

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی ساخت و تولید

عنوان

تحلیل مقاومت یک ورق کامپوزیتی لایه‌ای تحت تأثیر موج شوک حاصل از انفجار - مقایسه محیط
واسط آب و هوا

نگارنده

محمدجواد رضایی

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۱۵۹۷/۱۳
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد جواد رضایی با شماره دانشجویی ۹۵۰۶۹۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان تحلیل مقاومت یک ورق کامپوزیتی لایه‌ای تحت تأثیر موج شوک حاصل از انفجار-مقایسه محیط واسط آب و هوا که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: ممتاز) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
_____	استادیار	دکتر مهدی گردویی	۱- استاد راهنمای اول
_____	_____	_____	۲- استاد راهنمای دوم
_____	_____	_____	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر هادی پروز	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر سید هادی قادری	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

نه میتوانم مویشتان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته‌تان که شمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی

دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه‌های عمرم را در عصبای دست بودنتان بگذرانم.

پاس بی‌کران پروردگاریت را که حتی مان بنشیند و به طریق علم و دانش رهنمونان شود به بهشتینی رهروان علم و دانش متحیرمان نمود و نوشته‌هایی از علم و معرفت

را روزمان ساخت.

تقدیم به

استاد کرامت‌مندی

که از چشمه جوشان علم و اخلاق شایسته ایشان بهره بردم.

زیر سایه لطف الهی پدیدار باشند و برقرار.

سپاس‌گزاری

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت و به شکر اندرش مزید نعمت، هر نفسی که فرو می‌رود مدحیاست و چون بر می‌آید مفرح ذات، پس در هر نفسی دو نعمت موجودست و بر هر نعمت شکر واجب.

سعی

پس از حمد خداوند باری تعالی بر خود لازم می‌دانم تا زحمات اساتید گرانقدرم را ارج نهم. بسیار خرسندم که افتخار شاگردی استاد فرزانه جناب آقای دکتر حاج مهدی گردویی را دارم، بیش از همه سپاس‌گزار زحمات، محبت‌ها و راهنمایی‌های ایشان هستم و از خداوند رحمان بهترین‌ها را برای ایشان آرزو دارم.

از اساتید بزرگوار آقایان دکتر سید هادی قادری و سید وحید حسینی که خالصانه از علم خویش به من آموختند و زحمت داوری این پایان‌نامه را نیز متقبل شدند، کمال تقدیر و تشکر را دارم. بر خود لازم می‌دانم که از زحمات خالصانه دوست و برادر عزیزم مهندس حسن غفوریان نصرتی کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. همچنین تمام عزیزانی که به هر نحوی در طول دوران تحصیل و تهیه این مجموعه مرا یاری دادند صمیمانه تشکر و قدرانی نمایم و از خداوند متعال برای همه ایشان موفقیت و سربلندی را خواستارم.

تعهد نامه

اینجناب محمد جواد رضایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل مقاومت یک ورق کامپوزیتی لایه‌ای تحت تأثیر موج شوک حاصل از انفجار - مقایسه محیط واسط آب و هوا تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی گردویی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجناب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

مقاوم‌سازی سازه‌های کامپوزیتی که تحت تأثیر موج شوک انفجاری قرار دارند در طراحی سازه‌های محافظتی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، تحلیل عددی المان محدود به کمک هیدروکد ال‌اس‌داین‌ا برای شبیه‌سازی پدیده انفجار و تأثیر آن بر سازه در محیط واسط آب و هوا انجام شده است. سازه کامپوزیتی سه لایه شامل صفحه رویی از جنس سرامیک آلومینا (SiC)، صفحه میانی از جنس فولاد زره‌ای نورد شده گرم (RHA) و لایه زیرین از جنس پلی‌متیل متا‌اکریلات (PMMA) به عنوان لایه هدف می‌باشد. موج شوک حاصل از انفجار یک خرج کروی که در فاصله‌های مختلفی از مرکز سطح این سازه قرار دارد، ایجاد شده و پس از انتشار در محیط واسط به سازه کامپوزیتی برخورد می‌کند. شبیه‌سازی سه بعدی در محیط واسط هوا به روش بارگذاری بهبودیافته (LBE)، و در محیط واسط آب به روش انتخابی لاگرانژی-اویلری (ALE) انجام شد. برای صحت‌سنجی مدل و بررسی دقت تحلیل در هر دو محیط واسط، از نتایج تجربی مقالات استفاده شد. در محیط واسط هوا تأثیر برخورد موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت بر تنش عمود بر سطح و جابجایی ایجاد شده در لایه هدف مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به سازه بهینه که کم‌ترین تنش و تغییرشکل قابل انتقال به لایه هدف را در عین سبکی وزن و نسبت سفتی به وزن بالا داشته باشد، از روش سطح پاسخ استفاده شد. به کمک مدل رگرسیون درجه دو، تابع تنش و تغییرشکل ایجاد شده در لایه هدف بدست آمد و مقادیر بهینه ضخامت لایه‌ها در بازه تعریف شده، پیش‌بینی شد. به صورت مشابه، در محیط واسط آب نیز به بررسی تأثیر برخورد موج شوک در فواصل مختلف سازه کامپوزیتی، بر متغیر پاسخ جابجایی و تنش ایجاد شده در لایه هدف پرداخته شده است. همچنین برای دستیابی به سازه‌ی سبک، با نسبت سفتی به وزن بالا، دو مدل برای پیش‌بینی میزان جابجایی و تنش ایجاد شده در لایه هدف بدست آمد. در پایان، یک سازه با مشخصات یکسان در دو محیط واسط آب و هوا تحت بارگذاری انفجاری مورد مقایسه قرار گرفته است. در انفجار زیرآب در مقایسه با محیط هوا، تغییرشکل و تنش قابل انتقال به لایه هدف افزایش پیدا کرده است. بالا بودن سرعت موج به علت چگالی بالای آب و همچنین مشارکت سیال بیشتر در افزایش قدرت موج شوک برخوردی با سازه کامپوزیتی را می‌توان دلیل این پدیده دانست.

واژگان کلیدی: انفجار در هوا، انفجار زیرآب، موج شوک، ایمپالس، سازه کامپوزیتی، بهینه‌سازی، روش سطح

پاسخ

مقاله مستخرج از پایان نامه

رضایی، م. ج.؛ گردویی، م.؛ مطالعه عددی شکل دهی انفجاری آزاد ورق زرهی فولادی RHA؛ پانزدهمین همایش ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ساخت و تولید؛ تهران؛ ۱۳۹۷

فهرست عنوان‌ها

ت	تقدیم به.....
ج	سپاسگزاری.....
ح	تعهد نامه.....
خ	چکیده.....
د	مقاله مستخرج از پایان نامه.....
ذ	فهرست عنوان‌ها.....
س	فهرست شکل‌ها.....
ض	فهرست جدول‌ها.....
ظ	فهرست نشانه‌ها.....
۱	فصل ۱ مقدمه.....
۲	۱-۱-۱- پدیده‌ی انفجار.....
۳	۱-۱-۱- بررسی فیزیکی انفجار در هوا.....
۴	۲-۱-۱- بررسی فیزیکی انفجار زیر آب.....
۵	۲-۱- پیشینه‌ی تحقیق.....
۵	۱-۲-۱- تحقیقات انجام شده در محیط هوا.....
۸	۲-۲-۱- تحقیقات انجام شده در محیط آب.....
۱۱	۳-۱- ضرورت و نوآوری تحقیق.....
۱۲	۴-۱- ساختار کلی پایان نامه.....
۱۳	فصل ۲ مبانی انفجار و رفتار موج شوک در محیط واسط هوا و آب.....
۱۳	۱-۲- پدیده انفجار و گسترش موج شوک در محیط واسط هوا و آب.....
۱۹	۲-۲- مشخصات اصلی یک انفجار.....
۲۱	۱-۲-۲- مقیاس‌های انفجار.....
۲۲	۲-۲-۲- معادلات پرش رنگین - هوگونویوت.....
۲۴	۳-۲- رفتار موج شوک انفجار در محیط هوا.....
۲۴	۱-۳-۲- فشار لحظه‌ای.....

۲۵	..... ۲-۳-۲ حداکثر افزایش یا پرش فشاری
۲۶	..... ۳-۳-۲ مدت زمان بقاء
۲۶	..... ۴-۳-۲ ایمپالس موج انفجار بر واحد سطح
۲۸	..... ۴-۲ انفجار زیر آب
۲۸	..... ۱-۴-۲ رفتار دو مرحله‌ای
۲۹	..... ۲-۴-۲ تاریخچه فشار - زمان
۳۲	..... ۳-۴-۲ پارامترهای مورد بررسی در UNDEX

فصل ۳ مدل‌سازی انفجار..... ۳۵

۳۶	..... ۱-۳-۱ هیدروکود
۳۶	..... ۱-۳-۱ روش‌های شبیه‌سازی موج شوک در هیدروکدها
۳۷	..... ۲-۳-۱ گسسته‌سازی با استفاده از هیدروکدها
۴۳	..... ۲-۳-۲ نرم‌افزار LS-DYNA
۴۴	..... ۳-۳-۱ مدل‌های ساختاری و معادلات حالت
۴۴	..... ۱-۳-۳ مدل‌های مادی در تغییرشکل غیرالاستیک در نرخ کرنش بالا
۴۷	..... ۲-۳-۳ معادلات حالت
۴۹	..... ۴-۳-۱ مشخصات مدل
۵۲	..... ۵-۳-۱ کنترل گام زمانی
۵۳	..... ۶-۳-۱ ماده منفجره
۵۵	..... ۷-۳-۱ بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ
۶۰	..... ۸-۳-۱ طراحی آزمون جهت صحت‌سنجی

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۶۳

۶۳	..... ۱-۴-۱ مقدمه
۶۴	..... ۲-۴-۱ نتایج مدل‌سازی انفجار در محیط واسط هوا
۶۴	..... ۱-۲-۴-۱ استقلال نتایج از اندازه المان
۶۵	..... ۲-۲-۴-۱ صحت‌سنجی مدل برای یک هدف تک لایه فلزی
۷۴	..... ۳-۲-۴-۱ نتایج بهینه‌سازی سازه کامپوزیتی تحت بارگذاری انفجاری در محیط واسط هوا
۸۴	..... ۳-۴-۱ نتایج و بحث در محیط واسط آب
۸۴	..... ۱-۳-۴-۱ استقلال نتایج از اندازه المان
۸۵	..... ۲-۳-۴-۱ صحت‌سنجی نتایج انفجار در محیط واسط آب
۸۹	..... ۳-۳-۴-۱ نتایج بهینه‌سازی سازه کامپوزیتی
۱۰۰	..... ۴-۴-۱ مقایسه سازه کامپوزیتی در محیط واسط آب و هوا

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها.....۱۰۵

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۵

۵-۲- ارائه‌ی پیشنهادها..... ۱۰۸

منبع‌ها..... ۱۱۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- انتشار موج شوک در هوا ۴
- شکل ۲-۱- موج شوک و حباب گازی تشکیل شده در یک انفجار زیر آب ۵
- شکل ۱-۲- طرح‌واره تغییرات فشار موج انفجار در محیط هوا ۲۰
- شکل ۲-۲- نمودار فشار-زمان جهت محاسبه ایمپالس ۲۱
- شکل ۳-۲- نمونه از امواج فشاری ناشی از انفجار شیمیایی و اتمی ۲۷
- شکل ۴-۲- موج شوک و حباب گازی از یک انفجار زیر آب ۲۹
- شکل ۵-۲- تاریخچه فشار-زمان در یک انفجار زیر آب [۵۴] ۳۰
- شکل ۶-۲- مکانیزم آسیب بر روی سازه‌های دریایی تحت انفجار زیر آب ۳۲
- شکل ۱-۳- تقریبی برای تعریف $ABfx$ با استفاده از گسسته‌سازی برای انتگرالگیری عددی ۳۸
- شکل ۲-۳- مقایسه بین روش‌های لاگرانژی، اویلری و لاگرانژی - اویلری دلخواه ۴۱
- شکل ۳-۳- مدل سه‌بعدی صفحات مش‌بندی شده سازه کامپوزیتی ۴۹
- شکل ۴-۳- طرح‌واره ساختار مورد ارزیابی ۵۰
- شکل ۵-۳- طرح‌واره مدل‌سازی شده در محیط آب ۵۴
- شکل ۶-۳- طرح‌واره ساختار مورد آزمایش جهت صحت‌سنجی در محیط هوا ۶۰
- شکل ۱-۴- همگرایی مش در محیط هوا ۶۴
- شکل ۲-۴- شبکه بندی صفحه تک لایه فلزی دایره‌ای ۶۵
- شکل ۳-۴- خیز بی‌بعد شده برای چهار آزمون طراحی شده برای صحت‌سنجی در محیط هوا ۶۵
- شکل ۴-۴- مقایسه تغییرشکل بی‌بعد شده مرکز ورق برای آزمون‌های طراحی شده ۶۷
- شکل ۵-۴- تغییرات خیز بی‌بعد شده مرکز ورق برای آزمون T3، مقایسه نتایج عددی و تجربی ۶۷
- شکل ۶-۴- فشار بیشینه برای چهار آزمون طراحی شده از نتایج تحلیلی و عددی ۶۸
- شکل ۷-۴- نمودار فشار- زمان وارد بر سطح صفحه فولادی RHA برای آزمون T3 ۶۹

- شکل ۴-۸ نمودار تنش و جابجایی بر حسب زمان برای آزمون T3 ۶۹
- شکل ۴-۹ توزیع تنش موثر (بر حسب Pa) در چهار مرحله از زمان فرایند برای آزمون T3 ۷۰
- شکل ۴-۱۰ توزیع پارامتر آسیب برای نمونه تغییرشکل یافته بعد از آزمون T3 ۷۱
- شکل ۴-۱۱ تاثیر جرم خرج انفجاری و فاصله استقرار خرج بر ایمپالس حاصل از موج شوک در محیط هوا ۷۱
- شکل ۴-۱۲ مقادیر تحلیلی با مقادیر شبیه‌سازی عددی در محیط هوا ۷۳
- شکل ۴-۱۳ الف) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده، ب) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برآزش یافته ۷۶
- شکل ۴-۱۴ چگونگی تاثیر ضخامت لایه فلزی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف ۷۸
- شکل ۴-۱۵ چگونگی تاثیر ضخامت لایه فلزی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر مقدار جابجایی لایه هدف ۷۹
- شکل ۴-۱۶ نمودار سطح پاسخ براساس تغییر ضخامت لایه‌های فلزی و سرامیکی برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف ۸۰
- شکل ۴-۱۷ نمودار سطح پاسخ بر اساس تغییر ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف ۸۰
- شکل ۴-۱۸ مقادیر تنش ایجاد شده در لایه هدف تحت شرایط بهینه بر حسب Pa ۸۳
- شکل ۴-۱۹ مقادیر بیشینه جابجایی در لایه هدف تحت شرایط بهینه بر حسب m ۸۳
- شکل ۴-۲۰ همگرایی مش صفحه فولادی در محیط آب ۸۴
- شکل ۴-۲۱ شبکه‌بندی صفحه مستطیلی ۸۵
- شکل ۴-۲۲ نمودار جابجایی به زمان برای آزمون‌های طراحی شده و مقایسه با نتایج تجربی [۲۵] ۸۶
- شکل ۴-۲۳ مقایسه آزمون T3-MS1 بر حسب cm، با نمونه تجربی $\text{Shock factor} = 0.671$ ۸۷
- شکل ۴-۲۴ مقایسه آزمون T4-MS2 بر حسب cm، با نمونه تجربی $\text{Shock factor} = 0.794$ ۸۷
- شکل ۴-۲۵ مقایسه تغییرشکل دائمی صفحه بر حسب پارامتر موج شوک ۸۸
- شکل ۴-۲۶ نمودار فشار - زمان انفجار زیر آب برای آزمون T4-MS2 ۸۸
- شکل ۴-۲۷ نمودار فشار و جابجایی بر حسب زمان برای آزمون T4-MS2 ۸۹
- شکل ۴-۲۸ الف) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده، ب) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برآزش یافته ۹۱

- شکل ۴-۲۹-الف) نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی تنش ایجاد شده در لایه هدف ب) نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی جابجایی ایجاد شده در لایه هدف ۹۱
- شکل ۴-۳۰-چگونگی تاثیر ضخامت لایه فولادی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف ۹۴
- شکل ۴-۳۱-چگونگی تاثیر ضخامت لایه فولادی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر مقدار جابجایی لایه هدف ۹۵
- شکل ۴-۳۲-اثرات متقابل t_m و t_c بر تنش ایجاد شده در لایه هدف ۹۵
- شکل ۴-۳۳-اثرات متقابل t_m و t_c بر جابجایی ایجاد شده در لایه هدف ۹۶
- شکل ۴-۳۴-نمودار سطح پاسخ براساس تغییر ضخامت لایه های فلزی و سرامیکی برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف ۹۷
- شکل ۴-۳۵-نمودار سطح پاسخ بر اساس تغییر ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف ۹۸
- شکل ۴-۳۶-نمودار ستونی اختلاف بین تنش و جابجایی در لایه هدف برای مقایسه دو محیط آب و هوا.. ۱۰۲
- شکل ۴-۳۷-بیشینه جابجایی ایجاد شده در لایه هدف برای چهار آزمون مورد مقایسه بر حسب m ۱۰۳
- شکل ۴-۳۸-بیشینه تنش ایجاد شده در لایه هدف برای چهار آزمون مورد مقایسه بر حسب Pa ۱۰۳

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی RHA [۶۸] ۵۰
- جدول ۲-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی صفحات فولادی، سرامیکی و پلیمری ۵۰
- جدول ۳-۳ ثوابت معادله مادی جانسون-کوک و جانسون هلمکوئیست و معادله حالت گرونایزن ۵۱
- جدول ۴-۳ ضرایب مدل پلاستیک - سینماتیک صفحه فولادی RHA و پلیمری PMMA ۵۲
- جدول ۵-۳ ضرایب مدل مادی نول محیط آب [۷۴] ۵۲
- جدول ۶-۳ ضرایب معادله حالت گرونایزن محیط آب ۵۲
- جدول ۷-۳ مدل مادی ماده منفجره TNT [۷۶] ۵۳
- جدول ۸-۳ ضرایب معادله حالت JWL ماده منفجره TNT [۷۶] ۵۳
- جدول ۹-۳ سطوح طراحی و متغیرهای آن جهت استفاده در نرم‌افزار Minitab ۵۶
- جدول ۱۰-۳ آزمایش‌های طراحی شده به روش RSM برای محیط هوا ۵۸
- جدول ۱۱-۳ آزمایش‌های طراحی شده به روش RSM برای محیط آب ۵۹
- جدول ۱۲-۳ آزمون طراحی شده جهت صحت‌سنجی در محیط هوا ۶۰
- جدول ۱۳-۳ ترکیب شیمیایی Mild steel ۶۱
- جدول ۱۴-۳ ترکیب شیمیایی HS steel ۶۱
- جدول ۱۵-۳ خواص فیزیکی و مکانیکی HS Steel و Mild Steel جهت صحت‌سنجی در محیط آب [۲۵] ۶۱
- جدول ۱۶-۳ آزمون طراحی شده جهت صحت‌سنجی انفجار در محیط آب ۶۲
- جدول ۱-۴ مقایسه مقادیر شبیه‌سازی عددی با آزمون تجربی نیوبرگر [۹] ۶۶
- جدول ۲-۴ مقایسه مقادیر فشار بیشینه برای چهار آزمون طراحی شده از نتایج تحلیلی و عددی ۶۸
- جدول ۳-۴ مقایسه ایمپالس حاصل از انفجار در هوا به روش تحلیلی و عددی ۷۳
- جدول ۴-۴ جدول طراحی آزمایش به روش RSM به همراه پاسخ در محیط هوا ۷۵
- جدول ۵-۴ جدول تحلیل واریانس برای میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف ۷۷

- جدول ۴-۶ تحلیل واریانس برای جابجایی لایه هدف ۷۷
- جدول ۴-۷ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان جابجایی لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM ۸۱
- جدول ۴-۸ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM ۸۲
- جدول ۴-۹ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر عددی سفتی به وزن، تنش و جابجایی لایه هدف ۸۳
- جدول ۴-۱۰ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر تجربی در محیط آب ۸۶
- جدول ۴-۱۱ جدول طراحی آزمایش به روش RSM به همراه پاسخ در محیط آب ۹۰
- جدول ۴-۱۲ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ جابجایی لایه هدف ۹۲
- جدول ۴-۱۳ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ تنش ایجاد شده در لایه هدف ۹۳
- جدول ۴-۱۴ مقادیر بهینه پارامترها با هدف حداقل کردن میزان تنش، جابجایی در لایه هدف و افزایش سفتی به وزن در سازه کامپوزیتی ۹۹
- جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان جابجایی لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM ۹۹
- جدول ۴-۱۶ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM ۱۰۰
- جدول ۴-۱۷ آزمون‌های طراحی شده جهت مقایسه سازه کامپوزیتی در دو محیط واسط آب و هوا ۱۰۰

فهرست نشانه‌ها

E_t	مدول مماسی	A	ثابت مدل ماده جانسون-کوک
\bar{E}	انرژی داخلی در حجم اولیه	a	تصحیح مرتبه اول برای حجم
equ.	مقدار معادل	A_p	سطح مقطع صفحه
G	مدول برشی	A'	ثابت معادله حالت JWL
I	ایمپالس	A''	ثابت مدل ماده جانسون-هلمکوئیست
k	سختی محیط	B_{ad}	ضریب بی‌درروی حجمی
M	ماخ	B	ثابت مدل ماده جانسون-کوک
M'	ثابت مدل ماده جانسون-هلمکوئیست	B'	ثابت معادله حالت JWL
m	ثابت مدل ماده جانسون-کوک	B''	ثابت مدل ماده جانسون-هلمکوئیست
N	ثابت مدل ماده جانسون-هلمکوئیست	b	عرض صفحه
n	ثابت مدل ماده جانسون-کوک	C	ثابت مدل ماده جانسون-کوک
P	فشار	c'	ثابت مدل ماده جانسون-هلمکوئیست
P_s	فشار بیشینه	c_0	سرعت صوت در هوا
P_0	فشار محیط	c_s	سرعت صوت در جامدات
P^*	فشار نرمال	c_G	سرعت صوت در گازها
$p(t)$	فشار لحظه‌ای	c_L	سرعت صوت در مایعات
S	ضرایب معادله حالت گرونایزن	D_{CJ}	سرعت انفجار چاپمن-ژوگت
SF	پارامتر شوک	D	پارامتر آسیب جانسون-کوک
S'	سختی خمشی	D'	پارامتر آسیب جانسون-هلمکوئیست
T	دما	d	قطر صفحه
t	زمان آنی	E	مدول یانگ
t_d	زمان پالس مثبت فشار	E_s	انرژی منتقل شده موج شوک
t_m	ضخامت صفحه فولادی	E_i	انرژی داخلی

α	نسبت سفتی به وزن	t_c	ضخامت صفحه سرامیکی
θ	کاهش ثابت زمانی	t_p	ضخامت صفحه پلیمری
α'	پارامتر وجوه مکعب مرکزی	T_m	دمای ذوب
σ_y	تنش تسلیم	T_r	دمای محیط
σ	تنش جریان	T^*	تنش هیدرواستاتیک
σ^*	تنش مؤثر	U	سرعت موج شوک
σ_i^*	تنش نرمال مؤثر	u	سرعت ذره
σ_f^*	تنش شکست مؤثر	R	شعاع صفحه
ε	کرنش	R'	فاصله خرج انفجار از صفحه
ε_0	کرنش اولیه	R_0	ثابت جهانی گاز
ε_p	کرنش پلاستیک	R_1	ثابت معادله حالت JWL
$\Delta\varepsilon_p$	تغییرات کرنش پلاستیک مومسان	R_2	ثابت معادله حالت JWL
ε_f	کرنش شکست	V	حجم
ε_p^f	کرنش شکست جانسون-هلمکوئیست	W	جرم خرج انفجار
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش	Z	مقیاس فاصله
$\dot{\varepsilon}_p$	نرخ کرنش پلاستیک	z	امپدانس صوتی ویژه
$\dot{\varepsilon}^*$	نرخ کرنش مؤثر	ρ	چگالی
		γ	نرخ گرمای مخصوص
		γ_0	ضریب ثابت گامای گرونایزن
		μ	تابع حجم نسبی
		α_{sh}	پارامتر شکل موج
		v	ضریب پواسون
		ω	ثابت معادله حالت JWL
		δ	جابجایی

فصل ۱ مقدمه

صفحات^۱ یکی از اجزاء اصلی سازه‌های مهندسی را تشکیل می‌دهد. این صفحات در طی عملیات مختلفی چون شکل‌دهی، جوشکاری، پرچکاری، خم‌کاری و یا هر فرایند دیگر تولید به سازه مورد نظر تبدیل می‌شود. سازه‌های زمینی ممکن است تحت بارهای انفجار در هوا^۲ در یک محیط جنگی یا تحت اثر حملات تروریستی یا خرابکارانه قرار گیرد، در حالی که سازه‌های دریایی ممکن است با حمله موشک بالای سطح آب یا انفجار زیرآب^۳ توسط حمله یک اژدر یا یک انفجار زیرآبی قرار گیرد. در مقابل سازه‌های هوایی تحت تأثیر حمله انفجاری در هوا قرار خواهد داشت. علاوه بر این، انفجار گاز در تأسیسات و صنایع دریایی نیز رخ می‌دهد. امروزه با گسترش تهدیدات نظامی علیه تأسیسات نظامی کشورها به خصوص صنایع نظامی دریایی، ضرورت تحلیل پدیده انفجار دوچندان شده‌است. اثر پدیده‌ی UNDEX به عنوان یکی از مسائل مهم و پیچیده اندرکنش آب و سازه، بر روی سازه‌های شناور و غوطه‌ور، از نظر کاربردهای مهندسی و پدافند غیرعامل بسیار مهم و استراتژیک می‌باشد. لذا هر کشوری که به آب‌های آزاد راه دارد نیازمند آینده‌نگری نسبت به مقاوم‌سازی سازه‌ها و تأسیسات دریایی در مقابل این پدیده است. از جنگ جهانی دوم تاکنون در پروژه‌های صنعتی متعددی مانند شکل‌دهی بدنه کشتی‌ها،

^۱ Plates

^۲ Air blast

^۳ Underwater explosion (UNDEX)

زیردریایی‌ها و نیز در عملیات نظامی و همچنین اخیراً برای خارج کردن سازه‌های فرسوده دریایی مانند سکوها از انفجار زیرآب استفاده می‌شود. امواج حاصل از انفجار زیرآب تاثیر بسیار مهمی بر سازه‌های غوطه‌ور و شناور مانند زیردریایی‌ها، خطوط لوله، سکوهای دریایی، تأسیسات نفتی و همچنین سازه‌های زمینی و زیرزمینی مانند پالایشگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده در خط مقدم نبرد دارد. لذا در راستای نیل به طراحی و ساخت یک سازه مقاوم و در نتیجه کاهش خسارات وارد بر این سازه‌ها، تحلیل دقیق پدیده انفجار زیرآب و انفجار در هوا یک ضرورت تلقی می‌شود.

زره‌های محافظتی^۱ سازه‌هایی را گویند که به‌صورت ویژه برای مقاومت در برابر تهدیدهای نظامی شامل انفجار و ضربه بالستیک طراحی و ساخته می‌شود. یک زره زمانی کارایی لازم را دارد که خصوصیتی همچون چگالی پایین، مقاومت به شکست در برابر تنش‌های کششی بزرگ و مدول برشی بالا را داشته باشد. زره‌های تک‌لایه فلزی به دلیل بالا بودن چگالی، همه‌ی خواص فوق را ارضا نمی‌کند اما مواد سرامیکی غیر از مقاومت در برابر تنش کششی، بقیه موارد را پوشش می‌دهد. در سال‌های اخیر به منظور نیل به اهداف فوق، در ادوات نظامی، دریایی و هوافضا نوع جدیدی از ورق‌های مرکب لایه‌ای شامل ترکیبی از سرامیک، فلز و کامپوزیت پلیمری مستحکم شده با فیبر^۲ (FRP) به عنوان لایه پشتیبان^۳ به کرات مورد استفاده قرار گرفته‌است.

۱-۱- پدیده‌ی انفجار

انفجار^۴ یعنی آزاد شدن سریع و ناگهانی انرژی در مقیاس بزرگ. انفجار بر حسب طبیعت آن به سه دسته فیزیکی، هسته‌ای و شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شود. انرژی انفجار فیزیکی، ممکن است از ترکیدن سیلندر حاوی گاز فشرده و یا مخلوط کردن دو مایع با دمای مختلف به‌وجود آید. در یک انفجار هسته‌ای، انرژی از شکل‌گیری هسته‌های اتمی مختلف به وسیله توزیع مجدد پروتون‌ها و نوترون‌ها در درون هسته در حال برهم‌کنش تولید می‌شود. انفجار شیمیایی از اکسیداسیون سریع مولکول‌های کربن و هیدروژن ایجاد می‌شود.

^۱ Protective armors

^۲ Fiber Reinforced Polymer (FRP)

^۳ Backing

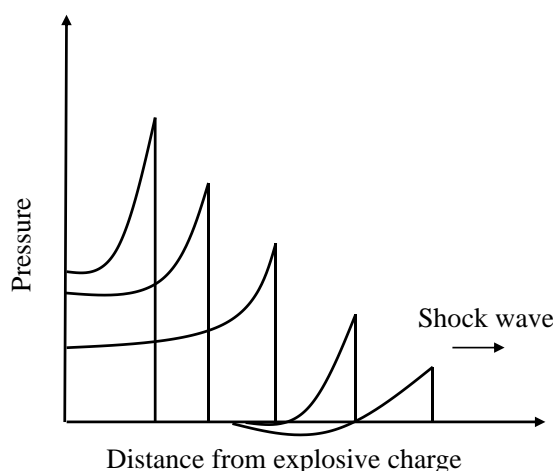
^۴ Explosion

مواد منفجره را می‌توان با توجه به حالت آن‌ها به سه نوع جامد، مایع و گاز طبقه‌بندی کرد. مواد منفجره جامد معمولاً انفجارهای بزرگ ایجاد می‌کنند. هم‌چنین می‌توان آن‌ها را بر حسب حساسیتشان به احتراق، به مواد منفجره اولیه و ثانویه دسته‌بندی کرد. مواد منفجره اولیه موادی هستند که به راحتی مثلاً به وسیله یک جرقه، شعله یا ضربه تحریک و سپس منفجر می‌شود. موادی چون جیوه فولمینات و آزید سرب مواد منفجره اولیه هستند. مواد منفجره ثانویه وقتی منفجر شوند، موج‌های انفجاری تولید می‌کنند که می‌توانند منجر به صدمات گسترده در محیط اطراف شوند. این دسته شامل TNT و ANFO می‌باشد. انرژی شیمیایی ذخیره شده در ماده منفجره از طریق امواج حاصل از انفجار در محیط پیرامون آن‌ها پراکنده می‌شود. این محیط پیرامونی می‌تواند هوا و آب باشد.

۱-۱-۱ بررسی فیزیکی انفجار در هوا

هنگامی که ماده منفجره به طور مناسب تحریک شود فرایند انفجاری منجر به تولید ناگهانی حجم وسیعی از گازها می‌گردد. این توده پر فشار هوای اطراف را به عقب رانده و باعث پیدایش امواج انفجاری می‌شود. در پیشانی این توده پر فشار هوا موج شوک شکل می‌گیرد که حاوی بیشتر انرژی آزاد شده به وسیله انفجار است. موج انفجار به صورت ناگهانی بزرگ می‌شود تا به فشاری بالاتر از فشار محیط پیرامون برسد. این موضوع به عنوان بیش‌فشار^۱ مطرح می‌گردد که با انبساط شوک کم‌کم از بین می‌رود. بعد از مدت کوتاهی ممکن است فشار به طور ناگهانی از فشار پیرامون پایین‌تر بیاید که به فاز منفی انفجار معروف است. در چنین فاز منفی، یک خلأ جزئی به وجود می‌آید و هوا به داخل مکیده می‌شود. این پدیده هم‌چنین با جریان‌های مکشی بزرگی که تا فاصله بسیار دوری از منبع انفجار که مواد حاصل از انفجار را حمل می‌کند، همراه است. در شکل ۱-۱ انتشار موج شوک در محیط هوا به صورت شماتیک نمایش داده شده‌است.

^۱ Overpressure

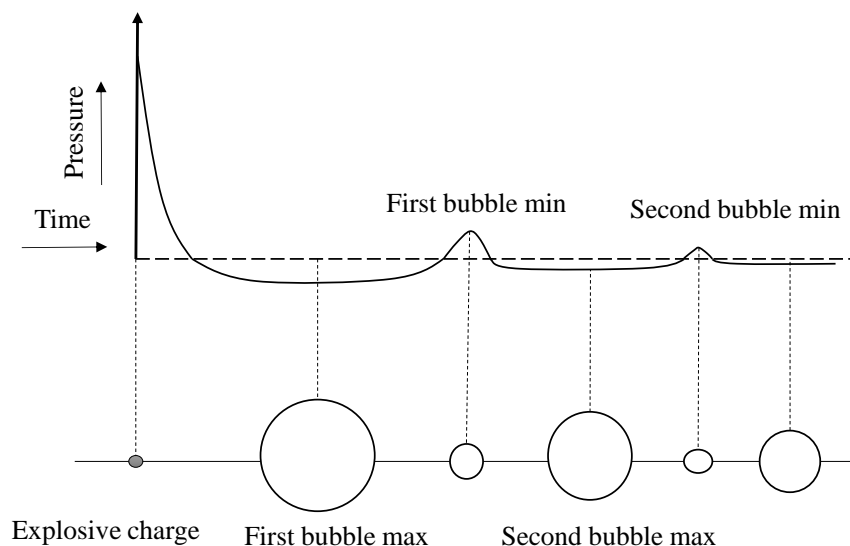


شکل ۱-۱- انتشار موج شوک در هوا

۲-۱-۱ بررسی فیزیکی انفجار زیرآب

انفجار زیرآب (UNDEX) با انفجار در هوا کاملاً متفاوت است. دو ویژگی، چگالی بالا و تراکم‌ناپذیری آب باعث تفاوت عمده آن با محیط هوا شده‌است. این دو ویژگی موجب شده تا آب محیطی بسیار مناسب برای انتقال موج شوک حاصل از انفجار شود. تأثیرات انفجار زیرآب بر روی سازه‌ها به مقدار و نوع ماده منفجره، فاصله از نقطه انفجار، عمقی که در آن انفجار رخ می‌دهد و عمق آب بستگی دارد. علاوه بر آن وجود سطوح بازتابنده مانند بستر دریا، سطح آب و نوع و فاصله آن‌ها از سازه‌ها نیز در این تأثیرات مهم است. آسیب اولیه به سازه به وسیله موج شوک اولیه ایجاد می‌شود. سپس این آسیب توسط پالس‌های ثانویه افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱ موج شوک و پالس حباب^۱ تشکیل شده در یک انفجار زیرآب را نشان می‌دهد.

^۱ Bubble pulse



شکل ۱-۲ موج شوک و حباب گازی تشکیل شده در یک انفجار زیر آب

۲-۱- پیشینه‌ی تحقیق

برای تحلیل خیز ورق‌های گیردار تحت بارگذاری انفجاری و همچنین تاثیر محیط واسط بر نحوه رفتار ورق می‌بایست بررسی‌ها در دو حوزه بارگذاری در محیط هوا و محیط آب انجام پذیرد. تحقیقات بسیاری در این دو حوزه انجام شده‌است که در ادامه، تاریخچه هر یک از این حوزه‌ها به طور مجزا بیان می‌شود.

۱-۲-۱ تحقیقات انجام شده در محیط هوا

از اولین تحقیقات تحلیلی انجام شده بر روی تغییرشکل پیشینه صفحات دایروی می‌توان به تحقیق فلورنس^۱ [۱] اشاره کرد. ایشان با استفاده از مدل صلب-مومسان برای مدل کردن رفتار صفحه مورد مطالعه، معادله خیز مرکز صفحه دایروی را بدست آورد. ویرزبیکي و فلورنس^۲ [۲] به بررسی تحلیلی - تجربی خیز مرکز صفحات دایره‌ای تحت اثر ایمپالس توزیع شده یکنواخت با استفاده از تئوری ویسکوپلاستیک پرداختند. ویرزبیکي برای تکمیل مطالعه فلورنس، متوجه انحراف بین مقدار تحلیلی خیز با نتایج تجربی بدست آمده در تغییرشکل‌های بزرگ و با نرخ کرنش بالا مانند فرایند شکل‌دهی انفجاری شد. وی دلیل این ناهماهنگی را حساسیت به نرخ کرنش صفحات مورد بررسی دانست. کینگری و بولماش^۳ [۳] معادلاتی را برای پیش‌بینی پارامترهای انفجار

^۱ Florence

^۲ Wierzbicki and Florence

^۳ Kingery and Bulmash

در محیط هوا برای خرج انفجاری کروی که موج کروی در محیط تولید می‌کنند، بدست آوردند. معادلات این روش به روابط سلاح متعارف^۱ معروف است که برای پیش‌بینی فشار بیشینه و بار ایجاد شده بر روی سازه‌های مهندسی استفاده می‌شود. زکاس و شفلر^۲ [۴] به عوامل مربوط به نحوه مش‌بندی که ممکن است باعث خطای تحلیل‌های المان محدود گردند، پرداختند. آن‌ها بررسی خود را بر روی عواملی که در شبکه محاسباتی ممکن است منجر به اختلاف بین محاسبات و واقعیت پدیده شود، متمرکز کردند. چگونگی تغییر اندازه المان‌ها و تغییرات ناگهانی در نحوه مش‌بندی از عواملی بود که مورد بررسی قرار گرفت. استوفل و همکاران^۳ [۵] در یک روش عددی، به اعمال بارگذاری ضربه‌ای بر ورق دایروی پرداختند. در این مدل آن‌ها از فرضیات سینماتیکی که تغییرشکل‌های برشی عرضی، اینرسی دورانی و اثرات غیرخطی بودن هندسی را لحاظ می‌نمود، بهره بردند. مدل ماده مورد استفاده در این تحقیق، رفتار الاستیک - پلاستیک با سخت شوندهگی ایزوتروپیک و سینماتیک و با در نظر گرفتن حساسیت نسبت به نرخ کرنش می‌باشد. هال و وو^۴ [۶] به بررسی اثر همزمان شوک در داخل زمین و موج شوک در هوا بر روی سازه‌های اطراف پرداختند. آن‌ها دریافتند که هنگامی که یک انفجار در سطح زمین رخ می‌دهد، موج شوک هم از طریق زمین و هم از طریق هوا به سازه‌های موجود در اطراف می‌رسد. آن‌ها دو پالس بارگذاری مختلف، یکی از هوا و یکی از زمین، که از نظر زمان رسیدن بیشینه فشار و حتی شکل پالس با هم متفاوت هستند را بر سازه‌های اطراف وارد کرده و به بررسی پاسخ دینامیکی آن پرداختند. یانگ^۵ و همکاران [۷] رفتار یک ورق نازک فلزی دایروی تحت موج شوک حاصل از انفجار در هوا هنگامی که بر روی سیال غیر ویسکوز قرار دارد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها انتشار موج شوک را شبیه‌سازی نمودند اما در حالی که هوا و سیال زیرین را مدل نموده بودند، یک پالس فشاری بر روی ورق فلزی اعمال کرده و اثر میدان‌های جریان ایجاد شده در دو سیال بر رفتار مکانیکی سازه فلزی را مورد تحقیق قرار دادند. بالدن و نوریک^۶ [۸] در یک پژوهش، به شبیه‌سازی عددی رفتار دینامیکی ورق‌های فولادی در برابر بارگذاری

^۱ Conventional Weapons (ConWep)

^۲ Zukas and Scheffler

^۳ Stoffel

^۴ Hal and Wu

^۵ Yong

^۶ Baldwin and Nurick

انفجاری حاصل از لایه ماده منفجره که روی آن قرار گرفته است، پرداختند. آن‌ها واماندگی ورق و رفتار پس از واماندگی آن را مورد توجه قرار دادند و به صحنه‌گذاری مدل عددی خود با نتایج تست‌های تجربی خود پرداختند. نیوبرگر و همکاران^۱ [۹] به بررسی عددی-تجربی پاسخ دینامیکی صفحات دایروی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری در فاصله نزدیک به صفحه با خرج انفجاری کروی در محیط هوا پرداخت. ایشان در بررسی خود از معادله تغییرشکل هاپکینس مقیاس شده [۱۰] استفاده کردند و همچنین اثر کلی حساسیت به نرخ کرنش را در پاسخ مدل در نظر گرفت. امینی^۲ [۱۱] اثر لایه پلی‌اوره را بر پاسخ ورق‌های دایروی فولادی DH-36 تحت بارگذاری ضربه‌ای به شکل تجربی و عددی بررسی نمودند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، آن‌ها دریافتند هنگامی که یک لایه از ماده پلی‌اوره روی سطح در معرض ضربه رسوب داده می‌شود، واماندگی ورق را در طی پروسه اثرات اولیه موج شوک حاصل، گسترش می‌دهد. تحت فشار، سفتی لایه پلی‌اوره به شدت افزایش می‌یابد (۱۰ الی ۲۰ برابر) و در نتیجه امپدانس این لایه پلیمری افزایش یافته و به امپدانس^۳ فولاد نزدیک‌تر می‌شود و در نتیجه انرژی بیشتری از این لایه به فولاد منتقل می‌گردد. این محققان در ادامه پژوهش، این فرایند را توسط نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی نمودند. نتایج شبیه‌سازی ورق‌های تک لایه و دو لایه تقریب بسیار خوبی با نمونه‌های آزمایشگاهی داشتند. ستوده‌شفی و همکاران^۴ [۱۲] تغییرشکل ورقی از جنس فولاد زرهی را تحت بارگذاری انفجاری خرج‌هایی از جنس C4 و TNT توسط نرم‌افزار LS-DYNA و با فرمولاسیون ALE مدل‌سازی نمودند. در مطالعه آنان نسبت جابجایی مرکز ورق به ضخامت ورق در شبیه‌سازی تطابق بسیار نزدیکی با نتایج تجربی مرتبط داشته است. زمانی و گودرزی^۵ [۱۳] به بررسی تجربی و عددی خیز بیشینه ورق‌های دایروی آلومینیومی در برابر انفجار در هوا پرداختند. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر نحوه برخورد موج شوک (یکنواخت و غیریکنواخت) بر میزان تغییرشکل بود که منجر به استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی میزان خیز بیشینه وسط ورق شد. زمانی و اصلانی^۶ [۱۴] به بررسی تأثیر امپدانس و ضخامت لایه‌های

^۱ Neuberger

^۲ Amini

^۳ Impedence

^۴ Chafi

^۵ Zamani and Goudarzi

^۶ Zamani and Aslani

متفاوت بر خیز لایه هدف در سیستم‌های زرهی لایه‌بندی شده تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از روش تحلیل عددی پرداخت. هدف کلی ایشان مطالعه رفتار سازه‌های چند لایه در نرخ کرنش‌های بالا و تاثیر آن‌ها بر میرایی موج شوک و خیز لایه هدف بود. فلاح و همکاران^۱ [۱۵] در بررسی خود به آنالیز ابعادی پاسخ دینامیکی ورق زرهی RHA در معرض انفجار متمرکز خرج انفجاری استوانه‌ای در محیط هوا پرداختند. آیسا و همکاران^۲ [۱۶] در یک مطالعه عددی به مقایسه پاسخ موج شوک انفجاری بر روی یک سازه مهندسی تک لایه از جنس فولاد RHA با یک سازه ترکیبی دولایه از جنس فولاد RHA و سازه ساندویچی (هسته لانه زنبوری آلومینیومی با لایه رویی و زیری از جنس فیبرکربن) پرداختند. آن‌ها در این مطالعه به پتانسیل بالای میرایی موج شوک در سازه دولایه رسیدند. در بررسی دیگر، مهرگانیان و همکاران^۳ [۱۷] به بررسی عددی و تجربی تغییر شکل دو ورق فولادی زره‌ای و ریختگی در اثر انفجار متمرکز در محیط هوا پرداختند و نتایج بدست آمده برای این دو ورق را مورد مقایسه قرار دادند. ژانگ و همکاران^۴ [۱۸] در یک مطالعه عددی و تحلیلی به مدل‌سازی دینامیکی تغییر شکل ورق نازک فولادی A921 تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. نتایج حل تحلیلی به روش انرژی با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. مشخص شد که حل تحلیلی از دقت و اعتبار بیشتری در شرایط مرزی مختلف برخوردار است.

۱-۲-۲- تحقیقات انجام شده در محیط آب

تحلیل کامل مسأله انفجار زیر آب نیازمند حل معادله ارتعاش سازه و انتشار موج از منبع انفجار در سیال به صورت همزمان است. از اولین روش‌های تئوری در زمینه تحلیل انفجار زیر آب می‌توان به تحقیق کول^۵ [۱۹] اشاره کرد. وی با ارائه یک مدل ساده به تشریح فرآیند انفجار پرداخت. مایر^۶ [۲۰] مسائل مرجعی را که یک حل دقیق تحلیلی از مسأله اندرکنش آب و سازه را ارائه می‌دهد، جمع‌آوری کرد. فلیپا و درانتس^۷ [۲۱] در

^۱ Fallah

^۲ Isa

^۳ Mehreganian

^۴ Zhang

^۵ Cole

^۶ Mair

^۷ Felippa and Deruntz

یک روش اجزا محدود به بررسی پدیده کاویتاسیون^۱ در انفجار زیرآب پرداختند و نتایج خود را بر اساس تحقیقات نیوتون ارائه کردند و تأثیر کاویتاسیون در انفجار زیر آب را مورد بررسی قرار دادند. در این روش میدان امواج درون سیال بر اساس یک تابع پتانسیل جابجایی به کمک انتگرال گیری ضمنی وارد شد. کد ایشان با نام CAFE^۲ معروف شد. وقتی که انفجار نزدیک یا در تماس با سازه رخ می دهد دیگر فرض جابجایی کوچک سیال نمی تواند منطقی باشد، در این مورد می توان از هیدروکدهایی مانند Autodyn و LS-DYNA استفاده کرد. تراویس^۳ و همکاران [۲۲] و جانسون^۴ و همکاران [۲۳] اثر انفجار زیرآب بر روی دیسک های دایروی گیردار که دارای ضخامت ها و ماده های مختلف بودند؛ مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ها فقط جابجایی بیشینه مورد اندازه گیری قرار گرفت. اسپراگ و گرس^۵ [۲۴] با برشمردن معایب مدل CAFE روش جدیدی را بر اساس المان های طیفی^۶ ارائه کردند. در المان های طیفی، توابع شکل سه خطی به کار رفته در مدل اجزا محدود CAFE برداشته شده و توابع لژاندر - چند جمله ای^۷ جایگزین آن شده اند. همچنین وی از ایده جداسازی محیط سیال به دو میدان کامل و میدان تداخل و تفرق برای بیان معادلات حاکم بر سیال استفاده نمود. راماجیاتیلاگام^۸ و همکاران [۲۵] در مطالعه خود به بررسی پاسخ دینامیکی گذرا غیرخطی صفحات مستطیلی تحت بارگذاری موج شوک پرداختند. آنان بررسی خود را به صورت تجربی و عددی روی صفحات مستطیلی گیردار در انفجار زیرآب انجام دادند. در پژوهشی دیگر راماجیاتیلاگام و ویندحان^۹ [۲۶] تغییر شکل و پارگی صفحات نازک مستطیلی تحت بارگذاری موج شوک ایجاد شده زیرآب را به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه آنان دو مدل پارگی به نام های پارگی کششی و پارگی برشی مورد بررسی قرار گرفت. قمصری^{۱۰} و همکاران [۲۷] به بررسی تحلیلی و تجربی حساسیت نسبت به نرخ کرنش در یک ورق ایزوتروپ

^۱ Cavitation

^۲ Cavitating acoustic finite element

^۳ Travis

^۴ Johnson

^۵ Sprague and Geers

^۶ Spectral element

^۷ Legendre-polynomial functions

^۸ Ramajeyathilagam

^۹ Ramajeyathilagam and Vendhan

^{۱۰} Qamsari

با شرایط مرزی مشخص تحت بارگذاری انفجاری زیرآب پرداختند. ضریب واماندگی فشار دینامیک به استاتیک که نشان‌دهنده‌ی میزان حساسیت به نرخ کرنش ماده می‌باشد را تعریف کردند و بیان داشتند که هر چه این ضریب برای یک ماده بالاتر باشد، ماده در نرخ کرنش‌های بالا مقاومت بیشتری در برابر جریان پلاستیک از خود نشان می‌دهد. گله‌داری و همکاران^۱ [۲۸] به صورت تحلیلی و تجربی، بهینه‌سازی صفحات کامپوزیتی تحت بار انفجار زیر آب به روش المان محدود را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان ضمن بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ی کامپوزیتی با ارائه الگوریتمی زوایا و ضخامت صفحات کامپوزیتی را بهینه کردند. کوهسار^۲ و همکاران [۲۹] مطالعه‌ای با عنوان بررسی تجربی و عددی انفجار زیرآب بر روی صفحات دایروی انجام دادند. در این مطالعه از نرم‌افزار LS-DYNA برای شبیه‌سازی استفاده کردند. حشمتی و زمانی^۳ [۳۰] در یک مطالعه عددی به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی تیوب شوک مخروطی انفجار زیر آب، بر فشار ایجاد شده پرداختند. ایشان با استفاده از کد غیرخطی LS-DYNA پدیده انفجار زیر آب را در یک تیوب شوک شبیه‌سازی کردند و برای صحت‌سنجی، نتایج حاصل را با نتایج تجربی سایر محققین مورد مقایسه قرار دادند. پارامترهای زاویه، طول تیوب شوک و وزن ماده منفجره بر روی فشار ایجاد شده را بررسی کردند. علیزاده^۴ و همکاران [۳۱] بر روی ارزیابی رفتار عرشه‌ی کامپوزیتی چند سلولی فولادی تقویت‌شده با صفحات پلیمر تقویت‌شده با فیبر شیشه تحقیق کردند. ایشان در نهایت به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت لایه مشبک که در مرکز صفحات GFRP قرار دارد، باعث افزایش تحمل بار سازه می‌شود. آبریت^۵ [۳۲] در پژوهش خود به بررسی استفاده از چند نوع پوشش جهت مقابله با اثرات موج شوک انفجار زیرآب بر روی سازه پرداخت. در این مطالعه ایشان از سه نوع پوشش؛ ساندویچی، پلیمری و فلزی برای کاهش اثرات تخریبی موج شوک انفجار بر روی سازه استفاده کرد. ژائو^۶ و همکاران [۳۳] به بررسی و مقایسه آسیب ایجاد شده بر روی دال‌های بتنی مسلح شده در معرض انفجار در محیط هوا و آب پرداختند. همچنین در این پژوهش، خصوصیات آسیب و تغییرشکل پلاستیکی میله

^۱ Galehdari

^۲ Koohsar

^۳ Heshmati and Zamani

^۴ Alizadeh

^۵ Abrate

^۶ Zhao

های فولادی تقویت شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. اوآن^۱ و همکاران [۳۴] به بررسی پاسخ دینامیکی صفحات کامپوزیتی دایروی تحت بارگذاری انفجاری زیرآب پرداختند. آنان اثر شدت ایمپالس اعمالی و ضخامت صفحه کامپوزیتی را بر روی تغییرشکل، شکست و مکانیزم‌های وابسته شناسایی و اندازه‌گیری کردند. لیو^۲ و همکاران [۳۵] اثر انفجار زیرآب بر روی کشتی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، به سطح پاسخ کشتی تحت انفجار زیرآب با توجه به اندرکنش غیر خطی بین سازه و سیال پرداخته شد.

۱-۳- ضرورت و نوآوری تحقیق

زره‌های محافظتی^۳ سازه‌های را گویند که به صورت ویژه برای مقاومت در برابر تهدیدهای نظامی شامل انفجار و ضربه بالستیک طراحی و ساخته می‌شود. پیش‌بینی دقیق اینکه چگونه زره‌های محافظتی تحت بارگذاری انفجاری آسیب می‌بینند، دغدغه اصلی طراحان است. روش تجربی برای تخمین آسیب در سازه‌های زمینی و مستغرق تحت انفجارهای هوایی و زیرآب بسیار گران و وقت‌گیر است. علاوه بر این حفاظت‌های زیست محیطی یکی دیگر از محدودیت‌های این آزمایش‌ها است. از طرف دیگر حل‌های تحلیلی برای پاسخ دینامیکی سازه به مسائل انفجار مخصوصاً انفجار زیرآب به دلیل پیچیدگی مدل سازه‌ای و اندرکنش سازه - سیال بسیار مشکل است. بنابراین تمرکز اصلی تحقیقات در زمینه بارگذاری ضربه‌ای انفجار و اثر دینامیک حباب و اندرکنش سازه - سیال بر روی روش‌های عددی متمرکز شده است.

یک زره زمانی کارایی لازم را دارد که خصوصیات هم‌چون چگالی پایین، مقاومت به شکست در برابر تنش‌های کششی بزرگ و مدول برشی بالا را داشته باشد. زره‌های تک‌لایه فلزی به دلیل بالا بودن چگالی، همه‌ی خواص فوق را ارضا نمی‌کند اما مواد سرامیکی غیر از مقاومت در برابر تنش کششی، بقیه موارد را پوشش می‌دهد. در سال‌های اخیر به منظور نیل به اهداف فوق، در ادوات نظامی، دریایی و هوافضا نوع جدیدی از ورق‌های مرکب لایه‌ای شامل ترکیبی از سرامیک، فلز و کامپوزیت پلیمری مستحکم شده با فیبر^۴ به عنوان لایه پشتیبان^۵ به

^۱ Huang

^۲ Liu

^۳ Protective armors

^۴ Fiber reinforced polymer (FRP)

^۵ Backing

کرات مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش‌های به عمل آمده در زمینه مقاومت به موج شوک حاصل از انفجار این نوع از ورق‌های کامپوزیتی به علت پیچیدگی‌های موجود در معادلات ساختاری، مدل شکست و معادله حالت مربوط به سرامیک، فلز و کامپوزیت لایه‌ای و همچنین معادله حالت و تابع ایمپالس حاصل از سوختن خرج انفجار محدود می‌باشد.

لذا در این تحقیق به بررسی عددی مقاومت یک زره کامپوزیتی لایه‌ای تحت تاثیر موج شوک حاصل از انفجار در دو محیط واسط آب و هوا پرداخته و نتایج این تحقیق با نتایج مقالات معتبر مقایسه خواهد شد. از مهم‌ترین نوآوری این تحقیق می‌توان به بهینه‌سازی ابعاد یک زره کامپوزیت سرامیک/ فلز با هدف دستیابی به حداقل تنش عمود بر سطح تحت ضربه موج شوک و تغییر شکل ایجاد شده در لایه هدف اشاره نمود. همچنین بررسی مقایسه‌ای محیط واسط هوا و آب در عملکرد سازه کامپوزیتی از دیگر نوآوری‌های این پایان‌نامه محسوب می‌شود.

۱-۴- ساختار کلی پایان‌نامه

این پایان‌نامه در قالب پنج فصل ارائه شده است. گام اول در مطالعه هر پدیده، شناخت و آشنایی با مفاهیم اولیه آن پدیده است، از این رو در فصل دوم به شناخت دقیق‌تر انفجار، ویژگی‌های آن و پارامترهای مختلف توصیف‌کننده‌ی معادلات رفتار موج شوک حاصل از انفجار در محیط هوا و آب پرداخته می‌شود. در فصل سوم شرح مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA داده شده است. همچنین مدل ساختاری، نوع المان بکار رفته و محیط اطراف آن در فضای نرم‌افزار توصیف شده است. در مورد جزئیات مسئله مورد بررسی و ساده‌سازی‌ها و فرضیات مورد استفاده پرداخته شده است. در این بخش معادلات حالت و نوع مواد مورد استفاده شده در محیط نرم‌افزار نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. فصل چهارم به بررسی نتایج بدست آمده از تاثیر موج شوک انفجار بر روی ورق تک لایه فولادی و ورق دولایه فولادی/ سرامیکی بر روی لایه هدف از جنس پلیمر در محیط هوا و آب پرداخته شده است. همچنین در این بررسی‌ها به مقایسه پاسخ دینامیکی سازه کامپوزیتی در دو محیط هوا و آب پرداخته شد. در فصل پنجم به بیان نتیجه‌های بدست آمده از این تحقیق پرداخته شد و در ادامه چند پیشنهاد به منظور بررسی کامل‌تر این موضوع ارائه گردیده است.

فصل ۲ مبانی انفجار و رفتار موج شوک در محیط واسط هوا و آب

در این بخش توصیف دقیقی از پدیده انفجار ارائه می‌گردد. مسلماً پدیده انفجار می‌بایست همانند هر رخداد دیگری بطور کامل و دقیق تعریف شده، تا ضمن تفکیک این پدیده از سایر موارد مشابه، امکان دسته‌بندی انواع انفجار بر اساس معیارهای علمی مهیا گردد. باید توجه داشت انفجار علاوه بر کاربردهای نظامی در اکتشاف معدن، نفت و نیز تولید انواع قطعات با اشکال پیچیده (به صورت تغییر فرم با سرعت بالا) در مبحث ساخت و تولید کاربرد دارد.

۲-۱- پدیده انفجار و گسترش موج شوک در محیط واسط هوا و آب

فعل و انفعالات شیمیایی انرژی‌زا در حقیقت از ترکیب شیمیایی یک عنصر اکسیدکننده (مثل اکسیژن) و یک عنصر اکسیدشونده (مثل کربن یا هیدروژن) پدید می‌آیند. اگر عناصر اکسیدشونده و اکسیدکننده در دو ماده جدا باشند نیاز به مخلوط کردن این دو ماده و ایجاد جرقه‌ی اولیه برای شروع فعل و انفعالات شیمیایی است. اغلب سوخته‌های روزمره مانند بنزین به عنوان سوخت مایع و گاز شهری از این دسته‌اند. در این حالت به علت گرما دادن مولکول‌های ماده اکسیدکننده و اکسیدشونده تجزیه شده، ترکیب شیمیایی جدید پدید می‌آید. این دسته از مواد منفجره را مخلوط‌های انفجاری می‌نامند. در مقابل موادی وجود دارند که یک مولکول آن‌ها هم شامل عناصر اکسیدشونده و هم اکسیدکننده است برای مثال نیتروگلیسرین $C_3H_5(NO_3)_3$ از این دسته

است که هر مولکول آن شامل اکسیژن کافی برای اکسید کردن کربن و هیدروژن موجود در آن است. در این نوع فعل و انفعال شیمیایی در مرحله‌ی اول اتم‌های مولکول پیچیده از هم گسسته شده و در مرحله بعد ترکیب شیمیایی جدید همراه با آزاد شدن انرژی انجام می‌گیرد. مواد منفجره مایع و جامد همگی از این دسته‌اند. این دسته از مواد، مواد انفجاری یک پایه نامیده می‌شوند. در فرایند انفجار یک موج ضربه‌ای در مخلوط‌های انفجاری و یا ماده‌ی انفجاری یک پایه ایجاد شده و پیشروی می‌کند. پشت این جبهه، فعل و انفعالات شیمیایی شروع شده و با آزاد کردن انرژی، حرکت موج ضربه‌ای را پشتیبانی می‌کند. نظریه ایجاد موج ضربه‌ای و پیشرفت آن در مخلوط‌های انفجاری تا حدودی زیادی شناخته شده‌است، حال آن‌که این مکانیزم در ماده‌ی منفجره یک پایه به علت سرعت و شدت بسیار بالای فعل و انفعالات به سختی قابل بررسی است.

در بررسی دینامیک اجسام صلب چنین فرض می‌شود که با اعمال نیروی مشخصی بر یک جسم، نیروهای متعادل‌کننده‌ی جسم به طور آنی تغییر می‌کنند تا جسم به تعادل جدیدی برسد ولی در عمل چنین نیست و با اعمال نیرویی بر جسم امواج کششی یا فشاری در جسم ایجاد شده که باعث تنش در آن می‌شود و با برخورد و انعکاس این امواج از دیواره‌ها تعادل برقرار می‌شود. سرعت انتقال امواج تنش در سیالات که قادر به تحمل تنش برشی نیستند ثابت بوده و تنها به یک روش می‌توانند موج را منتقل کنند که همان سرعت صوت در آن‌ها خواهد بود ولی در مورد جامدات به علت تحمل تنش برشی راه‌های بیشتری برای انتقال موج پدید می‌آید. در داخل ماده‌ی جامد دو نوع تنش تراکمی^۱ و برشی^۲ می‌تواند منتقل شود و می‌توان نشان داد هرگاه در جسمی الاستیک، تغییرشکلی پدید آید در حالت کلی امواجی از هر دو نوع تولید شده و در جسم منتشر خواهد شد. در صورتی که در اثر عبور موج تغییرشکل ماندگاری^۳ در جسم به وجود آید، موج را موج پلاستیک گویند. سرعت امواج پلاستیک در حالت کلی تابعی از اندازه تغییرشکل خواهد بود. زمانی که یک موج در محیط مایع، گاز یا پلاسما (به صورت کلی در یک محیط سیال) با سرعتی سریع‌تر از سرعت صوت حرکت کند، به آن موج ضربه‌ای^۴ گویند.

^۱ Compressive stress

^۲ Shear stress

^۳ Plastic deformation

^۴ Shock wave

انفجار یک واکنش شیمیایی بسیار سریع است که در آن مواد منفجره به یک گاز در دما و فشار بسیار بالا تبدیل می‌شود [۱۹]. آزاد شدن سریع انرژی سبب به وجود آمدن موج شوک فشاری در محیط واسط خواهد شد. پارامترهایی که برای ارزیابی عملکرد انفجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، فشار انفجار چپمن-جوگوت^۱ (C-J)، دمای انفجار و سرعت انفجار می‌باشد. به طور معمول برای ماده‌ی منفجره TNT با چگالی 1650 kg/m^3 ، فشار انفجار (C-J) 21000 MPa [۳۶]، دمای انفجار برابر با $3447 \text{ }^\circ\text{C}$ [۳۷] و سرعت انفجاری برابر 6950 m/s [۳۸] خواهد بود. به دلیل بازگشت‌ناپذیر بودن فرایند ترمودینامیکی حاکم، ابتدا این موج فشاری با سرعتی بزرگ‌تر از سرعت انتشار صوت در محیط منتشر شده و رفته‌رفته سرعت آن کاهش خواهد یافت [۳۹]. با توجه به محیط واسط، انفجار به سه گروه: انفجار زیر آب، انفجار در خلاء و انفجار در هوا تقسیم‌بندی می‌شود. تفاوت قابل توجهی در پدیده‌ی انتشار موج بین دو محیط واسط هوا و آب به دلیل خصوصیات فیزیکی متفاوت آنها و همچنین آثار مرتبط بین گازهای تولید شده از انفجار و محیط اطراف وجود دارد [۴۰]. خواص فیزیکی که برای محیط‌های منتشر کننده اهمیت دارد عبارتند از: سرعت صوت، چگالی، تراکم‌پذیری، حرارت و فشار محیط. اغلب هوا را تراکم‌پذیر و آب را به عنوان محیط تراکم‌ناپذیر در نظر می‌گیرند. سرعت صوت در محیط هوا و آب در سطح دریا به ترتیب برابر 340 m/s و 1483 m/s است. سرعت صوت با افزایش دما افزایش می‌یابد. علت این تفاوت را می‌توان در چگالی هوا و آب دانست که به ترتیب برابر $1/25$ و 1025 kg/m^3 است. UNDEX را می‌توان به دو بخش موج شوک^۲ و نوسان حباب^۳ تقسیم کرد، که هر دو می‌تواند باعث تغییر شکل و حتی شکست در سازه مورد اصابت شود. البته مکانیزم و نحوه شکست ایجاد شده از این دو پدیده کاملاً متفاوت است. UNDEX باعث ایجاد یک موج شوک با دامنه بالا در زمان کوتاه و ایجاد یک حباب بسیار فشرده که به سمت سطح آزاد سیال در اثر بویانسی حرکت می‌کند؛ می‌شود. زمانی که حباب منبسط می‌شود فشار داخل حباب کاهش می‌یابد تا زمانی که به زیر فشار محیط اطراف برسد. با رسیدن شعاع حباب به مقدار بیشینه، فشار به مقدار کمینه‌ی حدی خواهد رسید. در این وضعیت حباب شروع به منقبض شدن می‌کند تا به شعاع کمینه خود برسد. چون در این مرحله فشار زیادی در داخل حباب ایجاد

^۱ Chapman-Jouguet (C-J)

^۲ Shock wave

^۳ Bubble pulsation

می‌شود، حباب مجدد شروع به منبسط‌شدن می‌کند و یک موج فشاری دوم را در اطراف منتشر می‌کند. فرآیند منبسط و منقبض شدن حباب تا زمانی که حباب در اثر بویانسی به سطح آزاد سیال برسد، ادامه می‌یابد و یک سری موج‌های تکراری را در آب منتشر می‌کند. البته با گذشت زمان دامنه امواج فشاری حباب کاهش می‌یابد. فشار ناشی از موج شوک بسیار زیاد بوده اما مدت زمان اثر آن ناچیز است. از سوی دیگر فشار نوسان حباب در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد فشار شوک بوده ولی مدت اثر آن نسبت به زمان اثر موج شوک بسیار طولانی است. بنابراین در تحلیل سازه‌هایی که انفجار در نزدیکی آن‌ها رخ می‌دهد هر دو عامل موج شوک و نوسان حباب باید در نظر گرفته شود. موج شوک باعث آسیب‌های موضعی شدید در سازه‌های دریایی با فرکانس طبیعی می‌شود، در حالی که نوسان حباب با همگام‌شدن با فرکانس طبیعی سازه، آسیب‌های کلی در سطح را موجب می‌شود. برای ادامه چند اصطلاح کاربردی در مبحث انفجار به اختصار توضیح داده می‌شود.

• مفهوم سوختن

احتراق^۱ فرایندی است که با آزادسازی انرژی همراه است. آزادسازی انرژی از دو طریق سوختن^۲ یا انفجار صورت می‌پذیرد. اگر فرایند احتراق با سرعتی پایین‌تر از سرعت صوت^۳ انجام شود یا به عبارت دیگر با سرعت پایین‌تر از سرعت صوت به بیرون انتشار پیدا کند، به آن سوختن گویند. جبهه‌ی فشار هوای روبه‌روی فرایند سوختن، اشیاء را منفجر نمی‌کند و نمی‌ترکاند زیرا سرعت موج انتشار شده از فرایند احتراق نسبتاً کند است.

• سرعت صوت در محیط‌های مختلف

سرعت صوت^۴ فاصله‌ای است که یک موج صوتی در مدت زمان یک ثانیه در محیط می‌پیماید. در هوای خشک و در دمای °C ۲۰، سرعت صوت $343 \frac{m}{s}$ یا به طور تقریبی، یک کیلومتر در سه ثانیه است. سرعت صوت از یک ماده به ماده‌ای دیگر متفاوت است. صوت در مایعات و جامدات نامتخلخل سریع‌تر از هوا، حرکت می‌کند. سرعت صوت در آب حدود $\frac{4}{3}$ برابر $(1484 \frac{m}{s})$ و در آهن تقریباً ۱۵ برابر $(5120 \frac{m}{s})$ سرعت آن در هوای

^۱ Combustion

^۲ Deflagration

^۳ Subsonic

^۴ Speed of sound

۲۰ °C است. سرعت فراصوت^۱ به سرعت‌های بالاتر از سرعت صوت در هوا ($343 \frac{m}{s}$) گویند. سرعت ابرصوتی^۲ به سرعت‌های بالاتر از ۵ برابر سرعت صوت گویند. سرعت تراصوتی^۳ به سرعت‌های بین ۰/۸ تا ۱/۲۳ برابر سرعت صوت گویند. سرعت صوت در گازها از رابطه‌ی ۱-۲ بدست می‌آید.

$$c_G = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma \rho R T}{\rho}} = \sqrt{\gamma R_0 T} \quad 1-2$$

در این رابطه ρ برابر چگالی گاز، γ نرخ گرمای مخصوص، R_0 ثابت جهانی گازها، T دمای مطلق گاز هوا است. تغییرات سرعت صوت در هوا نسبت به دما از رابطه‌ی ۲-۲ بدست می‌آید.

$$\Delta c_0 = c_0 + 0.6T \quad 2-2$$

که c_0 سرعت صوت در هوا در دمای صفر درجه سانتیگراد که برابر $331/3$ ، T درجه حرارت محیط بر حسب سانتیگراد است. سرعت صوت در مایعات از رابطه‌ی ۳-۲ بدست می‌آید.

$$c_L = \sqrt{\frac{B_{ad}}{\rho}} \quad 3-2$$

که در آن B_{ad} مدول بالک^۴ و ρ چگالی ماده می‌باشد. ضریب بی‌درروی از تغییر حجم ناشی از کشش و رانش مایعات یا گازها تعیین می‌شود. سرعت صوت در جامدات از رابطه‌ی ۴-۲ محاسبه می‌شود.

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad 4-2$$

که E مدول یانگ و ρ چگالی ماده می‌باشد.

• ماخ

اگر شیئی با سرعت بیش از یک ماخ در هوا حرکت کند گفته می‌شود که سرعت آن مافوق صوت است. عدد ماخ نسبت سرعت شیئی در یک سیال به سرعت صوت در همان سیال گویند. که از رابطه‌ی ۵-۲ محاسبه می‌شود.

^۱ Supersonic speed

^۲ Hypersonic speed

^۳ Transonic speed

^۴ Bulk modulus

$$M = \sqrt{1 + \frac{6 P_s}{7 P_0}} \quad ۵-۲$$

که فشار بیشینه ایجاد شده از انفجار و P_0 فشار محیط می‌باشد. از عدد ماخ برای انعکاس نرمال موج شوک در محیط هوا استفاده می‌شود.

• مفهوم انفجار

انفجار واکنش سوختن یا تجزیه‌ای است که سرعت انجام آن از انتشار صوت در ماده منفجره بیشتر باشد. محدوده‌ی سرعت انفجار در مواد مختلف $\frac{km}{s}$ ۹-۱ است [۳۹]. از آنجا که عمل انفجار بسیار سریع است باعث تخریب یا ریختن اشیاء در طول مسیر می‌شود. هنگامی که یک واکنش تجزیه یا عمل ترکیب، انرژی بسیار زیادی را در یک مدت زمان بسیار کوتاه تولید می‌کند، انفجار اتفاق می‌افتد. اگر چه از لحاظ فنی انفجار یک شکل از واکنش اکسیداسیون است، اما نیازی به ترکیب با اکسیژن ندارد. مولکول‌های ناپایدار هنگامی که به شکل‌های جدید تقسیم و دوباره ترکیب می‌شوند، انرژی قابل توجهی آزاد می‌کنند. نمونه‌ی از مواد شیمیایی که باعث انفجار می‌شود، ماده منفجره نیتروگلیکول می‌باشد. این ماده از عناصر نیتروژن، کربن، اکسیژن و هیدروژن تشکیل شده‌است. بخش عمده‌ای از مواد منفجره از همین عناصر ساخته شده‌اند که به آنها مواد منفجره CHNO گفته می‌شود. فرمول کلی CHNO به صورت $C_c H_h N_n O_o$ نوشته می‌شود که در آن c, h, n, o ، تعداد اتم‌های هر کدام از عناصر در مولکول می‌باشد [۳۹].

• مقاومت صوتی

به مقاومت در برابر حرکت موج طولی در یک محیط مقاومت صوتی یا امپدانس صوتی^۱ گویند. امپدانس صوتی ارتباط بین فشار صوت و سرعت ذرات را مشخص می‌کند. این امپدانس را، امپدانس صوتی ویژه‌ی آن محیط می‌نامند زیرا آن را خود محیط مشخص می‌کند. زمانی که یک منبع صوتی انرژی خود را به یک محیط انتقال می‌دهد، با این وجود محیط از حرکت امواج منبع با یک امپدانس متوسط خاص مخالفت می‌کند. این مخالفت نه تنها به محیط، بلکه به اندازه‌ی حجم هوا که توسط منبع صوت تحت فشار قرار گرفته، وابسته است. امپدانس صوتی ویژه یک محیط که با انتشار موج صوتی صفحه‌ای مخالفت می‌کند از رابطه‌ی ۲-۶ بدست می‌آید.

^۱ Acoustic impedance

$$z = \sqrt{k\rho} \quad ۶-۲$$

که k برابر سختی محیط بر حسب N/m^2 و ρ چگالی محیط بر حسب kg/m^3 می باشد.

اگر به جای k معادله $k = c_0^2 \rho$ ، در رابطه ۶-۲ جایگزاری شود، امپدانس صوتی را می توان به صورت رابطه‌ی ۷-۲ بازنویسی کرد.

$$z = \sqrt{c_0^2 \rho \cdot \rho} = c_0 \rho \quad ۷-۲$$

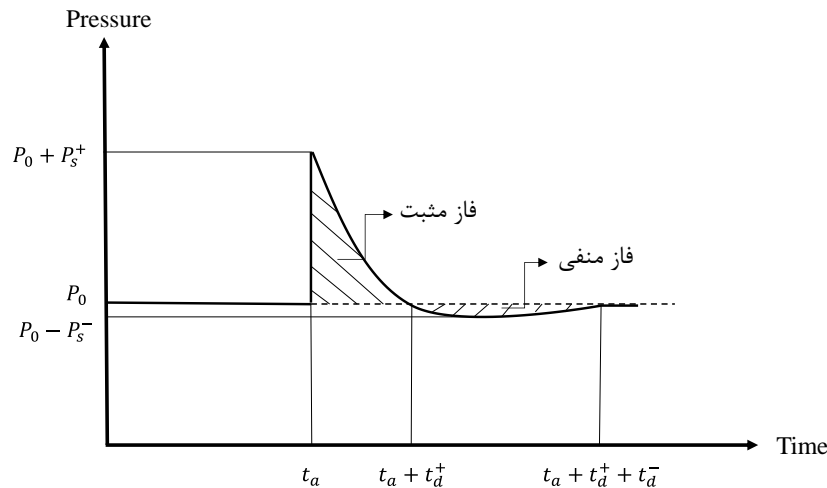
که c_0 سرعت صوت بر حسب m/s ، و ρ چگالی محیط بر حسب kg/m^3 است.

بنابراین امپدانس صوتی که در مخالفت با انتشار موج به کار می رود، با افزایش چگالی محیط و همچنین افزایش سرعت صوت، افزایش پیدا می کند. امپدانس صوتی ویژه هوا با دما تغییر می کند زیرا چگالی و سرعت صوت به دما وابسته است. واحد امپدانس صوتی ویژه برابر $1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ می باشد. امپدانس صوتی ویژه از سوی دیگر شرایط انتشار امواج صوتی در یک محیط یا شرایط انتقال انرژی صوتی از یک محیط به محیط دیگر را مشخص می کند. بنابراین اگر امپدانس محیطی پایین باشد یک فشار صوتی بزرگ، سرعت ذرات بزرگی را ایجاد خواهد کرد. اما همین فشار صوت در محیطی که امپدانس صوتی آن بالا باشد، سرعت ذرات نسبتاً کوچکی را ایجاد خواهد کرد [۴۱].

۲-۲- مشخصات اصلی یک انفجار

یکی از مهم ترین مشخصه‌ی یک انفجار در هوا امواج تولیدی آن است. هنگامی که ماده منفجره به طور مناسب تحریک گردد فرایند انفجاری منجر به تولید ناگهانی حجم وسیعی از گازها می گردد. این توده پر فشار هوای اطراف را به عقب رانده و باعث پیدایش امواج انفجاری می گردد [۳۹].

شکل ۱-۲ به صورت طرح‌واره تغییرات فشار موج انفجار برای یک نقطه به فاصله مشخص از خرج را نشان می دهد. به طور کلی انرژی منتقل شده ناشی از انفجار به بیش فشار، محیط واسط انتقال انرژی، فاصله از مرکز ماده منفجره، وزن و شکل هندسی آن بستگی دارد.



شکل ۱-۲ طرح‌واره تغییرات فشار موج انفجار در محیط هوا

مطابق شکل تاریخچه تغییرات فشار متشکل از سه مرحله می‌باشد. اولین مرحله، قبل از رسیدن موج انفجار به محل نقطه ارزیابی است که فشار برابر با فشار محیط P_0 می‌باشد. این فاز را فاز غیرآشفته^۱ می‌نامند. دومین مرحله، زمان ورود یا ایجاد موج انفجار است که با t_a تعیین می‌شود. در این زمان جبهه‌ی شوک به نقطه ارزیابی رسیده است. پس از ایجاد جبهه موج انفجار، فشار ناگهان افزایش می‌یابد و به مقدار حداکثر $P_0 + P_s^+$ (نقطه فشار بیشینه می‌باشد، با بالانویس "+" و "-" به ترتیب نشان‌دهنده‌ی فاز فشار بیشینه مثبت و منفی می‌باشد). سپس فشار تا مقدار P_0 در زمان $t_a + t_d^+$ افت می‌کند (t_d مدت زمان طولی نامیده می‌شود، و بالانویس "+" و "-" به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مدت زمان فاز مثبت و منفی است)، در مرحله سوم، فشار مجدداً کاهش یافته و این کاهش تا $P_0 - P_s^-$ ادامه داشته و سپس مجدد به مقدار P_0 در زمان $t_a + t_d^+ + t_d^-$ بر می‌گردد. بخشی از نمودار فشار- زمان که بالای P_0 قرار دارد، فاز مثبت نامیده می‌شود، این فاز در زمان t_d^+ می‌باشد. بخشی از تاریخچه فشار زمانی که فشار زیر خط P_0 ، از دامنه P_s^- و مدت زمان t_d^- ، فاز منفی نامیده می‌شود. فاز مثبت نمودار فشار- زمان انرژی اصلی انهدام را ایجاد خواهد کرد.

بر طبق تابع ۲-۸ با فرض کاهش نمایی فشار بر حسب زمان، معادله اصلاح شده‌ی فریدلندر^۲ [۴۲] به دلیل سهولت و دقت آن برای توصیف رابطه‌ی بین فشار - زمان استفاده می‌شود. در این معادله t زمان انفجار تا تولید

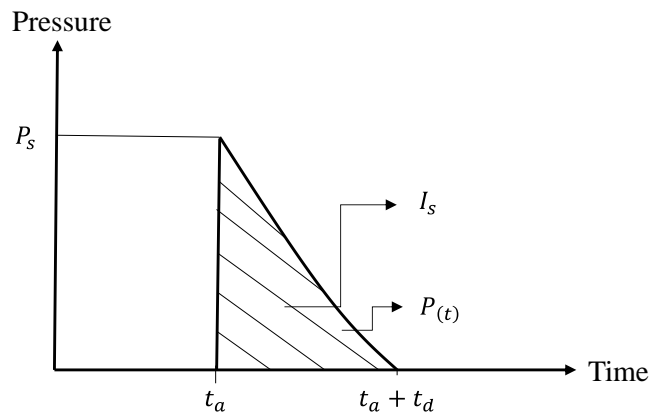
^۱ Undisturbed phase

^۲ Friedlander

موج می‌باشد که این زمان کوچکتر یا مساوی t_d است؛ P_s نیز فشار بیشینه حاصل از انفجار؛ t_d مدت زمان رسیدن فشار بیشینه به فشار محیط P_0 ؛ و α ضریب کاهش فشار موج انفجار می‌باشد.

$$p(t) = P_s \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\alpha t/t_d} \quad ۸-۲$$

ایمپالس ضربه یکی از پارامترهای مهم موج انفجار است که از سطح زیر نمودار فشار - زمان بدست می‌آید که در شکل ۲-۲ نشان داده شده و توسط رابطه ۹-۲ محاسبه می‌شود.



شکل ۲-۲ نمودار فشار-زمان جهت محاسبه ایمپالس

$$I = \int_{t_a}^{t_a+t_d} p(t) dt \quad ۹-۲$$

۱-۲-۲- مقیاس‌های انفجار

پیش از ورود به بحث در مورد چگونگی پیش‌بینی پارامترهای انفجار در هوا و آب، مقیاس‌های مورد استفاده در بیان معادلات به شرح زیر بیان می‌شود.

• مقیاس مکعب‌ریشه

قانون مقیاس هاپکینسون^۱ یا مقیاس مکعب‌ریشه، بیان‌کننده‌ی تولید امواج انفجاری یکسان در یک مقیاس فاصله مشخص است. از این مقیاس زمانی استفاده می‌شود که دو انفجار از ماده منفجره یکسان و هندسه

^۱ Hopkinson

مشابه ولی با اندازه متفاوت ماده منفجره در یک محیط انفجاری یکسان، عمل کند. این مقیاس با حرف Z مشخص می‌شود که در معادله ۲-۱۰ بیان شده است [۴۳].

$$Z = \frac{R'}{\sqrt[3]{W}} \quad ۱۰-۲$$

که در این معادله R' فاصله خرج انفجار از صفحه مورد نظر (فاصله از مرکز خرج انفجاری تا صفحه) و W جرم خرج انفجار بر حسب جرم TNT معادل می‌باشد.

• مقیاس جرم معادل TNT

برای تقریب جرم معادل TNT یک ماده منفجره می‌توان از چندین روش استفاده کرد. ساده‌ترین راه روش مقیاس جرم است که به وسیله نسبت سرعت‌های انفجار چاپمن-ژوگت (C-J) [۴۴, ۴۵] با توجه به رابطه ۲-۱۱ بیان می‌شود [۴۶].

$$M_{TNT} = \frac{D_{CJ}^2}{D_{CJ-TNT}^2} M \quad ۱۱-۲$$

در این معادله D_{CJ} سرعت انفجار چاپمن-ژوگت ماده منفجره و M جرم ماده منفجره و D_{CJ-TNT} سرعت انفجار C-J ماده منفجره TNT است.

۲-۲-۲ - معادلات پرش رنکین - هوگونیوت

برای بررسی پارامترهای موجود در یک نقطه قبل و بعد از عبور موج شوک، از معادلات پرش رنکین-هوگونیوت^۱ استفاده می‌شود [۴۷]. حرکت موج شوک را می‌توان از دیدگاه مختصات اویلری و لاگرانژی بررسی نمود. پنج متغیر؛ انرژی داخلی مخصوص e ، فشار P ، سرعت موج شوک U ، سرعت ذره u و چگالی ρ برای توصیف موج شوک مورد نیاز است. پس ۵ معادله برای بدست آوردن این ۵ متغیر لازم است. ۳ تا از این معادلات بر مبنای قوانین بقای جرم، مومنتوم و انرژی استخراج می‌شود. در مقوله موج شوک معادلات بقاء به فرایند بستگی ندارد. البته از آنجا که این متغیرها به طور ناپیوسته در جبهه موج شوک تغییر می‌کنند، این موضوع فقط در ابتدا و

^۱ Rankine-Hugoniot jump

انتهای فرایند صادق است. این سه رابطه بقاء با هم، معادلات پرش رنکین - هوگونیوت خوانده می‌شود. اعمال اصول بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای موج شوک که در طول ماده حرکت می‌کند معادلات زیر را ارائه می‌دهد.

۱- معادله بقای جرم: معادله بقای جرم بیان می‌کند که هیچگاه جرم از بین نمی‌رود یا به وجود نمی‌آید. بنابراین جرم ورودی با جرم خروجی برابر است. با استفاده از معادله بقای جرم رابطه ۲-۱۲ به دست می‌آید.

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{U-u_0}{U-u_1} \quad 12-2$$

۲- معادله بقای مومنتوم: معادله بقای مومنتوم بیان می‌کند که نرخ تغییرات ایمپالس برای یک جرم کنترل قبل از شوک و بعد از شوک باید با نیروی وارد شده به آن برابر باشد. از معادله بقای مومنتوم رابطه ی ۲-۱۳ بدست می‌آید که در آن P نشان‌دهنده فشار موج شوک است.

$$P_1 - P_0 = \rho_0(u_1 - u_0)(U - u_0) \quad 13-2$$

۳- معادله بقای انرژی: معادله بقای انرژی بیان می‌کند که افزایش انرژی در یک جرم کنترل برابر با کار انجام شده بر روی آن است. از معادله بقای انرژی رابطه ۲-۱۴ به دست می‌آید.

$$e_1 - e_0 = \frac{P_1 u_1 - P_0 u_0}{\rho_0(U - u_0)} - \frac{1}{2}(u_1^2 - u_0^2) \quad 14-2$$

اگر حالت ماده‌ای که در داخل آن شوک گسترش یافته است، معلوم باشد معادلات ۲-۱۲ تا ۲-۱۴ سه معادله با پنج کمیت نامشخص $U - e - \rho - u - P$ فراهم می‌آورد. یکی از این کمیت‌ها یعنی فشار یا سرعت جزء در ماده پشت شوک، نشانگر اندازه قدرت شوک است و باید به عنوان شرط مرزی تعریف شود. روابط اضافی که نیاز است تا موج شوک را به طور کامل توصیف کند به رفتار ماده وابسته است. در زمینه فیزیک شوک، این روابط، منحنی هوگونیوت خوانده می‌شود که نشانگر مکان هندسی حالتی است که از عبور شوک در حالت اولیه داده شده به دست آمده است. به بیان دیگر، هوگونیوت معادله حالتی است که تمامی حالاتی را که ماده می‌تواند موجود باشد، نشان می‌دهد و می‌تواند با عبارتهای انرژی داخلی، فشار و حجم مخصوص نوشته شود.

منحنی هوگونویوت به دست آمده از اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهد که پاسخ ماده به شوک فشاری در حالت اولیه، می‌تواند توسط رابطه ۲-۱۵ که به رابطه هوگونویوت معروف است، بیان کرد.

$$U = C_0 + u_0 + S(u - u_0) \quad 15-2$$

در این رابطه C_0 و S ضرایب اندازه‌گیری شده مربوط به ماده است که به حالت اولیه ترمودینامیکی ماده بستگی دارد. مقدار این ضرایب برای ماده منفجره مختلف در کتاب‌های مرجع آمده‌است. این معادله به طور گسترده برای توصیف پاسخ مواد به تراکم توسط شوک‌های قوی قابل کاربرد است. اما در تنش‌های کم که پدیده الاستیک-پلاستیک بر پاسخ مشاهده شده، چیره می‌شود و یا هنگامی که تغییر فاز اتفاق می‌افتد، احتیاج به اصلاح دارد.

۲-۳- رفتار موج شوک انفجار در محیط هوا

در مراجع مختلف برای محاسبه پارامترهای نمودار فشار - زمان انفجار در هوا، روابط تجربی و نیمه تجربی زیادی ارائه شده است. تمامی این روابط بر اساس ماده منفجره استاندارد TNT بدست آمده است. برای سایر مواد منفجره نیاز به معادل‌سازی جرمی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک انفجار در هوا امواج تولیدی آن می‌باشد. برای مشخص کردن خواص و توصیف امواج انفجار به سه پارامتر بیشینه فشار (بیش فشار) (P_s)، دوام موج انفجار (t_d) و ایمپالس ضربه (I) نیاز است. فاز منفی موج انفجار به طور کلی نادیده گرفته می‌شود.

۲-۳-۱ فشار لحظه‌ای

هر چقدر فشار پیشانی موج شوک بالاتر باشد سرعت موج شوک نیز بیشتر می‌شود. هم‌چنان که موج انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند، فشار در جبهه شوک کاهش و سرعت نیز کاهش می‌یابد. در فواصل دورتر از محل انفجار، سرعت موج شوک انفجار به سرعت صوت در محیط، نزدیک‌تر می‌شود. فشار لحظه‌ای $p(t)$ در فاز مثبت یک انفجار ایده‌ال در هوا از رابطه‌ی فریدلندر از رابطه ۲-۱۶ ارائه محاسبه می‌شود [۴۸].

$$p(t) = P_0 + P_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_d} \right) e^{-\alpha_{sh} t / t_d} \right] \quad 16-2$$

که P_0 فشار محیط، t زمان آنی، t_d پالس مثبت فشار و α_{sh} پارامتر شکل موج است که به فشار بیشینه‌ی، P_m موج شوک بستگی دارد. پارامتر شکل موج α_{sh} به عنوان یک پارامتر قابل تنظیم در نظر گرفته می‌شود و به گونه‌ی انتخاب می‌شود که رابطه بین فشار-زمان مقادیر مناسبی از موج انفجار را تأمین کند.

۲-۳-۲ حداکثر افزایش یا پرش فشاری

برای محاسبه بیش فشار حاصل از انفجار مواد منفجره کروی شکل در هوا، روابط تجربی و نیمه تجربی مختلفی به دست آمده‌است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

• رابطه کینی و گراهام

کینی و گراهام [۴۹] برای محاسبه بیش فشار رابطه ۲-۱۷ را ارائه نمودند. این رابطه بیش فشار را بر حسب تابع مقیاس فاصله Z ($m/kg^{1/3}$) نشان می‌دهد.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35} \right)^2}} \quad ۱۷-۲$$

• رابطه هنریخ

هنریخ^۱ [۵۰] مجموعه معادلات تجربی ۲-۱۸ را برای محاسبه بیش فشار برای بازه‌های مختلف Z ($m/kg^{1/3}$) بدست آورد.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1.4072}{Z} + \frac{0.554}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad 0.05 \leq Z \leq 0.3$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad 0.3 \leq Z \leq 1 \quad ۱۸-۲$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad Z \geq 1$$

^۱ Henrych

• رابطه برود

برود^۱ [۵۱] مجموعه معادلات تجربی ۱۹-۲ در بازه‌های مختلف Z ($m/kg^{1/3}$) برای محاسبه بیش فشار حداکثر در هوا بر حسب MPa به دست آورد.

$$P = \frac{0.098}{Z} + \frac{0.1465}{Z^2} + \frac{0.585}{Z^3} - 0.0019 \quad 0.01 \leq Z \leq 1$$

۱۹-۲

$$P = \frac{0.67}{Z^3} + 0.1 \quad Z \geq 1$$

۲-۳-۳ مدت زمان بقاء^۲

طول مدت بقای یک موج انفجاری، یکی از جنبه‌های مهم آن در توانایی ایجاد تخریب است. زیرا این تخریب مربوط به مدت زمانی است که نیروی مخرب به سیستم یا سازه وارد می‌گردد. چون از یک سو فاز فشار مثبت یک موج انفجار، تأثیرات تخریبی بیشتری دارد و از سوی دیگر مدت زمان این فاز با دقت بالاتری قابل اندازه‌گیری است، مدت زمان فاز مثبت بعنوان یک شاخص زمان کل انفجار مورد توجه قرار می‌گیرد. البته باید توجه داشت که فاز منفی انفجار، حدوداً ۲ برابر فاز مثبت به طول می‌انجامد. مدت زمان بقاء در فاز مثبت را، می‌توان به صورت رابطه ۲۰-۲ تعریف کرد [۴۹].

$$t_d = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6.9} \right)^2}} \times W^{1/3} \quad 20-2$$

در رابطه بالا عبارت t_d مدت زمان بقاء به میلی ثانیه برای یک کیلوگرم TNT بوده و Z مقیاس فاصله شده بر حسب ($m/kg^{1/3}$) و W وزن خرج انفجار TNT بر حسب kg می‌باشد.

۲-۳-۴ ایمپالس موج انفجار بر واحد سطح

ایمپالس یک موج انفجاری یکی از جنبه‌های توانایی آن در ایجاد تخریب است. برای امواج انفجاری، مساحت زیر منحنی فشار - زمان برابر ایمپالس بر واحد سطح برخورد می‌باشد. بخش مهم و عمده موج انفجاری همان

^۱ Brode^۲ Duration

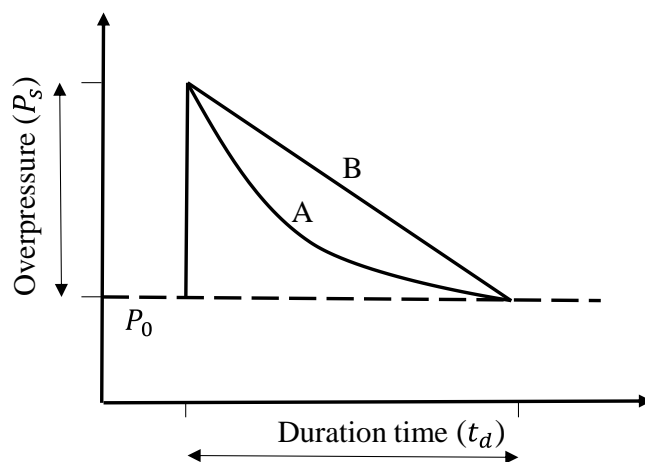
فاز مثبت فشار است و لذا ضربه ناشی از آن یکی از شاخص‌های مهم در تعیین ضربه یک موج انفجاری است. برای هر دو انفجار شیمیایی و اتمی یک معادله تجربی بر مبنای داده‌های مستقل به صورت معادله ۲-۲۱ برای محاسبه ایمپالس موج انفجاری بر واحد سطح تعریف می‌شود [۳۹].

$$\frac{I}{A_p} = \frac{0.067 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.23}\right)^4}}{Z^2 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.55}\right)^3}} \quad 21-2$$

طبق رابطه تجربی گودمن [۵۲]، میزان ایمپالس تولیدی حاصل از انفجار ماده منفجره بر حسب Pa·s به صورت رابطه ۲-۲۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{I}{W^{1/3}} = 6895 \left(\frac{0.06076}{Z} + \frac{0.02770}{Z^2} + \frac{0.002945}{Z^3} \right) \quad 22-2$$

اندازه ایمپالس موج انفجاری به دو پارامتر بیشینه فشار (بیش‌فشار) و مدت زمان موج بستگی دارد. علاوه بر این دو پارامتر، شاخص دیگری در این مقدار موثر است و آن سرعت کاهش بیشینه فشار است که به صورت طرح‌واره در شکل ۲-۳ نمایش داده شده‌است. مطابق شکل دو موج با مدت زمان یکسان مشاهده می‌شود که منحنی A دارای نرخ کاهشی بیشتری است (نمونه‌ای از انفجار هسته‌ای) این موج انفجاری دارای ایمپالس انفجاری کمتری بر واحد سطح نسبت به منحنی B است که سرعت کاهشی آن کمتر است. منحنی B نمونه‌ای از انفجار شیمیایی است که به علت تولید محصولات گازی در انفجار شیمیایی ایجاد شده‌است [۳۹].



شکل ۲-۳ نمونه از امواج فشاری ناشی از انفجار شیمیایی و اتمی

۲-۴- انفجار زیر آب

انفجار زیر آب انفجاری است که در آن خرج انفجاری در زیر آب منفجر شود. انفجار زیر آب با توجه به عمق قرارگیری خرج در آب طبقه‌بندی می‌شود، زیرا که تأثیرات فراوانی بر پارامترهای انفجار دارد [۵۳]. تفاوت عمده انفجار در زیر آب با انفجار در هوا در دینامیک هسته‌گازی محصولات حاصل از انفجار است. این واقعیت که آب ماده‌ای تراکم‌ناپذیر است، باعث می‌شود فشاری که به یک ناحیه از محیط آب وارد می‌شود، به صورت اغتشاشی با سرعت بسیار بالا به بقیه نقاط آن منتقل شده و باعث ایجاد میدان سرعت در محیط سیال و تغییر فشار آن گردد.

۲-۴-۱ رفتار دو مرحله‌ای

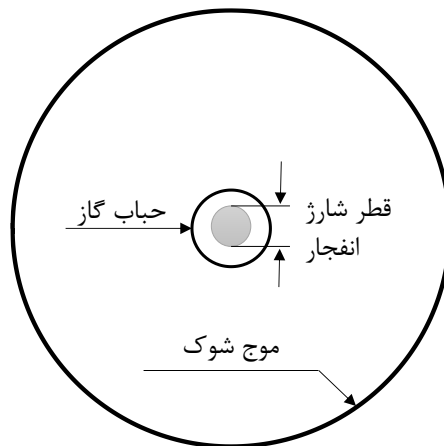
اندرکنش بین UNDEX و سازه‌های مجاور یک فرایند پیچیده است. ابتدا انفجار، مواد ناپایدار ماده‌ی منفجره را به محصولات گازی پایدار با یک دما و فشار بالا تبدیل می‌کند. به دنبال انفجار، موج ضربه‌ای حاصل به صورت کروی به سمت بیرون منتشر می‌شود. به محض رسیدن جبهه‌ی موج، مقدار قابل توجهی مومنتوم به سازه مجاور منتقل می‌شود. در عین حال، به دلیل عدم مطابقت امپدانس، امواج منعکس شده^۱ در سطح مشترک سازه - سیال و سطح مشترک گاز - مایع، ایجاد می‌شود. روی هم جمع شدن و انطباق امواج برخوردی و منعکس شده می‌تواند منجر به خلاءزایی^۲ در سیال شود.

شکل ۲-۴ موج شوک و حباب گازی تشکیل شده در یک انفجار زیر آب را نشان می‌دهد. پس از وقوع UNDEX، ابتدا یک موج شوک ایجاد شده و با سرعتی بیشتر از سرعت صوت منتشر می‌شود. پس از عبور این موج، فشار ایجاد شده به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. اما این فشار هنوز خیلی بالاتر از فشار هیدرواستاتیک محل وقوع انفجار است. پس از آن شعاع حباب گاز که بر اثر انبساط محصولات انفجار به وجود آمده است و حباب نامیده می‌شود، با نرخ زیادی افزایش می‌یابد. انبساط حباب و افزایش شعاع آن در مقایسه با زمان عبور موج شوک اولیه تا زمان نسبتاً زیادی ادامه می‌یابد. فشار داخلی حباب در اثر افزایش حجم کاهش می‌یابد. انبساط

^۱ Reflected wave

^۲ Cavitation

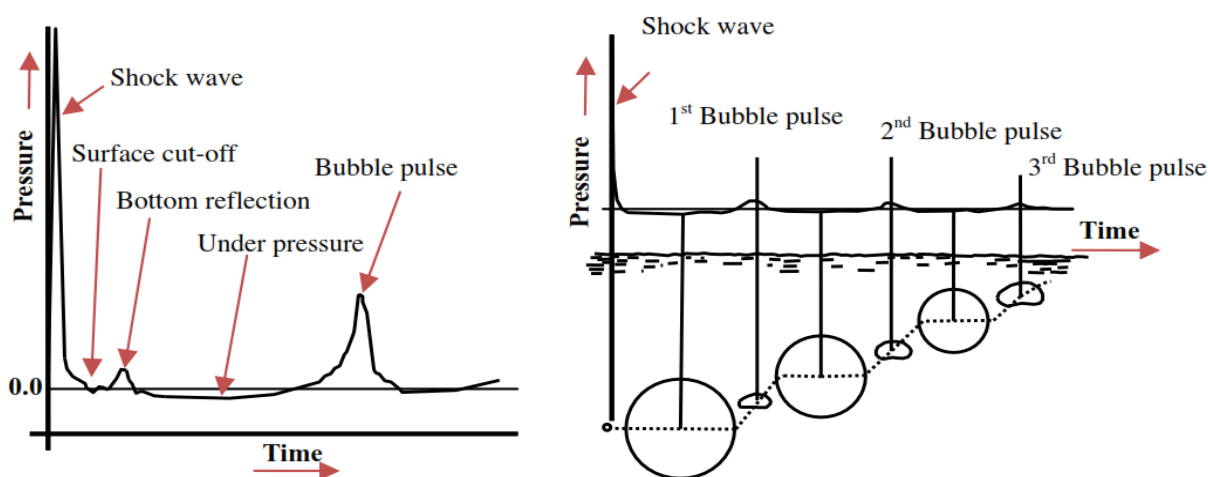
حباب حتی بعد از زمانی که فشار داخل آن به فشار هیدرواستاتیک آب می‌رسد، ادامه پیدا می‌کند و در نتیجه فشار داخل حباب از فشار اطراف آن کمتر می‌شود. در اثر این کاهش فشار، حجم حباب شروع به کاهش می‌کند. پس از آن، دوباره فشار درون آن افزایش می‌یابد این حرکت تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که فشار داخل از فشار اطراف آن بیشتر شده و مجدداً حباب شروع به انبساط می‌کند. اینرسی آب به همراه خصوصیات الاستیک گاز و آب شرایط لازم برای یک سیستم نوسانی را ایجاد می‌کند و حباب دوره‌های انبساط و انقباض را تجربه می‌کند و در واقع، نوسان حباب برای تعدادی از سیکل‌ها می‌تواند ادامه داشته باشد. حرکت نوسانی حباب موجب انتشار امواج فشاری می‌شود. فشار بیشینه در پالس‌های فشاری در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد فشار بیشینه در موج شوک است. اما زمان دوام آن‌ها بیشتر از زمان دوام موج شوک است به طوری که سطح زیر منحنی فشار - زمان برای هر دو پدیده قابل مقایسه می‌باشد. درصد قابل ملاحظه‌ای از انرژی حباب در نوسانات مختلف تلف شده و معمولاً فقط پالس اول در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۴ موج شوک و حباب گازی از یک انفجار زیر آب

۲-۴-۲ تاریخچه فشار - زمان

شکل ۲-۵ نمودار تاریخچه فشار-زمان و مراحل تشکیل و حرکت حباب به سمت سطح آب در UNDEX با فاصله معین از نقطه انفجار را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵ تاریخچه فشار-زمان در یک انفجار زیر آب [۵۴]

UNDEX باعث ایجاد یک موج شوک با دامنه بالا در زمان کوتاه و ایجاد یک حباب بسیار فشرده که به سمت سطح آزاد سیال در اثر بویانسی^۱ حرکت می‌کند؛ می‌شود. زمانی که حباب منبسط می‌شود فشار داخل حباب کاهش می‌یابد تا زمانی که به زیر فشار محیط اطراف برسد. با رسیدن شعاع حباب به مقدار بیشینه، فشار به مقدار کمینه‌ی حدی خواهد رسید. در این وضعیت حباب شروع به منقبض شدن می‌کند تا به شعاع کمینه خود برسد. چون در این مرحله فشار زیادی در داخل حباب ایجاد می‌شود، حباب مجدد شروع به منبسط شدن می‌کند و یک موج فشاری دوم را در اطراف منتشر می‌کند. فرآیند منبسط و منقبض شدن حباب تا زمانی که حباب در اثر بویانسی به سطح آزاد سیال برسد ادامه می‌یابد و یک سری موج‌های تکراری را در آب منتشر می‌کند. با گذشت زمان دامنه امواج فشاری حباب کاهش می‌یابد. فشار ناشی از موج شوک بسیار زیاد بوده اما مدت زمان اثر آن ناچیز است. از سوی دیگر فشار نوسان حباب در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد فشار بیشینه شوک اولیه بوده ولی مدت اثر آن نسبت به زمان اثر موج شوک بسیار طولانی است (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر تداوم موج شوک اولیه). بنابراین در تحلیل سازه‌هایی که اولاً انفجار در نزدیکی آن‌ها رخ می‌دهد و ثانیاً وزن خرج انفجار زیاد باشد، هر دو عامل موج شوک و نوسان حباب باید در نظر گرفته شود. موج شوک باعث آسیب‌های موضعی شدید در سازه‌های دریایی با فرکانس طبیعی می‌شود، در حالی که نوسان حباب با همگام شدن با فرکانس

^۱ Buoyancy effect

طبیعی سازه، آسیب‌های کلی در سطح را موجب می‌شود. مکانیزم آسیب بر روی سازه‌های دریایی تحت انفجار زیرآب را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

• اولین مکانیزم آسیب (فشار بالا)

درست بعد از انفجار، یک موج شوک و یک حباب گازی فشار بالای در حال انبساط پدیدار می‌شود. این موج با سرعت بسیار بالا حرکت می‌کند و یک فشار بسیار زیاد ایجاد می‌کند. این فشار زمانی که با سازه‌ها برخورد می‌کند اولین مکانیزم آسیب را بوجود می‌آورد.

• دومین مکانیزم آسیب (اثر شلاق زدن)^۱

در حالی که بارگذاری فشاری ناشی از ضربه موج شوک بسیار زیاد است ولی مدت زمان آن نسبت به مکانیک تشکیل حباب، بسیار کوتاه می‌باشد. انفجار یک حباب گازی فشار بالا تولید می‌کند و این حباب بخاطر فشار بالایش گسترش پیدا می‌کند. با این حال، اینرسی موجب افزایش فاصله حباب گاز می‌شود این امر موجب کاهش فشار داخلی حباب نسبت به محیط اطراف می‌شود. لذا انبساط متوقف می‌شود و بعد از آن فشار هیدرواستاتیک بیشتر از فشار داخل حباب می‌شود و این فاز تبدیل به فاز دیگری می‌شود. اگر فرکانس حباب با فرکانس سازه یکی شود باعث تجدید شلاق می‌شود و این خود باعث ایجاد مکانیزم دوم آسیب می‌شود.

• سومین مکانیزم آسیب (ضربه جت)^۲

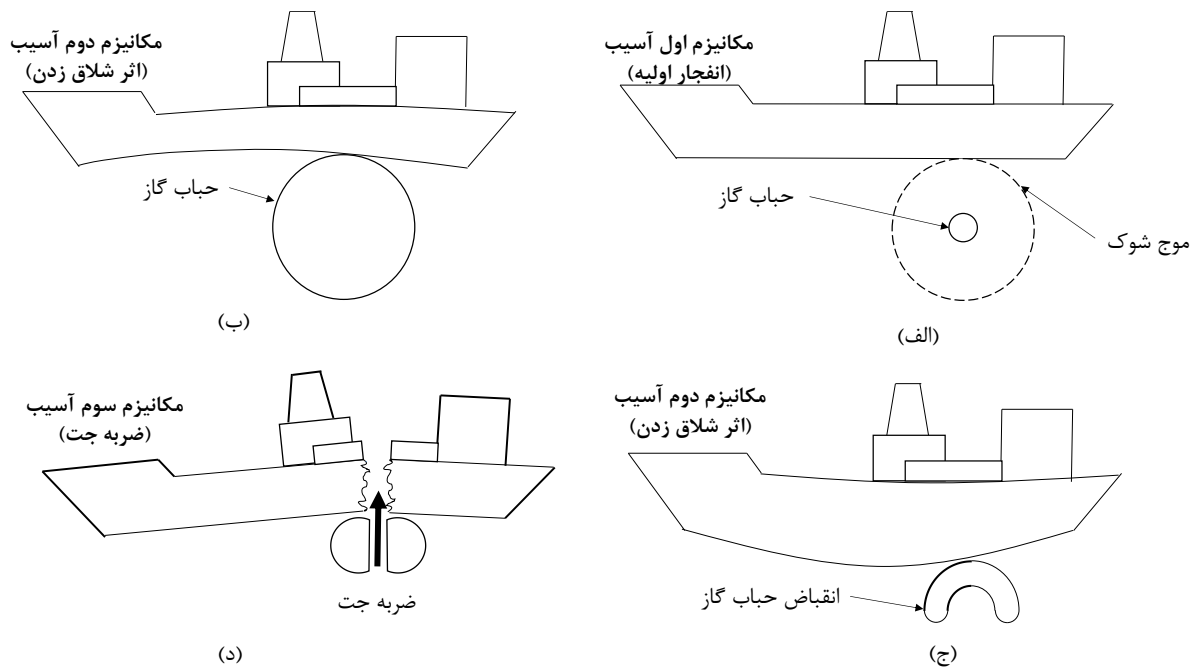
در اغلب موارد در فاز فروکش (انقباض حباب) کشندگی سازه توسط انقباض حباب، اثرات کشش (جاذبه) و نفوذ باعث ایجاد یک جت با سرعت بالا می‌شود. این جت به همراه حباب حرکت کرده با سطح حباب برخورد می‌کند. این جت در اثر برخورد با سطح حباب این جت به سمت سازه حرکت می‌کند و مکانیزم سوم آسیب را ایجاد می‌کند.

تأثیرات UNDEX بر روی سازه‌ها به مقدار و نوع ماده منفجره، فاصله از نقطه انفجار، عمقی که در آن انفجار رخ می‌دهد و عمق آب بستگی دارد. علاوه بر آن وجود سطوح بازتابنده مانند بستر دریا، سطح آب و نوع و

^۱ Whipping effect

^۲ Jet impact

فاصله آن‌ها از سازه‌ها نیز در این تاثیرات مهم است. طرح‌واره سه مکانیزم آسیب در شکل ۶-۲ نمایش داده شده‌است.



شکل ۶-۲ مکانیزم آسیب بر روی سازه‌های دریایی تحت انفجار زیر آب

۳-۴-۲ پارامترهای مورد بررسی در UNDEX

پارامترهای که در موج شوک انفجار زیر آب از نقطه نظر آسیب به صفحات اهمیت دارد عبارت است از: فشار بیشینه P_m ، ثابت کاهش زمانی θ ، ایمپالس I و انرژی منتقل شده توسط موج شوک E_s ، در این معادلات وزن خرج انفجاری W بر حسب kg، مقیاس فاصله Z بر حسب $m/kg^{1/3}$ و فشار لحظه‌ای p بر حسب Pa می‌باشد.

• فشار لحظه‌ای

در انفجار زیر آب، فشار $p(t)$ در یک نقطه معین به صورت معادله ۲-۲۳ بیان می‌شود [۱۹، ۵۵].

$$p(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad ۲۳-۲$$

در این رابطه θ مقدار زمانی است که طول می‌کشد تا موج شوک به مقدار $1/e$ مقدار بیشینه برسد که از رابطه ۲۴-۲ بر حسب میلی ثانیه (ms) بدست می‌آید، P_m فشار بیشینه جبهه موج شوک و t زمان است. θ در این رابطه به صورت رابطه‌ی ۲۴-۲ قابل محاسبه است.

$$\theta = 96.5 \times 10^{-6} (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{Z} \right)^{-0.22} \quad ۲۴-۲$$

• فشار بیشینه

P_m فشار بیشینه در جبهه موج شوک ایجاد شده در محیط آب بر حسب MPa از رابطه ۲-۲۵ قابل محاسبه است [۵۵, ۱۹].

$$P_m = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{Z} \right)^{1.13} \quad ۲۵-۲$$

• ایمپالس

ایمپالس (ضربه) میدان آزاد بر واحد سطح I ، بر حسب $\text{Pa} \cdot \text{s}$ طبق رابطه ۲-۲۶ محاسبه می‌شود [۵۵, ۱۹].

$$I = 5760 (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{Z} \right)^{0.89} \quad ۲۶-۲$$

• انرژی منتقل شده توسط موج شوک

انرژی منتقل شده توسط موج شوک بر واحد سطح بر حسب J/m^2 طبق معادله ۲-۲۷ محاسبه می‌شود [۵۵, ۱۹].

$$E_s = 98000 (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{Z} \right)^{2.1} \quad ۲۷-۲$$

فصل ۳ مدل‌سازی انفجار

شبیه‌سازی عددی پدیده انفجار و بررسی پاسخ سازه با استفاده از روش‌های کلاسیک مشکل و پیچیده است. روش‌های اجزاء محدود لاگرانژی نمی‌تواند مسائل شامل برهمکنش سیال و جامد را به خوبی و با دقت مناسب مدل نمایند. اما فرمولاسیون‌های چند ماده‌ای اوپلری^۱ و چند ماده‌ای لاگرانژی-اوپلری دلخواه^۲ را می‌توان برای شبیه‌سازی پدیده انفجار به کار برد. این روش‌ها برای غلبه بر مشکلات مربوط به واپیچش المان‌ها^۳ که منجر به توقف در روند حل می‌شود، توسعه پیدا کرده است.

از جمله نوآوری‌های این تحقیق، حل مسئله انفجار با در نظر گرفتن تعامل بین سیال - سازه (FSI) می‌باشد. به‌گونه‌ای که در آن می‌توان برای سیال بیش از یک ماده تعریف شود. در مورد مسئله انفجار، این امکان برای یک المان وجود دارد که حاوی آب، هوا و یا گازهای حاصل از انفجار باشد. در هر مرحله از تحلیل، خروجی‌های مورد نظر برای هر یک از ماده محاسبه و ذخیره می‌شود. برای مشخص کردن فصول مشترک دو ماده درون یک المان، یک روش حل بر اساس روش پیشنهادی یانگ [۵۶] برای جستجوی فصل مشترک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

^۱ Multi-material eulrian

^۲ Arbitrary lagrangian eulrian (ALE)

^۳ Element distortion

۳-۱- هیدروکد

هیدروکدها^۱ که کدهای انتشار موج نیز نامیده می‌شوند، یکی از ابزارهای عددی برای شبیه‌سازی مسائل دینامیکی غیرخطی مانند ضربه، نفوذ و انفجار هستند که می‌توانند در یک زمان از روش‌های مختلف گسسته سازی استفاده کنند. این کدها برای اولین بار برای شبیه‌سازی اثرات سلاح‌های هسته‌ای با رویکرد دینامیک سیالاتی برای حل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی توسعه یافتند. توسعه اصلی هیدروکدها توسط آزمایشگاه‌های ملی لوس‌آلاموس^۲ و لورنس لیورمور^۳ انجام شد. از جمله مهم‌ترین هیدروکدهای که در مراکز تحقیقاتی دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به HULL، MSC، DYTRAN، AUTODYN، LS-DYNA و HEMP اشاره کرد. از ویژگی‌های مهم هیدروکدها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- حل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی،
- ۲- تجزیه نمودن تانسور تنش به تانسورهای تنش هیدرواستاتیک و انحرافی،
- ۳- فرمول‌بندی معادلات حالت غیرخطی که تشکیل و انتشار موج شوک را مدل‌سازی می‌نماید،
- ۴- استفاده از معادلات بنیادی برای رفتار الاستیک، غیرالاستیک و وابسته به نرخ کرنش که شامل آسیب، واماندگی و رفتار پس از واماندگی است،
- ۵- انتگرال‌گیری صریح^۴ و ضمنی^۵ از زمان،
- ۶- به کارگیری روش‌های عددی برای ردیابی موج شوک مانند ویسکوزیته مصنوعی^۶ و روش گودنوف^۷

۳-۱-۱ روش‌های شبیه‌سازی موج شوک در هیدروکدها

مهم‌ترین کاربرد هیدروکدها، شبیه‌سازی موج شوک در سیالات و جامدات است. با مجزا نمودن تنش‌های انحرافی و هیدرواستاتیک همراه فرمولاسیون غیرخطی معادلات حالت، انتشار امواج شوک می‌تواند به صورت

^۱ Hydrocodes

^۲ Los alamos national laboratory

^۳ Lawrence livermore national laboratory

^۴ Explicit

^۵ Implicit

^۶ Artificial viscosity

^۷ Godunov method

ریاضی توصیف شود. مشخصات شبه‌ناپیوسته موج شوک، شبیه‌سازی عددی آن در مکان‌های گسسته در فضا و زمان را به موضوع با اهمیت تبدیل نموده است. ضخامت جبهه موج شوک در جامدات از مرتبه $m \cdot 10^{-5}$ و در گازها از مرتبه $m \cdot 10^{-7}$ است به همین دلیل استفاده از شبکه‌بندی با چگالی بالا در بسیاری از کاربردهای واقعی برای تفکیک نمودن دقیق موج شوک ممکن نیست. برنامه‌های عددی اختلاف محدود، المان محدود و روش‌های بدون المان تمایل دارند که نوسانات غیر طبیعی را درست در پشت پرش شوک پیش‌بینی کنند. دو روش عددی معمول در شبیه‌سازی امواج شوک عبارتند از ویسکوزیته مصنوعی و روش گودنف.

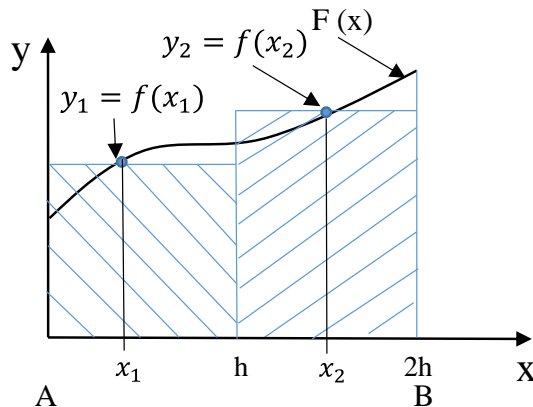
۳-۱-۲ گسسته‌سازی با استفاده از هیدروکدها

در نرم‌افزارهای تحلیل عددی، معادلاتی که فرمول‌بندی شده‌اند تا به‌طور پیوسته تابعی^۱ را در فضا و یا زمان شرح دهند، در مکان‌های گسسته و لحظه‌های زمان حل می‌شوند. در نتیجه حل و یا تقریب آن، تنها در تعداد محدودی از مکان‌های گسسته شده بیان می‌شود. این مکان‌های گسسته‌شده گره‌ها هستند که شبکه‌بندی‌ای را که نشان دهنده شکل هندسی سازه است به‌وجود می‌آورند. در اینجا نام روش‌های تفاضل محدود^۲، المان محدود^۳ و بطور کلی روش‌های محدود به میان می‌آید. برخی روش‌ها مانند روش اختلاف محدود منحصراً به گره‌ها توجه دارند و توابع و مشتقات را در گره‌ها محاسبه می‌نمایند. بر خلاف آن، روش المان محدود حل‌هایی را برای متغیرهای میدان در داخل سلول‌های با شکل مشخص که المان نامیده می‌شوند ارائه می‌نماید. همچنین متغیرهای دیگر را نیز در گره‌ها حل می‌کند. ساده‌ترین مثال برای گسسته‌سازی یک معادله، انتگرال‌گیری عددی از تابع $f(x)$ بین دو نقطه A و B است. اگر حل تحلیلی برای این تابع ممکن نبوده و یا بسیار پیچیده باشد، حل تقریبی عددی با استفاده از تفکیک نمودن دامنه حل \overline{AB} به قسمت‌های محدود قابل حصول خواهد بود. در مثال نشان داده شده در شکل ۳-۱ دو قسمت با طول h و نقاط مرکزی x_1 و x_2 و مقادیر y_1 و y_2 مشخص شده‌است [۵۷].

^۱ Functional

^۲ Finite differences

^۳ Finite elements



شکل ۱-۳ تقریبی برای تعریف $\int_A^B f(x)$ با استفاده از گسسته سازی برای انتگرال گیری عددی با جمع بندی بر روی مقادیر مرکزی y_i در هر قسمت که در فاصله h بین نقاط انتگرال گیری i ضرب شده است، حل تقریبی انتگرال مطابق رابطه ۱-۳ به دست می آید.

$$\int_A^B f(x) dx = \sum_i f(x_i)h \quad 1-3$$

در بیشتر هیدروکدها چهار روش برای گسسته سازی و حل معادلات حاکم وجود دارد. این روش ها شامل روش اختلاف محدود، روش حجم محدود^۱، روش المان محدود و روش هیدرودینامیک ذرات هموار^۲ هستند. این چهار روش الگوریتم های متفاوتی برای حل یک مسئله ارائه می نمایند. بسته به نوع فرمول بندی انتخاب شده برای سینماتیک محیط پیوسته، دو شاخه اصلی از گسسته سازی فضایی می تواند به کار برده شود. کاربرد مختصات مادی^۳ به شبکه ای که در آن گره های گسسته شده بنا بر تغییر شکل محاسبه شده حرکت می کنند می انجامد. از سوی دیگر مختصات فضایی^۴ گره ها را در فضا ثابت نگه می دارد و حرکت ماده و تغییر شکل مانند گذر شار از میان شبکه ها مشاهده می شود. ترکیب این دو روش اصلی گسسته سازی کاربرد زیادی در مسائل برهم کنش مانند برهم کنش سیال - سازه دارد.

^۱ Finite volume method (FVM)

^۲ Smooth particle hydrodynamic (SPH)

^۳ Material coordinates

^۴ Spatial coordinates

• روش لاگرانژی

در دیدگاه لاگرانژی^۱ در تحلیل اجزای محدود، از سابقه پیشینه بیشتری برخوردار است. این روش تحلیل، بر پایه دیدگاه لاگرانژ در حل استوار شده است که اساس آن تعقیب مسیر حرکت ذرات می باشد. مسائل تحلیل سازه، ارتعاشات (بدون دخیل بودن سیال)، انتقال حرارت، تحلیل خستگی و . . . از حوزه های متداول کاربرد این دیدگاه می باشند. در روش لاگرانژی، محیط حل به شکل تعدادی المان تقسیم بندی می شود و ماده تنها از طریق تغییر شکل المان ها و شبکه بندی موجود دچار حرکت می شود، لذا شکل هندسی ماده در حین تحلیل و به تناسب بارگذاری اعمال شده، دستخوش تغییر خواهد شد. از آن جایی که المان های لاگرانژی همواره و به شکل ۱۰۰٪ دربرگیرنده تنها یک ماده هستند، مرزهای ماده منطبق بر مرزهای المان خواهد بود [۵۸]. مشکل اصلی این روش آن است که در تغییر شکل های بزرگ المان ها دچار واپیچش^۲ شده و دترمینان ماتریس ژاکوبی^۳ در نقاط گوسی^۴ منفی خواهند شد. بنابراین روند حل واگرا شده و محاسبات متوقف می شود. اکثر هیدروکدها امکانات اضافی را در هنگام استفاده از روش لاگرانژی به کار می برند تا بتوانند این حلگر را برای مسائل مختلف به کار ببرند. این امکانات شامل استفاده از روش های نگاشت دوباره^۵ و حذف المان^۶ است.

• روش اویلری

در یک تحلیل اویلری، گره ها به شکل ثابت در فضا قرار گرفته اند و ماده اجازه حرکت در بین المان هایی را پیدا می کند که دچار تغییر شکل نشده اند. المان های اویلری لزوماً با ماده پر نشده اند و ممکن است دارای یک بخش خالی و یا حتی تماماً خالی باشند. لذا مرزهای ماده اویلری همواره باید در حین هر گام از تحلیل محاسبه شوند و در حالت کلی ممکن است منطبق بر مرزهای یک المان نباشند. به شکل متداول، مش اویلری یک شبکه ساده مستطیلی از المان ها است و با این هدف ایجاد شده که بتواند به خوبی فراتر از مرزهای ماده اویلری گسترش پیدا کند و با این کار، به ماده اجازه حرکت و تغییر شکل را بدهد. چنانچه هر بخش از ماده اویلری

^۱ Lagrangian

^۲ Distortion

^۳ Jacobian matrix

^۴ Gaussian point

^۵ Remapping

^۶ Element deletion

خارج از مش اویلری حرکت کند، از شبیه‌سازی حذف خواهد شد. امروزه استفاده از تحلیل اویلری در حل مسائل با تغییرشکل‌های بزرگ و همچنین حرکت سیالات بسیار متداول است [۵۹]. در این مباحث، المان‌های سنتی لاگرانژی به شدت دچار اعوجاج می‌شوند و دقت خود را از دست می‌دهند. در این روش، تانسور تنش و تاریخچه مواد باید از یک سلول به سلول دیگر منتقل شود. چون احجام و سطوح المان‌ها هیچ رابطه‌ای با احجام و سطوح مواد ندارند، مرزهای مادی را نمی‌توان توسط شبکه‌بندی مشخص کرد. به همین دلیل در این روش توانایی تعریف سطوح تماس وجود ندارد. پاشش و مخلوط شدن سیالات، جریان گاز و مسائل نفوذ می‌توانند به خوبی با استفاده از آنالیز اویلری مدیریت شوند اما ضروری است نکات زیر را در خصوص المان‌های اویلری بخاطر داشته باشید:

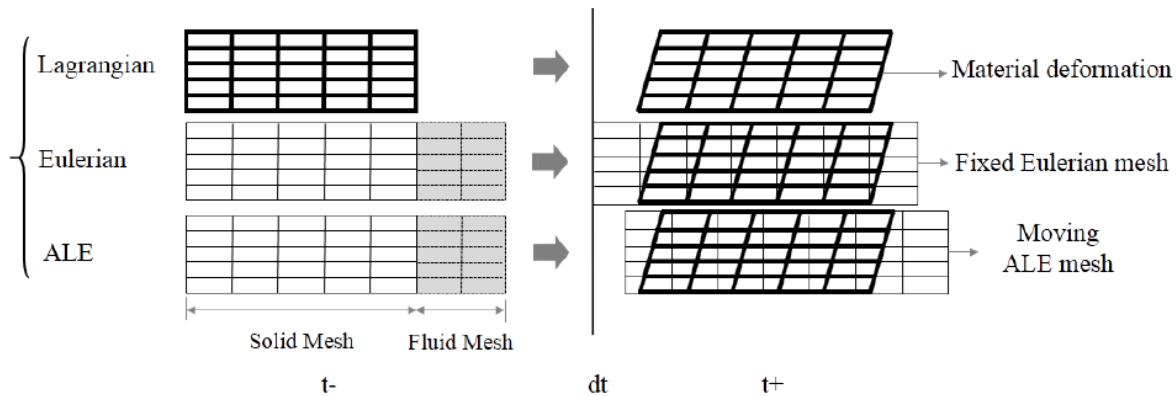
- ۱- المان‌های اویلری تنها در تحلیل‌های Explicit dynamic قابل استفاده هستند.
- ۲- در مسائل سه‌بعدی المان‌ها از نوع ۸ گره‌ای می‌باشد.
- ۳- به شکل پیش فرض، ماده‌ای در خود جای نداده‌اند و در اصطلاح تهی هستند.
- ۴- می‌توانند با یک ماده خارجی مقداردهی اولیه شوند.
- ۵- می‌توانند در آن واحد، حاوی مواد گوناگون باشند.
- ۶- الزامی در پر بودن حجم المان از ماده وجود ندارد و بخشی از آن می‌تواند بدون ماده باقی بماند.

• روش لاگرانژی - اویلری دلخواه

در روش لاگرانژی - اویلری دلخواه (ALE) علاوه بر مختصات مادی و مختصات فضایی، یک سیستم مختصات مرجع نیز وجود دارد. حرکت و تغییرشکل این مختصات مرجع، مستقل از سیستم‌های مختصات مادی و فضایی است و از آنجا که معادلات در روش ALE در مختصات مرجع فرمول‌بندی می‌شود، حرکت و تغییرشکل شبکه‌بندی مستقل از مختصات فضایی و مادی می‌باشد [۶۰].

در این روش انتقال و دوران شبکه‌بندی توسط یک الگوریتم حرکت شبکه کنترل می‌شود. با مدیریت مناسب الگوریتم حرکت شبکه می‌توان هم قابلیت‌های تقریب لاگرانژی و هم توانایی تقریب اویلری را در اختیار گرفت. این موضوع کاربر را قادر می‌سازد که مرزهای متحرک، سطوح آزاد و تغییرشکل‌های بزرگ را به نحو بهتری

مدل سازی نماید. در شکل ۲-۳ مقایسه ای بین مدل سازی با روش های لاگرانژی، اویلری و لاگرانژی - اویلری دلخواه را نشان می دهد.



شکل ۲-۳ مقایسه بین روش های لاگرانژی، اویلری و لاگرانژی - اویلری دلخواه

• روش اختلاف محدود

روش اختلاف محدود^۱ یکی از روش های ساده برای حل عددی معادلات دیفرانسیل معمولی و یا مشتق جزئی در مکان های گسسته است. ایده اصلی در این روش بر مبنای جایگزین کردن خارج قسمت دیفرانسیلی با خارج قسمت تفاضلی است که می تواند در نواحی گسسته سازی شده مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این روش یک معادله و یا دسته معادلات با شرایط مرزی مشخص، به گونه ای می تواند توسعه یابد که امکان استخراج مقادیر تابع و مشتقات در این نواحی را امکان پذیر نماید.

• روش حجم محدود

روش حجم محدود^۲ یکی از رایج ترین روش عددی در دینامیک سیالات محاسباتی است. کاربرد ویژه این روش در مسائل انتشار موج شوک در سیالات و برهمکنش سازه - سیال می باشد. اساس روش حجم محدود، اعمال تئوری گاوس بر انتگرال معادله انتقال است. لذا انتگرال حجمی درون المان سیال با انتگرال سطحی که با جمع انتگرال های روی وجوه المان سیال تعیین شده، جایگزین می شود.

^۱ Finite difference

^۲ Finite volume

• روش المان محدود

روش المان محدود مشهورترین روش گسسته سازی عددی است. هدف اصلی در روش المان محدود، یافتن حل یک مسئله پیچیده از طریق جایگزینی آن با یک مدل ساده تر است. در این روش، ناحیه حل به صورت مجموعه ای از زیر ناحیه های کوچک متصل به هم به نام المان یا اجزای محدود در نظر گرفته می شود. در ادامه برای هر المان یک حل تقریبی مناسب فرض می شود. با سوار نمودن این اجزاء و در نظر گرفتن شرایط تعادل کلی سیستم، تقریبی برای کمیت مورد نظر (جابجایی) بدست می آید. امروزه کدهای المان محدود تجاری و غیرتجاری متعددی موجود است. در میان کدهای تجاری می توان به Ansys، LS-DYNA، Nastran و Abaqus اشاره نمود.

• روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

نظریه هیدرودینامیک ذرات هموار یک روش گسسته سازی است که بدون استفاده از شبکه بندی و بر اساس این مفهوم که، نقاطی که در داخل یک جسم با هم همسایه هستند، در تمام طول محاسبات در مجاورت هم باقی می مانند، توسعه یافته است. SPH یک روش ذره ای با ماهیت لاگرانژی و الگوریتم نسبت گالیله ای^۱ است. در این روش می توان تاریخچه زمانی از ذرات مواد را به دست آورد. از این رو امکان محاسبه انتقال و جابجایی سیستم وجود دارد [۶۱]. دلیل توسعه روش SPH محدودیت های روش های مانند المان محدود و اختلاف محدود در مسائل بسیار پیچیده است. اگر چه بررسی این گونه مسائل با استفاده از روش هایی مانند نرم افزارهای المان محدود توسعه یافته غیرممکن نیست اما در این حالت پیچیدگی مسائل منجر به کاهش قابلیت اطمینان به این روش می شود. به دلیل وجود چالش های در شبیه سازی یک فرایند دینامیکی، دو انگیزه مهم برای استفاده از روش بدون المان به جای روش های با المان یا در ترکیب با آنها وجود دارد.

۱- شبیه سازی فرایندهای تجزیه و از هم پاشیدگی مواد. برای مثال فرایند تشکیل ترکش و تکه تکه شدن در چند جهت و همچنین فرایندهای شامل تغییر فاز جامد به مایع یا گاز.

^۱ Galileo relativity

۲- بررسی برهم‌کنش سیال با سازه که بررسی تماس این دو در حالت تخریب بسیار پیچیده بوده چرا که در طول زمان محل اتصال سیال با سازه تغییر می‌کند.

۳-۲- نرم‌افزار LS-DYNA

یکی از هیدروکدهای معروف، نرم‌افزار LS-DYNA است که قابلیت‌های بسیار بالایی در حل مسائل دینامیکی غیرخطی دارد. نرم‌افزار LS-DYNA نسخه بهبود یافته برنامه‌ی المان محدود سه بعدی DYNA3D است که در سال ۱۹۷۶ نوشته شده است. این کد در تحلیل انتشار امواج شوک، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاد، برخورد اجسام و نفوذ پرتابه‌ها توانمندی بالایی دارد. همچنین داشتن حدود ۲۰۰ نوع مدل ماده و ۱۳ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح این کد را به یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی تبدیل کرده است. این نرم‌افزار می‌تواند در بسیاری از مسائل دینامیکی با نرخ کرنش بالا مانند انفجار و ضربه مورد استفاده قرار گیرد. برای مدل‌سازی انفجار در نرم‌افزار LS-DYNA سه روش ^۱LB، ^۲LBE و ALE وجود دارد. در دو روش اول، از یک تابع برای اعمال بارهای فشاری ایجاد شده از انفجار مواد منفجره متعارف در هوا استفاده می‌شود. در روش LB از تابعی که توسط رندرز-پرسون و باننستر^۳ ارائه شده است [۶۲]، استفاده می‌شود. این تابع به نام تابع برود^۴ معروف است که برای مطالعات مهندسی، پاسخ خودروها و سازه‌ها در برابر انفجار مین‌های زمینی مناسب است. در روش LBE، همانند روش قبل از یک تابع جهت اعمال بارهای فشاری ناشی از انفجار در محیط هوا استفاده می‌شود با این تفاوت که در این روش از تابع پیشرفته‌تری استفاده می‌شود که قادر به در نظر گرفتن امواج منعکس شده، منابع انفجاری متعدد و کلاهدک انفجاری در حال حرکت می‌باشد. این تابع به رابطه ConWep نیز معروف است [۳]. در روش ALE سازه مورد نظر به صورت لاگرانژی و به صورت تداخل سازه با سیال^۵ (FSI) مدل می‌شود و مدل‌سازی صریح آب یا هوا و مواد منفجره با استفاده از فرمولاسیون سازگار چند ماده‌ای ALE انجام و معادلات ساختاری و حالت مناسب به مواد نسبت داده می‌شود.

^۱ Load-blast (LB)

^۲ Load-blast-enhanced (LBE)

^۳ Randerer-Pehrson and Bannister

^۴ Brode

^۵ Fluid-structure Interaction (FSI)

۳-۳- مدل‌های ساختاری و معادلات حالت

هیدروکدها برای محاسبه پاسخ مواد مختلف به بارگذاری ضربه‌ای نیاز به تعریف مدل ساختاری^۱ و معادله حالت^۲ ماده دارند. برخی از مسائل شامل انتشار موج شوک، تنها با استفاده از معادلات حالت هیدرودینامیک قابل محاسبه هستند اما در بسیاری از کاربردهای دیگر نمی‌توان از مقاومت ماده صرف‌نظر نمود. در مواد فاقد مقاومت برشی مانند گازها و سیالات نیاز به تعریف مدل ساختاری نمی‌باشد. در مواد جامد علاوه بر محاسبه فشار هیدرواستاتیک باید رابطه‌ای بین تنش و کرنش تعریف نمود. رفتار پلاستیک موادی مانند فلزات ممکن است شامل تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما باشد. در بررسی مسائل انفجار و ضربه سرعت بالا، در نقاط نزدیک به بارگذاری به دلیل ایجاد تنش‌های بسیار بزرگ می‌توان از مقاومت ماده چشم‌پوشی کرد. اما با کاهش مقدار تنش‌ها در نقاط دورتر از منطقه برخورد، نقاطی وجود خواهد داشت که تنش در آن‌ها کمتر از مقاومت ماده است.

۳-۳-۱ مدل‌های مادی در تغییرشکل غیرالاستیک در نرخ کرنش بالا

تغییرشکل بازگشت‌ناپذیر سازه‌ها ناشی از تغییر در ریزساختار ماده یعنی تغییر مکان نابجایی‌ها، رشد و انعقاد میکرونقص‌ها یا رهایش حلقه‌های پلیمر است. بر خلاف تغییرشکل‌های الاستیک، حالت‌های تنش و کرنش غیرالاستیک با اصلاحات بنیادین در ماده اولیه بدون بار، در مقیاس مولکولی یا کریستالی همراه خواهد بود. رفتار غیرالاستیک بسیاری از مواد به نرخ کرنش وابسته است. در فلزات تحت بارگذاری دینامیکی، معیار تسلیم وابسته به نرخ کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵۷]. تغییرشکل پلاستیک مواد در نرخ کرنش‌های بالا اغلب با استفاده از معادلات بنیادین که مطابق رابطه ۳-۲ تنش را به کرنش، نرخ کرنش و دما مربوط می‌سازد، توصیف می‌شود.

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$

۳-۲

که در آن ε کرنش، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش و T نشان دهنده دماست.

^۱ Constitutive model

^۲ Equation of state

• مدل جانسون - کوک

مدل جانسون - کوک^۱ تنش جریان را به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما مطابق رابطه ۳-۳ بیان می کند [۶۳].

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] (1 - T^*)^m \quad ۳-۳$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

در این رابطه σ تنش جریان، ε_p کرنش پلاستیک، $\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه، T دما، T_m دمای ذوب ماده و T_r دمای محیط است. ضرایب A ، B ، n ، m و C ثوابت ماده می باشند. سه ثابت اول از تست کشش شبه استاتیک در نرخ کرنش ثابت استخراج می شود. پارامتر C شاخص حساسیت به نرخ کرنش است. این ضریب با انجام آزمایش های استاندارد مربوط به نرخ کرنش های بالا مانند تجهیزات سرو هیدرولیک، میله ها پکینسون^۲ و آزمایش تیلور^۳ به دست می آید. توان m از انجام آزمایش در دماهای مختلف محاسبه می شود. از آنجا که تفکیک تاثیرات دما از تاثیر نرخ در مشخصات تست های دینامیکی سخت است، معمولاً از قسمت تاثیر دما در مدل جانسون - کوک صرف نظر می شود.

• مدل شکست جانسون - کوک

رفتار ماده در هنگام شکست توسط یک مدل آسیب^۴ پیوسته توصیف می شود. مدل شکست جانسون - کوک^۵ برای پیش بینی شروع آسیب در فلزاتی که تحت بارگذاری های با نرخ کرنش بالا و تغییرات دما قرار می گیرند، مناسب است. D به عنوان پارامتر آسیب به صورت رابطه ۳-۴ تعریف می شود [۶۴].

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad ۴-۳$$

^۱ Johnson-Cook

^۲ Hopkinson

^۳ Taylor

^۴ Damage model

^۵ Johnson-Cook damage

در رابطه بالا $\Delta \varepsilon_p$ تغییرات کرنش مومسان از نقطه شروع کرنش پلاستیک مومسان تا کرنش شکست و ε_f کرنش شکست می باشد. کرنش شکست از رابطه ی ۳-۵ محاسبه می شود.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 T^*] \quad 5-3$$

واماندگی هنگامی اتفاق می افتد که $D = 1$ شود. σ^* نشان دهنده ی سه محوره بودن تنش است که از نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش مؤثر بدست می آید. D_1 تا D_5 ضرایب ثابت بوده و وابسته به نوع ماده می باشد.

• مدل جانسون - هلمکوئیست

مدل جانسون - هلمکوئیست^۱ [۶۵] یک مدل ساختاری مناسب برای پیش بینی رفتار مواد شکننده، در معرض بارگذاری بسیار شدید می باشد. ویژگی های اصلی این مدل عبارتند از: مقاومت وابسته به فشار، آسیب و شکست، استحکام بعد از شکست، فشرده شدن و اثرات نرخ کرنش می باشد. سازکار این مدل بر این اساس است که هنگامی که آسیب شروع به انباشته شدن می کند، ماده شروع به نرم شدن می کند ($D' > 0$). این ایده به مواد اجازه می دهد که تحت افزایش کرنش پلاستیک به تدریج نرم شوند. به طور کلی استحکام یک تابع از استحکام شکست، استحکام اولیه، نرخ کرنش و آسیب می باشد. لذا تنش مؤثر به صورت رابطه ۳-۷ بیان می شود.

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D'(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad 7-3$$

در رابطه بالا σ_i^* تنش نرمال مؤثر، σ_f^* تنش شکست مؤثر و D' معیار آسیب است ($0 < D' < 1$). تنش نرمال مؤثر از رابطه ۳-۸ و تنش شکست از رابطه ۳-۹ بدست می آید [۶۵].

$$\sigma_i^* = A''(P^* + T^*)^N (1 + c' \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad 8-3$$

$$\sigma_f^* = B''(P^*)^M (1 + c' \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad 9-3$$

در روابط بالا A'' ، B'' ، c' ، M' و N ثوابت ماده و P^* فشار نرمال و T^* تنش هیدرواستاتیک می باشد. نرخ کرنش مؤثر بی بعد شده به صورت رابطه ۳-۱۰ بیان می شود.

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad 10-3$$

^۱ Johnson-Holmquist

در رابطه بالا ε نرخ کرنش لحظه‌ای و ε_0 نرخ کرنش اولیه می‌باشد. پارامتر شکست مشابه با پارامتر شکست مدل جانسون - کوک می‌باشد که از رابطه ۳-۱۱ محاسبه می‌شود [۶۴].

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad ۱۱-۳$$

در رابطه بالا $\Delta \varepsilon_p$ تغییرات کرنش پلاستیک از شروع تا کرنش شکست و ε_p^f کرنش شکست می‌باشد که مقدار آن از رابطه ۳-۱۲ بدست می‌آید [۶۵].

$$\varepsilon_p^f = D_1'(T^* + P^*)D_2' \quad ۱۲-۳$$

در رابطه بالا D_1', D_2' ثوابت ماده می‌باشد.

۳-۳-۲ معادلات حالت

معادلات حالت، معادلاتی هستند که پاسخ هیدرودینامیکی ماده را در بارگذاری‌های دینامیکی توصیف می‌کند. فشار گازها و مایعات در بارگذاری هیدرودینامیک تابعی از از چگالی و انرژی درونی است. همچنین مواد جامد در تغییرشکل‌های بزرگ، که در آن فشار هیدرودینامیک از تنش تسلیم خیلی بیشتر است، رفتار هیدرودینامیکی دارند. معادله حالت را می‌توان با استفاده از خواص ترمودینامیک مواد به دست آورد و برای استخراج روابط در حالت ایده‌آل، نیازی به اطلاعات دینامیکی نیست. در عمل تنها راه کاربردی و عملی برای به دست آوردن اطلاعات رفتاری مواد در نرخ‌های کرنش بالا، انجام آزمایش‌های دینامیکی با دقت بالاست.

• معادله حالت جونز - ویلکینز - لی

استفاده از معادله حالتی که بتواند هر چه بهتر ارتباط بین انرژی، فشار و حجم مواد منفجره را ایجاد کند، گام مهمی در مدل‌سازی عددی پدیده انفجار می‌باشد. هدف از استفاده این معادله، یافتن فشار تولید شده از آزادسازی انرژی ماده منفجره می‌باشد. معادله حالت تجربی جونز - ویلکینز - لی^۱ یک معادله مورد قبول برای توصیف فشار - حجم - انرژی مواد منفجره است و در بسیاری از هیدروکدها مورد استفاده قرار گرفته‌است. این تابع توسط لی [۶۶] به شکل رابطه ۳-۱۶ بیان شده‌است.

^۱ Jones-Wilkens-Lee (JWL)

$$P = A' \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B' \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \omega \frac{e}{V} \quad ۱۶-۳$$

در این رابطه P فشار، V حجم و e چگالی انرژی داخلی بر واحد حجم اولیه ماده منفجره را نشان می دهد. همچنین پارامترهای A' ، B' ، R_1 ، R_2 و ω ثابت های این معادله حالت بوده و از مشخصات ماده منفجره است.

• معادله حالت گرونایزن

برای مشخص کردن مقاومت حجمی ماده، معادله حالت یک مدل هیدرودینامیکی ایجاد می کند. این مدل فشار را تابعی از انرژی مخصوص و چگالی بیان می کند. از این رو معادله حالت گرونایزن، برای مدل کردن ماده ای با رفتار الاستیک ایزوتروپیک یا رفتار ویسکوز نیوتنی، مدل های پلاستیسیته میسز^۱ یا جانسون-کوک یا ماده ای که مقاومت حجمی ندارد (ماده بدون مقاومت برشی مثل آب یا هوا) به کار برده می شود. معادله حالت گرونایزن^۲ [۶۷] مطابق رابطه ۱۷-۳ تعریف می شود.

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2\right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}\right]} + (\gamma_0 + a\mu) \bar{E} \quad ۱۷-۳$$

در این رابطه \bar{E} انرژی داخلی در حجم اولیه، c تقاطع منحنی $U_p - U_s$ (تقاطع منحنی سرعت ذرات U_p ، به منحنی سرعت موج شوک U_s)، S_1 ، S_2 و S_3 ضرایب ثابت، γ_0 ضریب ثابت گامای گرونایزن و a تصحیح مرتبه اول حجم برای γ_0 است. μ به عنوان تابع حجم نسبی V است که از طریق رابطه ۱۳-۳ تعریف می شود. برای یک ماده منبسط شده $V = 1$ و رابطه ۱۷-۳ معادله به صورت ۱۸-۳ بازنویسی می شود.

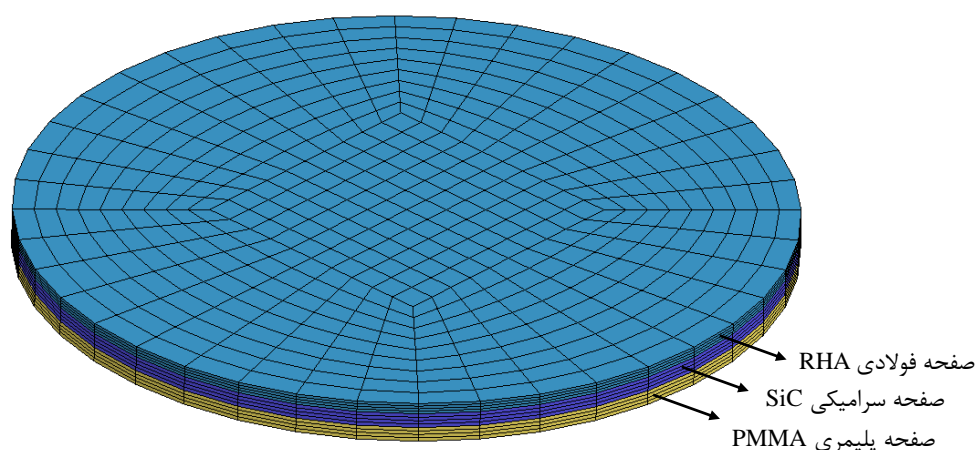
$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) \bar{E} \quad ۱۸-۳$$

^۱ Mises

^۲ Gruneisen

۳-۴- مشخصات مدل

صفحه کامپوزیتی به عنوان یک زره مقاوم شامل رویه سرامیکی ^1SiC و صفحه پستی فولادی ^2RHA می باشد که از صفحه هدف از جنس $^3\text{PMMA}$ محافظت می کند. مدل سه بعدی صفحات مش بندی شده در سازه کامپوزیتی در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۳ مدل سه بعدی صفحات مش بندی شده سازه کامپوزیتی

در این تحقیق، برای شبیه سازی اثرات موج شوک حاصل از انفجار TNT بر روی سازه، صفحه فولادی ^2RHA ، صفحه سرامیکی ^1SiC و صفحه هدف پلیمری $^3\text{PMMA}$ با استفاده از المان تغییر شکل پذیر جامد هشت گره ای با چهار المان در راستای ضخامت برای هر یک از لایه ها شبکه بندی شد. همچنین جهت مقید کردن درجات آزادی صفحات، گره های لبه ی خارجی در سه جهت حرکتی و سه جهت چرخشی محدود می شود. همچنین در محیط آب، علاوه بر مقید کردن درجات آزادی صفحات همانند محیط هوا، در مرزهای خارجی محیط آب از شرط مرزی Non-reflecting استفاده شده است. صفحات با قطر ۱ m و با ضخامت های مختلف که برای فولاد ^2RHA ۱۰، ۱۵ و ۲۰ mm و برای صفحه سرامیکی ۵، ۱۰ و ۱۵ mm و ضخامت پلیمر برابر مقدار ثابت ۲۰ mm در نظر گرفته شده است. در محاسبات از رفتار ناهمسانگردی صفحات صرف نظر شده است. ترکیب شیمیایی صفحه فولادی ^2RHA در جدول ۳-۱ و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی صفحات فولادی، سرامیکی و پلیمری در جدول ۳-۲ آورده شده است.

^۱ Silicon carbide

^۲ Rolled homogeneous armor

^۳ Polymethylmethacrylate

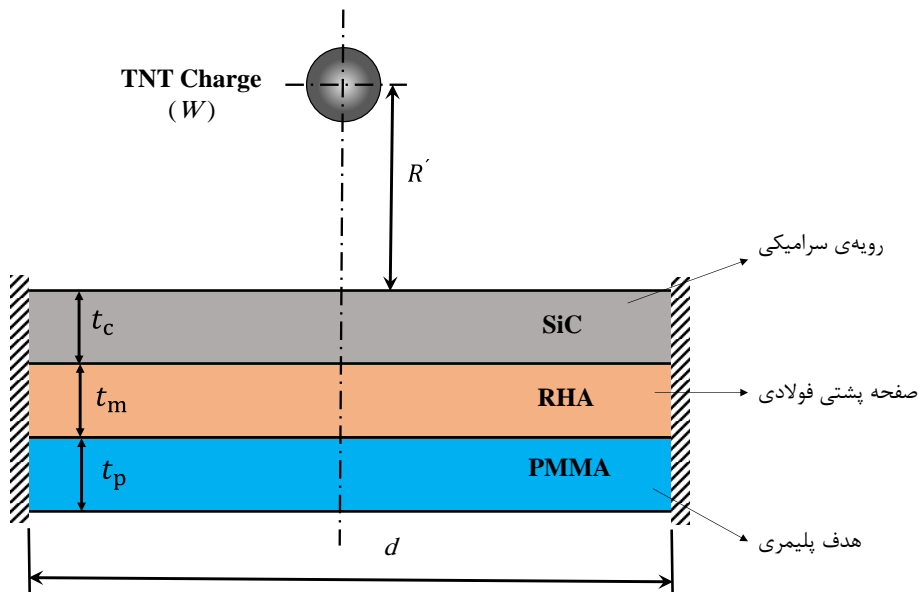
جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی RHA [۶۸]

C	Mn	Ni	Cr	Mo	S	p
۰/۱۸-۰/۳۲	۰/۶۰-۱/۵۰	۰/۰۵-۰/۹۵	۰/۰۰-۰/۹۰	۰/۳۰-۰/۶۰	۰/۰۱۵ (max)	۰/۰۱۵ (max)

جدول ۲-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی صفحات فولادی، سرامیکی و پلیمری

چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول برشی (MPa)	
۷۸۳۸	۰/۲۸	۲۱۰	۹۵۰	-	فولاد RHA [۹]
۳۱۶۳	۰/۱۴	۴۲۹	۱۳۷	۳۷۰	سرامیک SiC [۶۹]
۱۱۹۰	۰/۴۲	۵/۷۶	۶۴/۸	-	پلیمر PMMA [۷۰]

در این پژوهش، خرج انفجاری به صورت کروی و از ماده منفجره TNT در نظر گرفته شده است. شکل ۴-۳ طرحواره ساختار مورد آزمایش را نشان می‌دهد. d قطر صفحه، t_c ضخامت لایه سرامیکی، t_m ضخامت لایه فولادی، W وزن خرج انفجاری از ماده منفجره TNT و R' فاصله مرکز خرج انفجاری تا سطح صفحه می‌باشد.



شکل ۴-۳ طرحواره ساختار مورد ارزیابی

برای تعریف رفتار صفحه فولادی در بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش‌های بالا در محیط هوا، از مدل مادی و شکست جانسون - کوک و معادله حالت گرونایزن استفاده شد. برای صفحه هدف پلیمری نیز از مدل مادی جانسون - کوک و معادله حالت گرونایزن استفاده شد. همچنین برای ورق سرامیکی از مدل مادی جانسون - هلمکوئیست (بدون نیاز به معادله حالت) استفاده شده‌است. ضرایب مورد استفاده در جدول ۳-۳ آورده شده‌است.

جدول ۳-۳ ثوابت معادله مادی جانسون-کوک و جانسون هلمکوئیست و معادله حالت گرونایزن

پارامتر	سرامیک SiC (جانسون-هلمکوئیست [۷۱])	فولاد RHA (جانسون-کوک [۷۲] و گرونایزن [۷۳])	پلیمر PMMA (جانسون-کوک و گرونایزن)
A (MPa)	۰/۹۶	۷۹۲	۶۴/۸
B (MPa)	۰/۳۵	۵۰۹	-
n	۰/۶۵	۰/۲۶	-
C	-	۰/۰۱۴	-
m	-	۱/۰۳	-
T_m (°K)	-	۱۷۹۳	-
SF_{MAX}	۰/۸	-	-
HEL (GPa)	۱۴/۵	-	-
$PHEL$ (GPa)	۵/۹	-	-
D_1	۰/۴۸	۰/۰۵	-
D_2	۰/۴۸	۳/۴۴	-
D_3	-	-۲/۱۱	-
D_4	-	۰/۰۰۲	-
D_5	-	۰/۶۱	-
K_1 (GPa)	۲۰۴	-	-
c (m/s)	-	۴۶۱۰	۲۲۶۰
S_1	-	۱/۷۳	۱/۳۵
γ	-	۱/۶۷	۱/۵

برای تعریف رفتار ورق در بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش بالا در محیط آب، از مدل مادی پلاستیک - سینماتیک^۱ (نیازی به معادله حالت ندارد) برای صفحه فولادی RHA و صفحه هدف پلیمری PMMA استفاده شده است. مدل مادی جانسون - هلمکوئیست برای صفحه سرامیکی SiC در نظر گرفته شده است. ضرایب مورد استفاده برای صفحه فولادی و پلیمری در جدول ۳-۴ و برای صفحه سرامیکی در جدول ۳-۳ آورده شده است. همچنین مدل مادی نول^۲ برای محیط آب در جدول ۳-۵ و معادله حالت آن در جدول ۳-۶ ذکر شده است.

جدول ۳-۴ ضرایب مدل پلاستیک - سینماتیک صفحه فولادی RHA و پلیمری PMMA

ماده	RO (kg/m ³)	E (GPa)	PR	SIGY (MPa)	ETAN (MPa)	BETA	FS
فولاد RHA [۹]	۷۸۳۸	۲۱۲	۰/۲۸	۹۵۰	۶۰۰	۰	۰/۲۳
پلیمر PMMA [۷۰]	۱۱۹۰	۵/۷۶	۰/۴۲	۶۴/۸	۰	۰	۰

جدول ۳-۵ ضرایب مدل مادی نول محیط آب [۷۴]

مدل مادی	RO (kg/m ³)	PC	MU	TEROD	CEROD
Null	۱۰۲۵	۰	۰	۰	۰

جدول ۳-۶ ضرایب معادله حالت گرونایزن محیط آب

معادله حالت	C (m/s)	S ₁	S ₂	S ₃	GAMA0
گرونایزن	۱۴۸۳	۱/۷۵	۰	۰	۰/۲۸

۳-۵- کنترل گام زمانی

از مهم ترین پارامترهای کنترلی در استفاده از حلگر صریح، ضریب مقیاس گام زمانی است. برای همگرایی جواب در حل عددی، باید اندازه گام زمانی Δt برای هر نمو، کوچک تر از زمان گذر موج تنش از کوچک ترین اجزاء

^۱ Plastic-kinematic

^۲ Null

شبکه بندی معینی باشد. $\Delta t \leq l/c$ که در آن l کوچک ترین بعد المان ها و c سرعت موج است. در مسائل بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش بالا مثل بارگذاری انفجاری روی سازه ها، نفوذ و برخورد مقدار گام زمانی Δt در طول شبیه سازی تغییر می کند. Δt به صورت $\Delta t = \alpha l/c$ محاسبه می شود که در آن α ضریب مقیاس گام زمانی است این مقدار کمتر از ۰/۹ در نظر گرفته می شود. در تحلیل انفجار مقدار این ضریب به صورت تقریبی مقدار ۰/۶۷ در نظر گرفته می شود [۷۵].

۳-۶- ماده منفجره

در مدل سازی انفجار در محیط هوا تابع بار فشاری با استفاده از روش LBE بر حسب جرم معادل TNT محاسبه می شود. لذا در این روش نیازی به مدل سازی محیط هوا و ماده منفجره نیست.

در مدل سازی انفجار در محیط آب با روش ALE، ماده منفجره و محیط آب به وسیله فرمولاسیون ALE Multimaterial مدل سازی شد. با استفاده از این روش پیشرفته به عنوان توسعه و گسترش بر تحقیقات قبلی در این حوزه، هم پدیده انفجار در ماده منفجره، هم انتشار موج شوک در محیط واسط و هم رفتار دینامیکی سازه در برابر موج شوک حاصل از انفجار زیر آب شبیه سازی شد. ماده منفجره استفاده شده TNT با ضرایب مدل مادی High explosive burn (جدول ۳-۷) و معادله حالت JWL (جدول ۳-۸) مدل شد.

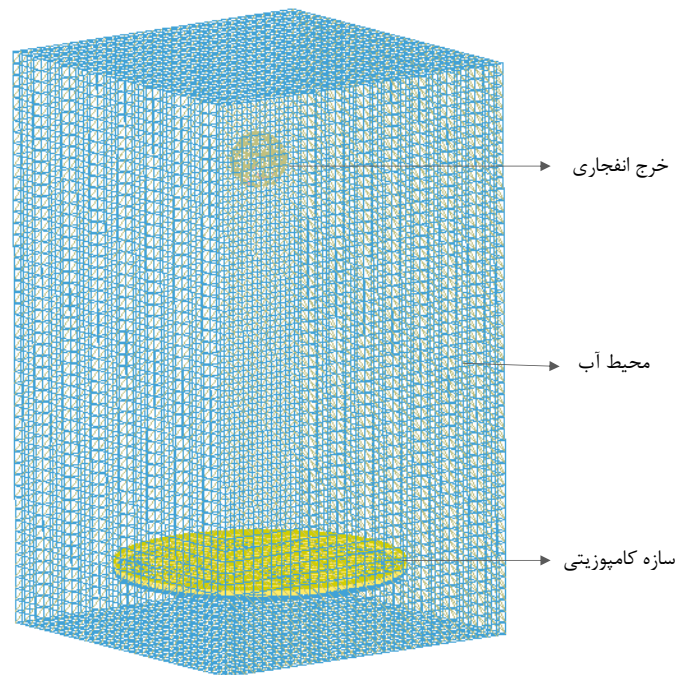
جدول ۳-۷ مدل مادی ماده منفجره TNT [۷۶]

$BETA$	P_{CJ} (GPa)	سرعت انفجار (m/s)	چگالی (kg/m ³)
۰	۲۱	۶۹۳۰	۱۶۳۰

جدول ۳-۸ ضرایب معادله حالت JWL ماده منفجره TNT [۷۶]

$OMEG$	R_2	R_1	B' (GPa)	A' (GPa)
۰/۳۵	۰/۹	۴/۱۵	۳/۲۱	۳۷۱/۲

برای مطالعه پارامتری در خصوص فاصله خرج انفجاری تا سازه یا جرم خرج انفجاری و تأثیر تغییراتی که در پاسخ سازه ایجاد می‌کند، استفاده از روش هندسه کسر حجمی^۱ یکی از راه‌های مطمئن و کم هزینه می‌باشد. این روش این امکان را به ما می‌دهد تا بدون ایجاد مدل با مش‌بندی‌های مختلف، به بررسی تغییرات پارامتر مورد نظر بر سازه بپردازیم. با استفاده از این روش نیازی به مدل‌سازی و مش‌بندی خرج انفجاری در فاصله و جرم‌های مختلف نیست بلکه کافیت با مشخص کردن مختصات و هندسه آن در Part ALE مورد نظر (که در این بررسی محیط آب مدنظر است) تأثیر تغییر فاصله خرج انفجاری TNT بر سازه کامپوزیتی که در محیط آب قرار دارد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور بعد از مدل‌سازی محیط آب و سازه کامپوزیتی، خرج انفجاری درون محیط آب در مختصات مورد نظر با هندسه کروی ایجاد می‌شود. طرح‌واره مشخص شده در شکل ۳-۵ مدل‌سازی در این روش برای محیط آب در نرم‌افزار LS-DYNA را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ طرح‌واره مدل‌سازی شده در محیط آب

^۱ Volume fraction geometry

۳-۷- بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

طراحی آزمایش شامل یکسری از آزمایش‌هایی می‌شود که به‌طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرایند تغییراتی ایجاد می‌کند تا از طریق آن میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرایند مشاهده و شناسایی شود. روش سطح پاسخ^۱ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل چند متغیره استفاده می‌شود و هدف آن مدل‌سازی و بهینه‌سازی پاسخ است [۷۷]. در بسیاری از مسائل RSM، رابطه بین پاسخ‌ها و متغیرهای مستقل ناشناخته است. بنابراین اولین گام در RSM، یافتن تخمین مناسب برای رابطه تابعی صحیح^۲ بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. معمولاً از یک چند جمله‌ای مرتبه پایین در برخی از نواحی متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ به خوبی توسط یک تابع خطی بر حسب متغیرهای مستقل مدل شود، تابع تقریب^۳ برای مدل مرتبه اول مطابق با رابطه ۳-۱۹ است [۷۸].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad ۱۹-۳$$

در این رابطه y تابع پاسخ، x_1 تا x_k متغیرهای مستقل، k تعداد متغیرهای مستقل، β_0 تا β_k ضرایب ثابت مجهول هستند که از تحلیل بدست می‌آیند و ε خطای آماری است. اگر انحنایی در سیستم وجود داشته باشد، آنگاه باید از چند جمله‌ای مرتبه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد؛ رابطه ۳-۲۰ این معادله را نمایش می‌دهد [۷۹].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j \quad ۲۰-۳$$

تقریباً در تمام مسائل RSM از یک یا هر دو مدل بیان شده استفاده می‌شود؛ البته بعید است که یک مدل چند جمله‌ای تقریب قابل قبولی برای رابطه تابعی صحیح در تمام فضای متغیرهای مستقل باشد، اما برای یک ناحیه نسبتاً کوچک معمولاً به خوبی کار می‌کند [۸۰]. روش RSM به طرح‌های مختلفی مانند مرکب مرکزی^۴ و باکس بنکن^۵ تقسیم می‌شود. یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین آنها روش طرح مرکب مرکزی است که با در

^۱ Response surface methodology (RSM)

^۲ True functional relationship

^۳ Approximating function

^۴ Central composite

^۵ Box-Behnken

نظر گرفتن تعداد متغیرهای مستقل و محدوده آنها ماتریس آزمون را طراحی می کند. در این روش بر مبنای مقادیر مختلف α سطوح مختلف برای هر متغیر ایجاد می شود.

روش طراحی آزمایش در این پژوهش، روش طرح مرکب مرکزی است که با در نظر گرفتن تعداد متغیرهای مستقل و محدوده آنها ماتریس آزمون را طراحی می کند. در این روش بر مبنای مقادیر مختلف α سطوح مختلف برای هر متغیر ایجاد می شود. با در نظر گرفتن $\alpha = 1$ تعداد سطوح ۳ و در غیر این صورت تعداد سطوح ۵ خواهد بود. ماتریس طراحی برای پژوهش حاضر ۳ سطح مختلف برای متغیرهای مستقل خواهد داشت که به همراه سطوح آن در جدول ۹-۳ آورده شده است.

جدول ۹-۳ سطوح طراحی و متغیرهای آن جهت استفاده در نرم افزار Minitab

سطوح			متغیرهای مستقل
بالا (+۱)	مرکزی (۰)	پایین (-۱)	
۲۰	۱۵	۱۰	ضخامت لایه فولادی (t_m)
۱۵	۱۰	۵	ضخامت لایه سرامیکی (t_c)
۱/۶	۱/۵	۱/۴	مقیاس فاصله (Z)

در ادامه جهت مقایسه یک نمونه از آزمون های طراحی شده در هر دو محیط هوا و آب، سطوح و متغیرهای طراحی در هر دو محیط مشابه انتخاب شده است. اثر این عوامل بر روی متغیرهای پاسخ تنش (σ) و جابجایی (δ) ایجاد شده در سطح رویی لایه هدف در جهت نرمال بر سطح بررسی خواهد شد. به منظور بررسی دقیق تر شرایط بهینه و رسیدن به پاسخی کارآمد، میزان افزایش نسبت سفتی به وزن سازه نیز به عنوان پارامتری تعیین کننده اضافه شد (رابطه ۳-۲۱). در این رابطه K سفتی خمشی^۲ سازه است که بر طبق رابطه ۳-۲۲ محاسبه می گردد [۸۱] و W وزن سازه می باشد.

$$\alpha = \frac{S'}{W} \quad ۲۱-۳$$

$$S' = \frac{EI}{b} \quad ۲۲-۳$$

^۱ Face-centered cube

^۲ Bending stiffness

E در این رابطه مدول الاستیک، I ممان اینرسی و b عرض سازه می‌باشد. این در حالیست که برای بدست آوردن سفتی خمشی سازه‌های چند لایه، با توجه به متفاوت بودن جنس در طول سازه، موقعیت تار خنثی باید با معادل سازی عرض لایه و در نتیجه یکسان کردن مدول الاستیسیته آن‌ها محاسبه شود [۸۱]. در این شرایط با هدف حداقل کردن میزان تنش و جابجایی لایه هدف همچنین کاهش وزن سازه در عین افزایش سفتی به وزن آن، مقادیر بهینه برای پارامترهای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب برای تعداد ۳ عامل ورودی، تعداد ۲۰ آزمایش برای رسیدن به هدف تعیین شد. آزمایش‌های طراحی شده با روش RSM در محیط هوا بر روی صفحه لایه‌چینی شده با فولاد، سرامیک و لایه هدف پلیمری در جدول ۳-۱۰ مشخص شده‌اند. در نهایت با استفاده از مقادیر تنش و جابجایی لایه هدف یک معادله رگرسیونی خطی درجه ۲ ایجاد خواهد شد؛ که این معادله آماری از نقاط داده‌های جدول عبور کرده و یا در نزدیکترین موقعیت نسبت به آن‌ها قرار می‌گیرد. نرم‌افزار مینی‌تب ۱۸ برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی حاکم بر آزمایش استفاده شده‌است. همچنین برای محیط آب، سطوح و متغیرهای مستقل جهت طراحی آزمایش مطابق جدول ۳-۹ می‌باشد. در این طراحی با در نظر گرفتن $\alpha = 1/68$ سه سطح برای متغیرهای آزمون RSM طراحی شد که در جدول ۳-۱۱ آورده شده‌است.

جدول ۳-۱۰ آزمایش‌های طراحی شده به روش RSM برای محیط هوا

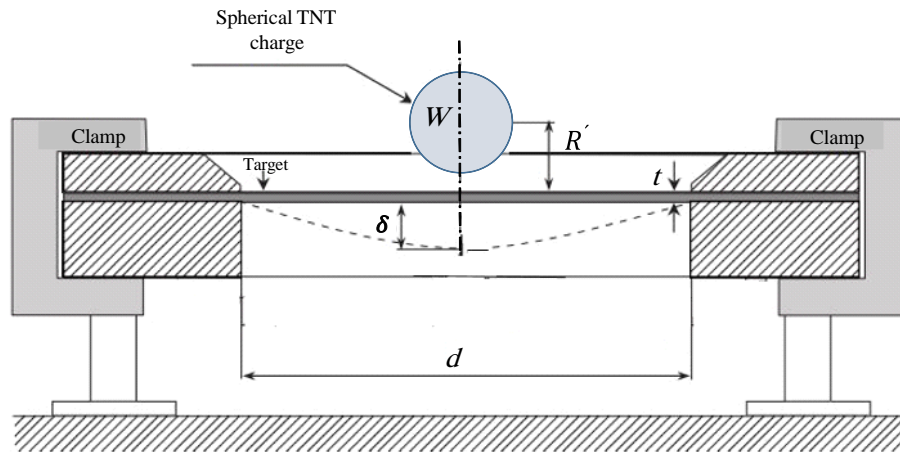
آزمون	عامل		
	Z	t_c	t_m
۱	۱/۵	۱۰	۱۵
۲	۱/۶	۱۵	۱۰
۳	۱/۵	۵	۱۵
۴	۱/۵	۱۰	۱۰
۵	۱/۵	۱۰	۱۵
۶	۱/۶	۵	۱۰
۷	۱/۴	۱۰	۱۵
۸	۱/۵	۱۰	۱۵
۹	۱/۵	۱۰	۲۰
۱۰	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۱	۱/۴	۱۵	۲۰
۱۲	۱/۵	۱۵	۱۵
۱۳	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۴	۱/۴	۵	۲۰
۱۵	۱/۶	۵	۲۰
۱۶	۱/۴	۱۵	۱۰
۱۷	۱/۶	۱۰	۱۵
۱۸	۱/۴	۵	۱۰
۱۹	۱/۵	۱۰	۱۵
۲۰	۱/۶	۱۵	۲۰

جدول ۱۱-۳ آزمایش های طراحی شده به روش RSM برای محیط آب

آزمون	عامل		
	Z	t_c	t_m
۱	۱/۵	۱۰	۱۵
۲	۱/۴	۵	۱۰
۳	۱/۵	۱۰	۱۵
۴	۱/۵	۱۰	۱۵
۵	۱/۶	۱۵	۲۰
۶	۱/۶	۱۵	۱۰
۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۸	۱/۶۶	۱۰	۱۵
۹	۱/۵	۱۸/۴	۱۵
۱۰	۱/۴	۱۵	۲۰
۱۱	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۲	۱/۴	۱۵	۱۰
۱۳	۱/۵	۱۰	۶/۶
۱۴	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۵	۱/۵	۱/۶	۱۵
۱۶	۱/۶	۵	۱۰
۱۷	۱/۵	۱۰	۲۳/۴
۱۸	۱/۳۳	۱۰	۱۵
۱۹	۱/۶	۵	۲۰
۲۰	۱/۴	۵	۲۰

۳-۸- طراحی آزمون جهت صحت سنجی

مطابق شکل ۳-۶ طرحواره آزمون صحت سنجی انفجار در هوا بر روی ورق تک لایه RHA به قطر d و ضخامت t که خرج TNT به وزن W ، به فاصله R' از مرکز صفحه قرار دارد؛ مشاهده می شود. تغییر شکل بیشینه مرکز صفحه پس از برخورد موج انفجار برابر δ می باشد.



شکل ۳-۶ طرحواره ساختار مورد آزمایش جهت صحت سنجی در محیط هوا

چهار آزمون جهت صحت سنجی در محیط هوا برای متغیر پاسخ، تغییر شکل بیشینه مرکز ورق فولاد زرهی RHA مطابق جدول ۳-۱۲ طراحی شده است که در ادامه با نتایج تجربی نیوبرگر [۹] مورد مقایسه قرار می گیرد.

جدول ۳-۱۲ آزمون طراحی شده جهت صحت سنجی در محیط هوا

شماره آزمون	t (m)	d (m)	W (kg)	R' (m)	Z (m/kg ^{1/3})
T1	۰/۰۲	۱	۳/۷۵	۰/۲	۰/۱۲۸
T2	۰/۰۱	۰/۵	۰/۴۶۸	۰/۱	۰/۱۲۸
T3	۰/۰۲	۱	۸/۷۵	۰/۱۳	۰/۰۶۳
T4	۰/۰۱	۰/۵	۱/۰۹۴	۰/۰۶۵	۰/۰۶۳

طرحواره آزمون صحت سنجی انفجار در آب همانند طرحواره آزمون انفجار در هوا می باشد شکل ۳-۶، با این تفاوت که محیط احاطه کننده صفحه آب می باشد. بر روی دو نوع ورق فولادی تک لایه به طول $۰/۳$ m و

عرض 0.25 m و ضخامت 0.004 m که خرج TNT به وزن W ، به فاصله R از مرکز صفحه قرار دارد؛ مشاهده می شود. تغییرشکل بیشینه مرکز صفحه پس از برخورد موج انفجار برابر δ می باشد.

برای صحت سنجی انفجار در محیط آب از دو نوع فولاد استفاده شده است. این دو نوع فولاد به نام های Mild Steel و HS Steel بوده که ترکیب شیمیایی نوع Mild Steel در جدول ۳-۱۳ و نوع HS Steel در جدول ۳-۱۴ بیان شده و همچنین خواص هر دو فولاد در جدول ۳-۱۵ آورده شده است. چهار آزمون بدین منظور برای این دو فولاد طراحی شده و با پژوهش تجربی راماجیاتیلگام و همکاران [۲۵] مورد مقایسه قرار گرفت. آزمون های طراحی شده برای محیط آب در جدول ۳-۱۶ ارائه شده است. قابل ذکر است که مقاله تجربی آزمایش های خود را با ماده منفجره PEK I انجام داده است که با استفاده از رابطه ۲-۱۱ تبدیل به TNT معادل شده و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳-۱۳ ترکیب شیمیایی Mild steel

C	Mn	Si	Nb	S	P
۰/۰۶	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸

جدول ۳-۱۴ ترکیب شیمیایی HS steel

C	Cr	W	V	Mn	Si
۰/۶۵-۰/۸۰	۴/۰۰	۱۸	۱	۰/۱-۰/۴	۰/۲-۰/۴

جدول ۳-۱۵ خواص فیزیکی و مکانیکی Mild Steel و HS Steel جهت صحت سنجی در محیط آب [۲۵]

ماده	مدول الاستیک E(GPa)	ضریب پواسون ν	چگالی $\rho(\text{kg/m}^3)$	تنش تسلیم $\sigma_y(\text{MPa})$	مدول مماسی Et (MPa)
HS Steel	۲۱۰	۰/۳	۷۸۰۰	۴۰۰	۲۵۰
Mild Steel	۲۱۰	۰/۳	۷۸۰۰	۲۵۰	۲۵۰

پارامتر شوک^۱ در انفجار زیر آب، به عنوان یک معیار تشخیص شدت انفجار است. این پارامتر تابعی از وزن خرج، فاصله خرج و زاویه افقی هدف نسبت خرج انفجار می‌باشد که به صورت معادله ۳-۲۳ تعریف می‌شود [۸۲].

$$SF = 0.45 \times \frac{W^{1/2}}{R'} \quad ۳-۲۳$$

جدول ۳-۱۶ آزمون طراحی شده جهت صحت‌سنجی انفجار در محیط آب

شماره آزمون	جنس	W (g)	TNT Equ. (g)	R' (m)	SF (kg ^{1/2} /m)
T1-HS1	HS Steel	۱۰	۶۰	۰/۱۵	۰/۳۰۰
T2-HS2	HS Steel	۲۰	۱۲۰	۰/۱۵	۰/۴۲۴
T3-MS1	Mild Steel	۵۰	۳۰۰	۰/۱۵	۰/۶۷۱
T4-MS2	Mild Steel	۷۰	۴۲۰	۰/۱۵	۰/۷۹۴

^۱ Shock factor

فصل ۴ نتایج و بحث

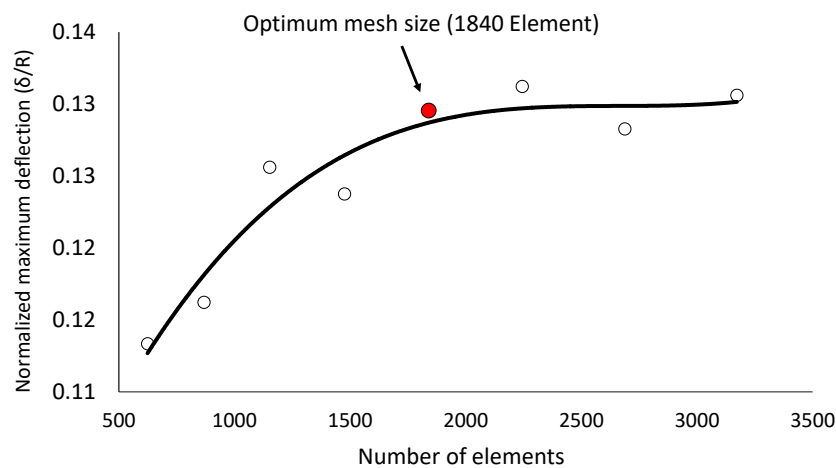
۴-۱- مقدمه

در این بخش نتایج پایان نامه شامل موارد ذیل ارائه شده است. در بخش انفجار در محیط هوا بعد از ارائه نتایج صحت‌سنجی برای بارگذاری بر روی یک ورق تک لایه فلزی، به تحلیل نتایج سازه کامپوزیتی در دو حالت انفجار با موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت پرداخته شده است. با استفاده از نرم‌افزار بهینه سازی Minitab به ارائه سازه‌ای با کمترین وزن و بیشترین استحکام به وزن پرداخته شده است. به صورت مشابه در محیط آب نیز بعد از صحت‌سنجی به بررسی عملکرد سازه کامپوزیتی در برابر موج شوک در فاصله نزدیک و دور پرداخته شده است. در انتها یک سازه با مشخصات یکسان و شرایط بارگذاری یکسان در دو محیط هوا و آب با هم مورد مقایسه قرار گرفته است.

۴-۲- نتایج مدل سازی انفجار در محیط واسط هوا

۴-۲-۱- استقلال نتایج از اندازه المان

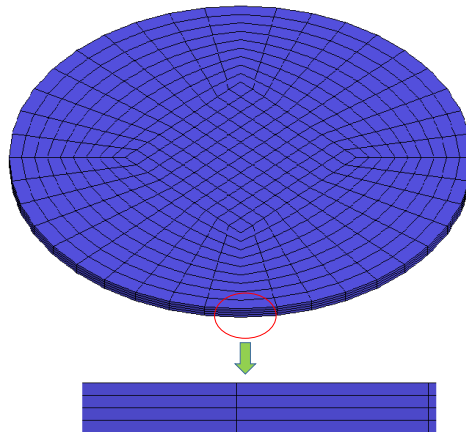
برای بررسی استقلال نتایج از اندازه المان، تحلیل حساسیت مش برای تابع هدف خیز بی بعد شده مرکز ورق بر حسب شعاع ورق انجام شد. این شبیه سازی با روش LBE برای $3/75$ kg ماده منفجره TNT در فاصله $0/2$ m از صفحه دایروی به قطر 1 m و ضخامت $0/02$ m از جنس ورق فولادی RHA اجرا شد که نتایج بدست آمده در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. مطابق شکل مشخص شد که ریز شدن المان تا رسیدن به 1840 المان ضروری است و پس از آن نتایج مستقل از اندازه المان خواهد بود.



شکل ۴-۱ همگرایی مش در محیط هوا

شکل ۴-۲ ورق شبکه بندی شده در نرم افزار LS-PREPOST-6.1 نشان می دهد. برای افزایش دقت تحلیل و به منظور جلوگیری از ایجاد المان نوک تیز با زاویه بسیار کوچک، در وسط صفحه المان ها بصورت مربعی ایجاد شد.

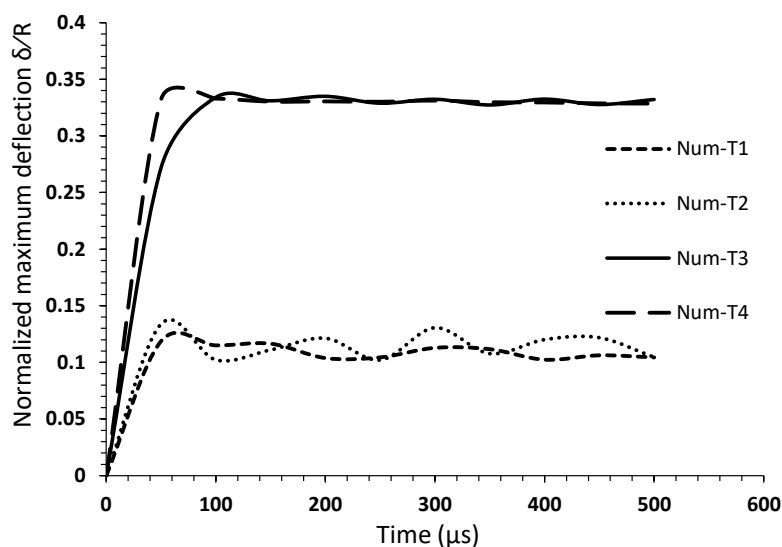
Number of elements= 1840
Number of nodes = 2405



شکل ۲-۴ شبکه بندی صفحه تک لایه فلزی دایره‌ای

۴-۲-۲- صحت‌سنجی مدل برای یک هدف تک لایه فلزی

شبیه‌سازی‌ها مطابق آزمون‌های طراحی شده در جدول ۳-۱۲ انجام شد و برای هر یک از آزمون‌ها نمودار جابجایی نرمال شده با شعاع صفحه دایروی به زمان در شکل ۴-۳ ارائه شده است. نکته قابل ذکر این است که اولاً پارامتر اصلی تعیین‌کننده در تغییر شکل ورق مقیاس فاصله Z می‌باشد. لذا آزمون‌های T1 و T2 با مقدار Z برابر ۰/۱۲۸ و همچنین آزمون‌های T3 و T4 با مقدار Z برابر ۰/۰۶۳ تغییر شکل یکسانی از خود نشان داده‌اند. نکته دیگر آن که هر چه وزن خرج انفجاری بیشتر شده است، دامنه نوسان ارتعاشی قطعه پس از تغییر شکل اولیه کاهش خواهد یافت. نکته بدیهی است که با کاهش مقیاس فاصله، تغییر شکل ورق بیشتر می‌باشد.



شکل ۴-۳ خیز بی بعد شده برای چهار آزمون طراحی شده برای صحت‌سنجی در محیط هوا

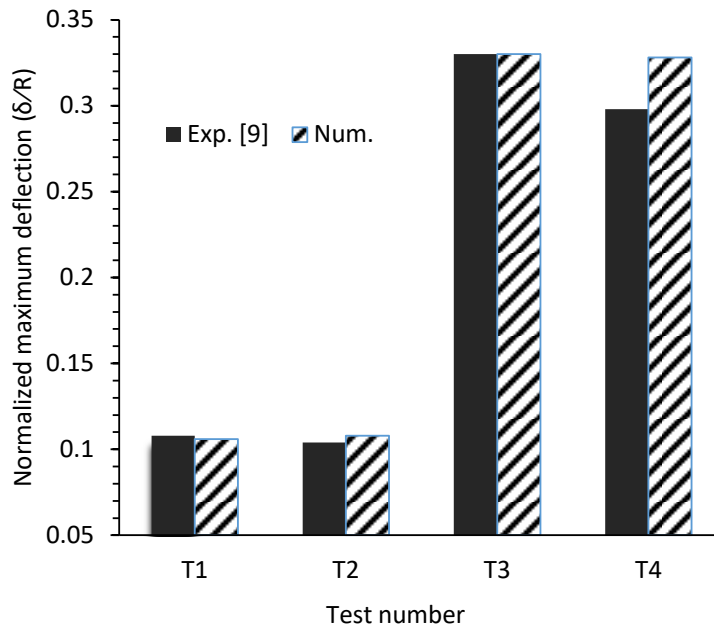
مقایسه نتایج عددی با داده‌های مقاله عددی - تجربی نیوبرگر، در جدول ۴-۱ آمده‌است. با توجه به آزمون‌های شبیه‌سازی شده و مقایسه با مقادیر تجربی، میانگین خطایی حدود ۴ درصد بدست آمده‌است که نشان از دقت بالای نرم‌افزار در شبیه‌سازی انفجار در محیط هوا به وسیله روش LBE دارد.

جدول ۴-۱ مقایسه مقادیر شبیه‌سازی عددی با آزمون تجربی نیوبرگر [۹]

شماره آزمون	$\frac{\delta}{R}|_{Num.}$	$\frac{\delta}{R}|_{Exp.}$ [۹]	درصد خطا
T1	۰/۱۰۶	۰/۱۰۸	۲
T2	۰/۱۰۸	۰/۱۰۴	۳/۵
T3	۰/۳۳	۰/۳۳	۰
T4	۰/۳۲۸	۰/۲۹۸	۹

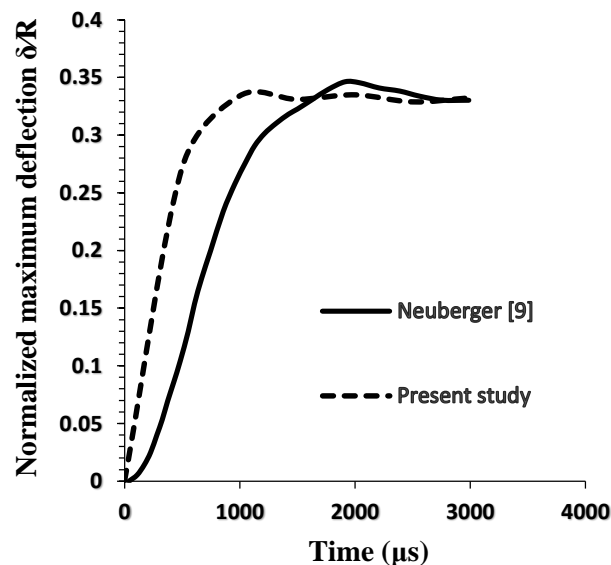
کم‌ترین و بیش‌ترین خطای مدل‌سازی به ترتیب مربوط به آزمون‌های T3 و T4 می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا با کاهش ضخامت نمونه افزایش می‌یابد. علت این افزایش خطا را می‌توان به اثر اندازه^۱ مرتبط دانست. در واقع خواص مکانیکی متاثر از تغییرات ابعادی نمونه تغییر می‌کند [۸۳]. که این تغییرات در مدل عددی لحاظ نشده‌است و می‌تواند منشاء بروز خطا باشد. البته فرض همسانگردی ورق نیز می‌تواند عامل دیگری برای اختلاف نتایج عددی و تجربی باشد. در شکل ۴-۴ تغییر شکل بی‌بعد شده مرکز ورق، حاصل از مدل عددی و تست تجربی برای چهار آزمون طراحی شده؛ به صورت نمودار ستونی ارائه شده‌است. مطابق شکل نتایج عددی از تطابق قابل قبولی در مقایسه با مقادیر تجربی برخوردار است.

^۱ Size effect



شکل ۴-۴ مقایسه تغییرشکل بی بعد شده مرکز ورق برای آزمون‌های طراحی شده

به منظور راستی‌آزمایی نتایج عددی، تغییرشکل بیشینه مرکز ورق حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش‌های نیوبرگر مورد مقایسه قرار گرفت. نیوبرگر به بررسی تجربی و عددی پاسخ دینامیکی صفحات دایره‌ای گیردار تحت بارگذاری انفجاری نزدیک به صفحه با مقادیر مقیاس‌شده‌ی خرج انفجاری کروی در محیط هوا پرداخته است. در شکل ۴-۵ خیز بی‌بعد شده مرکز ورق بر حسب زمان، حاصل از نتایج این تحقیق و مقاله نیوبرگر ارائه شده‌است که نشان می‌دهد نتایج عددی این پژوهش از تطابق قابل قبولی در مقایسه با نتایج مقاله مرجع برخوردار است.



شکل ۴-۵ تغییرات خیز بی‌بعد شده مرکز ورق برای آزمون T3، مقایسه نتایج عددی و تجربی

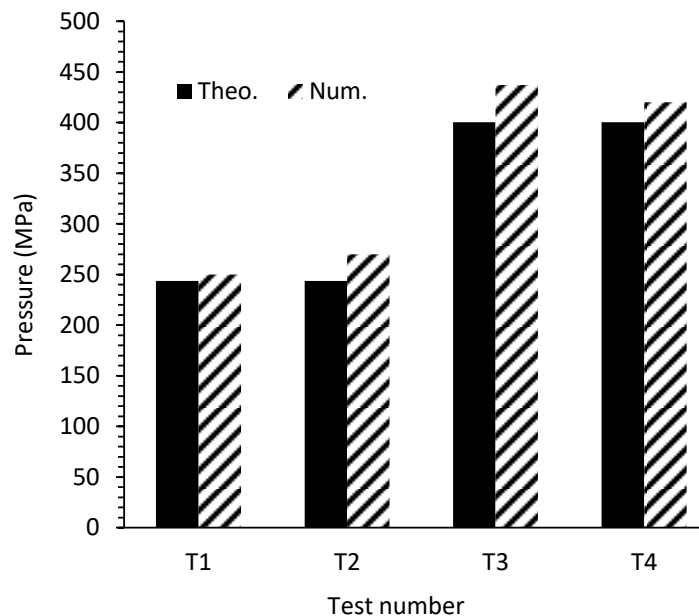
زمانی که موج انفجار در هوا با زاویه‌ی صفر درجه با سطح بالای صفحه برخورد می‌کند، به صورت عمود بر سطح بازتاب می‌کند. فشار بازتاب P_{pm} طبق رابطه‌ی رنکین - هوگونویوت^۱ برای گازهای ایده‌ال به صورت رابطه ۱-۴ بدست می‌آید [۵۰].

$$P_{pm} = \frac{2P_m(7P_0+4P_m)}{(7P_0+P_m)} \quad 1-4$$

فشار بیشینه تحلیلی به کمک روابط ۲-۱۷ و ۱-۴ محاسبه و با مقادیر معادل بدست آمده از شبیه‌سازی در جدول ۲-۴ مقایسه شده‌است. شکل ۶-۴ نتایج بدست آمده را به صورت نمودار ستونی نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴ مقایسه مقادیر فشار بیشینه برای چهار آزمون طراحی شده از نتایج تحلیلی و عددی

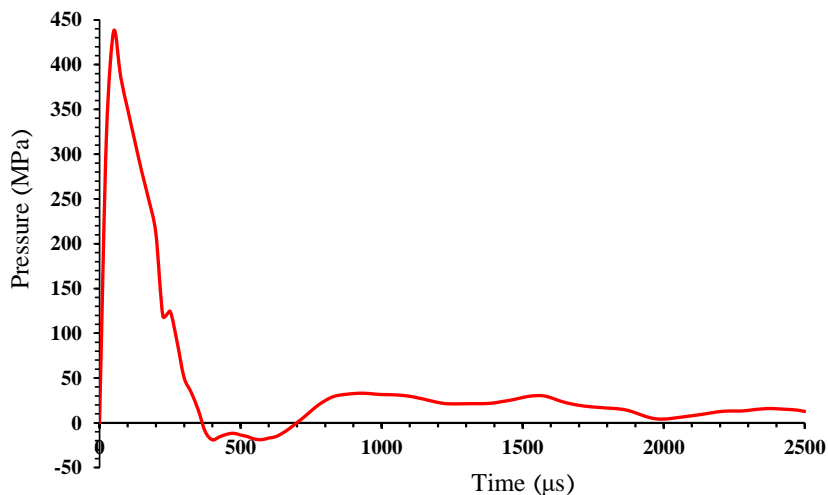
شماره آزمون	$P_{Theo.}$ (MPa)	$P_{Num.}$ (MPa)	درصد خطا
T1	۲۴۳/۸	۲۵۰	۲
T2	۲۴۳/۷	۲۷۰	۹
T3	۴۰۰/۵	۴۳۷	۹
T4	۴۰۰/۵	۴۲۰	۵



شکل ۶-۴ فشار بیشینه برای چهار آزمون طراحی شده از نتایج تحلیلی و عددی

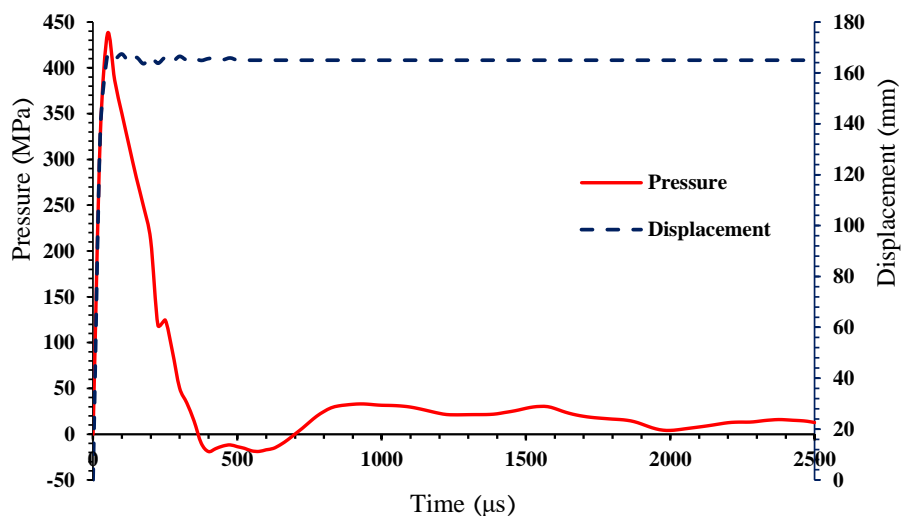
^۱ Rankine-hugoniot

باید توجه داشت که در روش تئوری مطابق رابطه ۲-۱۷ فشار بیشینه صرفاً تابعی از کمیت مقیاس فاصله Z است، به همین دلیل مثلاً برای آزمون‌های $T1$ و $T2$ با Z یکسان، فشار برابری نیز حاصل شده‌است. در حالی که در واقع ممکن است فشار ایجاد شده از خرج انفجار علاوه بر وزن و فاصله خرج به عوامل پیچیده‌تری مانند صلبیت خمشی مانع و زاویه‌ی برخورد موج شوک وابسته باشد که در مدل ساده تئوری لحاظ نشده‌است. نمودار فشار - زمان برای آزمون $T3$ در محیط هوا به صورت شکل ۴-۷ ارائه شده‌است. فشار بیشینه بدست آمده در این آزمون برابر 437 MPa است.



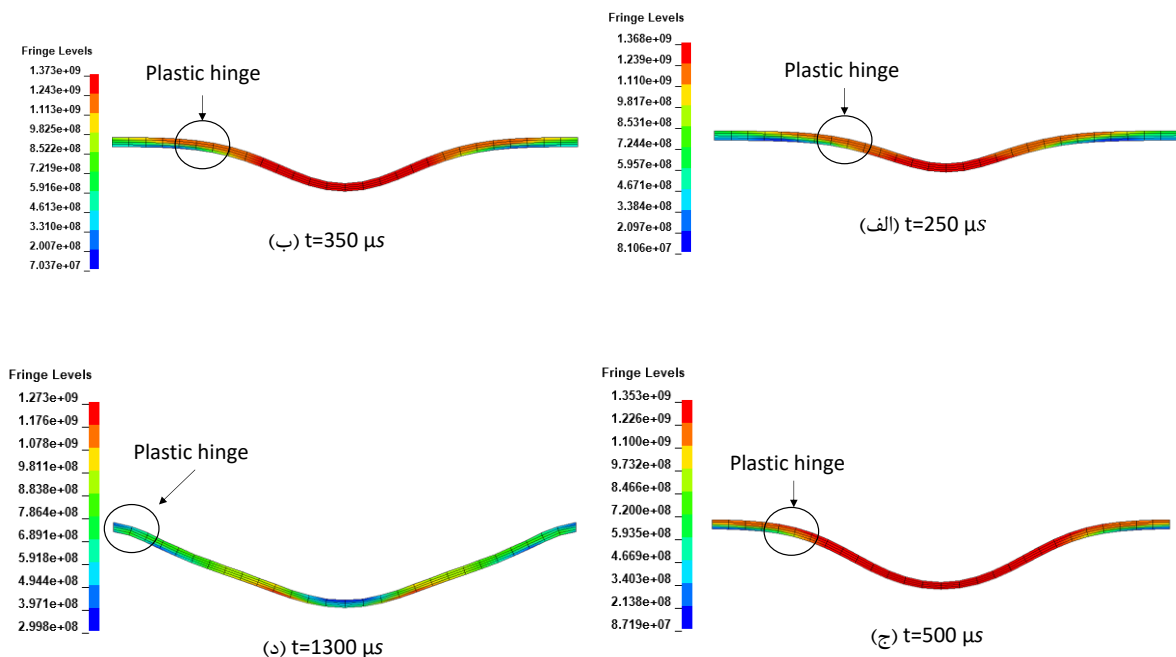
شکل ۴-۷ نمودار فشار- زمان وارد بر سطح صفحه فولادی RHA برای آزمون $T3$

در شکل ۴-۸ نمودار فشار و جابجایی بر حسب زمان برای آزمون $T3$ نمایش می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است تمام تغییر شکل انجام شده بر روی ورق با اولین برخورد پیشانی جبهه موج شوک تکمیل می‌شود.



شکل ۴-۸ نمودار تنش و جابجایی بر حسب زمان برای آزمون $T3$

توزیع تنش مؤثر در چهار مرحله از زمان فرایند به ترتیب برابر ۲۵۰، ۳۵۰، ۵۰۰ و ۱۳۰۰ μs برای آزمون T3 در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است در ابتدای حرکت، موج شوک کروی در قسمت (الف) سطح کمی از صفحه را در برمی گیرد این از آن جهت است که شعاع موج شوک در ابتدای انفجار کم بوده و با افزایش مدت زمان این شعاع افزایش پیدا می کند که نهایتاً در قسمت (د) موج شوک حاصله کل سطح صفحه را در بر گرفته و بیشینه اثر خود را بر جا می گذارد. همچنین می توان مشاهده کرد که مکانیزم تغییر شکل مومسان در شکل دهی انفجاری بر خلاف روش های سنتی با سرعت پایین (اعم از ابزار صلب فلزی و یا ابزار انعطاف پذیری مانند روغن و آب) به صورت کاملاً غیر یکنواخت است که با ایجاد و حرکت یک لولای پلاستیک^۱ همراه است. حرکت این لولا ابتدا از مرکز صفحه شروع شده و با افزایش زمان فرایند انفجار به سمت لبه های صفحه حرکت می کند.

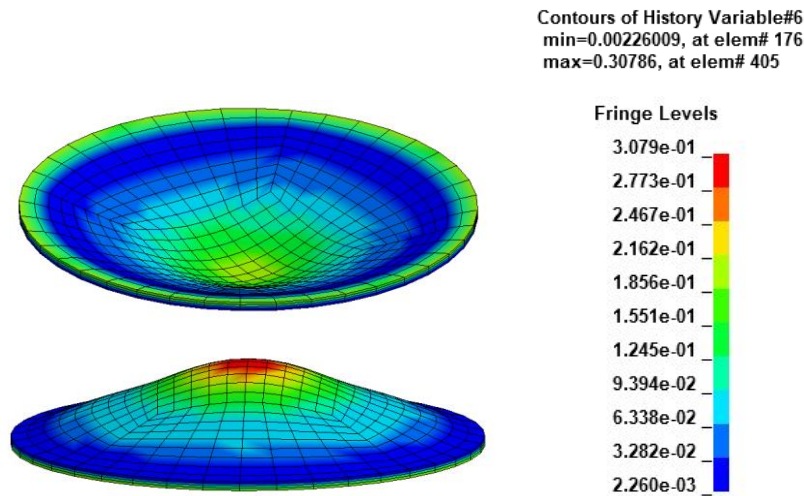


شکل ۴-۹ توزیع تنش مؤثر (بر حسب Pa) در چهار مرحله از زمان فرایند برای آزمون T3

به منظور پیش بینی سلامت محصول در حین فرایند شکل دهی انفجاری پارامتر آسیب D برای آزمون T3 استخراج و در شکل ۴-۱۰ نمایش داده شده است. اگر $D < 1$ باشد؛ نشان از سلامت ورق در هنگام شکل دهی

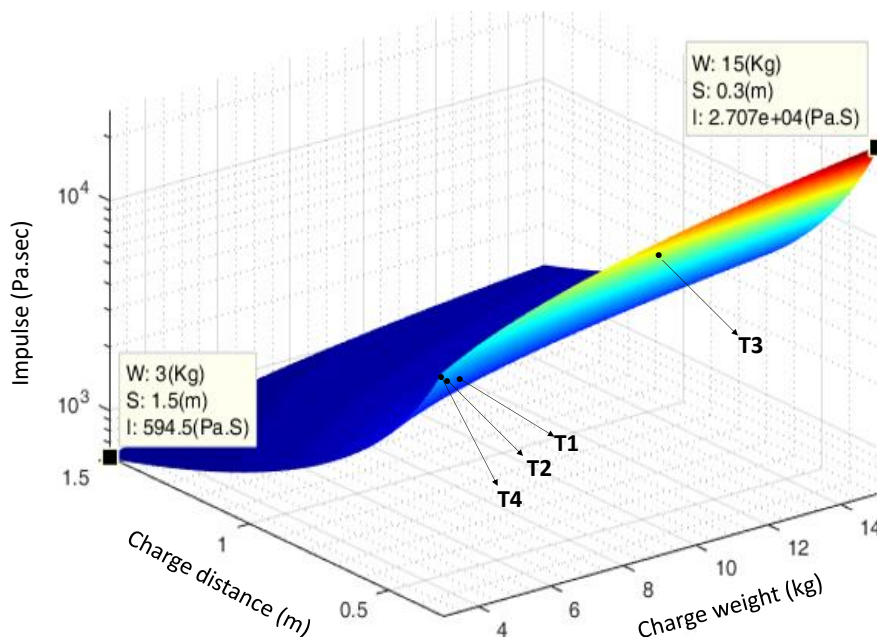
^۱ Plastic hinge

می‌باشد و در لحظه شروع آسیب این پارامتر به ۱ خواهد رسید. مطابق شکل این پارامتر در پایان فرایند شکل‌دهی به مقدار بیشینه 0.30786 رسید که نشان از سلامت ورق پس از تغییر شکل است.



شکل ۴-۱۰ توزیع پارامتر آسیب برای نمونه تغییر شکل یافته بعد از آزمون T3

یکی از پارامترهای مستقلی که می‌توان به وسیله آن خواص یک موج انفجاری را در محیط هوا توصیف کرد، ایمپالس تولید شده است. در یک انفجار مقدار خرج منفجره و فاصله آن تا سازه از متغیرهای تاثیرگذار بر روی ایمپالس تولید شده به وسیله انفجار می‌باشد. در شکل ۴-۱۱ تاثیر جرم خرج انفجار و فاصله استقرار خرج کروی بر ایمپالس حاصل از موج شوک نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۱ تاثیر جرم خرج انفجاری و فاصله استقرار خرج بر ایمپالس حاصل از موج شوک در محیط هوا

با توجه به شکل ۴-۱۱ که نشان دهنده اثر پارامتر وزن خرج انفجار و فاصله آن از ورق می باشد، مشاهده می شود با کم شدن فاصله خرج و افزایش مقدار خرج انفجاری ایمپالس ایجاد شده افزایش پیدا می کند.

مطابق رابطه ۴-۲ خیز بیشینه ورق به ایمپالس شوک ایجاد شده که نشان دهنده میزبان قدرت تخریبی شوک اولیه می باشد؛ وابسته است. این معادله توسط ویرزبیک و فلورنس [۲] با استفاده از مدل صلب - پلاستیک برای تغییر شکل صفحات دایروی گیردار ارائه شده است. در نتیجه این مدل تحلیلی، تغییر شکل مرکز صفحه δ بی بعد شده با شعاع صفحه R به کمک رابطه ۴-۲ محاسبه می شود.

$$\frac{\delta}{R} = 0.56 \frac{I^2 R}{8\mu M_0} \quad 2-4$$

$$M_0 := \sigma_0 h^2$$

که در این رابطه R شعاع صفحه، I ایمپالس تولیدشده، M_0 گشتاور خمشی پلاستیک، σ_0 تنش تسلیم و $2h$ ضخامت صفحه می باشد. همچنین μ چگالی سطح است که به صورت نسبت جرم به سطح مقطع تعریف می شود. یافته های تجربی ویرزبیک و فلورنس نشان داد معادله ی ۴-۲ که با فرض ماده ی صلب - کاملاً پلاستیک محاسبه شده است، برای تغییر شکل با نرخ کرنش بسیار زیاد قابل تعمیم نیست. لذا در ادامه برای حل این مشکل رابطه ۴-۳ را پیشنهاد کرد.

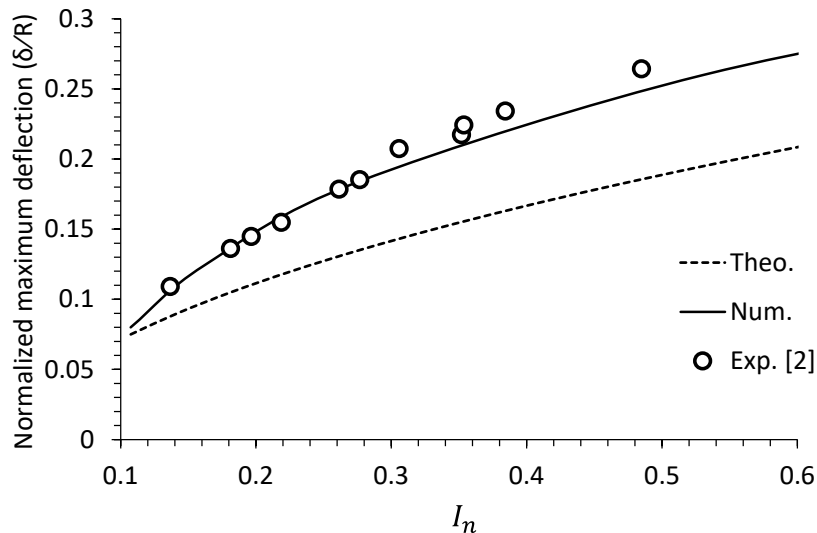
$$(\beta/8)[(\delta/R)\Delta + (4/\beta)^2 \log\{(\beta/4)(\delta/R + \Delta)\}] = 0.54(I_n)$$

$$I_n := \frac{I^2 R}{8\mu M_0} \quad 3-4$$

$$\Delta := [(4/\beta)^2 + (\delta/R)^2]^{1/2}$$

$$\beta := 2R/h$$

که در این رابطه I_n ایمپالس بی بعد شده می باشد. با استفاده از رابطه (۴-۳) پیش بینی های صورت گرفته تحلیلی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایش تجربی انجام گرفته داشت. مطابق شکل ۴-۱۲ خیز بی بعد شده مرکز ورق به ازای مقادیر مختلف ایمپالس I_n برای ورق با قطر ۱m و ضخامت ۰/۰۲m به صورت نرم افزاری و همچنین تحلیلی (به کمک رابطه ۴-۳) محاسبه و با نتایج تجربی ویرزبیک مقایسه شد.



شکل ۴-۱۲ مقادیر تحلیلی با مقادیر شبیه‌سازی عددی در محیط هوا

شکل ۴-۱۲ به وضوح نشان می‌دهد که مدل عددی با دقت بسیار مطلوب قادر به پیش‌بینی میزان تغییر شکل مرکزی ورق می‌باشد. در حالی که در روش ساده شده تحلیلی با افزایش ایمپالس انفجار انحراف نتایج از مقدار تجربی روند صعودی دارد. در واقع یافته‌های ویرزبکی و فلورنس صرفاً جهت پیش‌بینی خیز مرکز ورق برای انفجار با فشار یکنواخت بر سطح ورق دارای اعتبار است.

ایمپالس تولیدشده برای هر آزمون طراحی شده در محیط هوا بر طبق رابطه گودمن، که در رابطه‌ی ۲-۲۲ تعریف شده، محاسبه و در جدول ۴-۳ ارائه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر عددی و تئوری مورد مقایسه قرار گرفته‌است که نشان از انطباق قابل قبول نتایج دارد.

جدول ۴-۳ مقایسه ایمپالس حاصل از انفجار در هوا به روش تحلیلی و عددی

شماره آزمون	I_{Num} (Pa·s)	I_{Theo} (Pa·s)	درصد خطا
T1	۳۵۴۰۰	۳۷۷۰۰	۶
T2	۱۹۳۰۰	۱۸۹۰۰	۲
T3	۲۶۲۰۰۰	۲۷۹۲۰۰	۶
T4	۱۳۳۰۰۰	۱۳۹۶۰۰	۴/۷

۴-۲-۳ - نتایج بهینه‌سازی سازه کامپوزیتی تحت بارگذاری انفجاری در محیط واسط هوا

سازه مورد نظر تشکیل شده از لایه سرامیکی SiC، که در برخورد مستقیم موج شوک قرار دارد، لایه میانی صفحه فولادی مستحکم شده RHA و لایه آخر، صفحه پلیمری PMMA می‌باشد که نحوه قرار گرفتن این لایه‌ها در شکل ۲-۳ نشان داده شده‌است. این سازه بعد از مشخص شدن متغیرهای ورودی به شرح جدول ۳-۹ به کمک نرم‌افزار بهینه‌سازی مینی‌تب آزمایش‌های برای آن طراحی گردیده‌است که بعد از شبیه‌سازی آزمایش‌های طراحی شده به وسیله نرم‌افزار LS-DYNA پاسخ‌ها (تنش، جابجایی، نسبت سفتی به وزن و وزن سازه) به صورت جدول ۴-۴ بدست آمده‌است. با توجه به نتایج بدست آمده، در ادامه به بررسی و تحلیل آن پرداخته می‌شود.

نتیجه‌گیری قطعی از نمودارها و نتایج ارائه شده مستلزم تایید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می‌پردازد. تحقیق درباره تخلف از فرض‌های اساسی و کفایت مدل، از طریق بررسی باقیمانده‌ها، میسر است. عدم وجود نقاط پرت در شکل ۴-۱۳-الف نشان دهنده برقرار بودن فرض نرمال بودن^۱ داده‌هاست. همچنین پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ‌الگوی^۲ در شکل ۴-۱۳-ب نمایانگر برقراری فرض استقلال^۳ است. این شکل صحت فرض‌های نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تایید می‌کنند. با اثبات صحت فرض‌های یاد شده، می‌توان به نتایج تحلیل واریانس که در جدول‌ها و شکل‌های که در ادامه آورده شده، اعتماد کرد. لازم به ذکر است که در تحلیل واریانس، متغیرهایی در فرایند مؤثر هستند که مقدار P آن‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۰/۹۵، از ۰/۰۵ کمتر باشد. بر این اساس می‌توان از اثر عواملی که P آن‌ها از ۰/۰۵ بیشتر است، صرف‌نظر کرد.

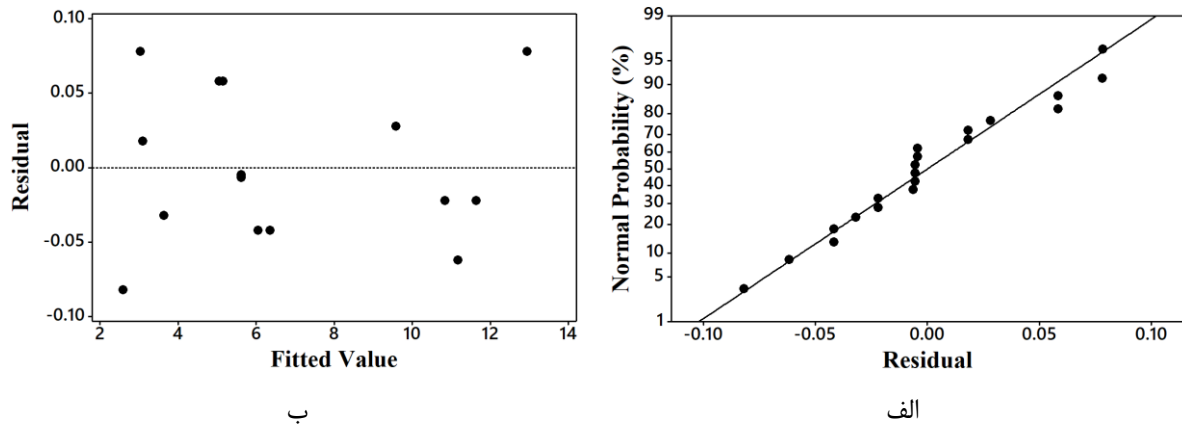
^۱ Normality assumption

^۲ Structure less

^۳ Independence assumption

جدول ۴-۴ جدول طراحی آزمایش به روش RSM به همراه پاسخ در محیط هوا

آزمون	پاسخ			عامل		
	W (N)	α (N.m/N)	δ (mm)	Z	t_c	t_m
۱	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۶	۱/۵	۱۰	۱۵
۲	۹۶۹/۴۵۰	۴۰۰/۰۰۰	۳/۱	۱/۶	۱۵	۱۰
۳	۱۰۲۷/۷۰۰	۱۸۷/۱۳۸	۱۱/۱	۱/۵	۵	۱۵
۴	۸۴۷/۶۰۰	۳۷۱/۶۹۱	۶/۳	۱/۵	۱۰	۱۰
۵	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۶	۱/۵	۱۰	۱۵
۶	۷۲۵/۷۵۰	۲۰۲/۵۷۰	۱۱/۶	۱/۶	۵	۱۰
۷	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۶	۱/۴	۱۰	۱۵
۸	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۶	۱/۵	۱۰	۱۵
۹	۱۴۵۱/۵۰۰	۴۵۲/۸۶۰	۵/۱	۱/۵	۱۰	۲۰
۱۰	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۶	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۱	۱۵۷۳/۳۵۰	۶۶۴/۴۷	۳/۱	۱/۴	۱۵	۲۰
۱۲	۱۲۷۱/۴۰۰	۵۱۸/۸۰۰	۳/۱	۱/۵	۱۵	۱۵
۱۳	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۶	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۴	۱۳۲۹/۶۵۰	۲۷۷/۲۲۶	۱۰/۸	۱/۴	۵	۲۰
۱۵	۱۳۲۹/۶۵۰	۲۲۷/۲۲۶	۹/۶	۱/۶	۵	۲۰
۱۶	۹۶۹/۴۵۰	۴۰۰/۰۰۰	۳/۶	۱/۴	۱۵	۱۰
۱۷	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۲	۱/۶	۱۰	۱۵
۱۸	۷۲۵/۷۵۰	۲۰۲/۵۷۰	۱۳	۱/۴	۵	۱۰
۱۹	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۵/۶	۱/۵	۱۰	۱۵
۲۰	۱۵۷۳/۳۵۰	۶۶۴/۴۷۰	۲/۵	۱/۶	۱۵	۲۰



شکل ۴-۱۳- الف) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده، ب) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته

اثر پدیده پیچیده و غیرخطی انفجار با تغییر فاصله خرج انفجاری تا سازه، جنس، ضخامت و تعداد لایه‌های تشکیل دهنده سازه تغییر می‌کند. در یک جرم ثابت خرج انفجاری، هر چه فاصله مرکز خرج تا سطح رویی سازه کمتر باشد، شدت آسیب وارده بیشتر می‌گردد. از طرفی اگر ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده کم باشد، این شدت آسیب افزایش پیدا می‌کند. طراحی مهندسی باید به گونه‌ای باشد که سازه با داشتن کمترین وزن، بیشترین مقاومت را در برابر موج شوک انفجاری از خود نشان دهد. برای تحلیل دقیق اثر پارامترهای مؤثر در این فرایند می‌بایست به دقت اثر عامل‌های اصلی و برهم‌کنش‌های مؤثر عامل‌ها را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد. نتایج تحلیل، جدول آنالیز واریانس و معادله رگرسیونی حاکم بر مسئله برای پاسخ‌ها در ادامه آورده شده‌است. همانطور که در جدول ۴-۵ مشاهده می‌شود از بین پارامترهای متغیر، عوامل ضخامت لایه فلزی (t_m) و مقیاس فاصله (Z) به ترتیب با $۲۸/۸\%$ و $۵۸/۳\%$ بیشترین تاثیر را بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف دارند. تمامی پارامترهای مرتبه دوم (t_m^2, t_c^2, Z^2) با توجه به اینکه مقدار P آن‌ها از $۰/۰۵$ کمتر نیست، بر روی فرایند اثر معناداری ندارند. از میان اثرات متقابل، اثر برهم‌کنش‌های بین پارامترهای $t_c \times Z$ و $t_m \times Z$ معنادار نیست و تنها اثر متقابل بین ضخامت لایه‌های فولادی و سرامیکی بر فرایند تاثیرگذار است.

جدول ۴-۵ جدول تحلیل واریانس برای میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف

منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار P	درصد تاثیر
t_m	۱	۰/۰۳۵۸۸۰	۰/۰۰۰	۲۸/۸۱
t_c	۱	۰/۰۰۲۱۹۰	۰/۰۳۷	۱/۷۶
Z	۱	۰/۰۷۲۵۹	۰/۰۰۰	۵۸/۳۰
t_m^2	۱	۰/۰۰۴۶۲۱	۰/۳۶۷	۳/۷۱
t_c^2	۱	۰/۰۰۱۳۵۳	۰/۲۷۴	۱/۰۹
Z^2	۱	۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۱۴۴	۰/۷۶
$t_m \times t_c$	۱	۰/۰۰۲۷۰۱	۰/۰۲۳	۲/۱۷
$t_m \times Z$	۱	۰/۰۰۰۰۳۷۸	۰/۳۴۱	۰/۳۰
$t_c \times Z$	۱	۰/۰۰۰۰۰۶۶	۰/۶۸۵	۰/۰۵

از نتایج بدست آمده در جدول ۴-۶ مشخص شد که بیشترین تاثیر بر مقدار جابجایی در لایه هدف را ضخامت لایه سرامیکی با درصد مشارکت ۸۹/۴۷ به خود اختصاص داده است. بقیه عوامل به غیر از پارامتر مرتبه دوم Z^2 و اثر برهم کنش بین $t_m \times Z$ بر روی مقدار جابجایی لایه هدف اثر معنادار دارند.

جدول ۴-۶ جدول تحلیل واریانس برای جابجایی لایه هدف

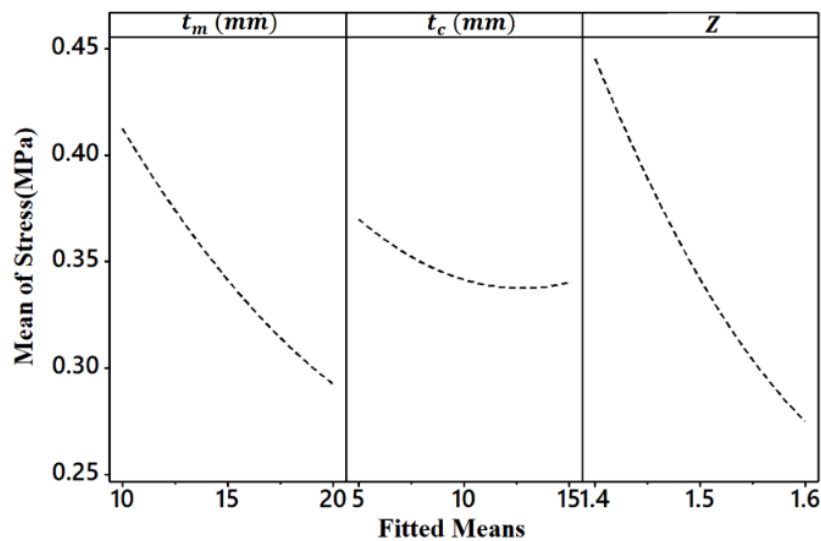
منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار P	درصد تاثیر
t_m	۱	۴/۲۲۵	۰/۰۰۰	۲/۲۸
t_c	۱	۱۶۵/۶۴۹	۰/۰۰۰	۸۹/۴۷
Z	۱	۲/۰۲۵	۰/۰۰۰	۱/۰۹
t_m^2	۱	۴/۷۰۴	۰/۰۴	۲/۵۴
t_c^2	۱	۷/۰۲۱	۰/۰۰۰	۳/۷۹
Z^2	۱	۰/۰۰۱	۰/۷۱۵	۰/۰۰
$t_m \times t_c$	۱	۱/۲۰۱	۰/۰۰۰	۰/۶۵
$t_m \times Z$	۱	۰/۰۰۱	۰/۵۷۲	۰/۰۰۰
$t_c \times Z$	۱	۰/۲۸۱	۰/۰۰۰	۰/۱۵

روابط ۴-۴ و ۵-۴ معادله رگرسیونی توابع پاسخ را براساس تحلیل واریانس بیان می‌کند. مقادیر $R-Sq=۹۴/۲۲\%$ و $Sq(adj)=۹۶/۹۶\%$ برای میزان تنش ایجاد شده و $R-Sq=۹۹/۹۸\%$ و $R-Sq(adj)=۹۹/۹۶\%$ برای مقدار جابجایی در لایه هدف نشان دهنده دقت خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد.

$$\sigma = 6.05 - 0.0120 t_m - 0.0335 t_c - 6.28 Z + 0.000444 t_m^2 + 0.000544 t_c^2 + 1.86 Z^2 + 0.000735 t_m \times t_c - 0.0138 t_m \times Z + 0.0058 t_c \times Z \quad ۴-۴$$

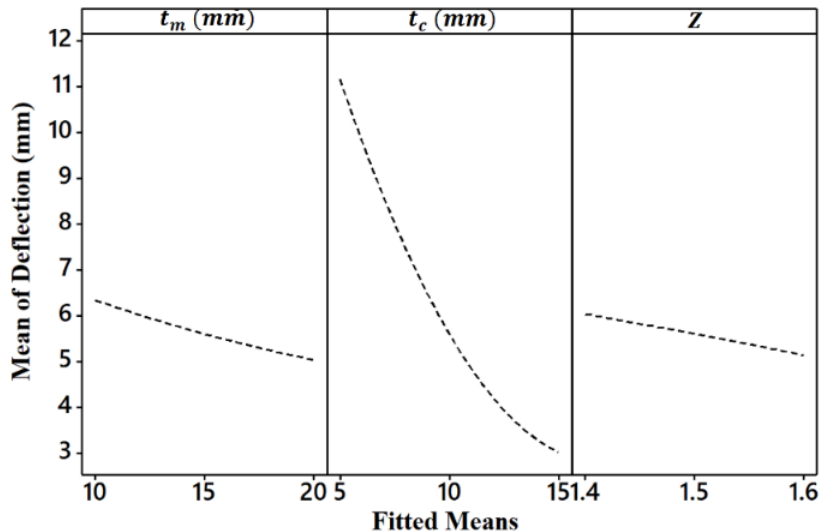
$$\delta = 34.60 - 0.4261 t_m - 2.7981 t_c - 4.5 Z + 0.00345 t_m^2 + 0.05945 t_c^2 - 1.37 Z^2 + 0.015500 t_m \times t_c + 0.0250 t_m \times Z + 0.3750 t_c \times Z \quad ۵-۴$$

همانطور که در جدول تحلیل واریانس مربوط به میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف ذکر شد (جدول ۵-۴)، قدرت موج شوک حاصل از انفجار وابستگی زیادی به مقیاس فاصله (Z) دارد. این موضوع در شکل ۴-۱۴ نیز به وضوح قابل مشاهده است؛ به گونه‌ای که با کاهش Z قدرت موج شوک افزایش و موجب افزایش ۴۰ درصدی میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف خواهد شد. با توجه به بررسی اثرات اصلی عوامل بر روی تنش ایجاد شده در این شکل می‌توان گفت که با افزایش ضخامت لایه‌ها میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف کاهش می‌یابد که این کاهش تنش با افزایش ضخامت لایه فولادی با شیب بیشتری اتفاق خواهد افتاد. میزان درصد مشارکت t_m در مقایسه با t_c در جدول ۵-۴ خود تایید کننده این موضوع است.

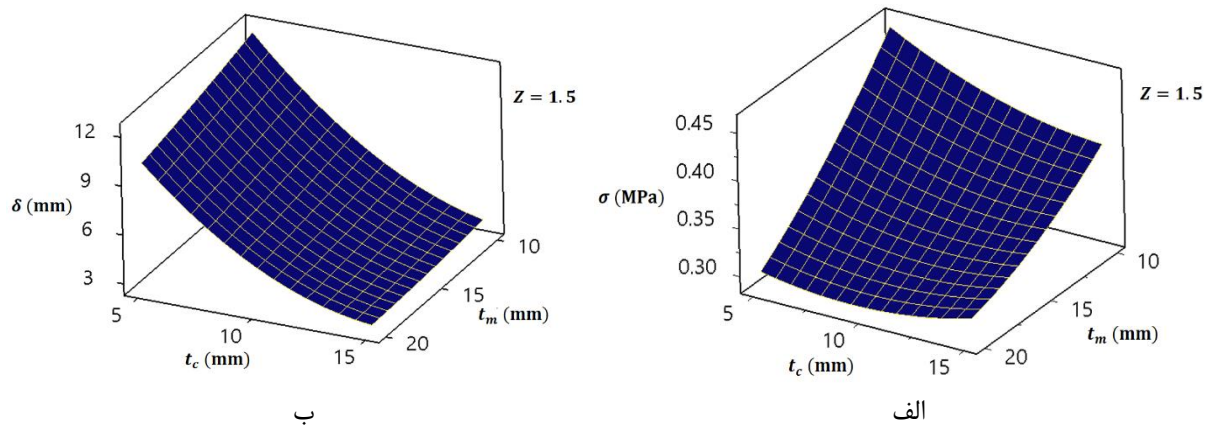


شکل ۴-۱۴ چگونگی تاثیر ضخامت لایه فلزی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف

از طرفی با توجه به شکل ۴-۱۵، تغییرات ضخامت لایه فولادی تاثیر کمتری بر مقدار جابجایی لایه هدف نسبت به تغییرات ضخامت لایه سرامیکی دارد. با کاهش ضخامت لایه سرامیکی میزان موج شوک عبوری افزایش و در نتیجه منجر به افزایش مقدار جابجایی لایه هدف به میزان ۷۳ درصد خواهد شد.

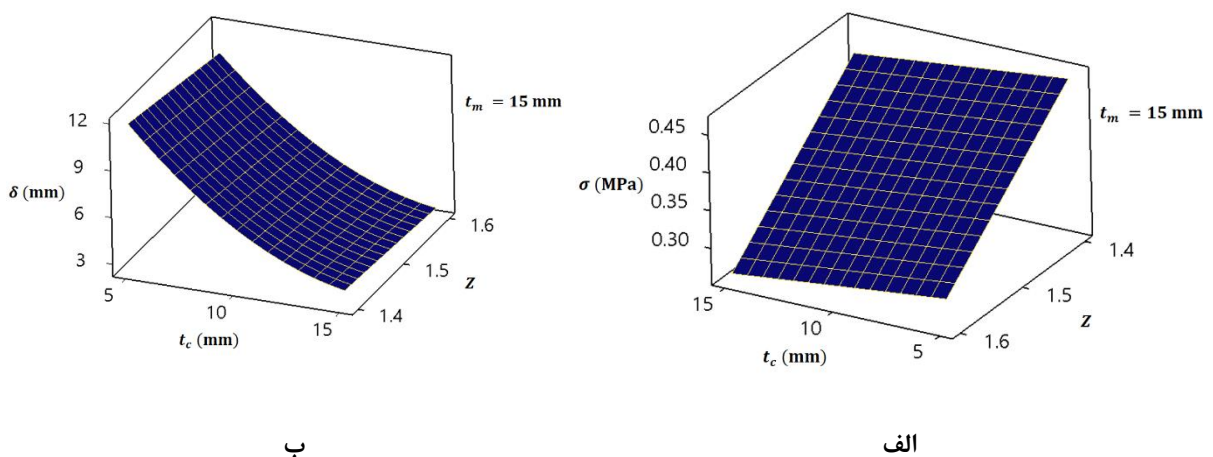


شکل ۴-۱۵ چگونگی تاثیر ضخامت لایه فلزی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر مقدار جابجایی لایه هدف به منظور بررسی بهتر و دقیق تر اثرات عوامل، سطح پاسخ سه بعدی مربوط به اثر ضخامت لایه های فلزی و سرامیکی بر روی میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف در شکل ۴-۱۶ ارائه شده است. در این نمودارها تابع پاسخ براساس دو متغیر بیان شده و متغیر سوم ثابت فرض شده است (در این شکل مقیاس فاصله برابر ۱/۵ فرض شده است). با توجه به شکل ۴-۱۶-الف، حداکثر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف تحت شرایطی ایجاد خواهد شد که ضخامت لایه های فلزی و سرامیکی پایین ترین مقدار را دارا باشند. لازم به ذکر است که در ضخامت لایه فولادی ثابت، با افزایش ضخامت لایه سرامیکی شیب تغییرات تنش ایجاد شده در لایه هدف کند خواهد بود. از طرفی حداکثر میزان جابجایی لایه هدف نیز در شرایطی که ضخامت لایه های فلزی و سرامیکی کمترین مقدار خود را داشته باشند ایجاد خواهد شد و همچنین در ضخامت لایه فولادی ثابت، با افزایش ضخامت لایه سرامیکی شیب تغییرات جابجایی لایه هدف تند خواهد بود (شکل ۴-۱۶-ب).



شکل ۴-۱۶ نمودار سطح پاسخ براساس تغییر ضخامت لایه‌های فلزی و سرامیکی برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف

با توجه به شکل ۴-۱۷-الف، با ثابت نگه‌داشتن ضخامت لایه فلزی (t_m برابر ۱۵ میلی‌متر)، بیشترین میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف برای ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله به ترتیب برابر ۵ میلیمتر و ۱/۴ بدست می‌آید و همچنین در ضخامت لایه سرامیکی ثابت، با کاهش مقیاس فاصله میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف با شیب نسبتاً تندی افزایش می‌یابد. در شکل ۴-۱۷-ب، تحت شرایطی که ضخامت لایه فولادی ثابت است، تغییرات پارامتر Z تأثیر کمی در جابجایی لایه هدف دارد. همچنین افزایش لایه سرامیکی باعث کاهش چشمگیر جابجایی لایه هدف خواهد شد.



شکل ۴-۱۷ نمودار سطح پاسخ بر اساس تغییر ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف

مهندسان تمایل به بهینه‌سازی پارامترهای فرایندی برای رسیدن به کیفیت مطلوب دارند. این شرایط بهینه می‌تواند شامل مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای ورودی باشد. برای بهبود پاسخ دینامیکی کامپوزیت‌های چند لایه نسبت به وزن، کنترل پارامترهای ضخامت لایه‌های فلزی و سرامیکی و نسبت استحکام به وزن سازه مورد نیاز می‌باشد. لذا هدف مطلوب در این پژوهش کاهش وزن سازه، افزایش نسبت سفتی به وزن، و رسیدن به حداقل مقادیر تنش و جابجایی لایه هدف است. با توجه به اینکه برخی از پاسخ‌ها اثر عکس روی یکدیگر دارند و افزایش در یکی منجر به کاهش دیگری می‌شود، نهایتاً باید حالتی را انتخاب نمود که هر یک از پاسخ‌ها به سطحی قابل قبول از مطلوبیت دست یابند. برای این کار از قسمت بهینه‌ساز پاسخ^۱ نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. همچنین مقایسه نتایج با روش المان محدود در ادامه ارائه شده است.

جهت دستیابی به سازه‌ای سبک که منجر به ایجاد جابجایی حداقل لایه هدف شود تحت شرایطی که مقدار مقیاس فاصله (Z) به عنوان یک قید ثابت فرض شود ($Z=1/6$)؛ مقادیر بهینه برای دو پارامتر لایه فلزی و سرامیک به ترتیب برابر ۱۰ و ۱۴/۰۲ میلی‌متر می‌باشد که تحت این شرایط مقادیر ۳/۳۹ میلی‌متر و ۹۴۵/۶۵ نیوتن به ترتیب برای جابجایی لایه هدف و وزن سازه توسط نرم‌افزار مینی‌تب ارائه شده است که با شبیه‌سازی فرایند تحت شرایط بهینه ذکر شده میزان جابجایی لایه هدف برابر ۳/۴۸ میلی‌متر بدست آمده است که میزان اختلاف بین نتایج ۲/۵ درصد است. همچنین نتایج مربوط به شرایطی که $Z=1/4$ است با اختلاف ۲ درصد در جدول ۴-۷ قابل مشاهده است. همچنین نتایج مربوط به شرایط ذکر شده برای کاهش وزن سازه و میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف در جدول ۴-۸ ارائه شده است.

جدول ۴-۷ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان جابجایی لایه هدف به همراه مقایسه با

روش FEM

عامل ثابت	مقادیر بهینه پارامترها	مقادیر پیش‌بینی شده مینی‌تب تحت شرایط بهینه	مقادیر حاصل از FEM	خطا %
$Z=1/4$	$t_m=10/00$ (mm)	$\delta=3/73$ (mm)	$\delta=3/81$ (mm)	۲ %
	$t_c=14/69$ (mm)	$W=962/06$ (N)	$W=961/40$ (N)	
$Z=1/6$	$t_m=10/00$ (mm)	$\delta=3/39$ (mm)	$\delta=3/48$ (mm)	۲/۵ %
	$t_c=14/02$ (mm)	$W=945/65$ (N)	$W=945/08$ (N)	

^۱ Response optimizer

جدول ۴-۸ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM

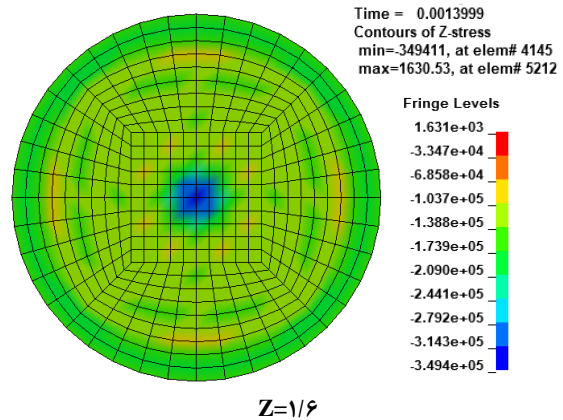
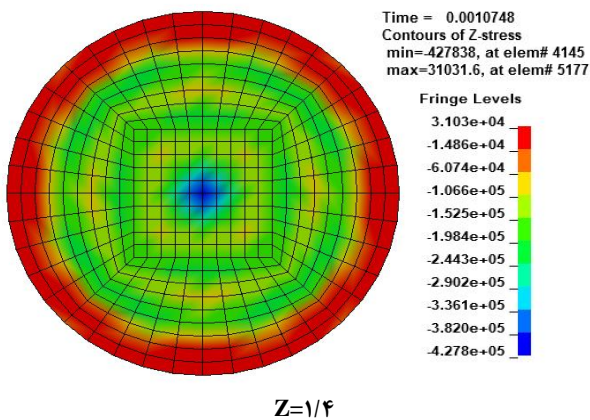
عامل ثابت	مقادیر بهینه پارامترها	مقادیر پیش‌بینی شده مینی‌تب تحت شرایط بهینه	مقادیر حاصل از FEM	خطا %
$Z = 1/4$	$t_m = 13/03$ (mm)	$\sigma = 0/46$ (MPa)	$\sigma = 0/47$ (MPa)	۱ %
	$t_c = 10/05$ (mm)	$W = 1031/83$ (N)	$W = 1031/27$ (N)	
$Z = 1/6$	$t_m = 10/50$ (mm)	$\sigma = 0/35$ (MPa)	$\sigma = 0/39$ (MPa)	۱۰ %
	$t_c = 8/43$ (mm)	$W = 839/94$ (N)	$W = 839/1$ (N)	

به منظور بررسی دقیق‌تر جهت پیدا کردن شرایط بهینه و رسیدن به پاسخی کارآمد، میزان افزایش نسبت سفتی به وزن سازه نیز به عنوان پارامتری تعیین کننده اضافه شد (۳-۱۷).

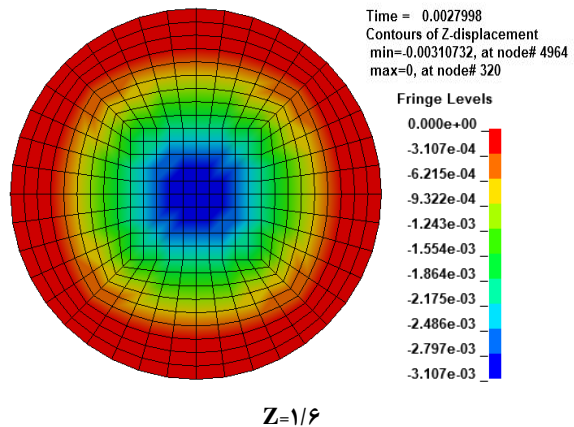
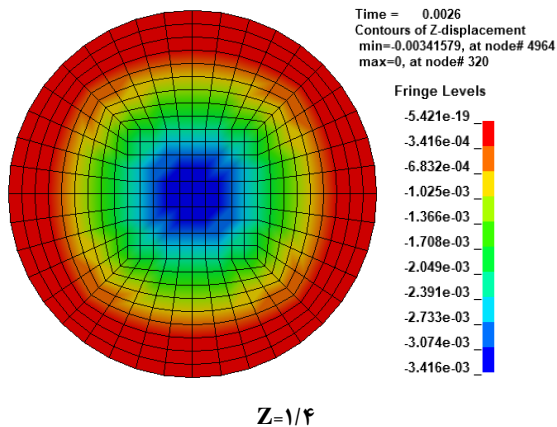
در این شرایط با هدف حداقل کردن میزان تنش و جابجایی لایه هدف و کاهش وزن سازه در عین افزایش سفتی به وزن آن، مقادیر بهینه برای پارامترهای مورد بررسی بر حسب مقادیر متفاوت مقیاس فاصله در جدول ۴-۹ ارائه شده‌است. همچنین شبیه‌سازی فرایند برای مقادیر بهینه در شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ قابل مشاهده است. در شکل ۴-۱۸ بیشینه تنش فشاری در راستای ضخامت و در شکل ۴-۱۹ بیشینه جابجایی لایه هدف در جهت عمود بر راستای ضخامت به ترتیب برای $Z=1/4$ و $Z=1/6$ نمایش داده شده‌است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا برای تنش ایجاد شده در لایه هدف برای موج شوک یکنواخت ($Z=1/6$) برابر $3/5$ درصد و برای موج شوک غیریکنواخت ($Z=1/4$) برابر $6/9$ درصد است. لازم به ذکر است که میزان خطایی برابر ۱ درصد برای جابجایی لایه هدف تحت شرایط ذکر شده در موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت حاصل شده‌است که این میزان خطا نشان دهنده دقت قابل قبول نتایج می‌باشد.

جدول ۴-۹ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر عددی سفتی به وزن، وزن، تنش و جابجایی لایه هدف

عامل ثابت	مقادیر بهینه پارامترها	مقادیر پیش‌بینی شده مینی تب تحت شرایط بهینه	مقادیر حاصل از روش FEM	خطا %
		$\alpha=431/35$	$\alpha=482/5$	
$Z=1/4$	$t_m=13/65$ (mm)	$W=1129/70$ (N)	$W=1189/70$ (N)	
	$t_c=15$ (mm)	$\sigma=0/459$ (MPa)	$\sigma=0/427$ (MPa)	۶/۹
		$\delta=3/41$ (mm)	$\delta=3/413$ (mm)	۱
		$\alpha=415/37$	$\alpha=400$	
$Z=1/6$	$t_m=10$ (mm)	$W=969/45$ (N)	$W=968/95$ (N)	
	$t_m=15$ (mm)	$\sigma=0/336$ (MPa)	$\sigma=0/349$ (MPa)	۳/۵
		$\delta=3/08$ (mm)	$\delta=3/104$ (mm)	۱



شکل ۴-۱۸ مقادیر تنش ایجاد شده در لایه هدف تحت شرایط بهینه بر حسب Pa

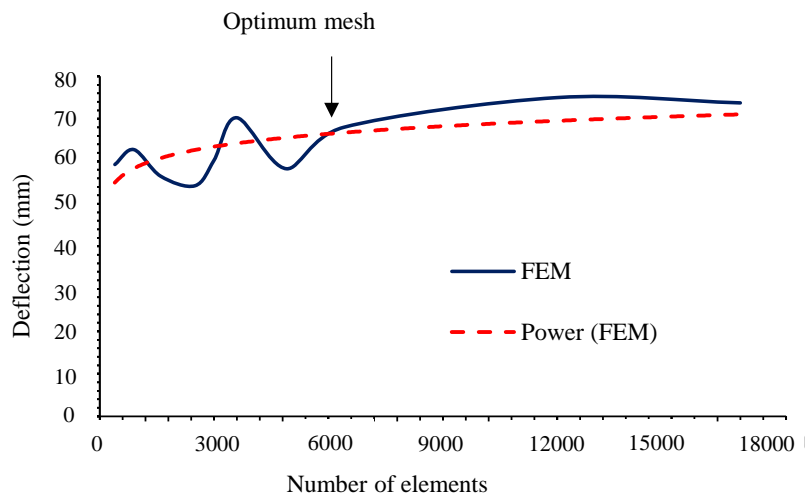


شکل ۴-۱۹ مقادیر بیشینه جابجایی در لایه هدف تحت شرایط بهینه بر حسب m

۴-۳- نتایج و بحث در محیط واسط آب

۴-۳-۱- استقلال نتایج از اندازه المان

برای بررسی استقلال نتایج از اندازه المان، تحلیل حساسیت مش برای صفحه با پارمتر پاسخ خیز بیشینه مرکز ورق مستطیلی انجام شد. این شبیه‌سازی با روش ALE برای ۵۰ g ماده منفجره PEK I در فاصله ۰/۱۵ m از صفحه مستطیلی از جنس Mild Steel با مشخصات فیزیکی و مکانیکی جدول ۳-۱۵ و با اندازه m^2 ۰/۳×۰/۲۵ و ضخامت ۰/۰۰۴ m اجرا شد که نتایج بدست آمده در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده‌است. مطابق شکل مشخص شد که ریز شدن المان‌ها تا رسیدن به اندازه ۶۰۰۰ المان ضروری است و پس از آن نتایج مستقل از اندازه المان است.



شکل ۴-۲۰ همگرایی مش صفحه فولادی در محیط آب

برای مش‌بندی محیط آب با استفاده از رابطه‌ی ۴-۶ اندازه بهینه مورد استفاده بدست آمد و در تمام مراحل شبیه‌سازی با اندازه المان ثابت برای محیط آب، نتایج استخراج شده‌است.

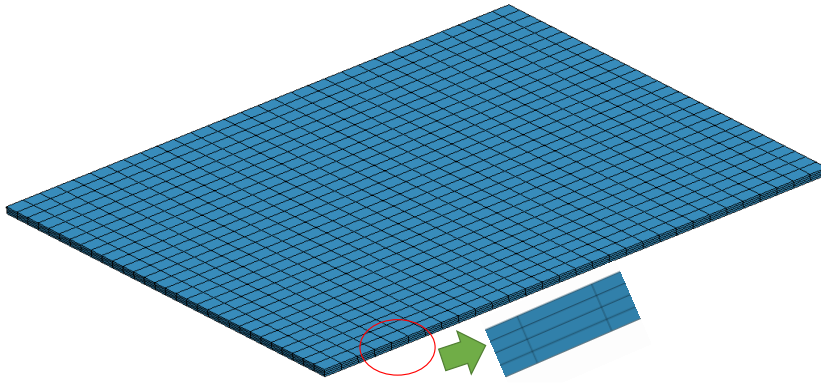
$$\frac{2\rho_{water}D}{\rho_{plate}t_{plate}} \leq 5$$

۴-۶

در این رابطه، D ضخامت المان آب در جهت نرمال بر سطح می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی اثرات موج شوک حاصل از انفجار بر روی سازه از جنس ورق Mild Steel مستطیلی با استفاده از المان تغییرشکل‌پذیر جامد هشت گره‌ای با چهار المان در راستای ضخامت و محیط آب با استفاده

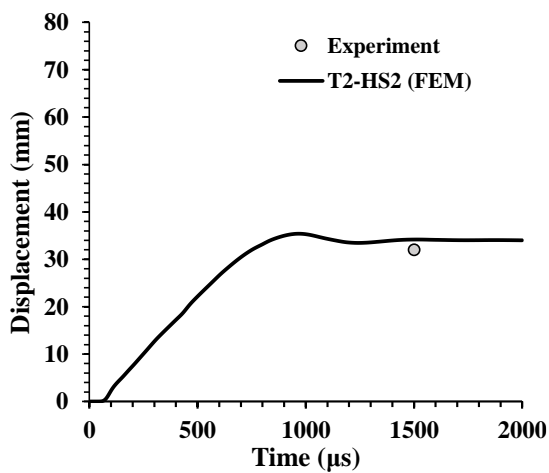
از المان چند ماده‌ای ALE مش‌بندی شده‌است. شکل ۴-۲۱ ورق شبکه‌بندی شده در نرم‌افزار LS- PREPOST-6.1 را نشان می‌دهد. مشخصات جنس اجزای مدل کاملاً مشابه مدل‌سازی انفجار در محیط واسط آب (جدول ۳-۱۵) می‌باشد.



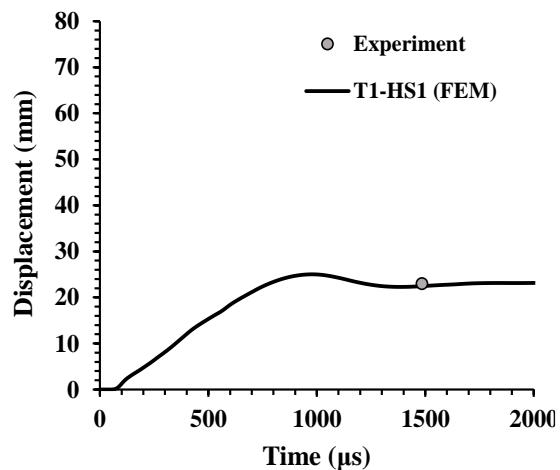
شکل ۴-۲۱ شبکه‌بندی صفحه مستطیلی

۴-۳-۲ - صحت‌سنجی نتایج انفجار در محیط واسط آب

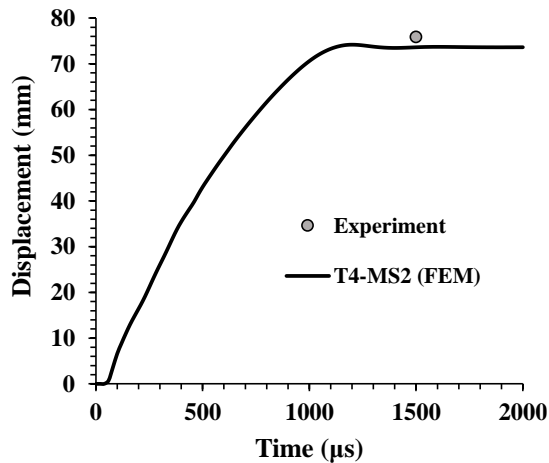
شبهه‌سازی‌ها مطابق جدول ۳-۱۶ با تعداد المان بدست آمده در بررسی استقلال نتایج انجام شد که برای هر کدام از آزمون‌ها نمودار جابجایی به زمان در شکل ۴-۲۲ آورده شده‌است. نکته قابل ذکر در این شکل آن است که با کاهش مقدار مقیاس فاصله Z، قدرت موج شوک رسیده‌شده به صفحه افزایش می‌یابد از طرف دیگر در صورتی پارامتر موج شوک SF در نظر گرفته شود، با افزایش مقدار پارامتر موج شوک قدرت موج شوک منتقل شده به صفحه افزایش می‌یابد.



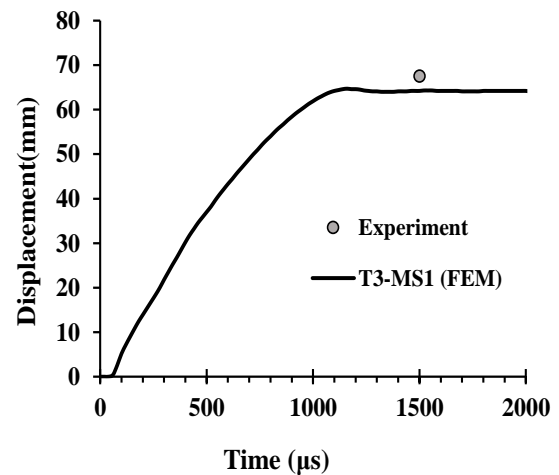
T2-HS2



T1-HS1



T4-MS2



T3-MS1

شکل ۴-۲۲ نمودار جابجایی به زمان برای آزمون‌های طراحی شده و مقایسه با نتایج تجربی [۲۵]

در جدول ۴-۱۰ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر و مقادیر تجربی مستخرج از مقاله راماجیاتیلگام و همکاران [۲۵] آورده شده‌است. مشاهده می‌شود که میانگین خطا بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حدود ۴٪ است. همچنین از نتایج بدست آمده مشخص است که آزمون T1-HS1 دارای کمترین خطا و آزمون T2-HS2 بیشترین خطا در بین نتایج، دارا می‌باشد. فولاد HS steel دارای تنش تسلیم بالاتری نسبت به فولاد Mild steel است و همانطور که از نتایج شبیه‌سازی بدست آمده‌است، فولاد HS steel در شرایط بارگذاری شدیدتر (خرج انفجار بیشتر)، دارای خطای بیشتری است.

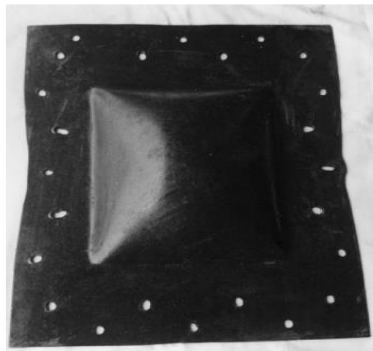
جدول ۴-۱۰ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر تجربی در محیط آب

شماره آزمون	$\delta_{Num.}(mm)$	$\delta_{Exp.}(mm)$ [۲۵]	درصد خطا
T1-HS1	۲۲/۷	۲۳	۱
T2-HS2	۳۴	۳۲	۵/۸
T3-MS1	۶۴/۳	۶۷/۵	۴/۷
T4-MS2	۷۴	۷۵/۹	۲/۵

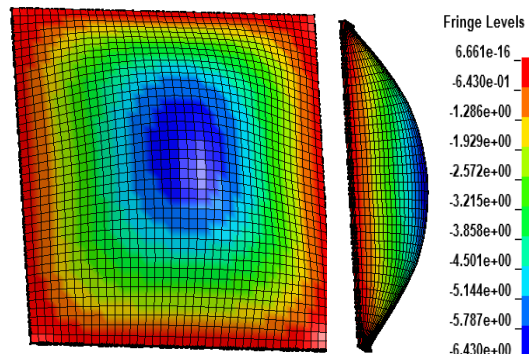
در ادامه، به‌عنوان نمونه نتایج شبیه‌سازی ۲ مورد از آزمون‌های جدول ۳-۱۶ با نتایج تجربی مقاله مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج در شکل ۴-۲۳ و ۴-۲۴ ارائه شده‌است. همانطور که در شکل ۴-۲۳ مشخص است برای

نتایج تجربی آزمون T3-MS1، نمونه بعد از بارگذاری انفجاری کاملاً سالم بوده و هیچ شکستی در آن اتفاق نیفتاده است، که نتایج شبیه‌سازی نیز این امر را تصدیق می‌کند. در حالی که در شکل ۴-۲۴ برای نتایج تجربی آزمون T4-MS2، هم در نمونه تجربی و هم در شبیه‌سازی عددی انجام شده شکست در تکیه‌گاه به خوبی قابل مشاهده است.

سالم



T3-MS1(Exp)[25]



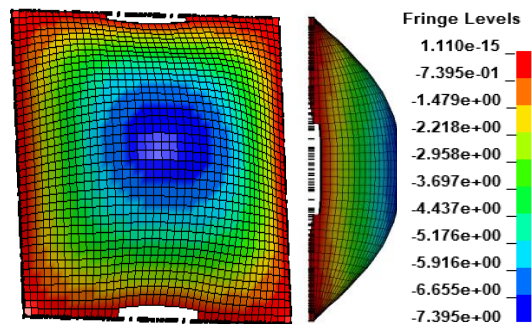
T3-MS1(FEM)

شکل ۴-۲۳ مقایسه آزمون T3-MS1 بر حسب cm، با نمونه تجربی $\text{Shock factor} = 0.671$

شکست در تکیه‌گاه



T4-MS2(Exp) [25]

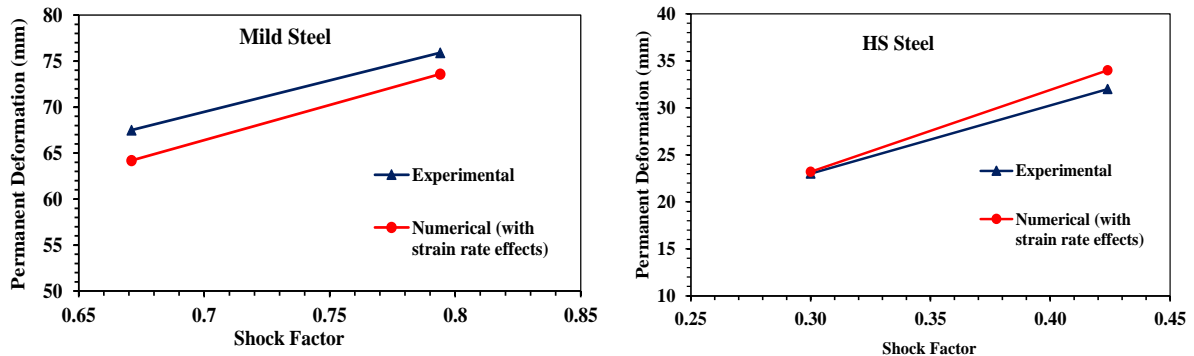


T4-MS2(FEM)

شکل ۴-۲۴ مقایسه آزمون T4-MS2 بر حسب cm، با نمونه تجربی $\text{Shock factor} = 0.794$

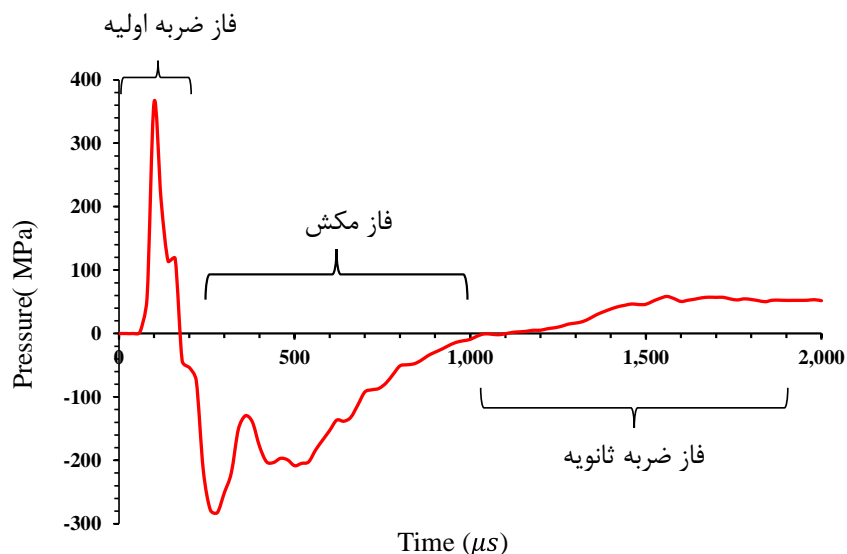
برای بیان واضح‌تر نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر تجربی بر اساس تغییر شکل مرکز صفحه مستطیلی به پارامتر موج شوک برای هر دو فولاد مورد بررسی در شکل ۴-۲۵ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است برای نمونه HS Steel در مقادیر پارامتر شوک پایین اختلافی بین مقدار عددی و تجربی دیده نمی‌شود

ولی هر چه این پارامتر بیشتر می‌شود قدرت موج شوک هم بیشتر شده و مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی ایجاد می‌شود. در نمونه Mild Steel برای مقادیر مختلف پارامتر موج شوک، اختلاف بین مقدار عددی و تجربی یکسان می‌باشد.



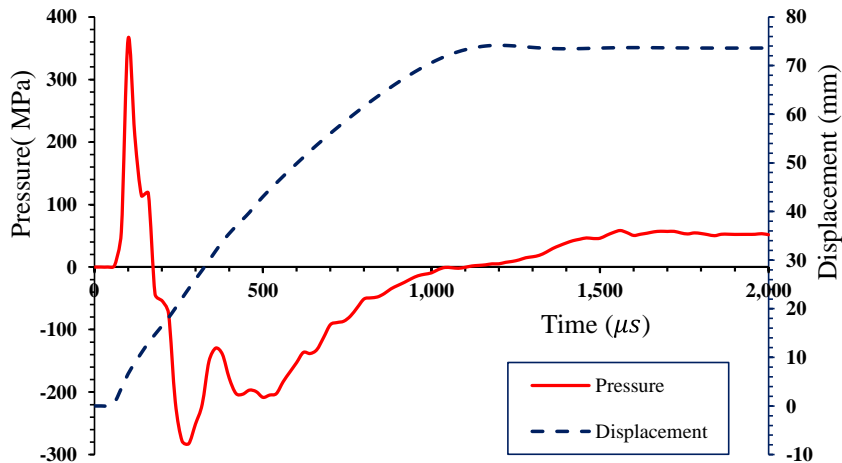
شکل ۴-۲۵ مقایسه تغییر شکل دائمی صفحه بر حسب پارامتر موج شوک

نمودار فشار - زمان برای انفجار زیر آب برای آزمون T4-MS2 استخراج شده‌است و در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده‌است. همان طور که از شکل مشخص است بعد ضربه پیشانی موج شوک، یک مکش روی صفحه فولادی اتفاق می‌افتد که نشان از ایجاد پدیده کاویتاسیون در سطح صفحه می‌باشد. این پدیده با منقبض شدن حباب اتفاق می‌افتد و بعد از این که فشار داخل حباب بیشتر از فشار سیال (آب) می‌شود این انقباض متوقف شده و شروع به افزایش مجدد اندازه می‌کند که باعث ایجاد ضربه در سازه می‌شود. فشار بیشینه ایجاد شده بر روی سطح صفحه مستطیلی در این آزمون برابر $364/3$ MPa است.



شکل ۴-۲۶ نمودار فشار - زمان انفجار زیر آب برای آزمون T4-MS2

در فاز مکش عیارم معکوس شدن جهت فشار، جابجایی همچنان روند صعودی دارد ولی تغییر شیب منحنی جابجایی (سرعت) با تغییر فاز فشار به کشش قابل توجه است. شکل ۴-۲۷ ترکیب نمودار فشار و جابجایی بر حسب زمان برای آزمون T4-MS2 را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۷ نمودار فشار و جابجایی بر حسب زمان برای آزمون T4-MS2

۴-۳-۳ نتایج بهینه‌سازی سازه کامپوزیتی

بررسی‌ها بر روی سازه سه لایه صورت می‌پذیرد. لایه اول سرامیک SiC که در برخورد مستقیم موج شوک قرار دارد، لایه دوم ورق فولادی مستحکم شده RHA و لایه آخر، ورق پلیمری $PMMA$ می‌باشد که نحوه قرار گرفتن این لایه‌ها در شکل ۳-۳ نشان داده شده‌است. این سازه بعد از این که متغیرهای ورودی (جدول ۳-۹) برای آن مشخص شد به وسیله نرم‌افزار مینی‌تب آزمایش‌های برای آن طراحی می‌شود (جدول ۳-۱۱) که بعد از شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار $LS-DYNA$ به بررسی و تحلیل آن پرداخته می‌شود.

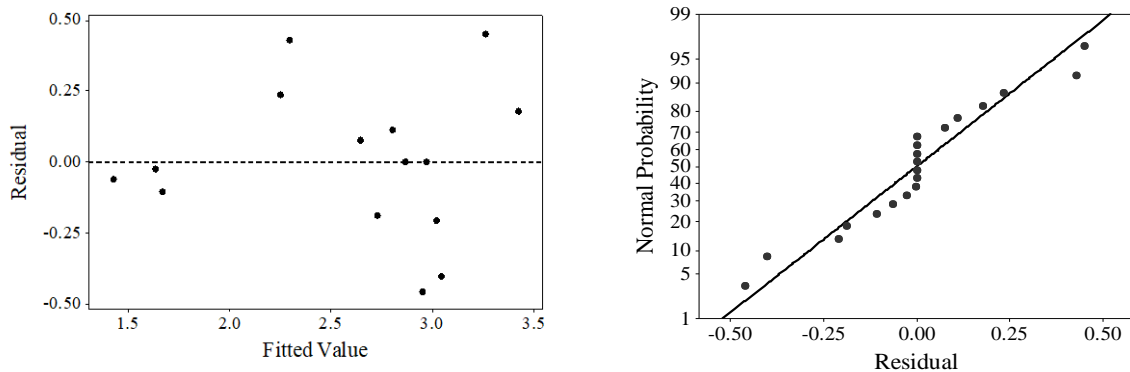
روش طراحی آزمایش در این بررسی، روش طرح مرکب مرکزی است. با در نظر گرفتن $\alpha=1/68$ تعداد ۳ سطح برای متغیرها مشخص شد. ماتریس طراحی به همراه سطوح آن در جدول ۳-۸ برای محیط آب همانند محیط هوا آورده شده‌است. عواملی که در این آزمایش‌ها تاثیر آن بر روی میزان خیز و تنش ایجاد شده در لایه هدف (صفحه $PMMA$) بررسی شد، شامل ۳ عامل سه سطحی شامل ضخامت لایه فولادی (t_m)، ضخامت لایه سرامیکی (t_c) و مقیاس فاصله (Z) بوده است. جدول طراحی آزمون‌ها به روش RSM به همراه پاسخ در جدول ۴-۱۱ آورده شده‌است. که با توجه به نتایج بدست آمده به تحلیل این نتایج پرداخته می‌شود.

جدول ۴-۱۱ جدول طراحی آزمایش به روش RSM به همراه پاسخ در محیط آب

آزمون	پاسخ			عامل			
	W (N)	α (N.m/N)	δ (mm)	σ (MPa)	Z	t_c	t_m
۱	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۱۳/۰۳	۲/۹۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۲	۷۲۵/۴	۱۱۳/۳۰	۲۴/۲۰	۱/۵۶	۱/۴	۵	۱۰
۳	۱۱۴۹/۵۵	۳۳۱/۴۲۲	۱۳/۰۳	۲/۹۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۴	۱۱۴۹/۵۵	۳۳۱/۴۲۲	۱۳/۰۳	۲/۹۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۵	۱۵۷۲/۵	۶۶۴/۸۰	۱۲/۴۱	۲/۷۲	۱/۶	۱۵	۲۰
۶	۹۶۹/۰۰	۴۰۰/۲۰	۱۱/۷۸	۳/۶۰	۱/۶	۱۵	۱۰
۷	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۱۳/۰۳	۲/۹۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۸	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۲۲	۱۱/۰۹	۲/۶۴	۱/۶۶	۱۰	۱۵
۹	۱۳۵۳/۶	۶۷۶/۱۰	۷/۴۵	۲/۹۱	۱/۵	۱۸/۴	۱۵
۱۰	۱۵۷۲/۵۰	۶۶۴/۸۰	۷/۳۱	۲/۸۶	۱/۴	۱۵	۲۰
۱۱	۱۱۴۹/۵۵۲	۳۳۱/۴۴۲	۱۳/۰۳	۲/۹۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۲	۹۶۹/۰	۴۰۰/۲۰	۱۴/۱۶	۲/۴۹	۱/۴	۱۵	۱۰
۱۳	۶۴۲/۰	۳۰۲/۵۰	۲۱/۷۳	۲/۴۸	۱/۵	۱۰	۶/۶
۱۴	۱۱۴۹/۵۵۲	۳۳۱/۴۴۲	۱۳/۰۳	۲/۹۷	۱/۵	۱۰	۱۵
۱۵	۹۴۴/۳۰	۱۰۴/۵۰	۲۱/۸۳	۱/۳۶	۱/۵	۱/۶	۱۵
۱۶	۷۲۵/۴۰	۱۱۳/۲۷	۲۲/۲۴	۱/۶۰	۱/۶	۵	۱۰
۱۷	۱۶۵۶/۰	۵۴۶/۱۰	۷/۴۴	۲/۵۴	۱/۵	۱۰	۲۳/۴
۱۸	۱۱۴۹/۵۵۰	۳۳۱/۴۴۲	۱۵/۰۸	۳/۷۱	۱/۳۳	۱۰	۱۵
۱۹	۱۳۲۹/۰	۲۷۷/۳۶	۱۲/۴۱	۲/۷۲	۱/۶	۵	۲۰
۲۰	۱۳۲۹/۰	۲۷۷/۳۶	۱۴/۳۷	۲/۸۱	۱/۴	۵	۲۰

نتیجه‌گیری قطعی از نمودارها و نتایج ارائه شده مستلزم تایید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می‌پردازد. عدم وجود نقاط پرت در شکل ۴-۲۸-

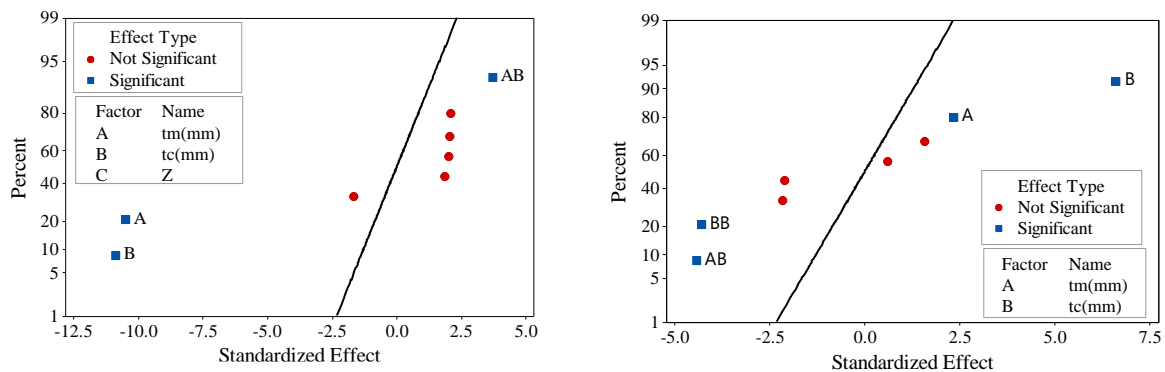
الف نشان دهنده برقرار بودن فرض نرمال بودن داده‌های تنش ایجاد شده در لایه هدف می‌باشد. همچنین پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگویی در شکل ۴-۲۸-ب نمایانگر برقراری فرض استقلال برای متغیر مورد بررسی است.



ب

الف

شکل ۴-۲۸ الف) نمودار احتمال مقادیر باقیمانده، ب) نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته بررسی نمودار اثرات نرمال عوامل در فرایند انفجار در محیط آب بر روی سازه کامپوزیتی بر روی میزان تنش و جابجایی ایجاد شده در لایه هدف در شکل ۴-۲۹-الف مربوط به متغیر پاسخ تنش و شکل ۴-۲۹-ب مربوط به جابجایی است که نشان دهنده‌ی این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی و متقابل B ، AB و BB بیشترین اثر را در تنش ایجاد شده در لایه هدف و عوامل اصلی و متقابل A ، B و AB بیشترین اثر را در جابجایی ایجاد شده در لایه هدف را داشتند. بر طبق این نمودار هر چه فاصله عامل از خط مورب بیشتر باشد تاثیر آن بر روی متغیر پاسخ معنادارتر خواهد بود.



ب

الف

شکل ۴-۲۹ الف) نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی تنش ایجاد شده در لایه هدف ب) نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی جابجایی ایجاد شده در لایه هدف

حال با در نظر گرفتن عوامل تحلیل واریانس انجام می‌گردد. عدد P ملاکی برای بررسی عوامل معنادار است. اگر مقدار P برابر یا کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان دهنده آن است که عامل مدنظر بر خروجی تحقیق تاثیر معناداری دارد. جدول ۴-۱۲ تحلیل واریانس و رابطه‌ی ۴-۶ تابع رگرسیونی برای بیان متغیر پاسخ جابجایی ایجاد شده در لایه هدف و جدول ۴-۱۳ تحلیل واریانس متغیر پاسخ تنش ایجاد شده در لایه هدف را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۲ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ جابجایی لایه هدف

منابع	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	مقدار P	درصد تاثیر
t_m	۱	۱۸۲/۴۲۰	۰/۰۰۰	۴۰/۶۳
t_c	۱	۱۹۶/۰۵۲	۰/۰۰۰	۴۳/۶۷
Z	۱	۴/۵۸۲	۰/۱۳۹	۱/۰۲
t_m^2	۱	۶/۹۷۵	۰/۰۶۷	۱/۲۴
t_c^2	۱	۷/۳۷۱	۰/۰۶۹	۱/۵۸
Z^2	۱	۰/۳۹۴	۰/۶۴۸	۰/۰۹
$t_m \times t_c$	۱	۲۲/۵۷۹	۰/۰۰۵	۵/۰۳
$t_m \times Z$	۱	۶/۹۹۴	۰/۰۷۵	۱/۵۶
$t_c \times Z$	۱	۵/۵۱۱	۰/۱۰۹	۱/۲۳

همانطور که از جدول ۴-۱۲ مشاهده می‌شود از بین پارامترها، عوامل ضخامت لایه فلزی (t_m)، ضخامت لایه سرامیکی (t_c) و اثر متقابل ضخامت لایه فلزی و سرامیکی ($t_m \times t_c$) بیشترین تاثیر را بر میزان جابجایی ایجاد شده در لایه هدف دارند. مقدار $R-sq=۹۶/۰۴\%$ و $R-sq(adj)=۹۲/۴۸\%$ برای میزان جابجایی ایجاد شده در لایه هدف نشان دهنده دقت خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد.

$$\delta = 163.60 - 5.04 t_m - 4.83 t_c - 100 Z + 0.0278 t_m^2 + 0.0286 t_c^2 - 16.5 Z^2 + 0.0672 t_m \times t_c + 1.78 t_m \times Z + 1.66 t_c \times Z \quad ۴-۶$$

جدول ۴-۱۳ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ تنش ایجاد شده در لایه هدف

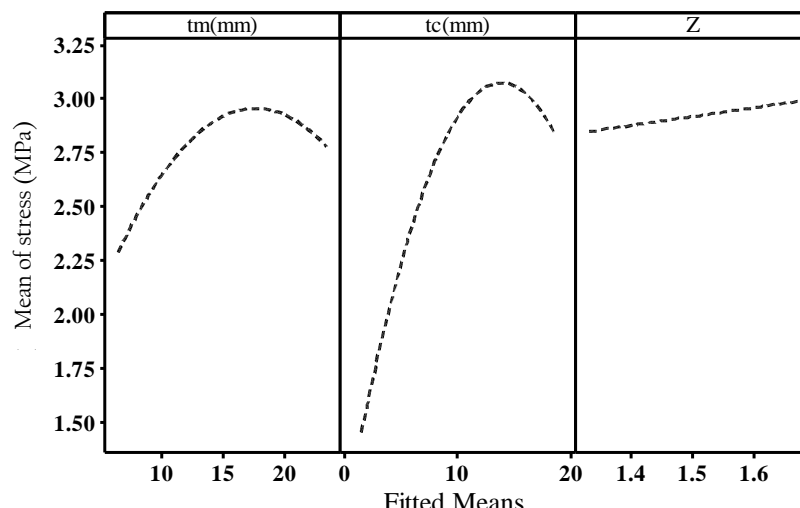
منابع	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	مقدار P	درصد تاثیر
t_m	۱	۰/۲۸۱۵۶	۰/۰۴۱	۴/۹۵
t_c	۱	۲/۲۸۵۴۵	۰/۰۰۰	۴۰/۲۲
Z	۱	۰/۰۱۷۸۵	۰/۳۳۳	۱/۴۱
t_m^2	۱	۰/۲۴۵۲۸	۰/۰۶۲	۲/۳۰
t_c^2	۱	۰/۹۷۴۸۴	۰/۰۰۲	۱۷/۱۶
Z^2	۱	۰/۰۷۶۴۹	۰/۲۴۷	۱/۳۵
$t_m \times t_c$	۱	۱/۰۳۶۸	۰/۰۰۱	۱۸/۲۵
$t_m \times Z$	۱	۰/۲۳۸۰۵	۰/۰۵۷	۴/۱۹
$t_c \times Z$	۱	۰/۱۳۰۰۵	۰/۱۴۱	۲/۲۹

همانطور که از جدول ۴-۱۲ مشاهده می‌شود از بین پارامترها، عوامل ضخامت لایه فولادی (t_m)، ضخامت لایه سرامیکی (t_c) و اثر متقابل ضخامت لایه فولادی و سرامیکی ($t_m \times t_c$) و همچنین ضخامت لایه سرامیکی با هم (t_c^2) دارای بیشترین تاثیر را بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف دارند. مقدار $R-sq=۹۲/۱۱\%$ و $R-sq(adj)=۸۴/۲۲\%$ برای مقدار تنش ایجاد شده در لایه هدف نشان دهنده دقت خوب مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد. در این تحلیل مشاهده می‌شود خلاف آنچه در محیط هوا اتفاق افتاد، در محیط آب عامل مقیاس فاصله (Z) تاثیری بر روی پارامتر پاسخ ندارد. این رهیافت از آن جهت است که در محیط آب به دلیل اثر تقابلی آب با موج شوک که باعث افزایش چشم‌گیر نیروی ایجاد شده می‌شود، تاثیر این پارامتر آنچنانی که در محیط هوا دیده شد در محیط آب دیده نمی‌شود. رابطه‌ی $۷-۴$ تابع رگرسیونی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار برای متغیر پاسخ تنش ایجاد شده در لایه هدف را نشان می‌دهد.

$$\sigma = -7.31 + 0.850 t_m + 0.128 t_c + 3.04 Z - 0.00534 t_m^2 - 0.01064 t_c^2 - 0.01440 t_m \times t_c - 0.345 t_m \times Z + 0.255 t_c \times Z \quad ۷-۴$$

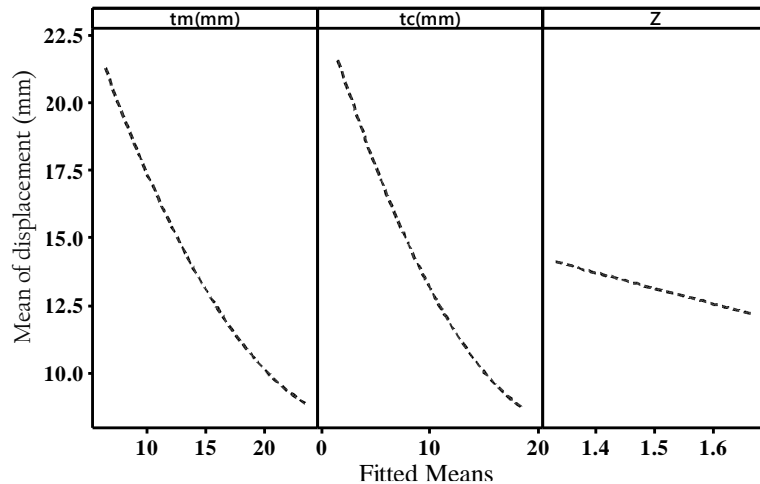
همانطور که در جدول تحلیل واریانس مربوط به میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف ذکر شد (جدول ۴-۱۳)، ضخامت لایه سرامیکی (t_c) بازه تاثیرات بیشتری در تنش ایجاد شده در لایه هدف دارد. این موضوع در شکل

۳۰-۴ نیز به وضوح قابل مشاهده است. شایان ذکر است که به دلیل استفاده از $\alpha' = 1/68$ بازه‌های در نظر گرفته شده برای عوامل، بزرگتر از محدوده تعریف شده برای هر عامل در جدول ۳-۹ می‌باشد. با توجه به شکل (۴-۳۰)، با افزایش ضخامت لایه سرامیکی تا مقدار ۱۵ mm، تنش ایجاد شده در لایه هدف ۵۵٪ افزایش می‌یابد و بعد از آن روند نزولی در آن مشاهده می‌شود همچنین بعد از لایه سرامیکی، اثر لایه فولادی (t_m) در میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف قابل ملاحظه است به طوری که با افزایش ضخامت لایه فولادی تا ۱۸ mm، تنش ایجاد شده در لایه هدف به میزان ۲۵٪ افزایش می‌یابد و بعد از این ضخامت روند نزولی پیدا می‌کند. با توجه به بررسی اثرات اصلی عوامل بر روی تنش ایجاد شده در این شکل می‌توان گفت که با افزایش ضخامت لایه‌ها تا یک محدوده مشخص میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش اتفاق می‌افتد که این کاهش تنش با افزایش ضخامت لایه سرامیکی با شیب بیشتری اتفاق خواهد افتاد.

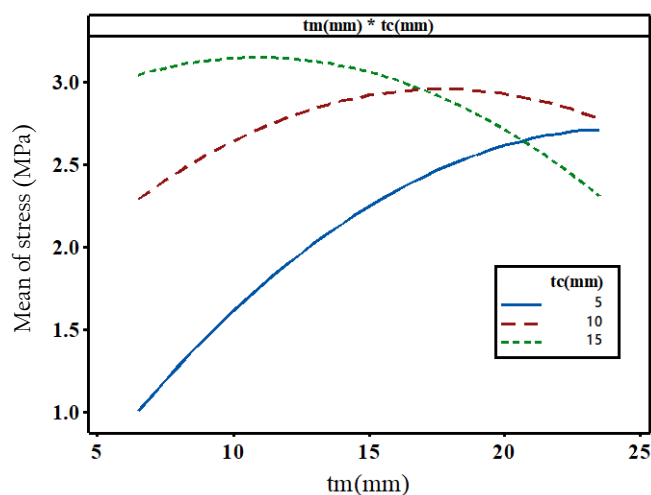


شکل ۳۰-۴ چگونگی تاثیر ضخامت لایه فولادی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف

از طرفی با توجه به شکل ۴-۳۱، تغییرات ضخامت لایه فولادی و سرامیکی به یک اندازه بر مقدار جابجایی ایجاد شده در لایه هدف تاثیر گذار هستند؛ بطوری که با افزایش ضخامت هر یک از لایه‌ها (t_c و t_m) میزان شوک عبوری از محیط آب کاهش یافته و در نتیجه منجر به کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف می‌شود. این کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف برای هر کدام از لایه‌ها برابر ۷۲٪ می‌باشد. در این شکل (۴-۳۱) همانطور که مشخص است عامل مقیاس فاصله (Z) تاثیر آنچنانی روی جابجایی ایجاد شده در لایه هدف همانند ضخامت لایه فولادی یا سرامیکی ندارد.

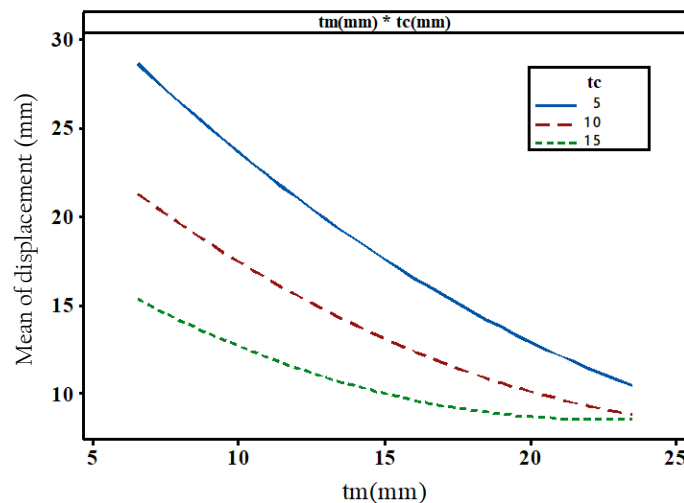


شکل ۴-۳۱ چگونگی تاثیر ضخامت لایه فولادی، لایه سرامیکی و مقیاس فاصله بر مقدار جابجایی لایه هدف همچنین با بررسی اثرات تقابلی ضخامت لایه فولادی و سرامیکی بر متغیر پاسخ میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف در شکل ۴-۳۲ مشخص و مشهود است که با افزایش ضخامت لایه فولادی در ضخامت ثابت ۵ mm لایه سرامیکی، باعث افزایش سریع تنش ایجاد شده در لایه هدف می شود از سوی دیگر، در ضخامت ثابت ۱۵mm لایه سرامیکی، با افزایش ضخامت لایه فولادی باعث کاهش ۳۰٪ تنش ایجاد شده در لایه هدف می شود. همچنین در ضخامت ثابت ۱۰ mm لایه سرامیکی، با افزایش ضخامت لایه فولادی تا ۱۷ mm، تنش به میزان ۱۸٪ افزایش یافته و بعد از آن نه تنها افزایشی در آن مشاهده نمی شود بلکه باعث کاهش تنش ایجاد شده در لایه هدف می شود.



شکل ۴-۳۲ اثرات متقابل t_m و t_c بر تنش ایجاد شده در لایه هدف

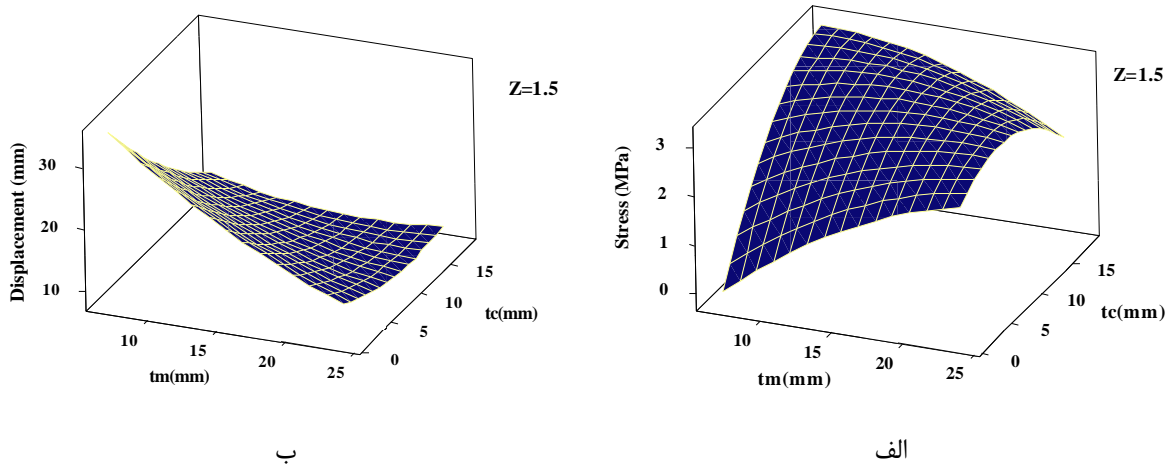
همچنین در شکل ۴-۳۳ اثر متقابل ضخامت لایه فولادی و لایه سرامیکی بر جابجایی ایجاد شده بر لایه هدف نشان داده شده است. در این شکل با افزایش ضخامت لایه فولادی، برای هر سه ضخامت لایه سرامیکی (۵-۱۰-۱۵ mm) کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف مشاهده می شود. در این کاهش مقدار جابجایی، برای ضخامت ثابت ۵ mm لایه سرامیکی کاهش برابر ۵۵٪ را نشان می دهد. همچنین مشاهده می شود که در ضخامت ثابت (۱۵ mm) لایه سرامیکی، وقتی ضخامت لایه فولادی به ۲۲ mm برسد، اثر ضخامت لایه سرامیکی در جابجایی ایجاد شده در لایه هدف بی اثر می شود و افزایش ضخامت لایه سرامیکی هیچ تأثیری در کاهش جابجایی لایه هدف ندارد.



شکل ۴-۳۳ اثرات متقابل t_m و t_c بر جابجایی ایجاد شده در لایه هدف

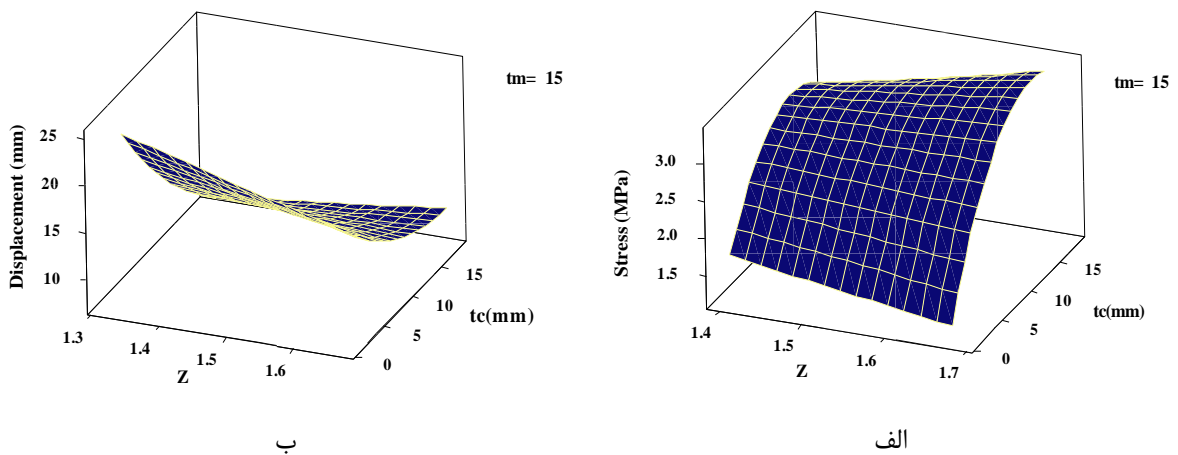
به منظور بررسی بهتر و دقیق تر اثرات عوامل، سطح پاسخ سه بعدی مربوط به اثر ضخامت لایه های فلزی و سرامیکی بر روی میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف در شکل ۴-۳۴ ارائه شده است. در این نمودارها تابع پاسخ براساس دو متغیر بیان شده و متغیر سوم ثابت فرض شده است (در این شکل مقیاس فاصله برابر $1/5 \text{ m/kg}^{1/3}$ فرض شده است). با توجه به شکل ۴-۳۴-الف، حداکثر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف تحت شرایطی ایجاد خواهد شد که ضخامت لایه های فلزی کمترین مقدار و لایه سرامیکی بیشترین مقدار خود را دارا باشد. همچنین با توجه به شکل الف مشخص است که تحت بیشترین ضخامت لایه فولادی، تغییرات در ضخامت لایه سرامیکی تاثیر قابل توجهی در میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف ندارد این بدان دلیل است که لایه فولادی از یک ضخامت خاصی به بعد کاملاً مقاوم در برابر عبور موج تنشی از خود می شود. همان طور

که در شکل ۴-۳۴-ب مشاهده می‌شود بر خلاف نمودار الف که وقتی کمترین ضخامت را برای لایه‌های فولادی و سرامیکی داشتیم، کمترین تنش در لایه هدف اتفاق می‌افتاد ولی در نمودار ب وقتی کمترین ضخامت را برای لایه‌های فولادی و سرامیکی داشته باشد، بیشترین جابجایی در لایه هدف اتفاق می‌افتد. کمترین جابجایی را زمانی خواهیم داشت که ضخامت لایه‌های فولادی و سرامیکی در بیشینه مقدار خود باشند.



شکل ۴-۳۴ نمودار سطح پاسخ براساس تغییر ضخامت لایه‌های فلزی و سرامیکی برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف

همچنین در شکل ۴-۳۵-الف، با ثابت نگه‌داشتن لایه فولادی (t_m برابر ۱۵ mm)، بیشترین میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف برای ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله به ترتیب برابر ۱۵ mm و ۱/۷ بدست آمده است. همچنین در ضخامت لایه سرامیکی ثابت، در محدوده‌ی موج شوک غیریکنواخت، شیب افزایش میزان تنش نسبت به محدوده یکنواخت، کمتر می‌باشد. در شکل ۴-۳۵-ب، تحت شرایطی که ضخامت لایه فولادی ثابت است، تغییرات پارامتر Z تأثیر کمی در جابجایی لایه هدف دارد. همچنین افزایش لایه سرامیکی باعث کاهش چشمگیر جابجایی لایه هدف خواهد شد.



شکل ۴-۳۵ نمودار سطح پاسخ بر اساس تغییر ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله برای، الف) تنش و ب) جابجایی لایه هدف

بهینه‌سازی پارامترهای فرایند، برای رسیدن به کیفیت مطلوب می‌تواند شامل مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای ورودی باشد. برای بهبود پاسخ دینامیکی کامپوزیت‌های چند لایه نسبت به وزن و نسبت استحکام به وزن، کنترل پارامترهای ضخامت لایه‌های فلزی و سرامیکی سازه مورد نیاز می‌باشد. لذا هدف مطلوب در این مطالعه کاهش وزن سازه، افزایش نسبت سفتی به وزن و رسیدن به حداقل مقادیر تنش و جابجایی لایه هدف است.

جهت دستیابی به سازه‌ای با هدف حداقل کردن میزان تنش، حداقل شدن میزان جابجایی و کاهش وزن سازه همزمان با افزایش سفتی به وزن آن، مقادیر بهینه برای پارامترهای مورد بررسی بر حسب بازه تعریف شده برای عوامل: ضخامت لایه فولادی، ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر بهینه برای سه عامل: ضخامت لایه فولادی، ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله به ترتیب برابر $23/4$ و $18/4$ mm و $1/41$ m/kg^{1/3} پیش‌بینی شد که منجر به ایجاد $7/273$ mm جابجایی، $1/731$ MPa تنش در لایه هدف و $968/783$ N.m/N استحکام به وزن گردیده‌است. تحت شرایط بهینه ذکر شده، شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA با مقادیر پیش‌بینی شده نرم‌افزار مینی‌تب، صورت پذیرفت و نتایج به شرح جدول ۴-۱۴ بدست آمد.

جدول ۴-۱۴ مقادیر بهینه پارامترها با هدف حداقل کردن میزان تنش، جابجایی در لایه هدف و افزایش سفتی به وزن در سازه کامپوزیتی

خطا %	مقادیر حاصل از FEM	مقادیر پیش‌بینی شده مینی‌تب تحت شرایط بهینه	مقادیر بهینه پارامترها
۱۱ %	$\delta = 6/4 \text{ (mm)}$	$\delta = 7/2 \text{ (mm)}$	$t_m = 23/4 \text{ (mm)}$
۹ %	$\sigma = 1/9 \text{ (MPa)}$	$\sigma = 1/731 \text{ (MPa)}$	$t_c = 18/4 \text{ (mm)}$
-	$\alpha = 957/184$	$\alpha = 968/783$	$Z = 1/4$

همچنین جهت دستیابی به سازه‌ای سبک که منجر به ایجاد جابجایی حداقل لایه هدف شود تحت شرایطی که مقدار مقیاس فاصله (Z) به عنوان یک قید ثابت فرض شود ($Z=1/6$)؛ مقادیر بهینه برای دو پارامتر لایه فولادی و سرامیکی به ترتیب برابر $6/6$ و $18/4$ mm می‌باشد که تحت این شرایط مقادیر $12/81$ mm برای جابجایی لایه هدف و $846/4$ N برای وزن سازه توسط نرم‌افزار مینی‌تب ارائه شده‌است که با شبیه‌سازی فرایند تحت شرایط بهینه ذکر شده میزان جابجایی لایه هدف برابر $14/1$ mm بدست آمده‌است که میزان اختلاف بین نتایج ۱۰٪ است. همچنین نتایج مربوط به شرایطی که $Z=1/4$ است با اختلاف ۲/۳٪ در جدول ۴-۱۵ قابل مشاهده است. همچنین نتایج مربوط به شرایط ذکر شده برای کاهش وزن سازه و میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف در جدول ۴-۱۶ ارائه شده‌است.

جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان جابجایی لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM

خطا %	مقادیر حاصل از FEM	مقادیر پیش‌بینی شده مینی‌تب تحت شرایط بهینه	مقادیر بهینه پارامترها	عامل ثابت
۱۰ %	$\delta = 14/1 \text{ (mm)}$	$\delta = 12/81 \text{ (mm)}$	$t_m = 6/6 \text{ (mm)}$	$Z = 1/4$
-	$W = 846/44 \text{ (N)}$	$W = 846/44 \text{ (N)}$	$t_c = 18/4 \text{ (mm)}$	
۲/۳ %	$\delta = 11/56 \text{ (mm)}$	$\delta = 11/3 \text{ (mm)}$	$t_m = 6/6 \text{ (mm)}$	$Z = 1/6$
-	$W = 846/44 \text{ (N)}$	$W = 846/44 \text{ (N)}$	$t_c = 18/4 \text{ (mm)}$	

جدول ۴-۱۶ مقادیر بهینه پارامترها با هدف کاهش وزن سازه و میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف به همراه مقایسه با روش FEM

عامل ثابت	مقادیر بهینه پارامترها	مقادیر پیش‌بینی شده مینی‌تب تحت شرایط بهینه	مقادیر حاصل از FEM	خطا %
$Z = 1/4$	$t_m = 6/6$ (mm)	$\sigma = 0/523$ (MPa)	$\sigma = 0/576$ (MPa)	۱۰ %
	$t_c = 5$ (mm)	$W = 436/82$ (N)	$W = 437/5$ (N)	-
$Z = 1/6$	$t_m = 6/6$ (mm)	$\sigma = 1/2$ (MPa)	$\sigma = 1/1$ (MPa)	۸ %
	$t_c = 5$ (mm)	$W = 436/82$ (N)	$W = 437/5$ (N)	-

۴-۴- مقایسه سازه کامپوزیتی در محیط واسط آب و هوا

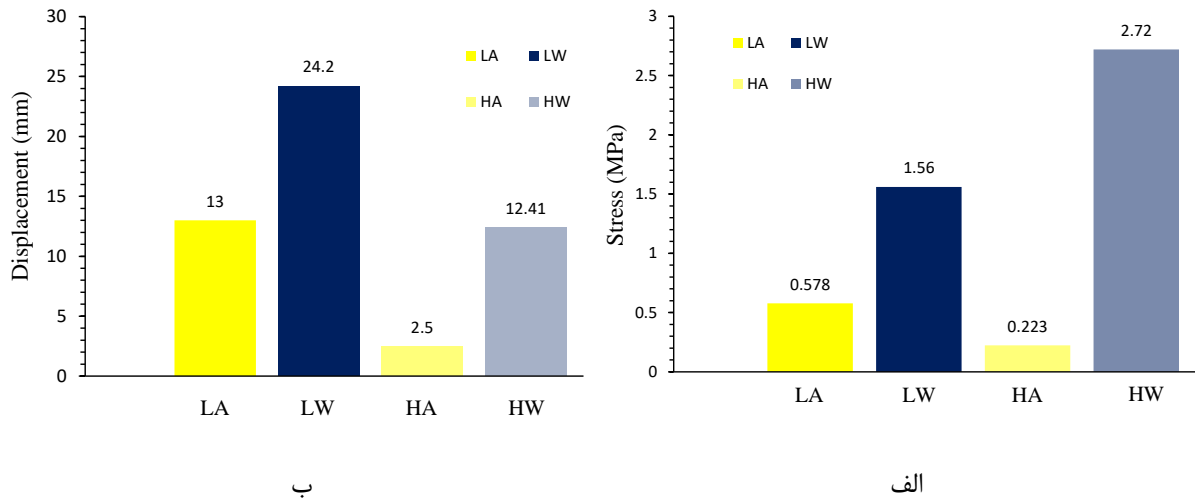
بعد از انجام محاسبات عددی در دو محیط آب و هوا، در این قسمت، چهار آزمون که دوه‌دو دارای مشخصات یکسانی می‌باشد، انتخاب شده‌است. مشخصات این چهار آزمون برای محیط هوا و آب مطابق جدول ۴-۱۷ بیان شده‌است. در این جدول (۴-۱۷) پاسخ تنش و جابجایی ایجاد شده در لایه هدف برای هر یک از آزمون‌های انتخاب شده در برابر هر کدام از آن‌ها بیان شده است.

جدول ۴-۱۷ آزمون‌های طراحی شده جهت مقایسه سازه کامپوزیتی در دو محیط واسط آب و هوا

کد آزمون	محیط واسط	t_m	t_c	Z	تنش (MPa)	جابجایی (mm)
LA	هوا	۱۰	۵	۱/۴	۰/۵۷۸	۱۳
LW	آب	۱۰	۵	۱/۴	۱/۵۸	۲۴/۲۰
HA	هوا	۲۰	۱۵	۱/۶	۰/۲۳۴	۲/۵
HW	آب	۲۰	۱۵	۱/۶	۲/۷۲	۱۲/۴۱

مقایسه بین مقدار تنش و جابجایی ایجاد شده در لایه هدف برای هر دو محیط بر روی سازه کامپوزیتی صورت گرفت که نتیجه بدین صورت شد که سازه کامپوزیتی تحت بارگذاری موج شوک حاصل از ۱ kg ماده منفجره TNT در محیط آب، دارای صدمات بیشتری نسبت به محیط هوا است. این صدمات به گونه‌ای است که در مقایسه آزمون LA و LW، تنش در محیط آب ۱۷۰٪ بیشتر از محیط هوا و جابجایی در لایه هدف به اندازه

۸۶٪ بیشتر از محیط هوا بر روی سازه کامپوزیتی ایجاد می‌شود. به طور مشابه در آزمون‌های HA و HW، تنش در محیط آب ۱۱۰٪ بیشتر از محیط هوا و جابجایی به اندازه ۴۰٪ بیشتر از محیط هوا بر روی سازه کامپوزیتی اتفاق می‌افتد. برای نمایش اختلاف آزمون‌ها با مشخصات ضخامت لایه‌ها و مقیاس فاصله یکسان، نمودار ستونی آماده شده که در شکل ۴-۳۶ نمایش داده شده است. در شکل ۴-۳۶-الف آزمون‌های LA و LW در حالت موج شوک غیریکنواخت، و آزمون‌های HA و HW در حالت موج شوک یکنواخت مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که از شکل الف مشخص است، میزان اختلاف تنش ایجاد شده در لایه هدف در آزمون‌های که در فواصل نزدیک مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، بسیار چشم‌گیر است. دلیل این اتفاق را می‌توان به تاثیرگذاری بیشتر جرم آب شرکت کننده در ناحیه اندرکنش بین سازه و سیال دانست. در شکل ب، اختلاف جابجایی ایجاد شده در لایه هدف در آزمون‌های LA و LW (حالت غیریکنواخت موج شوک)، چشم‌گیر می‌باشد. با توجه به مشخصات در نظر گرفته شده برای این دو آزمون (ضخامت لایه‌ها و مقیاس فاصله)، ضخامت لایه سرامیکی دارای کمترین مقدار خود می‌باشد که این امر باعث می‌شود که مقاومت این لایه در برابر عبور موج شوک از خود، کمتر شده و جابجایی ایجاد شده در لایه هدف افزایش یابد. دلیل مقاومت لایه سرامیکی در برابر عبور موج شوک، بخاطر وجود پیوند قوی کوالانسی ایجاد شده در بین اتم‌های تشکیل دهنده آن است. به طوری که در ضخامت‌های بالا لایه سرامیکی، موج شوک برای عبور از این لایه بخاطر برخورد کردن به توده عظیم پیوندهای کوالانسی که همانند سدی مستحکم عمل می‌کنند، چندین بار دچار انعکاس در بین لایه‌های تشکیل دهنده می‌شود که هر چند این اتفاق باعث افزایش تنش در لایه هدف می‌گردد، از سوی دیگر باعث کاهش قدرت موج شوک عبوری هنگام رسیدن به لایه فولادی می‌شود، در نتیجه کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف را به همراه دارد.



شکل ۴-۳۶ نمودار ستونی اختلاف بین تنش و جابجایی در لایه هدف برای مقایسه دو محیط آب و هوا

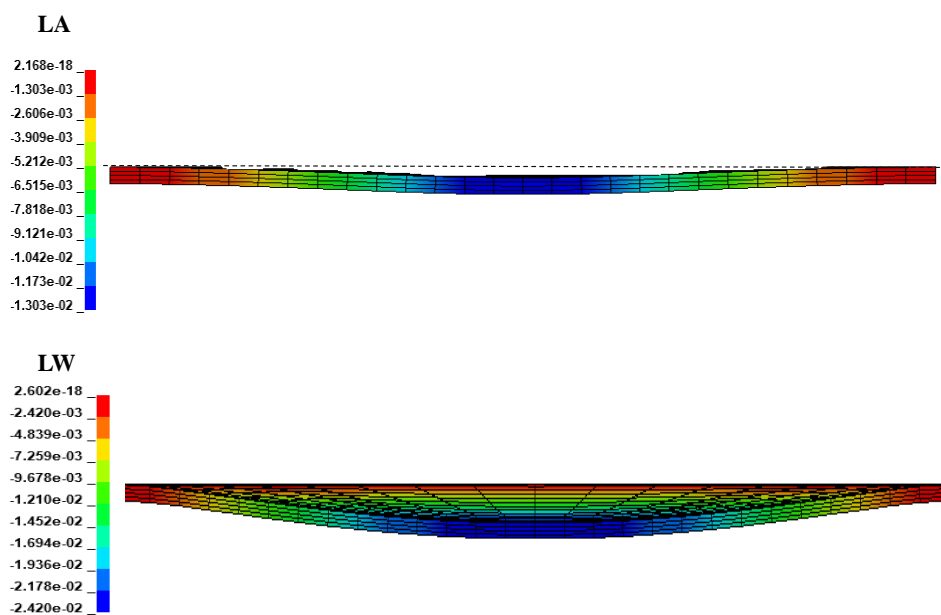
همچنین بعد از شبیه‌سازی آزمون‌های ارائه شده در

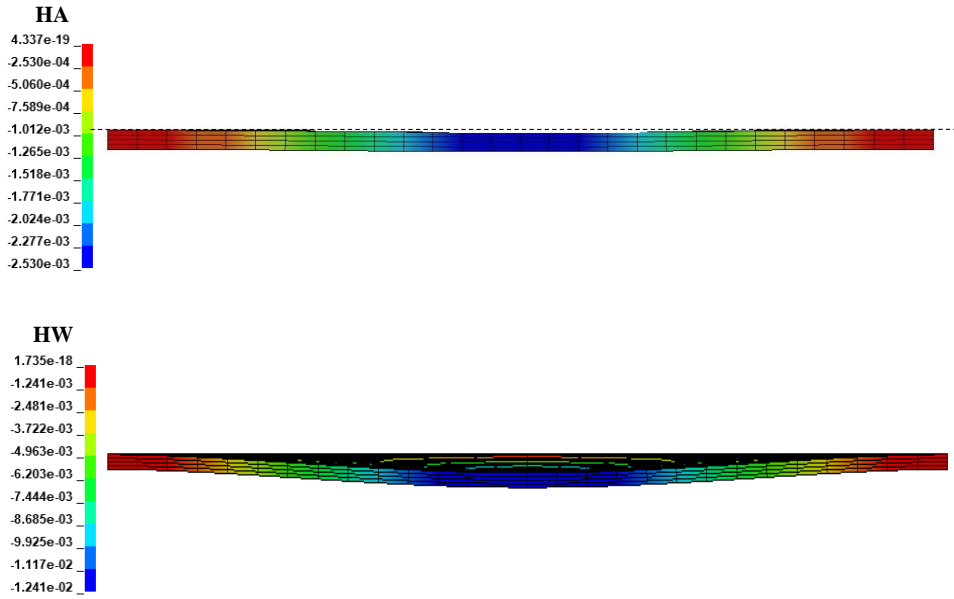
جدول ۴-۱۷، شکل ۴-۳۷ و شکل ۴-۳۸ مقایسه آزمون‌های طراحی شده در محیط هوا و محیط آب را نمایش

می‌دهد. شکل ۴-۳۷ کانتور بیشینه جابجایی ایجاد شده در لایه هدف بر حسب m برای آزمون‌های LA، LW،

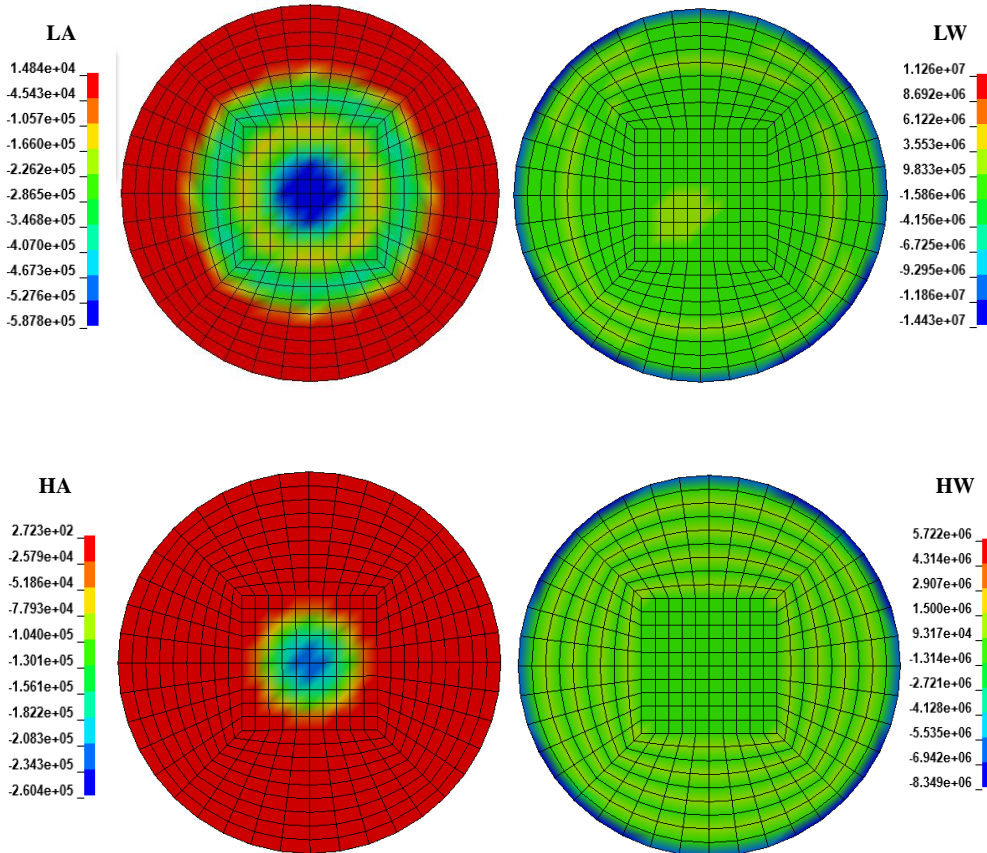
HA و HW را نمایش می‌دهد. شکل ۴-۳۸ کانتور بیشینه تنش عمود بر سطح فشاری در لایه هدف بر حسب

MPa برای آزمون‌های LA، LW، HA و HW را نمایش می‌دهد.





شکل ۴-۳۷ بیشینه جابجایی ایجاد شده در لایه هدف برای چهار آزمون مورد مقایسه بر حسب m



شکل ۴-۳۸ بیشینه تنش ایجاد شده در لایه هدف برای چهار آزمون مورد مقایسه بر حسب Pa

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینا به شبیه‌سازی پدیده انفجار بر روی صفحه کامپوزیتی فلز/سرامیک پرداخته شده است و نتایج شبیه‌سازی در محیط آب و هوا مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین جهت دستیابی به سازه‌ی سبک در عین حال با نسبت سفتی به وزن بالا به بهینه‌سازی آن پرداخته شد.

- مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق برای محیط هوا به شرح زیر می باشد:

- ✓ پارامتر مقیاس فاصله Z نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرشکل ایجاد شده در ورق در محیط هوا دارد،

به‌گونه‌ای که هر چقدر مقدار این پارامتر کمتر شود مقدار تغییرشکل ایجاد شده در ورق افزایش می‌یابد.

- ✓ اثر وزن خرج انفجار تأثیر بیشتری بر دامنه نوسان ارتعاشی ورق بعد از تغییرشکل نسبت به فاصله

خرج تا ورق دارد، این تأثیر به‌گونه‌ی است که در انفجارهای با وزن خرج بیشتر، دامنه نوسان ارتعاشی ورق پس از تغییرشکل اولیه کاهش می‌یابد.

- ✓ انعکاس موج شوک با مقیاس فاصله رابطه عکس دارد به‌طوری که با کاهش مقدار Z ، انعکاس موج

شوک افزایش می‌یابد.

- ✓ تغییر شکل مومسان در شکل‌دهی انفجاری به صورت کاملاً غیریکنواخت بوده و با ایجاد و حرکت لولای پلاستیک همراه است.
- ✓ ایمپالس برخورد متأثر از وزن خرج انفجار و فاصله آن از ورق است، به طوری که با کاهش فاصله خرج از ورق و افزایش مقدار خرج انفجاری ایمپالس برخورد افزایش پیدا می‌کند.
- ✓ از بین عوامل ضخامت لایه سرامیکی، ضخامت لایه فولادی و مقیاس فاصله، اثر مقیاس فاصله (Z) بر قدرت موج شوک حاصل از انفجار وابستگی زیادی دارد. با کاهش Z قدرت موج شوک افزایش و باعث افزایش ۴۰٪ میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف می‌شود.
- ✓ با افزایش ضخامت لایه‌های سرامیکی و فلزی میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف کاهش می‌یابد که تاثیر ضخامت لایه فولادی بر کاهش تنش بیشتر خواهد بود.
- ✓ ضخامت لایه سرامیکی تاثیر بیشتری بر میزان جابجایی ایجاد شده در لایه هدف به نسبت ضخامت لایه فلزی دارد؛ به طوری که کاهش ضخامت لایه سرامیکی از ۱۵ mm به ۵ mm منجر به افزایش میزان جابجایی لایه هدف به میزان ۷۳٪ خواهد شد.
- ✓ به‌طور کلی اثر ضخامت لایه سرامیکی بر مقدار جابجایی لایه هدف معنادارتر و تاثیر مقیاس فاصله و ضخامت لایه فلزی بر میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف بیشتر است.
- ✓ با استفاده از قابلیت پیدا کردن حالت بهینه در طراحی آزمایش، با هدف دستیابی به حداکثر نسبت سفتی به وزن سازه و حداقل میزان تنش و جابجایی لایه هدف و کمترین وزن سازه کامپوزیتی، نتایج نشان دهنده این است که در موج شوک یکنواخت ($Z=1/6$) باید ضخامت لایه فلزی و سرامیکی به ترتیب برابر ۱۰ و ۱۵ mm باشد. از طرفی در موج شوک غیر یکنواخت ($Z=1/4$) تحت این شرایط مقدار ضخامت لایه فلزی باید از ۱۰ به ۱۳/۶۵ mm افزایش یابد. همچنین شبیه‌سازی المان محدود حالت بهینه پیش‌بینی شده نشان‌دهنده دقت خوب نتایج تحلیل آماری به روش سطح پاسخ است.

- نتایج بدست آمده در محیط آب به شرح ذیل می‌باشد.
- ✓ در فاز مکش علیرغم معکوس شدن جهت فشار، جابجایی همچنان روند صعودی دارد ولی تغییر شیب منحنی جابجایی (سرعت) با تغییر فاز فشار به کشش قابل توجه است.
- ✓ با افزایش پارامتر شوک، قدرت موج شوک افزایش می‌یابد که نتیجه آن افزایش ایمپالس برخورد و افزایش تغییرشکل در ورق می‌شود.
- ✓ پارامتر شوک رابطه عکس با مقیاس فاصله دارد به طوری با کاهش مقیاس فاصله شدت موج شوک افزایش می‌یابد در صورتی که با افزایش پارامتر شوک شدت موج شوک افزایش می‌یابد.
- ✓ در انفجارهای ضعیف (وزن خرج پایین)، قدرت موج شوک برخوردی در ضربه اولیه در انفجار زیرآب آن‌چنان زیاد است که فاز مکش تنها باعث کاهش سرعت تغییرشکل در نمونه می‌شود.
- ✓ بر خلاف آنچه در محیط هوا اتفاق افتاد، در محیط آب عامل مقیاس‌فاصله (Z) تاثیری بر روی پارامتر پاسخ ندارد. این رهیافت از آن جهت است که در محیط آب به دلیل اثر تقابلی آب با موج شوک که باعث افزایش چشم‌گیر نیروی ایجاد شده می‌شود، تاثیر این پارامتر آن‌چنان که در محیط هوا دیده شد در محیط آب دیده نمی‌شود.
- ✓ تأثیر ضخامت لایه سرامیکی بر روی تنش ایجاد شده بسیار چشم‌گیر است، به طوری که با افزایش ضخامت این لایه تا ۱۵ mm، تنش به میزان ۵۵٪ افزایش می‌یابد.
- ✓ با افزایش ضخامت لایه فولادی تا ۱۸ mm در بررسی انفجار زیرآب، تنش ایجاد شده به میزان ۲۵٪ افزایش می‌یابد.
- ✓ با افزایش ضخامت هر یک از لایه‌ها (t_m و t_c) میزان شوک عبوری از محیط آب کاهش یافته و در نتیجه منجر به کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف می‌شود. این کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف برای هر کدام از لایه‌ها برابر ۷۲٪ می‌باشد.
- ✓ با افزایش ضخامت لایه فولادی در ضخامت ثابت ۵ mm لایه سرامیکی، باعث افزایش سریع تنش ایجاد شده در لایه هدف می‌شود از سوی دیگر، در ضخامت ثابت ۱۵ mm لایه سرامیکی، با افزایش ضخامت لایه فولادی باعث کاهش ۳۰٪ تنش ایجاد شده در لایه هدف می‌شود. همچنین در ضخامت

ثابت ۱۰ mm لایه سرامیکی، با افزایش ضخامت لایه فولادی تا ۱۷ mm، تنش به میزان ۱۸٪ افزایش یافته و بعد از آن نه تنها افزایشی در آن مشاهده نمی‌شود بلکه باعث کاهش تنش ایجاد شده در لایه هدف می‌شود.

✓ با افزایش ضخامت لایه فولادی، برای هر سه ضخامت لایه سرامیکی (۵، ۱۰ و ۱۵ mm) کاهش مقدار جابجایی در لایه هدف مشاهده می‌شود. در این کاهش مقدار جابجایی، برای ضخامت ثابت ۵ mm لایه سرامیکی کاهش ۵۵٪ را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که در ضخامت ثابت (۱۵ mm) لایه سرامیکی، وقتی ضخامت لایه فولادی به ۲۲ mm برسد، اثر ضخامت لایه سرامیکی در جابجایی ایجاد شده در لایه هدف بی‌اثر می‌شود و افزایش ضخامت لایه سرامیکی هیچ تأثیری در کاهش جابجایی لایه هدف ندارد.

✓ کمترین جابجایی زمانی رخ می‌دهد که ضخامت لایه‌های فولادی و سرامیکی در بیشینه مقدار خود باشند.

✓ با ثابت نگه‌داشتن لایه فولادی (t_m برابر ۱۵ mm)، بیشترین میزان تنش ایجاد شده در لایه هدف برای ضخامت لایه سرامیکی و مقیاس فاصله به ترتیب برابر ۱۵ mm و ۱/۷ بدست آمده است.

• نتایج بدست آمده از مقایسه بین محیط آب و هوا به شرح ذیل می‌باشد.

✓ با مقایسه محیط هوا با آب مشاهده شد که در فواصل نزدیک خرج انفجار، تنش در محیط آب ۱۷۰٪ بیشتر از محیط هوا و جابجایی در لایه هدف به اندازه ۸۶٪ بیشتر از محیط هوا بر روی سازه کامپوزیتی ایجاد می‌شود.

✓ همچنین در فواصل دور خرج انفجار از سازه، تنش در محیط آب ۱۱۰۰٪ بیشتر از محیط هوا و جابجایی به اندازه ۴۰۰٪ بیشتر از محیط هوا بر روی سازه کامپوزیتی اتفاق می‌افتد.

۵-۲- ارائه‌ی پیشنهادها

✓ به منظور بهبود پاسخ دینامیکی ورق تحت بارگذاری انفجاری می‌توان صفحات با روکش آلومینیومی، پلاستیک فشرده و ساندویچی را تحت بررسی قرار داد.

- ✓ همچنین بررسی با خرج انفجاری با هندسه استوانه‌ای یا مربعی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شود.
- ✓ در صورت فراهم بودن شرایط تست تجربی انفجار، نمونه کامپوزیتی فلز/سرامیک تحت آزمون قرار گیرد و با شرایط بهینه ارائه شده برای سازه کامپوزیتی مورد مقایسه قرار گیرد.
- ✓ در این تحقیق از روش‌های عددی دیگر همچون SPH برای شبیه‌سازی مسئله انفجار و اثرات موج شوک بر روی سازه مورد بررسی استفاده شود.

منبع‌ها

- [1] A. L. Florence, "Circular plate under a uniformly distributed impulse," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 2, no. 1, pp. 37-47, 1966.
- [2] T. Wierzbicki, A. L. Florence, "A theoretical and experimental investigation of impulsively loaded clamped circular viscoplastic plates," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 6, no. 5, pp. 553-568, 1970.
- [3] C. N. Kingery, G. Bulmash, Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst: US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, 1984.
- [4] J. A. Zukas, D. R. Scheffler, "Practical aspects of numerical simulations of dynamic events: effects of meshing," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 24, no. 9, pp. 925-945, 2000.
- [5] M. Stoffel, R. Schmidt, D. Weichert, "Shock wave-loaded plates," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 38, no. 42-43, pp. 7659-7680, 2001.
- [6] C. Wu, H. Hao, "Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, no. 6, pp. 699-717, 2005.
- [7] C. Yong, Z. Jun, W. Yu, and T. Ping, "Non-linear transient analysis of a blast-loaded circular plate resting on nonviscous fluid," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 82, no. 9, pp. 729-737, 2005.
- [8] V. Balden, G. N. Nurick, "Numerical simulation of the post-failure motion of steel plates subjected to blast loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 1-4, pp. 14-34, 2005.
- [9] A. Neuberger, S. Peles, D. Rittel, "Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: Air-blast loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 34, no. 5, pp. 859-873, 2007.
- [10] A. J. Wang, H. G. Hopkins, "On the plastic deformation of built-in circular plates under impulsive load," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 3, no. 1, pp. 22-37, 1954.
- [11] M. R. Amini, "Effect of polyurea on dynamic response and fracture resistance of steel plates under impulsive loads," UC San Diego, 2007.
- [12] M. S. Chafi, G. Karami, M. Ziejewski, "Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALE multi-material formulations," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 10-11, pp. 1269-1275, 2009.
- [13] M. Goudarzi, J. Zamani, "Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion," *Modares Mech. Eng.*, vol. 15, no. 1, 2015.
- [14] A. Aslani, J. Zamani, "A numerical analysis on effect of impedance and thickness of various layers on deflection of target plate in layered armor systems under explosive loading," *J. Sci. Technol. Compos.*, vol. 1, no. 2, pp. 11-20, 2015.
- [15] A. Fallah, N. Mehreganian, G. K. Boiger, and L. A. Louca, "Response of armour steel plates to localised air blast load: a dimensional analysis," *Int. J. Multiphys.*, vol. 11, no. 4, pp. 387-411, 2017.
- [16] M. F. M. Isa, M. Risby, M. Norazman, S. Khalis, M. Hafizi, and S. F. Arif, "Simulation on the shock attenuation behavior of coupled RHA and sandwich composite panel under blast loading," *J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 3S, pp. 555-565, 2017.
- [17] N. Mehreganian, L. Louca, G. Langdon, and R. Curry, "The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 115, pp. 81-93, 2018.

- [18] Y.-X. Zhang, F. Chen, and Y. Han, "Simulation Study on the Deflection Response of the 921A Steel thin plate under Explosive Impact Load," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 322, pp. 22–35, 2018.
- [19] R. H. Cole, R. Weller, "Underwater explosions," *Phys. Today*, vol. 1, p. 35, 1948.
- [20] H. U. Mair, "Benchmarks for submerged structure response to underwater explosions," *Shock Vib.*, vol. 6, no. 4, pp. 169-181, 1999.
- [21] C. A. Felippa, J. A. DeRuntz, "Finite element analysis of shock-induced hull cavitation," *Appl. Mech. Eng.*, vol. 44, no. 3, pp. 297-337, 1984.
- [22] F. Travis, W. Johnson, "Experiments in the dynamic deformation of clamped circular sheets of various metals subject to an underwater explosive charge," *Sheet Met. Ind.*, vol. 423, no. 39, pp. 456-474, 1962.
- [23] W. Johnson, A. Poynton, H. Singh, and F. W. Travis, "Experiments in the underwater explosive stretch forming of clamped circular blanks," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 8, no. 4, pp. 237-270, 1966.
- [24] M. A. Sprague, T. L. Geers, "A spectral - element method for modelling cavitation in transient fluid-structure interaction," *Int. J. Numer. Methods Engineering*, vol. 60, no. 15, pp. 2467-2499, 2004.
- [25] K. Ramajeyathilagam, C. P. Vendhan, V. B. Rao, "Non-linear transient dynamic response of rectangular plates under shock loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 24, no. 10, pp. 999-1015, 2000.
- [26] K. Ramajeyathilagam, C. P. Vendhan, "Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 30, no. 6, pp. 699-719, 2004.
- [27] Z. J. Kadkhoda Qamsari, A. Sheikhi Koohsar, A. Motamed Shariati, and H. Hadavei, "An analytical and empirical study of strain rate sensitivity in an isotropic sheet with specified boundary conditions under underwater loading," *Iranian Aerospace Society*, 2009, (In Persian)
- [28] S. Galehdari, H. Khodarahmi, S. H. Moud, and A. Karimi, "Analysis of Stand Off and Charge Weight Effect on Peak Pressure and Deformation of Metallic Plate Subjected to Under Water Explosion," *J. New Mater.*, vol. 4, no. 4, pp. 43–59, 2014.
- [29] A. Koohsar, S. Nasereddini, and E. Bazrafshan, "Test and numerical analysis of underwater explosion on circular plates." *Appl. Mech. Mater.*, vol. 187, no. 8, pp. 74–79, 2012.
- [30] Z. J. M. Heshmati, "Numerical Study of the Effect of Geometric Parameters of the Conic Shock Tubing underwater, on the Performance and Maximum Productive Pressure for Equivalent Mass Equivalence," *Modares Mech. Eng.*, vol. 15, no. 7, pp. 321–328, 2015.
- [31] A. Alizadeh, B. Novae Nia, "Evaluation of GFRP-reinforced reinforced multi-cell composite deck behavior," *J. Civ. Eng. Ferdousei*, vol. 26, no. 2, pp. 50–58, 2015.
- [32] S. Abrate, "Coatings for Mitigating the Effects of Underwater Shock Waves on Structures," *Blast Mitig. Strateg. Mar. Compos. Sandw. Struct.*, vol. 17, pp. 321–335, 2018.
- [33] X. Zhao, G. Wang, W. Lu, P. Yan, M. Chen, and C. Zhou, "Damage features of RC slabs subjected to air and underwater contact explosions," *Ocean Eng.*, vol. 147, pp. 531-545, 2018.
- [34] W. Huang, W. Zhang, T. Chen, X. Jiang, and J. Liu, "Dynamic response of circular composite laminates subjected to underwater impulsive loading," *Com. Part A: Applied Sci. and Man.*, vol. 109, pp. 63-74, 2018.
- [35] Y. Liu, A. Zhang, Z. Tian, and S. P. Wang, "Numerical investigation on global responses of surface ship subjected to underwater explosion in waves," *Ocean Eng.*, vol. 161, pp. 277-290, 2018.

- [36] M. H. Keshavarz, H. R. Pouretedal, "An empirical method for predicting detonation pressure of CHNOFCl explosives," *Thermochim. Acta.*, vol. 414, no. 2, pp. 203-208, 2004.
- [37] M. H. Keshavarz, H. R. Nazari, "A simple method to assess detonation temperature without using any experimental data and computer code," *J. Hazard. Mater.*, vol. 133, no. 1-3, pp. 129-134, 2006.
- [38] M. H. Keshavarz, "Detonation velocity of pure and mixed CHNO explosives at maximum nominal density," *J. Hazard. Mater.*, vol. 141, no. 3, pp. 536-539, 2007.
- [39] Z. Jamal, "Introduction to the explosion mechanics," 1st ed., Khajeh Nasir Tusi University of Technology, 2012, (In Persian)
- [40] J. K. Clutter, M. Stahl, "Hydrocode simulations of air and water shocks for facility vulnerability assessments," *J. Hazard. Mater.*, vol. 106, no. 1, pp. 9-24, 2004.
- [41] A. Wiliame, V. Wilkins, "Acoustic Impedance," Report., 2009
- [42] C. E. Needham, B. Waves, S. Wave, and H. P. Phenomena, "Blast wave propagation," *Blast Waves*, pp. 87-99, 2010.
- [43] A. C. Jacinto, R. D. Ambrosini, and R. Danesi, "Experimental and computational analysis of plates under air blast loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, no. 10, pp. 927-947, 2001.
- [44] D. L. Chapman, D. Edinburgh, P. Magazine, "VI. On the rate of explosion in gases," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 47, no. 284, pp. 90-104, 1899.
- [45] E. Jouguet, "Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz," *J. Maths. Pure Appl.*, vol. 7, pp. 347, 1905.
- [46] J. O. Hallquist, "LS-DYNA theory manual," *Livermore Softw. Technol. Corp.*, vol. 3, pp. 25-31, 2006.
- [47] M. A. Meyers, *Dynamic behavior of materials*, John wiley & sons, 1994.
- [48] G. F. Kinney, K. J. Graham, *Explosive shocks in air*: Springer Science & Business Media, 2013.
- [49] G. F. Kinney, K. J. Graham, *Explosive Shocks in Air*, pp. 35-49, 1985.
- [50] J. Henrych, R. Major, *The dynamics of explosion and its use*: Academia, 1979.
- [51] H. L. Brode, "Blast wave from a spherical charge," *Phys. Fluids*, vol. 2, no. 2, pp. 217-229, 1959.
- [52] H. J. Goodman, *Compiled free-air blast data on bare spherical pentolite*, Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground Md, 1960.
- [53] B. Le Méhauté, S. Wang, *Water waves generated by underwater explosion*: World Scientific, 1996.
- [54] A. Zhang, X. Yao, J. Li, "The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure," *Appl Ocean Research.*, vol. 30, no. 3, pp. 159-171, 2008.
- [55] L. Bjørnø, P. Levin, "Underwater explosion research using small amounts of chemical explosives," *Altrasonics.*, vol. 14, no. 6, pp. 263-267, 1976.
- [56] D. L. Youngs, "Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion," *Numer. methods fluid Dyn.*, 1982.
- [57] S. Hiermaier, *Structures under crash and impact: continuum mechanics, discretization and experimental characterization*: Springer Science & Business Media, 2007.
- [58] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, and K. Elkhodary, *Nonlinear finite elements for continua and structures*: John wiley & sons, 2013.
- [59] C. D. Benson, *Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes*, 1990.
- [60] J. Donea, S. Giuliani, J. P. Halleux, "An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions," *Comput. methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 33, no. 1-3, pp. 689-723, 1982.
- [61] A. Zhang, P. Sun, F. Ming, and A. Colagrossi, "acquaintance Particle Hydrodynamics (SPH) and its Applications," *J. Hydrodyn.*, vol. 29, no. 2, pp. 187-216, 2017.

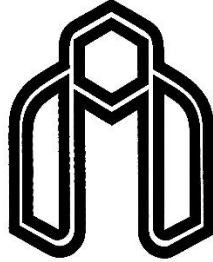
- [62] G. Randers-Pehrson, K. A. Bannister, "Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D," Army research lab aberdeen proving ground md, 1997.
- [63] G. R. Johnson, "A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 84, pp. 541-547, 1983.
- [64] G. R. Johnson, W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Eng. fracture mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 31-48, 1985.
- [65] G. R. Johnson, T. J. Holmquist, "An improved computational constitutive model for brittle materials." *AIP Conference Proceedings*, 1994
- [66] E. Lee, H. Hornig, and J. Kury, *Adiabatic expansion of high explosive detonation products*, Univ. of California Radiation Lab. at Livermore, Livermore, CA (United States), 1968.
- [67] Z. Zhang, L. Wang, and V. V. Silberschmidt, "Damage response of steel plate to underwater explosion: Effect of shaped charge liner," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 103, pp. 38-49, 2017.
- [68] T. Deniz, R. O. Yildirim, "Ballistic penetration of hardened steel plates," pp. 112-113, 2010.
- [69] J. F. Shackelford, Y. H. Han, S. Kim, and S. H. Kwon, *CRC materials science and engineering handbook*: CRC press, 2016.
- [70] A. Dorogoy, D. Rittel, and A. Brill, "A study of inclined impact in polymethylmethacrylate plates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 285-294, 2010.
- [71] Y. F. Wang, Z. G. Yang, "Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials," *Wear.*, vol. 265, no. 5-6, pp. 871-878, 2008.
- [72] J. R. Robbins, J. L. Ding, and Y. M. Gupta, "Load spreading and penetration resistance of layered structures—a numerical study," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 30, no. 6, pp. 593-615, 2004.
- [73] A. Wiśniewski, Ł. Tomaszewski, "Analysis of penetration depth with the use of AUTODYN 5 programme," *Problemy Techniki Uzbrojenia.*, vol. 38, 2009.
- [74] H. Wang, X. Zhu, Y. S. Cheng, and J. Liu, "Experimental and numerical investigation of ship structure subjected to close-in underwater shock wave and following gas bubble pulse," *Marine Structures.*, vol. 39, pp. 90-117, 2014.
- [75] ls-dyna_user manual_vol1_971R600, 2007.
- [76] L. Chen, L. Zhang, Q. Fang, and Y. Mao, "Performance based investigation on the construction of anti-blast water wall," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 81, pp. 17-33, 2015.
- [77] S. A. Fedosov, "Laser beam hardening of carbon and low alloyed steels: discussion of increased quantity of retained austenite," *J. of mat. Science.*, vol. 34, no. 17, pp. 4259-4264, 1999.
- [78] M. Moradi, and A. R. MohazabPak, "Statistical Modelling and Optimization of Laser Percussion Microdrilling of Inconel 718 Sheet Using Response Surface Methodology (RSM)," *Lasers in Eng.*, vol. 39, 2018.
- [79] M. Azadi, S. Azadi, F. Zahedi, and M. Moradi, "Multidisciplinary optimization of a car component under NVH and weight constraints using RSM." *ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.*, American Society of Mechanical Engineers, 2009..
- [80] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*: John wiley & sons, 2017.
- [81] Y. Wyser, C. Pelletier, J. Lange, "Predicting and determining the bending stiffness of thin films and laminates," *Packaging Technology and Science: An Int. J.*, vol 14.3, pp: 97-108, 2001.

- [82] E. Fathallah, H. Qi, L. Tong, and M. Helal, "Numerical investigation of the dynamic response of optimized composite elliptical submersible pressure hull subjected to non-contact underwater explosion," *Composite Structures.*, vol. 121, pp. 121-133, 2015.
- [83] V. A. Sergueeva, J. Zhou, B. E. Meacham, D. J. Branagan, "Gage length and sample size effect on measured properties during tensile testing," *Mat Science and Eng.*, vol. 526, no. 1-2, pp. 79-83, 2009.

Abstract

Reinforcement of composite structures affected by the explosive shock has a significant importance in the design of armors. In this research, a numerical finite element analysis has been carried out by using the LS-DYNA hydrocode for modeling the explosion phenomenon and its effect on the structure in the medium of the water and the air. The composite structure in this study consists of three layers: an alumina ceramic plate (SiC), an intermediate plate of hot rolled steel (RHA) and a lower layer of polymethyl methacrylate (PMMA), which was used as a target layer. The shock wave was created by blasting of a spherical explosive charge that located at different distances from the center of the structure surface, and in an intermediate medium hits to the structure. A three-dimensional simulation was carried out in the air medium by Load Blast Enhanced (LBE) method, and in the water medium by an Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method. For the verification of the model as well as the analysis of the accuracy in both intermediate environments, the numerical results were compared to the other empirical studies. In the air blasting, the impact of a uniform and nonuniform shock wave on the perpendicular stress and displacement of the target layer were investigated. The response surface method (RSM) was used to achieve the optimal structure, which transmitted the least stress and displacement to the target layer along with the light weight. By using the second order regression model, the stress and deformation function in the target layer was created and the optimal thickness of layers was predicted. Similarly, in the water media, the effect of the collision shock created from different stand-off distances on the displacement and the amount of stress of the target layer as a response was investigated. Finally, in the same structure at both air and water media, results were compared together. This comparison showed that the exerted deflection and stress on the target layer in underwater explosion was significantly higher than those of air medium. The reason for this phenomenon was the higher shock wave velocity due to higher density of water versus the air, and also higher amount of water contributing in the deformation process.

Keywords: Air blast, Underwater explosion, Shock wave, Impulse, Composite structure, Optimization, Response surface method



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Title

**Strength analysis of a laminated composite plate subjected to explosion shock
wave: underwater versus air blasting**

Written by

Mohammad Javad Rezaei

Supervisor

Dr. Mahdi Gerdooei

January 2019