

Numerical Damage Detection in Composite Pipe Adhesive Joints Using Ultrasonic Guided Waves

Salar Jouzani¹, MohammadHossein Soorgee^{2*}

1- MSc. Student, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshty University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshty University, Tehran, Iran

* mh_soorgee@sbu.ac.ir

Abstract

Pipelines are commonly used in various industries such as oil and gas, water supplies and petrochemical. Composite Pipes are appropriate choice due to some properties including high strength, lightness and high corrosion resistance. It is necessary to employ Nondestructive Tests (NDT) during construction as well as maintenance of such pipelines, in order to reduce costs. One of the damages that may occur on composite pipes is joint failure which normally happens during construction and operation of the pipes. Furthermore, the most common method of joints in composite pipes is adhesive joint. Ultrasonic Guided Wave (UGW) is suitable method of NDT. In this research, a numerical simulation of L(0,1) guided mode is carried out in order to inspect the adhesive joint between two composite pipes. A parametric study is performed on damage length variation in order to extract suitable feature from damaged pipe signals for damaged joint identification. Using two sensors which are located before and after the adhesive joint, with the purpose of receiving the reflected and transmitted ultrasound wave from the joint, two signals energy indices have been developed for damaged joint identification.

Keywords: Ultrasonic Guided Waves, Adhesive Joint Inspection, Composite pipes, Finite Element Method.

بازرسی اتصال چسبی لوله‌ی کامپوزیتی با استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی به روش عددی

سالار جوزانی^۱، محمدحسین سورگی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی تهران
 ۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران
 * mh_soorgee@sbu.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از خطوط لوله در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، آبرسانی و پتروشیمی بسیار پرکاربرد است. لوله‌های کامپوزیتی دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی نظیر سبکی، استحکام بالا و مقاومت به خوردگی گزینه مناسبی جهت استفاده در خطوط لوله می‌باشند. با توجه به صرف هزینه بالا برای نصب و تعمیر این لوله‌ها، استفاده از آزمون‌های غیرمخرب برای پیشگیری از بروز آسیب‌های احتمالی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از آسیب‌هایی که در حین ساخت و بهره‌برداری ممکن است رخ دهد، آسیب در اتصال لوله می‌باشد. اتصال چسبی یکی از رایج‌ترین انواع اتصالات میان لوله کامپوزیتی می‌باشد. استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی بعنوان یکی از آزمون‌های غیرمخرب جهت بازرسی اتصالات لوله‌های کامپوزیتی روشی مناسب و دقیق می‌باشد. در این مقاله شبیه‌سازی انتشار یک مود متقارن از امواج هدایت‌شده فراصوتی $L(0,1)$ جهت بازرسی اتصال چسبی میان دو لوله کامپوزیتی انجام شده است. تغییرات طول خرابی اتصال چسبی مورد بررسی قرار گرفته تا شاخص مناسب از سیگنال دریافتی جهت شناسایی اتصال معیوب تعیین گردد. با استفاده از دو سنسور که یکی قبل و دیگری بعد از اتصال چسبی جهت دریافت سیگنال‌های بازگشتی و عبوری قرار داده شده‌اند، دو شاخص انرژی مناسب جهت شناسایی اتصال معرفی مشخص شده است.

واژگان کلیدی: امواج هدایت‌شده فراصوتی، بازرسی اتصال چسبی، لوله کامپوزیتی، روش اجزاء محدود.

۱- مقدمه

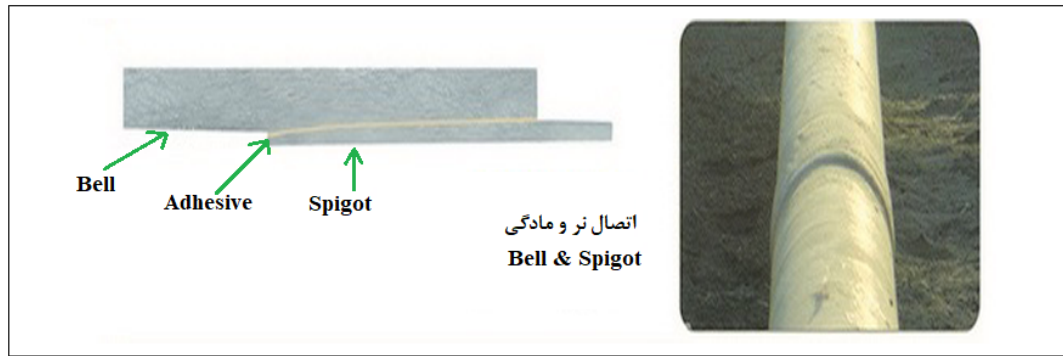
کیلومتر و خطوط انتقال نفت و سوخت نزدیک به ۲۳ هزار کیلومتر می‌باشد. از آنجایی که ساخت لوله‌های بلند برای استفاده در مسافت‌های طولانی میسر نیست لذا استفاده از اتصالات میان لوله‌های ساخته شده ضروری بنظر می‌رسد. برای مونتاژ لوله‌های کامپوزیتی اتصالات مختلفی نظیر اتصالات نر و مادگی چسبی^۲، فلنج، اتصالات جوشی یا لایه‌گذاری^۳ و سایر اتصالات نیز بکار گرفته می‌شوند. یکی از رایج‌ترین اتصالات لوله‌های کامپوزیتی استفاده از اتصال نر و مادگی چسبی است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. پایش سلامت سازه‌های مهندسی یکی از موضوعات پژوهشی چند رشته‌ای است که در سال‌های اخیر به واسطه اهمیت این سازه‌ها و دستیابی به روش‌های نوین در تشخیص سلامت آن‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. می‌توان ادعا کرد که پایش سلامت سازه‌های مهندسی و اتصالات بین آن‌ها می‌تواند هزینه‌هایی

امروزه استفاده از سیستم خط لوله در صنعت نفت و گاز، آبرسانی، سیستم‌های تهویه، سیستم‌های خنک‌کننده نیروگاه‌ها و انتقال محصولات پتروشیمی روشی رایج محسوب می‌شود. لوله‌های فولادی ویژگی‌های مناسبی نظیر استحکام بالا، سفتی و تحمل دمای بالا جهت استفاده در خطوط لوله نفت و گاز در زیر دریا را دارا هستند اگرچه مقاومت پایین در برابر خوردگی یک معضل غیرقابل چشم‌پوشی برای استفاده این لوله‌ها می‌باشد. لوله‌های کامپوزیتی علیرغم ویژگی‌هایی نظیر سبکی، استحکام و سفتی زیاد، قابلیت استفاده در شرایط، دما و فشار بالا دارای مقاومت به خوردگی زیادی نیز می‌باشند. از این‌رو استفاده از لوله‌های کامپوزیتی در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و آبرسانی بطور روزافزون در حال افزایش است (گریسیل [۱]). بطور کلی در ایران خطوط انتقال گاز بیش از ۳۶ هزار

³ Butt Wrap – Lay Up Joint

¹ Assembly

² Bell and Spigot



شکل ۱- نحوه اتصال نر و مادگی

قوامیان [۴] در یک مقاله مروری به استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی و بررسی انواع عیوب در لوله‌ها از جمله سازه‌های مدفون در خاک یا زیر آب و دارای پوشش توسط این روش غیرمخرب پرداخته است. هومن نخلی [۵] لوله‌ی معیوب فلزی را با استفاده از روش امواج هدایت‌شده فراصوتی به‌روش آنالیز فرکانسی و مطالعه پارامتری پیک فرکانسی مود پیچشی $T(0,1)$ موجود در سازه مورد ارزیابی قرار داده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد معمولاً استفاده از مود $T(0,1)$ جهت بازرسی عیوب محیطی مناسب‌اند. نیو ژادونگ [۶] به بررسی یک ترک محیطی با استفاده از امواج هدایت‌شده و ایجاد مود پیچشی در یک سازه لوله‌ای پرداخته است. در حضور مود پیچشی موده‌ای خمشی $F(1,n)$ نیز در تحریک با یک تراگذار^۳ وجود دارند. در این مقاله به روش عددی و تجربی با حذف موده‌ای خمشی به بررسی امواج بازگشتی از مود پیچشی پرداخته و نشان می‌دهد انرژی پیک بازگشتی با اندازه طول ترک رابطه خطی دارد و با زیاد شدن اندازه طول ترک، انرژی مود بازگشتی نیز افزایش می‌یابد. پوتیلاث [۷] در یک مطالعه پارامتریک به بررسی امواج هدایت‌شده و ضریب عبور مود متقارن در دو ورق کامپوزیتی با اتصال چسبی میان آن دو پرداخته و نشان داده با وجود عیب در اتصال چسبی، دامنه سیگنال عبوری در ورق مقابل به تراگذار دچار افت می‌شود. در این مقاله شرایط خواص مواد و ضخامت چسب نیز مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. گریسیل در مقاله [۸] به روش تجربی اتصال چسبی دو لوله کامپوزیتی را با بکارگیری امواج التراسونیک کلاسیک بررسی نموده است.

را از طریق جایگزینی برنامه تغییراتی زمان‌بندی شده یا استراتژی نگهداری بر مبنای شرایط سازه و از این طریق زمینه صرفه‌جویی در هزینه‌های غیرضروری تعمیر و نگهداری را فراهم آورد. برای اهمیت بیشتر بازرسی می‌توان به حادثه بلینگهام^۱ اشاره داشت. انفجار بلینگهام در ۱۰ ژوئن سال ۱۹۹۹ در واشنگتن رخ داد. ترکیدن لوله ۱۶ اینچ منجر به جاری شدن ۲۳۷۰۰۰ گالن گازوئیل در مناطق مسکونی و صنعتی بلینگهام شد. تقریباً یک و نیم ساعت بعد از ترکیدن لوله، گازوئیل

جاری شده آتش گرفت. خسارت وارده در این انفجار ۴۵ میلیون دلار تخمین زده شده است (اندرو تین [۲]). کامپوزیت‌ها در زمینه آسیب یا عیوب حین ساخت بسیار مستعدتر از فلزات هستند. در مواد کامپوزیتی عیوب زیادی در حین ساخت و بهره‌برداری نظیر لایه‌ای شدن^۲ رشد ترک در ماتریس سازه کامپوزیتی و سایر عیوب بوجود می‌آید اما یکی از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اتصال چسبی معیوب لوله نیز اشاره داشت (کابرال [۳]). با بهره‌گیری از انواع روش‌های غیرمخرب می‌توان به بررسی وضعیت اتصال پرداخت. یکی از بهترین روش‌های بازرسی غیرمخرب این اتصالات بهره‌گیری از امواج هدایت‌شده فراصوتی است. استفاده از این روش علاوه بر سرعت بالا و هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌های غیرمخرب در زمینه بازرسی لوله، امکان بررسی مسافت بیشتر لوله و نقاط غیرقابل دسترسی در سازه را نیز فراهم می‌کند. لذا استفاده از این روش برای بازرسی اتصالات چسبی لوله‌های کامپوزیتی می‌تواند روش کارآمدی محسوب شود.

³ Transducer

¹ Bellingham

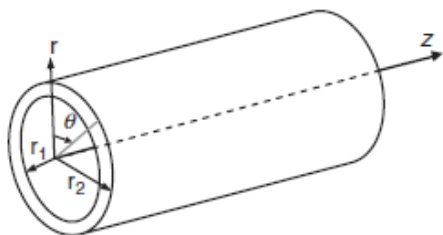
² Delamination

نمونه از خرابی در ناحیه اتصال چسبی لوله کامپوزیتی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. با استناد بر مقالات گوان [۸] و عسگری [۹] استفاده از مودهای $L(0,1)$ و $L(0,2)$ انتخاب مناسبی برای بازرسی اتصال می‌باشد زیرا این مود متقارن بوده و برای بازرسی عیوب شعاعی و محوری بر خلاف مود $T(0,1)$ مناسب‌تر از سایر مودها می‌باشد. از آنجایی که در این سازه حساسیت بازرسی اتصال نسبت به جابجایی در راستای شعاعی بالاتر به نظر می‌رسد، لذا برای تحریک سازه از مود $L(0,1)$ استفاده شده است.



شکل ۲- خرابی دو لوله از محل اتصال چسبی (ریچارد لی [۱۰])

محوری دارای شماره محیطی $m=0$ می‌باشد در حالی که مودهای نامتقارن مودهای خمشی^۵ نیز نام‌گذاری می‌گردند (جوزف رز [۱۱]).



شکل ۳- استوانه توخالی بعنوان مدل لوله

تئوری امواج هدایت شده فراصوتی توسط جوزف رز [۱۱] ارائه شده است.

از ویژگی‌های این امواج وابستگی سرعت موج به فرکانس و هندسه سازه است که این پدیده، پدیده پاشندگی^۶ نام دارد.

در این مقاله با استفاده از دامنه پیک‌های برگشتی کیفیت و نحوه اتصال چسب مورد بازرسی قرار گرفته و در عین حال الزام دسترسی به تمام نقاط اتصال چسبی در این روش می‌تواند یکی از معایب آن و دلیل انتخاب امواج هدایت شده فراصوتی در این مقاله باشد.

از آنجایی که در ابتدا ضرورت بازرسی لوله‌ها و اتصالات میان آن‌ها بیان شد لذا در این مقاله هدف بازرسی اتصال چسبی میان دو لوله کامپوزیتی با استفاده از امواج هدایت شده فراصوتی و تشخیص یک شاخص جهت شناسایی خرابی اتصال و جلوگیری از خرابی لوله از محل اتصال می‌باشد. دو

۲- امواج هدایت شده در سازه‌های استوانه‌ای

در این قسمت به بررسی امواج هدایت شده فراصوتی و مودهای مختلف آن در سازه‌های استوانه‌ای شکل بعنوان مدل لوله پرداخته می‌شود. زمانی که حرکت ذره در استوانه توخالی مطرح می‌شود، امواج هدایت شده انتشار یافته در داخل لوله شامل موج طولی^۱ و موج پیچشی^۲ می‌شوند. حرکت ذره در امواج طولی در راستای r و Z بوده در حالی که حرکت موج پیچشی در راستای θ صورت می‌گیرد. با توجه به پخش انرژی در جهت محیطی در امواج هدایت شده، می‌توان مودهای این امواج را بصورت متقارن محوری^۳ و نامتقارن محوری^۴ طبقه‌بندی نمود. یک گروه مود طولی بصورت $L(m,n)$ ، مود پیچشی بصورت $T(m,n)$ بیان می‌شوند. در اینجا m مرتبه محیطی یک مود و n نشان دهنده شماره مود هر گروه می‌باشد. یک مود متقارن

⁴ Non- Axisymmetric

⁵ Flexural

⁶ Dispersion

¹ Longitudinal

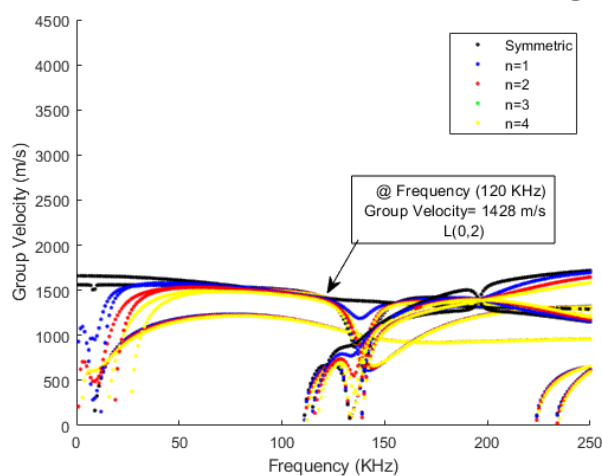
² Torsional

³ Axisymmetric

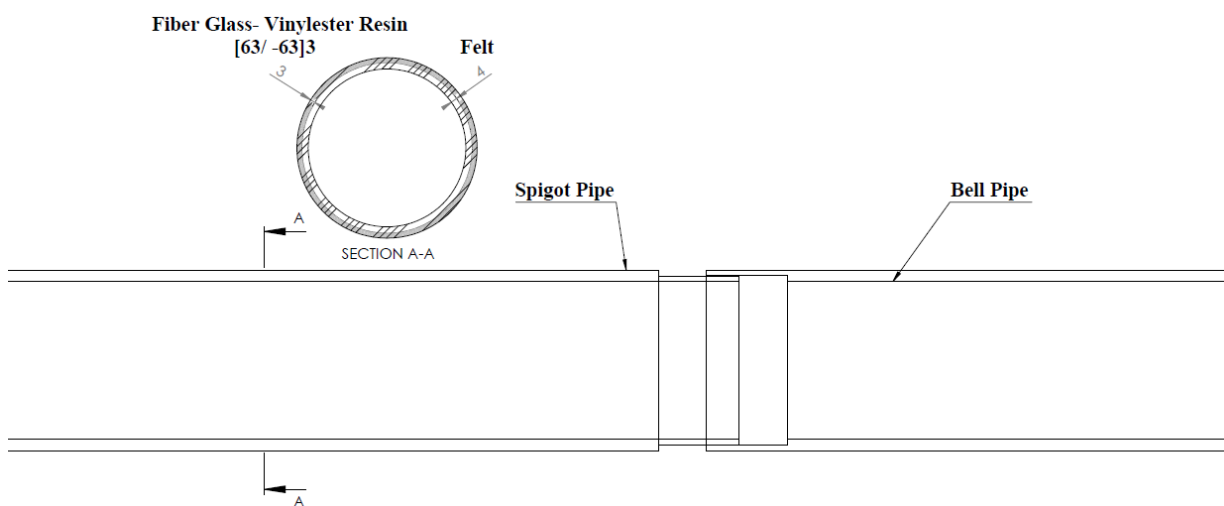
۳- تعریف مسئله

برای شبیه‌سازی انجام شده در این مسئله دو لوله کامپوزیت فایبرگلاس با ماتریس وینیل استر^۲ در نظر گرفته شده است. این لوله به ضخامت ۷ میلی‌متر بوده که ۴ میلی‌متر ابتدایی از جنس نمد و ۳ میلی‌متر بالا از کامپوزیت ساخته شده است. گفتنی است این سازه مناسب برای مقاومت در برابر خوردگی بوده و قسمت کامپوزیتی نیز جهت افزایش استحکام سازه می‌باشد. در شکل ۵ دو لوله و نوع اتصال قابل مشاهده است. خواص سازه نیز در جدول ۱ نیز درج شده است. در این مسئله تراگذار بر روی لوله اول قرار گرفته و دو سنسور نیز مطابق شکل ۶ یکی قبل از اتصال (S1) و دیگری بر روی لوله دیگر پس از اتصال (S2) قرار گرفته تا سیگنال‌های برگشتی بر روی لوله اول و عبوری لوله دوم را دریافت کنند. شکل ۶ هندسه مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد.

وابستگی سرعت به فرکانس در قالب منحنی‌های پاشندگی ارائه می‌شود. این منحنی که نمودار سرعت بر حسب فرکانس برای مدهای مختلف ارتعاشی سازه در بازه فرکانسی است کمک می‌کند مود مناسب جهت بازرسی انتخاب کرده و سرعت مود انتخابی نیز از این منحنی بدست می‌آید. راه دیگر رسیدن به منحنی پاشندگی استفاده از روش نیمه تحلیلی اجزاء محدود^۱ بوده که توسط مارزانی [۱۲] بصورت کامل برای سازه استوانه‌ای تحلیل و بررسی شده است. منحنی پاشندگی سرعت فاز برای سازه کامپوزیتی استفاده شده در این مسئله در شکل ۴ قابل رویت است.



شکل ۴- منحنی پاشندگی سرعت فاز برای سازه مورد بازرسی



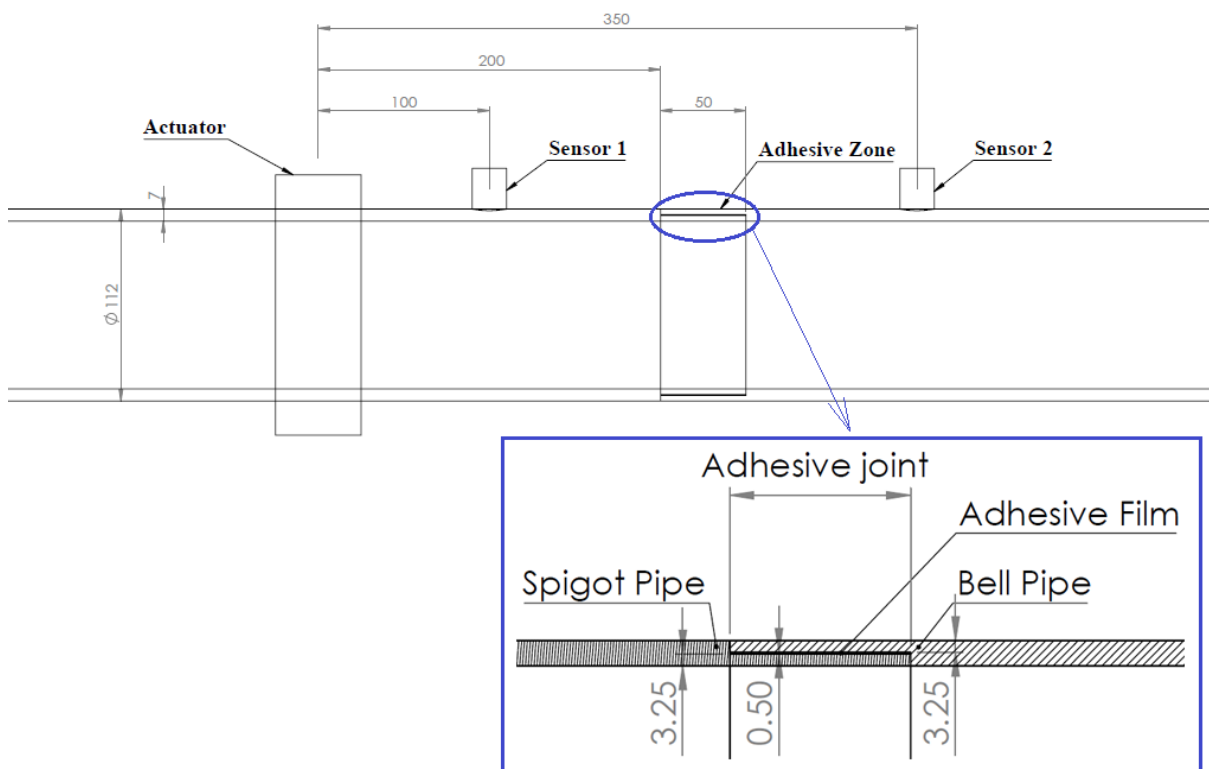
شکل ۵- دو لوله نر و ماده استفاده شده در این تحقیق

² Glass Fiber- Vinylester Matrix

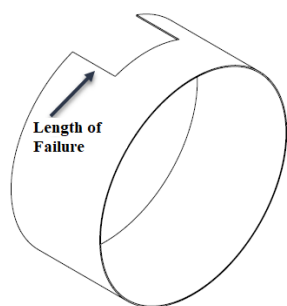
¹ Semi Analytical Finite Element (SAFE)

جدول ۱- خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده شده

ماده	ρ (Kg/m ³)	G_{23} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν	E_3 (GPa)	E_2 (GPa)	E_1 (GPa)
لایه نمد	۱۶۰۰	۴	۴	۶	۰.۳	۵	۱۴	۱۴
لایه الیاف پیچی	۱۸۰۰	۳.۵	۴.۵	۴.۵	۰.۲۵	۳	۳	۲۸



شکل ۶- تعریف مسئله (ابعاد به میلی‌متر)



شکل ۷- نحوه ایجاد عیب در لایه چسب

در این شبیه‌سازی مسئله به روش صریح^۱ حل شده است. از آنجا که نوع تحریک سازه بصورت اعمال فشار در ناحیه تراگذار بوده و فشار در محل قرارگیری سنسورها خوانده می‌شود استفاده از حل به روش صریح می‌بایست مد نظر

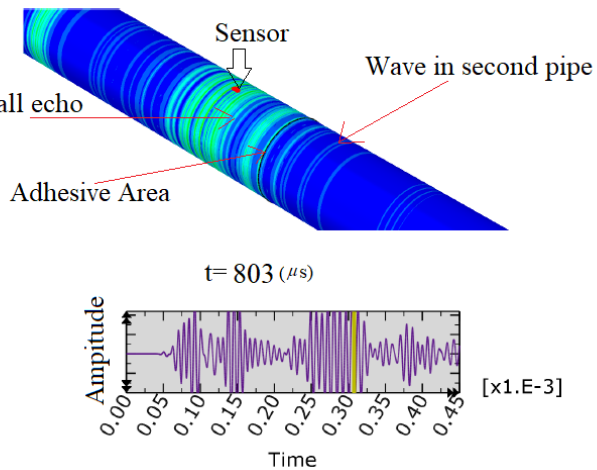
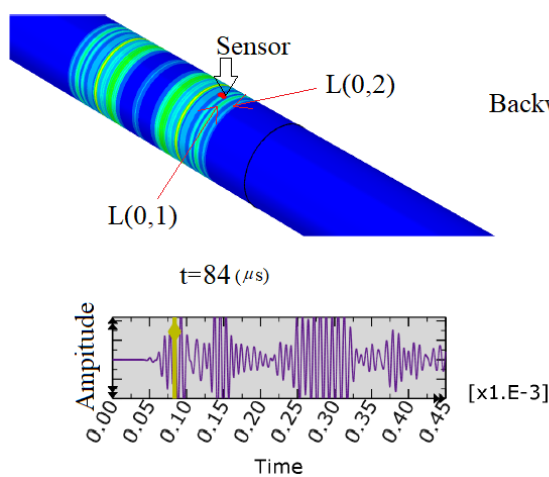
۴- شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی در راستای انجام این پروژه از نرم‌افزار ABAQUS CAE استفاده شده است. لوله‌های کامپوزیتی و چسب هردو بصورت یک مدل الاستیک شبیه‌سازی شده‌اند. فرکانس بازرسی ۱۲۰ کیلوهرتز انتخاب شده و یک سیگنال تون‌پرست ۵ سیکل توسط تراگذار جهت بازرسی اتصال چسبی این سازه تولید شده است. همچنین در این شبیه‌سازی نحوه ایجاد خرابی در اتصال چسبی بصورت حذف قسمتی از لایه چسب بوده و در طول‌های مختلف یا به عبارتی دیگر جهت بررسی خرابی‌های مختلف ایجاد شده است. شکل ۷ نحوه ایجاد خرابی در چسب را توضیح می‌دهد.

^۱ Explicit

داشته در تحریک مود $L(0,1)$ ظاهر شده و باعث ایجاد پدیده پاشندگی در موج می‌شود. با بررسی منحنی پاشندگی شکل ۴ مشاهده می‌شود سرعت مود $L(0,2)$ ۱۴۲۸ متر بر ثانیه گزارش شده است که این مقدار با استناد بر شبیه‌سازی‌های انجام شده شکل ۸ و همچنین سیگنال‌های دریافتی در سنسور دوم شکل ۱۰، ۱۶۰۵ متر بر ثانیه گزارش شده است که در حدود ۱۱٪ خطا را نشان می‌دهد که تا حدود قابل قبول می‌باشد.

سپس با تشخیص مودهای متقارن $L(0,1)$ و به $L(0,2)$ به کمک منحنی پاشندگی، مسئله بررسی می‌شود.



شکل ۸- شبیه‌سازی انتشار موج در سازه کامپوزیتی

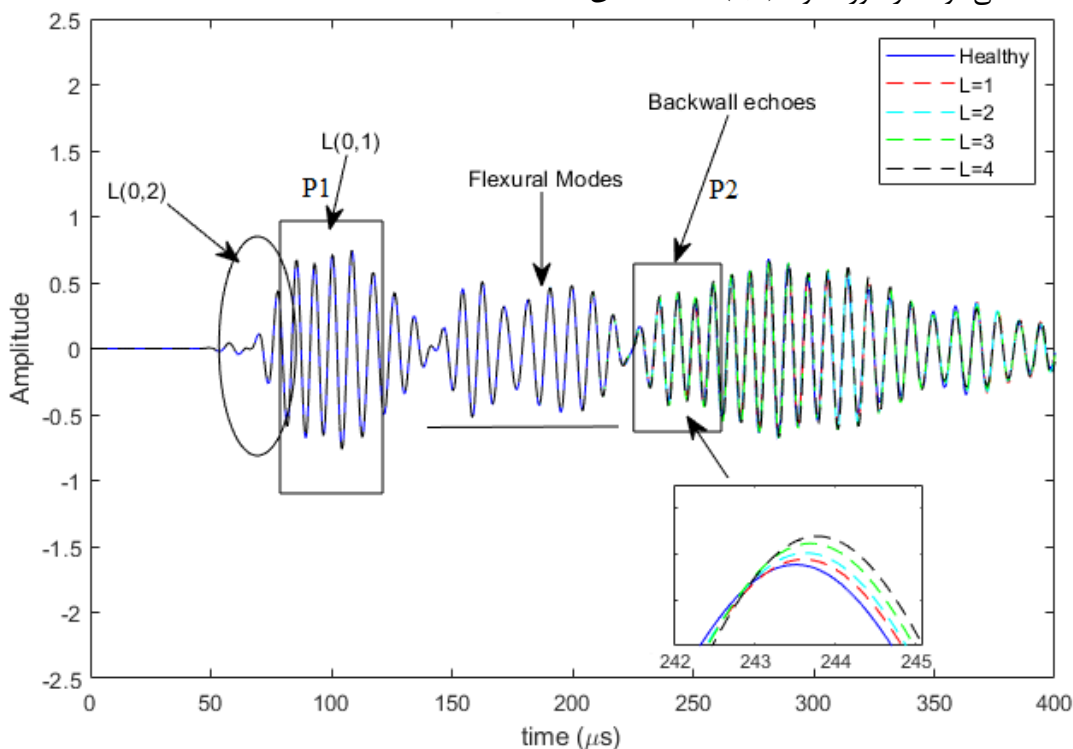
سنسور S1 نشان می‌دهد که پیک‌های بازگشتی از مودهای $L(0,1)$ و $L(0,2)$ دارای دامنه متفاوتی بوده و مبین آن می‌باشد که هرچه طول خرابی اتصال بزرگتر بوده، انرژی سیگنال بازگشتی بیشتر می‌باشد یا عبارت دیگر انرژی کمتری از سیگنال اولیه میرا شده یا به لوله دوم فرستاده شده است. P2 در شکل ۹ پیک بازگشتی مود $L(0,2)$ بوده و همانطور که نشان داده شده با افزایش طول خرابی، پیک P2 نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ دامنه مود بازگشتی از اتصال چسبی را در طول‌های مختلف خرابی نشان می‌دهد. انرژی سیگنال‌های دریافتی سنسور S2 نیز به تعبیری دیگر فرضیه قبلی را تایید می‌کند. شکل ۱۰ نیز سیگنال فیلتر شده دریافتی از سنسور S2 می‌باشد. با استفاده از منحنی پاشندگی که در مراحل قبل از آن استفاده شد دو مود متقارن تشخیص داده شد و به بررسی دامنه مودهای $L(0,1)$ و $L(0,2)$ پرداخته می‌شود. همانطور که شکل ۱۰

قرار گیرد. المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی این پروژه نیز از نوع تنش سه‌بعدی خطی بصورت صریح می‌باشد. پس از انجام شبیه‌سازی به بررسی صوت عبوری از سنسور اول ($S1$) و سنسور دوم ($S2$) که بر روی لوله دیگر قرار دارد پرداخته می‌شود. در این شبیه‌سازی و همانطور که در [۸] بحث شده است، در هنگام تحریک یک مود در یک سازه، بدلیل وجود پهنای باند فرکانسی تحریک، چندین مود همزمان تحریک شده و در سازه منتشر می‌شوند. با کمک تحریک متقارن تمرکز اصلی بر روی مود متقارن بوده در صورتی که مودهای دیگر نیز در سازه انتشار می‌یابند. از آنجایی که مود $L(0,2)$ سرعت بالاتری نسبت به سایرین

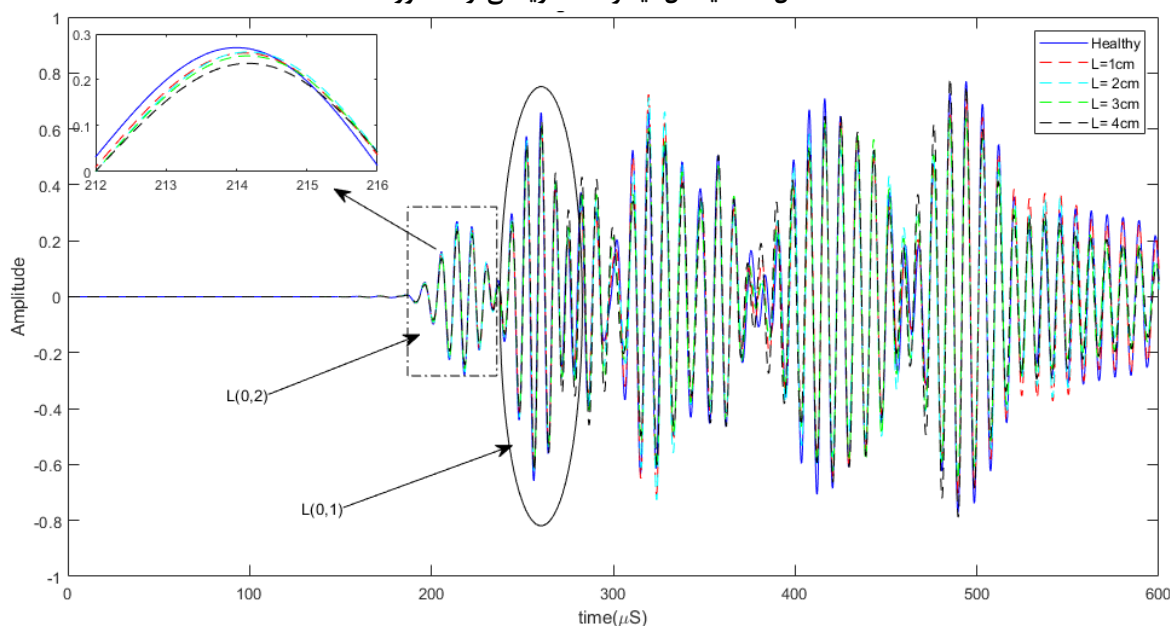
پس از انتشار مودهای متقارن، مودهای نامتقارن نیز در سازه ظاهر می‌شوند که این مودها در شکل ۹ نشان داده شده است. اما همانطور که در شکل ۸ مشخص شده، پس از حرکت مودها، امواج به انتهای لوله اول برخورد می‌کنند. در قسمت انتهایی لوله اول (قسمت نر) با تغییر هندسه لوله کامپوزیتی، انتظار پدیده تبدیل مود و همچنین تغییر در سرعت مودهای دیگر نیز می‌رود. قسمتی از صوت بازگشتی از انتهای لوله به اتصال چسبی برخورد داشته و میرا می‌شوند همچنین قسمتی از آن نیز به خود اتصال وارد شده و از اتصال به لوله دوم انتقال می‌یابد که این موضوع در قسمت دوم شکل ۸ نیز قابل مشاهده است. قسمتی از این صوت نیز بعنوان پیک بازگشتی در سنسور S1 دریافت شده است. این پیک (P2) در شکل ۹ نشان داده شده است. بررسی سیگنال‌های دریافتی دو سنسور S1 و S2 می‌تواند منجر به استخراج شاخص شود. بررسی سیگنال‌ها در

معیوب نیز بمانند مود قبلی نسبت به حالت اتصال سالم دچار افت شده اما همانطور که در شکل ۱۱ (قسمت ب) قابل ملاحظه است، با افزایش طول خرابی اتصال چسبی دامنه مود $L(0,2)$ سیگنال دریافتی یک روند نزولی را طی کرده که می‌تواند پارامتر مناسبی جهت بازرسی طول خرابی اتصال چسبی در کنار افزایش دامنه سیگنال بازگشتی از اتصال در سنسور S1 در نظر گرفته شود.

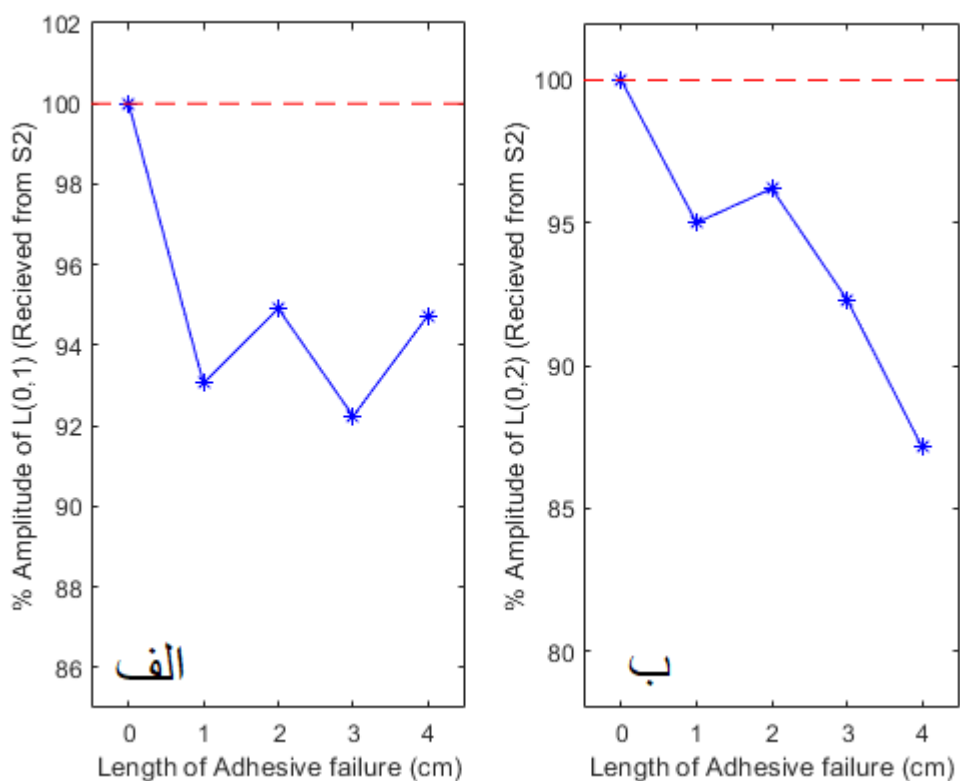
نشان می‌دهد سیگنال دریافتی در مود $L(0,1)$ و مود متقارن دیگر یعنی $L(0,2)$ دچار افت دامنه شده است. این افت برای طول‌های خرابی مختلف در شکل ۱۱ ترسیم شده است. همانطور که قابل ملاحظه است در مود $L(0,1)$ تمامی دامنه‌های معیوب نسبت به حالت اتصال سالم دچار افت شده اما این روند با افزایش طول خرابی اتصال چسبی تغییر مشخصی ندارد و صرفاً یک افت دامنه نسبت به حالت اتصال سالم مشاهده می‌شود. در مورد مود $L(0,2)$ دامنه‌های



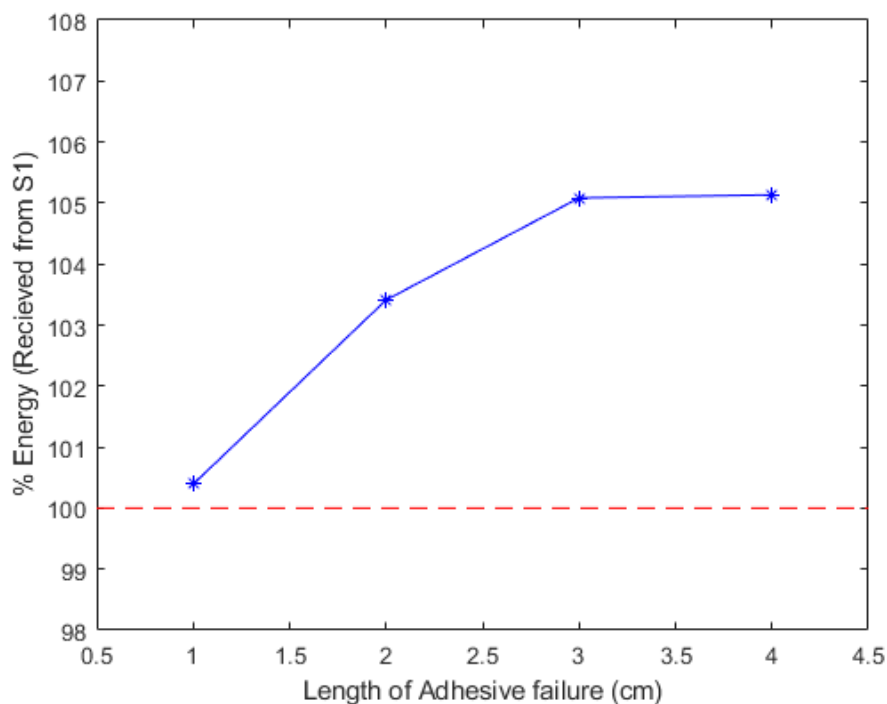
شکل ۹- سیگنال فیلتر شده دریافتی از سنسور S1



شکل ۱۰- سیگنال فیلتر شده دریافتی از سنسور S2



شکل ۱۱- الف) دامنه مود $L(0,1)$ در مواجهه با طول‌های مختلف خرابی اتصال چسبی ب) دامنه مود $L(0,2)$ در مواجهه با طول‌های مختلف خرابی اتصال چسبی



شکل ۱۲- دامنه مود $L(0,2)$ بازگشتی از اتصال چسبی در سنسور ۱

۵- نتایج

سیگنال دریافتی در سنسور S1 افزایش می‌یابد. همچنین دامنه مدهای متقارن $L(0,2)$ و $L(0,1)$ دریافتی از سنسور S2 نیز دچار افت می‌شود. بررسی حالات مختلف خرابی نشان می‌دهد دامنه دریافتی مود $L(0,2)$ با افزایش طول خرابی اتصال چسبی روند نزولی داشته و می‌تواند به همراه مود بازگشتی از چسب در سنسور S1 شاخص مناسبی جهت شناسایی خرابی و طول خرابی اتصال چسبی باشد. گفتنی است در این شبیه‌سازی شناسایی اتصال معیوب و بررسی پارامتری طول خرابی اتصال چسبی مورد نظر بوده و بررسی کیفیت اتصال چسبی یا تشخیص نوع خرابی اتصال با استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی در قدم‌های بعدی این پروژه می‌باشد.

در این مقاله به بررسی اتصال چسبی میان دو لوله کامپوزیتی با استفاده از امواج هدایت‌شده فراصوتی پرداخته شده است. با تحریک مود متقارن $L(0,1)$ صوت در درون سازه کامپوزیتی انتشار یافته و با استفاده دریافت و تغییرات صوت ارسالی اتصال معیوب چسبی میان دو لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از بررسی سیگنال‌های دریافتی دو سنسور S1 و S2، دو شاخص مناسب جهت شناسایی اتصال معیوب و بررسی طول خرابی اتصال چسبی معرفی شد. همانطور که نشان داده شد، با افزایش طول خرابی اتصال چسبی انرژی مود بازگشتی از اتصال چسبی در

۶- مراجع

- [6]. Niu, X., et al., *Piezoelectric transducer excitation for guided waves propagation on pipeline with flexural wave modes*. 2018.
- [7]. Puthillath, P.K., et al. *ULTRASONIC GUIDED WAVE INSPECTION OF ADHESIVE JOINTS: A PARAMETRIC STUDY FOR A STEP-LAP JOINT*. in *AIP Conference Proceedings*. 2009. AIP.
- [8]. Guan, R., et al., *Guided waves for damage identification in pipeline structures: A review*. 2017. 24(11): p. e2007.
- [9]. Asgari, M., et al., *Detection and discrimination of symmetric and asymmetric defects by using ultrasonic guided waves*.
- [10]. Lee, R., *Oil and Gas Inspection: NDT in Non-Metallic Materials*. 2015, Federal Institute for materials Research and testing.
- [11]. Rose, J.L., *Ultrasonic guided waves in solid media*. 2014: Cambridge university press.
- [12]. Marzani, A., et al., *A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides*. 2008. 318(3): p. 488-505.
- [1] Gresil, M., A. Poohsai, and N.J.P.E. Chandarana, *Guided wave propagation and damage detection in composite pipes using piezoelectric sensors*. 2017. 188: p. 148-155.
- [2]. Thien, A.B., *Pipeline structural health monitoring using macro-fiber composite active sensors*. 2006, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).
- [3]. Cabral, T.D., *A first approach to structural health monitoring of adhesive bonded joints in pipelines using integrated fiber optic sensors*. 2016.
- [4]. Ghavamian, A., et al., *Detection, localisation and assessment of defects in pipes using guided wave techniques: a review*. 2018. 18(12): p. 4470.
- [5]. Nakhli Mahal, H., K. Yang, and A.K.J.A.S. Nandi, *Defect Detection using Power Spectrum of Torsional Waves in Guided-Wave Inspection of Pipelines*. 2019. 9(7): p. 1449.