیدتر می‌شود. با به دست آوردن پارامترهای المان چسبنده، تغییرات قطر داخلی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش قطر داخلی، افزایش نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها را ایجاد می‌کند و این تغییرات با افزایش نسبت کاهش سطح مقطع شدیدتر می‌شود. همچنین نمونه‌هایی با ضخامت پوسته متفاوت مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که تغییرات ضخامت تأثیری بر نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها ندارد. در نهایت با به دست آوردن پارامترهای المان چسبنده، به طور کلی نیروی ماکزیمم برای جدایش لایه‌ها به نسبت کاهش سطح مقطع و مساحت ناحیه چسبنده بستگی دارد.

**تشکر و قدردانی:** احتراماً نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری‌های شرکت دانش‌بنیان فاتح ماشین بیرجند در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی نمایند.

**تأییدیه اخلاقی:** بدینوسیله تأیید می‌گردد که کلیه نتایج ارائه شده، حاصل پژوهش نویسندگان بوده است. ضمناً این مقاله جهت بررسی و چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای احسان شاهبیک با عنوان "بررسی استحکام بین لایه‌ای مفتول‌های دولایه" به راهنمایی آقایان سعید رهنما و فریبرز فاتحی سیچانی می‌باشد.

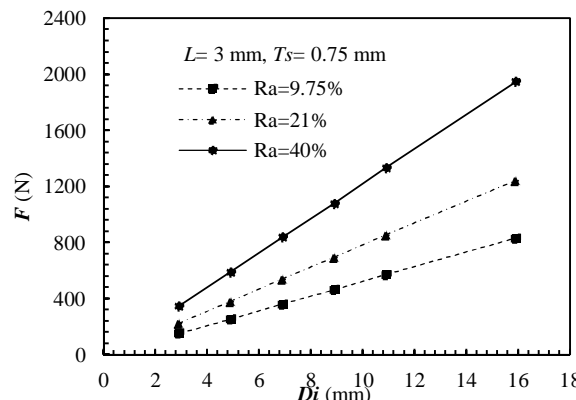
**سهم نویسندگان:** احسان شاهبیک (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ فریبرز فاتحی سیچانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/ پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ سعید



نمودار ۱۳) منحنی نیرو- طول برای کاهش سطح مقطع‌های مختلف

۴-۴- بررسی اثر قطر داخلی

نمونه‌هایی با قطر داخلی ۰/۹، ۰/۹، ۰/۹، ۰/۹، ۰/۹، ۰/۹ و ۱۵/۹ در طول ۳ میلی‌متر برای بررسی تأثیر قطر داخلی طراحی شدند. ضریب چسبندگی (C3) که از آزمایشات برابر ۲/۸۴، ۴/۲۵ و ۶/۶ به دست آمده بود، برای این نمونه‌ها استفاده شد. در این نمونه‌ها ضخامت پوسته ثابت (۰/۷۵ میلی‌متر) در نظر گرفته شد. نمودار ۱۴ تغییرات نیروی ماکزیمم جدایش لایه‌ها نسبت به قطر داخلی برای نمونه با طول ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان طور که در نمودار مشخص است، افزایش قطر داخلی باعث افزایش نیروی ماکزیمم جدایش بین لایه‌ای می‌شود.



نمودار ۱۴) منحنی نیرو- قطر داخلی برای کاهش سطح مقطع‌های مختلف

۵-۴- بررسی اثر ضخامت پوسته

نمونه‌هایی با ضخامت پوسته ۰/۷۵، ۰/۷۵ و ۲ برای بررسی ضخامت پوسته طراحی شدند. همچنین قطر هسته ۲/۹ میلی‌متر و طول ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ضریب چسبندگی (C3) برابر ۲/۸۴، ۴/۲۵ و ۶/۶ در نظر گرفته شد. نمودار ۱۵ تغییرات نیروی ماکزیمم نسبت به ضخامت پوسته برای نمونه با طول ۳ میلی‌متر را نشان