

## تحلیل و بهینه سازی صفحه کامپوزیتی تحت بار انفجار زیر آب با روش المان محدود

سید علی گله داری<sup>۱\*</sup>، عباس وفایی صفت<sup>۲</sup>، داوود آرزومندی<sup>۳</sup>، حسین خدارحمی<sup>۴</sup>، مهدی شهابی<sup>۵</sup>

### چکیده

سازه‌های دریایی باید علاوه بر تحمل فشار هیدرواستاتیک آب، تا حد امکان در برابر بارهای ناشی از انفجار زیر آب مقاوم باشند. می‌بایست نسبت استحکام به وزن این سازه‌ها تا حد امکان بالا بوده، تا سازه طراحی شده به لحاظ مواد مصرفی، انرژی و هزینه بهینه باشد. در این مقاله ابتدا روشی جهت شبیه‌سازی پدیده انفجار زیر آب در محیط نرم‌افزار ABAQUS ارائه شده و با استفاده از نتایج تجربی موجود، این روش صحت‌سنجی شده است. سپس با استفاده از این روش رفتار دینامیکی سازه کامپوزیتی تحت بار انفجار زیر آب بررسی شده است. در ادامه الگوریتمی ارائه شده است که به وسیله آن می‌توان با تغییر زاویه و ضخامت صفحه کامپوزیتی، وزن صفحه را در شرایطی که سازه در مقابل بار انفجار زیر آب دچار شکست نشود، با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه نمود. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده توانایی بهینه‌سازی وزن سازه کامپوزیتی را دارد. بر اساس بهینه‌سازی انجام شده، با کاهش ۳۸٪ وزن، سازه هم‌چنان در برابر نیروی انفجار مقاوم است. با توجه به پایین بودن نسبت وزن به استحکام در سازه‌های کامپوزیتی، این سازه‌ها کاربردهای فراوانی در صنایع نظامی و دریایی دارند. از نتایج این مسئله می‌توان برای بهینه‌سازی وزن و استحکام سازه‌های دریایی که در مقابل بار انفجار زیر آب قرار می‌گیرند استفاده نمود.

**واژه‌های کلیدی:** انفجار زیر آب، بهینه‌سازی، روش اجزاء محدود، الگوریتم ژنتیک، صفحه کامپوزیتی

<sup>۱</sup> - مربی، گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> - دانشیار، تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار

<sup>۳</sup> - کارشناس ارشد مکانیک، تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار

<sup>۴</sup> - دانشیار، تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار

<sup>۵</sup> - کارشناس ارشد مکانیک، تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار

\* - نویسنده مسئول مقاله: ali.galehdari@gmail.com

## پیشگفتار

سازه‌های دریایی علاوه بر تحمل فشار هیدرواستاتیک وارده از طرف آب باید تا حد امکان در برابر بارهای ناشی از انفجار زیر آب مقاوم باشد. پاسخ سازه‌ای که تحت اثر بار انفجار زیر آب قرار گرفته است، می‌تواند معیار مهمی جهت طراحی آن تلقی شود. کاربرد مواد کامپوزیت به دلیل قابلیت جذب انرژی، در قسمت‌های گوناگون تجهیزات و وسایل نظامی از جمله شناورها، اژدرها روند صعودی داشته و رفته رفته جای خود را در اکثر زمینه‌های صنعتی باز نموده است. بر همین اساس در صنایع گوناگون دریایی استقبال گسترده‌ای از مواد کامپوزیت به لحاظ استحکام قابل مقایسه با فلزات، سبک‌تر بودن نسبت به فلزات و مهم‌تر از همه مقاومت بالا در مقابل خوردگی، انجام شده است. استفاده از این مواد در ساخت سازه‌های دریایی و زیر دریایی باعث شده است که مسئله تاثیر بار انفجار زیر آب بر رفتار این مواد مورد توجه محققین قرار گیرد.

در پژوهش به عمل آمده به وسیله بارتا و حسن<sup>۱</sup> یک کد کامپیوتری سه بعدی برای تجزیه و تحلیل خرابی‌های وارده بر مواد کامپوزیتی تحت اثر انفجار زیر آب تهیه شده است. آنها هم‌چنین درصد انرژی صرف شده جهت لایه لایه شدن مواد کامپوزیتی و نیز اثر جهت پیچش الیاف بر رفتار سازه را بررسی نموده‌اند [۱]. راجندران و ناراسیم هان<sup>۲</sup> مروری بر روابط تشریح کننده پدیده انفجار زیر آب و تغییر فرم‌های الاستیک و پلاستیک ایجاد شده در صفحات بر اثر بار انفجار زیر آب را انجام داده‌اند [۲]. ترکمن<sup>۳</sup> و همکارانش نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و حل عددی با روش اجزاء محدود را برای یک صفحه کامپوزیتی با لایه‌های تقویت شده تحت تاثیر بار انفجاری، مقایسه نموده و تاثیر تقویت کننده‌ها و بار اعمال شده در پاسخ دینامیکی صفحه را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۳]. برت<sup>۴</sup> در موسسه تحقیقات و تکنولوژی دفاعی استرالیا با استفاده از نرم افزار DYNA2D موج ضربه‌ای و امواج

فشاری تولید شده در اثر انفجار زیر آب را مورد مطالعه قرار داده است [۴]. در این پژوهش پدیده‌هایی مانند حرکت موج انفجار در ماده منفجره، تولید و انتشار موج ضربه‌ای، نوسانات حباب و امواج فشاری ناشی از نوسانات حباب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا اثر مقدار ماده منفجره و عمق محل انفجار بر روی پدیده‌های فوق - الذکر بررسی شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل به کمک نرم افزار، در رابطه با موج ضربه‌ای و امواج فشاری با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند. با توجه به همخوانی خوب نتایج، نشان داده شده است که روش اجزا محدود روش مناسبی برای مطالعه پدیده انفجار زیر آب می‌باشد. در پژوهشی دیگر احمد<sup>۵</sup> و همکارانش پیرامون اثر انفجار زیر آب بر پوسته‌ها مطالعات تجربی انجام داده‌اند [۵]. هم-چنین راماجی تیلگام<sup>۶</sup> مطالعات مشابهی بر روی اثر بار انفجار زیر آب بر پوسته محفظه‌ها انجام داده است [۶]. در تاریخچه بحث انفجار زیر آب می‌توان به پژوهش انجام شده به وسیله اسپراگو<sup>۷</sup> و همکارانش اشاره کرد. در این پژوهش از روش اجزا محدود برای تجزیه و تحلیل رفتار یک سازه دریایی (مانند کشتی) تحت بار انفجار زیر آب استفاده شده است [۷]. در یک پژوهش اولسون و نوریک<sup>۸</sup> مطالعاتی پیرامون اثر بار انفجاری بر روی صفحات فلزی مستطیلی با تقویت و بدون تقویت انجام داده‌اند [۸]. اثر بارگذاری انفجار زیر آب بر روی سازه‌های تقویت شده به-وسیله چیکوچی<sup>۹</sup> با روش اجزا محدود و به کمک نرم افزار افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفته است [۹]. هم‌چنین سلیمی و همکاران با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه-سازی یک صفحه ساندویچ پانل را تحت بار انفجار زیر آب انجام داده‌اند. در این مقاله از روش اجزا محدود به منظور تحلیل نتایج بدست آمده استفاده شده است [۱۰]. بلان<sup>۱۰</sup> و همکاران رفتار دینامیکی سازه کامپوزیتی E-Glass/Epoxy را تحت بار انفجار زیر آب با استفاده از روش تجربی و تحلیل عددی بررسی نموده‌اند. در این

<sup>5</sup>- Ahmed

<sup>6</sup>- Ramajeythilagam

<sup>7</sup>- Sprague

<sup>8</sup>- Olson و Nurick

<sup>9</sup>- Cichocki

<sup>10</sup>-Blanc

<sup>1</sup>- Barta & Hassan

<sup>2</sup>- Rajendran & Narasimhan

<sup>3</sup>- Turkmen

<sup>4</sup>- Brett

شرایطی که سازه در مقابل بار انفجار زیر آب دچار شکست نشود، بهینه نمود.

### پدیده‌ی انفجار زیر آب

در پدیده‌ی انفجار زیر آب موج ایجاد شده پس از انفجار، تابعی از اندازه فشار و جابجایی سیال می‌باشد و بصورت ضربه‌ای و با سرعتی چند برابر سرعت صوت در آب حرکت می‌کند. از طرفی نوسانات حباب گاز ایجاد شده در اثر افزایش ناگهانی فشار اولیه، انتشار انرژی به فرم امواج فشاری را در پی دارد که بصورت شعاعی از محل انفجار به تمام جهات منتشر می‌گردد. توالی پدیده‌هایی که در انفجار زیر آب اتفاق می‌افتد، عبارتند از:

الف) انتشار موج ضربه‌ای اولیه با دامنه زیاد و زمان ماندگاری کم

ب) انتشار امواج فشاری در اثر نوسانات حباب با دامنه کمتر و زمان ماندگاری بیش‌تر نسبت به موج ضربه‌ای

ج) پدید آمدن جت پر سرعت سیال  
این واقعیت که آب یک سیال تراکم پذیر می‌باشد، باعث می‌شود که فشار ایجاد شده در یک نقطه از آن بصورت موج منتشر گردد. در این حالت اگر امواج به صورت امواج تحت در نظر گرفته شوند بدون لحاظ کردن میرایی طبیعی، دامنه امواج نسبتاً ثابت می‌ماند، اما اگر امواج در تمامی جهات بصورت کروی پخش شوند به دلیل پخش انرژی در سطح وسیع‌تر (سطح کروی)، دامنه امواج نسبت به فاصله از منبع تولید موج کاهش یافته و اصطلاحاً موج میرا می‌گردد.

مطابق شکل (۱) پس از تکمیل پدیده انفجار، فشار ایجاد شده (که در حدود چند هزار اتمسفر است) به آب اعمال می‌شود و باعث ایجاد موج ضربه‌ای در آب و حرکت آن در تمامی جهات می‌شود. فشار زیاد اولیه ناشی از انفجار پس از انتشار موج ضربه‌ای بصورت قابل ملاحظه-ای کاهش می‌یابد، اما این فشار هنوز خیلی بالاتر از فشار هیدرواستاتیک محل وقوع انفجار است. همین فشار بالا به آب سرعتی در جهت انتشار موج ضربه‌ای می‌دهد. در اثر این حرکت آب، شعاع کره گازی (حباب) با نرخ نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد.

انبساط حباب و افزایش شعاع آن تا زمان نسبتاً زیادی (نسبت به مقیاس زمانی حرکت موج ضربه‌ای) ادامه

مقاله از دستگاه تست انفجار زیر آب استفاده شده و نتایج آن با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار Ls-Dyna صحت سنجی شده است [۱۱]. کالاولاپالی<sup>۱</sup> در پایان‌نامه خویش بهینه سازی سازه یک زیر دریایی سبک را تحت بار انفجار زیر آب انجام داده است. به‌منظور شبیه‌سازی عددی از نرم افزار آباکوس استفاده نموده است. در نهایت با استفاده از تقویت کننده یک سازه با کمترین وزن و مقاوم نسبت به بار انفجار زیر آب طراحی نموده اند [۱۲]. راماجی تیلگام و همکاران، اثر انفجار زیر آب را بر روی یک صفحه فلزی با روش تجربی بررسی نموده اند [۱۳]. پروتی<sup>۲</sup> رفتار سازه ساندویچی کامپوزیتی را در برابر بار انفجار زیر آب مدل‌سازی نموده است. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی تماس آب با سازه از یک کد FSI<sup>۳</sup> استفاده شده است [۱۴]. لاتورته<sup>۴</sup> و همکاران، عملکرد صفحات کامپوزیتی را تحت بار انفجار زیر آب به روش تجربی مطالعه نموده اند. در این پژوهش مودهای شکست و مکانیزم خرابی سازه بررسی شده است [۱۵]. یزدانی روش تولید کامپوزیت‌های نانو ساختار آلومینیوم-کاربید بور را بررسی نموده‌اند. این نوع کامپوزیت مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعتگران حوزه‌های نظامی، هسته‌ای، حمل و نقل و رایانه قرار گرفته است [۱۶].

مطالعه منابع فوق‌الذکر جهت انتخاب روش اجزا محدود و در مرحله بعد انتخاب نرم افزار مناسب (آباکوس)، همچنین استفاده از روش اجزا محدود جهت مدل‌سازی پدیده انفجار زیر آب انجام شده است. انتخاب نرم‌افزار آباکوس بر اساس قابلیت این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی پدیده انفجار زیر آب و مطالعه اثر آن بر سازه‌های کامپوزیتی بوده است.

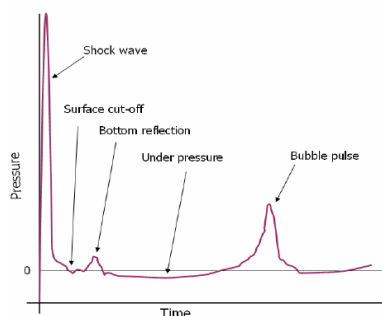
در این مقاله ابتدا روش شبیه‌سازی پدیده انفجار زیر آب در محیط این نرم‌افزار ارائه شده و با استفاده از نتایج تجربی موجود، این روش صحت‌سنجی شده است. سپس اثر بار انفجار زیر آب بر صفحه کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه الگوریتمی ارائه شده است که بوسیله آن می‌توان وزن صفحه کامپوزیتی را در

<sup>1</sup>- Kalavalapally

<sup>2</sup>- Perotti

<sup>3</sup>- Fluid Solid Interaction

<sup>4</sup>- Latourte



شکل ۱- توزیع فشار- زمان در پدیده انفجار زیر آب [۱۶]

### اثر انفجار زیر آب بر سازه

هنگامی که انفجار زیر سطح آزاد آب و در نزدیکی دیواره جامد اتفاق بیفتد، میدان جریان القاء شده در محیط آب به وسیله حباب و توزیع فشار اطراف آن به نحوی است که حباب در طی نوسانات گوناگون شکل کروی خود را از دست داده و قسمتی از محیط حباب که در جهت مخالف دیواره جامد قرار گرفته است به سمت داخل حباب حرکت می کند. این حرکت باعث می شود که یک جت پر سرعت سیال با سرعت تقریبی  $2000 \text{ m/s}$  به طرف درون حباب و به سمت دیواره جامد حرکت کند. برخورد جت پر سرعت سیال باعث تخریب شدید سازه می گردد [۱۹].

### معیار شکست در طراحی مواد کامپوزیت

تعیین محدودیت های طراحی به وسیله یک طراح برای مواد کامپوزیت، مشکل تر از انجام این مسئله برای مواد فلزی می باشد. زیرا معیار گسیختگی کامپوزیت ها پیچیده تر می باشد. این پیچیدگی به واسطه امکان وجود تورق در بعضی قسمت های این مواد و یا به تسلیم رسیدن اجزاء (ماتریس، الیاف) می باشد. در این مقاله از معیار زوال تسای هیل استفاده می شود [۲۰].

### الگوریتم بهینه سازی

امروزه مسئله بهینه سازی یکی از اساسی ترین مسائل مطرح در علوم مهندسی می باشد. در مهندسی مکانیک به دلیل تنوع مسائل رایج در آن و همچنین متعدد بودن

می یابد و فشار داخلی حباب در اثر افزایش حجم کاهش می یابد. انبساط حباب حتی بعد از زمانی که فشار داخل آن به فشار هیدرواستاتیک آب و فشار اتمسفر می رسد (به علت اینرسی) ادامه می یابد و در نتیجه فشار داخل حباب از فشار تعادل اطراف آن کمتر می شود. در اثر کاهش فشار داخل حباب، حرکت سیال اطراف حباب معکوس شده و حجم حباب کاهش و در نتیجه فشار درون آن افزایش می یابد. هنگامی که حباب تا حداقل شعاع فشرده شود، فشار بالا موجب انبساط مجدد آن شده و موج شوک دوم منتشر می گردد. این موج شوک دوم، پالس حباب نامیده می شود [۱۷].

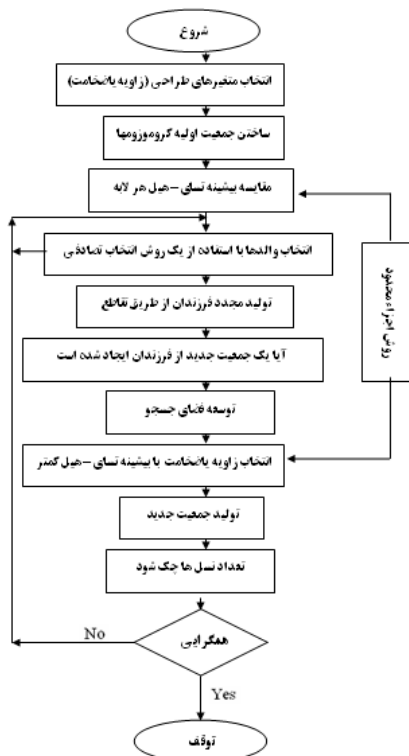
### معادلات تجربی حاکم بر پدیده انفجار زیر آب

پس از وقوع انفجار زیر آب، موج ضربه ای از محل وقوع انفجار منتشر شده و به اطراف گسترش می یابد. در هر نقطه از سیال که موج ضربه ای به آن می رسد، فشار سیال بطور ناگهانی و در زمان کوتاهی (کمتر از  $10^{-7}$  ثانیه) به مقدار بیشینه ( $P_m$ ) افزایش می یابد و سپس با تابعی تقریباً نمایی میرا می شود. فشار دینامیکی ناشی از موج ضربه ای بر حسب زمان با نماد  $P(t)$  نشان داده می شود. رابطه فشار بر حسب زمان معمولاً به شکل رابطه تجربی (۱) بیان می شود، که  $P_m$  و  $\theta$  مطابق روابط (۲) و (۳) داده شده اند. لازم به ذکر است که  $W$  وزن ماده منفجره معادل TNT و  $S$  فاصله هر نقطه از محل انفجار می باشد [۱۸].

$$P(t) = P_m \cdot e^{\left(\frac{-t}{\theta}\right)} \quad (1)$$

$$P_m = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{S}\right)^{1.13} \quad (2)$$

$$\theta = 96.5 \left(W^{1/3}\right) \left(\frac{W^{1/3}}{S}\right)^{-0.22} \quad (3)$$



شکل ۲- تعامل الگوریتم ژنتیک با نرم افزار اجزا محدود

### مدل‌سازی سازه تحت بار انفجار زیر آب صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی پدیده انفجار زیر آب

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار ABAQUS، مشخصات یک سری تست تجربی انجام گرفته به وسیله راماجی تیلگام و همکاران، استخراج شده و در نرم‌افزار مدل‌سازی گردید [۱۳]. در این تست‌ها صفحه‌ی فولادی مستطیلی به ابعاد  $0.25 \times 0.3$  متر و ضخامت ۲ میلی‌متر و با تکیه‌گاه گیردار مطابق شکل (۳) مورد استفاده گرفته و ماده منفجره به وزن ۱۰ تا ۶۰ گرم در فاصله‌ی ۱۵ سانتی‌متری از مرکز صفحه قرار دارد. مشخصات صفحه‌ی فولادی مطابق جدول (۱) می‌باشد. نتایج ۶ تست انجام شده در فاصله ثابت ۱۵ سانتی‌متر و مقدار خرج از ۱۰ تا ۶۰ گرم مطابق جدول (۲) برای تغییر فرم دائمی مرکز صفحه داده شده است.

پارامترهای مسائل، عموماً بهینه‌سازی به عنوان یک نیاز مطرح است. برای یافتن جواب بهینه راه‌حل‌های گوناگونی وجود دارد. برخی از این راه‌حل‌ها که سابقه دیرینه دارند به راحل‌های کلاسیک بهینه‌سازی مشهورند. الگوریتم‌های ژنتیک با الهام از طبیعت و مطالعه عملکرد آن جهت بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده بدست آمده است. این روش با الگو گرفتن از اصل انتخاب طبیعی موجودات زنده، در نظر گرفتن سیستم طبیعی و تکامل ژن‌های آنها جهت انطباق با محیط و تداوم بقا، جستجو را در فضای کاوش از جمعیت نقاط اولیه آغاز می‌نماید. در این روش با بکارگیری عملکردهای ژنتیکی تا رسیدن به نمونه‌های بهتر و احتمالاً بهترین آنها، جستجو ادامه می‌یابد. یکی از مهمترین ویژگی این الگوریتم‌ها امکان پردازش موازی می‌باشد [۲۱].

بهینه‌سازی در این مقاله در دو فاز انجام می‌شود. در فاز نخست زاویه بهینه‌ی الیاف با در نظر گرفتن معیار تسلی-هیل، بدست می‌آید. در فاز دوم وزن سازه بهینه می‌گردد و ضخامت بهینه لایه‌ها بدست می‌آید. بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم ژنتیک، در حالی که نرم‌افزار محاسباتی با نرم‌افزار اجزا محدود در ارتباط می‌باشد، مطابق فلوچارت شکل (۲) انجام می‌پذیرد.

ابتدا آنالیز صفحه‌ی کامپوزیتی به منظور تعیین عملکرد ایمن در برابر بار ناشی از انفجار یک مقدار معین ماده منفجره، انجام می‌شود. با تأیید این فرضیه که صفحه کامپوزیتی عملکرد بهتری می‌تواند داشته باشد، به بهینه‌سازی ساختار آن پرداخته شده است. نتیجه این بهینه‌سازی کاهش وزن سازه به همراه ارضاء قیود مربوط به عملکرد ایمن می‌باشد.

در تمامی مراجع ذکر شده پاسخ انواع گوناگون سازه‌ها، اعم از کامپوزیت و یا فلزی در برابر بار انفجار زیر آب مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا به گونه کلی اهداف این پژوهش را می‌توان به کارگیری نرم‌افزار ABAQUS به کمک ماژول Undex برای آنالیز صفحه‌ی کامپوزیتی در برابر بار انفجار زیر آب و دیگری استفاده از ورودی این آنالیز و تعامل با نرم‌افزار MATLAB به منظور بهینه‌سازی زاویه الیاف و ضخامت لایه‌های صفحه‌ی کامپوزیتی و در نتیجه کاهش وزن آن، دانست.

در نمودار شکل (۵) نتایج تغییر فرم دائمی مرکز صفحه بر حسب مقدار خرج، حاصل از حل عددی و نتایج تجربی با اندازه‌های گوناگون مش نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، نتایج عددی مدل صفحه با تعداد المان ۷۵۰ تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد، حداکثر تفاوت موجود ۱۶٪ می‌باشد. بجز تغییر فرم مرکز صفحه، تغییر فرم در راستای طولی صفحه نیز از حل عددی و تست تجربی مطابق نمودارهای شکل (۶) و (۷) برای وزن خرج‌های ۱۰ و ۲۰ گرم مقایسه شده است.

نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی انطباق خوبی دارند. این مهم نشان می‌دهد روند شبیه‌سازی، ضرایب و پارامترهای بکار رفته مناسب بوده و می‌تواند مبنای شبیه‌سازی صفحه کامپوزیتی قرار گیرد.

### جدول ۱- مشخصات صفحه فولادی [۱۳]

مدول الاستیسیته (E)	$2/1 \times 10^5$	مگاپاسکال
ضریب پواسون	۰/۳	-
چگالی	۷۸۶۰	kg/m <sup>3</sup>
تنش تسلیم	۳۰۰	مگاپاسکال
تنش زوال	۳۸۰	مگاپاسکال

جهت بررسی اثر اندازه مش در تغییر فرم صفحه، مدل‌سازی صفحه با تعداد المان‌های ۳۳۴ و ۷۵۰ و ۳۰۰۰ انجام گردید و در هر مورد تغییر فرم دائمی مرکز صفحه از حل عددی بدست آمده است. در شکل (۴) نمایی از صفحه‌ی تغییر فرم یافته برای وزن خرج ۲۰ گرم حاصل از حل عددی و تست تجربی نشان داده شده است. نتایج مقادیر عددی بدست آمده برای مقادیر گوناگون خرج در جدول (۳) ارائه و با مقدار تجربی مقایسه شده است.

### جدول ۲- نتایج تست تجربی [۱۳]

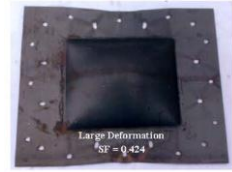
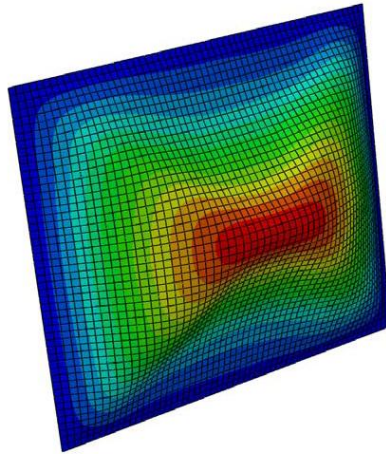
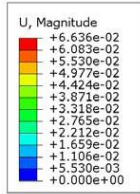
شماره تست	جرم ماده منفجره TNT(W) (گرم)	فاصله Stand off (R) (سانتی متر)	تغییر فرم دائمی مرکز صفحه (سانتی متر)
۱	۱۰	۱۵	۴
۲	۲۰	۱۵	۵/۷۸
۳	۳۰	۱۵	۶/۷۷
۴	۴۰	۱۵	۸/۶۴
۵	۵۰	۱۵	۱۰/۷۸
۶	۶۰	۱۵	۱۲/۵

### جدول ۳- نتایج تست تجربی [۱۳] و حل عددی

شماره تست	جرم ماده منفجره TNT(W) (گرم)	فاصله Standoff (R) (سانتی متر)	تغییر فرم دائمی تجربی (سانتی متر)	تغییر فرم دائمی عددی مرکز صفحه (سانتی متر)
			(سایز مش ۰/۵×۰/۵ cm)	(سایز مش ۱×۱ cm)
۱	۱۰	۱۵	۴	۳/۹۵
۲	۲۰	۱۵	۵/۷۸	۶/۴۷۲
۳	۳۰	۱۵	۶/۷۷	۷/۸۵۹
۴	۴۰	۱۵	۸/۶۴	۸/۷۹۸
۵	۵۰	۱۵	۱۰/۷۸	۱۰/۶۸
۶	۶۰	۱۵	۱۲/۵	۱۲/۷۵



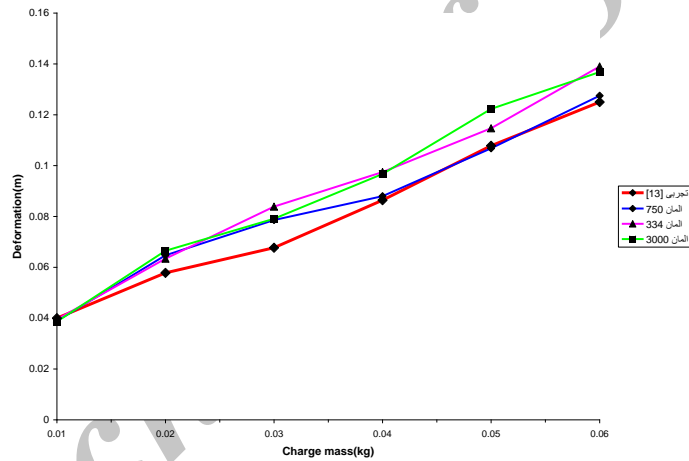
شکل ۳- قاب نگهدارنده صفحه فولادی [۱۳]



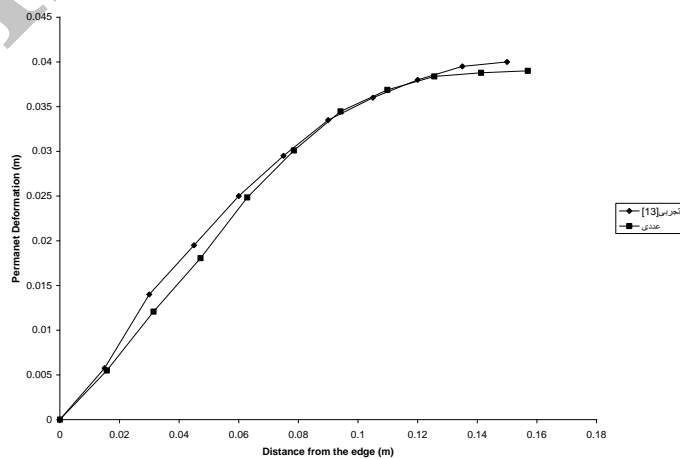
[۱۳]

Index  
 ODB: Platedeformation12346.odb Abaqus/Explicit Version 6.8-1 Fri Oct 23 20:43:56 Iran Standard Time 2009  
 Step: Step-1, Undeformed  
 Increment 13317: Step Time = 1.0000E-02  
 Primary Var: U, Magnitude  
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

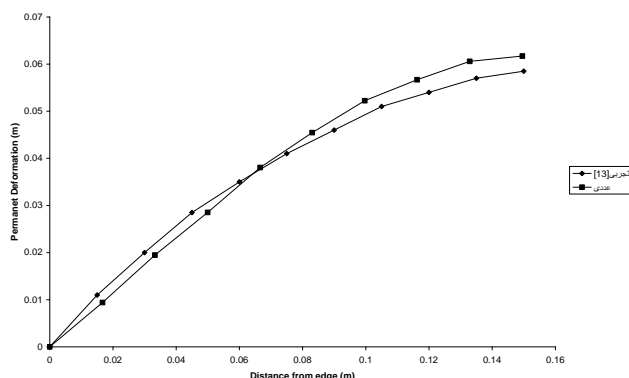
شکل ۴- کانتور تغییر فرم صفحه فولادی و نمونه تست تجربی [۱۳] به ازاء وزن خرج ۲۰ گرم



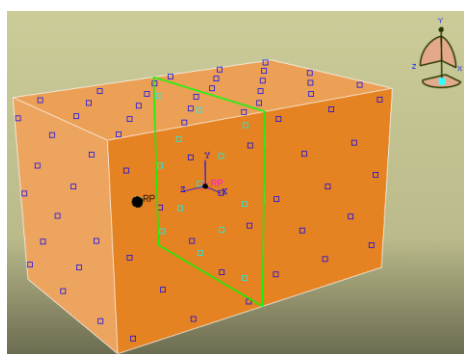
شکل ۵- مقادير تغییر فرم تجربی و عددی بر حسب وزن خرج برای اندازه مش متفاوت



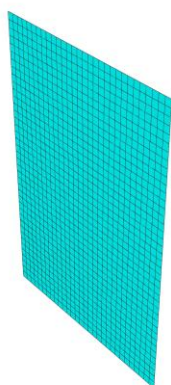
شکل ۶- تغییر فرم بر حسب فاصله‌ی طولی از لبه‌ی صفحه برای ۱۰ گرم TNT



شکل ۷- تغییر فرم بر حسب فاصله ی طولی از لبه ی صفحه برای ۲۰ گرم TNT



شکل ۸- مدل سازی صفحه کامپوزیتی و سیال در محیط نرم افزار



شکل ۹- شبکه بندی صفحه کامپوزیتی (۱۲۰۰ المان)

جدول ۴- مشخصات مادی کربن اپوکسی

مشخصه	کربن اپوکسی
$E_{11}$	۱۳۸Gpa
$E_{22}$	۸/۹۶Gpa
$G_{12}$	۷/۸ Gpa
$\rho$	$\text{kg/m}^3$ ۱۶۰۰
$\nu$	۰/۳

### مدلسازی صفحه و سیال

صفحه کامپوزیتی کربن اپوکسی با ابعاد ۴×۳ متر به ضخامت ۵ سانتی متر، در محیط نرم افزار ABAQUS مطابق روش فوق الذکر مدل می گردد. لازم به ذکر است که درجات آزادی حرکت در سه جهت اصلی ( $U_1, U_2, U_3$ ) برای صفحه بسته شده است. ماده منفجره مورد استفاده از نوع TNT به وزن ۳۰۰ گرم بوده و خرج در فاصله ۲ متری از مرکز صفحه قرار دارد.

پارامترهای لازم در مدل سازی شامل مشخصات مکانیکی کربن اپوکسی و مشخصات لایه های این صفحه به ترتیب در جداول (۴) و (۵) آمده است. نیمه بینهایت بودن سیال را می توان با اعمال شرایط مرزی در سطح خارجی مدل سیال به آن اعمال نمود. نمونه مدل سازی شده صفحه کامپوزیتی و سیال اطراف آن در شکل (۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تمام درجات آزادی لبه های صفحه بسته شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج بدست آمده از نوع شبکه بندی، معیار تسای هیل در تحلیل اولیه در لایه اول مورد مطالعه قرار گرفته و مقایسه نتایج در جدول (۶) آمده است. بر اساس این جدول، نتایج بدست آمده حول نتایج نظیر ۱۲۰۰ المان همگرا شده است. بنابراین این نوع شبکه بندی برای تحلیل های آتی انتخاب شده است. در ادامه نمونه شبکه بندی صفحه کامپوزیتی در شکل (۹) آمده است.



الیاف تشکیل شده است. به دلیل تقارن لایه چینی هر کروموزوم دارای سه ژن می‌باشد. هم‌چنین از سیستم کدگذاری عددی مطابق جدول (۷) استفاده شده است.

کد	۱	۲	۳	۴	۵
زاویه	۰	۴۵	۹۰	۴۵	۰
ضخامت (سانتی متر)	۱	۱	۱	۱	۱

لایه	جنس ماده	ضخامت لایه (متر)	زاویه الیاف
۱	کربن اپوکسی	۰/۰۱	۰
۲	کربن اپوکسی	۰/۰۱	۴۵
۳	کربن اپوکسی	۰/۰۱	۹۰
۴	کربن اپوکسی	۰/۰۱	۴۵
۵	کربن اپوکسی	۰/۰۱	۰

جدول ۶- مقایسه معیار تسای هیل در لایه ۱ با شبکه بندی های مختلف

تعداد المان	۳۰۰	۵۴۰	۱۲۰۰	۱۳۳۰	۱۴۵۲	۲۱۲۰
معیار تسای هیل	۰/۶۲۹۴	۰/۵۴۰۴	۰/۴۱۶۴	۰/۴۰۵۷	۰/۳۶۶۱	۰/۲۶۹۶

مسئله بهینه‌سازی به شکل زیر تعریف می‌گردد:

### الف) تابع هدف

در این مقاله تابع هدف در فاز اول، کمینه کردن ماکزیمم تسای- هیل در لایه‌های گوناگون صفحه و در فاز دوم وزن سازه می‌باشد.

### ب) متغیرهای طراحی

متغیرهای طراحی در فاز اول زاویه الیاف لایه‌ها و در فاز دوم ضخامت لایه‌ها می‌باشد.

### پ) قید

در این مسئله قید به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$\text{Max Tsai-Hill} < 1 \quad (\text{در هر لایه})$$

برای کمینه نمودن وزن بایستی مقدار تابع شایستگی پیشینه شود. در این فاز متغیر طراحی ضخامت لایه‌ها می‌باشد. در صورت نقض قید شکست سازه (مقدار تسای- هیل بزرگتر، مساوی یک) جریمه‌ای متناسب با بزرگی آن در تابع شایستگی اعمال می‌شود. در روند بهینه‌سازی دو معیار توقف در نظر گرفته شده است. الف) تعداد حداکثر نسل‌های تولیدی به ۱۰۰ نسل برسد. ب) تعداد نسل‌های پیاپی بدون تغییر نقطه بهینه به ۴۰ نسل برسد.

در حقیقت هدف، برقراری رابطه بین الگوریتم ژنتیک و تحلیل‌های المان محدود می‌باشد. برای بهینه‌سازی استحکام و وزن صفحه کامپوزیتی در برابر بار ناشی از انفجار زیر آب همانند تمام مسائل بهینه‌سازی باید تابع هدف، متغیرهای طراحی، متغیرهای حالت و قیود مسئله مشخص شوند.

### نتایج

الگوریتم ژنتیک توسعه یافته بعد از ۷۴ نسل با معیار توقف دوم خاتمه یافت. لایه چینی بهینه به صورت

### بهینه‌سازی

پس از تحلیل المان محدود اولیه به‌وسیله نرم افزار ABAQUS، مقادیر تسای- هیل در هر لایه بدست آمده است. به منظور کاهش مقادیر تسای- هیل باید تغییراتی در ساختار سازه انجام شود. بنابراین در فاز اول بهینه‌سازی، زاویه بهینه الیاف در لایه‌های گوناگون بدست آمده است. با توجه به توانایی‌ها و نحوه عملکرد منطق ژنتیک، در این قسمت به چگونگی بهینه کردن زاویه الیاف لایه‌های صفحه به روش الگوریتم ژنتیک پرداخته می‌شود.

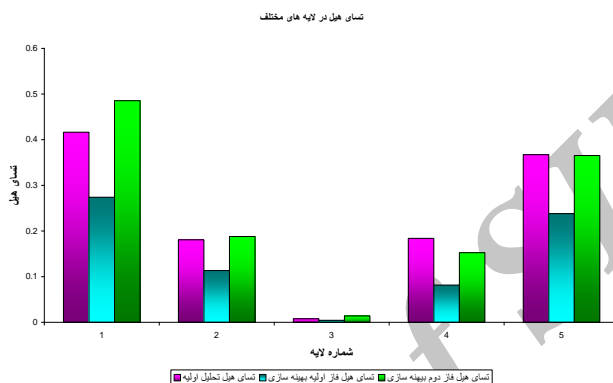
مهمترین موضوعی که باید در بهینه‌سازی مواد مرکب به کمک الگوریتم ژنتیک مد نظر قرار گیرد، مجزا بودن مقادیر متغیرهای طراحی (مجموعه الفابت ژن‌ها) می‌باشد. متغیرهای طراحی، زاویه الیاف و ضخامت آنها هستند و به دلیل ملاحظات ساخت، این متغیرها نمی‌توانند هر مقداری را اختیار نمایند. در این مسئله مجموعه زوایای مجاز  $[0 \text{ و } \pm 30 \text{ و } \pm 45 \text{ و } \pm 60 \text{ و } 90]$  درجه می‌باشد و می‌توان از لایه‌هایی با ضخامت‌های  $[1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10]$  میلی متر استفاده نمود. مدل ابتدایی، یک صفحه پنج لایه با لایه چینی  $[45, 90, 45, 0, 0]$  درجه می‌باشد که هر یک از لایه‌ها ۱۰ میلی متر ضخامت دارند.

### روند بهینه‌سازی

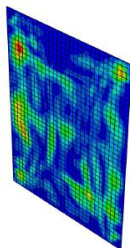
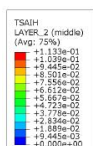
در این مسئله برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک توسعه یافته مواد مرکب، استفاده شده است. در این مسئله هر شخص از دو کروموزوم دربردارنده ضخامت لایه و زاویه

مقایسه‌ای بین ضخامت لایه‌های صفحه کامپوزیتی قبل و بعد از بهینه سازی فاز دوم انجام داده است. هم‌چنین در شکل (۱۳) زاویه الیاف در لایه چینی سازه قبل و بعد از بهینه سازی فاز اول نشان داده شده است. با انجام بهینه‌سازی فوق با کاهش ۳۸٪ وزن، سازه همچنان در برابر نیروی انفجار مقاوم است. نتایج بدست آمده از تحلیل و بهینه‌سازی در جدول (۸) آمده است.

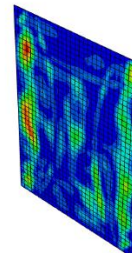
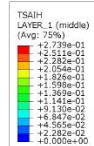
[۰.۲۷۱/۰، ۸۳/۰، ۶/۱۲۱، -، ۷/۵۰۱۳، ۶/۱۲۱] درجه بدست آمد. بنابراین بهینه‌سازی فاز اول انجام شده است. مقادیر تسای-هیل اولیه و مقادیر بهینه در نمودار شکل (۱۰) آمده است. در ادامه کانتور تسای-هیل در لایه-های ۱ تا ۵ بعد از بهینه سازی در شکل (۱۱) آمده است. پس از انجام بهینه‌سازی فاز دوم، ضخامت‌های بهینه بدست آمده به ترتیب در لایه‌های ۱ تا ۵ برابر ۶/۱، ۶/۴، ۶/۱۷، ۶/۳، ۶/۱ میلی‌متر می‌باشد. در نمودار شکل (۱۲)



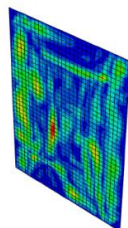
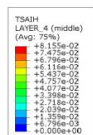
شکل ۱۰- تسای هیل لایه‌های صفحه کامپوزیتی قبل و بعد از بهینه‌سازی فاز اول و دوم



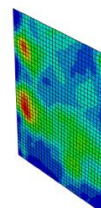
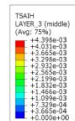
لایه دوم



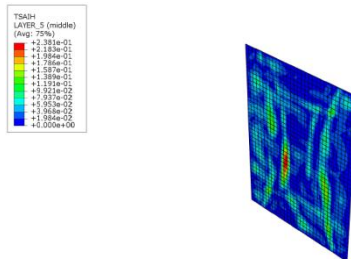
لایه اول



لایه چهارم

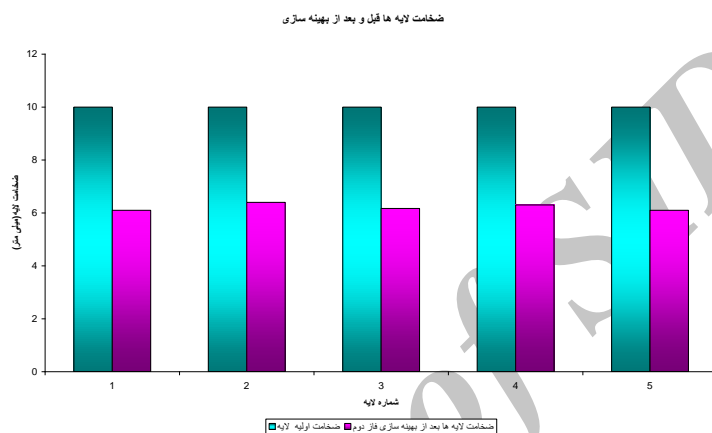


لایه سوم

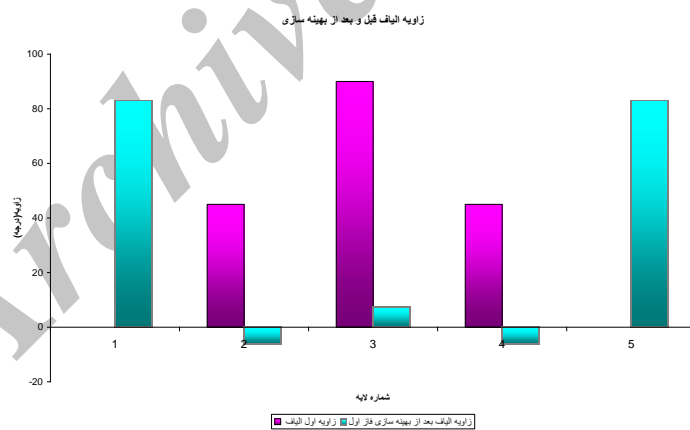


لایه پنجم

شکل ۱۱- کانتور تسای هیل در لایه‌های مختلف بعد از بهینه‌سازی فاز اول



شکل ۱۲- مقایسه بین ضخامت لایه‌های صفحه کامپوزیتی قبل و بعد از بهینه‌سازی



شکل ۱۳- مقایسه بین زاویه الیاف لایه‌های صفحه کامپوزیتی قبل و بعد از بهینه‌سازی

جدول ۸- نتایج تحلیل و بهینه سازی

نتایج	لایه شماره ۱	لایه شماره ۲	لایه شماره ۳	لایه شماره ۴	لایه شماره ۵
تسای هیل لایه‌ها قبل از بهینه سازی فاز اول	۰/۴۱۶۴	۰/۱۸۰۶	۰/۰۰۷۷	۰/۱۸۳۸	۰/۳۶۷۱
زاویه الیاف قبل از بهینه سازی فاز اول	۰	۴۵	۹۰	۴۵	۰
زاویه الیاف بعد از بهینه سازی فاز اول	۸۳/۰۲۷۱	-۶/۱۲۱۰	۷/۵۰۱۳	-۶/۱۲۱۰	۸۳/۰۲۷۱
تسای هیل لایه‌ها بعد از بهینه سازی فاز اول	۰/۲۷۳۹	۰/۱۱۳۳	۰/۰۰۴۳۹۸	۰/۰۸۱۵۵	۰/۲۳۸۱
ضخامت لایه‌ها قبل از بهینه سازی فاز دوم (میلی متر)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
ضخامت لایه بعد از بهینه سازی فاز دوم (میلی متر)	۶/۱	۶/۴	۶/۱۷	۶/۳	۶/۱
تسای هیل لایه‌ها بعد از بهینه سازی فاز دوم	۰/۴۸۵۴	۰/۱۸۷۹	۰/۰۱۳۹۲	۰/۱۵۲۴	۰/۳۶۵۳

### بحث و نتیجه گیری

نظامی و دریایی دارند. از نتایج این مسئله می‌توان برای بهینه‌سازی وزن و استحکام سازه‌های دریایی که در مقابل بار انفجار زیر آب قرار می‌گیرند استفاده نمود. هم‌چنین از روش ارائه شده می‌توان به منظور بهینه‌سازی وزن و استحکام سازه‌های کامپوزیتی تحت بار دینامیکی و یا استاتیکی استفاده کرد.

در این مقاله، به‌منظور بهینه‌سازی سازه کربن اپوکسی تحت بار انفجار زیر آب، تحلیل اثر مقدار خرج بر تغییر فرم صفحه فلزی و اثر به کمک نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید. نتایج حل عددی با نتایج تجربی تطابق خوبی داشته و حداکثر تفاوت ۱۶٪ مشاهده شده است. این مهم نشان می‌دهد روند شبیه‌سازی، ضرایب و پارامترهای بکار رفته مناسب بوده و می‌تواند در شبیه‌سازی و مطالعه رفتار سازه‌هایی که تحت بار انفجار زیر آب قرار می‌گیرند، کاربرد داشته باشد. پس از تعامل دو نرم‌افزار ABAQUS و MATLAB بهینه‌سازی این سازه انجام شد. از مقایسه نتایج نهایی و حل اولیه می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر دادن زاویه الیاف و حتی بدون تغییر ضخامت لایه‌ها می‌توان استحکام سازه را افزایش داد. بر اساس بهینه‌سازی انجام شده، با کاهش ۳۸٪ وزن، سازه همچنان در برابر نیروی انفجار مقاوم است. دلیل افزایش مقدار تسای-هیل نسبت به مقدار اولیه در بهینه‌سازی فاز دوم این است که در این فاز قید مسئله مقدار تسای-هیل کوچکتر مساوی یک است. در صورتی که در فاز اول مقدار تسای-هیل خود تابع هدف می‌باشد. این مهم، مزیت الگوریتم بهینه‌سازی به حساب می‌آید که می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنایع دریایی داشته باشد. در حل و طراحی مسئله، تقارن زوایا در نظر گرفته شده است، این موضوع باعث افزایش استحکام سازه شده است. با توجه به پایین بودن نسبت وزن به استحکام در سازه‌های کامپوزیتی، این سازه‌ها کاربردهای فراوانی در صنایع

### References

- Barta, R. C.; and Hassan, N. M. "Response of fiber reinforced composites to underwater explosive loads."; *Composites Part B*, 2007, 38, 448-468.
- Rajendran, R.; Narasimhan, K. "Deformation and fracture behavior of plate specimens subjected to underwater explosion-a review."; *International Journal of Impact Engineering*, 32, 2006, 1945-1963.
- Turkmen, H. S.; Mecitoglu, Z. "Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load."; *Journal of Sound and Vibration*, 221, 1999, 371-389.
- Brett, J. M. "Numerical Modeling of shock wave and pressure pulse generation by under water explosions."; DSTO-TR-0677, 1998.
- Ahmed, J.; Wong, K.; and Porter, J. "Non-linear dynamic analysis assessment of explosively loaded submarine hull panels."; *Shock Vib Bull*, 1990, 60, 139-170.
- Ramajeyathilagam, K.; Vendhan, C. P.; Bhujanga Rao, V. "Experimental and numerical investigations on deformation of cylindrical shell panels to underwater

- rectangular plates subjected to underwater shock."; International Journal of Impact Engineering, 30, 2004, 699-719.
14. L. E. Perotti; "Modeling the behavior of fiber reinforced sandwich structures subjected to underwater explosion"; PhD, Thesis, California Institute of Technology, 2011.
  15. Félix Latourte. and David Gre´goire. and Dan Zenkert. and Xiaoding Wei.; Horacio D. Espinosa.; "Failure mechanisms in composite panels subjected to underwater impulsive loads "; Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 59, 2011, 1623-1646.
  ۱۶. یزدانی، علی؛ "تولید کامپوزیت‌های نانوساختار آلومینیوم-کاربید بور به روش اتصال تجمعی نورد"، مجله‌ی مواد نوین، جلد ۱، شماره ۳، بهار ۱۳۹۰
  17. Cole, R. H.; "Underwater Explosions."; Princeton University press: Princeton, 1948.
  18. Keil, A. H. "Introduction to underwater explosion research."; UERD, Norfolk Naval ship yard, Portsmouth, Virginia, 1956.
  19. Van Dyke M.; "Album of Fluid Motion", Parabolic Press, Stanford, 1982.
  ۲۰. محسنی شکیب، سید محسن؛ "مکانیک سازه‌های مرکب"، انتشارات دانشگاه امام حسین، چاپ اول، ص ۳۶۷ - ۳۶۹، ۱۳۸۵.
  21. Ggoldberg, D. E.; Samatani, M. P. "Engineering Optimization Via genetic algorithm "; 9th Conference of Electronic computation(ASCE), 1986, 471-482.
  - explosion."; Shock Vib Bull, 8, 2001, 253-270.
  7. Sprague, M. A.; Geers, and T. L. "A spectral-element/finite element analysis of a ship-like structure subjected to an underwater explosion."; Computational Method Applied Mechanics and Engineering, 195, 2006, 2149-2167.
  8. Olson, M. D.; Nurick, G. N.; Fagnan, J. R. "Deformation and rupture of blast loaded square plates-predictions and experiments."; International Journal of Impact Engineering, 13, 1993, 279-291.
  9. Cichocki, k. "Effect of underwater blast loading on Structures with Protective elements."; International Journal of Impact Engineering, 22, 1999, 609-617.
  10. Hamidreza Salimi.; Bahador Saranjam.; Ahmad Hoseini Fard.; Mohsen Ahmadzadeh. "Use of Genetic Algorithms for Optimal Design of Sandwich Panels Subjected to Underwater Shock Loading"; Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 58, 2012, 156-164.
  11. James LeBlanc.; Arun Shukla.; "Dynamic response and damage evolution in composite materials subjected to underwater explosive loading: An experimental and computational study"; Composite Structures, 2010, In press.
  12. Rajesh Kalavalapally; "Multidisciplinary optimization of a lightweight torpedo structure subjected to underwater explosion"; Ms Thesis, B.Tech., Jawaharlal Nehru Technology University, India 2002.
  13. Ramajeyathilagam, K.; Vendhan, C. P. "Deformation and rupture of thin