

# مطالعه عددی و تجربی استفاده از روش انعکاس ضربه (Impact-Echo)

## در اندازه‌گیری ضخامت ورق‌های کامپوزیت الیافی دو جهته

محمد مهدی امیری\*

استادیار

پژوهشگاه صنعت نفت

amirimm@ripi.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳

### چکیده

تاکنون از روش انعکاس ضربه<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری و ارزیابی غیرمخرب سازه‌های بتنی و سنگی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و باندهای فرودگاه استفاده شده است، اما در این مقاله برای اولین بار کاربرد این روش در اندازه‌گیری و تعیین ضخامت ورق‌های کامپوزیتی به صورت تحلیلی و تجربی بررسی شده است. سازه‌های کامپوزیتی دارای کاربری گسترده‌ای در صنایع مختلف هستند و نیاز به بازرسی و اندازه‌گیری ضخامت آنها همواره احساس می‌شود. این روش می‌تواند ضخامت قطعات کامپوزیتی را سریع و حتی در مواردی که دسترسی به یک سمت قطعه وجود دارد، تعیین کند. برای این منظور ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده از فیبر شیشه (E-Glass) و اپوکسی به صورت لایه‌گذاری دستی و با در نظر گرفتن ویژگی‌های ایزوتروپیک در ضخامت‌های مختلف ساخته و به صورت عددی مدل شده‌اند تا اثر ضخامت بر روی نتایج به دست آمده مشخص شود. نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی امواج و همچنین تحلیل المان محدود حرکت موج با نتایج به دست آمده از دستگاه به منظور بررسی دقت، صحت و تکرارپذیری نتایج مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بین ضخامت‌های واقعی اندازه‌گیری شده ورق‌ها و ضخامت‌های به دست آمده از روش تحلیلی و دستگاه Impact-Echo نزدیکی قابل قبولی وجود دارد و استفاده از این روش در بازرسی قطعات کامپوزیتی امکان‌پذیر بوده و می‌توان بر روی گسترش کاربرد آن در مطالعات آتی به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب (NDT) برای قطعات کامپوزیت متمرکز شد.

**واژگان کلیدی:** انعکاس ضربه، موج P، ورق کامپوزیت، آزمون غیرمخرب، اندازه‌گیری ضخامت

### ۱. مقدمه

سانسالونه [۱] ابداع و مورد استفاده قرار گرفت. کاربرد این روش تنها محدود به اندازه‌گیری ضخامت سازه‌های بتنی نبوده و شامل تشخیص عیوبی مانند حفره‌ها، مک‌ها و تورق

روش انعکاس ضربه از اوایل دهه ۸۰ میلادی به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب برای سازه‌های بتنی توسط

(لایه لایه شدگی) است. کیم و همکاران [۲] از این روش برای آزمودن یکپارچگی شفت‌های بتنی استفاده کردند. آنها در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج تجربی از مدل‌سازی عددی بهره برده‌اند. همچنین آنها نشان دادند روش انعکاس ضربه قادر به شناسایی عیوب در شفت‌های بتنی در حالتی است که میزان کاهش در سطح مقطع شفت در اثر عیب بیشتر از ۵۰٪ نباشد. استارولاکیس و همکاران [۳] شناخت عیوب زیرسطحی توسط روش انعکاس ضربه را مطالعه کردند. آنها همچنین برای تحلیل این پدیده از روش حل عددی بهره بردند و در این راستا از یک شبکه عصبی برای طبقه‌بندی داده‌ها حاصل از برخورد موج با عیوب داخلی استفاده کردند.

ویلیان و همکاران [۴] مطالعه‌ای را به منظور تعیین مدول یانگ شش قطعه بتنی به عنوان تابعی از عیوب داخلی و درصد آب درون بتن با استفاده از روش انعکاس ضربه انجام داده‌اند. این مطالعه با استفاده از تحلیل فرکانسی امواج تولید شده با استفاده از برخورد یک گوی فلزی با سطح قطعه انجام پذیرفته است. وانگ و همکاران [۵] روشی جدید به منظور تعیین نسبت پواسون مواد با استفاده از روش انعکاس ضربه معرفی کرده‌اند. در این شیوه فرکانس رزونانس امواج طولی و عرضی ناشی از ضربه در استوانه‌های بتنی با ابعاد مشخص مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از تحلیل رگرسیون معادلاتی برای توصیف نفوذ امواج طولی و عرضی مورد استفاده قرار گرفته است. هسپائو و همکاران [۶] روشی جدید برای آزمون غیرمخرب آ قطعات بتنی پیشنهاد داده‌اند. آنها از تحلیل عددی به منظور تحلیل بازگشت امواج استفاده کرده‌اند. موری و همکاران [۷] نیز استفاده از روش انعکاس ضربه به عنوان روشی برای ارزیابی قطعات بتنی استفاده کرده‌اند. در این مطالعه از پاسخ دینامیک سازه‌های بتنی که تحت بارگذاری بارهای ضربه‌ای قرار گرفته‌اند استفاده شده است. همچنین تعیین عیوبی که دارای عمق زیادی نیستند از دیگر مواردی است که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته

است. در زمینه شبیه‌سازی آزمایشات تجربی نیز پژوهش‌های متعددی انجام شده است که از بین آنها می‌توان به کار چراغ‌پور و همکاران اشاره داشت [۸]. آنها شبیه‌سازی نمونه‌های تجربی در حالت پاسخ دینامیک و تحلیل کنترلی انجام داده‌اند و مدلی منطبق با واقعیت را نزدیک به آزمایشات تجربی انجام شده شبیه‌سازی کرده‌اند. ژائویان و همکاران [۹] روش اندازه‌گیری جدیدی با استفاده از امواج صوتی ارائه داده‌اند. آنها این پژوهش را روی فرآیند ریخته‌گری و تزریق قالب انجام داده‌اند. طباطبائی قمی و همکاران [۱۰] اندازه‌گیری ضخامت قطعات بتنی به شیوه غیرمستقیم با استفاده از روش انعکاس ضربه را مطالعه کرده‌اند. در این بررسی آنها ابتدا با استفاده از روش انعکاس ضربه ضخامت قطعات بتنی را اندازه‌گیری کرده و سپس با استفاده از روش غیرمستقیم (انتقال ضربه با استفاده از یک میله فلزی) این آزمایشات را مجدداً تکرار کردند. این پژوهش نشان داد نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری ضخامت با استفاده از روش مستقیم در مقایسه با روش غیرمستقیم نزدیکی قابل قبولی با یکدیگر دارند.

هدف اصلی از انجام این پژوهش بررسی حرکت امواج الاستیک (تولید شده توسط یک ضربه) درون یک ورق کامپوزیتی به منظور تعیین ضخامت و تشخیص عیوب داخلی بوده است. با به‌کارگیری این روش که روش انعکاس ضربه نام دارد در بازرسی قطعات و ورق‌های کامپوزیت، سرعت انجام آزمون افزایش یافته و هزینه‌های انجام آن کاهش می‌یابد. از سمت دیگر این روش توانایی کاربرد در محیط‌های صنعتی و غیر آزمایشگاهی را داراست. پاسخ‌دهی سریع و دقت بالا از سایر ویژگی‌های این روش محسوب می‌شود. در این مقاله از دو روش آزمایشات تجربی بر روی ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه و رزین اپوکسی و همچنین مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار LS-Dyna صحت کاربرد این روش برای ورق‌های کامپوزیتی بررسی شده است. از مقایسه بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و نتایج

تجربی می‌توان توانایی این روش در اندازه‌گیری ضخامت و همچنین تعیین عیوب داخلی ورق‌های کامپوزیتی را ارزیابی کرد.

## ۲. تئوری موج ضربه

در آزمایش امواج تنشی (یا موج نوع P) با فرکانس پایین که از ۱ کیلوهرتز تا ۶۰ کیلوهرتز در حال تغییر هستند. این امواج در نتیجه برخورد یک گوی فلزی به سطح ورق بتنی تولید شده و به درون آن منتقل می‌شوند. طول موج امواج تنشی به‌طور نسبی بلند بوده و معمولاً در حدود چند سانتی‌متر است. لازم به توضیح است که این امواج بسیار متفاوت از امواج التراسونیک است که فرکانس آنها بین ۰/۱ تا ۱۵ مگاهرتز متغیر است.

به منظور مطالعه استفاده از روش انعکاس ضربه، ضربه بر روی سطح ورق بتنی اعمال می‌شود و ترنسدیوسری برای دریافت امواج منعکس شده از داخل ورق در مجاورت آن قرار داده می‌شود. در این روش امواج صوتی با استفاده از یک ضربه مکانیکی مانند یک چکش یا گوی فلزی، تولید می‌شوند. این امواج در داخل جسم به سه صورت انتشار می‌یابند؛ نوع اول امواج اتساعی<sup>۳</sup>، نوع دوم امواج برشی یا عرضی<sup>۴</sup> و نوع سوم امواج رایلی<sup>۵</sup> هستند. امواج الاستیک نوع P و S درون ورق‌های بتنی با جبهه‌های نیم دایروی نفوذ می‌کنند و در صورت برخورد با هرگونه حفره و یا سطح خارجی امواج منعکس می‌شوند. این امواج انعکاسی به وسیله ترنسدیوسری که در نزدیک محل اعمال ضربه قرار دارند دریافت می‌شود. پس از انعکاس مکرر امواج تنشی بین سطح اعمال ضربه و مرزهای خارجی جسم و یا عیوب داخلی جسم، سیگنال‌های دامنه بر حسب زمان دارای یک تناوب موقتی خواهند بود. به همین دلیل با استفاده از تبدیل فوریه سریع<sup>۶</sup> سیگنال به دامنه فرکانسی تبدیل می‌شود که منجر به ایجاد پیک در طیف فرکانسی شده و از آن طریق می‌توان عمق وجود عیب یا لایه‌های مرزی را به‌دست آورد.

تمامی تست‌ها به وسیله دستگاه Portable Impact Qualitest Echo System PIES که توسط شرکت International Inc ساخته شده، انجام پذیرفته است. این دستگاه دارای دو عدد ترنسدیوسر پیزوالکتریک است.

در پژوهش‌های ابتدایی [۱] که در زمینه مطالعه امواج P انجام شده بود فرض می‌شد که سرعت موج درون صفحات و ورق‌های صلب تفاوتی با سرعت موج درون سایر اجسام صلب ندارند. اما مطالعاتی که پس از آن و با تجهیزات دقیق‌تر انجام شد، نشان داد که سرعت موج مرتبط با فرکانس مربوط به دامنه بیشینه (نشان‌دهنده ضخامت) تقریباً برابر با ۹۶٪ سرعت موج P است. [۱]. این تفاوت از آنجایی نشأت می‌گیرد که امواج P سبب ایجاد مود معینی از ارتعاش در ورق می‌شوند که بر روی مود تولید کننده فرکانس ضخامت تأثیر مستقیم می‌گذارد. جابه‌جایی‌های پدید آمده به‌وسیله این مود سبب پدید آمدن اشکال تکرار شونده‌ای در فرم کلی موج می‌شود.

مطالعه روی اجسام مختلف که تحت ضربه قرار می‌گیرند نشان می‌دهد برای تمامی اجسام فرکانس اصلی یا اولین مود ارتعاش تحریک شده به‌وسیله ضربه با سرعت موج  $C_p$  و یک بعد ویژه  $A$  (بعدی که اندازه‌گیری آن در آن جسم مدنظر است) مرتبط است. این ارتباط از طریق رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$f = \frac{\beta C_p}{2A} \quad (1)$$

که در این رابطه فرکانس با  $f$ ، اندازه ویژه با  $A$ ، ضریب شکل با  $\beta$  و سرعت موج با  $C_p$  نشان داده شده‌اند. لازم به توضیح است که متغیر  $\beta$  با توجه به هندسه جسم صلب مورد مطالعه تعیین می‌شود. هنگامی که موج درون یک ورق به منظور تعیین ضخامت حرکت می‌کند، در آن اندازه ویژه  $A$  معادل با ضخامت  $T$  و مقدار عددی ضریب شکل  $\beta$  برابر با ۰/۹۶ در نظر گرفته می‌شود [۱]. در نتیجه رابطه ۱ در مورد حرکت موج تنشی درون صفحه به صورت رابطه ۲ بازنویسی می‌شود.

$$T = \frac{0.96C_p}{2f} \quad (2)$$

هرچند که کاربری اصلی روش انعکاس ضربه در زمینه سازه‌های بتنی و سنگی است اما در این مقاله کاربری آن در مورد ورق کامپوزیت فایبرگلاس بررسی شده است. در بخش‌های آتی این مقاله به روش انجام آزمایشات تجربی و همچنین روش حل عددی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری پرداخته شده است.

### ۳. انجام آزمایشات تجربی

برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی فایبرگلاس از الیاف شیشه بافته شده، اپوکسی ۸۲۸ به همراه حلال و سخت‌کننده (۱۰٪) Tetra استفاده شده است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. هر ورق دارای طول ۱۹۲۵ میلی‌متر و عرض ۹۷۰ میلی‌متر است که ضخامت‌های آنها به ترتیب برابر است با ۶/۰۲، ۸/۰۰، ۱۰/۰۵، ۱۲/۰۱ میلی‌متر. برای شبیه‌سازی حرکت موج درون ورق کامپوزیت از نرم‌افزار ANSYS/LSDYNA استفاده شده است.



شکل ۱. مراحل ساخت ورق کامپوزیت مورد استفاده در آزمایش انعکاس ضربه

تمامی ورق‌های کامپوزیت و پرتابه‌ها به صورت ایزوتروپیک سه بعدی مدل شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده است پرتابه به صورت یک کره سه بعدی به همراه سرعت اولیه مدل شده است. با استفاده از مشخصات موج تنشی ایجاد شده در نتیجه برخورد الاستیک گوی فلزی بر سطح ورق کامپوزیتی، رفتار و حرکت موج تنشی درون ورق و

همچنین توانایی آن در اندازه‌گیری ضخامت ورق مطالعه می‌شود. این مطالعه بر روی ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف انجام پذیرفته است. تنظیمات تجربی انجام آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است. ضربه توسط رهاسازی گوی فلزی از یک فاصله مشخص به وسیله دست اعمال شده است.

جدول ۱. تنظیمات آزمایشات تجربی

ضخامت	سرعت اولیه پرتابه	شماره آزمایش
mm	m/s	
۶	۸/۸۵	۱
۸	۸/۸۵	۲
۱۰	۸/۸۵	۳
۱۲	۸/۸۵	۴

ورق‌های کامپوزیت مورد بررسی ایزوتروپیک فرض شده‌اند و همان‌طور که توسط مت و رونالد [۱۱] نشان داده شده است نسبت پواسون برای این مواد بین ۰/۲ تا ۰/۵ است که در این پژوهش عدد ۰/۲۵ به عنوان نسبت پواسون ورق‌ها در نظر گرفته می‌شود. چگالی ورق‌های ساخته شده برابر با ۱۵۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول یانگ برای آنها با توجه به ورق‌های تجاری متداول در بازار برابر با مقدار ۳/۸۲ GPa است. بنابراین با توجه به مقادیر و فرضیات بالا خواص مکانیکی گوی فلزی و ورق کامپوزیتی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

به منظور محاسبه سرعت موج تنشی یا موج P باید از رابطه ۳ که در مرجع ۱ آورده شده است بهره برد.

$$C_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه ۳ و همچنین داده‌هایی که در جدول ۲ نشان داده شده است، سرعت موج P برای گوی فلزی برابر

با  $6001 \text{ m/s}$  و برای استفاده از رابطه ۲ برای ورق کامپوزیت فایبرگلاس برابر با  $3176 \text{ m/s}$  است که این سرعت از دستگاه موج ضربه به دست آمده است که در ادامه توضیحات بیشتری در این رابطه ارائه خواهد شد.

جدول ۲. خواص مکانیکی گوی فلزی و ورق‌های کامپوزیت

اجزا	مدول یانگ ( $E$ ) GPa	نسبت پوآسون ( $\nu$ )	چگالی ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )
پرتابه گوی فلزی	۲۱۰	۰/۳	۷۸۵۰
ورق کامپوزیت فایبرگلاس	۳/۸۲	۰/۲۵	۱۵۷۸

محدوده فرکانسی سنسور پیزوالکتریک مورد استفاده ۱۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز بوده و بازه زمانی<sup>۷</sup> جابه‌جایی برای سنسور برابر با  $1/3334 \mu\text{s}$  است [۱۲].

همان‌طور که در مرجع [۱۲] اشاره شده است محدوده معمول برای نسبت پوآسون مواد ایزوتروپیک که در معرض بارگذاری تصادفی قرار می‌گیرند، در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نیز محدوده آزمایش  $0/2 < \nu \leq 0/5$  است. همان‌طور که در مرجع فوق‌الذکر اشاره شده است ناحیه در نظر گرفته شده محدوده وسیعی از مواد ایزوتروپیک را شامل می‌شود.

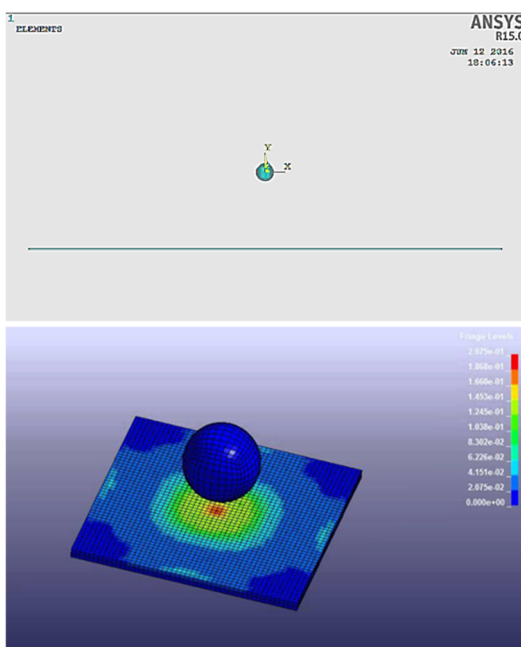
با توجه به این موضوع در این پژوهش مقداری میانگین برای نسبت پوآسون در نظر گرفته شده است. مقدار در نظر گرفته شده با سرعت صوت به دست آمده از دو رابطه ۳ و ۴ با یکدیگر مقایسه شده است.

نسبتی که در آن سرعت صوت  $C_p$  در رابطه ۳ محاسبه شده است با نسبت پوآسون به دست آمده از طریق آزمایش با یکدیگر نزدیک بودند (عدد ۰/۲۵ بوده است). بنابراین در

محاسبات از همین عدد به عنوان نسبت پوآسون نمونه‌های ساخته شده استفاده شده است.

#### ۴. شبیه‌سازی عددی

در این مقاله از بسته  $\text{DTM}^{\text{A}}$  که امکان شبیه‌سازی ساده‌تر در مطالعه سقوط آزاد را فراهم می‌کند استفاده شده است. سقوط آزاد عبارت است از رها شدن جسمی، با سرعت صفر در میدان گرانش. در این بخش نرم‌افزار ANSYS/LS-DYNA با مدل‌سازی گرانش، سقوط آزاد از ارتفاع مشخص بر روی یک سطح صلب صاف را شبیه‌سازی می‌کند. پس از به دست آوردن مدل در محیط نرم‌افزار LSDYNA لازم است تا کانتور جابه‌جایی در راستای عمود بر قطعه به دست آید. داده‌های مربوطه به این کانتور جابه‌جایی از طریق مستقیم و یا با استفاده از نرم‌افزار اکسل به نرم‌افزار MATLAB منتقل شده و در محیط نرم‌افزار MATLAB با استفاده از تبدیل فوریه سریع نمودار جابه‌جایی برحسب زمان به حالت نمودار دامنه برحسب فرکانس تبدیل شده و فرکانس بیشینه شناسایی می‌گردد.



شکل ۲. مدل سه بعدی پرتابه، ورق و شبکه‌بندی

پاسخ ورق کامپوزیتی فایبرگلاس به ضربه وارد شده توسط گوی فلزی به وسیله نرم افزار مورد بررسی قرار گرفته است و در شکل ۳ نمایش داده شده است. در انجام آزمایشات تجربی ترنسدیوسر پیزوالکتریک در نزدیک محل اعمال ضربه قرار می گیرد و به همین دلیل در شبیه سازی نرم افزاری تنها یک گره<sup>۹</sup> در لایه بالایی ورق کامپوزیتی در نظر گرفته می شود که به فاصله  $r$  از آن ترنسدیوسر قرار دارد.

نتایج به دست آمده از مدل سازی نرم افزار به حالت منحنی جابه جایی بر حسب زمان است. به دلیل آنکه به دست آوردن اطلاعات از حرکت موج درون قطعه کامپوزیتی مشکل بوده و مشاهده آن درون جسم تقریباً غیرممکن است از تبدیل فوریه سریع برای تحلیل بهتر نتایج استفاده شد. برای این منظور از تحلیل فرکانسی در دامنه داده های زمانی<sup>۱۰</sup> استفاده شد. منحنی های دامنه - فرکانس دارای نتایج واضح تری نسبت به منحنی های جابه جایی زمان هستند و به همین دلیل مکان دقیق عیب داخلی قطعه کامپوزیتی و یا ضخامت ورق بسیار دقیق تر قابل دستیابی است. شکل ۳ مثالی از این تحلیل را نمایش می دهد.

اگر ترنسدیوسر بیش از حد نزدیک به محل اعمال ضربه باشد امواج تولید شده زمان کافی برای تفکیک امواج  $S$ ،  $P$  و  $R$  از یکدیگر را پیش از رسیدن به ترنسدیوسر پیزوالکتریک ندارند. از سمت دیگر این نزدیکی می تواند سبب جدایی ترنسدیوسر از سطح قطعه در هنگام اعمال ضربه شود. دوری زیاد ترنسدیوسر از محل اعمال ضربه می تواند سبب تداخل بین امواج  $S$  و امواج  $P$  شود.

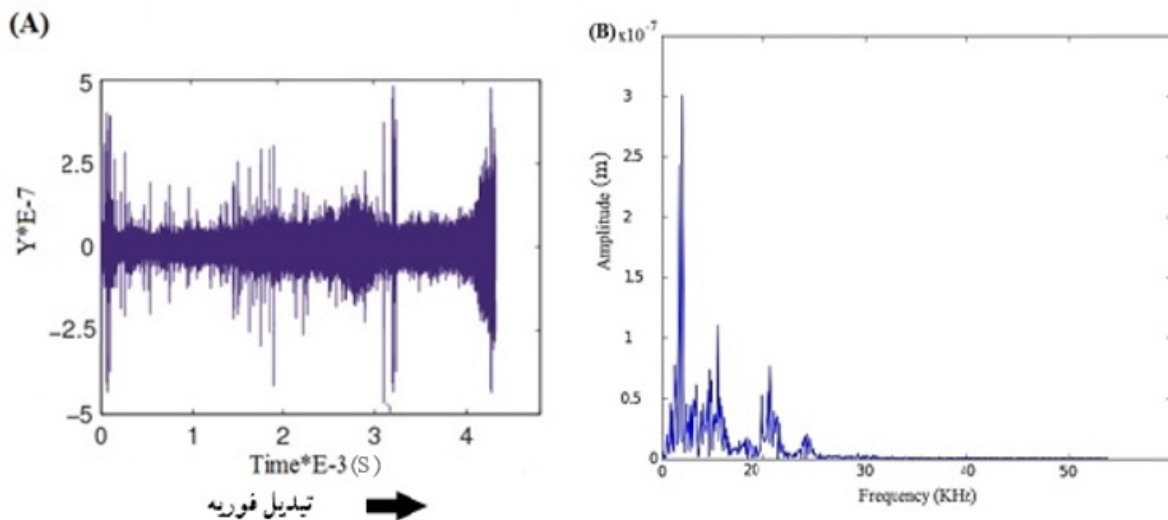
هرچند در پژوهشی مشابه به منظور بررسی روش انعکاس ضربه در سازه های بتنی از نسبت  $r/T=0.30$  استفاده شده است [۱۳]. اما در مقاله حاضر به دلیل آنکه نتایج تجربی

هم گرای بهتری در نسبت  $r/T=0.45$  داشتند این نسبت برای فاصله میان محل اعمال ضربه و محل قرارگیری سنسور ترنسدیوسر در نظر گرفته شده است.

در این رابطه  $r$  فاصله شعاعی ترنسدیوسر از محل اعمال ضربه و  $T$  ضخامت قطعه است. این فاصله تضمین کننده این موضوع است که دامنه جابه جایی ایجاد شده به وسیله موج  $P$  به اندازه کافی قوی است که رسیدن آن به سطح قطعه توسط سنسور ترنسدیوسر تشخیص داده شود. در شکل های ۴ تا ۷ جابه جایی نقاط در نسبت  $r/T=0.45$  نشان داده شده است. همان طور که پیش از این نیز اشاره شد هدف از تحلیل فرکانسی پدیده انعکاس ضربه تعیین فرکانس غالب در شبیه سازی رفتار موج  $P$  است.

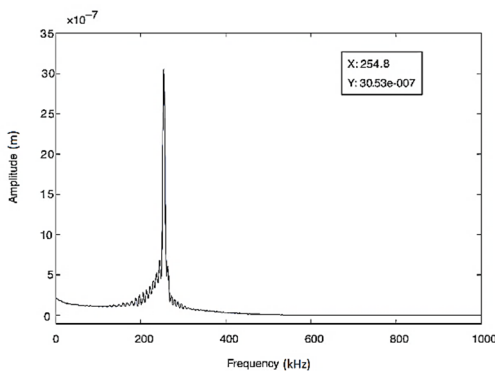
این موضوع با استفاده از تبدیل فوریه سریع برای تبدیل شکل موج از نمودار زمان - جابه جایی به فرکانس - جابه جایی محقق می شود. فرکانس بیشینه یا فرکانس پیک با استفاده از این تبدیل به راحتی به دست می آید و با استفاده از آن و قرار دادن آن در رابطه ۲ می توان ضخامت قطعه مورد آزمایش را به دست آورد. در این پژوهش سرعت نفوذ موج درون ورق کامپوزیت فایبرگلاس با استفاده از دستگاه موج ضربه (Impact Echo) برابر با  $3176 \text{ m/s}$  به دست آمده است. بنابراین ضریب شکل  $\beta$  که در مورد نفوذ موج تنش درون صفحات با ضخامت مشخص برابر با  $0.96$  فرض شده بود با استفاده از رابطه ۲، پس از به دست آوردن سرعت موج با استفاده از دستگاه موج ضربه<sup>۱۱</sup> به طور دقیق برابر با  $0.64$  خواهد بود. بنابراین رابطه ۲ به صورت رابطه ۴ بازنویسی می شود.

$$T = \frac{0.64C_P}{2f} \quad (4)$$



شکل ۳. تبدیل از دامنه زمان (A) به دامنه فرکانس (B)

اندازه‌های واقعی ورق‌ها که از طریق اندازه‌گیری تجربی و مستقیم به دست آمده است نشان می‌دهد که روش انعکاس ضربه توانایی اندازه‌گیری ورق‌های کامپوزیت مانند اندازه‌گیری قطعات و سازه‌های بتنی و سنگی را دارا است. در ورق‌هایی با ضخامت کمتر، که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، امواجی که ناشی از برخورد با سطوحی غیر از سطح خارجی ورق هستند، در طیف‌نما سبب ایجاد فرکانس‌های نزدیک به فرکانس بیشینه پیک یا فرکانس تعیین کننده ضخامت ورق، می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد نتایج حاصل از خواندن ضخامت ورق‌های نازک (کمتر از ۱۰ میلی‌متر) با استفاده از این روش می‌تواند همراه با مقداری امواج مزاحم باشد.

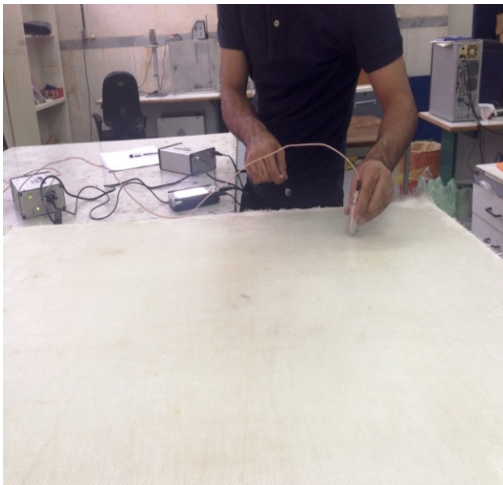


شکل ۴. پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۶ میلی‌متر

پس از به دست آوردن مدل در محیط نرم‌افزار LSDYNA لازم است تا کانتور جابه‌جایی در راستای عمود بر قطعه به دست آید. داده‌های مربوطه به این کانتور جابه‌جایی از طریق مستقیم و یا با استفاده از نرم‌افزار اکسل به نرم‌افزار MATLAB منتقل شده و در محیط نرم‌افزار MATLAB با استفاده از تبدیل فوریه سریع نمودار جابه‌جایی بر حسب زمان به حالت نمودار دامنه بر حسب فرکانس تبدیل شده و فرکانس بیشینه شناسایی می‌گردد. این تحلیل در شکل ۴ تا ۷ برای نقاط اعمال ضربه نشان داده شده است.

نتایج تحلیل همان‌طور که در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است میزان فرکانس ماکزیمم برای تعیین عیب از یک گراف به گراف دیگر متفاوت است. این موضوع باید توضیح داده شود که سرعت برخورد گوی با سطح ورق کامپوزیتی و ضخامت ورق کامپوزیتی در تمامی نمونه‌ها برابر و یکسان نیستند. یکی از نتایج اعمال ضربه با سرعت بالاتر افزایش انرژی موج‌های تولید شده و توانایی عبور آنها از لایه‌های کامپوزیت و رسیدن آنها به مرزهای خارجی ورق است. نزدیکی و تطابق نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی امواج برگشتی از درون ورق‌های کامپوزیت فایبرگلاس با

است. این اختلاف با تقسیم اختلاف بین ضخامت واقعی و ضخامت محاسبه شده بر ضخامت واقعی  $(\frac{T_s-T}{T})$  به دست می‌آید. بررسی اختلاف بین مقادیر تجربی و نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی هیچ‌گونه روند معناداری برای ایجاد یک خطا را نشان نمی‌دهد.



شکل ۸. به دست آوردن داده‌های لازم برای تحلیل فرکانسی از

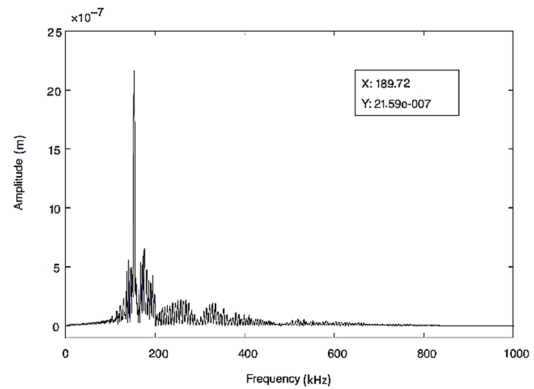
#### دستگاه Impact-Echo

جدول ۳. مقایسه بین ضخامت‌های به دست آمده از تحلیل

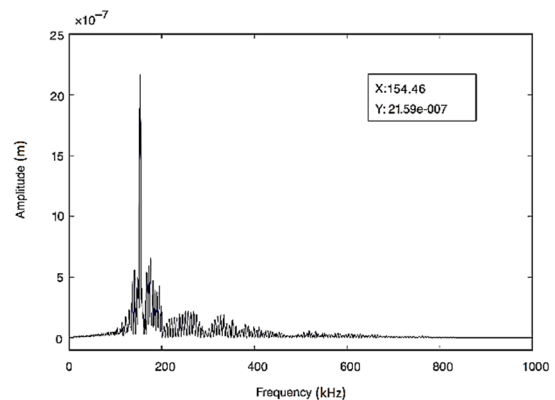
فرکانسی و اندازه‌های واقعی ضخامت

اختلاف بین ضخامت واقعی ورق $(T)$ mm	فرکانس ضخامت kHz	ضخامت به دست آمده از فرمول $(T_s)$ mm	اختلاف بین ضخامت $(\frac{T_s-T}{T})$
۶/۰۲	۱۵۲/۸	۶/۵۴	۸.۵۵٪
۸/۰۰	۱۲۷/۲۰	۷/۸۵	-۱.۸۸٪
۱۰/۰۵	۹۶/۰۷	۱۰/۳۹	۳.۴۲٪
۱۲/۰۱	۷۵/۹۴	۱۳/۱۵	۹.۴۸٪

در جدول ۳ ضخامت به دست آمده با استفاده از سرعت موجی که از دستگاه موج ضربه برابر با  $3176 \text{ m/s}$  به دست آمد به همراه فرکانسی که از حل عددی کسب شد در رابطه ۴ قرار داده شده که مقادیر مربوطه در ستون ضخامت به دست آمده از فرمول قابل مشاهده است.

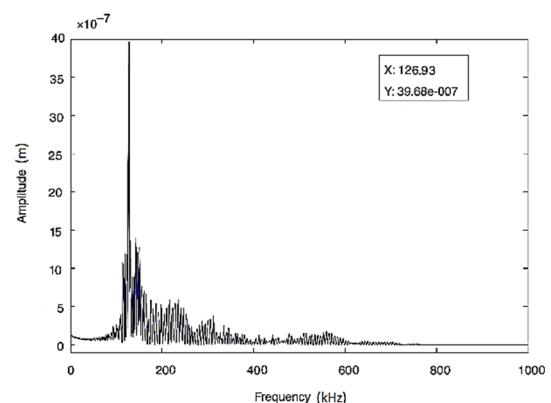


شکل ۵. پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۸ میلی‌متر



شکل ۶. پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۱۰

میلی‌متر



شکل ۷. پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۱۲

میلی‌متر

#### ۵. بررسی و مقایسه نتایج

جدول ۳ نشان‌دهنده نتایج تحلیل نمودارهای فرکانسی از شکل‌های ۴ تا ۷ و اختلاف بین ضخامت‌های به دست آمده از روش انعکاس ضربه و اندازه‌های واقعی ضخامت قطعات



## ۶. جمع‌بندی

مختلف که تمامی ویژگی‌های ساخت آنها مشخص است به منظور بررسی اثر ضخامت بر روی نتایج استفاده شده است. در پایان با مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل فرکانسی و نتایج آزمایشات تجربی با ضخامت واقعی قطعات نزدیکی و هم‌گرایی مناسبی بین نتایج تئوری و تجربی دیده می‌شود. نتایج این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد که هرچند تاکنون از روش موج ضربه یا انعکاس ضربه به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب برای سازه‌های بتنی استفاده شده است ولی این روش به خوبی می‌تواند برای تعیین ضخامت ورق‌های کامپوزیتی نیز به کار رود. بررسی کاربرد این روش به عنوان روشی برای تعیین سلامت قطعات کامپوزیتی و همچنین مشخص کردن اندازه و عمق قرارگیری عیوب درونی در قطعات کامپوزیتی می‌تواند از زمینه‌های انجام پژوهش‌های آتی در این زمینه باشد.

پژوهش‌هایی که در گذشته در مورد روش موج ضربه یا انعکاس ضربه به انجام رسیده است به خوبی قابلیت‌ها و توانایی‌های این روش را به عنوان روشی غیرمخرب در تعیین ضخامت و عیوب درونی سازه‌های بتنی به اثبات رسانده است. در این مطالعه به منظور بررسی کاربرد این روش در مورد قطعات کامپوزیتی در ابتدا تحلیل المان محدود روش انعکاس ضربه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS/LSDYNA انجام شده است. برای به‌دست آوردن نتایج تجربی، از دستگاه موج ضربه با استفاده از یک گوی فلزی به عنوان وسیله‌ای برای وارد آوردن ضربه بر روی یک ورق کامپوزیتی استفاده می‌شود. این برخورد سبب ایجاد موج P درون ورق کامپوزیتی می‌شود. در این راستا از بررسی چندین ورق کامپوزیتی فایبرگلاس با ضخامت‌های

## ۷. مأخذ

- [1] Sansalone, M J. and Streett, W B., "Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry", Ithaca, NY: Bullbrier Press, 1997.
- [2] Kim, D. S., Kim, H. W. y Kim W. C., "Parametric study on the impact-echo method using mock-up shafts", *NDT&E International*, 2002, Vol.35, PP.595-608.
- [3] Stavroulakis, G. E., "Impact-echo from a unilateral interlayer crack. LCP-BEM modelling and neural identification", *Engineering fracture mechanics*, 1999, Vol.62, no.2-3, pp.165-184.
- [4] Villain, Géraldine, Loïc Le Marrec, and Lalaonirina Rakotomanana, "Determination of the bulk elastic moduli of various concretes by resonance frequency analysis of slabs submitted to impact echo", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2011, Vol.15, no.4, pp.601-617.
- [5] Wang, Jin-Jun, Ta-Peng Chang, Bo-Tsun Chen, and Helsin Wang, "Determination of Poisson's ratio of solid circular rods by impact-echo method", *Journal of Sound and Vibration*, 2012, Vol.331, no.5, pp.1059-1067.
- [6] Hsiao, Chiamen, Chia-Chi Cheng, Tzunghao Liou, and Yuanting Juang, "Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method", *NDT & E International*, 2008, Vol.41, no.2, pp. 98-107.
- [7] Mori, K., A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, and I. Torigoe, "A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete", *NDT & E International*, 2002, Vol.35, no.6, pp.399-406.
- [8] Cheraghpour, Farzad, Masoud Vaezi, Hesam Eddin Shoori Jazeh, and S. Ali A. Moosavian, "Dynamic modeling and kinematic simulation of Stäubli© TX40 robot using MATLAB/ADAMS co-simulation", In *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2011, pp.386-391.
- [9] Fan, Zhaoyan, Robert X. Gao, Navid Asadizanjani, and David O. Kazmer, "Acoustic wave-based data transmission for multivariate sensing", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, Vol.62, no.11, pp.3026-3034.

- [10] Ghomi, M. Tabatabaee, Jafar Mahmoudi, and M. Darabi, "Concrete plate thickness measurement using the indirect impact-echo method", *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2013, Vol.28, no.2 pp.119-144.
- [11] Mott, P. H., and C. M. Roland, "Limits to Poisson's ratio in isotropic materials—general result for arbitrary deformation", *Physica Scripta*, 2013, Vol.87, no.5, pp.055404.
- [12] Cheng, Chia-Chi, Yiching Lin, Chia-Men Hsiao, and Hsiang-Chieh Chang, "Evaluation of simulated transfer functions of concrete plate derived by impact-echo method", *NDT & E International*, 2007, Vol.40, no.3, pp.239-249.
- [13] Cheng, Chia-Chi, Yiching Lin, Chia-Men Hsiao, and Hsiang-Chieh Chang, "Evaluation of simulated transfer functions of concrete plate derived by impact-echo method", *NDT & E International*, 2007, Vol.40, no.3, pp.239-249.

پی نوشت:

- 
1. Impact-Echo
  2. NDT
  3. Dilatational یا P-wave
  4. Distortional یا S-wave
  5. R-wave
  6. FFT (Fast Fourier Transform)
  7. Time Period
  8. Drop Test Module
  9. Node
  10. Frequency Analysis on the Time-Domain Data