



معاونت پژوهش و فناوری



جمهوری اسلامی ایران

## گزارش نهایی

(ویرایش سوم)

(۵۵-۲۱۷۵)

توسعه کاربرد دستگاه موج ضربه (Impact-Echo) به

منظور انجام تست غیر مخرب بر روی سازه های

کامپوزیتی

پژوهشکده توسعه تکنولوژی

گروه پژوهشی مهندسی مکانیک

اردیبهشت ۱۳۹۶



به نام آنکه آفرید.

Archive of SID

## شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: گزارش نهایی توسعه کاربرد دستگاه موج ضربه (Impact Echo) به منظور انجام تست غیر مخرب بر روی سازه های کامپوزیتی  
شماره ویرایش: سوم

عنوان فارسی طرح پژوهشی: توسعه کاربرد دستگاه موج ضربه (Impact Echo) به منظور انجام تست غیر مخرب بر روی سازه های کامپوزیتی  
عنوان انگلیسی طرح:

Project Title: Development of Impact Echo Test Equipment in Order to Test Composite Structures.

کد طرح: ۲۱۷۵-۵۵

تالیف کننده ها: سید محمد طباطبائی، محمد مهدی امیری  
ویرایش علمی:  
ویرایش ادبی:

تاریخ طرحنامه: ۹۳/۱۱/۰۷

تاریخ تصویب در شورای بررسی نهایی طرح ها: ۹۴/۱/۲۹

تاریخ شروع اجرای طرح: ۹۴/۰۲/۰۶

سطح دسترسی به سند: محرمانه (بدون موافقت کتبی، نسخه برداری یا تکثیر ممنوع است)

نام مسئول / همکار	محل استخدام	تخصص	عناوین فعالیت ها
محمد مهدی امیری	پژوهشکده توسعه تکنولوژی	مهندس مکانیک	تدوین گزارش
سید محمد طباطبائی	پژوهشکده توسعه تکنولوژی	دکتر مکانیک	مشاوره
سید حسن کمالی	پژوهشکده توسعه تکنولوژی	مهندس مکانیک	نظارت

سازمان مجری: پژوهشکده توسعه تکنولوژی

گروه مجری: گروه پژوهشی مهندسی مکانیک

نشانی: تهران، خیابان آزادی، ضلع شمالی دانشگاه شریف، خیابان قاسمی، پلاک ۷۱

تلفن محل کار تالیف کننده اصلی: ۰۲۱-۶۶۰۷۵۲۷

نشانی پست الکترونیک تالیف کننده اصلی: [taba@jdsharif.ac.ir](mailto:taba@jdsharif.ac.ir)

این سند به همه همکارانی که برای انجام کارهای پژوهشی در  
کشور بی‌دریغ کوشش  
می‌نمایند، تقدیم می‌شود.

Archive of SID

## چکیده

امروزه تست و آزمون غیر مخرب سازه‌ها به دلیل نیازمندی به تخمین عمر آنها از اهمیت فراوانی برخوردار است. اما با توجه به محدودیت‌های عملیاتی و فنی، کاربرد این روش‌ها در صنعت همواره با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. یکی از جدیدترین این روش‌ها، که اخیراً و ظرف ۲۰ تا ۳۰ سال اخیر به منظور انجام آزمون غیر مخرب بر روی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است روش Impact Echo می‌باشد. این روش دارای کاربردی گسترده و قابل اعتماد در زمینه سازه‌های بتنی و غیر فلزی (مانند آسفالت و سنگفرش) می‌باشد. از سویی دیگر سازه‌های کامپوزیتی امروزه دارای کاربردی گسترده در زمینه فناوری‌های نو و تکنولوژی‌های جدید می‌باشند. کاربرد کامپوزیت‌ها امروزه دیگر محدود به چند زمینه خاص نبوده و از حوزه هوافضا گرفته تا مخازن ذخیره‌سازی میعانات هیدروکربنی را شامل می‌گردد. به منظور انجام آزمون غیر مخرب بر روی تجهیزات کامپوزیتی نمی‌توان از روش‌های کاربردی برای فلزات مانند التراسونیک بهره برد، به همین دلیل در این پژوهش استفاده از روش Impact Echo بر روی سازه‌های کامپوزیتی بررسی شده است. این روش تاکنون برای کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار نگرفته است و در این پژوهش برای نخستین بار این کاربردی بررسی و توسعه داده خواهد شد. در این راستا امکان کاربرد این روش در ارزیابی غیر مخرب سازه‌های کامپوزیتی از دو طریق حل عددی در محیط نرم‌افزار LS-DYNA و همچنین آزمایشات تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از حل عددی و آزمایشات تجربی نزدیکی قابل قبولی را نشان دادند هر چند نتایج کاملاً بر یکدیگر منطبق نبودند. این عدم انطباق به آن دلیل است که سنسورها و پیکره‌بندی دستگاه موجود Impact-Echo برای ارزیابی سازه‌های بتنی و سنگی طراحی شده و به منظور استفاده بهینه و کاربردی از این روش نیاز به انجام تغییرات سخت‌افزاری در آنها می‌باشد.

**کلید واژگان:** کامپوزیت، Impact Echo، موج ضربه، امواج تنشی

## پیشگفتار

در این گزارش انجام آزمون غیرمخرب با استفاده از روش Impact Echo بر روی سازه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. روش Impact Echo (که بعد از این ما آن را موج ضربه می‌نامیم) روشی است برای تعیین عیوب داخلی در سازه‌های بتنی، سنگی و غیرفلزی. روش موج ضربه روشی غیر مخرب به منظور ارزیابی سلامت سازه‌های بتونی و سنگی می‌باشد که مبنای کار آن بر اساس استفاده از تنش صوتی ایجاد شده توسط ضربه (Impact) و نفوذ آن در سازه‌های بتونی و سنگی و دریافت امواج انعکاس یافته توسط عیوب داخلی یا سطوح خارجی استوار می‌باشد. این روش (Impact-echo) در ابتدا توسط گروه‌های تحقیقاتی کوچکی در اداره استاندارد آمریکا (از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۶) و دانشگاه کرنل (از سال ۱۹۸۷ تا کنون) تا حد چشمگیری توسعه یافت. لازم به ذکر است در دسامبر ۱۹۹۷ جامعه ارزیابی مواد ایالات متحده آمریکا (ASTM) این روش را با عنوان "روش استاندارد آزمون و اندازه‌گیری سرعت موج نوع P و ضخامت صفحات بتونی به وسیله روش Impact-echo" مورد پذیرش قرار داد. این استاندارد در کتاب سالانه استاندارد ASTM که در سال ۱۹۹۸ انتشار یافت مورد اشاره قرار گرفت.

از این روش می‌توان برای تعیین موقعیت و میزان گسترش عیوبی مانند ترک، تورق (Delamination)، فضاهای خالی، عیوب لانه زنبوری و جداشدگی در صفحات بتونی تقویت شده (مانند پیاده‌رو، دیوار و پل)، صفحات لایه‌ای (مانند آسفالت لایه‌ای)، ستون‌ها و تیرها (با مقطع دایروی یا مربعی) و مقاطع توخالی (لوله، تونل و یا تانک ذخیره) استفاده کرد. از این روش می‌توان برای تعیین موقعیت عیوب در منافذی که از دوغاب برای پر کردن آنها استفاده شده نیز بهره جست. دقت اندازه‌گیری این روش برای تعیین ضخامت صفحات بتونی کمتر از ۳٪ بوده و می‌توان از آن برای تعیین عیوبی که دقیقاً در مرزهای خارجی قطعه واقع شده‌اند استفاده کرد. همچنین این روش توانایی تعیین عیوبی مانند ترک، فضاهای خالی و غیره در سازه‌های سنگی که در ساخت آنها قطعات آجر با لایه‌ای از ملات به یکدیگر متصل شده‌اند را دارد.

روش Impact-echo روشی محدود به شناسایی عیوب نیست، بلکه دارای کاربردهای مانند کنترل کیفیت، اندازه‌گیری ضخامت آسفالت یک بزرگراه و یا تعمیرات پیشگیرانه مانند بازرسی منظم از ستون‌های یک پل بتونی می‌باشد. تجربه نشان داده است که شناخت کافی از روش Impact-echo و همچنین ساختار سازه‌ای که آزمون بر روی آن انجام می‌پذیرد دو عامل کلیدی برای موفقیت عملی این روش هستند.

دستگاه Impact Echo به طور معمول شامل تجهیزات و قطعات زیر می‌باشد:

- وسیله‌ای برای اعمال ضربه به قطعه
- ترنسدیوسر (Transducer) قابل حمل با دست
- سیستم دریافت داده آنالوگ/دیجیتال

- یک لب تاپ
- نرم افزار کامپیوتری
- کابل متصل کننده ترنسدیوسر به سیستم دریافت داده
- کابلی مناسب برای اتصال سیستم دریافت داده به لب تاپ
- منبع تامین قدرت DC

از این دستگاه تنها می توان به منظور ارزیابی غیرمخرب سازه های بتنی استفاده کرد اما هدف از این پژوهش، مطالعه گسترش کاربرد این دستگاه در سازه های کامپوزیتی می باشد. این طرح طبق نسخه نهایی طرحنامه مربوط (پیوست ۱) به تاریخ ۹۴/۲/۶، مصوب شورای بررسی نهایی طرح ها در تاریخ ۹۴/۱/۲۹ در چارچوب برنامه پژوهشی گروه پژوهشی مهندسی مکانیک به اجرا در آمده است. مجری طرح آقای سیدمحمد طباطبائی قمی بوده اند که علاوه بر مدیریت فعالیت ها، انجام نظارت بر روند انجام کار را نیز بر عهده داشته اند. آقای مهندس امیری وظیفه تدوین گزارش و مهندس کمالی مسئولیت پیگیری و تسهیل در اختصاص منابع را بر عهده داشتند.

گروه مهندسی مکانیک  
پژوهشکده توسعه تکنولوژی  
محمد مهدی امیری



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱: کامپوزیتها؛ اجزا و کاربردها .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۱
۱-۲- الیاف .....	۶
۱-۳- رزینها .....	۱۴
فصل ۲: عیوب متداول در کامپوزیتها و روشهای بازرسی کنونی .....	Error! Bookmark not defined.
۲-۱- مقدمه .....	۱۷
۲-۲- انواع نقصها .....	۱۷
۲-۳- روش های آزمون غیر مخرب .....	۱۹
فصل ۳: معرفی روش موج ضربه (Impact-Echo) و کاربردهای فعلی آن .	Error! Bookmark not defined.
۳-۱- مقدمه .....	۲۷
۳-۲- مبانی روش Impact-Echo .....	۲۸
۳-۳- پیشینه پژوهش .....	۲۹
۳-۴- مبانی تئوریک روش موج ضربه Impact Echo .....	۳۴
فصل ۴: تحلیل ضربه و حرکت امواج در کامپوزیتها .....	Error! Bookmark not defined.
۴-۱- مقدمه .....	۴۴
۴-۲- مکانیزم اثر و تحلیل امواج ضربه‌ای (P-Waves) .....	۴۶
۴-۳- انتشار امواج تنشی (الاستیک) .....	۴۷
۴-۴- امواج حاصله از ضربه الاستیک: موج ضربه (Impact Echo) .....	۴۹
۴-۵- نفوذ امواج الاستیک در یک محیط دو بعدی (صفحه نازک) .....	۵۶
۴-۶- نفوذ امواج الاستیک در یک محیط سه بعدی .....	۵۸
۷-۴- نفوذ موج در یک محیط لایه لایه مانند کامپوزیت .....	۵۹
۸-۴- میرا شدن امواج تنشی درون کامپوزیت .....	۶۱
فصل ۵: مدلسازی در محیط LS-DYNA .....	Error! Bookmark not defined.
۵-۱- مقدمه .....	۶۴
۵-۲- المان بندی صفحه کامپوزیت و ضربه زننده .....	۶۷
۵-۳- تعریف ماده و نسبت دادن آنها به کامپوزیت و ضربه زننده .....	۷۰
۵-۴- خواص (Properties) .....	۷۴

۷۸.....	۵-۶- شرایط مرزی (Boundary Condition)
۷۸.....	۵-۷- مقید کردن گره‌های زیر کامپوزیت در تمام راستاها
۸۱.....	۵-۸- تعریف جاذبه:
۸۳.....	۵-۹- تعریف Dynamics
۸۸.....	۱۰-۱- حل مسائل در LS-Dyna
۸۹.....	۱۱-۵- بدست آوردن جابجایی در راستای عمود

**فصل ۶: ساخت ورق‌های کامپوزیت و آزمایشات تجربی**

۹۳.....	۶-۱- ساخت نمونه‌های تجربی در آزمایشگاه
۱۰۲.....	۶-۲- تعیین عیوب داخلی ورق کامپوزیتی به وسیله روش موج ضربه
۱۱۰.....	۶-۳- تشخیص عیوب داخلی به وسیله دستگاه موج ضربه

**فصل ۷: نتیجه‌گیری و دستاوردها**

۱۱۵.....	۷-۱- مقدمه
۱۱۵.....	۷-۲- بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت و عمق درونی ترک
۱۲۰.....	۷-۳- ارزیابی ضخامت ورق
۱۲۰.....	۷-۴- تشخیص عیوب داخلی ورق
۱۲۱.....	۷-۵- سایر کاربردها

**فصل ۸: جمع‌بندی**

۱۲۳.....	۸-۱- مقدمه
۱۲۳.....	۸-۲- دستاوردهای طرح پژوهشی
۱۲۴.....	۸-۳- پیشنهاد زمینه‌های برای پژوهش‌های آتی
۱۲۵.....	۸-۴- دستاوردهای عملی
۱۲۵.....	۸-۵- تقدیر و تشکر

**منابع (References)**

۱۲۶.....	عنوان و چکیده مقاله اول
۱۳۴.....	عنوان و چکیده مقاله دوم

# فصل ۱

## کامپوزیت‌ها؛ اجزا و کاربردها



## ۱-۱- مقدمه

واژه‌ی کامپوزیت عموماً به موادی اطلاق می‌گردد که از دو جزء ماتریس زمینه (Matrix) و مقاوم‌کننده (Reinforcer) ساخته شده باشد. جزء ماتریسی عمدتاً از یک ترکیب پلاستیکی و رزینی ساخته می‌شود. تقویت‌کننده‌ها را تقریباً می‌توان به سه دسته الیاف، ذرات و ویسکرها (Whisker) تقسیم کرده که هر یک کاربرد منحصر به فرد دارند. جزء مقاوم‌کننده می‌تواند شیشه، کربن، سرامیک و حتی فلز باشد.

الیاف کربن از قدیمی‌ترین الیاف مورد استفاده در صنعت می‌باشند و بیش از صد سال از به کارگیری آنها می‌گذرد. این الیاف نخستین بار توسط ادیسون برای استفاده در المنت لامپ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از سال ۱۹۵۰ به بعد به دلیل گسترش روزافزون صنعت هوافضا و قرار گرفتن در دوران جنگ سرد، به موازات نیاز به مواد با استحکام بالا و وزن سبک، به کارگیری الیاف کربن نیز گسترش چشم‌گیری یافته است. کامپوزیت‌های مقاوم شده با الیاف کربن ۵ برابر قوی‌تر از فولاد ۱۰۱۰ و ۷ برابر سبک‌تر از آن است [۱]. در مقایسه با فولاد A16061 استحکام کششی کامپوزیت ۷ برابر بیشتر و وزن آن ۱٫۵ برابر سبک‌تر است [۲]. علاوه بر آن کشتی‌ها، ماشین‌های مسابقه، دسته‌ی راکت تینیس و ... هم در بدنه‌ی خود از الیاف کربن برخوردارند. در تمامی این موارد استحکام بالا، چگالی پایین و ضریب انبساط گرمایی پایین حرف اول را می‌زند.

فیبرهای کربنی دارای این مشخصه‌ی استثنائی‌اند که خواص مکانیکی خود را حتی در دماهای بالا نیز حفظ کنند. کامپوزیت‌های کربن-کربن در محیط خنثی می‌توانند تا دمای  $3000^{\circ}\text{C}$  را تحمل کنند، [۳] لیکن مقاومت به اکسایش پایانشان در این دما هنوز در دسر ساز است.

عموماً الیاف کربنی به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

- Pan-Based
- Isotropic Pitch-Based
- Anisotropic pitch-Based
- Rayon-Based
- Gas Phase-Based

مراحل تولید فیبرهای کربن به دو طریق Pitch و PAN وجود دارد. اساس کار همه‌ی آنها شامل اسپینینگ، پایدارسازی، کربوریزه کردن و یک مرحله‌ی تمام‌کاری می‌باشد. ساختار حاصل به آهنگ گرم کردن حساس است. در مقایسه با الیاف Rayon، رشته‌هایی که از پلی‌آکریلو نیتریل تهیه می‌شوند، همراستایی بالایی دارند. از این گذشته ماده‌ی منبع Pan کارایی بالاتری برای تبدیل به کربن دارند. شکست خود پدیده‌ای پیچیده است. این مسئله در مورد کامپوزیت‌ها پیچیدگی خاص خود را دارد. گستره‌ی وسیعی از تغییر شکل‌ها ممکن است در شکست کامپوزیت نقش داشته باشند. شرایط بارگذاری و شرایط برهم کنش تقویت‌کننده و ماتریس عواملی مهم در مطالعه‌ی شکست در کامپوزیت‌ها می‌باشند. قطر الیاف مورد استفاده، درصد حجمی الیاف در کامپوزیت، تنش‌های حرارتی وارده بر فیبر در حین تهیه‌ی آن، همه می‌توانند به طور مستقیم بر چگونگی جوانه زنی و گسترش ترک تاثیر بگذارند.

## ۱-۱-۱- تاریخچه کامپوزیت

دو سازنده‌ی کامپوزیت در حقیقت دارای مقادیر کرنش شکست متفاوت می‌باشند. وقتی که جزء دارای کرنش شکست پایین‌تر دچار شکست می‌گردد، بار اعمالی به جزء دیگر وارد می‌شود و در صورتی که آن جزء توان تحمل بار را داشته باشد، شاهد شکست Multiple خواهیم بود. اگر فیبر دارای استحکام کششی پایین‌تر باشد، شکست Single داریم.

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی، به تلفیق خواص مواد نیاز است و امکان استفاده از یک نوع ماده که همه‌ی خواص مورد نظر را برآورده سازد، وجود ندارد. به عنوان مثال در صنایع هوافضا به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، سبک باشند، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر نور ماوراء بنفش خوبی داشته باشند و در دماهای بالا استحکام خود را از دست ندهند. از آنجا که نمی‌توان ماده‌ای یافت که همه‌ی خواص فوق را دارا باشد، باید به دنبال روشی برای ترکیب خواص مواد بود. این راه حل همان مواد کامپوزیت است. کامپوزیت ماده‌ای چند جزئی است که خواص آن از هرکدام از اجزا بیشتر است، ضمن آنکه اجزای مختلف کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند.

با تعریف فوق، کامپوزیت‌ها در اصل از زمان‌های قدیم مورد توجه بشر بوده‌اند. از نمونه‌های قدیمی کاربرد این نوع مواد می‌توان به کاه گل و یا مومیایی اشاره نمود. تاریخچه کامپوزیت‌ها را می‌توان بصورت ذیل خلاصه نمود.

- سازه‌های کاه گلی (۱۵۰۰ سال قبل از میلاد)
- کمان چند لایه ای، ساخته شده از تاندون حیوانات، چوب و ابریشم (۱۰۰۰ سال قبل از میلاد)
- آغشته کردن سطوح پارچه ای هواپیماها با لاک محلول رزینی، ۱۹۱۰ میلادی
- فنلی تقویت شده با پارچه، ۱۹۳۰ میلادی
- ثبت اختراع پلی استر، ۱۹۳۶ میلادی
- فروش الیاف شیشه توسط شرکت، Owens Corning ۱۹۳۸ میلادی.
- ساخت پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه در پایگاه هوایی Patterson Wright ۱۹۴۲ میلادی.
- ساخت الیاف کربن توسط شرکت Union Carbide، ۱۹۵۹ میلادی
- ثبت اختراع الیاف کربن بر پایه PAN توسط Shido ژاپن، ۱۹۶۱ میلادی.
- ساخت الیاف پیوسته سرامیک و بُر، ۱۹۶۵ میلادی
- ساخت الیاف کولار، ۱۹۷۱ میلادی
- ساخت الیاف پلی اتیلن با جرم مولکولی فوق سنگین، ۱۹۸۵ میلادی
- تولد مجدد الیاف طبیعی، ۱۹۹۰ میلادی

کامپوزیت‌ها خواص مکانیکی برجسته‌ای داشته و از انعطاف پذیری مناسبی در طراحی برخوردارند و روش‌های ساخت آنها نسبتاً آسان است. کامپوزیت‌ها موادی سبک، مقاوم در برابر خوردگی و ضربه، دارای مقاومت خستگی عالی، مستحکم و با دوام‌اند و به روش‌های مختلفی قابل تبدیل به یک محصول یا یک قطعه می‌باشند.

امروزه کمتر صنعتی را می‌توان یافت که از کامپوزیت‌ها در آن استفاده نشده باشد. تخمین زده می‌شود در حال حاضر ۴۰۰/۰۰۰ تا ۴۵۰/۰۰۰ نفر در این صنعت مشغول به کار باشند. حجم کلی گردش مالی آن ۴۱/۵ میلیارد یورو باشد. کل تقاضا برای

مواد کامپوزیت در سال ۲۰۰۳، ۵/۶ میلیون تن تخمین زده شده است که از این میان ۱/۷۵ میلیون تن الیاف ۳/۸۵ میلیون تن رزین بوده است. در ۸ ماهه اول سال ۱۳۸۴ در ایران، بیش از ۹۰۰۰ تن الیاف شیشه وارد کشور شده که بیشتر آن مربوط به کارخانه‌های تولید لوله کامپوزیتی است. نسبت سهم فعالان این صنعت در جدول (۱-۱) نشان داده شده است.

جدول (۱-۱): نسبت سهم فعالان صنعت کامپوزیت [۲]

گروه فعال	درصد
مصرف کنندگان نهایی	۵۷٪
تولید کنندگان مواد اولیه	۲۱٪
فرآیندکنندگان	۹٪
سازندگان تجهیزات تولید	۸٪
توزیع کنندگان	۵٪
<b>جمع کل</b>	<b>۱۰۰٪</b>

رشد صنعت کامپوزیت از نظر ارزش در طی سال های ۲۰۰۳-۲۰۰۸، ۲ تا ۳ درصد پیش بینی شده است که در میان بخش های مختلف، صنعت تولید برق توسط باد با ۲۰٪، هوافضا با ۹٪، خودرو با ۷٪، و کشتی سازی با ۷٪، رشد بیشتری را تجربه می کنند. همچنین کشورهای هند و چین به ترتیب با ۹/۵٪ و ۱۵٪ رشد سالانه در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ سریع ترین رشد را در میان کشورهای مختلف دارا هستند. در ضمن باید توجه داشت که رشد کامپوزیت های گرمانرم بیشتر از کامپوزیت های گرما سخت می باشد به طوری که رشد کامپوزیت های گرمانرم ۹٪ و کامپوزیت های گرما سخت ۳٪ در سال ۲۰۰۳ بوده است. با این وجود در حال حاضر ۶۶٪ سهم بازار متعلق به کامپوزیت های گرما سخت می باشد.

مواد کامپوزیت، جزء مواد با تکنولوژی بالا محسوب شده و از این جهت میان مصرف این مواد و پیشرفت صنعتی جوامع، ارتباط معناداری دیده می شود. در جدول (۲-۱) توزیع مصرف مواد کامپوزیت در مناطق مختلف جهان نشان داده شده است.

در سال های اخیر، کاهش قیمت مواد اولیه، روش های تولید خودکار و انبوه مواد، موجب کاهش قیمت قطعات کامپوزیت و نیز گسترش کاربرد این مواد شده است. همچنین برخی از محصولات کامپوزیتی، ظرفیتهای جدیدی در این صنعت ایجاد کرده است. به عنوان مثال هواپیمای بوئینگ ۷۸۷ که ۵۰٪ وزن آن از کامپوزیت هاست به همراه هواپیمای ایرباس A380 با ۲۰٪ وزنی کامپوزیت، ۱۰۰۰ تن ظرفیت جدید در بخش مواد کامپوزیتی ایجاد نموده است.

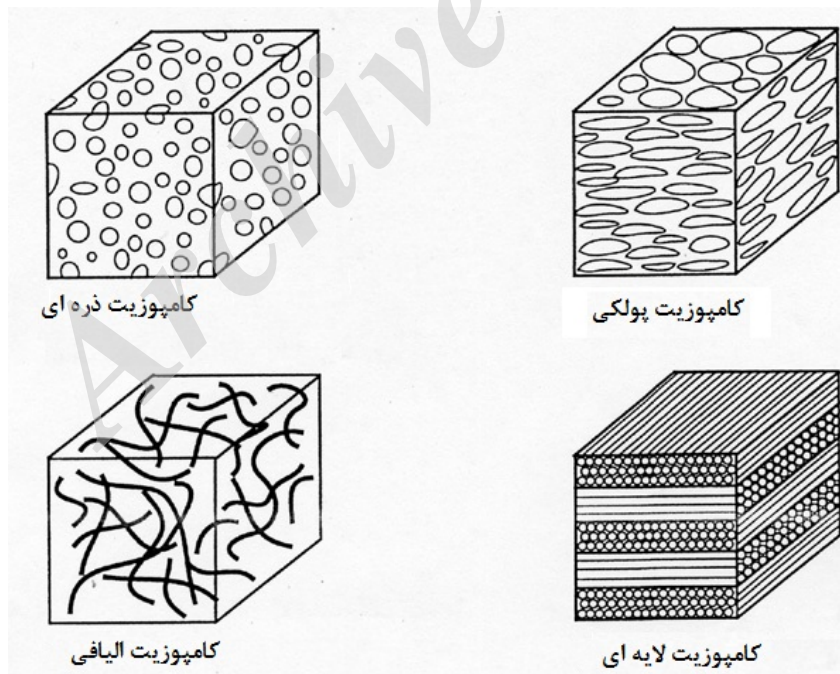
جدول ۱-۲: توزیع مصرف مواد کامپوزیت در مناطق مختلف جهان در سال ۲۰۰۴ [۲]

منطقه	درصد
آمریکای شمالی	۴۰٪
اروپا	۳۵٪
آسیا- اقیانوسیه	۲۲٪
سایر مناطق	۳٪

در ادامه این فصل تعریف و طبقه بندی مواد کامپوزیتی شرح داده می شود.

### ۱-۱-۲- تعریف کامپوزیت

کلمه کامپوزیت (Composite) که آن را در فارسی به مواد مرکب یا مواد چند سازه‌ای ترجمه کرده‌اند، به معنی مرکب از دو یا چند جزء مشخص است و از کلمه ترکیب کردن (to compose) گرفته شده است. لذا یک ماده با دو یا چند جزء مشخص را می‌توان یک کامپوزیت در نظر گرفت، در صورتی که فازها و یا اجزای تشکیل دهنده آن، خواص کاملاً متفاوتی با یکدیگر داشته باشند. در مقیاس میکروسکوپی، یک مخلوط فیزیکی از دو یا چند ماده مختلف را که این مواد مشخصات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و مرز مشخصی را با یکدیگر تشکیل دهند را کامپوزیت گویند. یک کامپوزیت شامل یک یا چند فاز غیر پیوسته در یک فاز پیوسته است. فاز غیر پیوسته معمولاً سخت‌تر و قوی‌تر از فاز پیوسته است لذا به آن فاز تقویت کننده گویند. تقویت کننده‌ها اشکال گوناگونی دارند و می‌توانند ذره‌ای، پولکی (flake)، لیفی و صفحه‌ای (lamina) باشند (شکل ۱-۱). فاز پیوسته، زمینه (matrix) نامیده می‌شود.

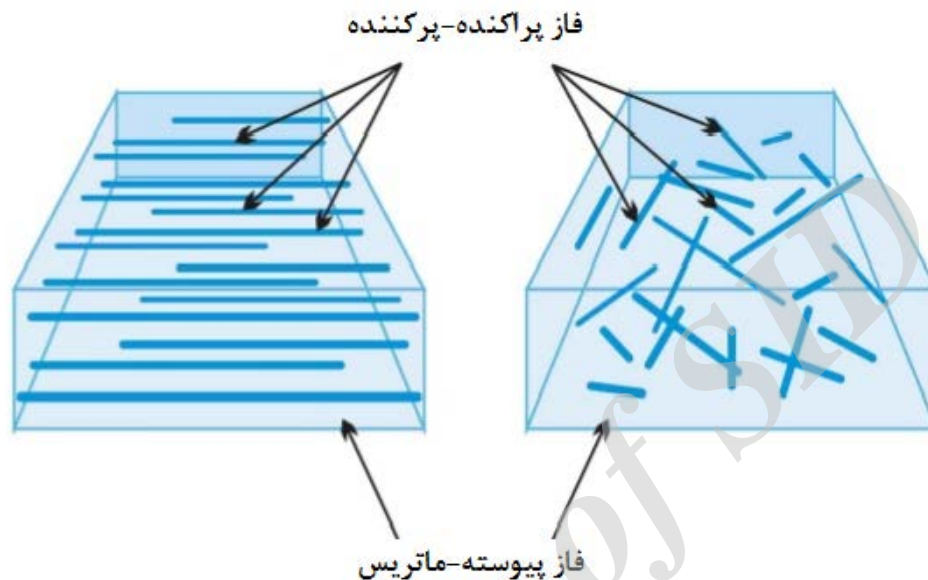


شکل (۱-۱): اشکال مختلف تقویت کننده‌ها. [۱]

عمدتاً در یک کامپوزیت، سه ناحیه متمایز شامل: فاز پیوسته، فاز غیر پیوسته و فصل مشترک (interface) وجود دارد که این

دوفاز تعیین کننده خواص و رفتار کامپوزیت می باشد (شکل ۱-۲).

بسیاری از مواد طبیعی نیز کامپوزیت هستند. چوب یک کامپوزیت طبیعی است که در آن سلولز بصورت لیفی، در زمینه لیگنین قرار گرفته است. استخوان و یا دندان نمونه‌ای دیگر از یک کامپوزیت طبیعی است که در آن کریستال‌های معدنی سخت هیدروکسی اپتات (hydroxy apatite) و یا اوستئون (Osteones) در زمینه نرم کلاژن (Collagen) پخش شده‌اند.



شکل ۱-۲: فازهای تشکیل دهنده یک کامپوزیت. [۱]

### ۱-۱-۳- طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها را از جهات مختلف می‌توان طبقه‌بندی نمود. هدف از تهیه بسیاری از کامپوزیت‌ها بهبود خواص مکانیکی نظیر استحکام، سفتی (مدول)، چقرمگی (Toughness) و کارایی در دمای بالا می‌باشد. لذا طبیعی است که مطالعه آنها بر اساس مکانیسم تقویت‌کنندگی مشترک صورت پذیرد. مکانیسم تقویت‌کنندگی بستگی به شکل هندسی (Geometry) تقویت‌کننده دارد، بنابراین بهتر است که طبقه‌بندی آنها بر این اساس صورت پذیرد. در برخی موارد، کامپوزیت‌ها را از نظر نوع زمینه آنها نیز طبقه‌بندی می‌نمایند. از این دیدگاه، کامپوزیت‌ها به سه دسته کامپوزیت‌های پلیمری (Polymer Matrix Composite) کامپوزیت‌های فلزی (Metal Matrix Composites) و کامپوزیت‌های سرامیکی (Ceramic Matrix Composites) تقسیم می‌شوند (جدول ۱-۳).

در این میان، کامپوزیت‌های پلیمری (PMC) بیشترین حجم استفاده را دارند. در این دسته از کامپوزیت‌ها هدف اصلی از کامپوزیت کردن بهبود خواص مکانیکی است. در کامپوزیت‌های فلزی بهبود قابلیت فرآورش نظیر ماشینکاری و در کامپوزیت‌های سرامیکی عمدتاً افزایش چقرمگی هدف اصلی است. ساخت دسته اخیر از کامپوزیت‌ها نسبتاً مشکل است. در تهیه کامپوزیت‌ها، خواص نهایی اصلی مانند مدول، استحکام، چقرمگی و چگالی مورد توجه قرار می‌گیرند. البته خواص حرارتی نظیر ضریب هدایت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی نیز دارای اهمیت است. از آنجا که کامپوزیت‌ها در حین ساخت و استفاده تحت شرایط حرارتی



مختلف قرار می‌گیرند، عدم تطابق بین ضرایب انبساط حرارتی اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت، سبب ایجاد تنش‌های باقیمانده در آن می‌شود که این امر به نوبه خود بر خواص مکانیکی تأثیر بسزایی دارد.

**جدول ۱-۳: طبقه بندی کامپوزیت ها از نظر نوع زمینه. [۳]**

انواع کامپوزیت ها		
کامپوزیت های فلزی (MMC)	کامپوزیت های سرامیکی (CMC)	کامپوزیت های پلیمری (PMC)
<b>مزایا (در مقایسه با PMC):</b> استحکام عرضی بیشتر استحکام برشی و فشاری بیشتر دمای کارکرد بالاتر عدم جذب آب و آتشگیری	<b>مزایا:</b> دمای کارکردی بسیار بالا	<b>مزایا:</b> قیمت پایین فراورش ساده مقاومت شیمیایی خوب وزن مخصوص پایین
<b>معایب:</b> کار زیادی در این مورد انجام نشده	<b>معایب:</b> شکننده بودن	<b>معایب:</b> استحکام و مدول نسبتاً پایین دمای کارکرد پایین، مقاومت محیطی ضعیف (قابل تخریب بوسیله اشعه ماورای بنفش و حلالها)
<b>مثال:</b> آلومینیم/ ذرات سیلیکون کارباید	<b>مثال:</b> سرامیک/الیاف سیلیکون کارباید بتون (کامپوزیت معمولی) آلومینا (کامپوزیت پیشرفته)	<b>مثال:</b> پلی استر/الیاف شیشه

**۲-۱- الیاف**

مواد اصلی تشکیل دهنده کامپوزیت های لیفی، الیاف و رزین ها (یا به عبارت جامع تر زمینه‌ها) هستند. در کامپوزیت‌های چندلایه، می‌توان از چند نوع الیاف نیز استفاده کرد که به آنها کامپوزیت‌های مخلوط (Hybrid) گویند. معمولاً سعی می‌شود از یک نوع زمینه استفاده شود تا چسبندگی خوبی بین لایه ها وجود داشته باشد. الیاف حجم قابل توجهی از یک کامپوزیت را تشکیل می‌دهند. وظیفه اصلی آنها تحمل بار اعمال شده به کامپوزیت می‌باشد. نوع لیف، مقدار آنها و آرایش یافتگی آنها بسیار حائز اهمیت‌اند و بر خواص زیر تأثیر می‌گذارند:

- استحکام و مدول کششی، فشاری و خمشی
- استحکام خستگی
- ضرایب انتقال حرارت و الکتریسیته
- وزن مخصوص کامپوزیت
- قیمت

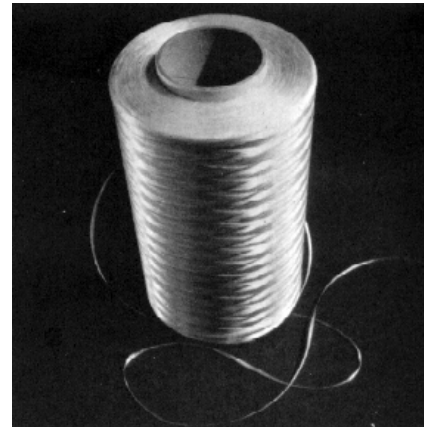
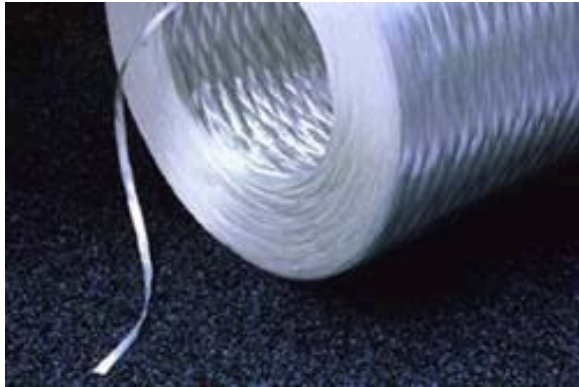
در این فصل مهمترین الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت، شرح داده می‌شوند اما قبل از آنکه به توضیح مهم ترین الیاف پرداخته شود، توضیح پارهای از اصطلاحات ضروری به نظر می‌رسد.

- لیف یا تار (filament): به رشته‌های بسیار باریکی از الیاف گفته می‌شود که قطر بسیار کمی (در حد چند میکرون) دارند.
- رشته الیاف (Strand): به تعدادی از لیف‌ها یا تارهای الیاف که کنار هم قرار گرفته باشند گفته می‌شود.
- نخ (Yarn): به رشته الیاف پیچیده شده گویند. به عبارت دیگر همان رشته الیاف هستند که مقداری تابیده شده‌اند. معمولاً این نخ‌ها روی یک هسته چوبی، کاغذی و یا پلاستیکی پیچیده می‌شوند (شکل ۱-۳)



شکل ۱-۳: یک نمونه دوک نخ الیاف شیشه.

- دسته الیاف نتابیده (Roving): به یک یا چند رشته از الیاف (حدود ۲۰۰ تار)
- دسته الیاف نتابیده (Roving): به یک یا چند رشته از الیاف (حدود ۲۰۰ تار) که کنار هم به طور موازی و بدون تاب قرار گرفته باشند گفته می‌شود (شکل ۲-۲) که غالباً روی یک دوک (هسته) پیچیده می‌شوند. بسته به نوع کاربرد و فرآیند مورد استفاده، انواع مختلفی از این نوع الیاف به بازار عرضه می‌شوند.
- تکس (Tex): وزن ۱۰۰۰ متر از الیاف را برحسب گرم گویند.
- دنیر (Denier): به وزن ۹۰۰۰ متر از الیاف بر حسب گرم، دنیر گفته می‌شود. این ویژگی بیانگر ظرافت الیاف بوده و هرچه کمتر باشد الیاف ظریف تر خواهند بود.



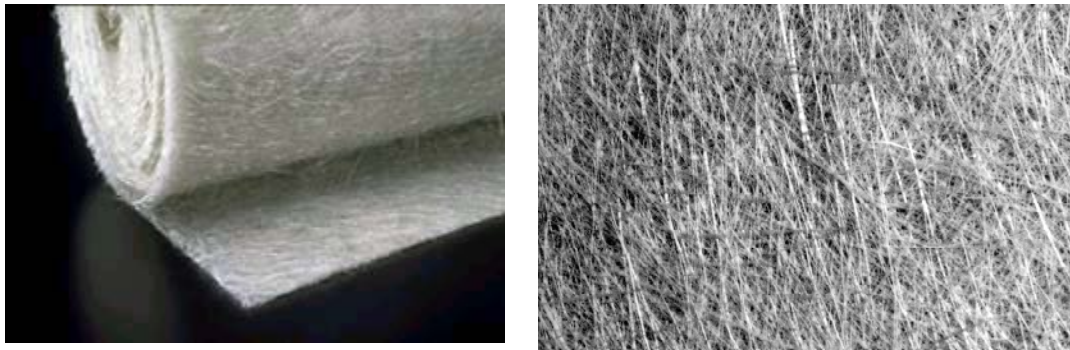
شکل ۱-۴: نمونه دوک دسته الیاف نتابیده (Roving)

- الیاف کوتاه یا خرد شده (Chopped Strand): به الیافی گفته می‌شود که عمدتاً در ترکیبات قالبگیری مورد استفاده قرار می‌گیرند و طول آنها از ۳ تا ۵۰ میلیمتر می‌باشد (شکل ۲-۳)
- الیاف آسیاب شده (Milled fibre): به الیاف بسیار کوتاهی گفته می‌شود که طول آنها حدود ۰/۲mm تا ۰/۰۸mm می‌باشد و از آسیاب کردن رشته الیاف پیوسته با آسیاب‌های چکشی تهیه می‌شوند (شکل ۱-۵). از این الیاف به عنوان پرکننده (filler) در رزین‌ها استفاده می‌شود و صافی سطح را بهبود می‌دهند. همچنین به عنوان افزایش دهنده ظاهری ویسکوزیته (Thixotropic) مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۵: الیاف آسیاب شده (شکل سمت چپ) و الیاف کوتاه شیشه (شکل سمت راست).

پارچه الیاف نمدی یا سوزنی (Chopped Strand Mat): الیاف سوزنی، نمدی و یا CSM رایج‌ترین الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت‌اند. این الیاف ترکیبی از الیاف خرد شده‌ای هستند که به صورت اتفاقی و درگیر درهم پخش شده‌اند (شکل ۱-۶) تا یک پارچه نمدمانندی را تشکیل دهند. طول الیاف در آنها معمولاً حدود ۵۰mm می‌باشد و وزن واحد سطح آنها از ۲۰۰ تا ۶۰۰ g/m<sup>2</sup> متغیر است. پارچه الیاف سوزنی با الیاف پیوسته (Continuous Filament Mat): این نوع از پارچه الیاف که به CFM معروفند، الیافی مشابه پارچه الیاف CSM هستند با این تفاوت که رشته‌های الیاف در آنها به صورت پیوسته است و به راحتی از هم جدا نمی‌شوند (شکل ۱-۷)



شکل ۱-۶: پارچه الیاف نمدی یا سوزنی (Chopped Strand Mat).



شکل ۱-۷: پارچه الیاف سوزنی با الیاف پیوسته (Continuous Filament Mat)

**تیشو (Tissue):** تیشو که به نامهای mat و Veil نیز نامیده می‌شود، به یک پارچه نازک نمدی ساخته شده از الیاف بسیار نازک که به صورت اتفاقی توزیع گردیده‌اند، اطلاق می‌گردد این نوع الیاف که از نظر ساختار شبیه دستمال کاغذی می‌باشند، به منظور تقویت ناحیه غنی از رزین قطعات کامپوزیتی و همچنین بهبود صافی سطح آنها ابداع گردیده‌اند. نوع مشابه دیگری از آنها وجود دارد که نمدهای چند لایه (overlay mat) نامیده شده و فقط مقداری ضخیم‌ترند. تیشوها در ضخامت‌های مختلف از ۰/۰۸ تا ۰/۳۴ میلیمتر با وزن واحد سطحی از ۳۰ تا ۶۰ g/m<sup>2</sup> و از جنس شیشه یا الیاف سنتزی نظیر پلی‌آکریلونیتریل یا پلی‌استر (پلی اتیلن ترفتالات) موجود می‌باشند. تیشوهای الیاف شیشه غالباً از الیاف شیشه نوع C (نوع مقاوم در برابر مواد شیمیایی) تهیه می‌گردند.

پارچه‌های بافته شده (Woven Rovings/ fabric): این پارچه‌ها به دو روش بافت نخ (Yarn) و یا دسته الیاف نتابیده (Rovings) تهیه می‌گردند و در بافت‌های مختلف و با وزن واحد سطح متفاوت و نتیجتاً ضخامت‌های مختلف به بازار عرضه می‌گردند. از نظر منشأ، الیاف به سه دسته معدنی، آلی و طبیعی تقسیم می‌شوند. الیاف شیشه، پنبه کوهی و بازالت منشأ معدنی و الیاف کربن و آرامید از جمله الیاف سنتزی می‌باشند. الیاف طبیعی خود دارای سه گروه الیاف با منشأ حیوانی (مانند موی بز)، گیاهی (مانند کنف) و معدنی (مانند آزبست) می‌باشند. مهم‌ترین الیاف مورد استفاده در صنعت فایبرگلاس عبارتند از: شیشه، کربن، آرامید و آلی (نظیر الیاف پلی اتیلن با آرایش یافتگی بالا). خواص مکانیکی مهم‌ترین الیاف تقویت کننده و تعدادی از مواد دیگر جهت مقایسه در جدول ۱-۴ آورده شده است. ازدیاد طول الیاف آلی در نقطه شکست آنها بالا است و از اینرو چقرمگی کامپوزیت را افزایش

خواهند داد. خطی بودن رفتار تنش-کرنش الیاف مدول بالا و میزان کم کرنش در شکست، از مشخصه‌های مهم آنها است.

جدول ۱-۴: مقایسه خواص مکانیکی مهم ترین الیاف تقویت کننده و برخی مواد دیگر [۴]

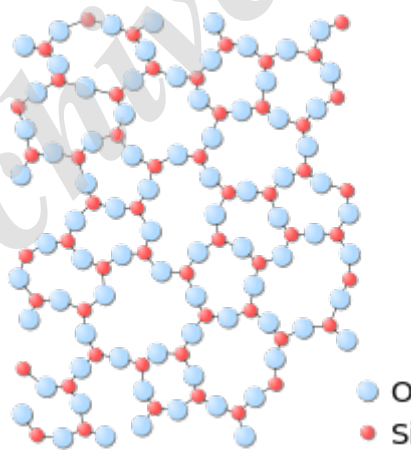
نوع مواد	چگالی نسبی	مدول یانگ، GPa	استحکام کششی، GPa	کرنش در شکست، %	قطر لیف، $\mu\text{m}$	قیمت \$/kg
الیاف:						
الیاف شیشه نوع E	۲/۵۵	۷۲	۱/۵-۳/۰	۱/۸-۳/۲	۱۰-۱۶	۲/۸
الیاف شیشه نوع S	۲/۵	۸۷	۳/۵	۴/۰	۱۲	۱۱
کربن بر پایه فیبر کربن PAN:	۲/۲۰	۳۸۰	۲/۰-۲/۴	۰/۵	۱۰	۲۸-۱۱۰
استحکام بالا (HS)	۱/۸	۲۲۰-۲۴۰	۳/۰-۳/۳	۱/۳-۱/۴	۷	
کارایی بالا	۱/۸	۲۲۰-۲۴۰	۳/۳-۳/۶	۱/۴-۱/۵	۷	
کرنش بالا	۱/۸	۲۲۰-۲۴۰	۳/۷	۱/۵-۱/۷	۷	
مدول متوسط (IM)	۱/۹	۲۸۰-۳۰۰	۲/۹-۳/۲	۱/۰	۷	
مدول بالا (HM)	۲/۰	۳۳۰-۳۵۰	۲/۳-۲/۶	۰/۷	۷	
SiCO پیوسته	۲/۵	۲۰۰	۳/۰	۱/۵	۱۰-۱۵	
سیلیکون کارباید whisker	۳/۲	۴۸۰	۷/۰	-	۱-۵۰	
SiTiCO پیوسته	۲/۳۵	۲۰۰	۲/۸	۱/۴	۱۰-۸	
بورون (Boron)	۲/۶	۴۱۰	۳/۴	۰/۸	۱۰۰	
$\alpha$ -Alumina (FP)	۳/۹	۳۸۰	۱/۷	۰/۴	۲۰	
$\beta$ -Alumina (Saffil)	۳/۳	۳۰۰	۲/۰	۰/۵	۳	
Alumina (Safimax $\psi/\theta$ SD)	۳/۳	۲۵۰	۲/۰	-	۳/۱	
Alumina (Safimax $\eta$ LD)	۲/۰	۲۰۰	۲/۰	-	۳/۲	
آرامید						
- مدول بالا	۱/۴۷	۱۸۰	۳/۴۵	۱/۹۰	۱۲	
- مدول متوسط	۱/۴۶	۱۲۸	۲/۶۵	۲/۴	۱۲	۴۸-۶۶
- مدول پایین	۱/۴۴	۶۰	۲/۶۵	۴/۰	۱۲	
	۱/۴	۱۷/۳	۰/۷	۲۲/۰	۱۲	
رزین ها:						
فنلیک	۱/۴	۷	-	۰/۵	-	
اپوکسی	۱/۲	۲-۳/۵	۰/۰۵-۰/۰۹	۱/۵-۶	-	۸-۴۰
پلی استر	۱/۴	۲-۳	۰/۰۴-۰/۰۸۵	۱-۲/۵	-	۲/۶
گرمانرمها:						
نایلون ۶۶	۱/۴	۲	۰/۰۷	۶۰	-	
پلی اتیلن با چگالی بالا	۰/۹۶	۱/۳	-	-	-	
پلی اتیلن با چگالی پایین	۰/۹۱	۰/۲۵	-	-	-	

## ۱-۲-۱- الیاف شیشه

الیاف شیشه رایج‌ترین و پرمصرف‌ترین لیف مورد استفاده در صنعت کا میوزیت است. برحسب نوع و ترکیب مواد به کاررفته در تهیه آنها، الیاف شیشه به انواع مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. ماده اصلی تشکیل دهنده الیاف شیشه همانند شیشه‌های معمولی (Lime Soda Glass) سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) است. اکسیدهای دیگر مانند  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{B}_2\text{O}_3$  برای اصلاح ساختمان شبکه  $\text{SiO}_2$  و همچنین بهینه کردن فرآیند ساخت نظیر پایین آوردن دمای ذوب به آن افزوده می‌شوند.

ساختمان الیاف شیشه یک شبکه سه بعدی از سیلیکون، اکسیژن و دیگر اتم‌ها است (شکل ۱-۸) که به صورت غیرمنظم (Random) در کنار هم قرار گرفته‌اند. لذا الیاف شیشه، ساختمانی آمورف یعنی غیرکریستالی و همسان (Isotropic) دارند یعنی در تمام جهات دارای خواص مکانیکی یکسان هستند. مزایا و معایب این لیف درمقایسه با دیگر الیاف به شرح زیر است:

مزایا	معایب
قیمت پایین	مدول کششی پایین
استحکام کششی بالا	وزن مخصوص نسبتاً بالا
مقاومت شیمیایی بالا	حساسیت به سایش در حین حمل و نقل
خواص عایقی عالی (حرارتی و الکتریکی)	مقاومت خستگی پایین
شکننده بودن	
سختی بالا (سایش قالب‌ها و کندی ابزار برش)	



شکل ۱-۸: ساختار مولکولی الیاف شیشه برپایه  $\text{SiO}_2$

## ۱-۲-۲) انواع مختلف الیاف شیشه

ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه در جدول ۱-۵ نشان داده شده است. نشانه‌های معرف هر نوع لیف (S، E و غیره) از واژه ای که بیانگر خصوصیت آن لیف است اقتباس شده است. A اشاره به Soda-lime glass دارد و از واژه Alkali گرفته شده و همان شیشه معمولی است که در گذشته متداول بوده

است؛ اما امروزه تقریباً الیاف نوع E جایگزین آن شده است.

حرف C از واژه Chemical گرفته شده است و الیافی است که مقاومت شیمیایی خوبی را از خود نشان می دهد. حرف D از واژه Dielectric گرفته شده است و الیافی است که کم ترین ثابت دی الکتریک را دارند. هر چه ثابت دی الکتریک یک ماده کمتر باشد آن ماده در برابر امواج الکترومغناطیس شفافتر (transparent) است. لذا از این الیاف در ساخت سپرهای محافظ رادار استفاده می شود تا ضمن محافظت رادار از عوامل جوی، امواج را بدون افت از خود عبور دهند.

جدول ۱-۵: ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه [۵]

نوع الیاف شیشه						
S	M	E	D	C	A	ترکیب درصد شیمیایی، %
۶۴/۳-۶۵	۵۳/۷	۵۲-۵۶	۷۴/۵	۶۰-۶۵/۰	۷۲-۷۲/۵	SiO <sub>2</sub>
۲۴/۸-۲۵	-	۱۲-۱۶	۰/۳	۲-۶	۰/۶-۱/۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰-۰/۲	۰/۵	۰/۰۵-۰/۴	-	۰/۲	-	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۱	۱۲/۹	۱۶-۲۵	۰/۵	۱۳-۱۶	۹-۱۰/۰	CaO
۱۰-۱۰/۳	۹	۰-۶	-	۳/۰-۴	۲/۵-۳/۵	MgO
-	= Li <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۸/۰-۱۳	۲۲	۲-۷	-	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰-۰/۲۷	= CeO <sub>2</sub> ۳	۰-۱	۱/۰	۷/۵-۱۲	۱۳-۱۴/۲	Na <sub>2</sub> O
-	ZrO <sub>2</sub> = ۲	-	۰-۱/۳	۰-۲	-	K <sub>2</sub> O
-	۷/۹-۸	۰-۰/۴	-	-	-	TiO <sub>2</sub>
-	BeO= ۸	-	۰/۱	۰/۱	۰/۷	SO <sub>3</sub>
-	-	۰-۰/۵	-	-	-	F <sub>2</sub>
خواص فیزیکی مکانیکی:						
۲/۴۸-۲/۴۹	۲/۸۹	۲/۵۴-۲/۵۵	۲/۱۶	۲/۴۹	۲/۵۰	چگالی
۴۶۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۲۴۱۴	۲۷۵۸-۳۱۰۳	۲۴۱۴	استحکام کششی MPa
۸۴-۸۸	۱۱۰	۷۲/۴-۷۶	۵۱/۷	۷۰	۷۲/۵	مدول کششی GPa
۴/۵۳-۴/۶۰	-	۵-۸۶-۶/۶	۳/۵۶-۳/۶۲	۶/۲۴-۶/۳۰	۶/۹۰	ثابت دی الکتریک

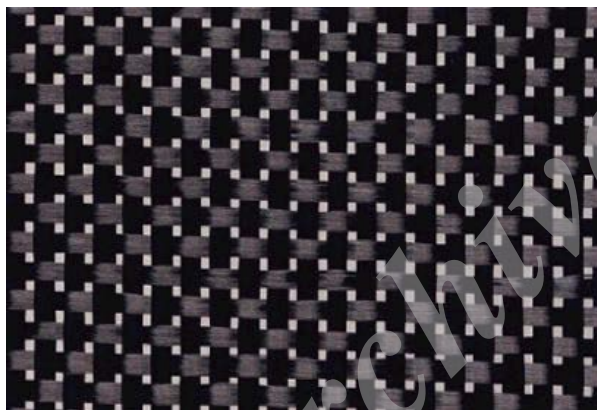
A: Soda lime glass C: Chemical resistance D: Low dielectric constant  
E: Good electrical Properties M: High modulus fiber S: High strength fiber

E از واژه Electrical گرفته شده است. این الیاف خواص عایق الکتریکی خوبی از خود نشان می دهند و پایین ترین قیمت را دارا می باشند. بیشتر از ۹۰٪ از الیاف شیشه مورد استفاده در صنعت کامپوزیت از این نوع است. M از واژه Modulus گرفته شده است و الیافی هستند که مدول بالایی دارند. S اشاره به High Strength دارد و این الیاف بالاترین استحکام را دارا می باشند. استحکام این نوع الیاف ۲۰٪ از نوع E بیشتر، و قیمت آن 4 برابر الیاف E است. (لازم به تذکر است که این الیاف ابتدا جهت کارهای نظامی طراحی شده بودند. بعدها الیافی با خواص استحکامی مشابه با کد S-2 جهت کاربردهای

عمومی به بازار عرضه شدند. به الیاف S و گاهی الیاف S-2 در اروپا، الیاف R اطلاق می شود. در سالهای اخیر، الیافی با نام ECR (Extra Corrosion Resistant) به بازار عرضه شده است که در واقع همان الیاف C بهبود یافته می باشند. این نوع الیاف مقاومت بسیار خوبی در برابر اسیدها و بازها از خود نشان می دهند. همچنین نوع دیگری از الیاف شیشه با درصد SiO<sub>2</sub> بالا (high silica) ابداع شده است که مقاومت حرارتی آنها بسیار زیاد است. از این نوع الیاف برای ساخت سپرهای حرارتی و نازل موشک‌های سوخت جامد استفاده می شود و جایگزین مناسبی برای الیاف پنبه کوهی محسوب می شوند. قیمت این نوع الیاف در حدود ۱۰ برابر الیاف شیشه نوع E می باشد.

### ۱-۲-۲- الیاف کربن یا گرافیت

کربن عنصری با چگالی  $2/27 \text{ g/cm}^3$  است و شکل‌های مختلف بلوری دارد. شکل بلوری مورد نظر در الیاف کربن، ساختار گرافیتی آن است که در آن عناصر کربن به صورت لایه‌های شش ضلعی قرار گرفته‌اند. شکل دیگر و معروف کربن، ساختار کووالانسی الماس است که در آن اتم‌ها، شبکه‌های سه بعدی سخت و انعطاف ناپذیر تشکیل می دهند. الیاف کربن (که در آمریکا به آن الیاف گرافیت می گویند) الیافی به مراتب نازک تر از موی انسان ( $100-200 \mu\text{m}$ ) در قطری بین  $10-6 \mu\text{m}$  می باشند. علیرغم حجم بالای استفاده از آنها، قیمت الیاف کربن هنوز نسبتاً بالا است. در شکل ۱-۹ صورت های مختلف الیاف کربن مشاهده می شود.



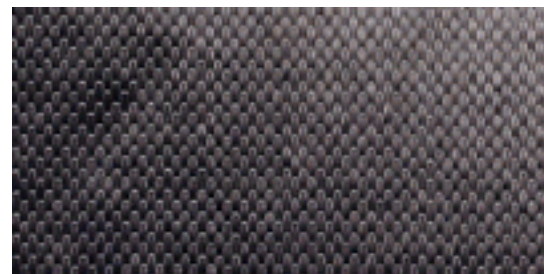
Woven fabric I



Roving



Preform



Woven fabric II

شکل ۱-۹: شکل های مختلف الیاف کربن



الیاف کربن از لحاظ ساختمانی متشکل از کربن های گرافیتی هستند و از نظر شیمیایی شامل ۹۹/۹٪ کربن خالص است. این ساختمان از لایه های موازی تشکیل شده است که در آنها اتم های کربن به صورت شش وجهی های منظم قرار گرفته اند. به این لایه ها صفحات بنیادی (basal plane) گفته شده و فواصل این لایه ها  $3/4 \text{ \AA}$  می باشد که بزرگتر از فاصله بین اتم های مجاور  $1/42 \text{ \AA}$  در هر لایه است هدایت الکتریکی و حرارتی بالای گرافیت در جهت لایه ها به علت تحرک الکترون های  $\pi$  در بین لایه ها است. این صفحات به وسیله نیروهای ضعیف واندروالسی در کنار هم قرار گرفته اند در حالی که پیوند محکم کووالانسی بین اتم های کربن موجود در هر لایه وجود دارد. لذا الیاف کربن از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی رفتاری ناهمسان (Anisotropic) از خود نشان می دهند. به همین جهت مدول آنها در جهت صفحات بنیادی حدود  $1000 \text{ Gpa}$  و در جهت عمود بر این صفحات حدود  $35 \text{ Gpa}$  می باشد. لذا جهت دهی صفحات بنیادی در جهت محور طولی الیاف باعث تولید الیافی با مدول بالا می شود که با توجه به چگالی کم این مواد (حدود  $2 \text{ g/cm}^3$ ) در نهایت الیافی با مدول ویژه بسیار بالا حاصل می گردد.

مزایای الیاف کربن:

- نسبت بسیار زیاد استحکام به وزن
- نسبت بالای مدول کششی به وزن
- استحکام بالای خستگی (مناسب کاربرد در هواپیما، خودرو، کالاهای ورزشی و آلات موسیقی)
- ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین (مناسب استفاده در دستگاه های اندازه گیری)
- مقاومت بالا در برابر خوردگی (کاربردهای زیست سازگار، صنایع شیمیایی و خطوط لوله)

معایب الیاف کربن:

- ۱- شکننده بودن
- ۲- هادی الکتریکی
- ۳- کرنش کم در شکست
- ۴- قیمت بالا

### ۳-۱- رزین ها

دومین جزء اصلی یک کامپوزیت، رزین می باشد. در اینجا منظور از رزین هر نوع پلیمری است که به عنوان زمینه یا فاز پیوسته کامپوزیت استفاده می شود. نقش رزین ها در کامپوزیت های لیفی عبارت است از:

- نگهداری الیاف در کنار یکدیگر.
- انتقال تنش به الیاف.
- محافظت از الیاف در مقابل عوامل محیطی (نظیر رطوبت).
- حفاظت سطح الیاف از سایش.

## ۱-۳-۱- رزین های اپوکسی

عبارت اپوکسی پیشوندی است که به یک پل اکسیژنی که اتم اکسیژن از دو طرف به دو گروه دیگر متصل باشد اطلاق می‌گردد. رزین های اپوکسی که از سال ۱۹۴۷ به صورت تجاری در آمریکا تولید شدند، حاوی دو حلقه در دو انتهای زنجیرند که معروف به اپوکساید (Epoxyde) یا اکسیران (Oxirane) می‌باشند. این گروه عاملی قابلیت اتصال به بسیاری از ترکیبات آلی را دارا می‌باشد.

رزین های اپوکسی معمولاً از واکنش اپی کلروهیدرین (کلرومتیل اکسیران) با ساختار شیمیایی با یک ترکیب حاوی چند گروه هیدروکسیل فعال که عمدتاً از دی فنیلول پروپان (Diphenylol Propane) یا بیسفنل (Bisphenol A) استفاده می‌شود، تهیه می‌گردند. اپی کلروهیدرین مایعی است بی رنگ که دارای بوی ناراحت کننده شبیه به کلروفرم می‌باشد و از واکنش کلر و پروپیلن تهیه می‌شود. نقطه ذوب آن  $57/2^{\circ}\text{C}$  - و نقطه جوش آن در  $760$  میلیمتر جیوه  $116/11^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. هنگام کار با این ماده، باید احتیاط های لازم را رعایت نمود چون سمی و مشکوک به سرطانزایی است. بیسفنل A ماده ای جامد و سفید رنگ با نقطه ذوب  $153^{\circ}\text{C}$  است و از واکنش دو مول فنل و یک مول استن به دست می‌آید.

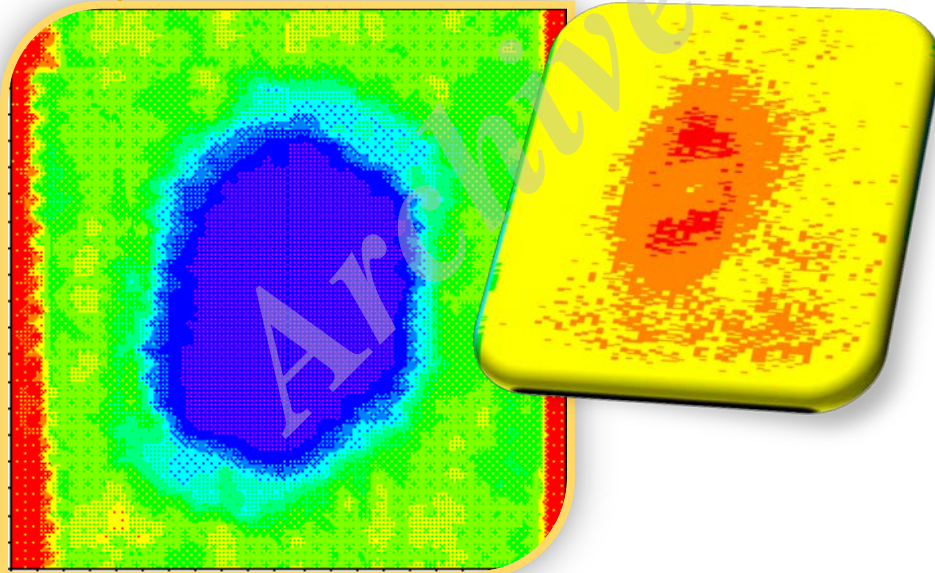
این رزین نیز با نام های دیگر توسط سایر شرکت ها به بازار عرضه می‌شود. درجه پلیمر شدن یا  $\eta$  در رزین های اپوکسی مایع بین  $0$  تا  $30^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. رزین های اپوکسی به جهت داشتن خواص بسیار خوب، کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند. مهم ترین این خواص عبارتند از:

۱. خواص مکانیکی خوب: مانند چقرمگی (toughness) سختی و مقاومت سایشی بالا که بیشتر به خاطر حضور ساختارهایی چون بیسفنل A در این رزین ها است.
۲. عایق الکتریکی خوب
۳. مقاومت حرارتی عالی
۴. چسبندگی عالی به بسیاری از مواد مانند فلزات، چوب، بتن، شیشه، سرامیک ها و بسیاری از پلاستیک ها. این ویژگی ناشی از وجود گروه های اپوکسی و هیدروکسیل در زنجیره است.
۵. مقاومت شیمیایی خوب به ویژه در محیط های قلیایی: این ویژگی ناشی از حضور حلقه های بنزنی در زنجیره اصلی و پایداری شیمیایی خوب اتصالات فنلی - اتر می‌باشد.
۶. جمع شدگی (shrinkage) کم پس از واکنش های پخت، این خاصیت امکان ساخت قطعاتی با ابعاد دقیق را فراهم می‌کند و تنش های پسماند در قطعه کم خواهد بود.

## فصل ۲

### عیوب متداول در کامپوزیت‌ها و

### روش‌های بازرسی کنونی



## ۱-۲- مقدمه

در هر صنعتی کنترل کیفیت، بسیار دارای اهمیت است و بدون آن نمی‌توان قطعاتی با کیفیت مطلوب و دوام مناسب تولید نمود. عمده شکایتها در مورد کیفیت ظاهری و کارایی قطعات فایبرگلاس، ناشی از آن است که رزین خوب پخت نشده است. اما برخی از اشکالات مشاهده شده، ناشی از عدم دقت در حین کار می‌باشد. نحوه اصلاح این عیوب با بررسی علت ظهور آنها به راحتی مشخص می‌شود. در این فصل ابتدا انواع نقص‌ها و روش‌های رفع عیوب متداول در کامپوزیت‌ها با تأکید بر روش لایه‌گذاری دستی شرح داده می‌شوند. سپس به آزمون‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها که به کمک آنها می‌توان مشخصات قطعات کامپوزیتی را تعیین نمود یا کنترل کیفیت آنها را انجام داد، پرداخته می‌شود.

## ۲-۲- انواع نقصها

## ۱-۲-۲- چین و چروک برداشتن

چین و چروک برداشتن (wrinkling) نظیر آنچه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، ناشی از تبخیر استایرن یا مونومر وینیلی موجود در رزین پلی استر غیر اشباع روی سطح لایه‌ی ژلی است که سبب پخت ناقص لایه ژلی نیز می‌گردد. برای جلوگیری از چین و چروک برداشتن باید مطمئن بود که آمیزه رزین یعنی نسبت‌های رزین به شروع کننده و شتاب دهنده، مناسب است و لایه ژلی خیلی نازک نیست و با کنترل دما و رطوبت و اینکه قالب در معرض جریان هوا، بویژه هوای گرم نباشد می‌توان آن را برطرف نمود. اگر کارگاه به وسیله هوای گرم، گرم می‌شود باید قالب را در مکانی قرار داد که در معرض مستقیم جریان هوا نباشد.

## ۲-۲-۲- حباب حباب شدن

حباب حباب شدن سطح (pinholing) ناشی از حبابهای کوچک هوا است که در لایه ژلی قبل از ژل شدن آن محبوس شده‌اند. نمونه ای از این نوع نقص در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. این اشکال زمانی اتفاق می‌افتد که گرانشی رزین خیلی بالا است یا پرکننده زیادی دارد یا رزین لایه ژلی، لایه فیلم را به خوبی خیس نمی‌کند.

## ۲-۲-۳- چسبندگی ضعیف لایه ژلی

چسبندگی ضعیف لایه ژلی به لایه‌های بعدی ناشی از آن است که یا لایه‌ها خوب پخت نشده‌اند یا قبل از لایه گذاری، لایه ژلی خیلی خشک شده است. این مسأله سبب می‌شود پس از جدا کردن قطعه از قالب، اشکالاتی نظیر آنچه که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، اتفاق افتد.

## ۲-۲-۴- ترکهای ریز برداشتن

به وجود آمدن ترکهای ریز (crazing) در سطح قطعات کامپوزیت که پس از ساخت یا چند ماه پس از آن اتفاق می‌افتد، یکی از معایب رایج در قطعات کامپوزیتی است. این اشکال در نواحی غنی از رزین یا جایی که آمیزه رزین یا آمیزه لایه ژلی مناسب نبوده اتفاق می‌افتد. این ترک‌ها ممکن است به دلیل زیاد بودن استایرن یا ضخیم بودن لایه ژلی بروز کند. هرچه رزین منعطف‌تر باشد

می توان لایه ژلی ضخیم تری داشت و برعکس، اگر سخت باشد باید آن را نازک تر گرفت. این اشکال اگر پس از چند ماه اتفاق افتد ناشی از عدم پخت مناسب رزین یا زیاد بودن پرکننده آن می باشد. بروز ترک های ریز در سطح مقطع قطعات ضخیم و یا ترکهای بزرگ در نواحی ضخیم قطعات کامپوزیتی یکی از اشکالات رایج است. در صورت عدم جلوگیری از بروز این نقایص و یا ترمیم نکردن آن، تمرکز تنش در نوک این ترک ها و یا نفوذ رطوبت در آنها باعث کوتاهی عمر قطعات کامپوزیتی می شود. علت اصلی بروز این عیوب ناشی از عدم کنترل گرمای ناشی از پخت رزین پلی استر است. با استفاده از کاتالیزور مناسب و کنترل شرایط پخت، می توان این نقایص را رفع نمود.

#### ۲-۲-۵- ترک های ستاره ای

ترک های ستاره ای یکی دیگر از معایبی است که گاهی اتفاق می افتد. این اشکال ناشی از ضخیم بو دن لایه ژلی و یا به دلیل ضربات وارد شده به پشت قطعه می باشد. در هر حال ضخامت لایه ژلی هرگز نباید از ۰/۵ میلیمتر بیشتر شود.

#### ۲-۲-۶- نقاط خشک داخلی

نقاط خشک داخلی زمانی به وجود می آیند که دو لایه از الیاف را بخواهیم به طور همزمان آغشته سازی کنیم اگر با سکه روی سطح قطعه ضربه زده شود، از صدای آن می توان متوجه این نقاط خشک داخلی شد.

#### ۲-۲-۷- حل شدن رزین

حل شدن رزین (leaching) یک عیب مهم است و پس از استفا ده از قطعه و در معرض رطوبت قرار گرفتن ظهور می کند. این اشکال به علت از دست رفتن رزین قطعه است و به دلیل آن است که یا رزین خوب پخت نشده یا انتخاب رزین به اشتباه صورت گرفته است.

#### ۲-۲-۸- تاول زدن

وجود تاول (Blister) مشخص می کند بین لایه ها جدایی (Delamination) وجود دارد این جدایی ناشی از آن است که هوا یا حلال در بین لایه ها محبوس شده است. اگر تاولها در محدوده وسیعی از قطعه وجود داشته باشند، بیانگر آن است که رزین خوب پخت نشده است؛ این نوع تاول ممکن است تا چند ماه پس از قالبگیری بروز نکند. همچنین اگر قطعه در طی پخت در معرض تشعشع حرارتی زیادی قرار گیرد تاول ایجاد می شود. یکی از دلایل بروز این نقص ممکن است ناشی از مناسب نبودن کاتالیزور MEKP باشد اگر تاول در زیر لایه سطحی باشد ممکن است به علت عدم خیس شدن خوب الیاف شیشه با رزین در طی آغشته سازی باشد. این مطلب ناشی از این حقیقت است که زمان کافی به الیاف جهت جذب رزین قبل از غلطک کاری داده نشده است. این نوع تاول را می توان پس از جدا کردن قطعه از قالب به کمک بازرسی چشمی مشاهده نمود. گاهی اوقات تاول پس از آنکه قطعه کامپوزیتی به مدت زمان طولانی در معرض آب قرار داشته است اتفاق می افتد که در این صورت ناشی از جمع شدن آب در حبابهای ریز لایه ژلی یا در زیر آن است. فشار آب یا طولانی شدن زمان غوطه وری در آب سبب خواهد شد که حبابهای کوچک در لایه ژلی رشد کرده و سبب ترک ترک شدن آن شود. اگر آب گرم باشد (نظیر استخر شنا) این اثر شدیدتر خواهد بود. آب جمع شده

در این جابها سبب حل شدن املاح قطعه شده، حالت اسیدی ضعیف به خود می گیرد. اگرچه کلیه عوامل مؤثر در این نقص هنوز بخوبی شناخته نشده است و مطالعات در این زمینه ادامه دارد، اما انتخاب سیستم رزین مناسب و لایه گذاری خوب مطابق استاندارد، این نوع نقص ها را به حداقل می رساند.

## ۲-۲-۹- زرد شدن

قطعات GRP پس از آنکه مدت زمان طولانی در معرض نور خورشید قرار بگیرند زرد می شوند. اگرچه این پدیده ناچیز است اما در قطعات شفاف و قطعات سفید ممکن است قابل توجه باشد. این پدیده سطحی ناشی از جذب تشعشعات ماورای بنفش نور خورشید است. به همین جهت بیشتر رزین هایی که جهت تهیه ورق ها مورد استفاده قرار می گیرند، حاوی مواد جاذب UV هستند که به میزان قابل توجهی سرعت زرد شدن را کاهش می دهند. زرد شدن تأثیری برخواص مکانیکی ورق ندارد. چند لایه ای هایی که رزین زیادی دارند، نسبت به آنها که الیاف بیشتری دارند، دیرتر زرد می شوند. اگر یک ورق کاملاً پخت شود و حداقل ۷۵٪ وزنی رزین داشته باشد و اگر لایه سلوفان آن قبل از استفاده، از آن جدا گردد، میزان زرد شدن آن پس از مدت زمان طولانی در معرض نور خورشید بودن ناچیز و قابل اغماض است.

## ۲-۳- روش های آزمون غیر مخرب

روش های آزمون غیر مخرب (Non-Destructive Testing, NDT) از آزمون هایی هستند که روز به روز بر اهمیت آنها افزوده می شود. این موضوع پذیرفته شده است که تمامی مواد مهندسی حاوی نقص و عیب (defect) می باشند. ترک ها ی ریز (craze)، ترک (crack)، جدایی لایه ها (delamination)، شکست الیاف (fiber fracture) و حفره (void) نمونه نقص های موجود و رایج در کامپوزیت ها می باشند. این عیوب یا ناشی از مواد اولیه است یا در طی فرآیند ساخت یا مراحل مونتاژ و یا در طی سرویس دهی به وجود می آیند. نمونه نقص هایی که در اثر شرایط سرویس دهی ایجاد می شوند، آورده شده است. تمامی نقص ها در لحظه اول مضر نیستند و اینکه یک نقص سبب خروج قطعه ای از سرویس می شود، بستگی به عوامل متعددی از جمله نوع، اندازه، موقعیت آن و شرایط سرویس دهی قطعه دارد لذا تشخیص و شناسایی نقایص برای تصمیم گیری در مورد قطعه حاوی آنها، بسیار حایز اهمیت است.

روش های آزمون غیر مخرب روش های مختلفی اند که می توان به کمک آنها بدون صدمه زدن به قطعه، این نقایص را شناسایی کرد. این روش ها اساساً جهت بازرسی، کنترل کیفیت و امکان سنجی ادامه سرویس دهی قطعات فلزی و نیز در کارهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته اند. متعاقباً استفاده از این روش ها در کامپوزیت های پلیمری نیز، چه در امور تحقیقاتی و چه در صنعت، رایج گردیده است. از آنجا که مکانیزم های شکست (failure) کامپوزیت ها در مقایسه با فلزات به خوبی شناخته نشده اند، غالباً پس از شناسایی نقص به کمک روش های NDT قضاوت در مورد اهمیت آن مشکل است.

انواع مختلف آزمون های غیرمخرب را می توان شامل سه رده تحقیقاتی، کنترل کیفی و صنعتی (خط تولید) در نظر گرفت. از نظر قدمت می توان آنها را در دو گروه روش های پایه ای و روش های جدید طبقه بندی نمود. روش های پایه ای شامل روش مافوق صوت (Ultrasonic C-Scan)، رادیوگرافی (Radiography) و روش های ارتعاشی (Vibration) می گردد. از روش های

جدید می توان به روش های حرارتی یا گرمانگاری (Thermography) نشر صوتی (Acoustic Emission) و روش Acousto-Ultrasonic اشاره کرد. در این بخش روش های مافوق صوت و گرمانگاری به اختصار شرح داده می شوند.

جدول ۱-۲: نقایص ایجادشده در مواد کامپوزیتی در اثر شرایط سرویس دهی.

Service Loading Condition	Corresponding Defects
Fatigue and Impact	Matrix Cracking
	Crazing
	Fiber Failure
	Delamination
Lightning	Debonding Between the Fiber and Matrix
	Delamination
Environmental Conditions	Matrix Plasticization
	Debonding
Erosion	Fiber Chemically Corroded (Glass, Kevlar)
	Reduction in Thickness

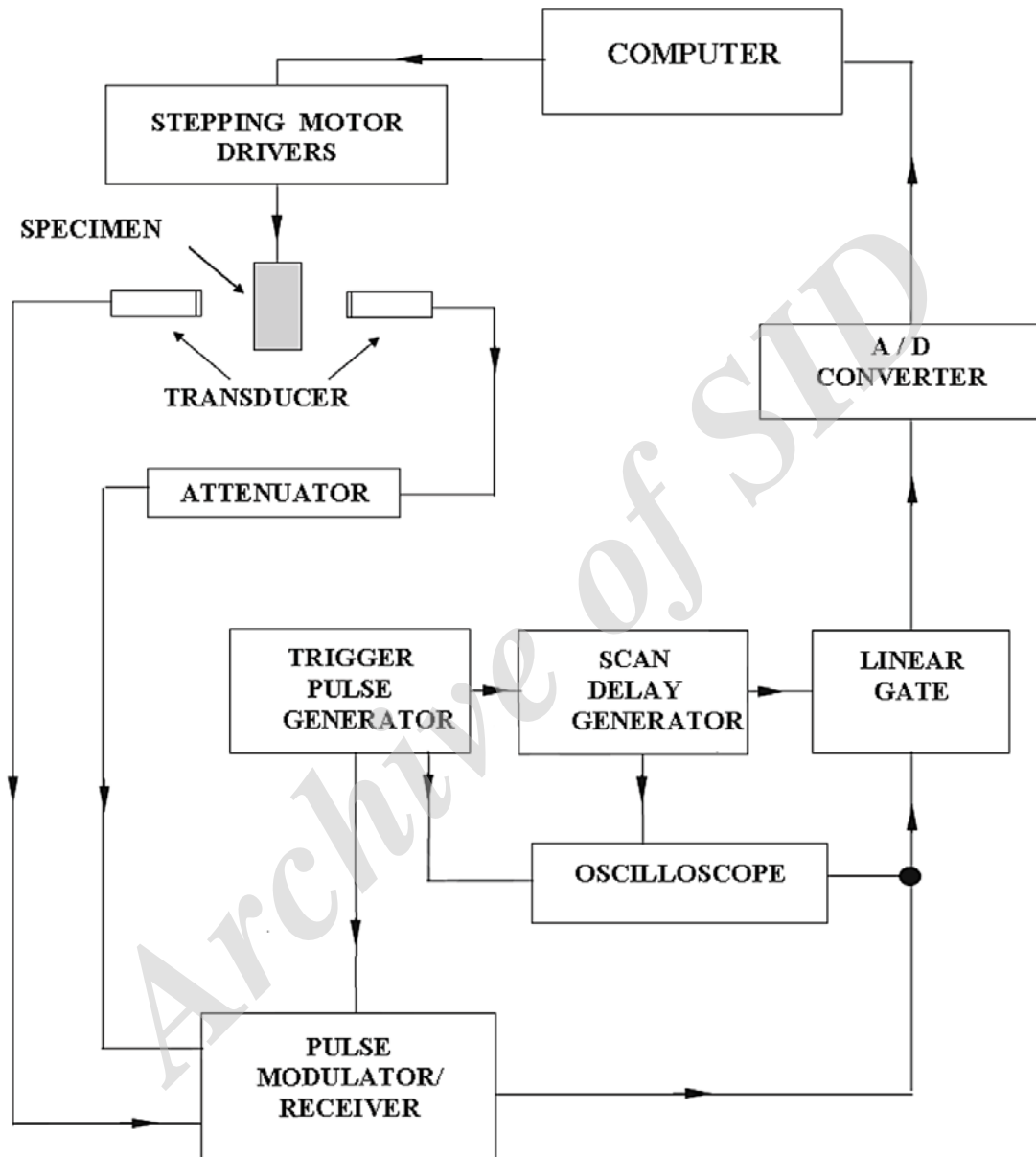
### ۱-۲-۲- روش مافوق صوت

روش مافوق صوت (ultrasonic C-scan) یکی از روش های قدیمی و کاملاً شناخته شده می باشد که به میزان قابل توجهی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش از امواج مافوق صوت که به آنها امواج تنشی (stress wave) نیز گویند، استفاده می شود. لذا جهت شناخت این روش، اطلاعاتی در مورد امواج ضروری است. امواج تنشی، امواج مکانیکی یا ارتعاشی هستند که در آنها ارتباط بین فرکانس (f) و طول موج (λ) به صورت زیر است:

$$\lambda = c/f$$

که در این رابطه C سرعت موج می باشد. سرعت، تابع خواص الاستیک ماده است و مشاهده می شود که در یک فرکانس ثابت، طول موج بستگی به نوع ماده مورد بررسی دارد. فرکانس مورد استفاده جهت کامپوزیت ها ۱۰-۱ MHz است و گاهی هم از فرکانس ۵۰۰ kHz و یا تا ۲۵ MHz هم استفاده می کنند. این در حالی است که فرکانس های قابل شنیدن تا ۲۰ kHz است. لذا فرکانس های مورد استفاده قابل شنیدن نیستند. توسعه یا حرکت یک موج مافوق صوت، تحت تأثیر فرکانس، طول موج، ساختار کامپوزیت، نقص های ساختاری و نقص های ناشی از بارگذاری قرار می گیرد. در روش مافوق صوت باید موج را به سطح قطعه ارسال کرد و مقدار منعکس شده یا عبور کرده را مورد بررسی قرارداد که این کار توسط ترانسدوسرهای (transducer) از نوع پیزوالکتریک انجام می شود. اینها می توانند پالس های الکتریکی را به ارتعاش در حالت ارسال و ارتعاشهای مکانیکی یا موج های تنشی را به پالس های الکتریکی در حالت دریافت تبدیل نمایند. عبور امواج بین ترانسدوسرها و مواد، بسیار ضروری است لذا به

یک ماده حد واسط (coupling media) بین آنها نیاز است که این ماده باید خود قابلیت انتقال امواج را داشته باشد. غالباً از آب و گاهی از گریس ها و ژلهای مختلف به عنوان ماده حد واسط استفاده می‌شود.



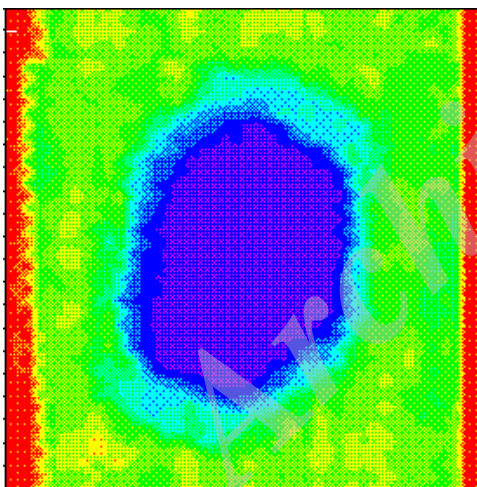
شکل ۱-۲: بلاک دیاگرام آزمون مافوق صوت به روش (Through-Transmission).

جهت به دست آوردن نتایج مطلوب باید همواره مطمئن بود که در طی آزمایش، ماده حد واسط بین ترانسدیوسرها و قطعه مورد آزمون وجود دارد لذا غالباً از یک حمام آب استفاده می‌شود و ترانسدیوسرها و قطعه را داخل آب قرار می‌دهند. اگر از دو ترانس دیوسر، یکی به عنوان فرستنده و دیگری به عنوان گیرنده استفاده شود و قطعه در حد واسط این دو قرارگیرد به این روش

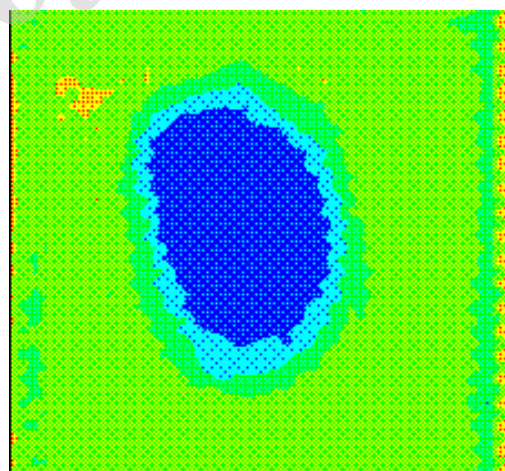


(through-transmission) گفته می‌شود. در روش مافوق صوت کلیه نقاط قطعه بررسی (scan) شده، تغییرات دامنه موج (attenuation) ثبت می‌گردد. این نتایج را می‌توان به روشهای مختلف نشان داد که رایج ترین آن بیان نتایج به صورت صفحه-ای است که به (C-scan) معروف است. در این حالت می‌توان شدت نقص (severity) را به صورت سیاه و سفید با میزان تیرگی مختلف (یا در رنگ های مختلف) نشان داد. مزایا و معایب روش مافوق صوت را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

مزایا	معایب
<ul style="list-style-type: none"> <li>• قدرت نفوذ بالا، امکان بررسی قطعات ضخیم</li> <li>• کفایت دسترسی به یک سطح قطعه</li> <li>• حساسیت بالا در شناخت نقص های کوچک</li> <li>• حساس به نقص های سطح های</li> <li>• قابل استفاده در مکان های مختلف</li> <li>• قابلیت اتوماتیک شدن</li> <li>• بی ضرر و زیان بودن</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• زمان آزمایش طولانی جهت قطعات بزرگ</li> <li>• عدم حساسیت به نقص های نزدیک سطح</li> <li>• نیاز به ماده حد واسط</li> <li>• نیازمند نیروی ماهر و متخصص</li> <li>•</li> </ul>



ب) کامپوزیت HTA/913



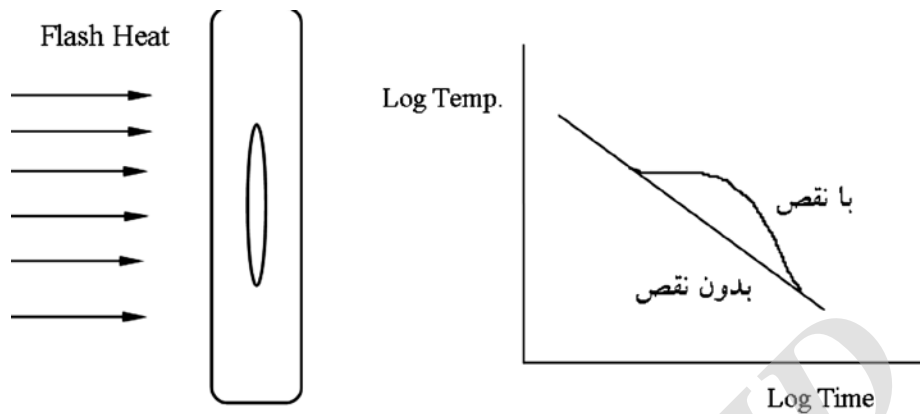
الف) کامپوزیت HTA/982A

شکل ۲-۲: تصویر آزمون مافوق صوت C-scan ناشی از نقص حاصل از آزمون ضربه در کامپوزیت های اپوکسی / الیاف کربن

### ۲-۲-۲- روش گرمانگاری گذرا

روش گرمانگاری گذرا (transient thermography) یکی از روش های جدید در بررسی عیوب است که در سالهای اخیر توجه محققین را به خود جلب کرده است. در این روش پاسخ قطعه وقتی در معرض یک پالس حرارتی (flash heat) قرار می‌گیرد اندازه گیری می‌شود. این پالس حرارتی سریع ، سبب بروز اثرات گذرا می‌گردد که ثبت آن گرمانگاری گذرا نامیده می‌شود. اگر یک طرف

یک قطعه در معرض یک پالس حرارتی قرار گیرد دمای سطح آن افزایش می یابد. میزان افزایش دما به انرژی حرارتی، زمان اعمال حرارت و خواص حرارتی ماده بستگی دارد. حرارت از داخل ماده‌ای که حاوی نقص است، در سرعت های متفاوت نفوذ کرده (شکل ۲-۳) و سبب تغییرات در خواص حرارتی موضعی می‌گردد.

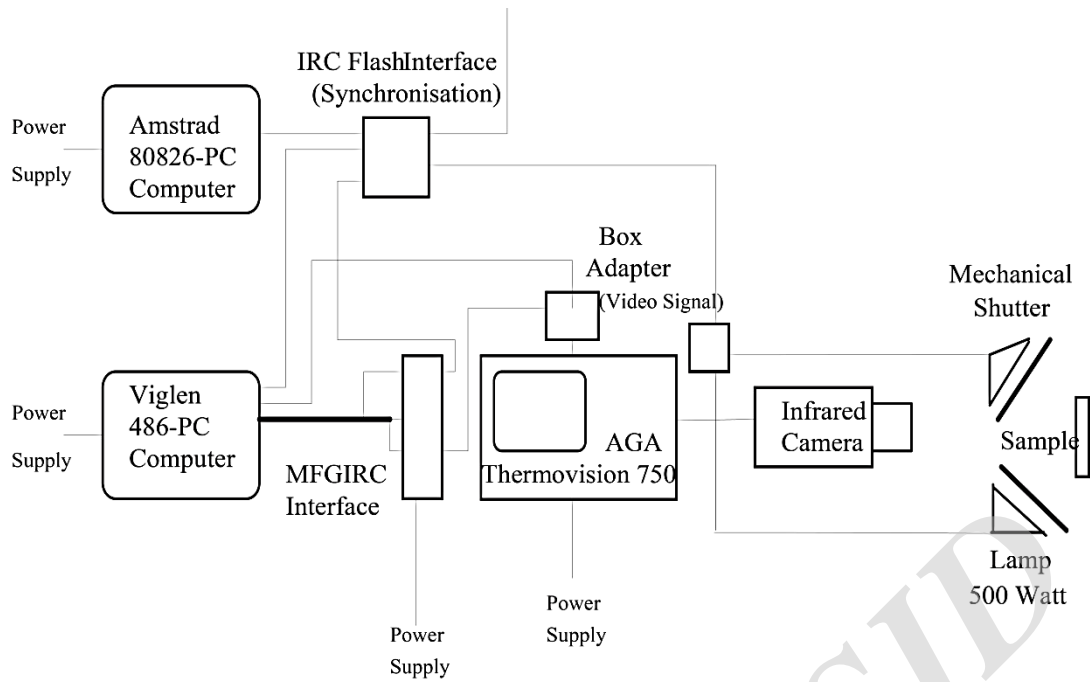


شکل ۲-۳: حرارت دادن قطعه و تغییرات دما بر حسب زمان در حالت بدون نقص و با نقص

نقص هایی از قبیل جدایی لایه ها (delamination) سبب کاهش میزان نفوذ حرارت در ماده شده، در نتیجه اختلاف دماهای موضعی گذرا را به وجود می آورند. این اختلاف دماها توسط یک دوربین IR ثبت می‌گردد. نمایی از مجموعه کامل این آزمایش در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

### روش های مختلف گرمانگاری گذرا

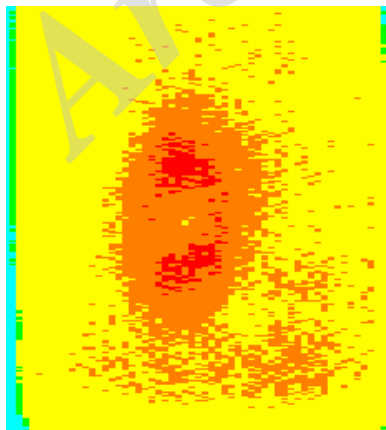
آزمون گرمانگاری گذرا را می‌توان به دو روش یک طرفه (Single-sided) و دوطرفه (Double-sided) بسته به نحوه قراردادن دوربین، منبع حرارتی و نمونه انجام داد. در روش یک طرفه، دوربین و منبع حرارتی در یک طرف قطعه قرار می‌گیرند. در این روش که برای نقص‌های نزدیک سطح به کار می‌رود، نقص به صورت موضعی گرم مشاهده می‌شود. در روش دوطرفه، منبع حرارتی در یک طرف قطعه و دوربین در طرف دیگر قرار می‌گیرد. در این حالت نقص به صورت قسمتی سرد مشاهده می‌شود که این روش برای بررسی نقص های عمیق‌تر استفاده می‌شود.



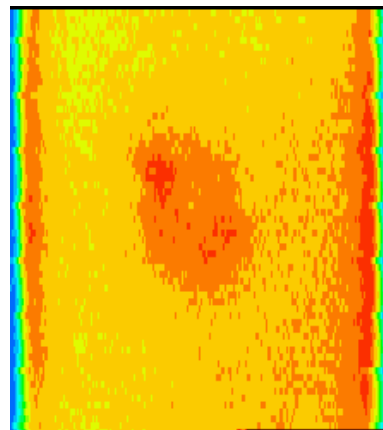
شد

کل ۲-۴: نمایی کامل از روش آزمون گرمانگاری گذرا و تجهیزات مربوطه.

باید توجه داشت که تغییرات حرارتی حتماً در حالت گذرا مورد بررسی قرار گیرند زیرا در حالت پایدار (steady-state) نقص‌ها تأثیری روی انتقال حرارت ندارند. اختلاف دمای قابل توجه برای شناخت یک نقص ممکن است فقط در یک مدت زمان کوتاه (معمولاً ۵۰۰ms) بروز کند، لذا ضروری است که تغییرات دما به کمک یک دوربین IR ویدئویی ثبت شود. حساسیت و دقت این روش با افزایش ضریب هدایت مواد کاهش می‌یابد و اگر سطح قطعه مورد آزمایش از قابلیت‌های مختلف نشر نور (emissivity) برخوردار باشد مشکلات کار بیشتر می‌شود. با اسپری کردن یک رنگ روی سطح قطعه می‌توان این مشکل را برطرف نمود. نمونه‌ای از نتایج حاصله در بررسی نقص‌های ایجاد شده در یک قطعه کامپوزیتی که تحت آزمون ضربه قرار گرفته است، در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



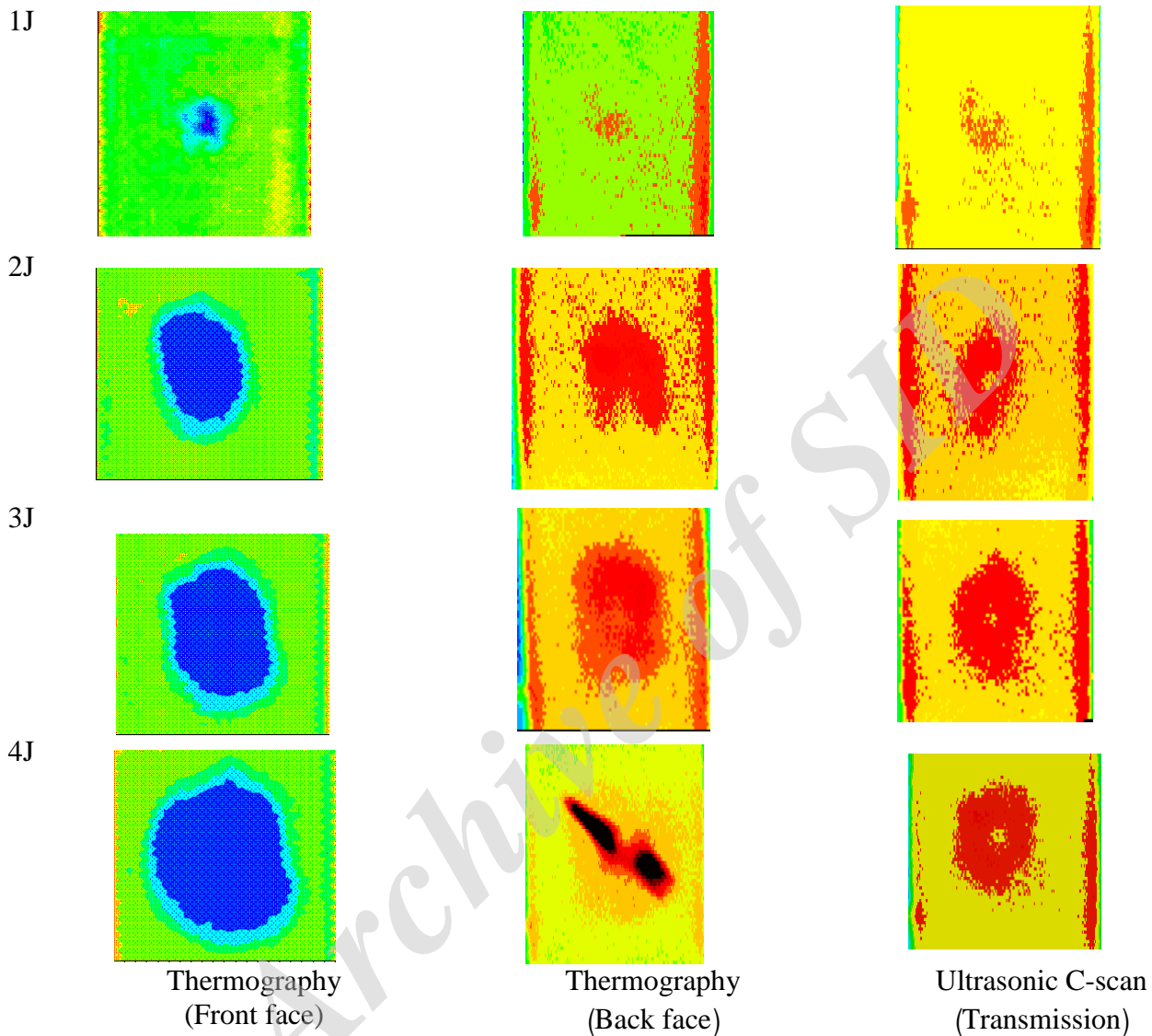
ب) ۲J ضربه



الف) ۱J ضربه

شکل ۲-۵: تصویر آزمون گرمانگاری ناشی از نقص حاصل از آزمون ضربه در کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن

مقایسه نتایج حاصل از بررسی های انجام شده به کمک روش های مافوق صوت و گرمانگاری گذرا، در مطالعه نقص های حاصل از آزمون ضربه در کامپوزیت های اپوکسی-الیاف کربن در شکل ۲-۶ نشان داده شده است.

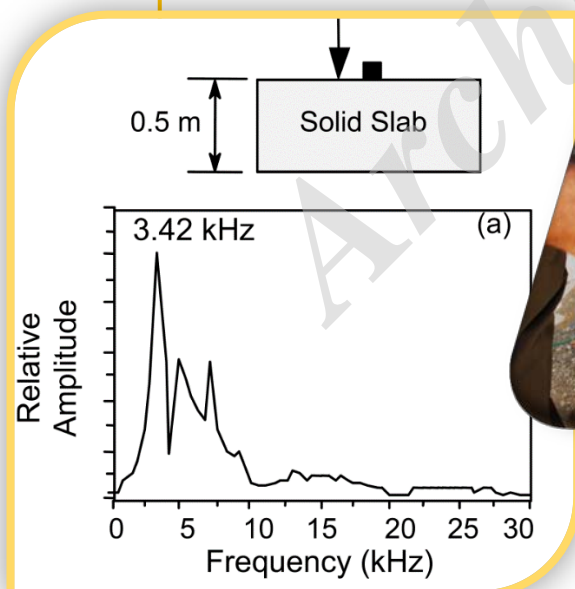


شکل ۲-۶: مقایسه نتایج آزمون گرمانگاری و روش مافوق صوت از نقص های حاصل از آزمون ضربه در کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن HTA/913 در مقادیر مختلف انرژی ضربه ای.

در این مطالعات در روش گرمانگاری، نمونه ها از دو طرف (سطح مقابل اعمال ضربه و سطح پشت آن) مورد بررسی قرار گرفته اند. این نتایج حساسیت روش گرمانگاری گذرا را به نحوه بررسی نمونه نشان می دهد. روش مافوق صوت به جهت عبور امواج از درون نمونه از چنین حساسیتی برخوردار نیست.

## فصل ۳

# معرفی روش موج ضربه (Impact-Echo) و کاربردهای فعلی آن



## ۳-۱- مقدمه

روشی غیر مخرب به منظور ارزیابی سلامت سازه‌های بتونی و سنگی می‌باشد که مبنای کار آن بر اساس استفاده از تنش صوتی ایجاد شده توسط ضربه (Impact) و نفوذ آن در سازه های بتونی و سنگی و دریافت امواج انعکاس یافته توسط عیوب داخلی یا مرزهای خارجی استوار می باشد. این روش (Impact-echo) در ابتدا توسط گروه های تحقیقاتی کوچکی در اداره استاندارد آمریکا (از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۶) و دانشگاه کرنل (از سال ۱۹۸۷ تا کنون) تا حد چشمگیری توسعه یافت. لازم به ذکر است در دسامبر ۱۹۹۷ جامعه ارزیابی مواد ایالات متحده امریکا (ASTM) این روش را با عنوان "روش استاندارد آزمون و اندازه گیری سرعت موج نوع P و ضخامت صفحات بتونی به وسیله روش Impact-echo" مورد پذیرش قرار داد. این استاندارد در کتاب سالانه استاندارد ASTM که در سال ۱۹۹۸ انتشار یافت مورد اشاره قرار گرفت. این روش همچنین توانایی تعیین عمر و سلامت سازه های باستانی مانند بناهای سنگی و بناهای خشتی را دارا می باشد.



شکل ۳-۱: نمایی از دستگاه Impact-Echo

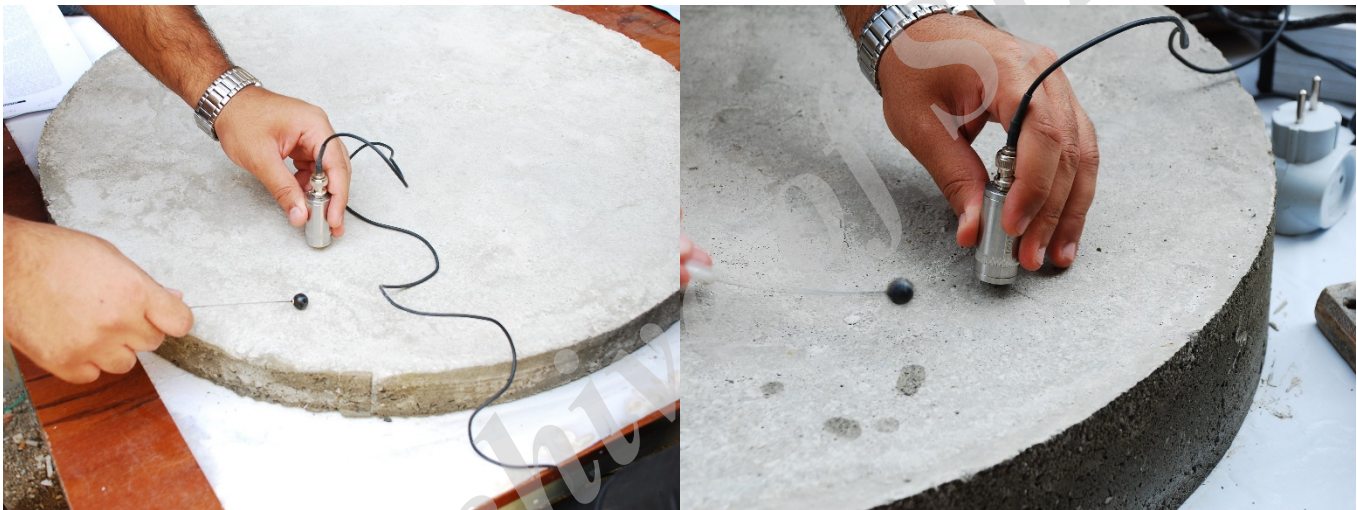
دستگاه Impact Echo، دارای کارایی های بسیار مناسب برای آزمایشهای غیر مخرب مانند تخمین خصوصیات مکانیکی مصالح ساختمانی (به ویژه بتن) با استفاده از امواج تنشی، می باشد. مزیت مهم این دستگاه به قرار زیر است (شکل ۳-۱):

- دقت بالا
- قابل حمل بودن
- استفاده بسیار ساده

از این روش می توان برای تعیین موقعیت و میزان گسترش عیوبی مانند ترک، تورق (Delamination)، فضاهای خالی، عیوب

لانه زنبوری و جداسدگی در صفحات بتونی تقویت شده (مانند پیاده رو، دیوار و پل)، صفحات لایه ای (مانند آسفالت لایه ای)، ستونها و تیرها (با مقطع دایروی یا مربعی) و مقاطع توخالی (لوله، تونل و یا تانک ذخیره) استفاده کرد. همچنین با استفاده از این روش می توان موقعیت عیوب در منافذی که از دوغاب برای پر کردن آنها استفاده شده است را نیز تعیین نمود. دقت اندازه گیری این روش برای تعیین ضخامت صفحات بتونی کمتر از ۳٪ بوده و می توان از آن برای تعیین عیوبی که دقیقاً در مرزهای خارجی قطعه واقع شده اند استفاده کرد (شکل ۳-۲). همچنین این روش توانایی تعیین عیوبی مانند ترک، فضاهای خالی و غیره در سازه های سنگی که در ساخت آنها قطعات آجر با لایه ای از ملات به یکدیگر متصل شده اند را دارد.

روش Impact-echo روشی محدود به شناسایی عیوب نیست، بلکه دارای کاربردهای مانند کنترل کیفیت، اندازه گیری ضخامت آسفالت یک بزرگراه و یا تعمیرات پیشگیرانه مانند بازرسی منظم از ستون های یک پل بتونی می باشد. شناخت کافی از روش Impact-echo و همچنین ساختار سازه ای که آزمون بر روی آن انجام می پذیرد دو عامل کلیدی برای موفقیت عملی این روش هستند.



شکل ۳-۲: نمایی از انجام تست بر روی قطعات بتنی

### ۳-۲- مبانی روش Impact-Echo

امروزه ارزیابی غیر مخرب (Non Destructive Evaluation) و یا آزمون غیر مخرب (Non Destructive Test) از جایگاه ویژه ای در مرحله ساخت، تولید و کنترل کیفیت محصولات برخوردار است. از روش های غیر مخرب نه تنها در مرحله طراحی و تولید بلکه در مراحل پس از راه اندازی نیز استفاده می گردد. از جمله روش های آزمون غیر مخرب می توان به روش های زیر اشاره داشت:

- آزمون انتشار امواج صوتی (اکوستیک)
- آزمون بصری و نوری
- آزمون رادیوگرافی

- آزمون ذرات مغناطیسی
- آزمون فرا صوت (التراسونیک)
- آزمون مایعات نافذ
- آزمون الکترومغناطیس
- آزمون نشتی
- آزمون ترموگرافی
- آزمون نشت شار مغناطیسی
- مقایسه روش‌ها

استفاده از بیشتر روشهای فوق مانند التراسونیک برای ارزیابی سازه های غیرفلزی به ویژه بتن و کامپوزیتها به دلیل ساختار ناهمگون (heterogeneous) آنها، مشکل می باشد چرا که امواج التراسونیک درون این ساختارها میرا (Damp) می شوند. امروزه برای ارزیابی این گروه از مواد از روشهای غیرمخربی که بر اساس امواج تنشی کار می کنند، استفاده می گردد. دلیل این موضوع پراکندگی (scattering) امواج تنشی و محدود شدن نفوذ آنها در این سازه ها می باشد. به منظور رفع این محدودیت در کاربرد روشهای آلتراسونیک در مورد سازه های بتنی، روشی بر مبنای امواج تنشی تولید شده بر اثر ضربه در اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه یافت که بعدها به روش Impact-Echo معروف شد. در روش موج ضربه (Impact-Echo)، یک پالس تنشی گذرا به وسیله یک ضربه مکانیکی در یک نقطه بر روی سطح خارجی جسم ایجاد می گردد. این پالس به صورت امواج اتساعی از نوع P (dilatational P wave) و پیچشی از نوع S (distortional S wave) در درون جسم، و به صورت موج رایلی نوع R (Rayleigh surface wave) در سطح جسم انتشار می یابد. امواج S و P با جبهه های نیم کروی درون جسم نفوذ می کنند و پس از برخورد با عیوب داخلی (مانند ترک یا حفره) و مرزهای خارجی جسم انعکاس می یابند. یک ترنسیدیوسر (Transducer) که نزدیک به محل ضربه قرار دارد، برای نمایش جابجایی های که بر اثر برخورد و انعکاس امواج پدید آمده است، بر روی سطح نصب می شود. امواج نوع P دارای اهمیت فراوانی در کاربرد روش Impact-Echo در مورد ساختارهای صفحه هستند چرا که جابجایی هایی که در اثر این امواج پدید می آید بسیار بزرگتر از آنها می باشد که در اثر امواج نوع S نزدیک به سطح هستند پدید می آیند.

### ۳-۳- پیشینه پژوهش

روزانه به تعداد ساختمان‌هایی که به دلایل ایمنی به تدریج غیرقابل استفاده می‌شوند در کشورهای صنعتی افزوده می‌گردد [۷]. بسیاری از عیوبی که در سازه‌های بتنی وجود دارند به دلیل قرار نداشتن در سطح با چشم قابل مشاهده نمی‌باشند [۱۰]. امروزه معمولاً از چندین روش ارزیابی به طور ترکیبی برای سنجش پایه‌های بتنی پل استفاده می‌گردد [۹]. کشیدن زنجیر بر روی سازه‌های بتنی و همچنین استفاده از چکش کماکان دو روش بسیار پر کاربرد بازرسی پایه پل‌های بتنی می‌باشند چرا که بازرسان می‌توانند با توجه به صدا عیوب داخلی سازه‌ها را تشخیص دهند [۱۰]. البته این روش‌های همواره مشکلات و موانعی از قبیل وابستگی



قابل توجه به منابع انسانی، ثبت دستی داده‌ها و انسداد در خط‌های انتقال داده را به همراه دارد [۸]. روش Impact-Echo متناوباً ثابت کرده است که روشی موثر به منظور تشخیص عیوب درونی بتن می‌باشد [۱۰]. این روش در گذشته با وارد آوردن ضربه به سطح بتن و دریافت موج‌های صوتی برگشتی به وسیله سنسورهای سطحی پیزوالکتریک انجام می‌پذیرفته است [۹]. در سالیان اخیر استفاده از روش Impact-Echo بدون استفاده از تماس سطحی و با فاصله هوایی به دلیل سرعت بالا در جمع آوری داده مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. باید توجه داشت که تحریک غیرتماسی موده‌های آکوستیکی در بتن به دلیل تفاوت امپدانس آکوستیکی بین هوا و بتن، مشکل می‌باشد [۱۳]. به دلیل همین مشکلات تقریباً تمامی آزمایش‌های Impact-Echo با افتادن یک توپ فلزی بر روی سطح انجام می‌پذیرد [۱۴]. در پژوهش‌های دیگر در زمینه Impact-Echo مشخصات گوی فلزی که به منظور وارد آوردن ضربه مورد استفاده قرار می‌گیرد آورده شده است [۸، ۱۴]. به منظور غلبه بر بازگشت گوی وارد کننده ضربه، در برخی از پژوهش‌های پیشنهاد استفاده از قطرات آب و یا قطعات یخ داده شده است که به هنگام برخورد با سطح و وارد آوردن ضربه از بین رفته و امکان بازگشت آنها وجود نداشته باشد [۱۵]. نیروی وارد شده توسط این دست از پرتابه‌ها از نیروی وارد شده توسط پرتابه‌های فلزی کمتر است [۱۶]. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که اندازه مشخص جسم وارد کننده ضربه دارای مزیت برای تشخیص عیوب مشخصی می‌باشد [۱۷]. این مساله بدان دلیل است که اجسام وارد کننده ضربات مختلف دارای زمان تئوری نشست متفاوت بوده و به همین دلیل طیف بسامد بازگشتی متفاوتی دارند [۱۱]. به همین دلیل در برخی پژوهش‌ها از اجسام وارد کننده ضربه یکبار مصرف مانند یخ، استفاده کردند، که در این موارد با وارد آوردن ضربه‌های متعدد و مشابه به یک نقطه خاص، دقت آزمایش نیز افزایش یافته است [۱۸]. در پژوهشی که توسط دیویس [۱۹] انجام شده است، کاربردهای گسترده روش Impact-Echo مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله وی اشاره کرده است که روش Impact-Echo بیشتر برای تعیین عیوب در ستون‌های بتونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این روش قابلیت استفاده در بازرسی المان‌های تقویت شده بتونی مانند کف ساختمان، پیاده رو، ستون‌های پل، تانک‌های ذخیره سازی سیال و سازه‌های بلند مانند دودکش‌های بزرگ و سیلوها را دارا می‌باشد. در این مقاله تاریخچه‌ای از پیدایش و گسترش کاربردهای روش Impact-Echo در آمریکای شمالی به همراه گزیده‌ای از کاربردهای صنعتی این روش، در ارزیابی و مطالعه سازه‌ها بیان شده است. کلا و همکاران [۲۰] سه روش التراسونیک، radar R و impact-echo را برای انجام تست غیر مخرب در سازه‌های بتونی مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. آنها برای هر کدام از این سه روش مزایا و معایبی ذکر کردند. از جمله قابلیت‌هایی که آنها برای Impact-Echo در مقایسه با دو روش دیگر ذکر کردند عبارت است از: توانایی مناسب در تعیین ضخامت، بدست آوردن سرعت موج در بتون و تشخیص عیوبی که نوع آنها به درستی مشخص نمی‌باشد. وانگ و همکاران [۲۱] نسبت پواسون را برای چند میله بتونی با استفاده از روش Impact-Echo بدست آوردند. آنها با بدست آوردن فرکانس اصلی طولی و عرضی میله‌های دایروی که از جنس‌های فولاد، بتون و برنج تهیه شده بودند، نسبت پواسون آنها را تعیین کردند. آنها همچنین در این پژوهش معادله‌ای برای تعیین فرکانس غالب که در دامنه عرضی طیف بدست آمده است، ارائه دادند. علاوه بر این به منظور اعتبار بخشی به روش پیشنهاد شده، معادله‌ای دیگر برای بدست آوردن نسبت پواسون میله‌های بلند و باریک در کاربردهای عملی ارائه داده‌اند. مدینا و همکاران [۲۲] روشی جدید برای محاسبه ثابت‌های الاستیکی دینامیک برای یک صفحه ایزوتروپیک با اندازه‌گیری رزونانس Impact-Echo و سرعت موج رابلی (Rayleigh Wave Velocity) پیشنهاد کرده‌اند. نسبت پواسون یک تابع تک متغیره از نسبت بین فرکانس ضخامت و سرعت

موج راییلی است. در این مقاله روش پیشنهاد شده برای استفاده در یک ورق بتونی با ابعاد محدود و مشخص مورد استفاده قرار گرفته است و به منظور استفاده صحیح از این روش لازم است ضخامت ورق، از پیش مشخص شده باشد. وابستگی نسبت پواسون در بتون به طور مستقل با استفاده از تحلیل المان محدود (FEM) و معادله مود S1 موج Lamb بدست می آید. همچنین لازم به ذکر است که ضریب تصحیح هندسی ( $\beta$ ) که در روش Impact-Echo مورد استفاده قرار می گیرد، به نسبت پواسون مربوط بوده و برای محاسبه مدول یانگ (Young's Modulus) مورد استفاده قرار می گیرد. تفسیر امواج دریافتی از درون جسم که حاصل ارسال امواج صوتی می باشد، همواره راحت نبوده و به همین دلیل در پژوهشی دیگر که توسط مدینا [۲۳] انجام شده است، از روش پردازش سیگنال (Signal Processing) به همراه شبیه سازی المان محدود به منظور بهبود امواج دریافتی استفاده شده است. برای ارزیابی این روش، از تخمین ضخامت یک لایه بتون و تشخیص عیوب داخلی در بین لایه بتون و آسفالت استفاده شده است. با به کارگیری این روش از امواج مزاحم (Noise) و قله های (Peaks) ناخواسته در دامنه فرکانس کاسته شده و تفسیر نتایج راحت تر می شود. در همین راستا روشی دیگر برای کاربرد غیر تماسی Impact-Echo توسط موری و همکاران [۲۴] پیشنهاد شده است. این روش مبتنی بر پاسخ دینامیکی عیوب موجود در ساختار بتون می باشد که تحت بار ضربه ای ناشی از Impact-Echo قرار می - گیرند. بر خلاف روش های آزمون غیر مخرب مشابه، در این روش از ابزارهای غیر تماسی هم برای تولید ضربه (تولید ضربه در اثر انفجار گاز درون یک سیلندر) و هم به منظور نمایش پاسخ ارتعاشی (لرزه نگارهای لیزری برای اندازه گیری سرعت سطحی بتون) استفاده می گردد. در این پژوهش از روش های تجربی و عددی (المان محدود) برای نمونه های بتونی که دارای عیوب داخلی ساختگی (ترک های سکه شکل و موازی سطح آزاد جسم) بودند با تغییر در عمق و طول، استفاده شده است. مطابق نتایج عددی و تجربی، به نظر می رسد روش موجود توانا به تشخیص صحیح عیوب، به ویژه عیوب کم عمق باشد. از میان پژوهش های محدودی که در داخل کشور برای مطالعه روش Impact-Echo انجام پذیرفته است، می توان به مقاله دکتر طباطبائی اشاره داشت [۲۵]. در مقاله طباطبائی و همکاران روشی جدید برای اندازه گیری ضخامت ورق های بتونی به طور غیر مستقیم مبتنی بر روش Impact-Echo پیشنهاد شده است. در این رویکرد ضربه یک گوی فلزی با استفاده از یک میله فلزی به صورت امواج تنشی به ورق بتونی منتقل می شود. شبیه سازی های عددی با استفاده از ورق های با ضخامت های متفاوت انجام پذیرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد پاسخ به ضربه ورق بتونی برای فرکانس غالب در روش غیرمستقیم، با نتایج بدست آمده از روش مستقیم یا تماسی نزدیک می باشد. این روش با دقت قابل قبولی می تواند ضخامت ورق های بتونی را مشخص کند. در پژوهش دیگری در داخل کشور بر روی یکی از کاربردهای روش Impact Echo به منظور ارزیابی میزان خرابی های سازه های بتنی یک تصفیه خانه فاضلاب در جنوب کشور کار شده است [۲۶]. برای این منظور، مجموعه آزمایش های مخرب و غیرمخرب نسبتاً جامعی در محل تصفیه خانه و آزمایشگاه انجام پذیرفت. آزمایش های مخرب شامل مغزه گیری برای تعیین مقاومت فشاری، جذب آب، درصد تخلخل و چگالی بتن، تعیین عمق کربناتاسیون، نفوذ یون کلرید، روش پراکنش اشعه ایکس (XRD) و آزمایش های غیرمخرب شامل تعیین پتانسیل نیم پیل و سرعت خوردگی آرماتور، مقاومت الکتریکی و روش Impact Echo می باشند. نتایج آزمایشها نشان داد که کیفیت بتن به هیچ عنوان مناسب نبوده و باعث خرابی زود رس در سازه های این تصفیه خانه شده است. در زمینه تست غیر مخرب مواد کامپوزیتی نیز تا کنون پژوهش های مختلفی انجام شده و مقالات متعددی نیز انتشار یافته است.

لستاری و کیاو [۲۷] تشخیص عیوب داخلی تیرهای ساندویچی لانه زنبوری که دارای ساختار پلیمری تقویت شده بودند را مطالعه کردند. در این مطالعه تشخیص عیوب داخلی بر مبنای پاسخ دینامیکی کامپوزیت ساندویچی بنا نهاده شده است. این روش تجربی برای تشخیص عیوب کامپوزیتی مبتنی بر پاسخ های دینامیکی ساختاری و استفاده از سنسورهای هوشمند می باشد. میزان عیوب داخلی با استفاده از تغییرات در خواص مکانیکی مانند منحنی شکل مود، قابل تشخیص می باشد. سو و همکاران [۲۸] از امواج Lamb هدایت شده برای شناسایی عیوب داخلی قطعات کامپوزیتی استفاده کرده اند. در این مقاله توضیحاتی در مورد این روش عیب یابی به همراه آخرین پیشرفت های صورت گرفته در زمینه شناسایی عیوب داخلی بر مبنای امواج Lamb در مواد کامپوزیت ارائه داده شده است. در پژوهشی دیگر که توسط آلبانو و همکاران انجام پذیرفته است [۲۹]، افزایش خواص مکانیکی بتن پرتلند، پس از افزودن ضایعات لاستیک خودرو مورد ارزیابی قرار گرفته است. این پژوهشگران برای تعیین خواص مکانیکی بتن پیش و پس از افزودن ضایعات لاستیک از تست التراسونیک و تست مخرب بهره گرفته اند. دیامانتی و همکاران [۳۰] روشی کم هزینه و سریع برای تست غیر مخرب قطعات کامپوزیتی که در سرویس قرار دارند را توسعه دادند. برای این منظور آنها از امواج Lamb فرکانس پایین برای بازرسی قطعات کامپوزیتی یکپارچه و ساندویچی استفاده کردند. سنسورهای کوچک پیزوالکتریک برای تولید امواج فرکانس پایین و ارسال آنها به درون جسم مورد استفاده قرار گرفته اند. از این روش به طور موفقیت آمیز به منظور بازرسی عیوب تیرهای ساندویچی کامپوزیت استفاده شده است. بایراکتار از یک شیوه غیرمخرب برای کنترل قطعات کامپوزیتی استفاده کرده است [۳۱]. وی از توموگرافی محاسبه شده اشعه ایکس (X-ray computed tomography) به منظور ارزیابی مواد کامپوزیتی چه در مرحله تولید و چه در حین بهره برداری استفاده کرده است. پارک و همکاران [۳۲] روشی برای آزمون غیر مخرب کامپوزیت های ترموست/فیبر کربنی با استفاده از امواج ماورا بنفش و حرارتی ابداع کردند. به منظور ارزیابی وضعیت کامپوزیت، این پژوهشگران از اختلاف مقاومت الکتریکی برای مقایسه روش حرارتی و ماورابنفش بهره بردند.

از سی اسکن (C-Scan) به طور معمول برای تشخیص عیوبی که در حین ساخت و یا بهره برداری در قطعات کامپوزیتی به وجود می آیند استفاده می شود و به منظور تشخیص صحیح عیوب با این روش نیاز به تجربه در کنار شناخت صحیحی از کامپوزیت می باشد. در مقاله هوسر و همکاران [۳۳] نتایج کار تجربی در تشخیص عیوب پلاستیک های تقویت شده با فیبر کربنی (CFRP) در مواجهه با ضرباتی با سرعت پایین بررسی شده است. در این پژوهش ده نوع کامپوزیت در چهار ضخامت مختلف مورد مطالعه قرار گرفته اند. ضربات وارد شده بر کامپوزیت با استفاده از یک پرتابه و ریزش خرده سنگ شبیه سازی شده است. با توجه به اینکه در صورت وارد آمدن ضرباتی با سرعت کم، لایه لایه شدگی متداولترین عیب می باشد نواحی لایه لایه شدگی به طور صحیح با پردازش تصویر خام و استفاده از روش پردازش دیجیتالی تصاویر به طور صحیح مشخص شده اند. با استفاده از نتایج بدست آمده در این مطالعه، یک رابطه تجربی میان مناطق لایه لایه شدگی و انرژی ضربه مشاهده می شود. اگرچه از روش التراسونیک به طور معمول برای تشخیص عیوب لایه لایه شدگی در مواد کامپوزیتی استفاده می گردد اما در سالهای اخیر از این روش برای تشخیص عیوب ماتریس مواد کامپوزیتی استفاده شده است. در مطالعه ای که توسط آیمریچ و همکاران [۳۴] صورت پذیرفته است با استفاده از روش Pulse Echo پدیده لایه لایه شدگی در کامپوزیتها بر اثر ضربات کم انرژی بررسی شده اند. به منظور ارزیابی این روش نتایج منتخبی از این پژوهش به بحث و مقایسه با نتایج حاصل از داده های اشعه ایکس گذارده شده است.

پیش بینی و گروه بندی عیوب در پلیمرهای تقویت شده فیبر کربنی (CFRP) همواره یکی از مسائل چالش برانگیز بوده است.

استفاده از روش غیر مخرب التراسونیک یکی از شیوه‌های متداول و قابل اعتماد به منظور طبقه بندی عیوب در مواد همگون ایزوتروپیک می باشد. هرچند با توجه به پیچیدگی ساختاری کامپوزیت ها، نیاز به تفسیر سیگنال دقیق در مورد آنها می باشد اما به طور سنتی برخی روشها به منظور بهبود بخشیدن به کیفیت سیگنال های دریافتی متداولتر می باشند. در مطالعه بوچاد و همکاران [۳۵] سعی در تشخیص عیوب قطعات کامپوزیتی با مقایسه و ارزیابی روشهای پردازش سیگنال دریافتی و التراسونیک به شکل معکوس گردید.

امکان سنجی استفاده از روش های نوری به منظور تشخیص عیوب ضربه ای در لایه های باریک کامپوزیت در پژوهشی توسط امبو و همکاران [۳۶] مطالعه و بررسی شده است. نمونه هایی که در سطوح مختلف انرژی تحت ضربه قرار گرفته بودند در سطوح مختلف انرژی مورد تحلیل قرار گرفتند. در این بررسی نتایج بدست آمده با روش نوری و همچنین روش اینترفرومتری مورد مقایسه قرار گرفتند. این مطالعه نشان می دهد که هر دو روش قادر به تشخیص عیوب ناشی از ضربه می باشند که البته کیفیت آنها وابسته به موقعیت عیب و ضخامت ورق می باشد. اگرچه به کارگیری این روش سبب صرفه جویی قابل توجهی در زمان شده ولی باید توجه داشت که تصاویر و نتایج به دست آمده با این روش دارای نویز بیشتر و صرف زمان بیشتری در پردازش و تفسیر دارند. استفاده از روش های غیر مخرب به منظور ارزیابی قطعات کامپوزیتی از چند دهه گذشته آغاز شده است. در طی این مدت استفاده از مواد کامپوزیتی به طور چشمگیری در صنایع هوافضا، صنایع دریایی، پتروشیمی، انرژی، ساختمان، و حمل و نقل گسترش یافته است. در ابتدا از مواد کامپوزیتی تنها به عنوان تقویت کننده سازهها استفاده می شد ولی هم اکنون در بسیاری از سازهها این مواد نقش اصلی را بر عهده دارند. این موضوع سبب پدید آمدن مواد کامپوزیتی با ضخامت بالا و طبعاً پیچیدگی بیشتر شده است. تحقیقات و پژوهش های مرتبط با ارزیابی غیر مخرب مواد کامپوزیتی، متناسب با گسترش استفاده از آنها توسعه نیافته است. در پژوهشی که توسط ابراهیم [۳۷] انجام شده است گزارشی از پیشرفت های حاصله در زمینه ارزیابی غیر مخرب مواد کامپوزیتی با ضخامت بالا (بیش از ۱۵ میلیمتر) ارائه شده است و دورنمایی به منظور انجام پژوهش های آتی ترسیم شده است. در پژوهشی دیگر [۳۸] از روش Impact-Echo به منظور ارزیابی پیوستگی ساختار بتنی راکتور آب سنگین استفاده شده است. به منظور توسعه کاربرد این روش یک قطعه کوچک برای تست ساخته شده و قدرت تشخیص روش Impact-Echo با استفاده عمق و جهت ترک مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از بررسی قطعه ساخته شده و انجام آزمون بر روی آن، این روش بر روی سازه های بتنی نیروگاه پیاده شد. در پژوهشی دیگر [۳۹] از روش التراسونیک در کنار Pulse-Echo به منظور ارزیابی عیوب ناشی از پدیده خستگی در قطعات کامپوزیتی کشتی های بزرگ استفاده شده است. هدف از این تحقیق بحث و مطالعه تشخیص غیر مخرب آسیب ناشی از خستگی در کشتی های ساخته شده از کامپوزیت های ضخیم با استفاده از روش التراسونیک و Pulse Echo می باشد. شروع و رشد ترک خستگی در اثر بارهای دوره ای در پلیمرهای فیبری (GRP) با ضخامت بین ۷ تا ۳۸ میلی متر مونتور شده است. بارگذاری خستگی تا تنش های بالا (بیشتر از ۵۰ درصد تنش تسلیم) باعث پدید آمدن تنش گسترده ای متشکل از مسیرهای رشد ترک به همراه نابجایی صفحه ای شده است که این عیوب به راحتی با استفاده از روش التراسونیک قابل تشخیص می باشند. ترک هایی که در اثر تنش های پایین خستگی (کمتر از ۵۰٪ تنش تسلیم) پدید می آیند باعث خرابی کمتری می شوند و همچنین به دلیل آنکه انتشار امواج التراسونیک در امتداد مسیر رشد ترک قرار دارد، تشخیص آنها مشکل می باشد. یکی از دستاوردهای این پژوهش آن است که نشان می دهد قابلیت تشخیص رشد ترک به وسیله امواج التراسونیک با افزایش ضخامت پلیمر، افزایش می یابد.

در مقاله لین و همکاران [۳۵] روشی جدید به نام طیف Impact-Echo نرمال شده و کاربرد آن در مونیتر کردن فرآیند سخت شدن ملات ساختمانی Impact Echo معرفی شده است. در این پژوهش از این ویژگی انعکاسی موج از سطحی که با هوا در تماس است، و نمایش طیفی از امواج در نمایشگر استفاده می‌شود که در آن با نمایش قله تشکیل شده می‌توان عمق ترک را تخمین زد. البته با توجه به وابستگی قله تشکیل شده به شدت ضربه وارد شده نمی‌توان عمق عیب درونی بتن را به درستی تشخیص داد. به همین دلیل نیاز به نرمال کردن طیف با توجه به نیروی ضربه اعمالی می‌باشد. پس از نرمال کردن دامنه، طیف نمایش داده شده، می‌تواند اطلاعات مفیدی در زمینه شدت امواج برگشتی از سطوح به ما بدهد. در این پژوهش از Impact-Echo نرمال شده برای نمایش، روند سخت شدن ملات استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که نرمال شدن طیف امواج باعث ثابت شدن قله امواج برای ضربه‌های مختلف شده و ضرایب تغییر کمتر از ۱/۵٪ خواهند بود. تغییرات در دامنه امواج نرمال شده در گذر زمان فرایند سخت شدن ملات را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی، روشی مناسب برای مونیتر کردن فرایند سخت شدن ملات می‌باشد.

در روش های سنتی pulse-echo که در یک بازه مشخص زمانی تعریف می‌شدند به دلیل عرض زیاد پالس‌ها همواره دارای محدودیت بودند که این موضوع منجر به ایجاد تصاویر B-Scan غیر دقیق و مبهم می‌گردد. در مقاله وو و وان [۴۱] از روش مناسب پردازش سیگنال Pulse Echo و التراسونیک به منظور تشخیص لایه لایه شدگی در لایه‌های کامپوزیتی نازک استفاده می‌گردد. این روش برای کامپوزیت های ۸ و ۱۶ لایه گرافیت اپوکسی به همراه لایه ای از کربن به کار رفته است.

در مقاله کیم و چونگ [۴۲] مشخصه‌هایی از کارافتادگی در کامپوزیتهای کولار ساده تحت بارگذاری ضربه ای با استفاده از گسترش صوت (Acoustic Emission) مطالعه شده است. به وسیله میله‌ای به استوانه های از پیش آماده شده ضربه وارد شده و پاسخ آکوستیکی آنها در بازه زمانی وارد آمدن ضربه مونیتر می‌گردد. پس از شکست، مطالعاتی به منظور ایجاد ارتباط مابین پاسخ آکوستیکی و نوع شکست انجام گردید. در این مطالعه ابتدا سیگنال با توجه به دامنه و سطح انرژی مورد تحلیل قرار گرفتند و سپس امواج بر اساس قله فرکانسی و دامنه بدست آمده با تبدیل فوریه (FFT) به چهار دسته تقسیم شدند. با افزایش نرخ کشش تا حدود S-1 ۱۱۸۲ تنش تسلیم و چقرمگی کامپوزیت تا دو برابر افزایش یافت.

### ۴-۳- مبانی تئوریک روش موج ضربه Impact Echo

هنگامی که یک نیروی بیرونی (به صورت تنش یا یک جابجایی) به طور ناگهانی بر روی نقطه ای از سطح یک جسم سخت وارد می‌شود، این نیرو به سه صورت درون جسم گسترش پیدا می‌کند، موج نوع P، موج نوع S و موج نوع R. موج P و S با جبهه کروی درون جسم گسترش پیدا می‌کنند. همچنین موج P سبب پیدایش تنش های نرمال یا عمودی شده و موج S سبب پیدایش و گسترش تنش های برشی می‌گردد. موج R اما معمولاً از نقطه اصابت ضربه در امتداد سطح جسم حرکت می‌کند. برای بررسی اثر ضربه بر یک قطعه کامپوزیتی لازم است تا ضربه وارد شده، امواج تولیدی و نحوه حرکت آنها درون جسم مورد تحلیل المان محدود قرار گیرند. پس از این تحلیل می‌بایست جابجایی نودال مش بندی المان محدود مشخص گردد. در این مرحله می‌توان با مشخص کردن مسیر حرکت امواج S، نحوه بازگشت امواج P درون جسم را بدست آورد تا پس از آن جبهه ی امواج، به خوبی نمایان گردند. در این مرحله همچنین می‌توان برای بدست آوردن نتیجه ای بهتر، از شبیه سازی عددی نیز بهره برد تا به دیدی

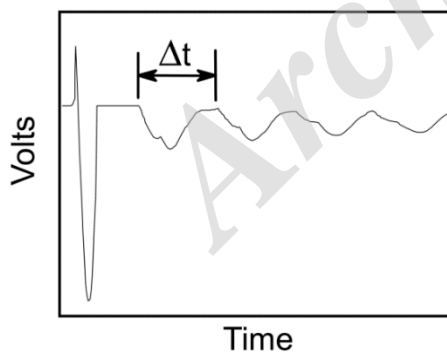
روشن درباره پاسخ حفره های و عیوب درونی به امواج گسترش یافته و همچنین پاسخ خود جسم به این امواج را بدست آورد. در یک جسم الاستیک ایزوتروپیک محدود، سرعت موج در جسم با مدول الاستیسیته یانگ  $E$  و نسبت پواسون  $\nu$  و دانسیته  $\rho$  مرتبط می باشد.

### ۱-۴-۳- منعکس شدن امواج در مرزهای جسم

هنگامی که امواج تنشی در طول جسم حرکت می کند، به یک جسم دیگر برسد نسبتی از آن موج بازگشت داده می شود. دامنه انعکاس تابعی از زاویه برخورد می باشد و هنگامی این زاویه برابر با  $90^\circ$  درجه می باشد این نسبت انعکاس در حالت بیشینه خود قرار دارد.

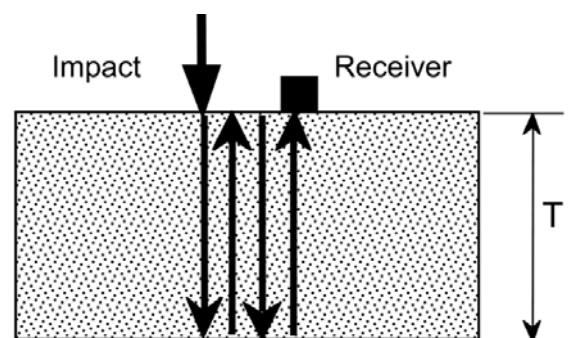
### ۲-۴-۳- تحلیل فرکانسی

در پژوهش های ابتدایی از روش Impact-Echo از تحلیل دامنه زمانی به منظور اندازه گیری زمان شروع ضربه تا بازگشت موج P استفاده می شد. با توجه به وقتگیر بودن و نیاز به مهارت در تعیین زمان بازگشت موج P در این پژوهش از روش موفق [۴۳] تحلیل فرکانسی به جای تحلیل دامنه زمانی امواج به منظور ارزیابی رفتار امواج در Impact-Echo استفاده می گردد. مبنای تحلیل فرکانسی بر این اصل استوار است که امواج ناشی از ضربه به سطح جسم بارها بین رویه بالایی و پایینی جسم حرکت می کنند و همین رفت و برگشتها باعث ایجاد موج فرکانسی درون جسم می گردد. فرکانس امواج P به طور مستقیم مرتبط با ضخامت صفحه مورد آزمایش می باشد. فرض انجام آزمایش Impact Echo آن است که سرعت موج در تمام جسم یکسان بوده و تغییر نمی کند. اصول تحلیل فرکانسی در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. موج P که به وسیله ضربه تولید شده است انعکاسهای متعددی بین سطح اعمال ضربه و سطح انعکاس دهنده را طی می کند. هر زمانی که موج P به سطح تست می رسد باعث ایجاد جابجایی مشخصی می شود. بنابراین شکل موج دارای یک الگوی نوسانی با توجه به فاصله طی شده در رفت و برگشت های متعدد توسط موج P دارد.



$$\Delta t = \frac{2T}{C_{pp}}$$

شکل ۳-۳: اصول تحلیل فرکانسی؛ به دلیل رفت و برگشت های متعدد بین سطوح بالایی و پایینی جسم، موج شکل فرکانسی به خود می گیرد.



هرچه فاصله بین دریافت کننده و محل اعمال ضربه کمتر باشد، فاصله طی شده توسط موج کمتر می شود. با توجه به ضخامت

صفحه کامپوزیتی می توان فرکانسی را بدست آورد که به فرکانس ضخامت صفحه معروف است.

$$f = \frac{C_p}{2T} \quad (3-1)$$

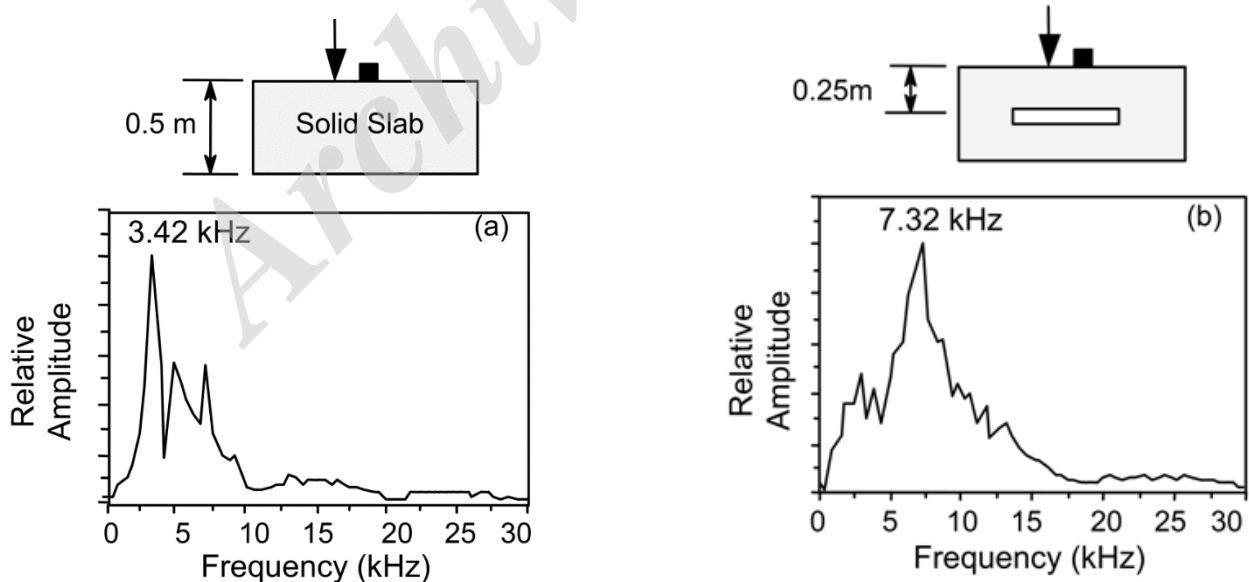
که در این رابطه  $C_p$  سرعت حرکت موج P در راستای ضخامت صفحه می باشد و  $T$  ضخامت صفحه کامپوزیتی و یا فاصله بین صفحه اعمال ضربه و صفحه خارجی آن می باشد. از این رابطه می توان فرکانس حرکت موج در صفحه کامپوزیتی را بدست آورد در ابتدا تصور بر این بود که سرعت موج در طول ضخامت صفحه با سرعت موج در یک جسمی با همان جنس، اما ضخامت بیشتر یکسان است و با توجه به رابطه (3-1) محاسبه می گردد [38]. مطالعات بعدی و عمیقتر نشان داد سرعت موج با فرکانس ضخامت مرتبط می باشد و ضخامت صفحه تقریباً ۹۶٪ سرعت موج P می باشد که با استفاده از رابطه زیر بدست می آید [44]:

$$T = \frac{0.96 C_p}{2f} \quad (3-2)$$

این تفاوت به دلیل انعکاس های مکرر موج P است که سبب برانگیخته شدن یک مود از ارتعاش در صفحه شده و جابجایی های پدید آمده به وسیله آنها باعث تولید الگوهای دوره ای اصلی در شکل موج خواهد شد.

### ۳-۴-۳- طیف دامنه

در تحلیل فرکانسی نتایج Impact-Echo هدف تعیین فرکانس حاکم در شکل موج های ثبت شده می باشد. به همین دلیل در این مرحله باید از روش تبدیل فوریه (FFT) کمک گرفت تا بتوان اشکال موجی ثبت شده را به دامنه فرکانسی منتقل کرد (شکل (3-4)).



شکل (3-4): نمونه هایی از طیف دامنه از آزمایشات Impact-Echo

نتایج تغییر یافته با استفاده از تبدیل لاپلاس در طیف نوسانی، نوسانات فراوانی در فرکانس های مختلف به صورت موجی شکل را نشان می دهد. برای یک ساختار صفحه ای فرکانس ضخامت بالاترین قله در طیف می باشد که نشان دهنده ضخامت جسم یا صفحه مورد آزمایش می باشد. در شکل (۳-۴) استفاده از تحلیل فرکانسی Impact-Echo نشان داده شده است. در شکل (a-2) طیف دامنه یک آزمایش برای صفحه ای با ضخامت ۵ میلیمتر نشان داده شده است. به همین دلیل قله فرکانسی در فرکانس ۴۲/۳ kHz می باشد که مرتبط با انعکاس های متعدد بین صفحه پایین و بالایی قطعه می باشد. با استفاده از رابطه (۳-۴) سرعت موج درون قطعه را می توان بدست آورد.

## طراحی وسایل مورد نیاز برای انجام آزمون

آزمایش Impact-Echo مبتنی بر سه جز اساسی است:

- وسیله یا ابزاری به منظور اعمال ضربه مکانیکی در یک مدت مشخص و کوتاه
- یک دریافت کننده تنظیم شده و طراحی شده به منظور دریافت امواج منعکس شده.
- یک سیستم تحلیل سیگنالهای دریافتی به منظور دریافت، تحلیل و ذخیره صورت موجهای ناشی از حرکت جزئی سطح جسم.

به منظور اندازه گیری دقیق شکل‌های موج منتشر شده از یک ترنسدیوسر جابجایی با قابلیت تطابق بالا با شرایط کار می بایست استفاده گردد. البته لازم به ذکر می باشد که در پژوهشهای مشابه از شتاب سنج به منظور سنجش ارتعاش سطحی استفاده شده است. پژوهش های گذشته نشان دهنده این موضوع است که استفاده از یک ترنسدیوسر جابجایی کار تفسیر نتایج را بسیار ساده تر می کند چرا که بسیاری از مطالعات تجربی انجام شده بر روی روش Impact-Echo با جابجایی سطح سر و کار داشته اند. ترنسدیوسر نباید فرکانس رزونانسی نزدیک به فرکانسهای طبیعی ضخامت داشته باشد که در طول آزمایش ممکن است بوجود آیند، چراکه در اینصورت کار تفسیر نتایج بسیار مشکل می گردد.

## انتخاب ماده واسط (Couplant)

به منظور اندازه گیری صحیح حرکت سطح، باید ترنسدیوسر به طور مناسبی بر روی سطح جسم قرار گیرد. در مورد بیشتر ترنسدیوسرها از برخی مواد مانند گریس به منظور کوپل کردن ترنسدیوسر و سطح جسم استفاده می گردد. انتخاب نوع ماده واسط (Couplant) به طور صحیح تاثیر بسیاری در نحوه کارکرد و کیفیت نتایج خواهد داشت. برای استفاده از روش Impact-Echo در مورد بتن، در برخی موارد برای غلبه کردن بر بافت غیرمنظم سطح و همچنین انتقال صحیح جابجایی های سطح به سنسور پیزوالکتریک از یک نوار سربی استفاده می شود. این رویکرد سبب کاهش زمان انجام آزمایش نیز می گردد.

## انتخاب فاصله مناسب

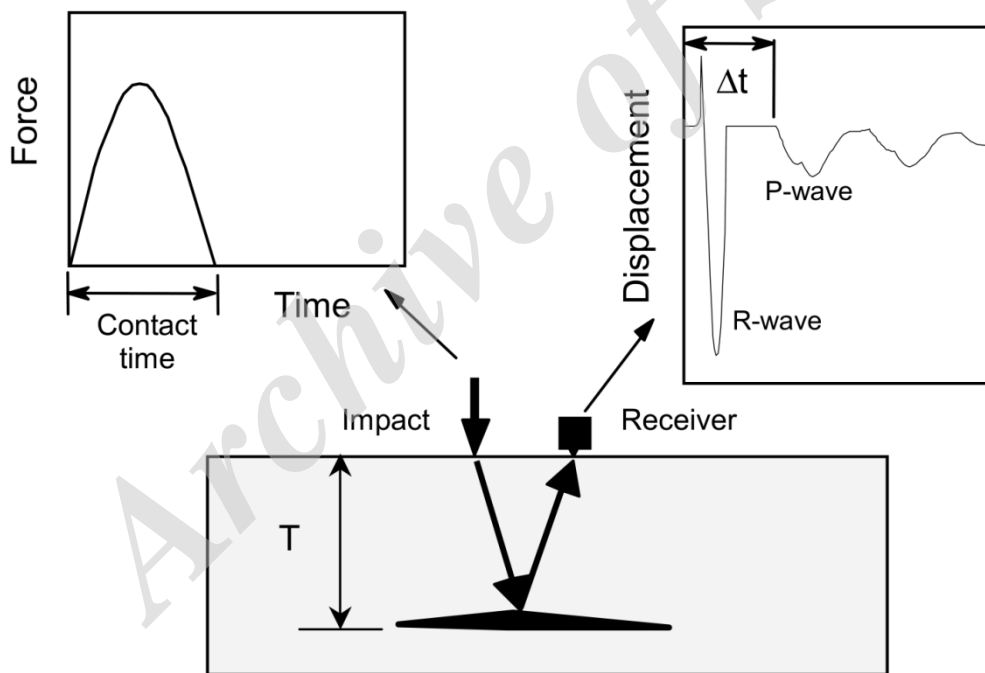
تنظیم فاصله میان نقطه وارد کردن ضربه و محل قرارگیری ترنسدیوسر نیز بسیار مهم می باشد. اگر این فاصله بیشتر از یک میزان



خاص باشد در آن صورت جواب دریافتی غالب توسط رسیور، موج P نخواهد بود. اما اگر فاصله بین محل اعمال ضربه و محل دریافت امواج برگشتی بسیار نزدیک باشند در آنصورت امواج غالب، امواج سطحی خواهند بود. بر اساس چند سری از پژوهش های گذشته فاصله ۰/۲ تا ۰/۵ عمق عیب اندازه ای مناسب برای فاصله میان محل اعمال ضربه و دریافت کننده امواج برای تست صفحه های بتنی می باشد. البته سانسالونه و استریت فاصله کمتر از ۴۰٪ عمق را پیشنهاد داده اند ولی در مورد این پژوهش می بایست تمامی این فواصل از ابتدا مشخص گردند.

### مدت زمان ضربه

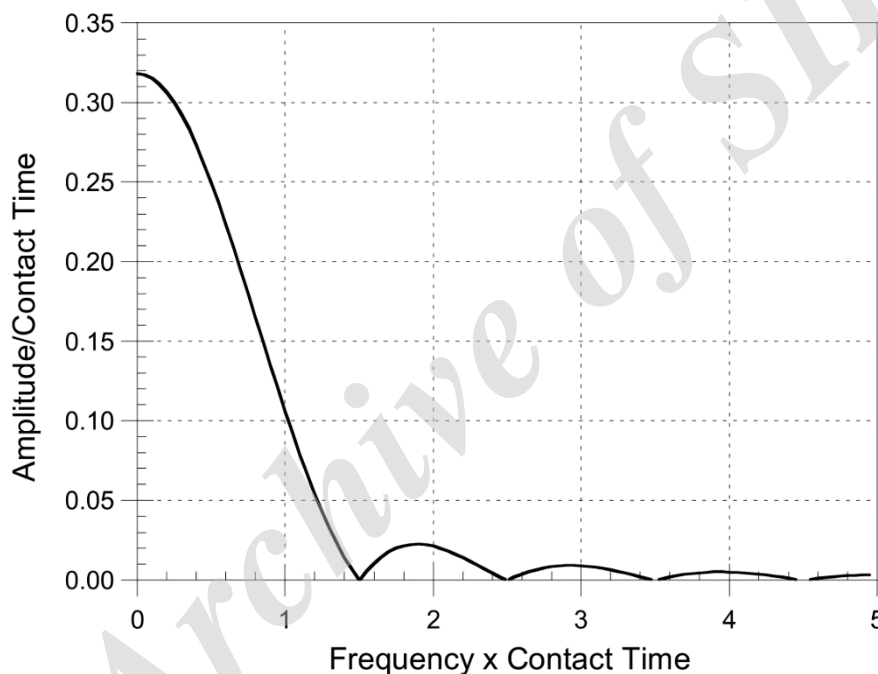
بازه زمانی وارد آمدن ضربه یکی از قسمتهای مهم و با اهمیت آزمون Impact-Echo می باشد. مبنای این روش تولید ارتعاش رزونانسی مرتبط با مود ضخامت می باشد. به منظور برانگیختن مود ضخامت، پالس ورودی باید شامل اجزای فرکانسی باشد. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، رابطه زمان نیرو برای ضربه می تواند با یک نیم سیکل سینوسی تقریب زده شود، و مدت زمان ضربه نیز به عنوان زمان تماس شناخته می شود. اجزای فرکانسی که در پالس ورودی وجود دارند بوسیله سری فوریه منحنی نیم سیکل سینوسی تعیین می گردند.



شکل (۳-۵): مسیر حرکت امواج تنشی در روش Impact-Echo

شکل (۳-۵) طیف دامنه منحنی سینوسی نیم سیکل را نشان می دهد. این طیف به منظور تصحیح زمان تماس پالس نرمال شده می باشد. دامنه اجزای فرکانس متناسب با زمان تماس و محدوده فرکانسهای پالس متناسب با معکوس زمان تماس می باشند. به عنوان یک تقریب، بالاترین جز فرکانسی دامنه قابل تشخیص می تواند به عنوان معکوس زمان برخورد در نظر گرفته شود. بنابراین

هرچه زمان تماس کاهش یابد، محدوده فرکانسها افزایش می یابد اما دامنه های اجزای فرکانسی کاهش می یابد. به منظور شناسایی عیوب سطحی و یا به بیان صحیحتر عیوب نزدیک به سطح، پالس تنشی باید دارای اجزای فرکانسی بزرگتر از فرکانس های مرتبط با عمق عیب باشد. برای مثال برای یک موج نوع P، با سرعت  $4000 \text{ m/s}$  و عمق ترک  $0.2$  متر، فرکانس ضخامت برابر با  $10 \text{ kHz}$  می باشد. بنابراین زمان تماس پالس باید کوچکتر از تقریباً  $100$  میکرو ثانیه باشد تا عیب در طیف دامنه قابل تشخیص باشد. همانطور که در بخش قبلی به آن اشاره شد، گوی های فولادی قطعات موثری برای وارد آوردن ضربه بر روی صفحه بتنی می باشند چرا که می توان با تغییر در قطر گوی های زمان تماس را تغییر داد. تعیین زمان برخورد مناسب به منظور تشخیص عیوب داخلی یکی از مهمترین بخشهای پژوهشهای مرتبط با آزمون Impact-Echo می باشد. زمان تماس می تواند با اندازه گیری تقریبی عرض اولین کاهش در شکل موج در دامنه زمانی بدست آید. این زمان بدست آمده با عرض موج نوع R مرتبط می باشد.



شکل (۶-۳): طیف دامنه نرمال شده برای ضربه ای که دارای شکل منحنی سینوسی نیم سیکل می باشد.

### کوچکترین عیب قابل تشخیص

یکی از پرسشهایی که همراه در زمینه استفاده از روش Impact-Echo مطرح بوده است این است که کوچکترین عیب قابل تشخیص به وسیله این روش چه میزان می باشد. پاسخ به این سوال چندان راحت نمی باشد چرا که عواملی متعددی بر این که آیا عیب مورد نظر قابل تشخیص می باشد یا خیر تاثیرگذار می باشند:

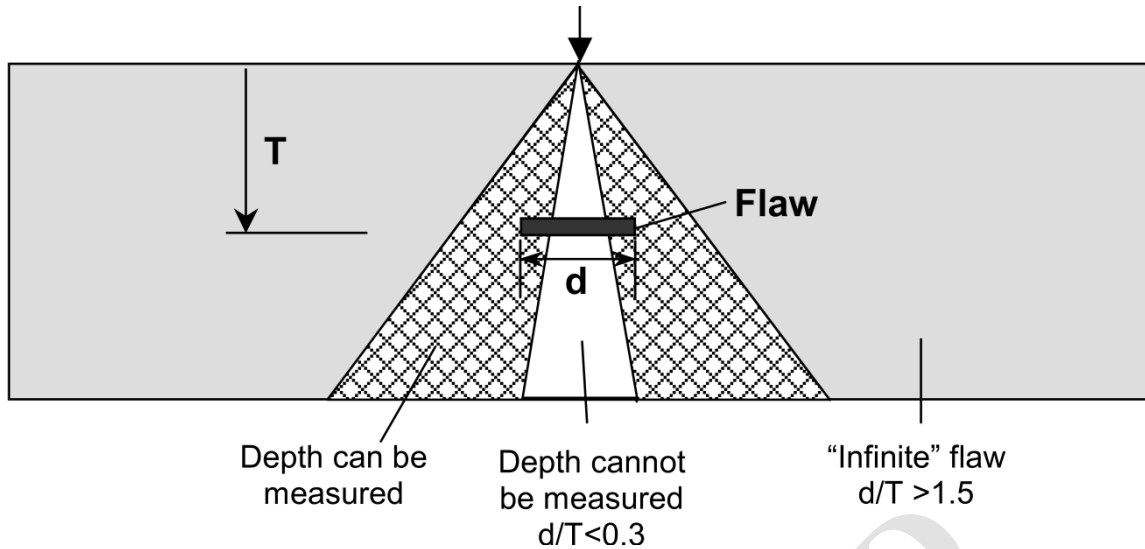
- نوع عیب و جهتگیری آن درون جسم

- عمق عیب

- زمان تماس ضربه

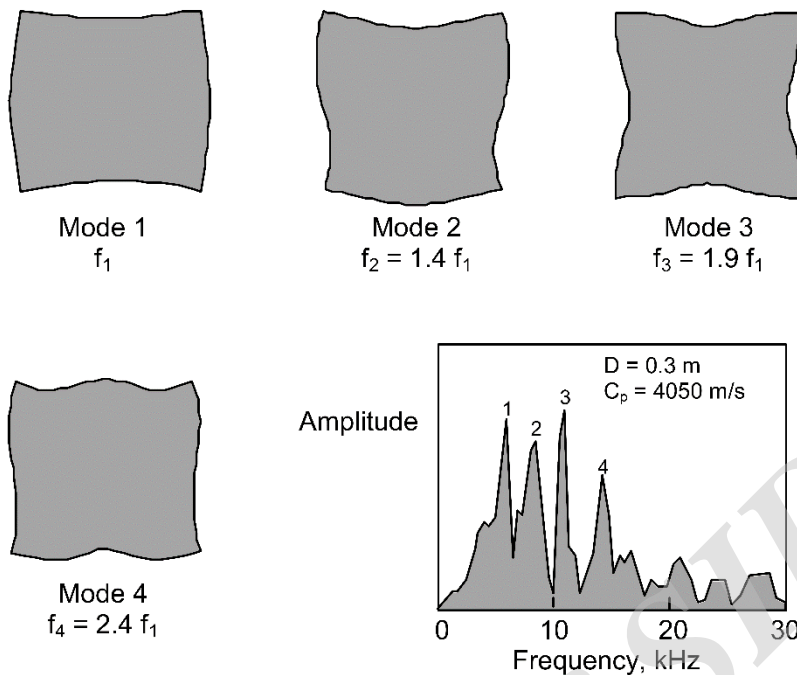
به علاوه، ضروری است که میان دو مفهوم در ابتدا تفاوت قائل شد، اول اینکه آیا توانا به تشخیص عیب می‌باشیم یا خیر و دوم اینکه آیا توانا به تعیین عمق عیب هستیم یا خیر. وجود عیوب کوچک پاسخ فرکانسی ضخامت را به وسیله حرکت دادن آن به یک مقدار کوچکتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین اگر میزان ضخامت عضو مورد مطالعه مشخص باشد و در تمام طول‌های مختلف مقداری ثابت باشد و هیچ عاملی دیگر وجود نداشته باشد که بتواند بر روی سرعت موج P در موقعیتهای دیگر بر روی جسم تأثیر بگذارد، در آنصورت مشاهده یک کاهش در فرکانس ضخامت، یک نشانه مشخص از وجود عیب در عضو مورد بررسی میباشد حتی اگر طیف دامنه دارای قله فرکانسی بیشتری که نشان دهنده عمق عیب باشد، نداشته باشد. عیوبی که به صورت صفحه ای و موازی سطح بیرونی تست گسترش یافته اند، ساده ترین عیوب به منظور تشخیص با روش Impact-Echo می‌باشند. عیوب دیگری مانند حفره‌های خالی درون جسم، دسته دوم از عیوب قابل تشخیص با استفاده از Impact-Echo می‌باشد.

هرچند به میزان عمق یک عیب درونی افزوده گردد عیوب کوچکتری قابل تشخیص خواهند بود. بر اساس مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی در برخی از پژوهشهای گذشته برای یتن اینگونه پیشنهاد شده است که اگر اندازه عرضی ترک صفحه‌ای افزایش یابد به طوری که اندازه عرضی آن بیش از یک سوم عمق آن باشد، در آنصورت عمق آن عیب قابل تشخیص خواهد بود. اگر اندازه عرضی ترک بیشتر از یک و نیم برابر عمق عیب باشد، آن عیب مانند عیبی با مرز نامحدود رفتار می‌کند و رفتار آن ترک درست مانند صفحه ای است با ضخامتی برابر با عمق آن ترک. در این پژوهش که نتیجه آن در شکل (۳-۷) نشان داده شده است، اگر عیبی در ناحیه ای که با هاشور نشان داده شده است قرار گیرد طیف دامنه به طور معمول دارای دو قله خواهد بود. قله اول نشان دهنده عمق عیب و قله فرکانس پایینتر نشان دهنده ضخامت صفحه خواهد بود. در حالت نشان داده شده در شکل (۳-۷) اگر عیبی صفحه ای در ناحیه هاشور خورده قرار داشته باشد در آنصورت تنها در صورت کوچک بودن زمان تماس قابل تشخیص می‌باشد. اگر زمان تماس طولانی شود در آنصورت انرژی کافی در فرکانس مرتبط با فرکانس ضخامت وجود نخواهد داشت. و همچنین طیف دامنه هیچ قله ای مرتبط با عمق عیب نخواهد داشت. به طور کلی زمان تماس باید کوتاه تر از زمان رفت و برگشت موج باشد.



شکل (۷-۳): کوچکترین ترک افقی قابل تشخیص با توجه به عمق آن. اگر عیب در این محدوده سفید رنگ قرار گیرد در آنصورت عمق عیب قابل اندازه گیری می باشد. در مورد صفحات بتنی اینگونه بدست آمده است که اگر زمان تماس کمتر از زمان تماس زمان رفت و برگشت موج  $P$  باشد در آنصورت عمق عیب صفحه ای با اندازه ای کافی، قابل اندازه گیری خواهد بود.

گسترش کاربرد روش Impact Echo از صفحات کامپوزیتی به قطعات ساخته شده از کامپوزیت با اشکال مختلف از دیگر اهداف این پژوهش می باشد. روش Impact-Echo در شناخت بسیاری از عیوب داخلی مانند حفره های هوا و عیوب لانه-زنبوری داخل قطعات ساخته شده از بتن موفق بوده است. در کنار نتایج تجربی بدست آمده از این روش همواره نیاز به انجام مطالعات تحلیلی به منظور دستیابی به فهم بهتری از گسترش امواج در محیط های جامد دارا و فاقد عیب می باشد. کاربرد این روش اخیراً به سازه های منشوری مانند ستون ها و تیرها نیز گسترش یافته است. در حین پژوهش های انجام شده به منظور گسترش کاربرد روش Impact-Echo به ستون ها و تیرها، پژوهشگران متوجه شدند که انعکاس و برگشت موج از محیط بیرونی ستونها و تیرهایی با مقطع مربعی سبب ایجاد موده های پیچیده ای از ارتعاش می گردد. این مسئله به وضوح در شکل (۳-۸) نشان داده شده است.



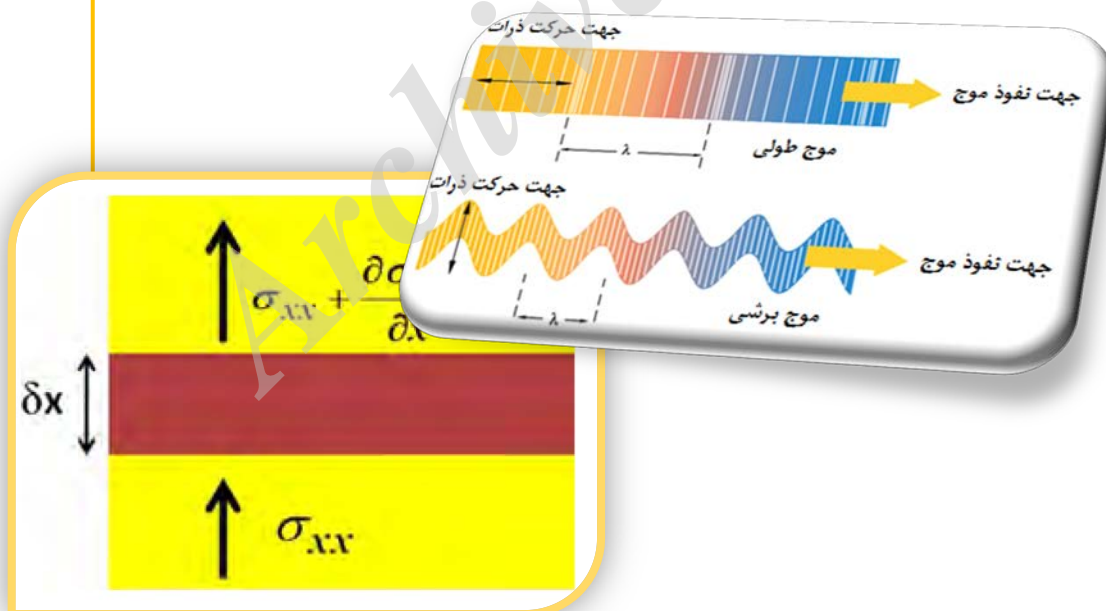
شکل (۸-۳): چهار شکل مود اولیه و طیف دامنه تجربی مربوطه برای یک میله مربعی با ضخامت ۰/۳ متر

این مودها منجر به طیف دامنه با قله های فراوانی شدند که البته ضخامت هر عضو مرتبط با فرکانس غالب نبود. با انجام پژوهشهای متعدد و تحلیل های مکرر استفاده از روش Impact-Echo به عنوان روشی قابل اعتماد به منظور تشخیص عیوب در تیرهای بتنی و ستون ها مورد پذیرش قرار گرفت. تحلیل‌های انجام گرفته نشان داد که به منظور غلبه پیچیدگی های موجود بر سر راه استفاده از این روش باید در نظر داشت که کوچکترین اندازه عرضی سازه باید حداقل پنج برابر ضخامت باشد.

## فصل ۴

# تحلیل ضربه و حرکت امواج

## در کامپوزیت‌ها



## ۴-۱ مقدمه

امواج پی (P-waves) یا امواج فشاری (Pressure waves) امواجی هستند که جهت انتشار آنها در راستای ارتعاش ذرات می-باشد، امواج صوت ملموس ترین امواج فشاری هستند. این امواج می‌توانند از درون گازها، مایعات و جامدات عبور کنند، هر چند که امواج برشی نمی‌توانند از سیالات عبور کنند. امواج فشاری خیلی سریعتر از امواج برشی و امواج سطحی مستهلک می‌شوند فلذا در زمان زلزله موجب خرابی نمی‌شوند ولی بدلیل کوتاه بودن طول موجشان در مقایسه با دیگر امواج زلزله، به سرعت پخش می‌شوند و به همین دلیل به آنها امواج اولیه گفته می‌شود زیرا قبل از امواج دیگر قابل ثبت هستند. لرزه‌سنج و شتابسنج این امواج را ثبت می‌کند. در ابتدا لازم است تعاریف و اصطلاحاتی که در زمینه مطالعه امواج تنشی به کار می‌روند به شرح زیر تعریف شوند:

## امپدانس صوتی:

حاصلضرب سرعت موج P در چگالی که در محاسبات خصوصیات بازتاب موج تنشی در مرزها استفاده می‌شود.

## طیف دامنه:

نمودار دامنه نسبی بر حسب بسامد که از شکل موج و با استفاده از روش تبدیل فوریه بدست می‌آید.

## تبدیل فوریه:

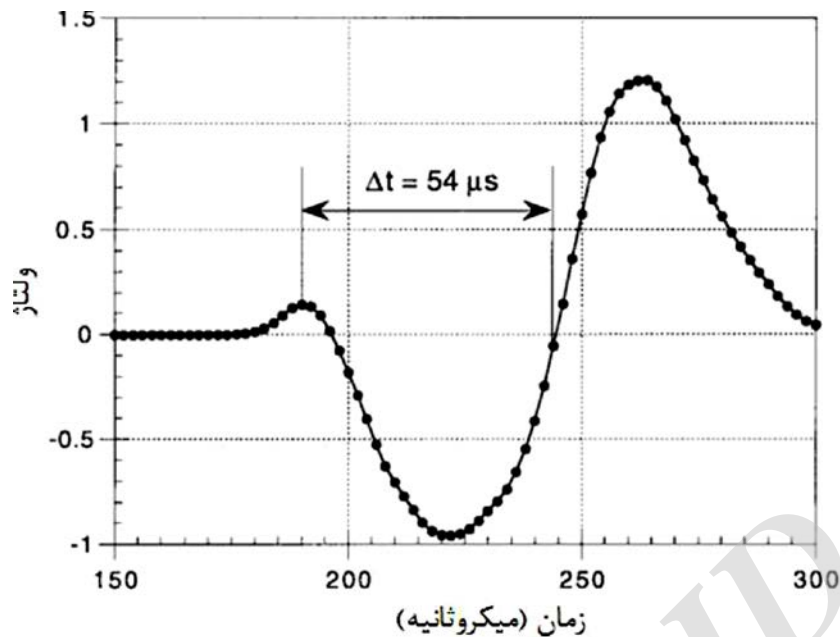
رورشی عدد است که برای تبدیل شکل موج دیجیتال از دامنه زمانی به دامنه بسامدی به کار برده می‌شود. نقاط پیک طیف دامنه متناظر با بسامد غالب موج هستند.

## روش ضربه بازتاب:

یک روش آزمون غیرمخرب فرستنده-مبدلی است که بر پایه استفاده از یک ضربه مکانیکی کوتاه مدت برای تولید امواج تنشی گیرا و بکارگیری یک مبدل باند پهن در مجاورت نقطه ضربه بنا نهاده شده است. موج‌ها به دامنه بسامد تبدیل شده و طیف‌های دامنه حاصله تحلیل می‌شوند تا بسامدهای غالب در پاسخ سازه به ضربه تعیین گردند.

## مدت ضربه:

مدت زمانی است که کوبه تولیدکننده امواج تنشی، در تماس با سطح تحت آزمایش می‌باشد. زمان تماس نیز نامیده می‌شود. مدت ضربه یک عامل اساسی در موفقیت دو روش در برگرفته این استاندارد می‌باشد. مدت ضربه‌های توصیه شده ارائه گردیده‌اند. در عمل، مدت ضربه به نوع کوبه و وضعیت بتن در نقطه ضربه بستگی دارد. سطوح صاف و سخت مدت ضربه کوتاهتری نسبت به سطوح زبر نرم دارند. مصرف کننده موظف است که مطابقت مدت ضربه را با بازه توصیه شده بررسی نماید. اندازه تقریبی مدت ضربه را می‌توان از آن بخش موج که متناظر با موج سطحی ورودی است، بدست آورد. شکل (۴-۱) مثالی از پخش موج سطحی و زمان تماس تقریبی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): نمایی بزرگ شده از بخش موج سطحی که عرض سیگنال موج سطحی را به عنوان تقریبی از زمان تماس ضربه نشان می‌دهد

### موج P

موج اتساعی (طولی یا P) که سبب جابجایی ذرات در راستایی موازی با راستای انتشار موج می‌رود. این موج در حین انتشار تولید تنش‌های عمودی (کششی یا فشاری) انتشار می‌یابد.

### سرعت موج P

سرعتی است که موج P با آن در محیط توپر نیمه نامحدود منتشر می‌شود. سرعت موج P همان سرعت ضربان (پالس) فشاری می‌باشد.

### بسامد نمونه برداری (فرکانس)

نرخی است که در آن نقاط تشکیل دهنده شکل موج ثبت می‌شوند. معکوس بازه زمانی نمونه برداری، به صورت هرتز بیان می‌شود.

### دوره تناوب نمونه برداری

مدت زمان شکل موج، که برابر است با حاصلضرب تعداد نقاط شکل موج در بازه نمونه برداری

### بازه نمونه برداری

اختلاف زمان مابین دو نقطه مجاور در شکل موج



## موج سطحی

موجی تنشی است که سبب حرکت بیضوی ذرات می‌شود. دامنه حرکت ذرات به سرعت در عمق کاهش می‌یابد. موج رایلی نیز نامیده می‌شود.

## شکل موج

سیگنالی ثبت شده از مبدل است که به صورت نمودار ولتاژ بر حسب زمان ترسیم می‌شود.

## سرعت ظاهری موج P در صفحه

پارامتر است که برابر ۰/۹۶ سرعت موج P می‌باشد:

$$C_{p,plate} = 0.96 C_p \quad (4-1)$$

که در آن:

$C_{p,plate}$ : سرعت ظاهری موج P در صفحه بر حسب متر بر ثانیه؛

$C_p$ : سرعت ظاهری موج P در بتن بر حسب متر بر ثانیه که از روش الف بدست می‌آید.

این پارامتر در محاسبات ضخامت صفحات در اندازه‌گیری به روش ضربه بازتاب بکار برده می‌شود. سرعت موج P در یک ماده (بتن) قابل تبدیل به سرعت ظاهری موج P در یک صفحه می‌باشد که در محاسبه ضخامت صفحه از طریق رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$T = \frac{C_{p,plate}}{2f} \quad (4-2)$$

که در آن:

$T$  ضخامت صفحه بر حسب متر

$f$  بسامد مود ضخامت موج P صفحه می‌باشد که از طیف دامنه تعیین می‌گردد.

صفحه هر سازه منشوری که در آن ابعاد جانبی حداقل ۶ برابر ضخامت آن باشند.

## ۲-۴- مکانیزم اثر و تحلیل امواج ضربه‌ای (P-Waves)

در یک شرایط وارد آمدن ضربه یک ضربه مکانیکی رویکردی که در مکانیک جامدات وجود دارد دیگر معتبر نخواهد بود چرا که در آن رویکرد پاسخ دینامیک سیستم در نظر گرفته نمی‌شود. روش‌هایی که تاثیرات تنش/ کرنش دینامیک را در نظر می‌گیرند عبارتند از استرومکانیک (Stereomechanics)، روش انرژی (Energy Methode)، مکانیک تماسی و نفوذ موج تنشی (Stress Wave Propagation). در این فصل روابط بنیادین حاکم برای انتشار موج تنشی مکانیکی در مواد جامد (Solids) بر اساس ضربه و یا بارگذاری لحظه‌ای ارائه می‌گردد. پاسخ به ضربه بستگی به انرژی جسم وارد کننده دارد. در اثر ضربه با سطح انرژی پایین امواج تنشی الاستیک منتشر شده، انتشار امواج پلاستیک برای ضربه‌هایی با شدت بالا رخ داده و جامدات رفتاری هیدرودینامیک در اثر

ضربه‌های شدیدتر از خود نشان می‌دهند. معادله پایه‌ای موج که در این بخش ارائه می‌گردد تنها در یک بعد و با در نظر گرفتن خواص جسمی که موج درون آن منتشر می‌شود مطالعه شده است. مفهوم امپدانس موج در طی معادله پیوستگی حرکت موج برای سرعت، تنش و نیرو در شرایط مرزی تعریف می‌شود. ضرائب انتقال و گسترش نیز نشان داده شده‌اند. روش موج تنشی یک تحلیل تنشی دقیق بر روی اجسام جامد الاستیک ارائه می‌دهد. به علاوه تغییر سطح تنش/ کرنش در مواد جامد به عنوان تابعی از زمان و فضا شناخته می‌شود. از سوی دیگر انتشار موج تنشی نیاز به تحلیل‌های پیچیده ریاضی دارد و به همین دلیل برای مطالعه آن نیاز به ساده سازی مکانیزم برخورد جسم و ضربه می‌باشد. در کاربردهای مهندسی که اجسامی با هندسه‌های پیچیده وجود دارند روش موج تنشی با استفاده از تحلیل المان محدود صورت می‌پذیرد. در این بخش روش‌های المان محدود به منظور نشان دادن انتشار امواج تنشی در اجسام جامد مورد مطالعه قرار می‌گیرند. پارامترهای المان محدود مانند شناخت تماس، انتخاب المان، معادلات ساختاری مواد، شرایط مرزی و بازه‌های افزایش زمانی در تهیه مدلی دقیق مهندسی از انتشار تنش و کرنش به کار می‌روند.

### ۳-۴- انتشار امواج تنشی (الاستیک)

هنگامی که یک نیروی ضربه‌ای یا یک پالس بر روی یک جسم الاستیک اعمال می‌شود، اغتشاش حاصله صورت یک موج تنشی در درون جسم جامد منتشر می‌شود که بسیار شبیه به انتشار امواج صوتی در هوا می‌باشد. ذرات در لایه‌ی نازکی نزدیک به سطح برخورد به حرکت در می‌آیند. سایر قسمت‌های جسم برای مدت زمان کوتاه بدون هیچگونه اغتشاشی باقی می‌مانند. با گذر زمان قسمتی از جسم که تحت تاثیر ضربه قرار داشت سبب می‌گردد تا این حرکت ذرات به سایر قسمت‌های جسم نیز انتشار یابد به همین طریق موج تغییر شکل الاستیک در جسم منشر شود. در پشت جبهه موج ذرات جسم در حال تغییر شکل و ذرات در حال حرکت می‌باشند اما در جلوی جبهه موج جسم بدون تغییر و در حالت سکون قرار دارد. اگر هندسه جسمی که به آن ضربه وارد می‌شود ساده و یکنواخت بوده و اگر نیروی وارد شده به درستی تعریف شده و به طور یکنواخت اعمال گردد معادلاتی برای تحلیل انتشار موج در یک محیط الاستیک برای ارزیابی تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در جسم به کار می‌رود. این امواج از مرزهای جسم و سطوح تماس جسم با سطوح دیگر منعکس می‌گردد. وابسته به شرایط مرزی، ایستادن یا امواج تنشی تداخلی ممکن است کرنش‌های محلی و تنش‌های مرتبط با شرایط ضربه بزرگتر از بارگذاری استاتیک عادی تولید شوند. اگر نیروی ضربه سرعتی کمتر از سرعت صوت در جسم جامد داشته باشد در آنصورت انتشار موج الاستیک خواهد بود. برای موادی که تحت تنش‌هایی از طریق بارگذاری دینامیک خارجی باشند در آنصورت رویکرد سنتی مکانیک جامدات دیگر کاربردی نخواهد بود. بر اثر بارگذاری که منجر به بروز تنش‌هایی پایین‌تر از حد تسلیم ماده می‌گردد "امواج تنشی الاستیک" تولید می‌شوند. تئوری الاستیسیته مبنای تحلیل موج در جامدات را فراهم می‌کند. تاثیر اینرسی المان‌ها و همچنین روابط سازگاری می‌توانند برای بدست آوردن معادله جابجایی حرکت که معادلات ناویر استوک نامیده می‌شوند به کار روند. این روابط معادله حرکت امواج تنشی در اجسام جامد نام دارند. در مورد ضربه به دلیل اینکه شدت یا نرخ بارگذاری به اندازه کافی بالاست نیروهای اینرسی در ماده می‌بایست در نظر گرفته شوند. حل مسائل در مکانیک ضربه نیاز به کاربرد قوانین پایه‌ای مکانیک و فیزیک و همچنین توصیف رفتار ماده در نظر گرفته شده دارد. سیستم معادلات حاکم بر رفتار مواد هموژن، ایزوتروپ، الاستیک خطی تشکیل شده است از معادلات تنشی حرکت، قانون هوک و روابط جابجایی-کرنش که بر اساس روابطی که در ادامه می‌آیند توصیف می‌گردد:

روابط کرنش-جابجایی (سینماتیک)

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4-3)$$

شرایط سازگاری ماده (معادلات سازنده)

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (4-4)$$

معادلات حرکت برای المانهای بسیار کوچک (تعادل)

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho a_i \quad (4-5)$$

در این معادلات آرایه‌ها  $i, j = 1, 2, 3$ ، ثابت لام  $\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$  و مدول برشی  $\mu = \frac{E}{2(1+v)}$  می‌باشند. ثابت لام و مدول برشی دو ثابت مستقل الاستیک هر ماده هستند که تمامی خواص مهندسی الاستیک هر ماده ایزوتروپیک را بیان می‌کنند. برای بدست آوردن هر کدام از معادلات اسکالر می‌توان از نوشتن معادلات برداری ۱ ~ ۳ در سه جهت اصلی کمک گرفت. برای نمونه از جمع زدن نیروها در سه جهت  $x, y, z$  و نوشتن معادله تعادل با تغییرات در ممتوم هر المان معادلات حرکت به شرح زیر بدست می‌آیند:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i \xrightarrow{\text{yields}} \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \sigma_x + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz} + \rho b_x = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_x \\ \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \sigma_y + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{yz} + \rho b_y = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_y \\ \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \sigma_z + \rho b_z = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_z \end{cases} \quad (4-6)$$

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i \xrightarrow{\text{yields}} \begin{cases} (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \Delta + \mu \Delta^2 (u_x) + \rho b_x = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_x \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \Delta + \mu \Delta^2 (u_y) + \rho b_y = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_y \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \Delta + \mu \Delta^2 (u_z) + \rho b_z = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_z \end{cases} \quad (4-7)$$

که در این روابط  $\Delta = \nabla \cdot \mathbf{u} = u_{j,j} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$  برابر با دیورژانس بردار جابجایی  $\mathbf{u}$  می‌باشد. در مورد ضربه تاثیر نیروی جسم در مدت زمان کوتاه وارد آمدن ضربه در برابر نیروی بالای ضربه می‌تواند نادیده گرفته شود. با توجه به این موضوع معادلات به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} = \rho \ddot{u}_i \quad (4-8)$$

با استفاده از ( $\nabla$ ) معادله طولی موج به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu u_{i,jji} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} = \rho \ddot{u}_{ii} \quad \text{یا} \quad \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = \frac{M \partial^2 \Delta}{\rho \partial x_i \partial x_i} \quad (4-9)$$

که در رابطه بالا  $M$  از رابطه پایین به دست می‌آید:

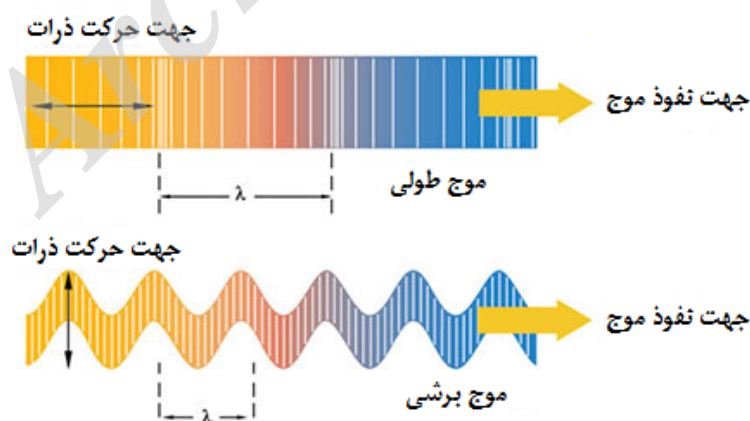
$$M = (\lambda + 2\mu) = \frac{E(1 + \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4-10)$$

امواج P امواجی هستند که حرکت ذرات که به دلیل اغتشاش ایجاد شده عمود بر جبهه موج، موازی با جهت انتشار پالس و کرنش اتساعی خالص است. امواج P را همچنین امواج اتساعی، طولی، اولیه یا فشاری نام دارند. موج P مربوط می‌شود به تنش عمودی و می‌تواند در تمامی حالت‌های ماده نفوذ کند. در الاستیسیته خطی مدولهای موج  $\lambda$  مانند  $M = \rho c_p^2$  به عنوان مدولهای موج طولی شناخته می‌شوند و یکی از مدولهای الاستیک موجود برای توصیف مواد هموزن ایزوتروپیک می‌باشد. در این معادله  $c_p$  سرعت موج  $\lambda$  در یک جسم الاستیک جامد محدود می‌باشد.

#### ۴-۴- امواج حاصله از ضربه الاستیک: موج ضربه (Impact Echo)

##### ۴-۴-۱- انواع مختلف موج

طیف گسترده‌ای از امواج مختلف می‌توانند در اجسام جامد نفوذ کنند. در امواج فشاری و طولی (امواج نوع P) جهت حرکت ذره در راستای جهت نفوذ موج می‌باشد. در نوع دوم که امواج برشی (shear waves) نام دارند و به نام امواج نوع S نیز خوانده می‌شوند جهت نفوذ موج عمود بر جهت حرکت ذرات می‌باشد (شکل ۱-۱). علاوه بر این دو دسته از موج‌ها، در هنگام اعمال ضربه در روش Impact Echo معمولاً نوعی دیگری از موج سطحی که به نام موج رایلی (Rayleigh) شناخته می‌شوند نیز پدید می‌آید. این سه نوع موج در اجسام جامد و صلب نفوذ می‌کنند ولی تنها امواج برشی هستند که نمی‌توانند در گازها و سیالات نفوذ کنند. در یک ماده ایزوتروپیک و برای یک جهت موج دارای دو سرعت  $C_L$  و  $C_T$  می‌باشد، اما در مواقعی که بدنه دارای سطوح آزاد می‌باشد، انواع دیگری از امواج شکل می‌گیرند. این امواج، امواج سطحی می‌باشند که ساده‌ترین مثال آنها موج دریا است. وجود این امواج برای اولین بار در سال ۱۸۸۷ توسط رایلی نشان داده شد و سپس با استفاده از شواهدی مرتبط با علم زمین شناسی مورد اثبات قرار گرفت. این موج همچنین با نام رایلی یا موج نوع R نیز شناخته می‌شود.



شکل ۴-۲: امواج طولی و برشی

در امواج صوتی فاصله بین دو نقطه مینیمم و یا ماکزیمم متوالی طول موج (wavelength) نامیده می‌شود. رابطه بین طول موج، فرکانس و سرعت صوت می‌تواند بدین صورت نوشته شود:

$$l = \frac{v}{f} \quad (4-11)$$

در این رابطه  $l$  نشان دهنده طول موج،  $v$  نشان دهنده سرعت موج و  $f$  نشان دهنده فرکانس موج می‌باشد.

#### ۴-۴-۲- تحلیل نفوذ موج تنشی الاستیک در یک سازه کامپوزیتی

در پدیده "موج ضربه" ما با بارگذاری ضربه‌ای یا لحظه‌ای مواجه هستیم که این نوع بارگذاری می‌تواند به سه دسته تقسیم شود؛ ضربه قوی یا ضربه با فشار بالا، ضربه ضعیف یا ضربه با فشار متوسط و ضربه الاستیک یا ضربه با انرژی پایین. رفتاری که اجسام صلب در برابر این ضربه‌ها از خود نشان می‌دهند به ترتیب هیدرودینامیک، پلاستیک با کرنش محدود و الاستیک خطی می‌باشد [۴۶]. در مواردی که ضربه با فشار بالا بر جسم وارد می‌گردد تنش ایجاد شده به مراتب بیشتر از تنش حد تحمل ماده بوده و بنابراین مقاومت جسم نادیده گرفته شده و جسم همانند یک سیال لزج قابل فشردن سازی در نظر گرفته می‌شود [۴۷]. در حالت الاستیک پس از بارگذاری جسم دچار تغییر شکلی برگشت پذیر شده که پاسخ جسم به آن توسط قانون هوک، توصیف می‌شود. به دلیل خطی بودن معادلات حاکم بسیاری از مسائل دینامیک در محدوده الاستیک به روش تحلیلی قابل حل می‌باشد. بسیاری از مطالعاتی که تاکنون بر روی نفوذ امواج تنشی انجام شده است در مورد اجسام هموزن یا یکنواخت بوده است. در مورد نفوذ امواج در اجسام کامپوزیت، ایده‌آل ترین حالت مطالعه نفوذ موج در کامپوزیت‌های لایه لایه می‌باشد. پس بنابراین ما ماده کامپوزیت را به صورت لایه به لایه در نظر می‌گیریم.

#### ۴-۴-۳- امواج تنشی الاستیک یک بعدی

سرعت امواج طولی  $C_0$  در یک محیط با دانسیته  $\rho$  و مدول حجمی  $K$  با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

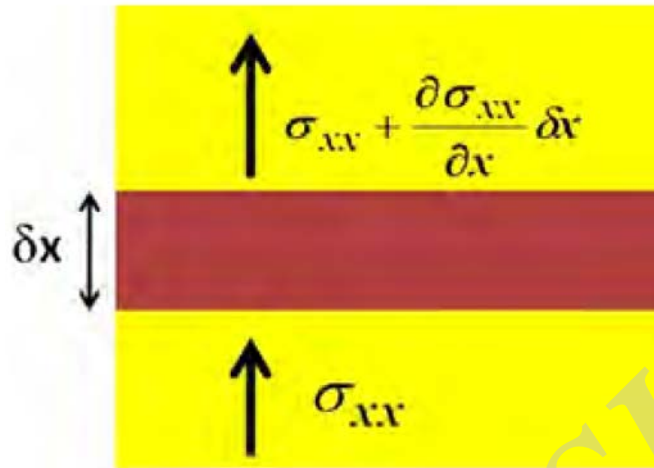
$$C_0 = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (4-12)$$

این رویکرد این اجازه را می‌دهد تا مطالعه انعکاس و انکسار امواج در تمامی مرزهای آزاد جسم برای امواج ممکن شود. در ابتدا نفوذ امواج طولی در سطوح جدا کننده دو محیط مورد مطالعه قرار می‌گیرد و سپس با تعمیم نتایج امواج تنشی پیچشی و جانبی بررسی می‌گردند. اگر عرض یک لایه کامپوزیت محدود و برابر  $\Delta x$  فرض گردد مطابق با آن چه در شکل (۴-۲) نشان داده شده است با اعمال تنش به مقدار  $\sigma_{xx}$  تنشی برابر با مقدار زیر به لایه بعدی یا سطح تماس بعدی منتقل می‌گردد:

$$\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta x \quad (4-13)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۱۳-۴) فوق می‌توان رابطه زیر را بدست آورد:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-14)$$



شکل ۴-۳: فرضیات نفوذ موج طولی

این معادله با در نظر گرفتن تابع خطی جابجایی وابسته به زمان  $u_t$  حل می‌شود که با استفاده از آن رابطه بین تنش با سرعت ذره به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma_{xx} = \rho C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4-15)$$

عبارت  $\rho C_0$  به عنوان امپدانس کامپوزیت شناخته می‌شود. سرعت ذره به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$V = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4-16)$$

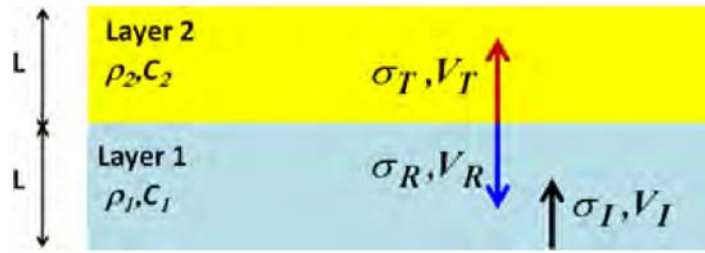
تساوی فوق می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$V = \frac{\sigma_{xx}}{\rho C_0} \quad (4-17)$$

پس از برخورد موج تنشی به مرز بین دو ماده قسمتی از موج از مرز رد شده و قسمتی از آن منعکس می‌گردد. با توجه به پیوستگی سرعت در صفحه بین دو ماده تنش منتقل شده می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود.

$$V_I = V_T + V_R \quad (4-18)$$

در اینجا  $V_I$  سرعت لحظه‌ای ذره،  $V_R$  سرعت ذره منعکس شده و  $V_T$  سرعت ذره منتقل شده می‌باشد. این سرعت‌ها در شکل شماره (۳-۴) نشان داده شده‌اند.



شکل شماره ۴-۴: نمایشی شماتیک از انتقال و انعکاس موج در سطح بین دو جسم

با مرتبط ساختن تنش لحظه‌ای با سرعت لحظه‌ای ذره در اولین لایه پیش از مرز بین دو ماده  $V_I$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_I = \frac{\sigma_I}{\rho_1 C_1} \quad (4-19)$$

با توجه به تعادل نیروها در سطح مرز جدا کننده، تساوی زیر بین نیروهای موثر بر دو سطح به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(\sigma_I + \sigma_R)A_I = \sigma_T A_2 \quad (4-20)$$

با جایگذاری روابطه فوق تنش منتقل شده  $\sigma_T$  و تنش منعکس شده  $\sigma_R$  به طریق زیر بدست می‌آیند:

$$\sigma_T = \frac{A_1 \rho_1 C_1}{A_1 \rho_1 C_1 + A_2 \rho_2 C_2} \sigma_I \quad (4-21)$$

$$\sigma_R = \frac{A_2 \rho_2 C_2 - A_1 \rho_1 C_1}{A_1 \rho_1 C_1 + A_2 \rho_2 C_2} \sigma_I \quad (4-22)$$

امپدانس اختلاف دو ماده‌ای که با هم در تماس هستند در سطح تماس آن دو از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I = 1 - m_1 m_2 \quad (4-23)$$

که در آن:

$$m_1 = \frac{\sigma_T}{\sigma_I} = \frac{2A_1 \rho_2 C_2}{A_1 \rho_1 C_1 + A_2 \rho_2 C_2} \quad (4-24)$$

$$m_2 = \frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{A_2 \rho_2 C_2 - A_1 \rho_1 C_1}{A_1 \rho_1 C_1 + A_2 \rho_2 C_2} \quad (4-25)$$

به راحتی دیده می‌شود که  $0 \leq I \leq 1$  می‌باشد.

آخرین موردی که باید در نظر گرفته شود انعکاس موج تنشی از انتهای آزاد میله می‌باشد. به دلیل آنکه تنش عمود بر سطح می‌باشد در هنگام انعکاس باید به طور کامل در خلاف جهت انتشار منعکس شود. در این محاسبات چگالی هوا صفر در نظر گرفته شده است و به همین دلیل نیازی به رابطه‌ای برای تحلیل رفتار موج در هنگامی که به انتهای آزاد می‌رسد نمی‌باشد. از سمت دیگر با توجه به اینکه موج تنشی هنگامی که به انتهای آزاد می‌رسد در جهتی مخالف با جهت نفوذ و در فازی مخالف منعکس می‌گردد.

## ۴-۴-۴- سرعت امواج طولی الاستیک

با توجه به رابطه  $C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}$  که در آن  $C_L$  سرعت یک پالس طولی الاستیک که از فشار یا کشش در یک محیط یک بعدی مانند میله مقید نشده می‌باشد تنها وابسته به مشخصات فیزیکی آن جسم بوده و هیچگونه ارتباطی با شکل یا نیروهایی که در آن اعمال می‌شوند ندارد. به دلیل آنکه  $E$  وابسته به دما می‌باشد در نتیجه  $C_L$  نیز وابسته به دما خواهد بود. سرعت موج برای برخی از مواد ایزوتروپیک در شکل جدول (۴-۱) داده شده است.

جدول ۴-۱: سرعت موج طولی الاستیک [۴۷]

	چدن	فولاد	برنج	مس	سرب	آلمینیوم	شیشه
$E$ [GPa]	۱۱۴	۲۰۴	۹۳/۳	۱۱۴	۱۷/۶	۶۹	۵۵
$\rho_0$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	۷۲۰۰	۷۷۵۰	۸۳۰۰	۸۸۷۰	۱۱۳۰۰	۲۶۶۰	۱۸۷۰
$C_L$ [m/s]	۳۹۸۰	۵۱۵۰	۳۳۶۰	۳۶۹۰	۱۱۹۰	۵۱۰۰	۵۳۴۰

## ۴-۴-۵- انتقال موج در یک محیط یک بعدی در شرایط کرنش صفحه‌ای

معادله حرکت برای هر المان در زمان  $t$  در یک محیط یک بعدی که عرض آن در مقایسه با طول آن قابل صرف نظر کردن می‌باشد به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (۴-۲۶)$$

در این معادله  $u$  معادله جابجایی یک ذره می‌باشد.

تنش بر المان در حالت کرنش صفحه‌ای وارد می‌شود و بنابراین در جهت  $Z$  هیچگونه افزایش طولی نخواهد داشت و بنابراین در اینجا  $\epsilon_z = 0$  و  $\sigma_y = 0$  و به همین صورت می‌توان گفت میله در جهت  $Y$  آزاد است و بنابراین کرنش آن با توجه به رابطه  $\epsilon_z = \frac{-\sigma_z - \nu \sigma_x}{E}$  برابر با صفر خواهد بود که در آن  $\nu$  نسبت پواسون می‌باشد. با در نظر گرفتن  $\sigma_z = -\nu \sigma_x$  و استفاده از قانون هوک خواهیم داشت:

$$\epsilon_x = \frac{-\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z}{E} = \frac{-\sigma_x + \nu \nu \sigma_x}{E} \quad (۴-۲۷)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{(1-\nu^2)}{E} \sigma_x \quad (۴-۲۷)$$



و در نتیجه موج تنشی به طریق زیر بدست خواهد آمد:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho_0(1-v^2)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-28)$$

و سرعت موج طولی نیز بدین صورت بدست می آید:

$$C'_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-v^2)}} \quad (4-29)$$

$$\frac{C'_L}{C_L} = \sqrt{\frac{1}{1-v^2}} \quad (4-30)$$

#### ۴-۴-۶- انتقال موج در یک محیط یک بعدی بدون تغییر شکل عرضی

با توجه به صفر بودن تنش عرضی و عدم وجود هیچگونه تغییر شکلی در جهت  $Y$  و  $Z$  و با توجه به تقارن هندسی نتیجه می شود

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$$

قانون هوک تبدیل می شود به:

$$E\varepsilon_y = \sigma_y - v(\sigma_y - \sigma_x) = \sigma_y(1-v) + v \cdot \sigma_x \quad (4-31)$$

با توجه به صفر بودن کرنش عرضی  $\varepsilon_y = 0$  خواهیم داشت:

$$\sigma_y = \frac{-v\sigma_x}{1-v} \quad (4-32)$$

$$\varepsilon_x = \frac{-\sigma_x - 2v\sigma_y}{E} \quad (4-33)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -\sigma_x \frac{(1-v-2v^2)}{E(1-v)} \quad (4-34)$$

بنابراین رابطه موج تنشی به شرح زیر است:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho_0} \cdot \frac{(1-v)}{(1+v)(1-2v)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-35)$$

با توجه به این رابطه سرعت موج طولی با استفاده از رابطه زیر تعریف می گردد:

$$C''_L = \sqrt{\frac{E}{\rho_0} \frac{(1-v)}{(1+v)(1-2v)}} \quad (4-36)$$

$$\frac{C_L''}{C_L} = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4-37)$$

و یا:

$$C_L'' = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho_0}} \quad (4-38)$$

#### ۴-۴-۶- انعکاس امواج طولی در محیط یک بعدی

هنگامی که موج به انتهای محیط تک بعدی برسد با توجه به شرایط مرزی در جهات مختلف منعکس خواهد شد. در شرایطی که انتهای میله آزاد باشد امواج کششی به صورت فشاری و امواج فشاری به صورت امواج کششی منعکس می‌گردند. در صورتی که انتهای میله ثابت باشد امواج فشاری به صورت فشاری و امواج کششی به صورت امواج کششی منعکس می‌گردند [۶]. در هنگامی که سطح آزاد در انتهای محیط یک بعدی وجود داشته باشد تمامی انرژی موج خواه اینکه فشاری باشد یا کششی منعکس می‌گردد و هیچ مقداری از آن به محیط هوا منتقل نمی‌گردد. اما در هنگامی که دو محیط جامد و صلب با یکدیگر در تماس هستند قسمتی از موج منعکس شده و قسمتی از موج به محیط دوم منتقل می‌شود. به منظور ساده‌سازی بررسی رفتار موج تنشی درون یک محیط صلب یک بعدی فرض می‌شود محیط بین دو جسم به طور ایده‌آل به یکدیگر متصل شده‌اند و موج در جهتی کاملاً عمود بر سطح تماس دو جسم برخورد می‌کنند. در این حالت دامنه موج منتقل شده به محیط دوم و همچنین موج منعکس شده کاملاً برابر با اختلاف نسبی امپدانس صوتی دو محیط می‌باشد. دامنه موج  $P$  منعکس شده و منتقل شده به محیط دوم برابر با مقادیر زیر می‌باشد [۶]:

$$A_{Reflected} = A_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4-39)$$

$$A_{Reflected} = A_i \frac{(2Z_2)}{Z_2 + Z_1} \quad (4-40)$$

$Z_1$  امپدانس محیطی است که موج  $P$  درون آن حرکت می‌کند تا به مرز بین دو محیط برسد و  $Z_2$  امپدانس صوتی محیطی است که آن سوی مرز بین دو جسم قرار دارد.  $A_i$  دامنه حرکت لحظه‌ای هر ذره در موج مورد بررسی می‌باشد. نسبت  $A_{Reflected}/A_i$  ضریب انعکاس و یا  $R$  نامیده می‌شود.

$$R = \frac{A_{Reflected}}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4-41)$$

جدول ۴-۲: مقادیر امیدانس برخی از مواد [۶]

نوع ماده	امیدانس ویژه صوتی
هوا	۰/۴
آب	$۰/۵ \times ۱۰^۶$
خاک	$۰/۴ \times ۱۰^۶$ تا $۰/۳$
بتن	$۱۰ \times ۱۰^۶$ تا ۷
فولاد	$۴۷ \times ۱۰^۶$

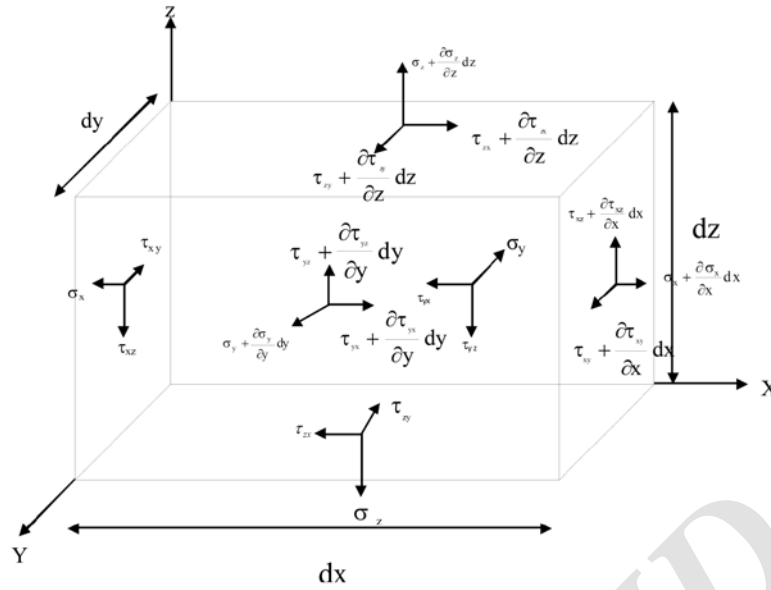
بنابراین با توجه به مطالب مطرح شده به خوبی مشخص است که امواجی که به درون جسم ارسال می‌شوند پس از برخورد با عیوب که حاوی هوا می‌باشند برخورد گشت و این دلیل عملکرد مناسب استفاده از امواج تنشی در تعیین عیوب داخلی کامپوزیت‌ها می‌باشد. ضریب انعکاس که در بالا بدان اشاره شد بسته به اختلاف مقدار امیدانس صوتی دو جسم می‌تواند مقادیر مثبت و یا منفی اختیار کند. در مواقعی که موج ارسالی درون کامپوزیت به لایه خارجی جسم که با هوا در تماس است برسد و یا به عیبی درون جسم برخورد کند به دلیل بزرگتر بودن امیدانس هوا  $Z_2$  از امیدانس کامپوزیت  $Z_1$  مقدار ضریب انعکاس  $R$  منفی خواهد شد و این به آن معنا است که موج در جهتی عکس جهت انتشار اولیه منعکس می‌گردد. بنابراین یک موج نوع  $P$  که به حالت فشاری منعکس شده بود پس از برخورد با محیط خارجی در حالت موج  $P$  کششی منعکس می‌گردد. اگر امیدانس صوتی محیط دوم بزرگتر باشد در آن صورت هیچگونه تغییری در علامت تنش به وجود نخواهد آمد و موج در جهت ضریب انعکاس  $R$  علامتی مثبت را اختیار خواهد کرد. در این حالت موج در حالت موج تنشی فشاری منعکس خواهد شد. این موضوع که فشاری و یا کششی بودن موج منعکس شده تاثیر فراوانی بر تمایز قایل شدن بین محیطی که موج به آنها برخورد کرده دارد نقش پررنگی در تعیین عیوب در روش موج ضربه دارد. برای مثال موج برگشتی حاصل از برخورد موج منعکس شده با محیطی مانند هوا و با محیطی مانند فلز می‌باشد تفاوت دارد.

#### ۴-۵- نفوذ امواج الاستیک در یک محیط دو بعدی (صفحه نازک)

در صفحه تنش یک صفحه نازک و یکنواخت دو موج الاستیک نفوذ می‌کنند. رابطه حرکت این امواج با در نظر گرفتن شکل (۲-۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \quad (۴-۴۲)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \quad (۴-۴۳)$$



شکل (۴-۴) توزیع تنش در یک جسم جامد

کرنش در حالت صفحه‌ای برای صفحه (xy) با توجه به شکل (۴-۴) و روابط تنش - کرنش برای یک المان صفحه‌ای در حالت ایزوتروپیک به صورت زیر می‌باشد:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \quad (4-44)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) \quad (4-45)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial xy}{G} \quad (4-46)$$

همچنین روابط مربوط به تنش برای المان صفحه‌ای به صورت زیر می‌باشند:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4-47)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4-48)$$

$$\sigma_{xy} = G \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4-49)$$

با در نظر گرفتن روابط فوق خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-50)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (4-51)$$

با توجه به روابط فوق می‌توان نتیجه گرفت که در ورق دو سرعت موج صفحه‌ای وجود دارد. یکی از آنها باعث پدید آمدن جابجایی موازی با محور انتقالی و مقداری برابر با  $C_L = C_P = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$  و دیگری که سبب جابجایی در جهت متقاطع با محورها می‌شود دارای سرعتی برابر با  $C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$  خواهد بود.

#### ۴-۶- نفوذ امواج الاستیک در یک محیط سه بعدی

به منظور فهم نفوذ موج در یک محیط نامتناهی الاستیک در حالت سه بعدی معادله حرکت می‌بایست با استفاده از پارامترهای تنش نوشته شود. در یک المان از ماده کامپوزیت به ابعاد  $dx$ ،  $dy$  و  $dz$  تنش‌های عمودی  $\sigma_x$ ،  $\sigma_y$ ،  $\sigma_z$  و برشی  $\tau_{xy}$ ،  $\tau_{yx}$ ،  $\tau_{xz}$ ،  $\tau_{zx}$ ،  $\tau_{yz}$ ،  $\tau_{zy}$  همانطور که در شکل (۴-۴) ناشی از نیروهای موثر بر آن المان خواهند بود. اگر  $u$ ،  $v$  و  $w$  نمایانگر اندازه بردار یک حرکت در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  باشند در آن صورت روابط (۴-۵۲) تا (۴-۵۴) برای تعادل در راستای محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  نوشته می‌گردد. در این روابط نیروهای خارجی با نیروهای اینرسی داخلی در توازن قرار دارند و  $\rho$  میزان جرم در واحد حجم یا چگالی نام دارد.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4-52)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (4-53)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (4-54)$$

با در نظر گرفتن تئوری الاستیسیته و نوشتن تساوی مشتق‌های پاره‌ای جابجایی برای کرنش‌های برشی و نرمال و مرتبط ساختن تنش و کرنش با استفاده از قانون هوک به یکدیگر و به کار بردن ثابت‌های مواد یعنی مدول یانگ ( $E$ )، مدول برشی ( $G$ )، مدول حجمی ( $\lambda$ ) و نسبت پواسون ( $\mu$ ) و جایگزینی مقادیر  $\tau_{zx}$  با  $\tau_{xz}$ ،  $\tau_{xy}$  با  $\tau_{yx}$  و  $\tau_{yz}$  با  $\tau_{zy}$  رابطه (۴-۵۵) برای توصیف حرکت  $x$  به بیان خواهد شد. به طور مشابه و با در نظر گرفتن حرکت در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  کرنش حجمی ( $\varepsilon$ ) و سرعت اولیه موج در کامپوزیت ( $v_p$ ) به وسیله رابطه (۴-۵۸) بدست خواهد آمد:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + G \nabla^2 u \quad (4-55)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4-56)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = v_p^2 \nabla^2 \varepsilon \quad (4-57)$$

که در آن:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4-58)$$

$$v_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$$

(۴-۵۹)

نفوذ موج تنشی در در یک محیط الاستیک با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (۴-۶۰)$$

$$v_c = \sqrt{E/\rho} \quad (۴-۶۱)$$

برای امواج برشی یا امواج  $S$  معادله حرکت  $S$  به معادله زیر کاهش می‌یابد:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t^2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = G \partial^2 \bar{\omega}_x \quad (a۴-۶۲)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = v_s^2 \partial^2 \bar{\omega}_x \quad (b۴-۶۳)$$

که در آن  $v_s = \sqrt{G/\rho}$  و کرنش چرخشی در جهت  $x$  به صورت  $\bar{\omega}_x = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$  بیان می‌شود. امواج  $P$  سبب هیچگونه پیچشی نشده و از سمت دیگر امواج  $S$  نیز سبب هیچگونه تغییری در حجم نمی‌شوند. نسبت سرعت موج  $P$  به سرعت موج  $S$  از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

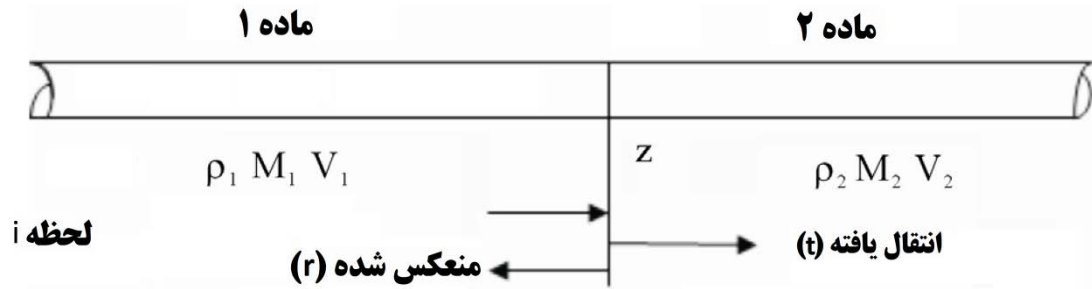
$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2-2\mu}{1-2\mu}} \quad (۴-۶۴)$$

که در آن  $\mu = 0.3$  و میزان نسبت  $\frac{v_p}{v_s}$  برابر با  $1/17$  خواهد بود.

امواج که درون بدنه جسم حرکت می‌کنند دارای جبهه نیمه کروی بوده و امواج ریلی دارای جبهه استوانه‌ای می‌باشند. دامنه امواج حجمی متناسب با  $\frac{1}{r}$  و دامنه موج ریلی متناسب با  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  می‌باشد.

#### ۴-۷- نفوذ موج در یک محیط لایه لایه مانند کامپوزیت

در ابتدا نفوذ موج در یک محیط یک بعدی مانند میله را که از چندین لایه تشکیل شده است بررسی می‌شود. فرض می‌شود که موج درون یک ماده هموزن حرکت کرده و به مرز آن با یک ماده نرم‌تر می‌رسد. مساله‌ای که در اینجا برای حل انتخاب شده است (همانطور که در شکل ۴-۴ نیز مشخص است) حرکت هارمونیک موج تنشی در جهت  $x$  به سمت مرز بین دو ماده می‌باشد.



شکل (۴-۴): نفوذ یک بعدی موج در سطح تماس ماده

با ارضا کردن شرایط سازگاری جابجایی‌هایی و همچنین پیوستگی تنش دامنه و تنش لحظه‌ای، امواج منتقل شده و منعکس شده با استفاده از روابطی که در ادامه می‌آیند به یکدیگر مرتبط خواهند شد:

$$A_r = \frac{1 - \alpha_z}{1 + \alpha_z} A_i \quad (۴-۶۵)$$

$$\alpha_z = \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} \quad (۴-۶۶)$$

$$A_t = \frac{2}{1 + \alpha_z} A_i \quad (۴-۶۷)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_z - 1}{\alpha_z + 1} \sigma_i \quad (۴-۶۸)$$

$$\sigma_r = -1 \omega \rho_1 v_1 A_i \quad (۴-۶۹)$$

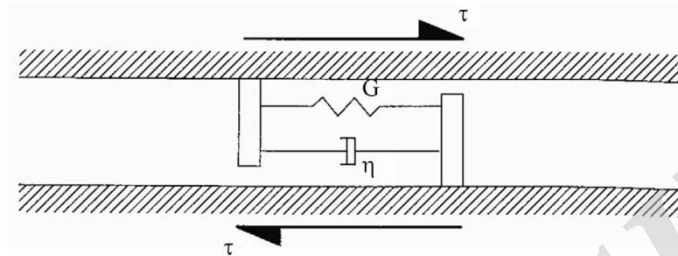
$$\sigma_t = \frac{2\alpha_z}{1 + \alpha_z} \sigma_i \quad (۴-۷۰)$$

صفر بودن نسبت امپدانس به معنای شرایط آزاد در سطوح می‌باشد. دامنه جابجایی در دامنه دوبرابر جابجایی لحظه‌ای موج بوده و برابر با تنش اما با علامت منفی می‌باشد. تنش در مرزها دوبرابر موج لحظه‌ای می‌باشد. صفر بودن این نسبت بدان معناست که تمامی موج منقل شده و هیچ مقداری از آن منعکس نمی‌گردد. پاسخ سیستم بارگذاری دینامیک به وسیله تبدیل فوریه و منتقل کردن توابع به دامنه فرکانسی حل می‌گردد. این رویکرد به طور گسترده برای تحلیل پاسخ سازه‌های بتنی به ضربه مورد استفاده قرار می‌گیرد که دامنه زمانی رفت و برگشت موج به دامنه فرکانسی به وسیله تبدیل فوریه منتقل می‌گردد. به وسیله تبدیل معکوس فوریه و ضرب آن در دامنه فرکانسی نتایج به دامنه زمانی منتقل می‌شود. مساله اکنون بدست آوردن توابع لایه‌های کامپوزیت که نسبت جابجایی بالاترین و پایین‌ترین نقطه به یکدیگر می‌باشد. با استفاده از مدول تبدیل تابع دامنه بدست می‌آید. هر لایه از کامپوزیت یک ماده هموژن محسوب شده ولی با در نظر گرفتن لایه‌های متعددی از رزین و فایبر ساختار ناهمگون یا *Heterogeneous* ماده شکل می‌گیرد. هنگامی که در پدیده *Impact Echo* ضربه به لایه خارجی کامپوزیت برخورد می‌کند موج درون آن حرکت کرده تا به لایه‌های درونی برسد در این هنگام مقداری از موج منعکس شده و مقداری از آن منتقل می‌گردد. به دلیل پایین‌تر بودن سرعت موج در لایه‌های پایین‌تر کامپوزیت معمولاً موج با زاویه‌ای نزدیک به قائم منعکس می‌گردد. با فرض تحلیل یک بعدی پاسخ لایه‌های زیرین کامپوزیت، پاسخ آن بیشتر به صورت امواج *S* خواهد بود.

#### ۴-۸- میرا شدن امواج تنشی درون کامپوزیت

با در نظر گرفتن معادلات (۴-۶۵) تا (۴-۷۱) بیان کننده رفتار موج هستند بدون هیچگونه کاهش در دامنه ولی این موضوع در عمل اتفاق نمی‌افتد. در طی نفوذ موج در یک جسم کامپوزیت کاهش انرژی در موج رخ می‌دهد که این موضوع در کاهش دامنه موج خود را نشان می‌دهد. اگر کامپوزیت را مانند یک ماده ویسکو الاستیک با سختی فنر  $G$  و ثابت میرایی ویسکوز  $\eta$  تنش برشی  $\tau$  کرنش  $\gamma$  مانند شکل (۴-۶) که به وسیله رابطه زیر داده می‌شود:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (4-72)$$



شکل (۴-۶): در نظر گرفتن کامپوزیت در حالت ایده‌آل ویسکو الاستیک

امواج منعکس شده  $SH$  به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (4-73)$$

با جایگذاری رابطه (۴-۷۲) در (۴-۷۳) رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (4-74)$$

#### ۴-۸-۱- تابع انتقال

با در نظر گرفتن کامپوزیت به عنوان یک ماده ویسکو الاستیک که لایه  $N$  آن مرز کامپوزیت در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۷) راه حل انتشار موج مانند آنچه در ادامه می‌آید خواهد بود:

$$u(z, t) = Ae^{-i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)}$$

$$\tau(z, t) = G^* \frac{\partial u}{\partial z} = (G + i\omega\eta) \frac{\partial u}{\partial z} = G(1 + 2i\xi) \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4-75)$$

در این روابط  $A$  و  $B$  دامنه موج‌هایی هستند که در جهت بالا و پایین در حال حرکت می‌باشند،  $k^*$  عدد مختلط موج بوده که از بسط نتایج تساوی (۴-۷۵) بدست می‌آید. نسبت امپدانس مختلط  $(\alpha_m^*)$ ، بین لایه‌های  $m$  و  $m + 1$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha_m^* = \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \quad (4-76)$$



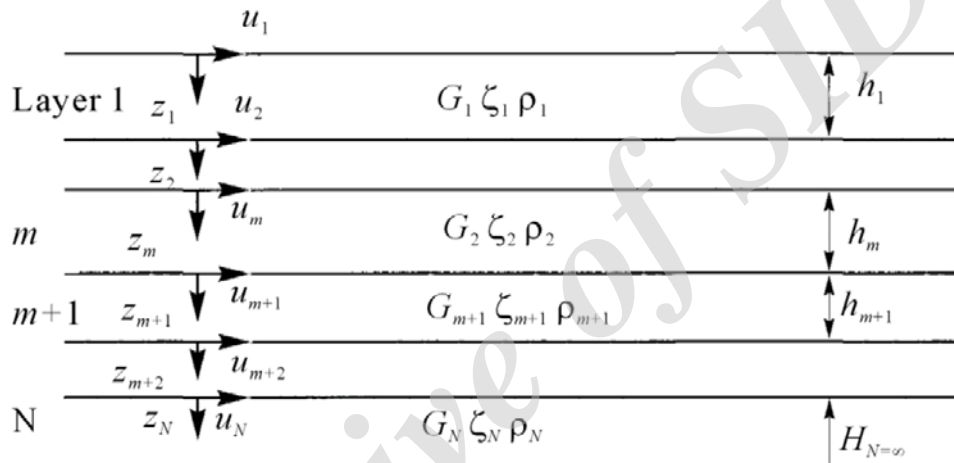
در سطح بالایی کامپوزیت که ضربه به آن وارد می‌گردد تنش برشی باید برابر با صفر باشد و  $B_1 = A_1$  توابع مرتبط با دامنه در لایه  $m$  و سطح ۱ از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$A_m = a_m(\omega)A_1 \quad (۴-۷۷)$$

در سطح بالایی کامپوزیت که ضربه به آن وارد می‌گردد تنش برشی باید برابر با صفر و  $B_1 = A_1$  باشد. توابع مرتبط با دامنه در لایه  $m$  و سطح ۱ از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$F_{ij}(\omega) = \left| \frac{u_i}{u_j} \right| = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad (۴-۷۸)$$

به دلیل اینکه  $|\ddot{u}| = \omega |\dot{u}| = \omega^2 |u|$  می‌باشد از این تابع انتقال می‌توان برای یافتن دامنه شتاب و جابجایی نیز بهره برد.

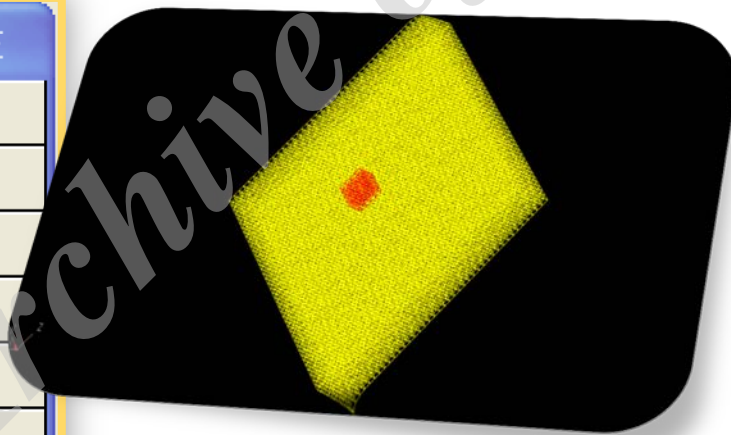
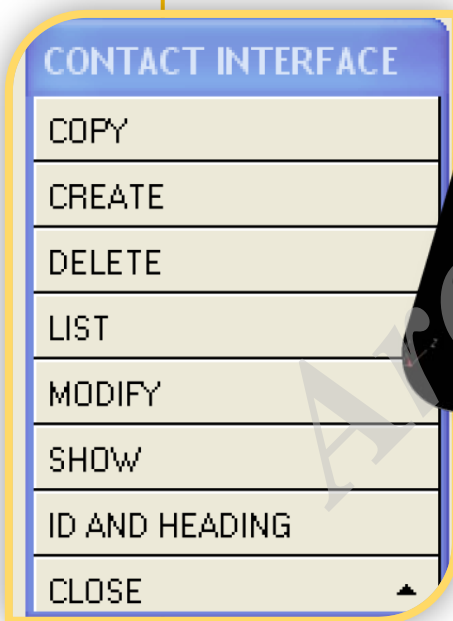


شکل (۴-۷): لایه‌های کامپوزیت

اگر میزان حرکت ذره‌ای در سطح خارجی کامپوزیت که به آن ضربه وارد می‌گردد مشخص باشد در آن صورت می‌توان حرکت هر لایه درونی دیگر با استفاده از این روابط مشخص خواهد کرد.

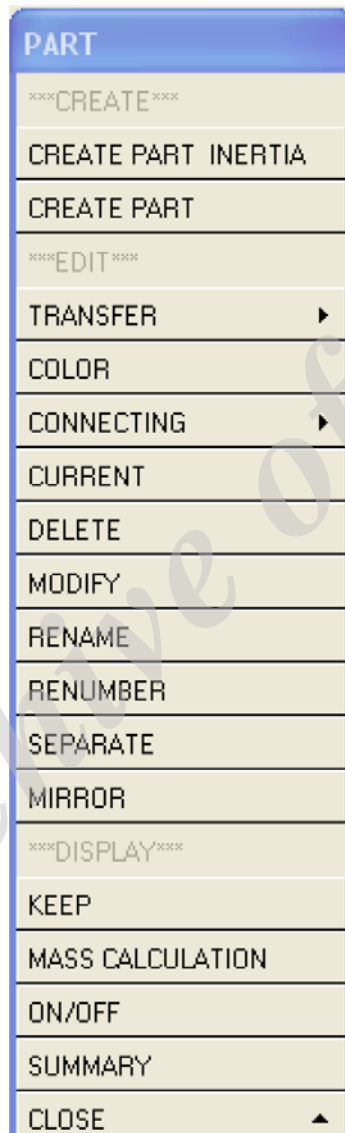
## فصل ۵

# مدل سازی در محیط LS-DYNA



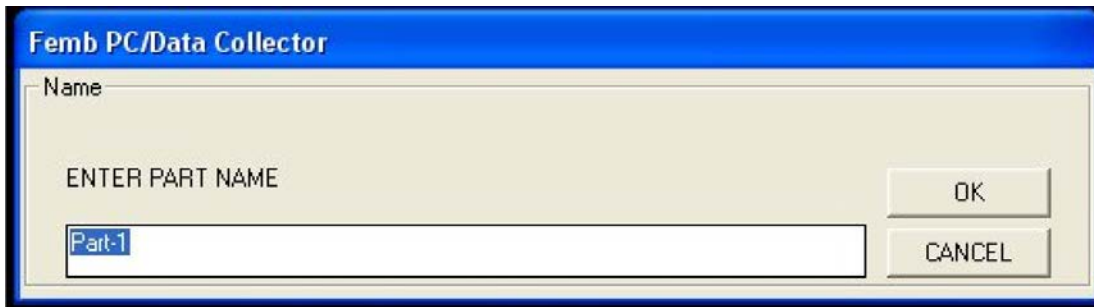
## ۵-۱- مقدمه

مراحل مدل سازی قطعه کامپوزیت در اولین مرحله برای ترسیم در محیط Pre-Processing ایجاد Part می باشد. هدف از ایجاد Part منظم کردن خطوط، سطوح و المان ها می باشد که در هر مرحله ترسیم خواهد شد. همچنین برای ترسیم هر مدل، از پارت های جدا استفاده می شود. به منظور مدل سازی Impact Echo در محیط نرم افزار LS-DYNA از چهار Part به نام های Target1، Target (برای کامپوزیت)، Pro، Pro1 (برای ضربه زننده) استفاده می شود. در ابتدا گزینه Part را از Toolbar بالای Pre-Processing انتخاب می شود و سپس منوی زیر در سمت راست صفحه مانیتور ظاهر خواهد شد.



شکل ۵-۱: منوی Part

از منوی Part گزینه Create Part انتخاب می شود، سپس پنجره ای به صورت زیر باز شده که نام پارت مورد نظر را می خواهد. در این مرحله نام پارت های مورد نظر خود را وارد کرده و کلید OK را می زنیم.

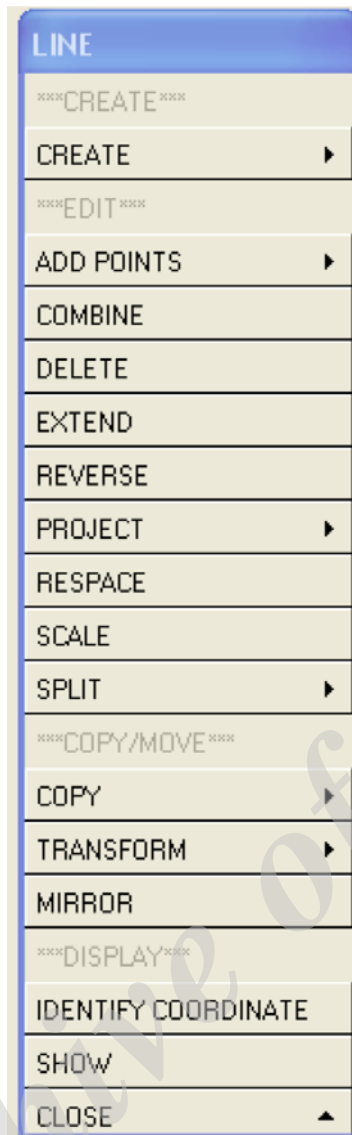


شکل ۵-۲: وارد کردن نام Part 1

پس از ایجاد پارت، آن پارت به صورت پارت فعال درآمده و خطوط، صفحات یا المان‌های که ترسیم می‌شود در این پارت قرار خواهند گرفت. همچنین در گوشه سمت راست در بالای مانیتور نام پارت فعال نوشته می‌شود. برای فعال کردن پارت‌های دیگر از می‌توان گزینه Current در منوی Part استفاده کرد.

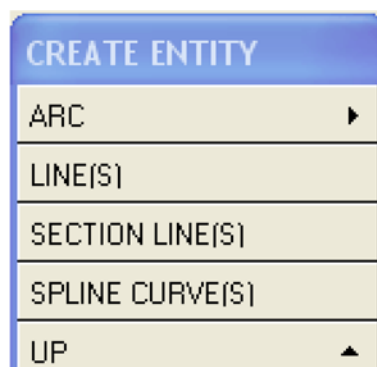
لازم به توضیح است دیمانسیون در نظر گرفته شده در این مدل بر اساس واحدهای میلی‌متر، میلی ثانیه، گرم، مگاپاسکال انجام می‌گیرد.

در ابتدا از منوی Part گزینه Current را انتخاب کرده و از پنجره‌ای که باز می‌شود گزینه Target 1 انتخاب می‌شود. از این به بعد هر خط، سطح و یا هر المانی که ترسیم شود در این پارت جدید (Target 1) ریخته می‌شود و به رنگ همان Part در می‌آید. پس از انجام این کار از Toolbar قسمت بالای Pre-Processing گزینه Line انتخاب می‌شود تا منوی مربوط به Line به صورت زیر در سمت راست صفحه مانیتور ظاهر شود:



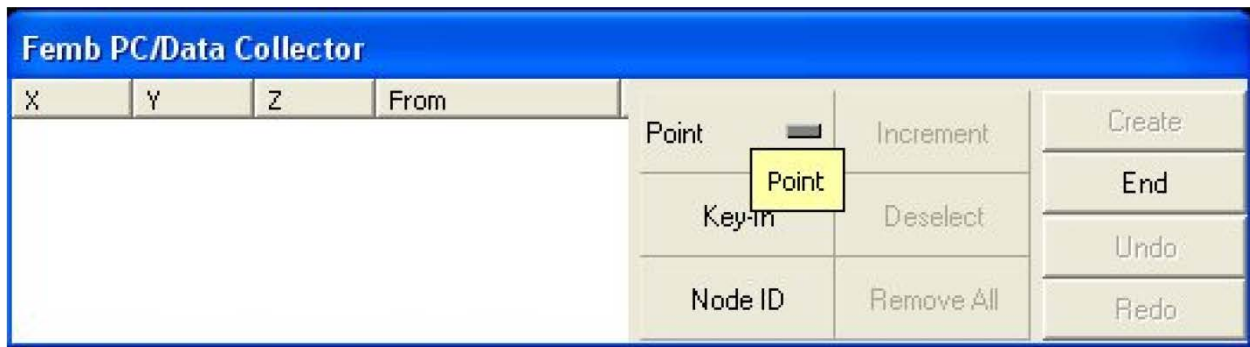
شکل ۵-۳: منوی مربوط به Line

از منوی Line گزینه Create را انتخاب کنید به این ترتیب منوی دیگری به صورت زیر ظاهر می‌شود:



شکل ۵-۴: منوی مربوط به Create

حال گزینه Line را برای ترسیم خطوط مستقیم انتخاب می‌کنیم پس از انتخاب گزینه فوق پنجره‌ای به صورت زیر ظاهر می‌شود:



شکل ۵-۴: منوی مربوط Femb

با انتخاب گزینه Key-In می‌توان مختصات نقاط ابتدا و انتهای خط را در زیر X، Y، Z تایپ کرد. همچنین می‌توان ابتدا مختصات یک نقطه را به وسیله key-in وارد کرد و سپس به وسیله انتخاب گزینه increment مقدار افزایش طول نقطه انتهای خط، نسبت به ابتدای خط را در زیر X، Y، Z تایپ نمود. همچنین بعد از ایجاد هر دو نقطه، باید گزینه Create را انتخاب کرد تا خط بین دو نقطه ایجاد شود.

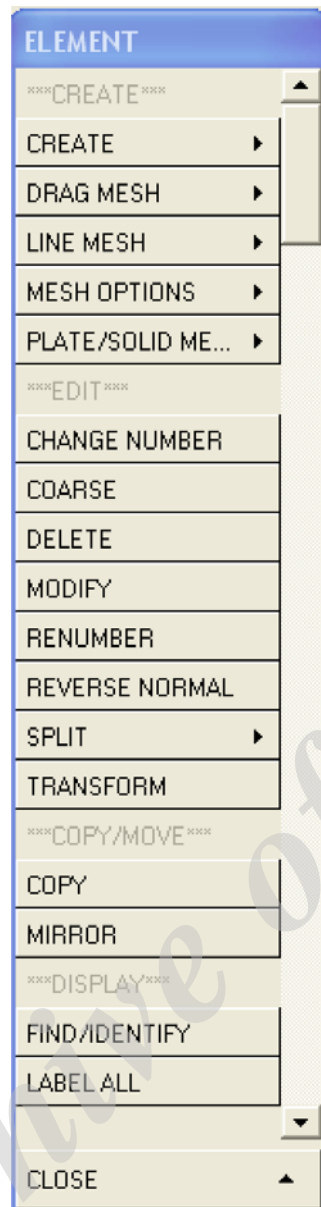
حال یک مستطیل به ابعاد ۱۰۰ X ۵۰ رسم می‌شود و پارت Pro1 را از طریق آنچه قبلاً توضیح داده شد فعال کرده و در آن یک مربع به ابعاد ۵۰ در ۵۰ رسم می‌کنیم.

## ۵-۲- المان بندی صفحه کامپوزیت و ضربه زننده:

لازم به توضیح است اگر برای المان بندی، المان‌ها را بین چهار خط یا کمتر قرار دهیم نوع المان تولید شده Shell یا پوسته می‌باشد همچنین اگر صفحه را هم المان بندی کنیم باز هم المان Shell ایجاد می‌شود. ولی اگر المان‌ها را بین ۶ خط یا بیشتر قرار دهیم المان Solid ایجاد خواهد شد.

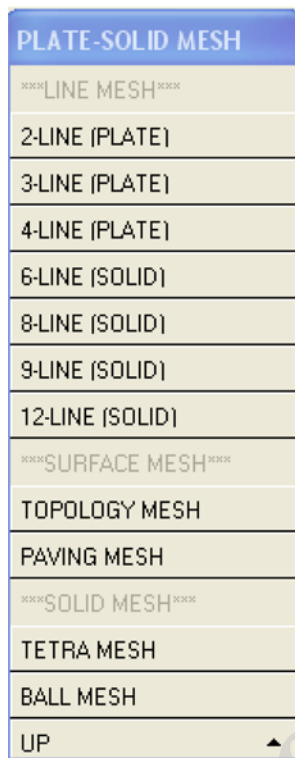
به دلیل اینکه این مسئله می‌بایست به صورت سه بعدی حل شود ابتدا المان‌های Shell ایجاد می‌شوند و سپس به وسیله Drag Mesh آن را Solid می‌کنیم.

از Toolbar بالای صفحه مانیتور گزینه Element را کلیک کرده تا کادری مانند شکل زیر ظاهر شود:



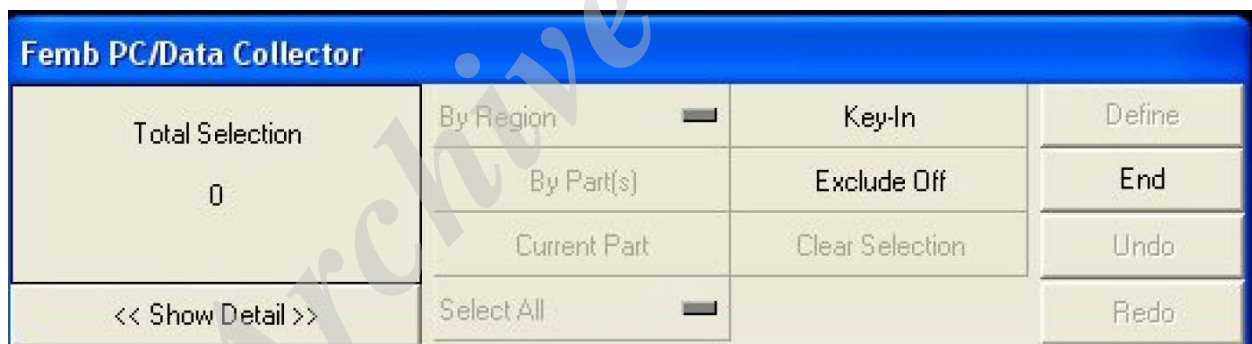
شکل ۵-۵: منوی Element

از منوی Element گزینه Plate/Solid Mesh را کلیک کرده تا کادری مانند شکل ۵-۶ زیر ظاهر شود:



شکل ۵-۶: منوی Plate Solid Mesh

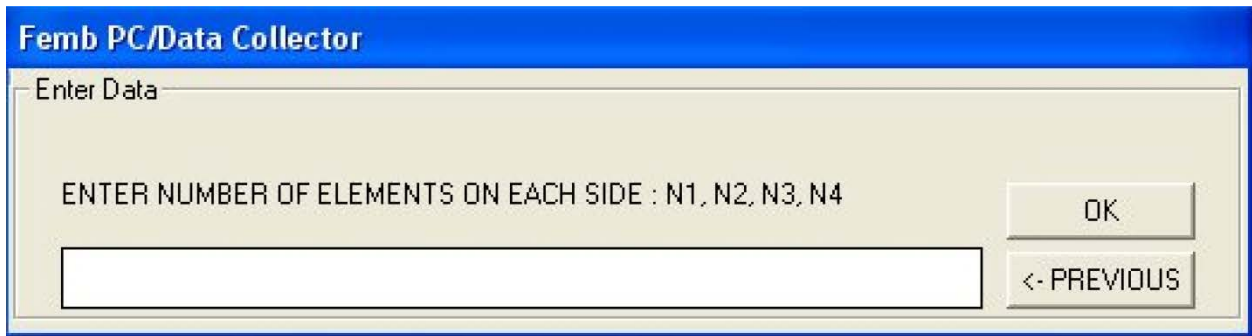
از منوی Plate/Solid mesh گزینه 4-Line را کلیک کنید تا کادری مانند شکل زیر ظاهر شود:



شکل ۵-۷: منوی Femb PC

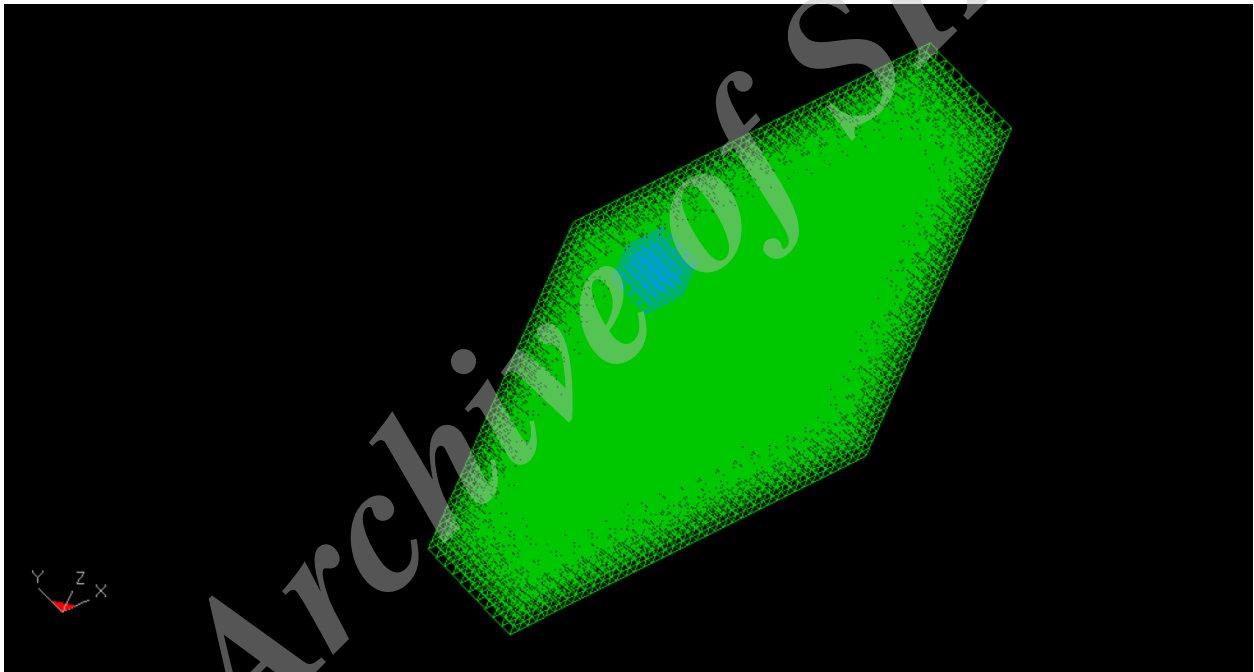
در این مرحله از ما خواسته می‌شود که چهار خط را به عنوان مرزهای سطحی که قرار است المان بندی شود به وسیله موس انتخاب کنیم. پس از انجام این عمل پنجره‌ای به صورت زیر باز می‌شود که در آن تعداد المان بر روی هر خط یا وجه را از ما می‌خواهد، ما تعداد ۱۰، ۴۰، ۱۰، ۴۰ را داده و بعد از این کار با کلیک کردن بر روی Yes مش رو صفحه مورد نظر زده می‌شود.





شکل ۵-۸: وارد کردن تعداد المان

وقتی کار Mesh زدن کامپوزیت تمام شود حال نوبت ضربه زننده است و مانند کامپوزیت آن را مش بندی می کنیم. وقتی که کامپوزیت و ضربه زننده را به صورت Shell مش می زنیم سپس هر کدام از آنها را در پارت مربوطه به خود به وسیله آیکون Drag Mesh از حالت Shell به صورت Solid در می آوریم و سپس پارت های قبلی را پاک می کنیم.



شکل ۵-۹: پایان مرحله المان بندی

### ۵-۳- تعریف ماده و نسبت دادن آنها به کامپوزیت و ضربه زننده:

پس از مرحله المان بندی، نوبت به ایجاد ماده و نسبت دادن آن به پارت مربوطه می باشد.

نرم افزار LS-DYNA دارای کتابخانه مواد گسترده ای می باشد که با انتخاب نوع رفتار ماده می توانیم خواص مربوط به ماده را در کارت های مربوطه وارد کرده و برای ایجاد ماده و نسبت دادن آن به المان های مربوطه مراحل زیر را انجام دهیم:

- از Toolbar بالای صفحه گزینه Material انتخاب می‌شود.
- پس از ظاهر شدن منوی Material اگر برای المان‌های ماده تعریف نشده باشد المان‌ها به رنگ خاکستری روشن درمی‌آیند. در اینجا چون برای المان‌ها ماده تعریف نشده است المان‌ها به رنگ خاکستری روشن در می‌آیند.
- از منوی Material گزینه Create را انتخاب کرده و بعد از آن گزینه Structural را انتخاب می‌کنیم. بعد از این کار منوی Structural به صورت زیر ظاهر می‌شود:



شکل ۵-۱۰: منوی Structural

حال برای ضربه زننده ماده MAT-Plastic-Kinematic را انتخاب کرده و ضرایب فولاد را بر اساس واحدهای تعریف شده در کارت ان وارد می‌کنیم.

MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
1	7.8e-3	2.0e5	0.29	250.0	20e3	1

شکل ۵-۱۱: منوی کارت برای ضربه زننده

**MID:** Material ID  
**RO:** Mass Density  
**E:** Young Modulus

**PR:** Poisson's Ratio

**SIGY:** Yield Stress

**ETAN:** Plastic Hardening Modulus

**BETA:** Hardening Parameter

بعد از وارد کردن این اعداد در کارت ماده انتخابی کلید OK زده می‌شود:

Keyword Table			
M-1	Vari...	Description	Value(s)
*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 1.1 2.1	MID	MATERIAL ID	1
	RO	MASS DENSITY	7.8e-3
	E	YOUNG'S MODULUS	2e5
	PR	POISSON'S RATIO	0.29
	SIGY	YIELD STRESS	250
	ETAN	PLASTIC HARDENING MODULUS	20e3
	BETA	HARDENING PARAMETER	1
Ok    Abort    Apply			

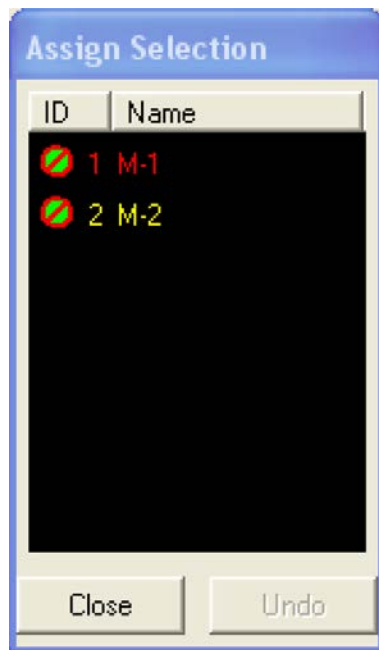
شکل ۵-۱۲: نمایش مشخصات مکانیکی ضربه زننده

نام MAT-Composite-Damage برای ماده کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود، از این ماده برای آنالیز کردن سازه‌های کامپوزیت تقویت شده توسط الیاف شیشه که در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود.

برای این نوع کامپوزیت علاوه بر نیاز به تعریف پارامترهای ماده باید یک معادله حالت نیز تعریف گردد که این کار در مراحل بعد انجام می‌پذیرد.

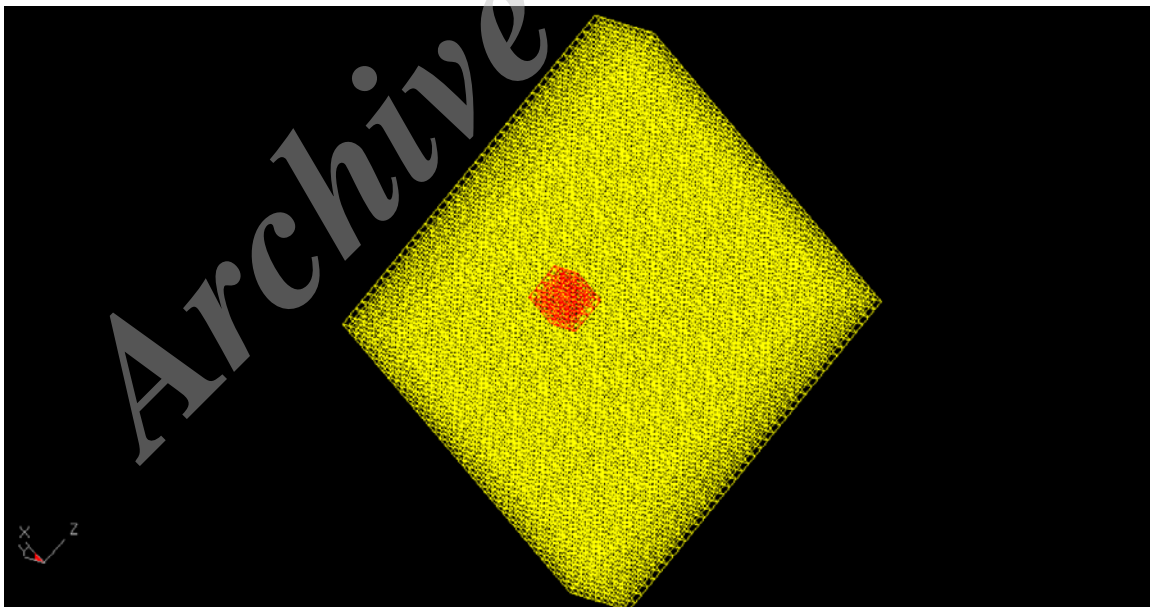
بعد از انجام مراحل فوق نوبت به نسبت دادن (Assign) ماده‌ای تعریف شده فوق داریم، برای این کار مراحل زیر باید انجام پذیرد:

از Toolbar بالای صفحه گزینه Material را انتخاب می‌کنیم. از منوی Material گزینه Assign را انتخاب کرده تا کادری مانند شکل پایین باز شود:



شکل ۵-۱۳: منوی Assign Selection

از منوی Assign Selection به وسیله موس مواد را به ترتیب انتخاب کرده و از پنجره باز شده به وسیله موس یکی یکی پارت-های مورد نظر را انتخاب کرده و Apply می‌کنیم. پس از انجام مراحل بالا رنگ المان‌های کامپوزیت و ضربه زننده از خاکستری روشن عوض شده و رنگ ماده را می‌گیرد.



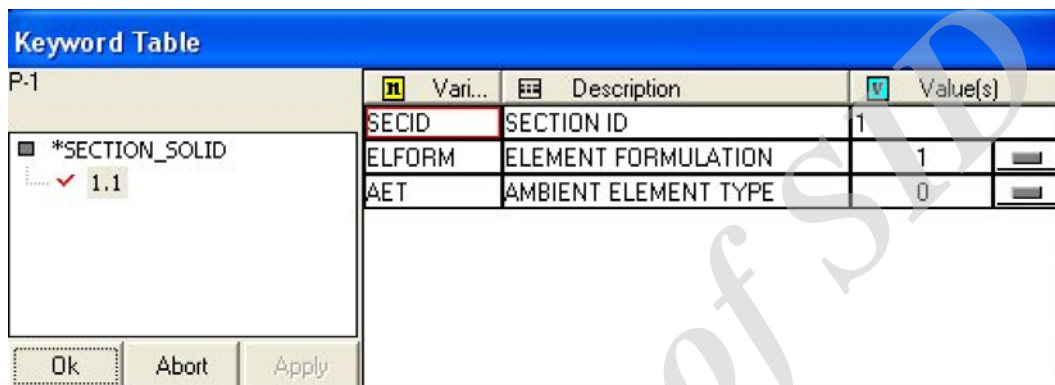
شکل ۵-۱۴: تغییر رنگ المان ورق کامپوزیت

#### ۵-۴- خواص (Properties):

در این مرحله باید ویژگی‌های المان‌های کامپوزیت و ضربه زننده را تعریف کنیم. در اینجا لازم است توضیح داده شود که المان‌هایی که برای کامپوزیت و ضربه زننده تعریف می‌کنیم از نوع Solid بوده و برای این کار به ترتیب مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

از Toolbar بالای صفحه گزینه Property را انتخاب می‌کنیم. پس از این کار تمامی المان‌ها به رنگ خاکستری روشن در می‌آید که نشانه این است که برای المان‌ها خواص تعریف نشده است.

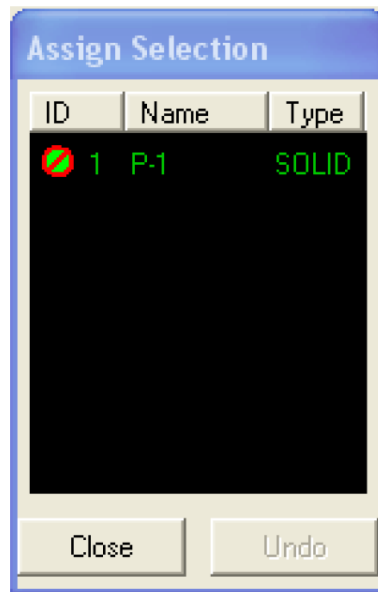
از منوی Property گزینه Create را کلیک کرده و Solids را انتخاب می‌کنیم پس از اجرای دستورات بالا، پنجره‌ای به صورت زیر ظاهر می‌شود:



شکل ۵-۱۵: منوی ساخت Solid

سپس مراحل زیر انجام می‌پذیرد:

- با کلیک کردن بر روی گزینه Element Formulation گزینه Constant Stress Solds Element را انتخاب می‌کنیم.
  - با کلیک کردن بر روی گزینه Ambient Element Type گزینه Pressure and Temperature را انتخاب می‌کنیم. سپس Apply و سپس Ok را کلیک می‌کنیم.
- با انجام مراحل بالا، خواص برای المان‌های تعریف شده است و باید این ویژگی به المان‌ها نسبت داده شود. سپس از منوی Element Property گزینه Assign انتخاب شده و سپس پنجره Assign Selection به صورت زیر باز می‌شود:



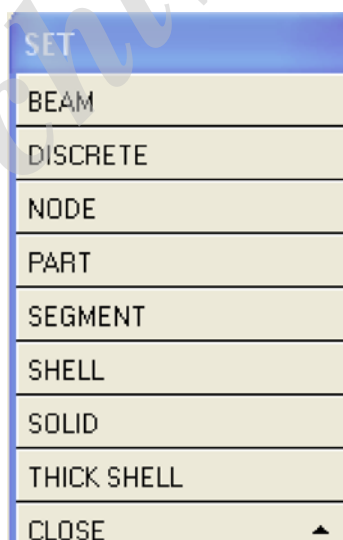
شکل ۵-۱۶: منوی Assign Selection

از منوی فعال Assign Selection تنها گزینه موجود یعنی P-1 را انتخاب می‌کنیم. از پنجره جدید باز شده هر دو پارت را به وسیله موس انتخاب کرده و سپس Apply می‌کنیم. با انجام مراحل بالا هر دو پارت به یک رنگ درمی‌آید و این بدان معناست که برای پارت‌های فوق خواص تعریف شده است.

### تنظیم کردن (Set):

در این آنالیز ما نیاز به چهار Set داریم، دو تا Set Part برای Contact و دو تا Set Node برای شرایط مرزی. برای تعریف کردن Set مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

از Toolbar بالای صفحه گزینه Set را انتخاب می‌کنیم تا کادری مانند شکل زیر باز شود:

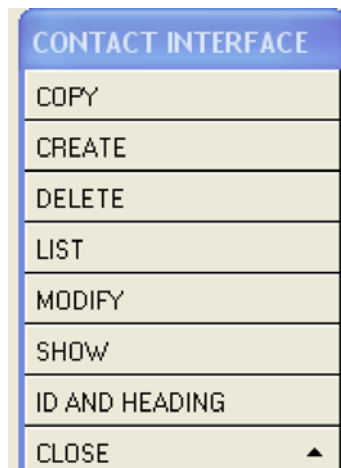


شکل ۵-۱۷: منوی Set

سپس برای هر دوماده کامپوزیت و ضربه زننده هم Part و هم Node تعریف می‌شود.

## ۵-۴- مدل کردن برخورد (Contact Modeling):

در این مرحله از طراحی به تعریف نوع تماس Contact میان المان‌های ضربه زننده با المان‌های کامپوزیت می‌پردازیم. از Toolbar بالای صفحه گزینه Contact را انتخاب می‌کنیم. در این مرحله منوی Contact Interface به صورت زیر ظاهر می‌شود.



شکل ۵-۱۸: منوی Contact Interface

از این منوی گزینه Create را کلیک کرده و در ادامه با انتخاب 3Dimension منوی به شکل زیر ظاهر می‌شود:



شکل ۵-۱۹: منوی 3Dimension

از منوی فوق گزینه Surface to Surface Contact Automatic را انتخاب می‌کنیم در ادامه پنجره‌ای به صورت زیر باز می‌شود که باید نام و شماره برخورد را وارد کرد.



شکل ۵-۲۰: تعریف برخورد



پس از مراحل بالا باید Slave و Master را برای برخورد معرفی کنیم که بعد از انجام این دو کار Apply و سپس Ok می-کنیم.

Contact1	Vari...	Description	Value(s)
	SSID	SLAVE ID	1
	MSID	MASTER ID	2
	SSTYP	SLAVE TYPE	2
	MSTYP	MASTER TYPE	2
	SBOXID	BOXID FOR SLAVE DEFINITION	
	MBOXID	BOXID FOR MASTER DEFINITI...	
	SPR	PRINT SLAVE IN BINARY FORC...	0
	MPR	PRINT MASTER IN BINARY FO...	0

شکل ۵-۲۱: مشخصات ضربه

چند نکته در مورد Slave و Master:

- Master: قطعه‌ای است که وضعیتش مشخص تر است.
- Slave: قطعه‌ای است که وضعیتش نسبت به Master نامعلوم تر است.
- اگر در یک آنالیز یک جسم صلب و دیگری نرم بود قطعه صلب master است.
- اگر هر دو Slave و Master نرم بودن باید مش بندی Slave ریزتر باشد.

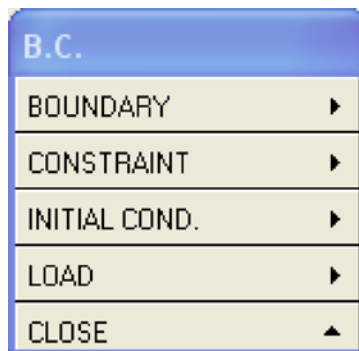
#### ۵-۵- شرایط مرزی (Boundary Condition):

در این مرحله دو نوع شرط باید اعمال کنیم:

- ۱- مقید کردن گره‌های زیر کامپوزیت در تمام راستاها
- ۲- مشخص کردن نمودار حرکت ضربه زننده

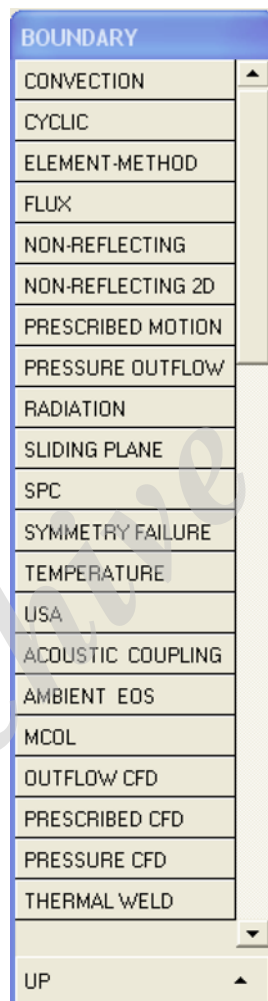
#### ۵-۶- مقید کردن گره‌های زیر کامپوزیت در تمام راستاها:

برای مقید کردن گره‌های زیر کامپوزیت در تمام راستاها، به ترتیب مراحل زیر را انجام می‌دهیم. از Toolbar بالایی صفحه گزینه B.C را کلیک می‌کنیم که به صورت زیر باز می‌شود.



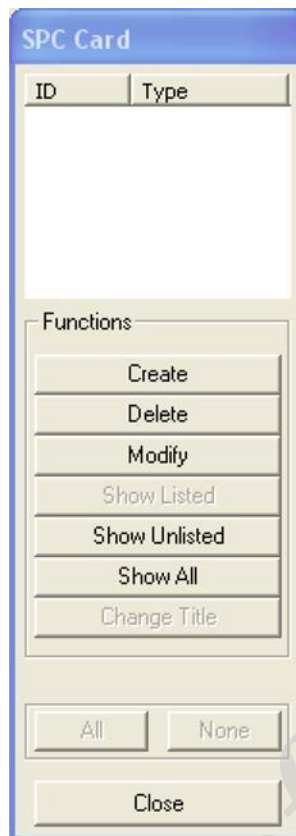
شکل ۵-۲۲: تعیین قیود

از منوی B.C گزینه Boundary را کلیک می‌کنیم که به صورت زیر باز می‌شود:



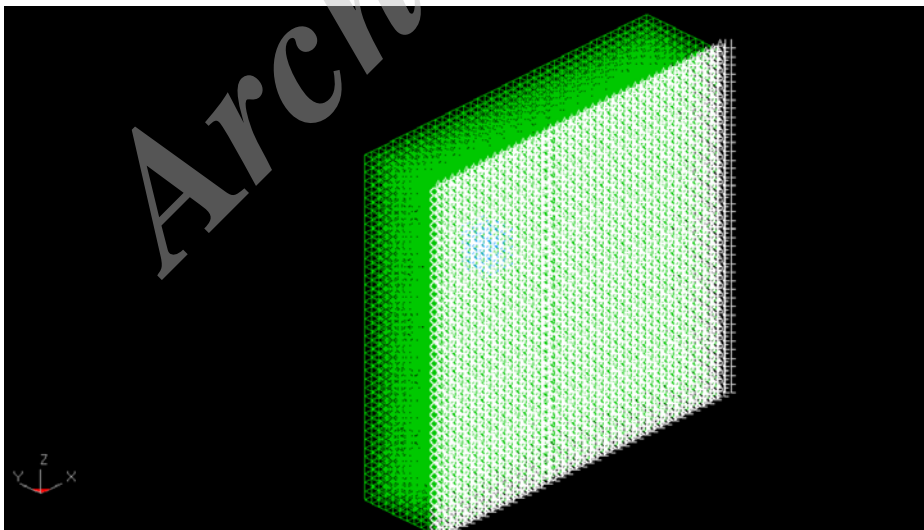
شکل ۵-۲۳: منوی Boundary Condition

از منوی Boundary Condition گزینه SPC را کلیک کرده که به صورت زیر باز می‌شود:



شکل ۵-۲۴: منوی گزینه SPC

از SPC Card گزینه Create را کلیک کرده و سپس گره‌های زیر کامپوزیت را در تمام جهات می‌بندیم و در ادامه سپس Ok می‌کنیم. پس از انجام مراحل بالا مرحله مقید کردن گره‌های زیر کامپوزیت به پایان می‌رسد و در واقع گره‌های زیر کامپوزیت را در تمام راستاها مقید می‌شود.



شکل ۵-۲۵: مقید شدن کامپوزیت در تمامی جهات

**۵-۷- تعریف جاذبه:**

برای آنکه حرکت ضربه زننده واقعی شبیه سازی شود ما در اینجا نیروی گرانشی زمین نیز تعریف می کنیم.

برای اینکار مراحل زیر را انجام می دهیم:

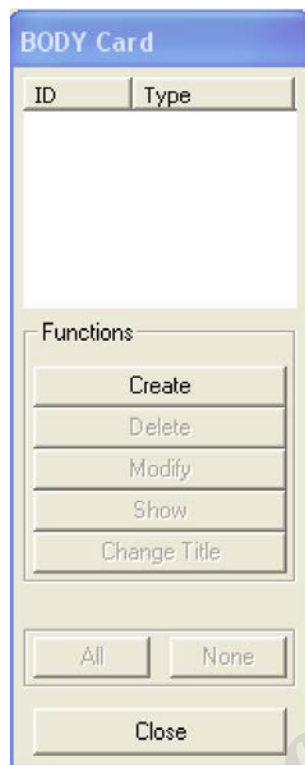
۱- ابتدا یک منحنی تعریف می کنیم که نشان دهد مقدار جاذبه در زمان صفر برابر با  $9/81$  و در زمان های دیگر نیز همین مقدار است. مانند منحنی قبلی اینکار را انجام می دهیم.

۲- سپس وارد منوی B.C می شویم و در آنجا بر روی Load کلیک کنید تا کادری مانند شکل زیر باز شود:

LOAD
BEAM
BODY
BRODE(EXPLOSION)
DENSITY
HEAT GENERATION
MASK
NODE
RIGID BODY
SEGMENT PRESSURE
SHELL PRESSURE
SUPERPLASTIC FORM
SUB-SEA
THERMAL
UP ▲

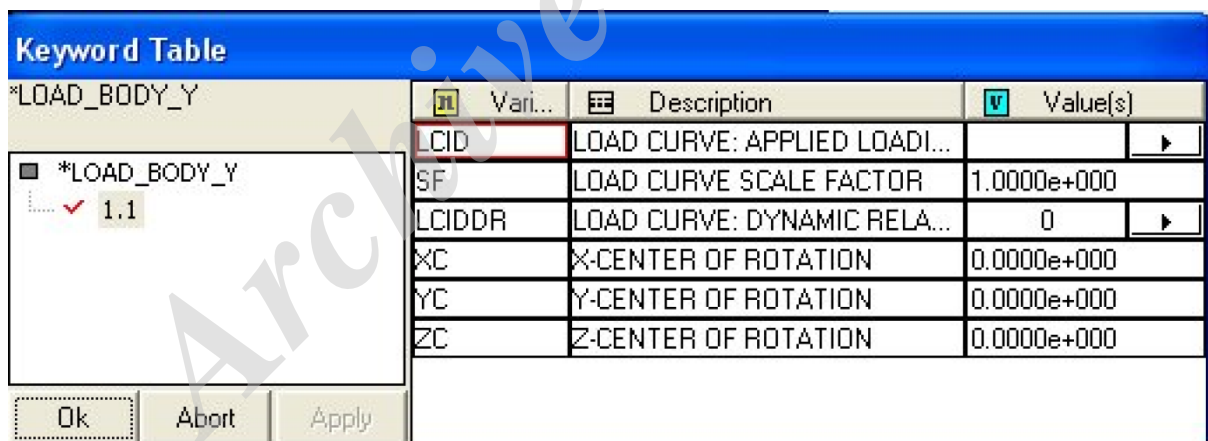
شکل ۵-۲۶: تعریف بار

در آنجا بر روی Body کلیک کنید تا کادری مانند شکل زیر باز شود:



شکل ۵-۲۷: Body

در Body Card بر روی گزینه Create کلیک کنید و بر روی Y Acceleration کلیک کنید تا کادری مانند شکل زیر باز شود:

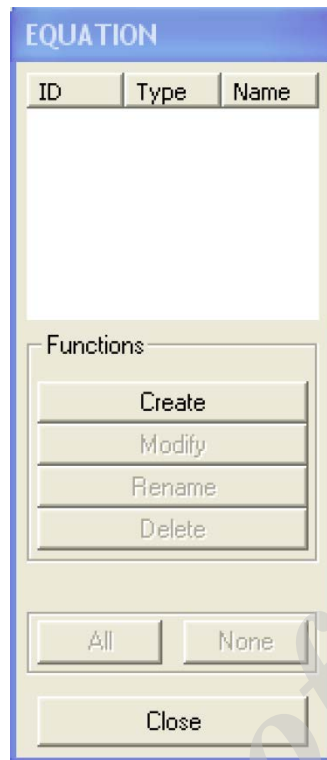


شکل ۵-۲۸: Keyword Table

در این کادر منحنی تعریف شده برای گرانش و همچنین مقدار جاذبه را وارد کرده و کلید OK را فشار دهید. معرفی معادله حالت کامپوزیت:

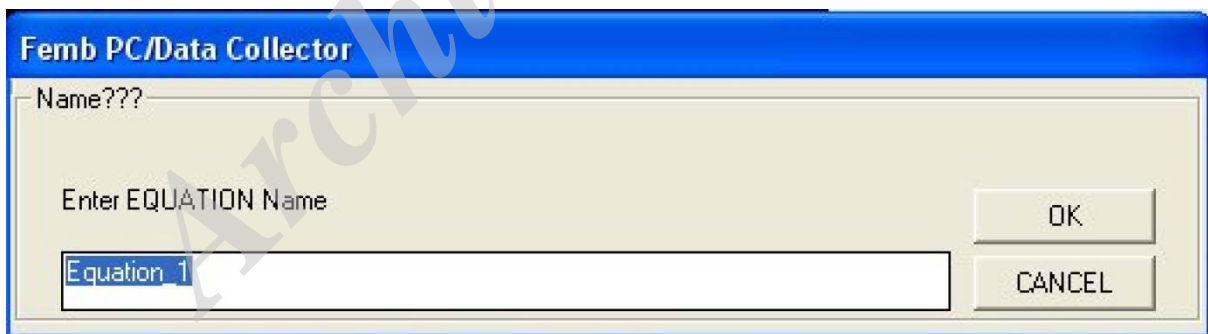
برای معرفی کردن معادله کامپوزیت به ترتیب مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

از Toolbar بالای صفحه بر روی گزینه Dynamics کلیک کنید، در آنجا بر روی گزینه Equation کلیک کنید تا کادری مانند شکل زیر باز شود:



شکل ۵-۲۹: Equation

در این کادر بر روی Crate کلیک کرده و سپس بر روی Tabulated Compaction کلیک کنید تا کادر جدیدی مانند شکل زیر باز شود:



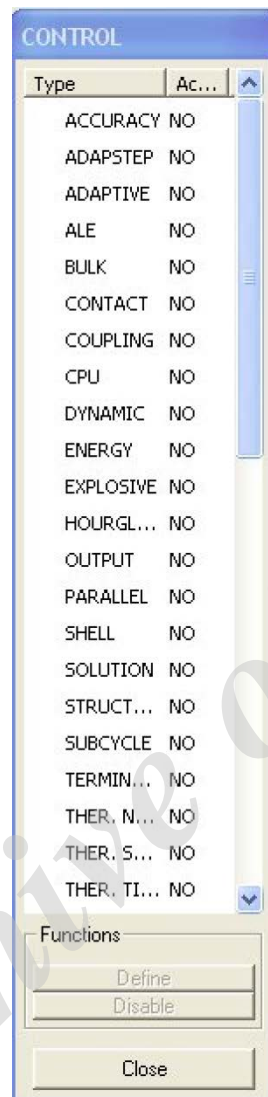
شکل ۵-۳۰: منوی Femb

اسم پیش فرض را قبول کرده تا کادر بعدی باز شود سپس در آنجا اعداد معادله حالت کامپوزیت را می‌دهیم و با Ok کردن از این محیط خارج می‌شویم.

## ۵-۸- تعریف Dynamics:

در این مرحله، به تعریف زمان انجام آزمایش، تعداد مراحل می‌پردازیم.

از منوی Dynamics گزینه Control را کلیک کنید تا کادری به صورت زیر باز شود:



شکل ۵-۳۱: تعریف کنترل

در این کادر بر روی Termination کلیک کنید تا کادر آن باز شود و در آنجا مقدار ۳/۸ را وارد کنید:

Keyword Table			
*CONTROL_TERMINATION	Vari...	Description	Value(s)
<input checked="" type="checkbox"/> *CONTROL_TERMINATION <input checked="" type="checkbox"/> 1.1	ENDTIM	TERMINATION TIME	3.8
	ENDCYC	TERMINATION CYCLE	0
	DTMIN	INITIAL TIME STEP S.F.	0.0000e+000
	ENDENG	PERCENT ENERGY CHANGE	0.0000e+000
	ENDMAS	PERCENT MASS CHANGE	0.0000e+000

Ok Abort Apply

شکل ۵-۳۲: تعریف زمان اعمال ضربه به مدت ۳/۸

از منوی Dynamics گزینه Data Base را کلیک کنید تا منوی Data Base Option به صورت زیر باز شود:

DATABASE OPTION
ADAMS
ASCII
BINARY
CROSS SECTION
EXTENT
FORMAT
FSI
HISTORY
NODAL FORCE GR
SPRING FORWARD
SUPER PLASTIC FORMING
TRACER
UP

شکل ۵-۳۳: منوی Data Base Option

از این منو گزینه Binary را کلیک کنید و در این کادر گزینه Dplot را انتخاب کرده و Define را کلیک کرده و مقدار ۰/۰۱ را بزنید. در این مرحله کار طراحی در محیط FEMB به پایان می‌رسد.

### ۵-۹- اعمال ضربه:

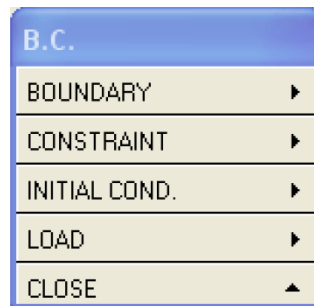
در این روش مانند روش قبل کامپوزیت و ضربه زننده را طراحی، مش‌زنی، جنس دادن، خواص دادن، برخورد و... را انجام می‌دهیم.



در این بخش این است که ما می‌خواهیم طراحی را بر اساس ۳ ضربه متوالی انجام دهیم پس در طراحی به جای ۱ ضربه زنده ۳ تا ضربه زنده طراحی می‌کنیم. چون دیگر در این روش برای زنده مسیر حرکت تعریف نمی‌کنیم پس نیاز به سرعت اولیه برای آنها داریم.

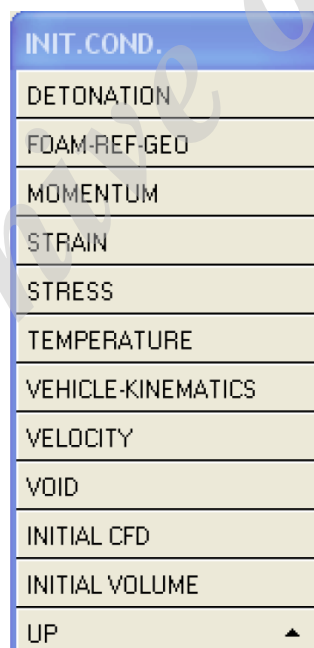
دادن سرعت اولیه به ضربه زنده:

از Toolbar بالای صفحه گزینه B.C را کلیک می‌کنیم تا کادری مانند شکل زیر باز شود:



شکل ۵-۳۴: تعریف شرایط مرزی

سپس با کلیک کردن بر گزینه Initial Condition مانند شکل زیر باز می‌شود:



شکل ۵-۳۵: تعریف شرایط اولیه

سپس در این کادر جدید بر روی گزینه Velocity کلیک می‌کنیم تا کادر جدید دیگری باز شود. در این کادر بر روی Create کلیک کرده و در جواب Node Set را انتخاب کنید بعد از این کار در کادر جدید سرعت و جهت ضربه زنده‌ها را انتخاب کنید.

قبل از آنالیز این پروژه ما نیاز به یک فایل KEYWORD دیگری داریم که در آن شرط جدید مساله مانند پاک کردن ضربه زنده اول در برخورد اول و سپس پاک کردن ضربه زنده دوم در برخورد دوم را داریم.

برای اینکار مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

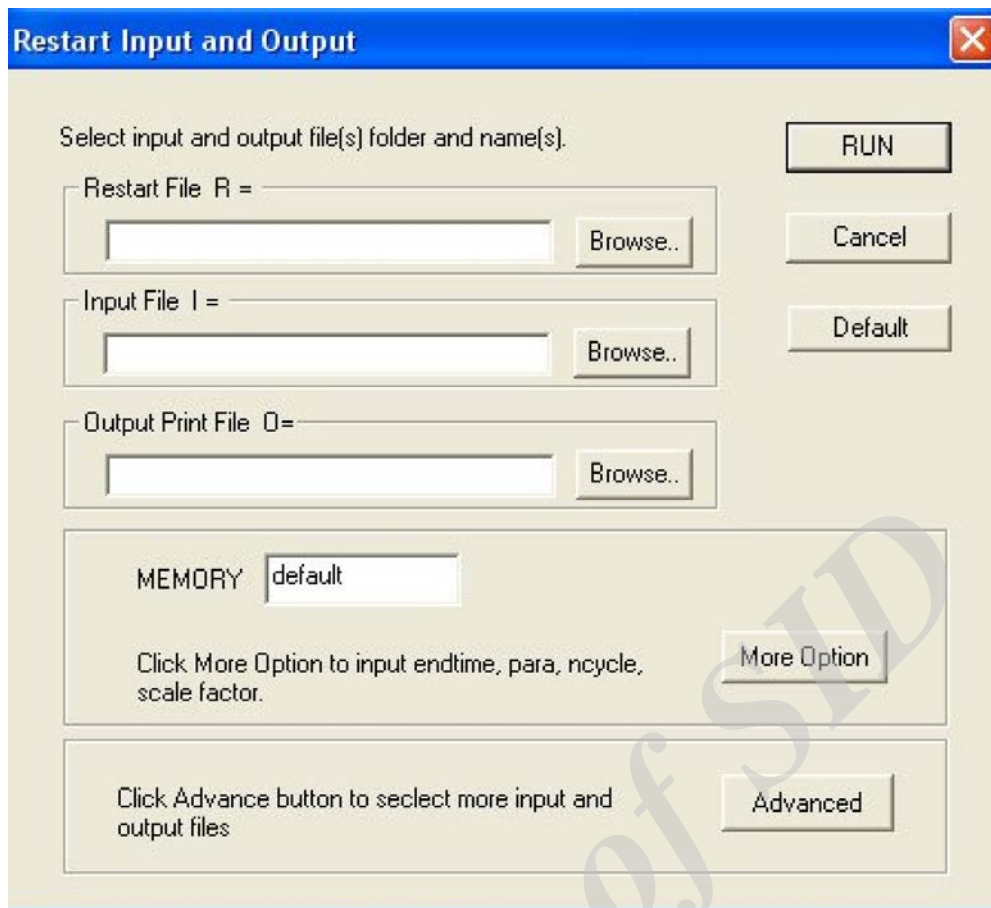
ابتدا یک فایل Note Pad باز می‌کنیم و دستور زیر را در آن می‌نویسیم:

```
*KEYWORD
*CONTROL_TERMINATION
$   ENDTIM   ENDCYC      DTMIN   ENDENG   ENDMAS
      4.20      0        0.0     0.0     0.0
*delete_part
$   p1      p2
      3
*END
```

در قسمت ENDTIM ما زمان پایین تحلیل دوم، سوم و . . . را مشخص می‌کنیم و در قسمت Deleted Part نام پارتی که می‌خواهیم پاک شود را وارد می‌کنیم. در طراحی محاسبه می‌کنیم در چه زمانی ضربه زنده اول با کامپوزیت برخورد می‌کند و بر این اساس زمان حل را وارد می‌کنیم سپس مانند قسمت قبل آنالیز را انجام می‌دهیم، وقتی آنالیز انجام شود LS-DYNA یک فایل به نام D3PLOT01 برای ما می‌سازد، با داشتن این فایل و فایل ایجاد کرده جدید ما آنالیز دوم را انجام می‌دهیم. برای این کار در محیط نرم‌افزار بر روی آیکن

Restart LS-DYNA analysis

کلیک می‌کنیم تا کادری مانند شکل زیر باز شود:



شکل ۵-۳۷: منوی Restart LS-DYNA analysis

در قسمت Restart File R نام فایل ایجاد شده در آنالیز قبلی را وارد می‌کنیم و در قسمت Input File I فایل Note Pad جدید ایجاد شده را وارد می‌کنیم و به نرم‌افزار اجازه می‌دهیم آنالیز را انجام دهد. برای ضربه دوم نیز مانند قسمت قبل انجام می‌دهیم.

### ذخیره کردن با پسوند \*.dyn\*

از Toolbar بالای صفحه گزینه File را انتخاب می‌کنیم.

گزینه Export را کلیک کنید.

پنجره Export File باز می‌شود که از منوی کرکره‌ای بالا پنجره آدرس فولدری که می‌خواهیم فایل را در آن ذخیره کنید انتخاب می‌کنیم سپس نامی برای فایل مورد نظر انتخاب می‌کنیم و دکمه Save را می‌زنیم.

### ۵-۱۰- حل مسائل در LS-Dyna

بعد از باز کردن نرم افزار LS-Dyna از Toolbar بالای آن، گزینه Solvers را انتخاب کرده و از منوی باز شده گزینه

## Start Is-dyna analysis

را انتخاب کرده و سپس فایل ایجاد کرده را معرفی می‌کنیم و در آخر Ok می‌کنیم.

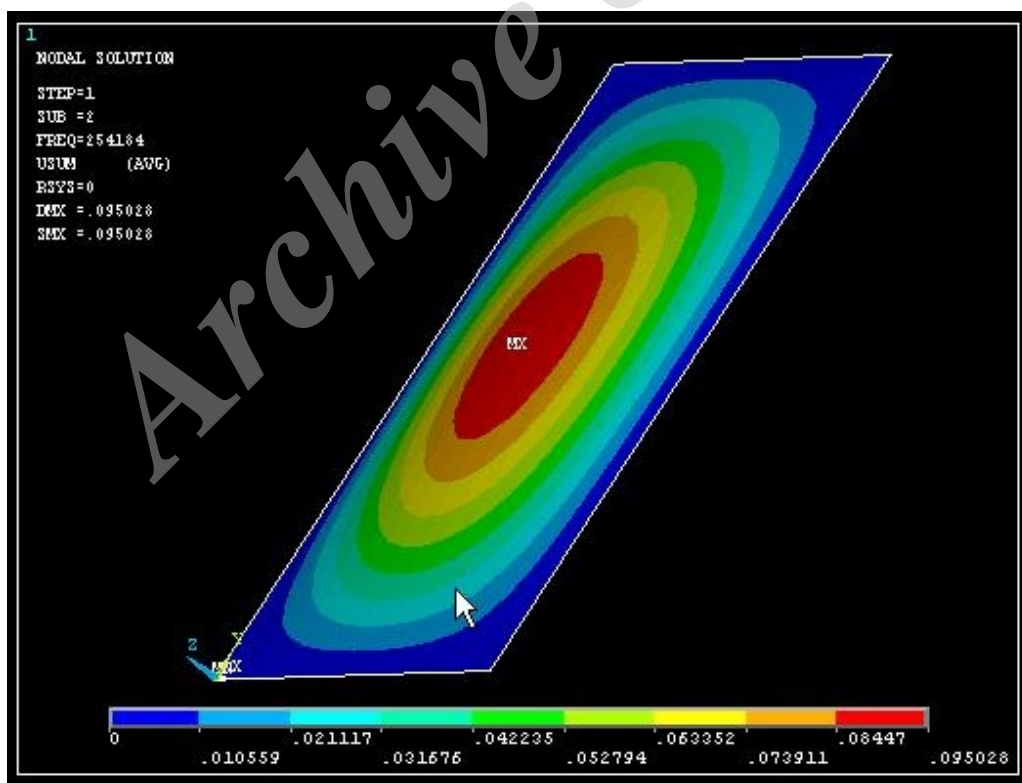
## بررسی نتایج:

پس از حل مساله نوبت به دیدن نتایج می‌رسد.

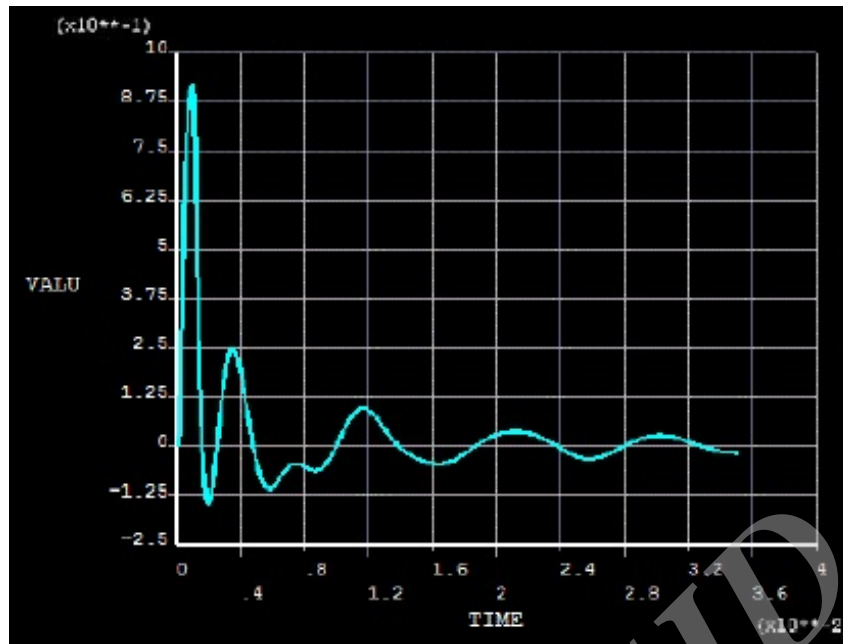
از Toolbar بالای نرم افزار گزینه Post-Processing را انتخاب می‌کنیم با اینکار کادر جدیدی باز می‌شود که در آن نتایج آنالیز مساله وجود دارد.

## ۵-۱۱- بدست آوردن جابجایی در راستای عمود

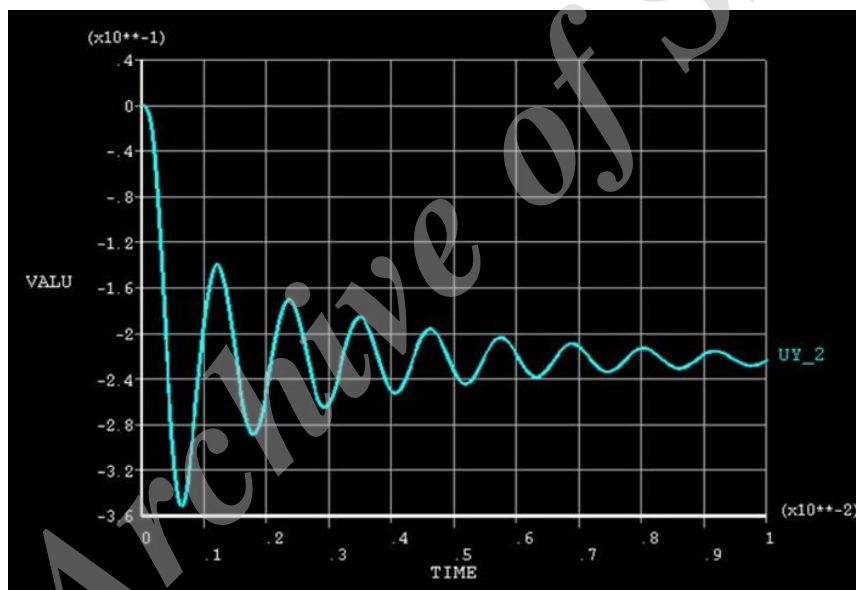
پس از بدست آوردن مدل در محیط نرم افزار LSDYNA لازم است تا کانتور جابجایی در راستای عمود بر قطعه بدست آید. داده‌های مربوطه به این کانتور جابجایی از طریق مستقیم و یا با استفاده از نرم افزار اکسل به نرم افزار MATLAB منتقل شده و در محیط نرم افزار MATLAB با استفاده از تبدیل فوریه صریح (Fast Fourier Transform) نمودار جابجایی بر حسب زمان به حالت نمودار دامنه بر حسب فرکانس تبدیل شده و فرکانس بیشینه شناسایی می‌گردد. این تحلیل‌ها در فصل ۶ به طور کامل شرح داده شده‌اند.



شکل ۵-۳۸: نمای شماتیک جابجایی سطح ورق در اثر برخورد



شکل ۵-۳۹: نمودار جابجایی بر حسب زمان یک نقطه از سطح ورق در راستای عمود بر ورق



شکل ۵-۳۹: نمودار جابجایی بر حسب زمان یک نقطه از سطح ورق در راستای عمود بر ورق

## ۱۲-۵ محاسبه سری فوریه به صورت عددی

در این قسمت محاسبه سری فوریه به صورت عددی توضیح داده می‌شود. سری فوریه به شکل‌های گوناگون قابل تعریف است، برای راحتی کار فرم ساده زیر را در بازه‌ی  $0 \leq t \leq 1$  در نظر گرفته می‌شود. فرض کنید برای محاسبه‌ی سری فوریه تنها باید ضرایب آن را حساب کرد، برای محاسبه هر کدام از ضرایب باید هر کدام از انتگرال‌های سری را حساب کنیم. برای نمونه مقدار  $a_n$  در نرم افزار مطلب به شرح زیر محاسبه می‌شود:

```
function y = anfunc(t)
```

```
y = 2*sin(2*pi*t).*sin(2*n*pi*t);
```

همانطور می دانیم هر کدام از این ضرایب یک دنباله از اعداد هستند و با توجه به مقدار  $n$  مقدار آنها تغییر می کند. برای محاسبه تغییرات  $\text{anfunc}$  با  $n$ ، ۲ راه وجود دارد (مبحث مربوط به **Parameterizing Functions Called by Function** را در راهنمای متلب مطالعه کنید). در اینجا از تابع تودرتو (**nested function**) استفاده می شود.

```
function myfunc
```

```
for n = 1:10
```

```
an(n) = quad(@anfunc,0,1);
```

```
end
```

```
an
```

```
function y = anfunc(t)
```

```
y = 2*sin(2*pi*t).*sin(2*n*pi*t);
```

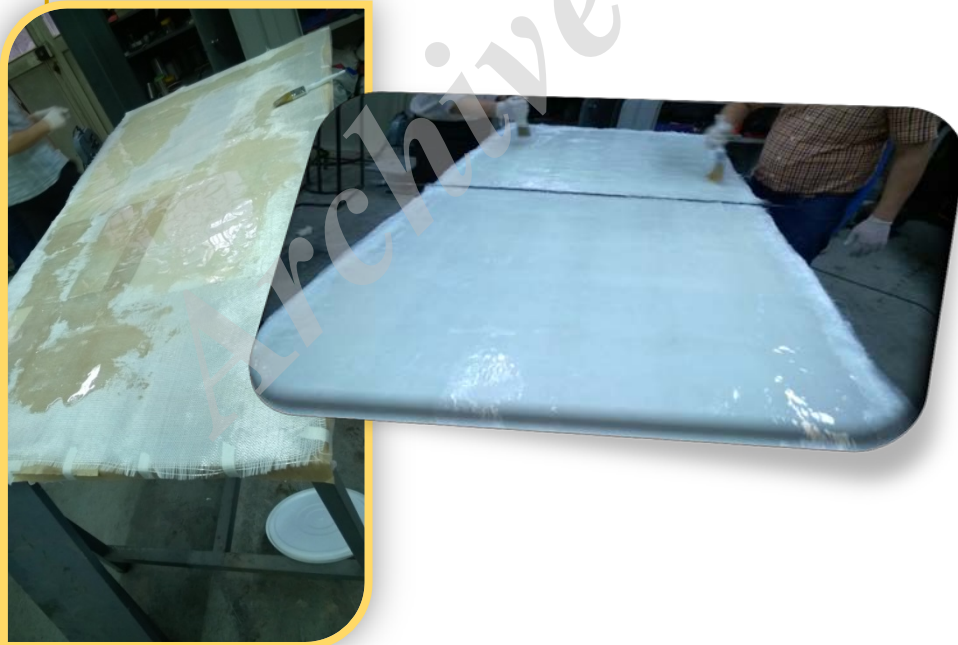
```
end
```

```
end
```

در ادامه کافی است که ابتدا دیگر ضرایب را حساب کرده و سپس مقدار سری را از جمع کردن آنها را محاسبه کنیم.

## فصل ۶

### ساخت ورق‌های کامپوزیت در آزمایشگاه



## ۱-۶- ساخت نمونه‌های تجربی در آزمایشگاه

برای بررسی اثر روش موج ضربه نیاز به ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی نیاز به ساخت نمونه‌های از ورق کامپوزیت در محیط آزمایشگاهی می‌باشد. برای این منظور چهار عدد ورق در ضخامت‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر که در آنها عیبی پیش فرض نیز قرار دارد ساخته شده‌اند. برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی فایبرگلاس از الیاف بافته شده E-Glass، اپوکسی ۸۲۸ به همراه حلال و سخت کننده (10% Teta) استفاده شده و برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شده است. در این روش ابتدا لایه‌های فیبر شیشه قرار می‌گیرد و بر روی آن رزین اپوکسی مالیده می‌شود. (شکل (۱-۶)). در ادامه برای ایجاد عیب روشی انتخاب شده است که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. در این روش پس از قرار دادن لایه‌های زیرین شکافی در نظر گرفته می‌شود و لایه‌های بعدی ورق با استفاده از یک برش در دو سمت آن قرار می‌گیرد. پس از قرار گرفتن چند لایه فیبر ورق و مالیدن اپوکسی بر روی آنها یک شکاف در وسط هر ورق ایجاد می‌گردد. با این شیوه ما توانستیم یک شکاف در وسط ورق ایجاد کنیم که در فاصله مشخصی از دو سر ورق قرار دارد. لایه‌های بعدی فیبر بر روی این شکاف قرار می‌گیرند به نحوی که این شکاف در زیر لایه‌های بالایی پنهان شده و دیگر قابل رویت نمی‌باشد که این موضوع در شکل (۳-۶) به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. دلیل ایجاد عیبی به این شکل به این دلیل است که در فرآیند ساخت ورق‌های کامپوزیت و قرار گیری آنها در پرس حرارتی، عیوبی که به سایر روش‌های ایجاد شوند (مانند عیوب سکه‌ای) از بین می‌روند و یا رزین فضای داخل آنها را پر می‌کند ولی در این شیوه این شکاف حتی پس از قرار گرفتن ورق درون پرس حرارتی شکل خود را حفظ کرده و از بین نمی‌رود. داده‌های آزمایشگاهی انجام آزمون در جدول (۱-۶) شرح داده شده است.

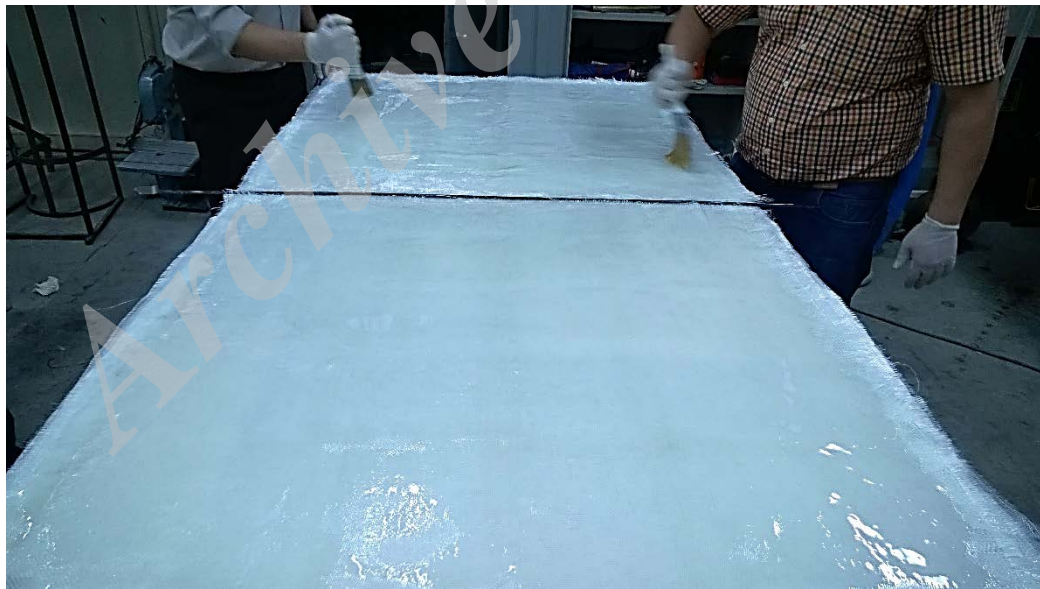
جدول ۱-۶: داده‌های مرتبط با نمونه‌های کامپوزیتی

مقدار	اجزا کامپوزیت
۳۰ کیلوگرم	E Glass woven fabric fibers نوع فیبر به کار رفته
۳۰ کیلوگرم	Epoxy 828 with solvent, 30 Kg رزین به کار رفته در ساخت
۳ کیلوگرم	TETA (10%) سخت کننده (Hardner)
۱۹۲۵ میلیمتر	طول قطعات
۹۷۰ میلیمتر	عرض قطعات
۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ میلیمتر	ضخامت
۱۲/۵۶ میلیمتر	قطر گوی استیل وارد کننده ضربه
۳۰۰ گرم	وزن گوی استیل وارد کننده ضربه
۳۲۷۴ متر بر ثانیه	سرعت موج

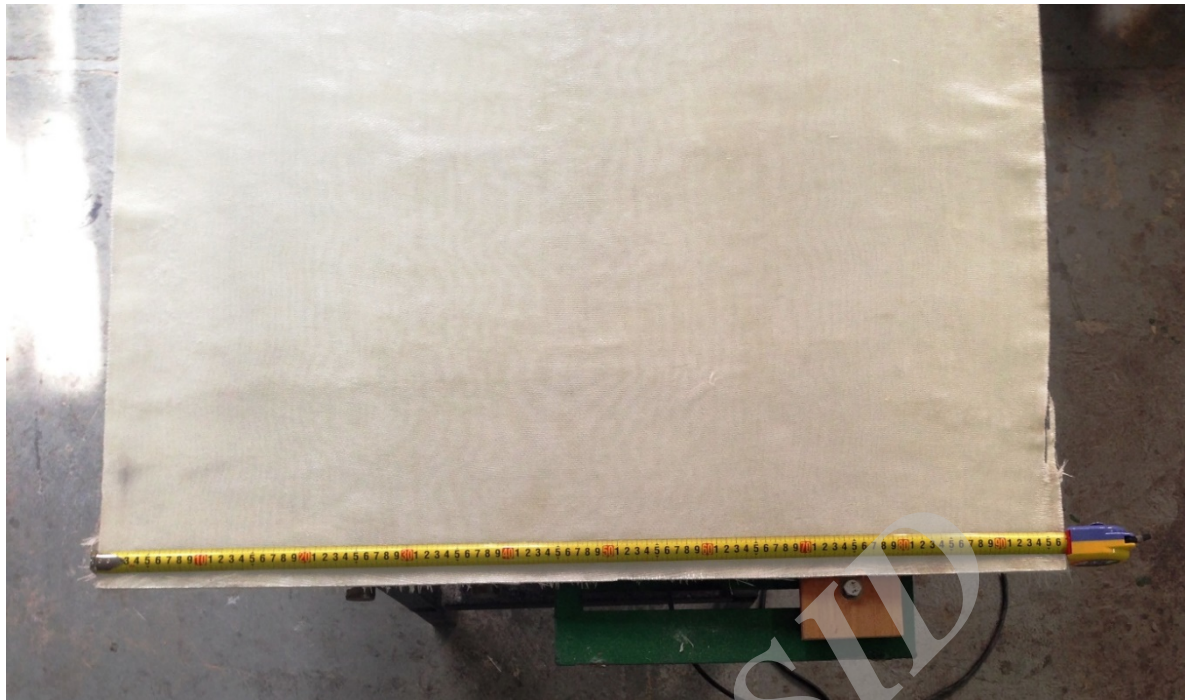




شکل ۶-۱: قرار دادن لایه ابتدایی در ساخت ورق‌های کامپوزیتی در آزمایشگاه



شکل ۶-۲: ساخت ورق‌های کامپوزیتی در آزمایشگاه



شکل ۶-۳: ورق کامپوزیت ساخته شده

هر ورق دارای طول ۱۹۲۵ میلیمتر و عرض ۹۷۰ میلیمتر می‌باشد که ضخامت‌های آنها در جدول شماره (۲-۶) ارائه شده‌اند. برای شبیه‌سازی حرکت موج درون ورق کامپوزیت از نرم افزار ANSYS/LSDYNA استفاده شده است. تمامی ورق‌های کامپوزیت و پرتابه‌ها به صورت تقارن-محوری و ایزوتروپیک سه بعدی مدل شده‌اند. همانطور که در بخش قبل نشان داده شد 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 (۲-۶) ارائه شده است:

جدول ۶-۲: تنظیمات آزمایشات تجربی

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

ورق‌های کامپوزیت مورد بررسی ایزوتروپیک فرض شده‌اند و همانطور که توسط مت و رونالد [۴۳] نشان داده شده است نسبت پوآسون برای این مواد بین ۰/۲ تا ۰/۵ می‌باشد که در این پژوهش عدد ۰/۲۵ به عنوان نسبت پوآسون ورق‌ها در نظر گرفته می‌شود. چگالی ورق‌های ساخته شده برابر با ۴۱۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول یانگ برای آنها با توجه به مقادیر متداول برای کامپوزیت‌ها برابر با مقدار ۳۵ Gpa در نظر گرفته شده است [۴۴]. بنابراین با توجه به مقادیر و فرضیات بالا خواص مکانیکی گوی فلزی و ورق کامپوزیتی مانند آنچه در جدول (۲-۶) نمایش داده شده است می‌باشد. به منظور محاسبه سرعت موج تنشی یا موج P باید از رابطه (۳-۶) که در مرجع [۵] آورده شده است بهره برد.

$$C_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (3-6)$$

با استفاده از رابطه (۳-۶) و همچنین داده‌هایی که در جدول (۲-۶) نشان داده شده است، سرعت موج P برای گوی فلزی برابر با ۶۰۰۱ m/s و برای ورق کامپوزیت فایبرگلاس برابر با ۳۱۷۶ m/s می‌باشد.

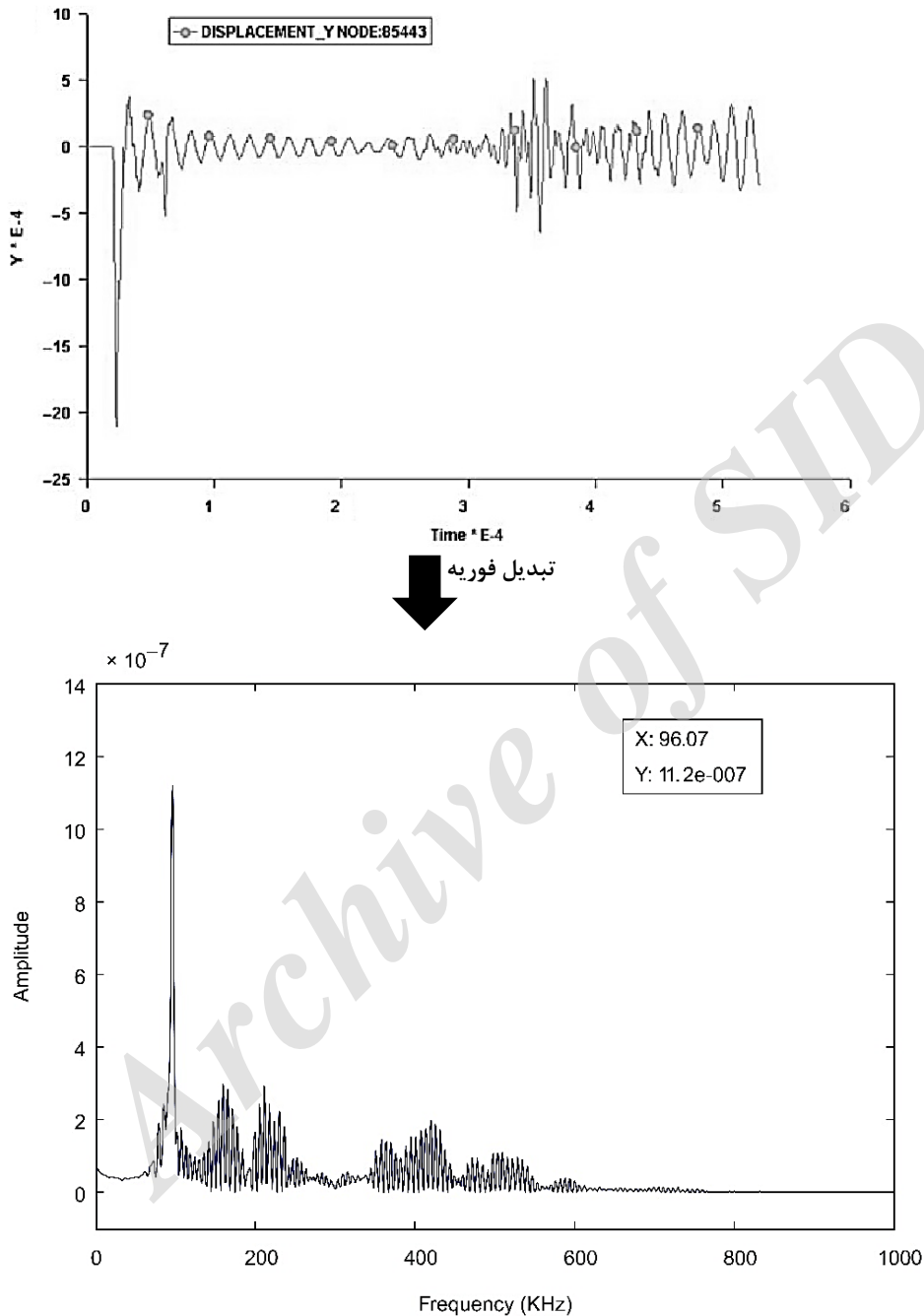
جدول ۲-۶ خواص مکانیکی گوی فلزی و ورق‌های کامپوزیت فایبرگلاس

چگالی ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت پوآسون ( $\nu$ )	مدول یانگ (E) GP	اجزا
۷۸۵۰	۰/۳	۲۱۰	پرتابه گوی فلزی
۴۱۶۵	۰/۲۵	۳۵	ورق کامپوزیت فایبرگلاس

محدوده فرکانسی سنسور پیزوالکتریک مورد استفاده ۱۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز بوده و بازه زمانی جابجایی (Time Period) برای سنسور برابر با ۱/۳۳۴  $\mu$ s می‌باشد [۱۸]. همانطور که در مرجع [۴۳] اشاره شده است محدوده معمول برای نسبت پوآسون مواد ایزوتروپیک که در معرض بارگذاری تصادفی قرار می‌گیرند (مانند آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش) در محدوده  $0.2 \leq \nu < 0.5$  قرار می‌گیرد. 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 (۲-۶) و (۳-۶) با یکدیگر مقایسه شده است. نسبتی که در آن سرعت صوت  $C_p$  محاسبه شده (رابطه ۳-۶) با نسبت پوآسون بدست آمده از طریق آزمایش با یکدیگر نزدیک بوده‌اند عدد ۰/۲۵ بوده است. بنابراین در محاسبات از همین عدد به عنوان نسبت پوآسون نمونه‌های ساخته شده استفاده شده است.

پاسخ ورق کامپوزیتی فایبرگلاس به ضربه وارد شده توسط گوی فلزی به وسیله نرم‌افزار ANSYS/LSDYNA مورد بررسی قرار گرفته است. در انجام آزمایشات تجربی ترنسدیوسور پیزوالکتریک در نزدیک محل اعمال ضربه قرار می‌گیرد و به همین دلیل در شبیه‌سازی نرم‌افزاری تنها یک گره (Node) در لایه بالایی ورق کامپوزیتی در نظر گرفته می‌شود که به فاصله (r) از آن ترنسدیوسور قرار دارد. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی نرم‌افزار ANSYS-LSDYNA به حالت منحنی جابجایی بر حسب زمان می‌باشد. به دلیل آنکه بدست آوردن اطلاعات از حرکت موج درون قطعه کامپوزیتی مشکل بوده و مشاهده آن درون جسم تقریباً غیرممکن می‌باشد از تبدیل فوریه سریع (FFT) برای تحلیل بهتر نتایج استفاده شده است. برای این منظور از تحلیل فرکانسی در

دامنه داده‌های زمانی (Frequency Analysis on the Time-Domain Data) استفاده شده است. منحنی‌های دامنه-فرکانس دارای نتایج واضحتری نسبت به منحنی‌های جابجایی زمان می‌باشند و به همین دلیل مکان دقیق عیب داخلی قطعه کامپوزیتی و یا ضخامت ورق بسیار دقیقتر قابل دستیابی است. شکل (۴-۶) مثالی از این تحلیل را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۶: تبدیل از دامنه زمان (A) به دامنه فرکانس (B) (این نتایج برای ورقی به ضخامت ۱۰ mm است).

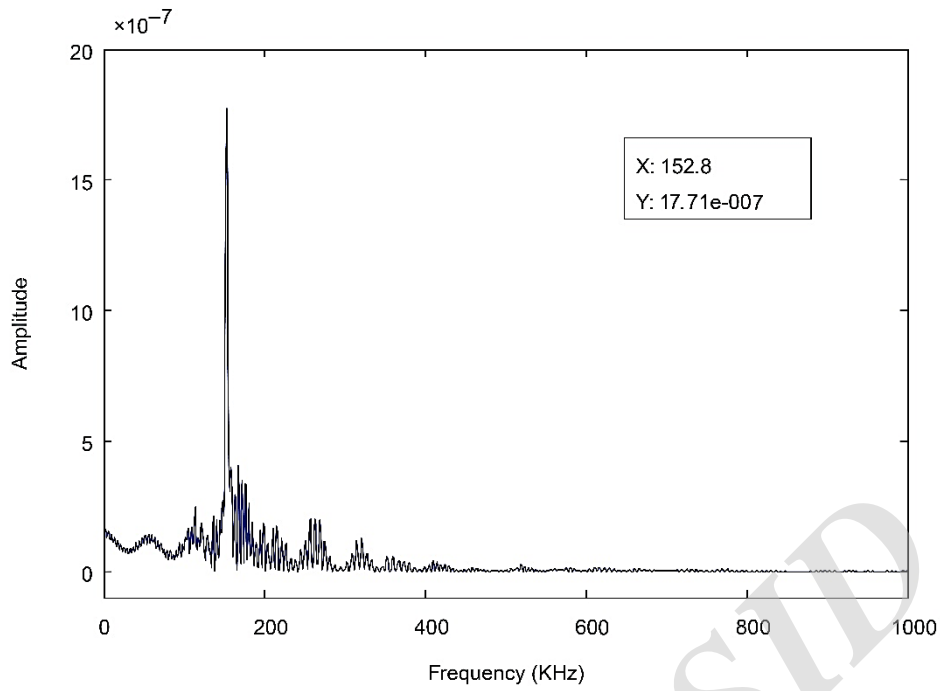
اگر ترنسدیوسر بیش از حد نزدیک به محل اعمال ضربه باشد امواج تولید شده زمان کافی برای تفکیک امواج P، S و R از یکدیگر را پیش از رسیدن به ترنسدیوسر پیزوالکتریک ندارند. از سمت دیگر این نزدیکی می‌تواند سبب جدایی ترنسدیوسر از سطح قطعه در هنگام اعمال ضربه گردد. دوری زیاد ترنسدیوسر از محل اعمال ضربه می‌تواند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

هرچند در پژوهشی مشابه به منظور بررسی روش موج ضربه در سازه‌های بتنی از نسبت  $r/T=0.30$  استفاده شده است [۱۹] اما در مقاله حاضر به دلیل آنکه نتایج تجربی همگرایی بهتری در نسبت  $r/T=0.45$  داشتند این نسبت برای فاصله میان محل اعمال ضرب 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 می‌باشد. این فاصله تضمین کننده این موضوع است که دامنه جابجایی ایجاد شده به وسیله موج  $P$  به اندازه کافی قوی می‌باشد که رسیدن آن به سطح قطعه توسط سنسور ترنسدیوسر تشخیص داده شود. در شکل (۵-۶) تا (۸-۶) جابجایی نقاط در نسبت  $r/T=0.45$  نشان داده شده است.

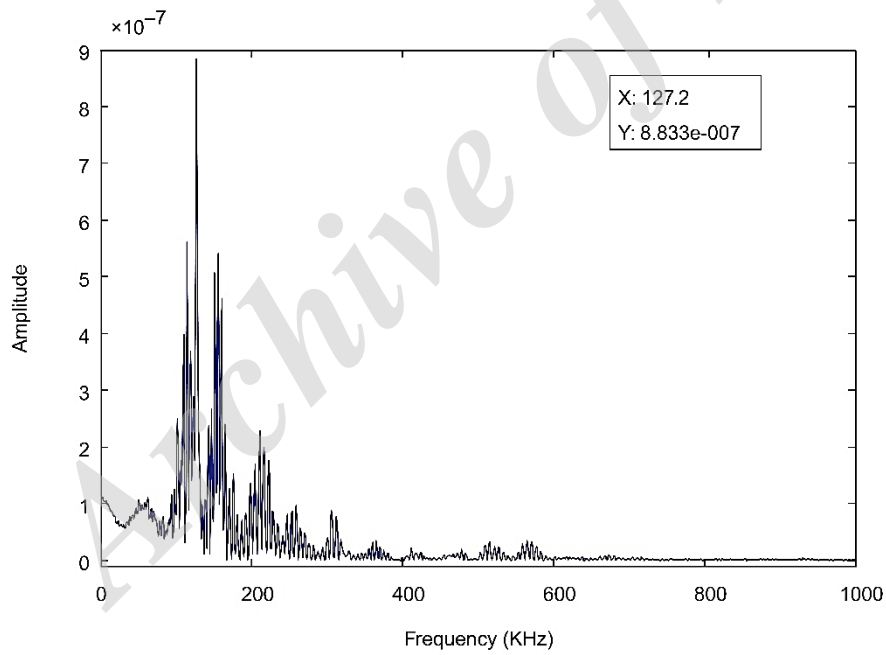
همانطور که پیش از این نیز اشاره شد هدف از تحلیل فرکانسی پدیده موج ضربه تعیین فرکانس غالب در شبیه‌سازی رفتار موج  $P$  می‌باشد. این موضوع با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) برای تبدیل شکل موج از نمودار زمان-جابجایی به فرکانس-جابجایی محقق می‌گردد. فرکانس بیشینه یا فرکانس Peak با استفاده از این تبدیل به راحتی به دست می‌آید و با استفاده از آن و قرار دادن آن در رابطه (۲-۶) می‌توان ضخامت قطعه مورد آزمایش را به دست آورد. در این پژوهش سرعت نفوذ موج درون ورق کامپوزیت فایبرگلاس با استفاده از رابطه (۳-۶) برابر با  $3176 \text{ m/s}$  به دست خواهد آمد. بنابراین ضریب شکل  $\beta$  که در مورد نفوذ موج تنشی درون صفحات با ضخامت مشخص برابر با  $0.96$  فرض شده بود (رابطه (۲-۶)) پس از بدست آوردن سرعت موج با استفاده از دستگاه Impact-Echo به طور دقیق برابر با  $0.61$  خواهد بود. بنابراین رابطه (۲-۶) به صورت رابطه (۴-۶) بازنویسی می‌شود:

$$T = \frac{0.61C_p}{2f} \quad (۴-۶)$$

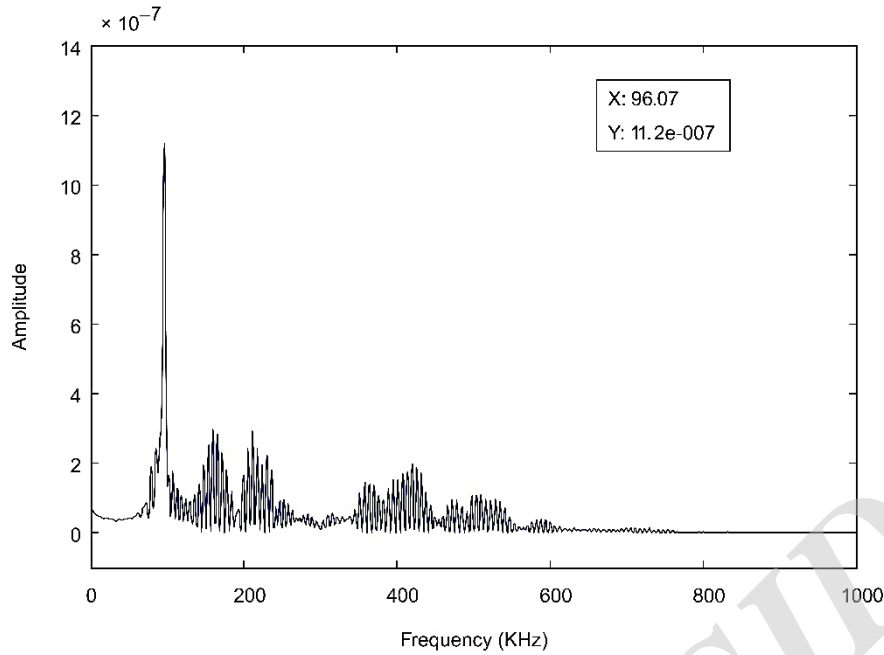
همانطور که در شکل‌های (۱۱-۶) تا (۱۴-۶) نشان داده شده است میزان فرکانس ماکزیمم برای تعیین عیب از یک گراف به گراف دیگر متفاوت می‌باشد. این موضوع باید توضیح داده شود که سرعت برخورد گوی با سطح ورق کامپوزیتی و ضخامت ورق کامپوزیتی در تمامی نمونه‌ها برابر و یکسان نمی‌باشند. یکی از نتایج اعمال ضربه با سرعت بالاتر افزایش انرژی موج‌های تولید شده و توانایی عبور آن‌ها از لایه‌های کامپوزیت و رسیدن آنها به مرزهای خارجی ورق می‌باشد. نزدیکی و تطابق نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی امواج برگشتی از درون ورق‌های کامپوزیت فایبرگلاس با اندازه‌های واقعی ورق‌ها که از طریق اندازه‌گیری تجربی و مستقیم بدست آمده است نشان می‌دهد که روش موج ضربه (Impact-Echo) توانایی اندازه‌گیری ورق‌های کامپوزیت را مانند اندازه‌گیری قطعات و سازه‌های بتنی و سنگی دارا می‌باشد. در ورق‌هایی با ضخامت کمتر (شکل ۶-۱۱ و ۶-۱۲) امواجی که ناشی از برخورد با سطوحی غیر از سطح خارجی ورق می‌باشند، در طیف نما سبب ایجاد فرکانسی نزدیک به فرکانس بیشینه (Peak) یا فرکانسی 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 (Noise) باشد.



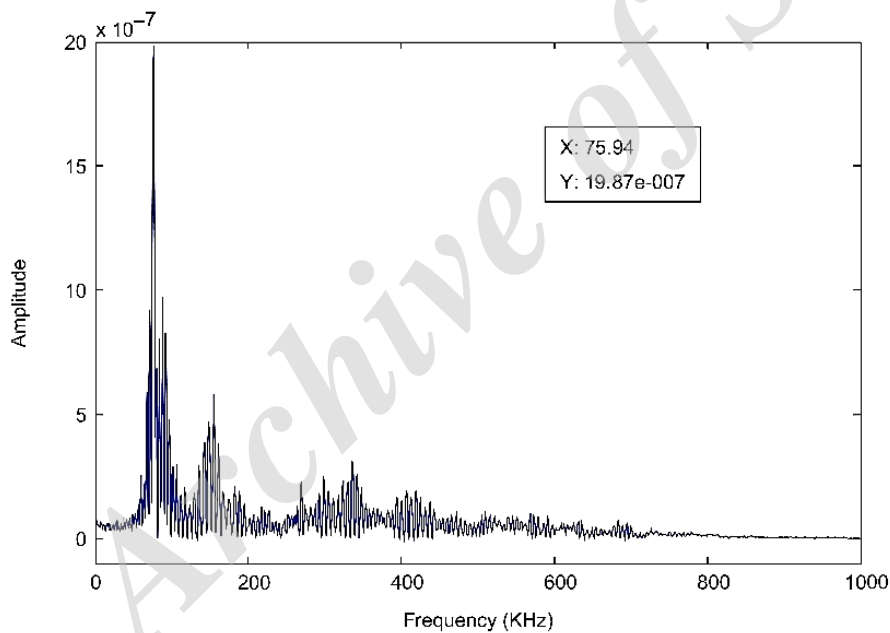
شکل ۵-۶: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۶ میلیمتر



شکل ۶-۶: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۸ میلیمتر



شکل ۶-۷: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۱۰ میلیمتر



شکل ۶-۸: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۱۲ میلیمتر

جدول (۶-۳) نشان دهنده نتایج تحلیل نمودارهای فرکانسی از شکل (۶-۵) تا (۶-۸) و اختلاف بین ضخامت‌های بدست آمده از روش موج ضربه و اندازه‌های واقعی ضخامت قطعات می‌باشد. این اختلاف با تقسیم اختلاف بین ضخامت واقعی و ضخامت محاسبه شده بر ضخامت واقعی  $(\frac{T_s-T}{T})$  بدست می‌آید. بررسی اختلاف بین مقادیر تجربی و نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی هیچگونه روند معناداری برای ایجاد یک خطا را نشان نمی‌دهد. در این جدول ضخامت تئوری بر مبنای رابطه (۶-۴) با استفاده از سرعت بدست آمده برابر با  $3274m/s$  بوده است و ضریب برابر با  $0.61$  می‌باشد.

جدول ۶-۳: مقایسه بین ضخامت‌های بدست آمده از تحلیل فرکانسی و اندازه‌های واقعی ضخامت

ضخامت واقعی ورق (T) mm	فرکانس ضخامت 1/sec	ضخامت بدست آمده از فرمول (T <sub>S</sub> )mm	اختلاف بین ضخامت اندازه‌گیری شده و ضخامت محاسبه شده $\left(\frac{T_s-T}{T}\right)$
۶/۰۲	۱۵۲/۸۰	۶/۵۳۵	٪۸/۶
۸/۰۰	۱۲۷/۲۰	۷/۸۵۰	-٪۱/۹
۱۰/۰۵	۹۶/۰۷	۱۰/۳۹۴	٪۳/۴۰
۱۲/۰۱	۷۵/۹۴	۱۳/۱۴۹	٪۹/۵



شکل ۶-۹: بدست آوردن داده‌های لازم برای تحلیل فرکانسی از دستگاه Impact-Echo

همانطور که مشاهده گردید به منظور بررسی کاربرد این روش در مورد قطعات کامپوزیتی در ابتدا تحلیل المان محدود روش موج ضربه با استفاده از نرم افزار ANSYS/LSDYNA انجام شده است. برای بدست آوردن نتایج تجربی، از دستگاه موج ضربه (Impact-Echo) 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 مختلف که تمامی ویژگی‌های ساخت آنها معلوم می‌باشد به منظور بررسی اثر ضخامت بر روی نتایج استفاده شده



است. در پایان با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل فرکانسی و نتایج آزمایشات تجربی با ضخامت واقعی قطعات نزدیکی و همگرایی مناسبی بین ضخامت بدست آمده از مدلسازی عددی و اندازه‌گیری ضخامت واقعی ورق‌ها (شکل ۶-۱۰) دیده می‌شود. نتایج این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد که هرچند تاکنون از روش Impact-Echo یا موج 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.



شکل ۶-۱۶: اندازه‌گیری ضخامت یکی از ورق‌های کامپوزیت به ضخامت ۸ میلیمتر

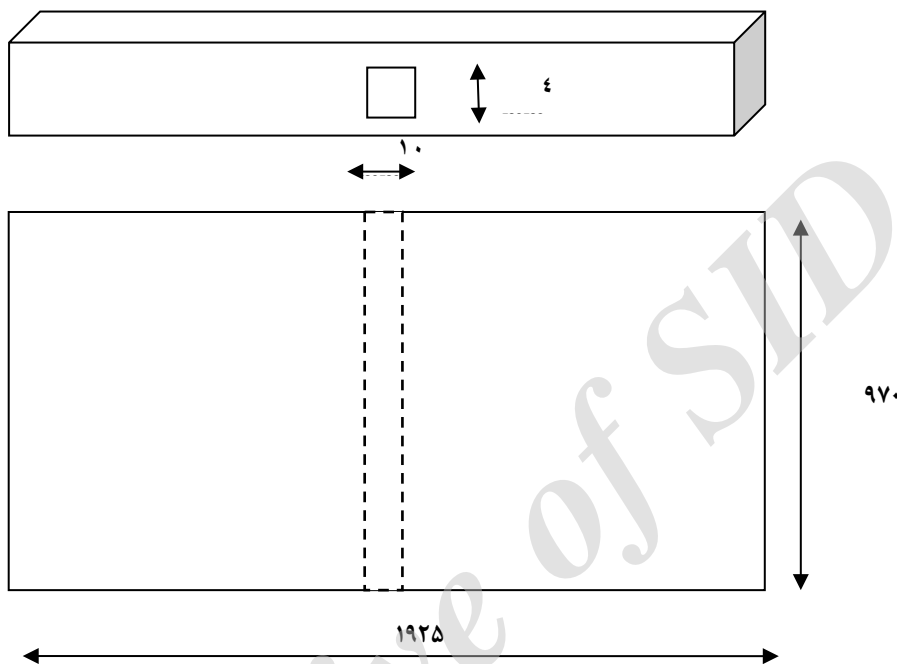
## ۲-۶- تعیین عیوب داخلی ورق کامپوزیتی به وسیله روش موج ضربه

یکی از کاربردهای اصلی روش‌های ارزیابی غیر مخرب تعیین سلامت سازه‌ها و مشخص کردن عیوب داخلی قطعات می‌باشد. روش موج ضربه در کاربردهای گذشته توانایی در تشخیص عیوب داخلی قطعات بتنی را نشان داده بود اما در پژوهش حاضر این موضوع در مورد قطعات و سازه‌های کامپوزیتی مطالعه می‌گردد. بدین منظور در ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده در ابعاد ۱۹۲۵ میلیمتر و عرض ۹۷۰ میلیمتر یک عیب داخلی پیش فرض ایجاد شده است. این عیب پیش فرض در لایه‌های میانی ورق‌های کامپوزیتی قرار دارد و لایه‌های بعدی بر روی آن قرار می‌گیرد. بدین ترتیب ورق‌هایی تولید شده‌اند که در ظاهر عاری از عیب هستند ولی در داخل دارای عیبی پیش فرض می‌باشند.

فرآیند تولید ورق‌های کامپوزیت در شکل (۱۰-۶) از مرحله "الف" تا "د" نشان داده شده است. در مرحله اول لایه‌گذاری دستی انجام شده و رزین بر روی آن قرار داده می‌شود. پس از گذاشتن چند لایه، لایه‌های بعدی بریده شده و با فاصله با یکدیگر قرار داده می‌شوند. لایه‌های بعدی بر روی این شکاف تولید شده قرار می‌گیرند به نحوی که همانطور که در

انتهای شکل (۶-۱۱) نشان داده شده است ورق ساخته شده ظاهراً فاقد هرگونه عیب بوده ولی از دید از جانب عیب پیش فرض آن مشخص می‌گردد.

نمایی از عیب پیش فرضی که در ورق‌های کامپوزیتی ایجاد شده است در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است. عمق این عیب برابر است با ۶ میلیمتر و طول آن برابر با ۱۰ میلیمتر می‌باشد. این عیب با مشاهده ظاهری قابل تشخیص دادن نیست و با استفاده از روش‌های غیر مخرب قابل تشخیص دادن می‌باشد.

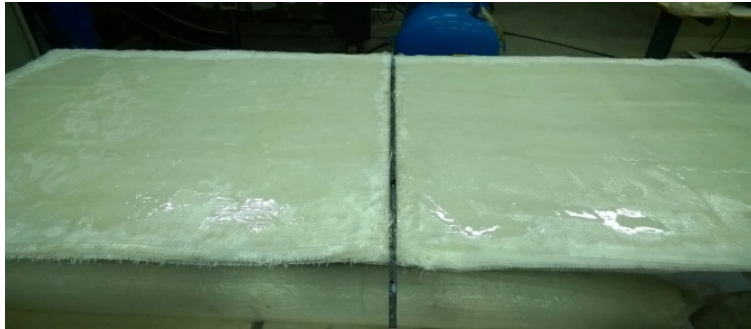


شکل ۶-۱۰: عیب پیش فرض در صفحه کامپوزیت

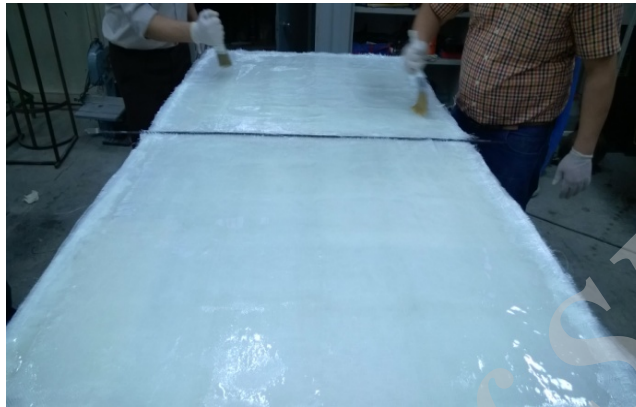
همانطور که در شکل (۶-۱۱) نشان داده شده است در ابتدا سطح الیاف شیشه با رزین آغشته می‌شود و سپس چندین لایه به همین صورت بر روی هم قرار می‌گیرند. در ادامه لایه‌های بعدی برش خورده و با فاصله از یکدیگر قرار می‌گیرند. این فاصله پس از چند مرحله سبب ایجاد یک شکاف سرتاسری عرضی در ورق‌های می‌شود. بعد از قرار دادن چند لایه بر روی شکاف و آغشته کردن آنها با رزین سرانجام ورقی با یک عیب درونی حاصل می‌گردد.

با انجام این کار در مورد تمامی چهار ورق، در تمامی آنها یک عیب پیش فرض ایجاد می‌گردد. هدف این پژوهش در این مرحله تشخیص موقعیت درونی عیب و فاصله آن از سطح ورق می‌باشد. این فاصله یک بار با استفاده از شبیه‌سازی در محیط ANSYS/LSDYNA بدست می‌آید و بار دیگر با استفاده از دستگاه موج ضربه. در ادامه این نتایج با یکدیگر مقایسه شده و توانایی این روش در تعیین عیوب داخلی ورق‌های کامپوزیت اپوکسی گلاس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

الف



ب



ج



د



شکل ۶-۱۱: مراحل ساخت ورق کامپوزیت (الف) و (ب) حین ساخت و (ج) و (د) قطعه نهایی با محل قرارگیری عیب

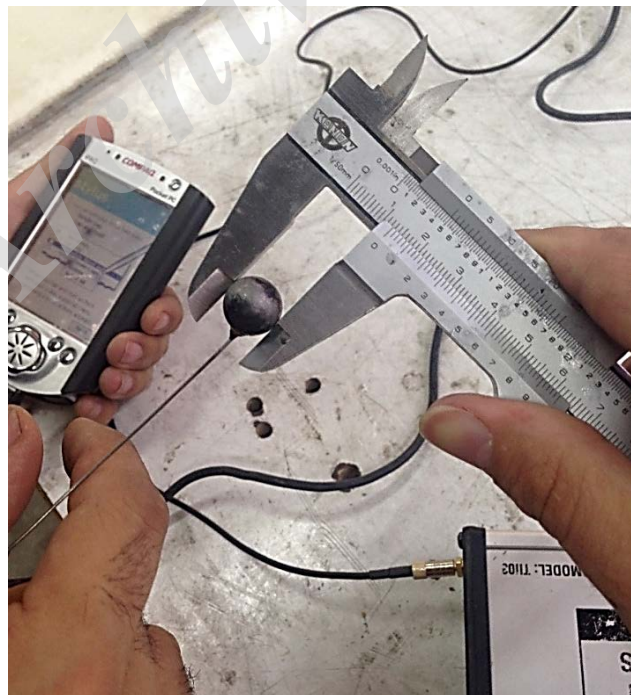
AM MG RPT طرح توسعه کاربرد دستگاه موج ضربه D960223.docx ۱۰۴

AM MG RPT طرح توسعه کاربرد دستگاه موج ضربه D960223.docx

به منظور فراهم آوردن مدلی دقیق تمامی اجزا و قسمت‌های دخیل در آزمایشات تجربی مورد اندازه‌گیری دقیق قرار گرفته است. در شکل (۶-۱۲) وزن گوی فلزی و در شکل (۶-۱۳) اندازه‌ی گوی فلزی بدست آمده است. از این ابعاد و اندازه برای مدل کردن فرآیند موج ضربه در نرم‌افزار ANSYS/LSDYNA استفاده می‌گردد. این اطلاعات نقش مهمی در واقعی کردن مدل دارند. از روی وزن و ابعاد گوی کروی می‌توان چگالی گوی فلزی را بدست آورد که این موضوع در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۱۱: اندازه‌گیری وزن گوی فلزی



## شکل ۶-۱۲: اندازه‌گیری قطر گوی ضربه‌زننده

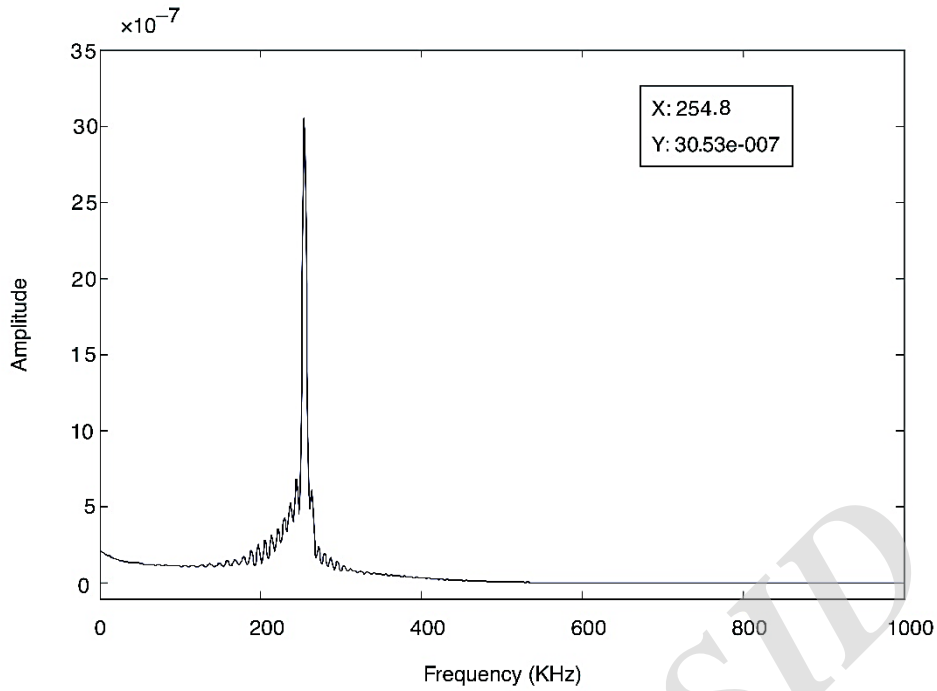
جدول ۴-۶: خواص مکانیکی گوی فلزی و ورق‌های کامپوزیت فایبرگلاس

چگالی ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت پواسون ( $\nu$ )	مدول ینگ ( $E$ ) $GP$	اجزا
۷۸۵۰	۰/۳	۲۱۰	پرتابه گوی فلزی
۴۱۶۵	۰/۲۵	۳۵	ورق کامپوزیت فایبرگلاس

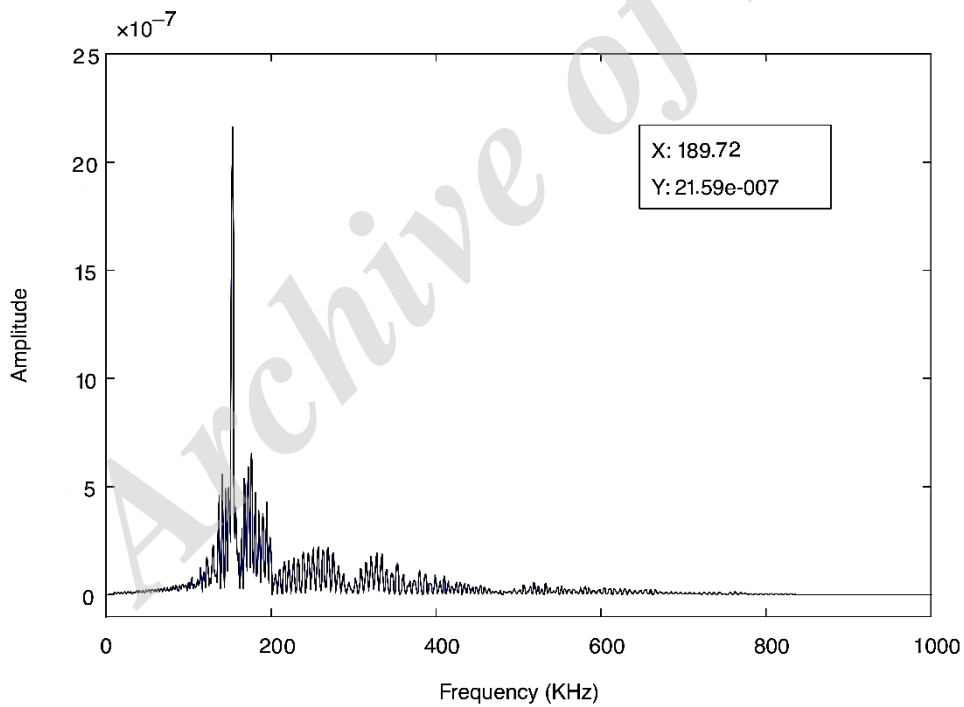
همانطور که در اشکال (۶-۱۴) تا (۶-۱۷) مشخص شده است جابجایی‌ها در نقاط نزدیک به عیب توسط تبدیل فوریه از دامنه جابجایی زمان به فرکانس زمان تبدیل می‌شود. در این اشکال نقاطی که نشان دهنده فرکانس بیشینه یا Peak می‌باشند مرتبط با فرکانسی هستند که در آن نقطه عیب پیش فرض قرار دارد. در اینجا نیز برای مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیند موج ضربه یا Impact-Echo از نرم‌افزار ANSYS/LSDYNA استفاده شده است. ضربه در نقطه‌ای نزدیک به عیب زده شده و نتایج در آن نقاط مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

$$T = \frac{0.41C_p}{2f} \quad (۶-۵)$$

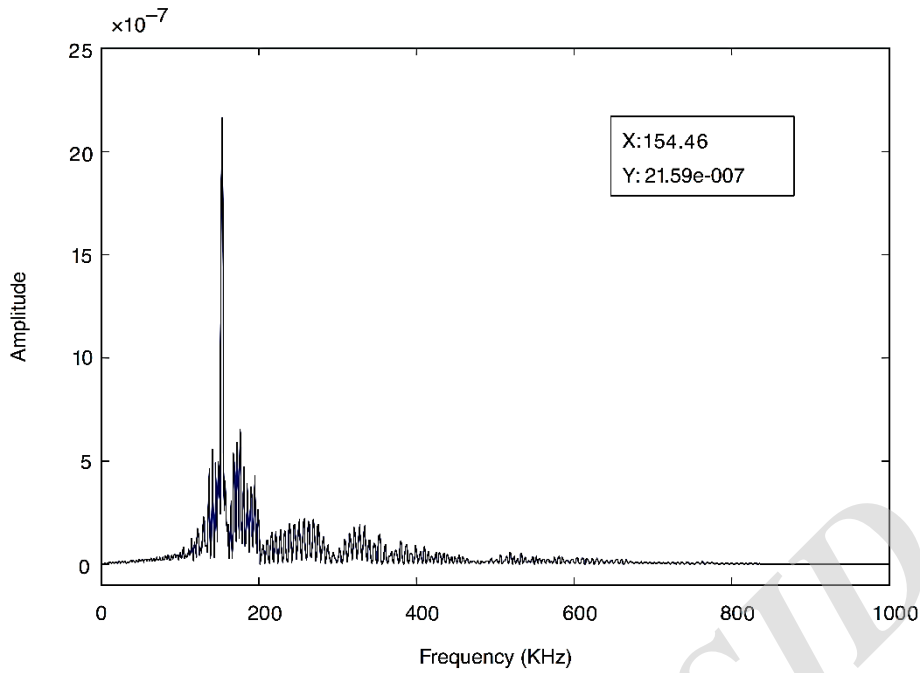
لازم به یادآوری است که این نسبت پیشتر برای بدست آوردن ضخامت ورق‌های کامپوزیتی برابر با ۱/۶۱ فرض شده بود و در اینجا و برای بدست آوردن عیوب داخلی عدد ۰/۴۱ بدست آمده است. همچنین لازم به توضیح است که این نسبت‌ها از مقایسه بین اندازه‌های تئوری و واقعی بدست آمده است.



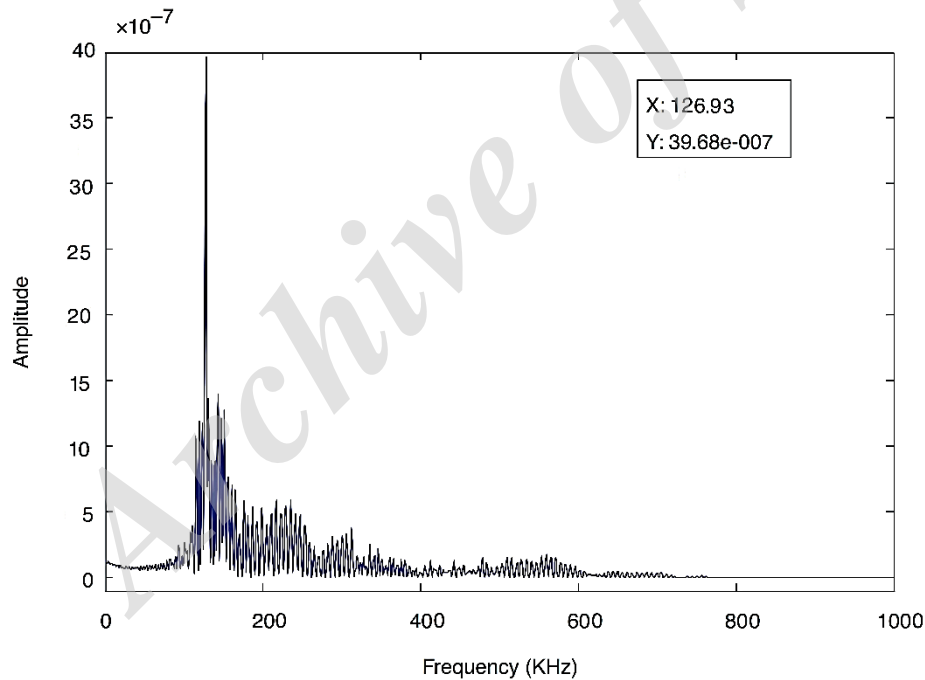
شکل ۶-۱۴: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۶ میلیمتر



شکل ۶-۱۵: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۸ میلیمتر



شکل ۶-۱۶: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۱۰ میلیمتر



شکل ۶-۱۷: پاسخ فرکانسی ورق کامپوزیتی با ضخامت ۱۲ میلیمتر

جدول (۵-۶) نشان دهنده نتایج تحلیل نمودارهای فرکانسی از شکل (۶-۱۴) تا (۶-۱۷) و اختلاف بین عمق عیب بدست آمده از روش موج ضربه و اندازه‌های واقعی عمق عیوب قطعات می‌باشد. این اختلاف با تقسیم اختلاف بین عمق

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

در رابطه با جدول (۶-۵) لازم به توضیح است که مجدداً از رابطه (۶-۲) به منظور تعیین عمق ترک درون ورق‌های کامپوزیتی استفاده شده است. اما در این حالت و برای بدست آوردن عمق عیوب داخلی ورق نسبت ۰/۴۱ برای این رابطه توصیه می‌گردد چرا که در این نسبت کمترین خطا نسبت به عمق واقعی ترک‌ها مشاهده شده است.

بنابر این می‌توان رابطه (۶-۲) را برای استفاده به منظور تعیین عمق عیوب داخلی ورق‌های کامپوزیتی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$T = \frac{0.41C_p}{2f} \quad (۶-۳)$$

جدول ۶-۵ مقایسه بین عمق ترک بدست آمده از تحلیل فرکانسی و اندازه‌های واقعی ضخامت

ضخامت ورق (T) mm	فرکانس ضخامت $f \left(\frac{1}{s}\right)$	عمق بدست آمده عیب از فرمول $(L_s)$ mm	عمق واقعی عیب L (mm)	اختلاف بین عمق عیب تئوری و واقعی $\left(\frac{L_s-L}{L}\right)$
۶,۰۲	۲۵۴,۰۸	۳,۹۱۹	۳	۳۰,۲٪
۸,۰۳۵	۱۸۹,۷۳	۵,۱۶۳	۴	۲۸,۵٪
۹,۸۷	۱۵۴,۴۶	۶,۴۶۵	۵	۲۹,۳٪
۱۲,۰۱	۱۲۶,۹۳	۷,۵۶۷	۶	۲۶٪





الف

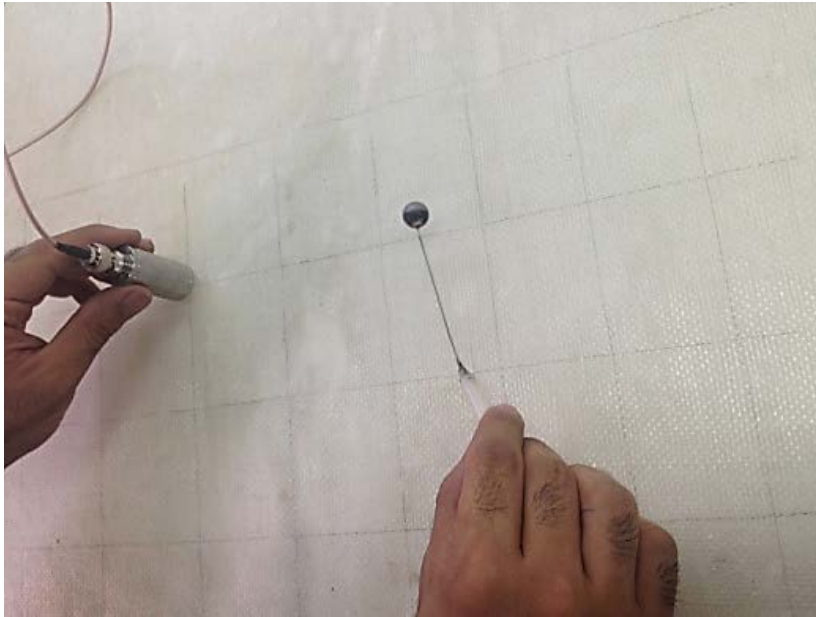


ب.

شکل ۶-۱۸: (الف) و (ب) دستگاه موج ضربه Impact-Echo

### ۳-۶ تشخیص عیوب داخلی به وسیله دستگاه موج ضربه

پس از انجام آزمون موج ضربه بر روی صفحات کامپوزیتی به منظور تحلیل به انسیتومصالح ساختمانی دانشگاه تهران ارسال گردید. به دلیل آنکه تحلیل نتایج بدست آمده از آزمون موج ضربه با استفاده از سیستمی که برای خود دستگاه موج ضربه موجود طراحی شده است مستلزم پرداخت هزینه است این تحلیل تنها برای یکی از ورق‌های کامپوزیتی با ضخامت ۱۰ میلیمتر صورت پذیرفته است. برای این منظور در ابتدا سطح صفحه مورد نظر شبکه بندی شده و مربع‌هایی به ضلع ۵ سانتیمتر ایجاد شد. در ادامه در هر کدام از خانه‌های این شبکه آزمون موج ضربه صورت می‌پذیرد که این موضوع به خوبی در شکل (۱۹-۶) نشان داده شده است.

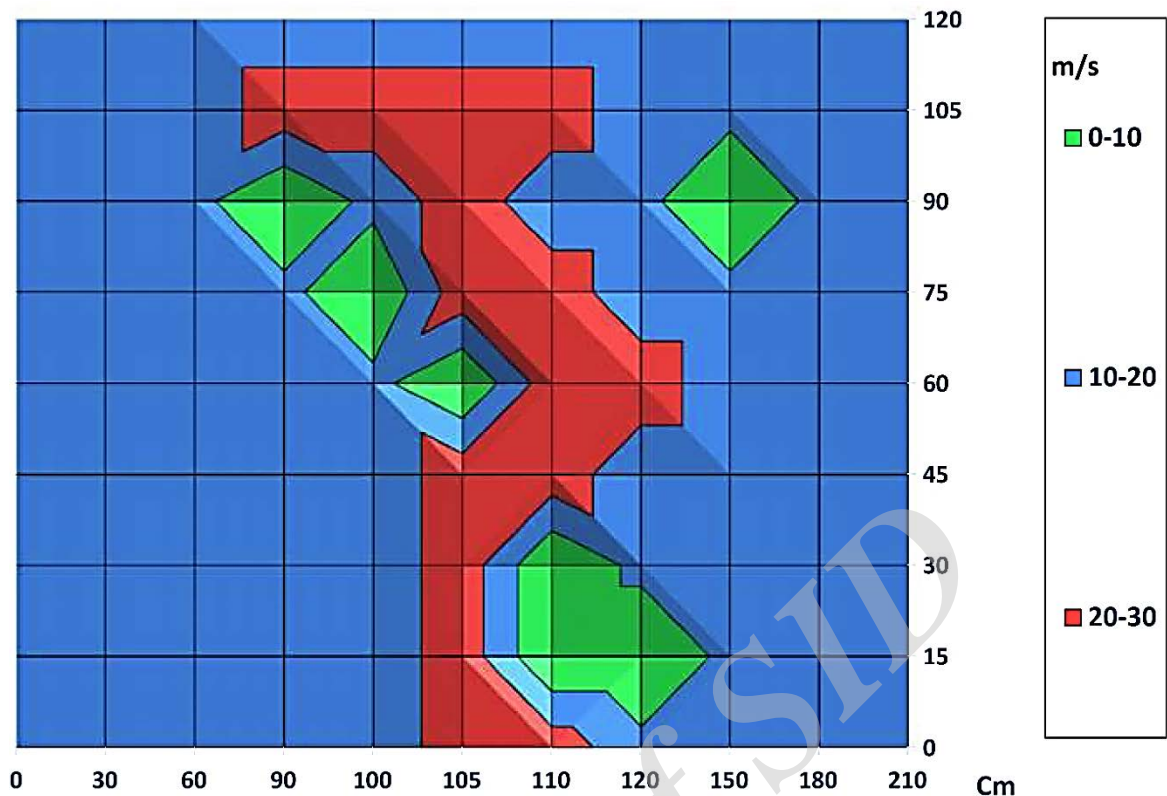


الف



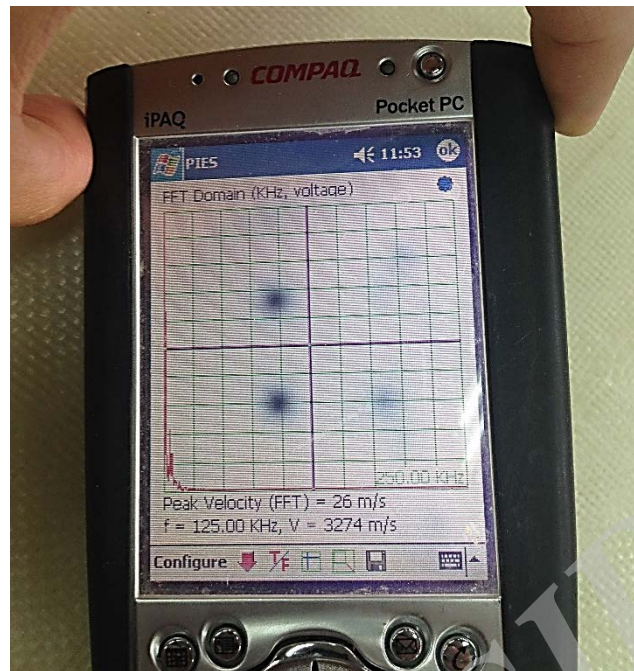
ب

شکل ۶-۱۹: شیوه انجام آزمون الف: مش بندی سطح ورق ب: برداشت داده‌ها با استفاده از پروب  
سپس نتایج بررسی و تحلیل داده‌های تجربی توسط سیستم موج ضربه مورد ارزیابی قرار گرفت که گرافی مانند آنچه در شکل  
(۶-۲۶) نشان داده شده است حاصل گردید.



شکل ۶-۲۰: در این شکل عیب درونی جسم به خوبی توسط تحلیل المان محدود بر روی نتایج دستگاه Impact Echo نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۶-۲۰) مشخص است رنگ سبز مشخص کننده مناطقی است که سرعت مربوط به فرکانس بیشینه موج یا Peak Velocity (FFT) در آنها بین ۰ تا ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد. رنگ آبی مشخص کننده مناطقی است که سرعت مربوط به فرکانس بیشینه موج یا Peak Velocity (FFT) در آن مناطق بین ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه است و رنگ قرمز نیز مشخص کننده مناطقی است که در آن سرعت مربوط به فرکانس بیشینه موج یا Peak Velocity (FFT) موج بین ۲۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد. برای نمونه در شکل (۶-۲۱) نتایج حاصل از تحلیلی که خود دستگاه بر روی امواج دریافتی از درون قطعات کامپوزیتی انجام داده است نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است این نتایج مربوط به ارزیابی ضخامت قطعه می‌باشد که در شکل (۶-۲۰) در ناحیه آبی قرار داشته که در آن سرعت مربوط به فرکانس بیشینه موج یا Peak Velocity (FFT) برابر با  $m/s$  ۱۳ می‌باشد.

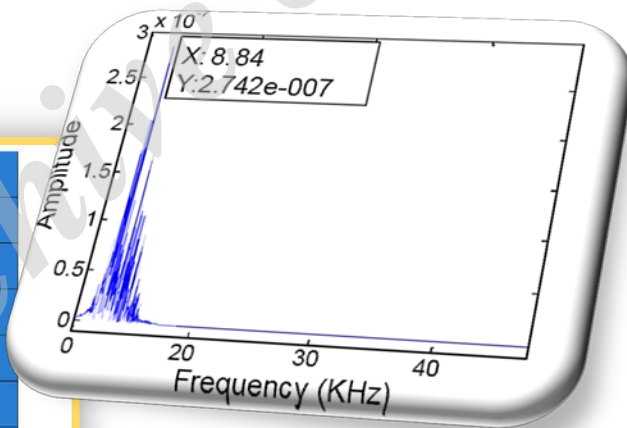
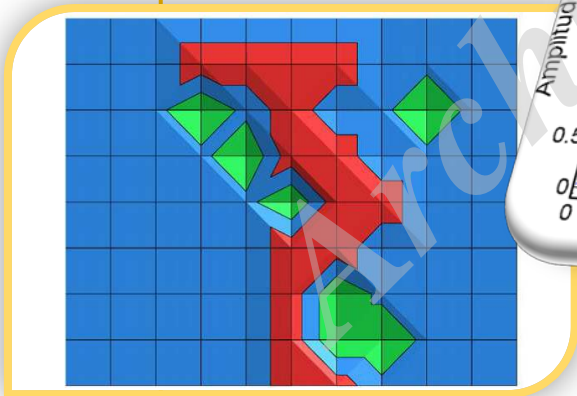


شکل ۶-۲۱: نمونه‌ای از خروجی دستگاه (Impact-Echo)

این سرعت‌ها سرعت‌هایی است که پس از انجام تبدیل فوریه بر داده‌ها توسط خود دستگاه بدست آمده است. این داده‌ها نشان می‌دهد دستگاه شکاف میانی را که در ورق قرار داشت را توانسته تا حدودی تشخیص دهد. البته لازم به ذکر است به دلیل اینکه سنسور و برنامه و کالیبراسیون دستگاه به منظور استفاده در قطعات بتنی و سازه‌های سنگی تنظیم شده است فلذا دقت آن در مورد قطعات و سازه‌های کامپوزیتی در حد قابل قبولی قرار ندارد. در صورتی که دستگاه موج ضربه صرفاً برای استفاده در ورق‌ها و سازه‌های کامپوزیتی طراحی و ساخته شود قطعا ترک و عیوب داخلی با کیفیت و وضوح بیشتری مشخص خواهند شد.

# فصل ۸

## نتیجه گیری و دستاوردها



## ۷-۱- مقدمه

این روش دارای پتانسیل‌ها و محدودیت‌هایی می‌باشد. نفوذ موج به درون جسم و برخورد آن با مرزهای داخلی یکی از مهمترین محدودیت‌ها در راه استفاده از این روش می‌باشد. یکی از مهمترین قابلیت‌هایی که روش‌های اندازه‌گیری می‌بایست داشته باشند قابلیت تکرارپذیری (Repeatability) است. هرچند در پژوهش صورت گرفته داده‌ها در شرایط آزمایشگاهی برداشت گردید ولی لازم است تا با تغییر و مطالعه در برخی فاکتورها این قابلیت را تقویت کرد تا بتوان از این روش به راحتی و با قابلیت اطمینان بالا در شرایط عملیاتی نیز بهره برد.

## ۷-۲- بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت و عمق درونی ترک

در این طرح پژوهشی از FFT برای انجام یک تحلیل فرکانسی بر روی داده‌ها در دامنه زمانی استفاده شده است. تفسیر منحنی-های فرکانس-دامنه راحت‌تر از منحنی‌های زمان-جابجایی هستند و اطلاعات مورد نیاز از قبیل ضخامت قطعه و یا موقعیت عیب از این طریق دارای دقت بالاتری می‌باشند. در مورد ورق‌های کامپوزیت مورد مطالعه، فرکانس غالب (Dominant Peak) در طیف نگار (Spectrum) به عنوان فرکانس ضخامت شناخته شده و از آن برای محاسبه ضخامت ورق و تعیین عیوب درونی با استفاده از رابطه (۴-۴) استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است با پاسخ عددی یک ورق با ضخامت ۱۰ میلیمتر فرکانس غالب برابر با ۱۲۶/۹۳ کیلوهرتز می‌باشد.

برای توضیح اثر فاصله میان محل وارد آمدن ضربه و ترنسدیوسر بر روی دامنه-ضخامت، جابجایی عمودی نقاط در یک بازه زمانی در نسبت‌های متفاوت  $r/t$  (برای مدل‌های طراحی شده) ثبت شده است. اگر ترنسدیوسر به محل وارد آمدن ضربه بسیار نزدیک باشد، موج P زمان کافی برای جدا شدن از امواج S و R پیش از رسیدن به ترنسدیوسر را نخواهد داشت. علاوه بر این وارد آمدن ضربه در نزدیکی ترنسدیوسر می‌تواند سبب جدا شدن و فاصله گرفتن ترنسدیوسر از سطح شود. از سمت دیگر اگر محل وارد آمدن ضربه از محل قرارگیری ترنسدیوسر فاصله زیادی داشته باشد در آنصورت انعکاس امواج P از سطح دیگر جسم می‌تواند سبب تداخل در یکپارچگی امواج R شود. به این منظور در پژوهش‌های قبلی در زمینه کاربرد موج ضربه در سازه‌های بتنی نسبت  $r/t = 0.3$  [۱۵] برای از بین بردن اثرات نامطلوب دو مورد فوق انتخاب شده است. این فاصله اطمینان می‌دهد که دامنه جابجایی ایجاد شده به وسیله موج P به اندازه کافی قوی می‌باشد و می‌تواند به وسیله ترنسدیوسر به راحتی تشخیص داده شود. در این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی نسبت ۰/۴۵ برای  $r/t$  انتخاب شده است. در تحلیل نشان داده شده در این پژوهش سرعت نفوذ موج در کامپوزیت ۳۱۷۶ متر بر ساعت بدست آمده است. بنابراین مقدار  $\beta$  برای استفاده در روابطی که در فصل‌های گذشته به منظور تخمین ضخامت با استفاده از فرکانس بیشینه مورد استفاده قرار گرفت می‌تواند با توجه به نتایج تجربی بدست آمده مجدداً اصلاح شده و با مقادیری برابر با ۰/۶۱ برای تعیین ضخامت و ۰/۴۱ برای تعیین عیوب داخلی برابر مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه رابطه میان ضخامت و فرکانس بیشینه می‌تواند مجدداً به صورت زیر بازنویسی گردد:

$$T = \frac{0.61 C_P}{2f} \quad (1-7)$$

$$T = \frac{0.41 C_P}{2f} \quad (2-7)$$

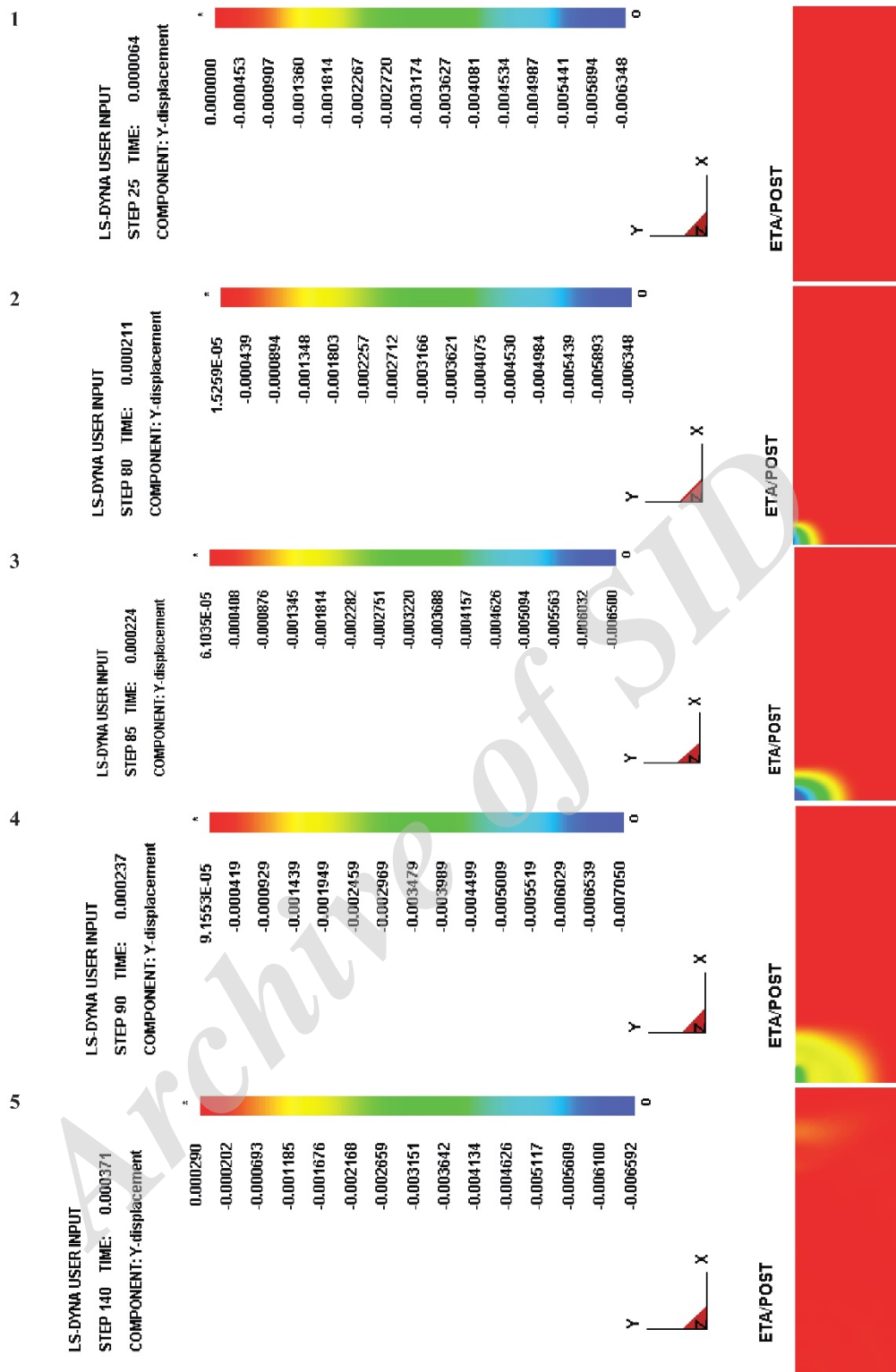
جدول (۱-۷) نشان دهنده نتایج تحلیل نمودارهای فرکانسی و اختلاف بین ضخامت‌های بدست آمده از روش موج ضربه و اندازه‌های واقعی ضخامت قطعات می‌باشد. این اختلاف با تقسیم اختلاف بین ضخامت واقعی و ضخامت محاسبه شده بر ضخامت واقعی  $\left(\frac{T_S-T}{T}\right)$  بدست می‌آید. بررسی اختلاف بین مقادیر تجربی و نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی هیچگونه روند معناداری برای ایجاد یک خطا را نشان نمی‌دهد. در این جدول ضخامت تئوری بر مبنای رابطه (۱-۷) با استفاده از سرعت بدست آمده برابر با  $3274 \text{ m/s}$  بوده است و ضریب برابر با  $0.61$  می‌باشد.

جدول ۱-۷: مقایسه بین ضخامت‌های بدست آمده از تحلیل فرکانسی و اندازه‌های واقعی ضخامت

اختلاف بین ضخامت اندازه‌گیری شده و ضخامت محاسبه شده $\left(\frac{T_S-T}{T}\right)$	ضخامت بدست آمده از فرمول $(T_S) \text{ mm}$	فرکانس ضخامت $1/\text{sec}$	ضخامت واقعی ورق $(T) \text{ mm}$
٪.۸/۶	۶/۵۳۵	۱۵۲/۸۰	۶/۰۲
-٪.۱/۹	۷/۸۵۰	۱۲۷/۲۰	۸/۰۰
٪.۳/۴۰	۱۰/۳۹۴	۹۶/۰۷	۱۰/۰۵
٪.۹/۵	۱۳/۱۴۹	۷۵/۹۴	۱۲/۰۱

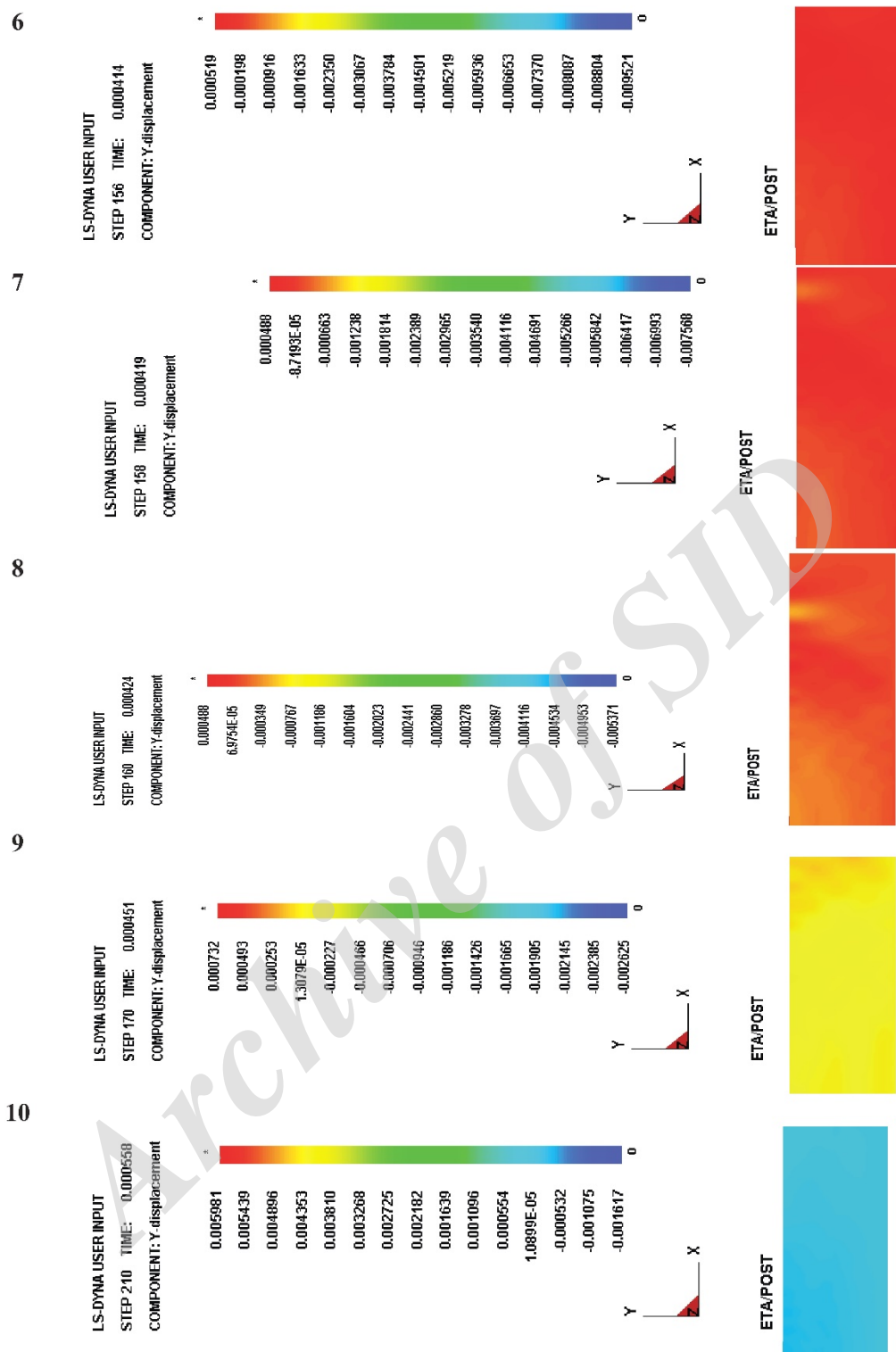
### ۷-۳- بررسی نتایج حاصل از نفوذ موج

اشکال شماره ۱-۷ تا ۳-۷ جابجایی حاصل از برخورد بر روی سطح ورق را نشان می‌دهد. در ابتدا گوی فلزی بر روی سطح ورق برخورد می‌کند که این سبب ایجاد جابجایی در راستای Y می‌گردد. این جابجایی‌ها در نرم افزار ANSYS با توجه به رنگ معیاری که در کنار آن نشان داده شده است مشخص می‌باشد. خروجی این قسمت یعنی بدست آوردن جابجایی در راستای عمود بر سطح ورق در بدست آوردن نمودارهایی جابجایی و فرکانسی کمک شایانی می‌کند.



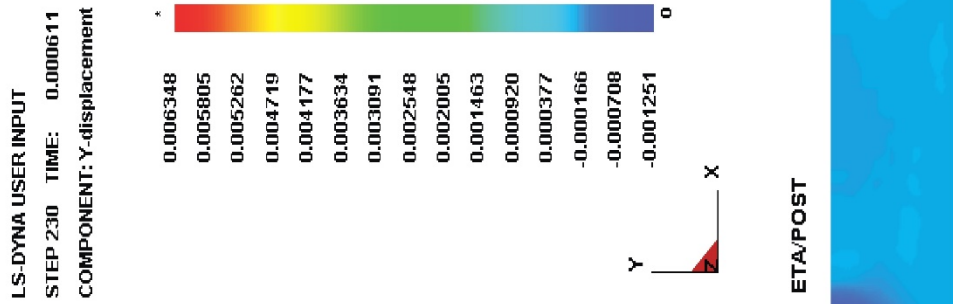
شکل ۷-۱: شبیه‌سازی المان محدود ضربه بر روی ورق‌های کامپوزیتی به ضخامت ۱۲ میلی‌متر (نتایج مراحل ۲۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰ و ۱۴۰ نشان داده شده است)



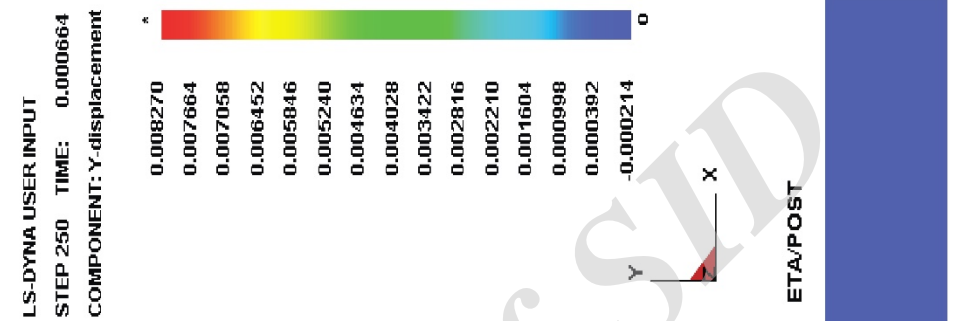


شکل ۷-۲: شبیه‌سازی المان محدود ضربه بر روی ورق‌های کامپوزیتی به ضخامت ۱۲ میلیمتر (نتایج مراحل ۱۵۶، ۱۵۸، ۱۶۰، ۱۷۰ و ۲۱۰ نشان داده شده است)

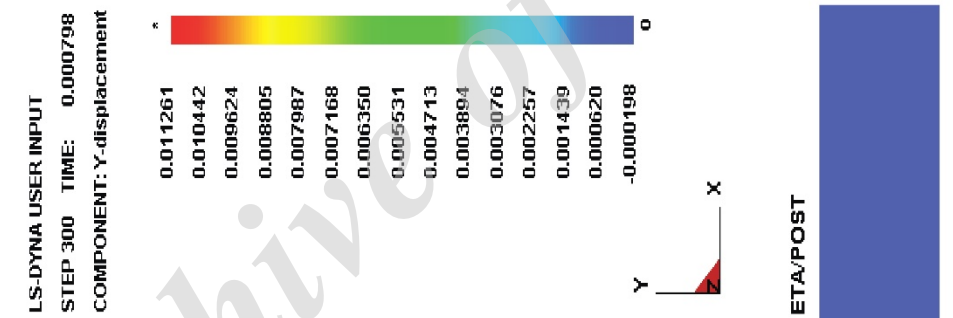
11



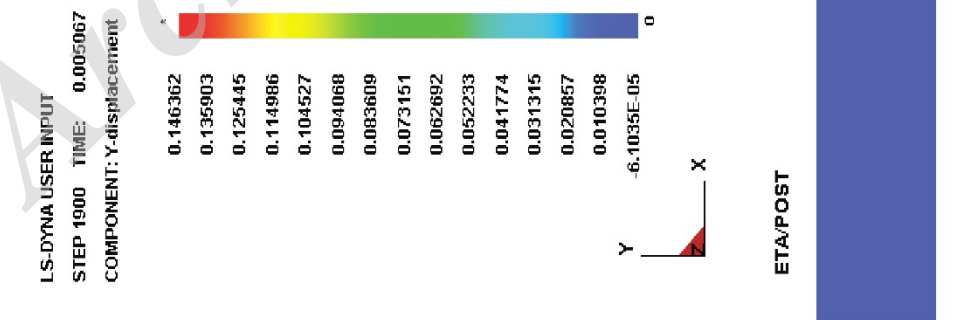
12



13



14



شکل ۷-۳: شبیه‌سازی المان محدود ضربه بر روی ورق‌های کامپوزیتی به ضخامت ۱۲ میلیمتر (نتایج مراحل ۲۳۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۱۹۰۰ نشان داده شده است)

در شکل (۷-۱) از مرحله ۲۵ تا ۱۴۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است موج در فاز اولیه نفوذ خود می-باشد. این مرحله نشان می-دهد که جهت نفوذ موج و جهت حرکت ذرات درون جسم یکی است. همچنین حالت انتشار فشاری موج نیز در این مرحله مشخص می-باشد. مرحله ۸۰ ورود موج به درون ورق کامپوزیتی را نشان می-دهد. همانطور که در شکل (۷-۲) از مرحله ۱۵۶ تا ۲۱۰ نشان داده شده است امواج تنشی در حال بازگشت از مرزهای ورق هستند. با توجه به بازه زمانی در نظر گرفته برای مدل شکل (۷-۳) نشان دهنده مرحله ۲۳۰ تا ۱۹۰۰ بوده که در آن امواج در حال حرکت در خلاف جهت بوده و بنابراین رنگ جسم تغییر کرده است. مرحله ۸۵ تا مرحله ۱۵۶ نشان می-دهد که قسمتی از موج نفوذ کننده به داخل ورق به صورت موج فشاری منکسر می-شوند. با توجه به اینکه زاویه وارد آمدن ضربه و ورق ۹۰ درجه می-باشد بنابراین نسبت دامنه موج منکسر شده به دامنه حرکت ذره از رابطه زیر به دست می-آید:

$$R_{refracted} = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_s} \quad (7-3)$$

$Z_c$  و  $Z_s$  به ترتیب نشان دهنده امپدانس صوتی کامپوزیت و فلز می-باشند. امپدانس صوتی  $Z$  حاصل ضرب سرعت موج در چگالی ماده می-باشد. با استفاده از رابطه (۳-۱)  $Z_c = 92 \times 10^5$  و  $Z_s = 470 \times 10^5$  به دست می-آید. بنابراین مقدار  $R_{refracted}$  برابر با ۲۳٪ محاسبه می-گردد، بنابراین دامنه موج منعکس شده به دامنه حرکت ذرات برابر با ۶۷٪ می-باشد.

مرحله ۱۵۸ نشان دهنده حرکت موج می-باشد که پس از برخورد با اطراف جسم که هوا وجود دارد منعکس می-گردد. این انعکاس به دلیل اختلاف بین امپدانس هوا و کامپوزیت می-باشد. اشکال ۱۵۸ تا ۲۳۰ نشان می-دهد که امواج دارای شکل کششی می-باشد. بنابراین در مرحله اکثر جابجایی‌ها که علامت مثبت نیز دارند نشان داده شده است. از مرحله ۲۳۰ تا ۳۰۰ موج منعکس شده حالت کششی داشته و جابجایی‌های مثبت شده علامت مثبت خواهند داشت. این نتایج در تطابق کامل با نظریه انعکاس امواج تنشی از میله با انتهای باز و میله با انتهای بسته می-باشد [۴۴].

#### ۷-۴- ارزیابی ضخامت ورق

اصلی ترین بخش این پژوهش مربوط به ارزیابی و بدست آوردن ضخامت ورق‌های کامپوزیت با استفاده از روش موج ضربه می-باشد. در این پژوهش در ابتدا با استفاده از رفت و برگشت امواج تنشی که در اثر ضربه پدید آمدند و انجام تحلیل فرکانسی بر روی امواج برگشتی مدلسازی عددی روش موج ضربه انجام پذیرفت. در ادامه این فرایند با استفاده از دستگاه موج ضربه نیز انجام پذیرفت و نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی با نتایج تجربی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که این روش توانایی قابل قبولی در تعیین ضخامت ورق‌های کامپوزیت دارد.

#### ۷-۵- تشخیص عیوب داخلی ورق

با توجه به این موضوع که انعکاس امواج از مرز خارجی ورق در اثر تفاوت امپدانس دو محیط می-باشد در نتیجه اگر عیبی درون قطعه کامپوزیت موجود باشد و مقداری هوا نیز در آن حبس شده باشد در آنصورت با این روش فاصله سطح قطعه تا عیب را می-

توان به راحتی اندازه گرفت. این کاربرد این روش را می‌توان به عنوان شیوه‌ای برای آزمون غیر مخرب در قطعات کامپوزیتی مورد استفاده قرار داد.

#### ۶-۷- سایر کاربردها

در این طرح پژوهشی از روش موج ضربه یا Impact Echo به منظور ارزیابی ضخامت قطعات کامپوزیتی استفاده شده است. همچنین در این طرح پژوهشی با استفاده از روش موج ضربه، توانایی این روش در تعیین عیوب داخلی قطعات کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. ولی این روش کماکان دارای قابلیت‌های فراوانی برای استفاده در زمینه ارزیابی قطعات کامپوزیتی می‌باشد. یکی از زمینه‌های پژوهش‌های آتی استفاده از روش موج ضربه به منظور ارزیابی لوله‌های کامپوزیتی می‌باشد. تعیین عمق و ابعاد ترک درون قطعات کامپوزیتی از دیگر زمینه‌های ممکن برای پژوهش‌های آتی می‌باشد. در صورتی که انتقال امواج صوتی به سطح قطعه مورد آزمون از راه دور ممکن باشد در آن صورت می‌توان با استفاده از این روش بدون تماس با سطح قطعه را نیز بررسی نمود.

یکی دیگر از مکانیزم‌هایی که با استفاده از روش موج ضربه می‌توان از آن استفاده نمود کنترل دائمی سطح یک قطعه می‌باشد. در این حالت اگر قطعه در مکانی برای مدتی طولانی قرار داشته باشد می‌توان ضرباتی را در یک دوره مشخص زمانی به آن وارد کرد و سپس از دریافت امواج درونی قطعه سلامت قطعه را به طور دائمی کنترل نمود.

# فصل ۹

## جمع بندی



## ۸-۱- مقدمه

هدف اصلی از انجام این طرح پژوهشی بررسی حرکت امواج الاستیک (تولید شده توسط یک ضربه) درون یک ورق کامپوزیتی به منظور تعیین ضخامت و تشخیص عیوب داخلی بوده است. با به کارگیری این روش که روش موج ضربه و یا Impact Echo نام دارد در بازرسی قطعات و ورق‌های کامپوزیت، سرعت انجام آزمون افزایش یافته و هزینه‌های انجام آن کاهش می‌یابد. از سمت دیگر این روش به خوبی توانایی کاربرد در محیط‌های صنعتی و غیر آزمایشگاهی را دارا می‌باشد.

پژوهش‌هایی که در گذشته در مورد روش Impact-Echo یا موج ضربه انجام شده است به خوبی قابلیت‌ها و توانایی‌های این روش را به عنوان روشی غیرمخرب (NDT) 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 موج ضربه با استفاده از نرم افزار ANSYS/LSDYNA انجام شده است. همچنین برای بدست آوردن نتایج تجربی، از دستگاه موج ضربه (Impact-Echo) با استفاده از یک گوی فلزی به عنوان وسیله‌ای برای وارد آوردن ضربه بر روی یک ورق کامپوزیتی استفاده شده است. این برخورد سبب به وجود آمدن امواج P درون ورق کامپوزیتی می‌شود. در این راستا از بررسی چندین ورق کامپوزیتی فایبرگلاس با ضخامت‌های مختلف که تمامی ویژگی‌های ساخت آنها معلوم می‌باشد به منظور بررسی اثر ضخامت بر روی نتایج استفاده شده است. در پایان با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل فرکانسی و نتایج آزمایشات تجربی (ضخامت واقعی قطعات) نزدیکی و همگرایی مناسبی بین نتایج تئوری و تجربی دیده می‌شود. نتایج این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد که هرچند تاکنون از روش Impact-Echo یا موج ضربه به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب برای سازه‌های بتنی استفاده شده 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.

## ۸-۲- دستاوردهای طرح پژوهشی

دستاوردهای عمده این طرح پژوهشی به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- استفاده از روش موج ضربه به منظور تعیین ضخامت ورق‌های کامپوزیت
  - ۲- تشخیص عیوب داخلی ورق‌های کامپوزیت با استفاده از روش موج ضربه
- مدل‌سازی المان محدود روش موج ضربه (Impact-Echo) به منظور تعیین دقیق ضخامت و همچنین تعیین عیوب داخلی انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. برای انجام آزمون دسترسی به دو نقطه (یکی برای اعمال ضربه و دیگری برای قرارگیری ترنسدیوسر) از یک سمت قطعه کفایت می‌کند که همین موضوع باعث می‌شود بتوان از این روش برای بازرسی قطعات و صفحاتی که امکان دسترسی تنها به ناحیه محدودی از آنها وجود دارد استفاده کرد. این روش دارای

مزیت‌های فراوانی نسبت به سایر روش‌های آزمون غیر مخرب قطعات کامپوزیتی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به قابل حمل بودن دستگاه، دقت در پاسخ، عدم نیاز به سطح عاری از ناخالصی، سرعت در پاسخ، راحتی کاربرد و ... اشاره داشت. همچنین محاسبات عددی به این دلیل انجام شده‌اند که می‌توانند فهم بهتری از تئوری حاکم بر روش Impact-Echo را فراهم کنند. مهمترین جنبه‌های نوآوری این طرح پژوهشی به شرح زیر می‌باشند:

**معرفی روشی جدید برای اندازه‌گیری ضخامت ورق‌های کامپوزیت:** تا کنون از این روش برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات کامپوزیتی استفاده نشده بود. این موضوع هنگامی اهمیت پیدا می‌کند که دسترسی به هر دو سمت قطعه مورد آزمون ممکن نباشد.

**کاهش هزینه‌های اندازه‌گیری و انجام آزمون:** با استفاده از روش Impact Echo زمان انجام آزمون کاهش می‌یابد و ابزارآلات و تجهیزات مورد نیاز جهت انجام آزمون نیز کمتر خواهند شد.

**تعیین فاکتور شکل (Shape Factor):** با استفاده از روش موج ضربه برای ورق کامپوزیتی این فاکتور برابر با ۰/۹۴ به دست آمده است.

**شبیه‌سازی روش موج ضربه:** این شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار ANSYS LSDYNA انجام پذیرفته است که نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم افزاری نزدیکی قابل قبولی دارند.

**تبدیل فوری در نرم افزار MATLAB:** با استفاده از تبدیل فوری سریع (Fast Fourier Transform) در محیط نرم افزار MATLAB یک تحلیل فرکانسی بر روی داده‌های به دست آمده در یک دامنه زمانی انجام شده است. **صحت سنجی نتایج تئوری با آزمایشات تجربی:** نتایج شبیه‌سازی با استفاده از آزمایشات تجربی مورد تایید قرار گرفته است.

**تشخیص عیوب داخلی ورق کامپوزیتی با استفاده از روش Impact Echo.**

عیبی پیش‌فرض درون یک ورق کامپوزیت قرار داشت و تحلیل انجام شده بر روی سرعت موج در نقاط مختلف ورق انجام شده است با توجه به گراف بدست آمده به خوبی مشخص است.

### ۳-۸- پیشنهاد زمینه‌های برای پژوهش‌های آتی

اگرچه پژوهش‌های فراوانی در زمینه انرژی امواج ناشی از ضربه انجام شده است ولی کماکان زمینه‌های فراوانی به منظور پژوهش در این زمینه وجود دارد. برخی از زمینه‌های پیشنهادی برای انجام پژوهش آتی به شرح زیر می‌باشند:

- استفاده از روش موج ضربه با اعمال ضربه به شیوه‌های دیگر
- اندازه‌گیری ضخامت لوله‌های کامپوزیتی
- اندازه‌گیری طول قطعات کامپوزیتی با استفاده از روش موج ضربه

#### ۴-۸- دستاوردهای عملی

به منظور بازرسی قطعات کامپوزیتی تاکنون روش‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که هرکدام از آنها دارای مزایا و معایبی بوده‌اند. به دلیل گستردگی کاربرد قطعات کامپوزیتی در صنعت روز به روز به موارد مصرف آنها افزوده شده و نیاز به روش‌هایی جدید برای آزمون غیر مخرب آنها بیش از پیش احساس می‌شود. در این پژوهش برای نخستین بار از روش Impact Echo یا موج ضربه به منظور بازرسی غیر مخرب قطعات کامپوزیتی استفاده شده است روشی که استفاده از آن تا پیش از این محدود به قطعات بتنی و یا سنگی بوده است. این روش به دلیل اینکه به وسیله یک دستگاه قابل حمل انجام می‌پذیرد و کمتر از شرایط محیطی تاثیر می‌پذیرد روشی بسیار مطلوب در محیط‌های صنعتی به شمار می‌آید. پاسخ دهی سریع و دقت بالا از سایر ویژگی‌های این روش می‌باشد. به همین مطالعه کاربرد این روش از دو طریق آزمایشات تجربی بر روی ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه و رزین اپوکسی و همچنین مدلسازی عددی در محیط نرم‌افزار LS-Dyna مورد انجام شده است. نتایج حاصل از مدلسازی و نتایج تجربی دارای نزدیکی قابل قبولی بوده و این موضوع نشان داد که این روش توانایی خوبی در اندازه‌گیری ضخامت و همچنین تعیین عیوب داخلی ورق‌های کامپوزیتی دارد.

#### ۵-۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان این پژوهش بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهش و فناوری سازمان مرکزی جهاد دانشگاهی و همچنین گروه فنی و مهندسی که با حمایت‌های خود از این طرح، امکان انجام آن را فراهم آوردند صمیمانه تقدیر و تشکر به عمل آورند.



## منابع (References):

- [1] محمدحسین بهشتی، امیرمسعود رضادوست "پلاستیک های تقویت شده (کامپوزیت ها)", چاپ اول ۱۳۸۴، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، شابک: ۹۶۴۰۶۷۵۷۲۵
- [2] JEC Market Survey: Structure and Dynamics of the Composites Industry (Abstract), <http://www.jecomposites.com/>, News, 2005.
- [3] B. D. Agarwal and L.J. Broutman, "Analysis and Performance of Fiber Composites", (2nd Ed), Wiley, 1990.
- [4] F. R. Jones, "Handbook of Polymer-Fibre Composites", Longman Group UK Limited, UK, 1994.
- [5] A. R. Bunsell, "Fibre Reinforcements for Composite Materials", Elsevier, Netherlands, 1988.
- [6] Mary J. Sansalone and William B. Street, "The Impact-Echo Method", NDTnet 1998 February, Vol.3 No.2
- [7] ASCE "Report Card for America's Infrastructure", 2013, 6/17/2013, Available: <http://www.infrastructurereportcard.org>
- [8] Gucunski, N., Imani, A., Romero, F., Nazarian, S., Yuan, D., Wiggenhauser, "Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration", Transportation Research Board, Washington, D.C. (2013)
- [9] Gucunski, N., Romero, F., Kruschwitz, S., Feldmann, R., Abu-Hawash, A., Dunn, M. Transp. "Multiple complementary nondestructive evaluation technologies for condition assessment of concrete bridge decks" Res. Rec. 2201, 34–44 (2010)
- [10] ASTM Standard D4580 ed., "Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding", West Conshohocken, PA: ASTM International (2012)
- [11] Carino, "Training: often the missing link in using NDT methods." N. J. Constr. Build. Mater. Vol. 38, pp. 1316–1329 (2013)
- [12] Zhu, J.Y., Popovics, "Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo." J. S. J. Eng. Mech.—ASCE 133, 628–640 (2007)
- [13] Dai, X., Haberman, M.R., Tsai, Y.-T., Zhu, J. "Excitation of Rayleigh and zero-group-velocity (ZGV) Lamb waves using air-borne N-waves focused by an ellipsoidal reflector." In: Proceedings of Meetings on Acoustics, vol. 19, p. 030083 (2013)
- [14] Ryden, N., Lowe, M.J.S., Cawley, "Non-contact surface wave testing of pavements using a rolling microphone array." NDTCE'09, Non-destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France (2009)
- [15] Mazzeo, B.A., Patil, A.N., Guthrie, W.S. "Acoustic impact-echo investigation of concrete delaminations using liquid droplet excitation." Nondestructive Test. Eval. Int. 51, 41–44 (2012)

- [16] Grinspana, A.S., Gnanamoorthy, R., Colloids Surf. A, Physicochem. "Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film", Eng. Asp. 356, 162–168 (2010)
- [17] Schoefs, F., Abraham, "Probabilistic evaluation to improve design of impact-echo sources", Transp. Res. Rec., J. Transp. Res. Board 2313, 109–115 (2012)
- [18] Brian A. Mazzeo, Anjali N. Patil, Randy C. Hurd, Jeffrey M. Klis, Tadd T. Truscott, W. Spencer Guthrie, "Air-Coupled Impact-Echo Delamination Detection in Concrete Using Spheres of Ice for Excitation", Journal of Nondestructive Evaluation, December 2013.
- [19] Allen G. Davis, "The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001", NDT & E International, 36 (2003) 185–193.
- [20] C. Colla, M. Krause, Ch. Maierhofer, H-J Hohberger, H. Sommer, "Combination of NDT techniques for site investigation of non-ballasted railway tracks" Journal of NDT&E International 35 (2002) 95-105.
- [21] Jin-Jun Wang, Ta-Peng Chang, Bo-Tsun Chen, Hsin Wang, "Determination of Poisson's ratio of solid circular rods by impact-echo method", Journal of Sound and Vibration 331 (2012) 1059–1067.
- [22] R. Medina, A. Bayo'n, "Elastic constants of a plate from impact-echo resonance and Rayleigh wave velocity", Journal of Sound and Vibration 329 (2010) 2114–2126
- [23] R. Medina, M. Garrido, "Improving impact-echo method by using cross-spectral density", Journal of Sound and Vibration 304 (2007) 769–778.
- [24] K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, I. Torigoe, "a new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete", NDT&E International 35 (2002) 399-406.
- [25] M. Tabatabaei Ghomi, J. Mahmoudi, M. Darabi, "Concrete Plate thickness measurement using the impact-echo method", Nondestructive Testing and Evaluation, Volume 28, Issue 2, 2013
- [۲۶] مسعود مرادیان، دکتر محمد شکرچی زاده، "عملکرد بتن در محیط اسیدی و فاضلابی و ارائه راهکارهای ترمیم" پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران - گرایش سازه بهمن ماه ۱۳۸۹
- [27] Wahyu Lestari, Pizhong Qiao, "Damage detection of fiber-reinforced polymer honeycomb sandwich beams", Composite Structures 67 (2005) 365–373
- [28] Zhongqing Su, Lin Ye, Ye Lu, "Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review", Journal of Sound and Vibration 295 (2006) 753–780
- [29] C. Albano, N. Camacho, J. Reyes, J.L. Feliu, M. Hernández, "Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing", Composite Structures 71 (2005) 439–446.
- [30] Diamanti, C. Soutis, J.M. Hodgkinson, "Lamb waves for the non-destructive inspection of

*monolithic and sandwich composite beams*”, Composites: Part A 36 (2005) 189–195.

[31] E. Bayraktar, S.D. Antolovich, C. Bathias, "New developments in non-destructive controls of the composite materials and applications in manufacturing engineering", Journal of materials processing technology, 206(2008)30–44.

[32] Joung-Man Park, Jin-Woo Kong, Dae-Sik Kim, Jae-Rock Lee "Non-destructive damage sensing and cure monitoring of carbon fiber/epoxy acrylate composites with UV and thermal curing using electro-micromechanical techniques", Composites Science and Technology 64 (2004) 2565–2575

[33] NDT & E International, "Estimation of impact-induced damage in CFRP laminates through ultrasonic imaging", Volume 31, Issue 5, October 1998, Pages 359-374, M.V. Hosur, C.R.L. Murthy, T.S. Ramamurthy, Anita Shet

[34] Composites Part B: "Ultrasonic evaluation of matrix damage in impacted composite laminates", Engineering, Volume 31, Issue 1, January 2000, Pages 1-6 F Aymerich, S Meili.

[35] N. Bochud, A.A. Fahim, Á.M. Gómez, G. Rus, "Impact Damage Characterization in Composites Using Signal Processing Techniques", Procedia Engineering, Volume 14, 2011, Pages 169-176,

[36] R. Ambu, F. Aymerich, F. Ginesu, P. Priol, "Assessment of NDT interferometric techniques for impact damage detection in composite laminates", Composites Science and Technology, Volume 66, Issue 2, February 2006, Pages 199-205,

[37] ME. Ibrahim "Nondestructive Evaluation of Thick-Section Composites and Sandwich Structures: A Review", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, In Press, Accepted Manuscript, Available online 24 April 2014,

[38] Anish Kumar, Baldev Raj, P. Kalyanasundaram, T. Jayakumar, M. Thavasimuthu, "Structural integrity assessment of the containment structure of a pressurized heavy water nuclear reactor using impact echo technique", NDT & E International, Volume 35, Issue 4, June 2002, Pages 213-220

[39] A.P. Mouritz, C. Townsend, M.Z. Shah Khan, "Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics", Composites Science and Technology, Volume 60, Issue 1, 1 January 2000, Pages 23-32,

[40] Shu-Ken Lin, Yiching Lin, Keng-Tsang Hsu, Tsong Yen, "Use of the normalized impact-echo spectrum to monitor the setting process of mortar", NDT & E, International, Volume 43, Issue 5, July 2010, Pages 385-393.

[41] S.-C. Wooh, C. Wei, "A high-fidelity ultrasonic pulse-echo scheme for detecting delaminations in composite laminates", Composites Part B: Engineering, Volume 30, Issue 5, July 1999, Pages 433-441.

[42] Sung-Choong Woo, Tae-Won Kim, "High-strain-rate impact in Kevlar-woven composites and fracture analysis using acoustic emission", Composites Part B: Engineering, Volume 60, April 2014, Pages 125-136.

[43] Mott P. H., Roland C. M., "Limits to Poisson's ratio in isotropic materials—general result for

*arbitrary deformation*”, The Royal Swedish Academy of Sciences Physica Scripta, Volume 87, Number 5, Published 17 April 2013.

[44] <http://www.christinedemerchant.com/carbon-kevlar-glass-comparison.html>

[45] Cheng C., Ynching L., Hsiaoc C., C. Hsiang, “*Evaluation of simulated transfer functions of concrete plate derived by impact-echo method*”, NDT & International, 40(3), 239-249, pp. 2007.

[46] Graham, R.A. “*Solid under High Pressure Shock Compression*”, Mechanics, Physics and Chemistry, Springer-Verlag, New York, 1993.

[47] Zukas, J.Z., “*Introduction to Hydocodes*”, Elsevier B.V., Amsterdam, The Netherlands 2004.

[48] Johanson, W., “*Impact Strength of Materials*”, Manchester: Manchester University 1970.

Archive of SID

## Non Destructive Evaluation of Composite Plates Impact-Echo

### Abstract

The impact-echo method is a technique for flaw detection in concrete. It is based on monitoring the surface motion resulting from a short-duration mechanical impact. The method overcomes many of the barriers associated with flaw detection in concrete based on ultrasonic methods. The purpose of this paper is to provide an overview of the technique and to discuss the important parameters involved in this type of testing. One of the key features of the method is the transformation of the recorded time domain waveform of the surface motion into the frequency domain. The impact gives rise to modes of vibration and the frequency of these modes is related to the geometry of the test object and the presence of flaws. The principles involved in frequency analysis are discussed. The importance of the impact duration in relation to flaw detection and other factors affecting the smallest flaw that can be detected are also reviewed. The paper concludes with a summary of the ASTM standard governing the use of the impact-echo method for measuring the thickness of plate-like structures.

**Keywords:** Impact Echo, Composite, Non Destructive Test.

پذیرفته شده  
در انتظار نوبت چاپ

عنوان و چکیده مقاله اول

## Non Destructive Evaluation of Glass-Epoxy Composite using impact-echo method

M. Tabatabaee Ghomi<sup>a</sup>, Gh. Liaghat<sup>b</sup> and M. Amiri<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Center of Excellence in Precision Dimensional Measurement, Technology Development Institute (TDI) and ACECR  
Researcher, Tehran, Iran;

<sup>b</sup>Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, Tehran, Iran;

### Abstract:

In this paper a new method for Nondestructive testing or Nondestructive evaluation is proposed for Glass-Epoxy composite. For this purpose, impact-echo is used to evaluate the properties of composite materials, detecting internal defects and thickness measurement. In the impact-echo method a steel ball impacts on a composite plate and generates stress waves or P-waves which will be transferred into the plate. The results show that impact response of the composite plate for dominant thickness frequency for measuring thickness and locating the defect is in agreement with the normal measurement. Results represent that this method could be used for thickness measurement and flaw detection of Epoxy-Glass composites with a reasonable accuracy.

**Keywords:** Impact-Echo, Composite plates, Non Destructive Test (NDT), P-Wave

*Accepted* in "International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology", ISSN: 2252-0406

با رتبه علمی پژوهشی مصوب وزارت علوم در سال ۱۳۹۵

پذیرفته شده  
در انتظار نوبت چاپ

عنوان و چکیده مقاله دوم

## بررسی تجربی، عددی و تحلیلی استفاده از روش موج ضربه (Impact Echo) در آزمون غیرمخرب ورق‌های کامپوزیت‌های اپوکسی - الیاف شیشه

محمد امیری\*<sup>۱</sup>، سید محمد طباطبایی قمی<sup>۲</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری پژوهش محور، قطب علمی اندازه‌گیری دقیق ابعادی گروه پژوهشی مهندسی مکانیک پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی، تهران

\* تهران، ۶۸۶-۱۳۴۴۵، mm\_amiri@tdins.org

۲- مدیر قطب علمی اندازه‌گیری دقیق ابعادی گروه پژوهشی مهندسی مکانیک پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی، تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

### چکیده

از روش موج ضربه یا Impact-Echo تاکنون برای اندازه‌گیری و مطالعه 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 و ورق‌های کامپوزیت دارای کاربری گسترده‌ای در صنایع مختلف می‌باشند و نیاز به بازرسی و اندازه‌گیری ضخامت آنها همواره احساس می‌شود. این روش می‌تواند ضخامت قطعات کامپوزیتی را به سرعت و 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 به صورت عددی مدل شده‌اند تا اثر ضخامت بر روی نتایج بدست آمده مشخص شود. نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی امواج و همچنین تحلیل المان محدود حرکت موج با نتایج بدست آمده از دستگاه مقایسه شده است. نتایج بدست آمده در پایان نشان می‌دهد بین ضخامت‌های واقعی اندازه‌گیری شده ورق‌ها و ضخامت‌های بدست آمده از روش تحلیلی و دستگاه Impact-Echo نزدیکی قابل قبولی وجود دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد 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 برای قطعات کامپوزیت (NDT) متمرکز شد.

### کلیدواژگان

موج ضربه، موج P، ورق کامپوزیت، آزمون غیرمخرب، اندازه‌گیری ضخامت

پذیرفته شده در "مجله علوم و فناوری کامپوزیت" با رتبه علمی پژوهشی مصوب وزارت علوم در سال ۱۳۹۵، ISSN:2383-3823

## Non Destructive Evaluation of Composite Plates Impact-Echo

### Abstract

The impact-echo method is a technique for flaw detection in concrete. It is based on monitoring the surface motion resulting from a short-duration mechanical impact. The method overcomes many of the barriers associated with flaw detection in concrete based on ultrasonic methods. The purpose of this paper is to provide an overview of the technique and to discuss the important parameters involved in this type of testing. One of the key features of the method is the transformation of the recorded time domain waveform of the surface motion into the frequency domain. The impact gives rise to modes of vibration and the frequency of these modes is related to the geometry of the test object and the presence of flaws. The principles involved in frequency analysis are discussed. The importance of the impact duration in relation to flaw detection and other factors affecting the smallest flaw that can be detected are also reviewed. The paper concludes with a summary of the ASTM standard governing the use of the impact-echo method for measuring the thickness of plate-like structures.

**Keywords:** Impact Echo, Composite, Non Destructive Test.



چاپ شده

عنوان و چکیده مقاله اول

## Non Destructive Evaluation of Glass-Epoxy Composite using impact-echo method

M. Tabatabaee Ghomi<sup>a</sup>, Gh. Liaghat<sup>b</sup> and M. Amiri<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Center of Excellence in Precision Dimensional Measurement, Technology Development Institute (TDI) and ACECR  
Researcher, Tehran, Iran;

<sup>b</sup>Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, Tehran, Iran;

### Abstract:

In this paper a new method for Nondestructive testing or Nondestructive evaluation is proposed for Glass-Epoxy composite. For this purpose, impact-echo is used to evaluate the properties of composite materials, detecting internal defects and thickness measurement. In the impact-echo method a steel ball impacts on a composite plate and generates stress waves or P-waves which will be transferred into the plate. The results show that impact response of the composite plate for dominant thickness frequency for measuring thickness and locating the defect is in agreement with the normal measurement. Results represent that this method could be used for thickness measurement and flaw detection of Epoxy-Glass composites with a reasonable accuracy.

**Keywords:** Impact-Echo, Composite plates, Non Destructive Test (NDT), P-Wave

*Accepted* in "International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology", ISSN: 2252-0406

با رتبه علمی پژوهشی مصوب وزارت علوم در سال ۱۳۹۵

پذیرفته شده  
در انتظار نوبت چاپ

عنوان و چکیده مقاله دوم

## بررسی تجربی، عددی و تحلیلی استفاده از روش موج ضربه (Impact Echo) در آزمون غیرمخرب ورق‌های کامپوزیت‌های اپوکسی - الیاف شیشه

محمد امیری\*<sup>۱</sup>، سید محمد طباطبایی قمی<sup>۲</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری پژوهش محور، قطب علمی اندازه‌گیری دقیق ابعادی گروه پژوهشی مهندسی مکانیک پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی، تهران

\* تهران، ۶۸۶-۱۳۴۴۵، mm\_amiri@tdins.org

۲- مدیر قطب علمی اندازه‌گیری دقیق ابعادی گروه پژوهشی مهندسی مکانیک پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی، تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

### چکیده

از روش موج ضربه یا Impact-Echo تاکنون برای اندازه‌گیری و مطالعه 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 و ورق‌های کامپوزیت دارای کاربری گسترده‌ای در صنایع مختلف می‌باشند و نیاز به بازرسی و اندازه‌گیری ضخامت آنها همواره احساس می‌شود. این روش می‌تواند ضخامت قطعات کامپوزیتی را به سرعت و 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 به صورت عددی مدل شده‌اند تا اثر ضخامت بر روی نتایج بدست آمده مشخص شود. نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی امواج و همچنین تحلیل المان محدود حرکت موج با نتایج بدست آمده از دستگاه مقایسه شده است. نتایج بدست آمده در پایان نشان می‌دهد بین ضخامت‌های واقعی اندازه‌گیری شده ورق‌ها و ضخامت‌های بدست آمده از روش تحلیلی و دستگاه Impact-Echo نزدیکی قابل قبولی وجود دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد 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 برای قطعات کامپوزیت (NDT) متمرکز شد.

### کلیدواژگان

موج ضربه، موج P، ورق کامپوزیت، آزمون غیرمخرب، اندازه‌گیری ضخامت

پذیرفته شده در "مجله علوم و فناوری کامپوزیت" با رتبه علمی پژوهشی مصوب وزارت علوم در سال ۱۳۹۵، ISSN:2383-3823