تعیین نقاط آسیب پذیر اسکله‌های شمع و عرشه در برابر بار انفجار – مطالعه موردی

سید احمد حسینی[۱*]، بهروز نصیری[۲]

[۱] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ hoseini@mut.ac.ir
[۲] کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ bhrooz.bnm@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

کلمات کلیدی:
اسکله شمع و عرشه
انفجار زیر آب
اندرکنش آب – سازه
اندرکنش خاک – سازه
نقاط آسیب‌پذیر

چکیده

بنادر یکی از مهم‌ترین گلوگاه‌های اقتصادی، نظامی و سیاسی برای کشورهای است که از موهبت داشتن مرزهای آبی برخوردارند. از جمله سازه‌های اصلی در بنادر، اسکله‌ها می‌باشند. از اینرو بررسی عملکرد اسکله‌ها در شرایط بحرانی و تهدیدات نظامی و تروریستی دشمن امری ضروری و در راستای سیاست‌های پدافند غیرعامل می‌باشد. در این تحقیق پاسخ و نقاط آسیب پذیر اسکله‌های شمع و عرشه در برابر بار انفجار زیر آب مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، یکی از اسکله‌های شمع و عرشه واقع در جنوب ایران انتخاب شده و یکی از قاب‌های آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس و روش آندکس[۱] آن استفاده شده است. روش استفاده شده برای شبیه‌سازی اسکله شمع و عرشه، ابتدا صحت‌سنجی شده و پس از اطمینان از صحت مدل تاثیر انفجار زیر آب روی رفتار کلی سازه و همچنین تاثیر پارامترهای مختلف روی پاسخ سازه مشخص گردید. بررسی‌ها نشان داد که با آسیب دیدن و حتی از کاربری خارج شدن چند شمع پیرامون منبع انفجار، در اغلب شرایط کل سازه از کاربری خارج نمی‌شود و می‌توان بدون اینکه، سازه از شرایط بهره برداری خارج شود به تعمیر و بهسازی آن پرداخت.

Determine the Vulnerable Points of Pile-Supported Wharves against the Blast Load – Case Study

Seyyed Ahmad Hosseini[1], Behrouz Nasiri[2]

[1] Assistant Professor, Malek-Ashtar University of Technology; hoseini@mut.ac.ir
[2] MSc, Malek-Ashtar University of Technology; bhrooz.bnm@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 5 Oct. 2018
Accepted: 4 May. 2019

Keywords:
pile-supported wharf
underwater explosion
water-structure interaction
soil-structure interaction
the vulnerable points

ABSTRACT

Ports are among the important economic, military and political bottlenecks for countries that have the gift of maritime boundary. One of the main structures in ports is the wharves, which are important for many uses. Thereby, design and performance of wharves under critical conditions and the enemy's military and terrorist threats is indispensable for passive defense. In this research, the responses and the vulnerable points of pile-supported wharves against the underwater blast load are being investigated. For this purpose, one of the pile-supported wharves in south of Iran is selected and one of its frames is studied. For modeling, Abaqus software and its Undex method are used. The method used to simulate the pile-supported wharf was first verified and, after ensuring the validity of the model, the effect of underwater explosion on the overall behavior of the structure and the effect of different parameters on the structure response were determined. Investigations have shown that, with the damage and even the withdrawal of several piles around the source of explosion, in most cases the entire structure does not go out of use, and without being removed from the operating conditions, can be repaired and upgraded it.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

۱ - مقدمه

یک بندر سیستمی متشکل از اسکله‌های پهلوگیری، تجهیزات و امکانات بارگیری و تخلیه بار و سیستم‌های زیربنایی می‌باشد. اگر به هر یک از اجزای کلیدی بندر (اسکله‌ها و...) آسیب جدی وارد آید کاربری بندر به خطر افتاده و خسارت اقتصادی سنگین به بار خواهد آمد. عوامل مختلفی می تواند اجزای مختلف یک بندر را دچار آسیب کرده و موجب عدم بهره دهی بندر شود. عواملی نظیر وقایع انسانی (شامل آتش سوزی، انفجار، حملات نظامی و...) و عوامل مخرب طبیعی (نظیر زلزله، سونامی و ...) از جمله عوامل تهدید کننده یک بندر می‌باشند.

موضوع بررسی رفتار اسکله‌های شمع و عرشه در برابر بار انفجار، به صورت مستقیم مورد بررسی قرار نگرفته است و اغلب مطالعات در این حوزه، شامل سازه‌های دریایی مستغرق در معرض انفجار و بررسی انتشار موج انفجار زیر آب می‌باشد. وانگ و همکارانش به بررسی ویژگی‌های انتشار موج شوک و اثرات حباب انفجار زیر آب در نزدیکی مرزها پرداخته‌اند. آن‌ها از یک روش عددی همراه با ترکیب روش لاگرانژی و اویلری برای شبیه سازی اثر متقابل موج شوک و سازه استفاده نموده‌اند [۱]. همچنین وانگ و همکارانش موج شوک متمرکز در آب در یک مجرای مارپیچی لگاریتمی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. شوک متمرکز در آب پدیده‌ای است که می‌تواند در طول برخورد یک موج شوک تولید شده توسط یک انفجار در زیر آب بر روی هر نوع سازه‌ی دریایی رخ دهد. برای پیش بینی واکنش دینامیکی سازه‌های دریایی، درک دینامیکی موج شوک در طول این رویداد مهم است [۲]. لی و رانگ نیز در سال ۲۰۱۲ با انجام آزمایش و مدل‌سازی عددی پاسخ دینامیکی سازه‌های در معرض بار انفجار زیر آب را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق یک سیلندر آلومینیومی تحت بار انفجار زیر آب مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. هانگ و همکارانش پاسخ دینامیکی سازه‌های سیلندری در معرض بار انفجار زیر آب را تجزیه و تحلیل نموده‌اند. در این تحقیق آزمایشی در درون یک تانک انجام شده است [۴]. جن به بررسی پاسخ تماس محیط آکوستیک[۲] و کاهش آسیب وسیله نقلیه غوطه‌ور تحت انفجار زیر آب پرداخته است [۵]. اوکار و هاکان پاسخ دینامیکی بدنه کشتی در معرض انفجار زیر آب را مورد بررسی قرار داده و از روش آندکس موجود در نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی انفجار زیر آب استفاده کرده‌اند [۶]. ژانگ و همکارانش در یک مطالعه عددی ویژگی‌های انتشار موج شوک ناشی از انفجار در زیر آب و حالت شکست سازه فولادی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۷]. یک مطالعه عددی بر روی امواج ناشی از انفجار زیر آب و اثرات آن بر سازه‌های دریایی نزدیک توسط وانگ و همکارانش انجام شده است. در این تحقیق به امواج ناشی از انفجار در زیر آب پس از تعامل با سازه‌های ثابت و اجسام شناور و به رابطه بین نیروی موج با عمق مدفون مواد منفجره و فاصله افقی بین منبع انفجار و سازه پرداخته شده است [۸]. با توجه به این تحقیقات و دیگر بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که تاکنون پیرامون اسکله‌های شمع و عرشه تحت بار انفجار تحقیق خاصی انجام نشده است و در این مقاله، برای اولین بار به این موضوع پرداخته می‌شود.

۲- مبانی علمی و مدل‌سازی

۲-۱ بتن

جهت پیش بینی رفتار غیرخطی بتن و لحاظ نمودن آثار کاهش مقاومت بتن ناشی از خرابی، از مدل بتن آسیب دیده‌ی خمیری[۳] استفاده شده است. این مدل برای بتن در حالت آسیب دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار خمیری بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل ترک‌های کششی و خردشدگی فشاری می‌باشد [۹].

۲-۲ خاک

مدل دراکر – پراگر[۴] در برگیرنده رفتار غیرخطی بوده و می‌تواند معیار تسلیم برای خاک را بر اساس شکل سطح تسلیم در صفحه تنش - کرنش در نظر بگیرد [۱۰].

۲-۳ فولاد

در این تحقیق برای فولادهای سازه‌ای از قبیل شمع‌ها و تیرها و سایر موارد از مشخصات ایزوتروپیک[۵] فولاد به همراه مدل خرابی جانسون-کوک استفاده شده است. مدل جانسون-کوک[۶] برای فلزهایی که تحت تاثیر نرخ کرنش بالا هستند، مفید می‌باشد. شکست برشی مدل جانسون - کوک بر اساس پارامتر خسارت $\dot{\omega}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\omega} = \sum\left(\Delta\bar{\varepsilon}^{p}/\bar{\varepsilon}_{f}^{p}\right) \qquad (۱)$$

$\Delta\bar{\varepsilon}^{p}$ نمو کرنش خمیری معادل و $\bar{\varepsilon}_{f}^{p}$ برابر کرنش نهایی درمرحله شکست می‌باشد، که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{f}^{p}=\left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right)\right].\left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] .\left(1 - d_5 \hat{\theta}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه p فشار یا تنش میانگین، q تنش ون میسس و d_1 تا d_5 پارامترهای شکست می‌باشند. مقدار $\dot{\omega}$ بیشتر از صفر متناظر با شروع رفتار خمیری مقطع فولادی است و شکست زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار $\dot{\omega}$ بزرگتر از یک باشد [۱۱].

۲-۴- سیال

وقتی مسائلی همچون سازه‌های دریایی تحت اثر انفجار زیر سطح آزاد مطرح است، می‌توان با استفاده از روش‌های اجزا محدود

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

اویلری[۷]و لاگرانژی[۸] به بیان مدل سیستم درگیر پرداخت، که بطور معمول (در مواردی همچون انفجار خارج از محیط سیال، مانند اثرات انفجار بر مخازن) سیال با استفاده از معادله حالت خطی هوگونویت[۹] تعریف می‌شود [۱۲]. با توجه به این که تشکیل این فرمول‌ها و گسسته‌سازی مکانی و زمانی آن‌ها بسیار پیچیده و نیازمند حجم حافظه تحلیلی بسیار بالایی می‌باشد، و همواره بین محققان علاقه کمتری برای استفاده از این فرمولاسیون در انفجار درون سیال با ابعاد بزرگ وجود دارد، در این تحقیق برای محیط آب از سیال آکوستیک استفاده شده است. سیال آکوستیک به ارائه رفتار مایع و گاز تحت عبور یک اغتشاش سریع نظیر امواج شوک و ارتعاش صوتی که با زمان‌هایی در محدوده فرکانس‌های صوتی انتشار می‌یابند، می‌پردازد [۱۳].

۲-۵ انفجار زیر آب

پس از انفجار مواد منفجره در آب، ابتدا یک موج شوک ایجاد می‌شود. موج شوک و فشار آن با حرکت شعاعی آب به سمت بیرون کاهش یافته و در فواصل دور به مقادیر آکوستیک (مقادیر مربوط به انتشار صوت در آب) می‌رسد. پس از موج شوک، حباب از محل انفجار به آب اطراف فشار وارد کرده و به سرعت بزرگ می‌شود. فشار پالس حباب نیز با توجه به فاصله مرکز انفجار از هدف می‌تواند همانند خود موج شوک موجب آسیب شود[۱۴]. در این تحقیق تحلیل شوک حاصل از انفجار زیر آب با استفاده از روش آندکس انجام شده است. روش آندکس برای تحلیل شوک در یک مدل شامل المان‌های محدود آکوستیک، مدل‌سازی اثرات جرم آب و بارگذاری موج برخوردی برای سازه در تعامل با سیال استفاده می‌شود. در این روش تحلیل شوک حاصل از انفجار زیر آب بر اساس روابط تجربی و ثابت‌های کول[۱۰] صورت می‌گیرد [۶]. تاثیر آب پیرامون شمع با افزایش جرم بخش‌های از شمع که درون آب قرار دارد، مدل می‌گردد (ایده جرم افزوده[۱۵]).

۲-۶ اندرکنش‌ها

۲-۶-۱ اندرکنش خاک و سازه

روش‌های متعددی برای حل مسأله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش زیرسازه[۱۱] و روش مستقیم[۱۲] اشاره کرد. در روش زیرسازه، مسأله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، به یک سری زیر مسأله ساده‌تر تفکیک می‌شود. و هر زیر مسأله با مناسب‌ترین روش تحلیل شده و سپس نتایج حاصله با استفاده از اصل جمع آثار قوا، با هم ترکیب می‌شوند. در روش حل مستقیم نیز اندرکنش خاک و سازه به وسیله روش اجزای محدود انجام می‌شود. روش مستقیم اجازه درنظرگرفتن قوانین رفتار غیرخطی خاک را نیز می‌دهد. در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک به ویژه در سطح تماس خاک و سازه مهم می‌باشد [۱۶].

۲-۶-۲ اندرکنش آب و سازه

معمولاً در مسائل انفجار در زیر آب با دو نوع مسائل نزدیک سطح آزاد و نواحی دور از سطح آزاد سر و کار داریم. اهمیت این موضوع به دلیل وجود پدیده‌ای به نام کاویتاسیون می‌باشد. این پدیده که ماهیتی کاملاً غیرخطی دارد، در تحلیل مسائل اندرکنش آب و سازه نقش مهمی را ایفا می‌کند [۱۷].

روش‌های محاسباتی پیشرفته‌ای برای برخورد با امواج انفجار زیر آب در اعماق اقیانوس‌ها (میدان دور از سطح آزاد و بدون حضور کاویتاسیون) ابداع گردیده است. در این روش‌ها سیال به عنوان یک میدان آکوستیک همگن و نامحدود در نظر گرفته شده است، در حالی که سازه و احتمالاً سیال نزدیک به سازه به وسیله روش اجزا محدود و تاثیر میدان سیال به وسیله یکی از روش‌های المان مرزی یا المان نامحدود بیان می‌گردد [۱۷].

روش مدل‌سازی سطح خیس[۱۳] برای مسائل نزدیک سطح آزاد و در معرض کاویتاسیون بکار می‌رود. در این روش اندرکنش بین سیال و سازه تنها بر اساس روش‌های تقریبی سطح خیس سازه در نظر گرفته شده است. معادله حرکت حاکم بر سازه و معادله تقریب مجانبی دوگانه[۱۴] به همراه رابطه سازگاری بین ذرات و سازه برای حل سیستم اندرکنش و پاسخ‌های دینامیکی سازه استفاده می‌گردد [۱۸]. معادله تقریب مجانبی دوگانه از مرتبه اول به صورت رابطه (۳) می‌باشد:

$$M_f\dot{P}_s(t) + \rho c A_f P_s(t) = \rho c M_f \dot{u}_s(t) \qquad (۳)$$

که M_f ماتریس جرم سیال برای سطح خیس از مش سیال (سطح چسبیده به سازه) و $\dot{u}_s(t)$ بردار سرعت ذرات سیال و عمود بر سطح خیس سازه می‌باشد.

۳- تعریف مساله و مدل

اسکله شمع و عرشه مورد نظر یک اسکله موازی ساحل با ترکیب شمع‌های قائم و مایل است. عرشه اسکله به صورت دال بتن مسلح به ضخامت ۳۷,۵ سانتیمتر است، که توسط گروهی از شمع‌های قائم و مایل نگه‌داری می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

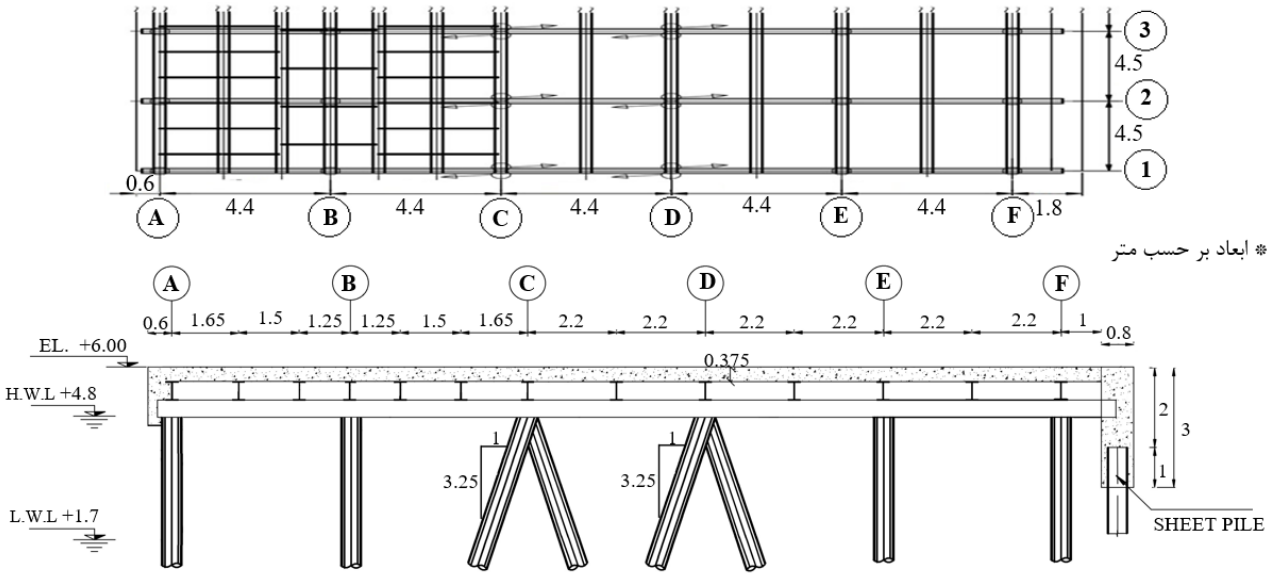
شمع‌ها از جنس فولاد و دارای مقطع دایروی به قطر ۵۰٫۸ سانتیمتر و ضخامت ۹ میلیمتر می‌باشند. جزئیات کامل و نحوه‌ی اتصالات شمع‌های قائم و مایل و چیدمان میلگردهای دال بتنی عرشه در مرجع [۱۹] آمده است. در شکل ۱ پلان سازه فولادی اسکله و مقطع عرضی آن نشان داده شده است.

در این تحقیق با توجه به گستردگی اسکله مورد نظر فقط یک قاب از اسکله با در نظر گرفتن فرضیات منطقی مدل‌سازی شده است. برای این کار حوزه خاکی اسکله از یک جنس در نظر گرفته شده، که با توجه ابعاد قاب اسکله و عمق مدفون شمع‌ها به ترتیب دارای طول، عرض و عمق ۲۶، ۴ و ۲۶ متر می‌باشد. همچنین محیط آب به ترتیب دارای طول، عرض و عمق ۲۶، ۴ و ۴ متر است. عرشه بتن مسلح در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی نیز با توجه به سهم بارگیر هر قاب دارای ابعاد ۲۳٫۶×۴٫۵×۰٫۳۷۵ متر می‌باشد.

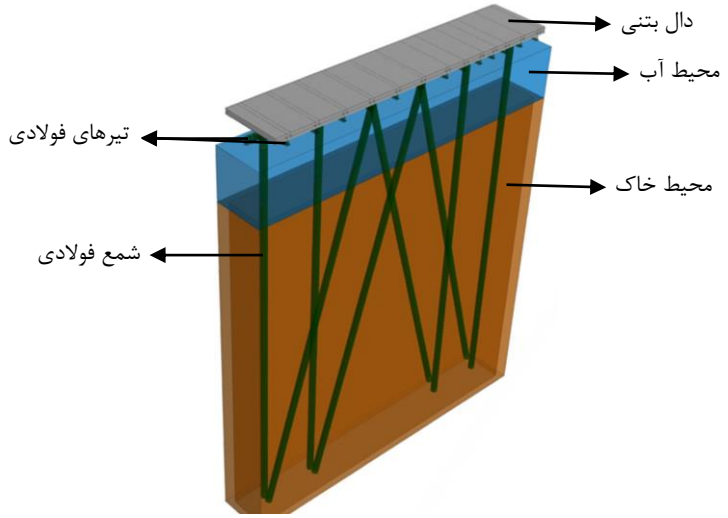
از آن‌جایی که در این تحقیق بررسی انفجار زیر آب مد نظر است، یکی از موقعیت‌های ماده منفجره درون آب با توجه به موادری نظیر جانمایی هندسی، جهت قرارگیری قاب نسبت به ساحل و سایر موارد برای سناریو مبنا انتخاب گردیده است. این موقعیت برای مدل مبنا در عمق ۲ متری از سطح آزاد آب بر روی محور افقی قاب (راستای عمود بر ساحل) و در مرکز فاصله بین دو شمع A و B در نظر گرفته شده است (با توجه به شکل ۱). در جدول ۱ مشخصات ثابت مصالح مدل مبنا ارائه شده است.

جدول ۱ – مشخصات ثابت مدل مبنا شبیه‌سازی شده در این تحقیق

فولاد	بتن	خاک	عمق آب	عمق خاک
St52,37	۲۵ مگاپاسگال	ماسه متراکم	۴ متر	۲۶ متر



شکل ۱ – پلان سازه فولادی اسکله و مقطع عرضی آن [۱۹]



شکل ۲ – نمایی از مدل‌سازی اسکله مورد مطالعه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

۳-۱ مدل‌سازی در نرم‌افزار

برای مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. اولین گام در انجام یک مدل‌سازی ایجاد مدل برای قطعه و جزء مورد نظر است. در مدل مد نظر با توجه به بخش ۲ برای تعریف مصالح آب، خاک، بتن و فولاد به ترتیب از مدل‌های آکوستیک، دراکر - پراگر، بتن آسیب دیده‌ی خمیری و ایزوتروپیک فولاد به همراه خرابی جانسون – کوک استفاده شده است.

در مدل مبنا از بتن با مقاومت فشاری ۲۵ MPa، ماسه متراکم با چگالی ۱۸۱۰ Kg/m^3 و مدول الاستیسیته ۱۲۴ MPa با ضریب اصطکاک داخلی ۴۲ درجه و فولاد با مقاومت نهایی ۳۷۰ MPa برای اعضای فرعی (اتصالات و ...) و ۵۲۰ MPa برای اعضای اصلی (شمع‌ها و تیرها) استفاده شده است. سایر مشخصات مصالح مورد استفاده در مرجع [۱۹] بطور کامل بیان شده است.

همانطور که در بخش ۲-۵ اشاره گردید، تحلیل شوک حاصل از انفجار زیر آب با استفاده از مدل موج برخوردی آندکس انجام می‌شود، برای این کار نیاز به خواص آب، خواص ماده منفجره تی‌ان‌تی، عمق ماده منفجره، وزن ماده منفجره، راستای بردار نرمال سطح آزاد آب، فشار محیط، شتاب گرانش و سایر پارامترهای ثابت مرتبط با تحلیل می‌باشد. این مشخصات در مرجع [۶] ارائه شده است.

برای رفتار نرمال اندرکنش خاک و سازه، از گزینه Hard Contact استفاده شده است. این نوع تماس، از نفوذ دو سطح در یکدیگر جلوگیری می‌کند. همچنین اجازه جدا شدن سطوح تماس بین خاک و سازه در حین تحلیل داده می‌شود. برای رفتار مماسی اندرکنش خاک و سازه از روش پنالتی استفاده و ضریب اصطکاک با توجه به جنس آن‌ها تعیین شده است.

اتصال سازه با محیط آکوستیک بین مش آب و مش سازه در سطح مشترک مرطوب با استفاده از قید TIE تعریف شده است. و بار ناشی از انفجار زیر آب در سطح مشترک سازه و آب اعمال می‌گردد. برای تعریف سطح آزاد، فشار آکوستیک سطح آب برابر صفر تعریف شده و سطوح مرزی محیط آکوستیک بصورت غیر انعکاسی در نظر گرفته شده است.

برای دال بتنی اندازه مش بصورت یکنواخت و نوع آن سالید[۱۵]، سه بعدی و هشت گره‌ای مکعبی با نقطه انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) انتخاب شده و به میلگردهای دال بتنی نیز مش یکنواخت و نوع تراس[۱۶]، سه بعدی و دو گره‌ای (T3D2) اختصاص داده شده است. برای مدل قاب فولادی نوع المان‌های پوسته‌ای[۱۷] و چهار گره‌ای مربعی (S4R) اعمال شده و المان‌های خاک نیز با توجه به پیچیدگی هندسی محیط خاک به علت حضور شمع‌های مایل از نوع سالید، سه بعدی و چهار گره‌ای هرمی (C3D4) تعیین شده است. برای جلوگیری از بازگشت امواج ناشی از انفجار درون محیط خاک از مرز جاذب استفاده شده، که نوع اجزای مرز جاذب المان بی‌نهایت، سه بعدی و هشت گره‌ای (CIN3D8) می‌باشد. در نهایت محیط آکوستیک آب مش‌بندی و نوع آن المان آکوستیک، سه بعدی و چهار گره‌ای هرمی (AC3D4) انتخاب شده است. در این مدل تحلیل به روش دینامیکی صریح انجام شده است. در شکل ۲ نمایی از مدل‌سازی اسکله نشان داده شده است.

۳-۲ صحت سنجی و تحلیل حساسیت مدل عددی

به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی و عددی مربوط به یک اسکله شمع و عرشه تحت بار انفجار، برای اطمینان از نتایج مدل عددی این تحقیق، پارامترهای تاثیر گذار بر مدل تحت انفجار زیر آب از جمله انتشار موج انفجار، اندرکنش سیال با سازه و اندرکنش خاک با سازه در مدل‌های جداگانه مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفته است. همچنین چند مورد از حساسیت‌های مدل عددی شامل عملکرد مرزهای جاذب، مرزهای غیر انعکاسی، سطح آزاد آب، سطح بستر خاک و ابعاد شبکه‌بندی مدل تحلیل و ارزیابی شده است.

۳-۲-۱ صحت سنجی انفجار زیر آب در میدان آزاد با روابط تجربی

بمنظور اطمینان از نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انفجار زیر آب در میدان آزاد از روابط آیین‌نامه‌ای و کار تحقیقاتی ژانگ و وانگ [۲۰] استفاده شده است. یکی از روابط تجربی تاریخچه فشار موج شوک ناشی از انفجار زیر آب در هر نقطه، رابطه نمایی کول (۴) می‌باشد.

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \qquad (۴)$$

P_m فشار ماکزیمم و θ ثابت میرایی موج شوک بسته به مقدار و فاصله قرارگیری ماده منفجره، بصورت زیر است:

$$P_m = k_1\left(W^{1/3}/R\right)^{\alpha_1} \qquad (۵)$$

$$\theta = k_2\left(W^{1/3}\right)\left(W^{1/3}/R\right)^{\alpha_2} \qquad (۶)$$

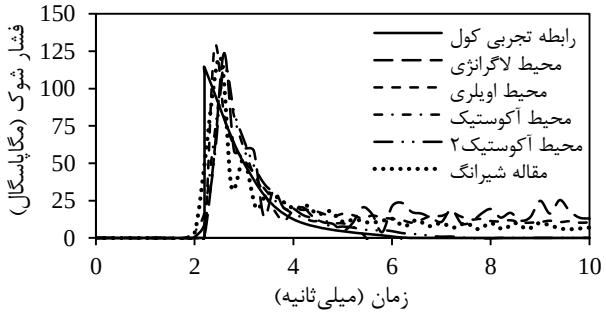
که P_m برحسب مگاپاسگال، θ برحسب میکروثانیه، W برحسب کیلوگرم و R برحسب متر می‌باشد. و ثابت‌های k_1، k_2، α_1 و α_2 وابسته به نوع ماده منفجره می‌باشند. برای ماده منفجره TNT پارامترهای ثابت فوق به ترتیب برابر ۵۲,۱۶، ۹۶,۵، ۱,۱۳ و ۰,۲۲- می‌باشد.

این مسئله در نرم افزار آباکوس به سه روش اویلری، لاگرانژی و آندکس مدل‌سازی شده است. جزئیات در مرجع [۲۰] آمده است. روش آندکس در دو محیط آکوستیک انجام شده است، که در یکی ماده منفجره درون محیط آکوستیک و در دیگری خارج از محیط آکوستیک قرار دارد. مقایسه تاریخچه زمانی فشار بدست آمده از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در این تحقیق، رابطه تجربی و مقاله شیرانگ در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور مشاهده می‌شود نتایج حاصل تطابق قابل قبولی دارند.



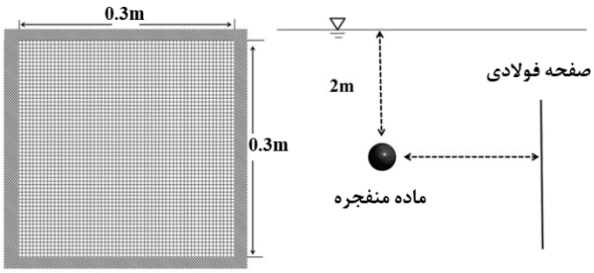
شکل ۳ - مقایسه تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار زیر آب در میدان آزاد برای رابطه تجربی، مقاله و شبیه‌سازی‌های این تحقیق

۳-۲-۲ صحت سنجی اندرکنش سازه با سیال در انفجار زیر آب

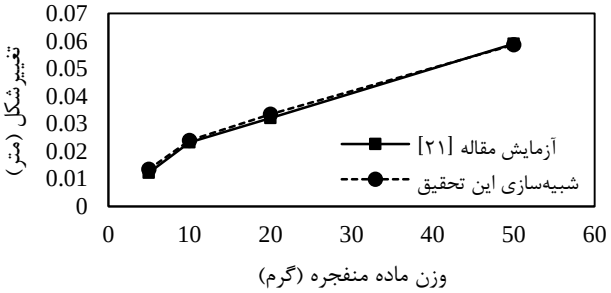
در همه مسئله‌های ارائه شده در این بخش از تحقیق برای مدل‌سازی انفجار زیر آب از روش آندکس استفاده شده است.

۳-۲-۲ -۱ صحت سنجی صفحه فولادی تحت انفجار زیر آب با داده‌های آزمایشگاهی

در این مورد برای ارزیابی پاسخ شبیه‌سازی صفحه فولادی تحت انفجار زیر آب، شرایط مدل‌سازی نزدیک به همان شرایط آزمایش ذکر شده در مقاله مرجع [۲۱] می‌باشد. جزئیات در مرجع ارائه شده است. در شکل ۴ پلان شماتیک مدل نشان داده شده است. تغییرشکل مرکز صفحه در معرض انفجار زیر آب برای مقایسه نتایج آزمایش مقاله مرجع [۲۱] و شبیه‌سازی این تحقیق در شکل ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی بین نتایج آزمایش مقاله و مدل‌سازی وجود دارد.



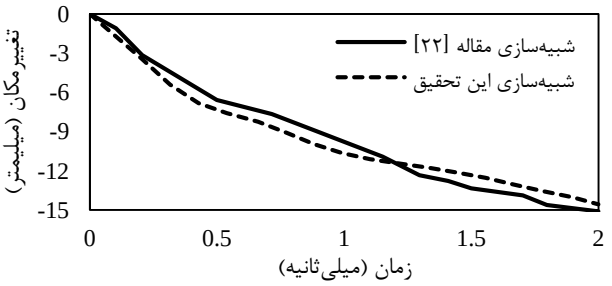
شکل ۴ – پلان شماتیک صفحه فولادی تحت انفجار [۲۱]



شکل ۵ - مقایسه تغییرشکل مرکز صفحه در آزمایش مرجع [۲۱] و شبیه‌سازی این تحقیق

۳-۲-۲-۲ صحت سنجی لوله فولادی تحت انفجار زیر آب

در این قسمت یک لوله که می‌تواند بخشی از پایه یک سازه دریایی باشد، تحت اثر انفجار زیر آب مدل‌سازی شده و با نتایج مقاله محمدی و شاه محمدی مقایسه شده است. جزئیات مسئله در مرجع [۲۲] آمده است. در شکل ۶ تغییر مکان مرکز لوله در شبیه‌سازی مقاله مورد بررسی و این تحقیق مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی میان نتایج شبیه‌سازی‌ها وجود دارد.

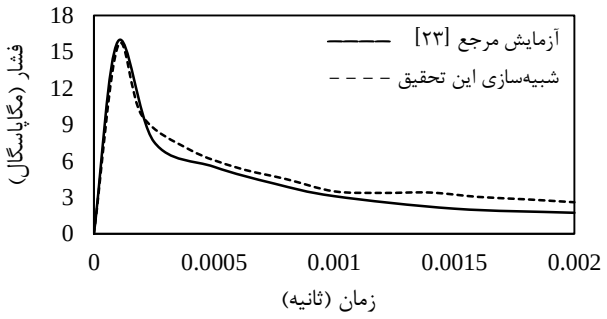


شکل ۶ - مقایسه تغییر مکان مرکز لوله تحت انفجار زیر آب در شبیه‌سازی مقاله [۲۲] و شبیه‌سازی این تحقیق

۳-۲-۲-۳ صحت سنجی سیلندر در معرض انفجار زیر آب

در این بخش نیز یک سیلندر تحت اثر انفجار زیر آب مدل‌سازی و با نتایج مقاله ناو و فاکس مقایسه شده است. جزئیات در مرجع [۲۳] آمده است. در شکل ۷ فشار شوک حاصل از انفجار زیر آب برگرفته از آزمایش مورد بررسی مرجع [۲۳] و شبیه‌سازی این تحقیق مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بین این نتایج نیز تطابق قابل قبولی وجود دارد.

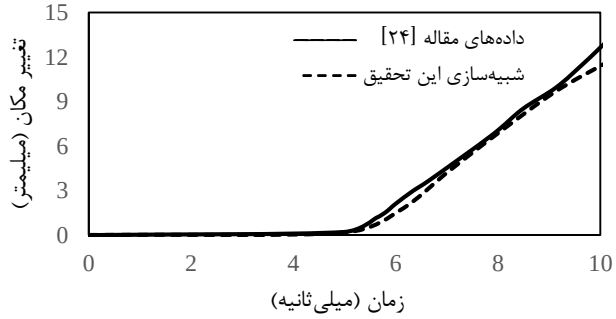
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]



شکل ۷ - مقایسه فشار شوک حاصل از انفجار زیر آب در آزمایش مرجع [۲۳] و شبیه‌سازی این تحقیق

۳-۲-۳ صحت سنجی اندرکنش خاک با سازه تحت بار انفجار

برای صحت سنجی اندرکنش خاک با سازه تحت بار انفجار از مقاله تجزیه و تحلیل شمع فولادی توخالی در معرض بارگذاری انفجار مدفون استفاده شده است. جزئیات کامل مسئله در مرجع [۲۴] آمده است. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های ارائه شده در مقاله تا حد قابل قبولی می‌توان صحت مدل‌سازی را تایید نمود. در شکل ۸ مقایسه تغییر مکان جانبی سر شمع بر حسب زمان بدست آمده از شبیه‌سازی این تحقیق و داده‌های مقاله نشان داده شده است.



شکل ۸ - مقایسه تغییر مکان جانبی سر شمع در داده‌های مقاله [۲۴] و شبیه‌سازی این تحقیق

۳-۲-۴ عملکرد مرزهای جاذب و غیرانعکاسی

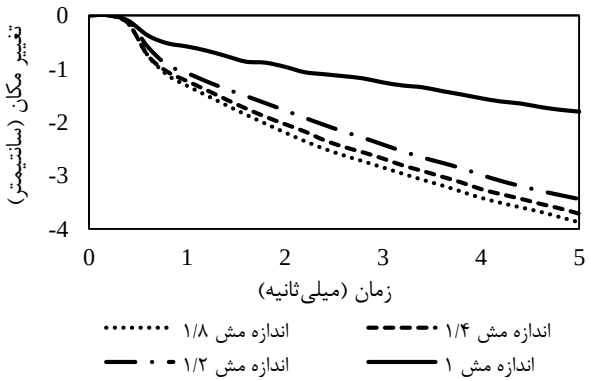
برای اطمینان از کارکرد مناسب مرز جاذب انرژی محیط خاک و مرز غیرانعکاسی محیط آب دو مدل با این نوع از مرزها تحت بار انفجار زیر آب شبیه‌سازی گردید. با رسم نمودار فشار - زمان در فاصله نزدیک به مرز دو حوزه خاکی و آبی با وجود مرزهای جاذب و غیرانعکاسی بدلیل جذب امواج و عدم بازگشت آن‌ها، هیچ گونه انعکاس قابل توجه‌ای در مقدار فشار مشاهده نگردید [۱۹]. بنابراین، هر دو مرز در شبیه‌سازی‌های انجام شده عملکرد قابل قبولی داشته‌اند.

۳-۲-۵ رفتار سطح آزاد آب و سطح بستر خاک

بمنظور اطمینان از عملکرد مناسب سطح آزاد آب و سطح بستر خاک از نظر بازتاب موج انفجار زیر آب از این سطوح، دو مدل دارای این شرایط شبیه‌سازی گردید. بازتاب موج انفجار بر اساس قوانین انعکاس محاسبه شده است [۱۴]. نتایج حاصل از روابط انعکاس و شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق برای سطح آزاد آب به ترتیب برابر ۱۸,۱- و ۱۶,۵- مگاپاسگال، و همچنین برای سطح بستر خاک به ترتیب برابر ۷۲,۳- و ۶۶,۵- مگاپاسگال بدست آمده است. بنابراین، هر دو سطح در شبیه‌سازی‌های انجام شده عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده‌اند.

۳-۲-۶ حساسیت سنجی ابعاد شبکه مدل

برای تعیین حساسیت ابعاد شبکه مدل با توجه به وجود اجزای مختلف در مدل‌سازی، ابتدا اندازه شبکه‌بندی نمونه اولیه محیط آب و سازه فولادی هر یک بطور جداگانه بررسی شده و سپس اندازه شبکه کل نمونه مدل‌سازی با تناسبی ثابت تغییر داده شده است. به عبارتی اندازه شبکه اولیه کل نمونه مدل‌سازی به ترتیب با نسبت ۰,۵، ۰,۲۵ و ۰,۱۲۵ کاهش داده شده است. در شکل ۹ نتایج تغییر مکان نزدیک‌ترین نقطه از شمع به مرکز انفجار برای اندازه‌های مختلف شبکه مقایسه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و همگرایی آن‌ها در اندازه شبکه ۱/۴ (کاهش اندازه شبکه اولیه به نسبت ۰,۲۵)، اندازه شبکه ۱/۴ برای شبکه‌بندی نهایی انتخاب شده است.



شکل ۹ - مقایسه تاثیر تغییر اندازه شبکه کل نمونه مدل‌سازی بر تغییر مکان نزدیک‌ترین نقطه از شمع به مرکز انفجار (کاهش اندازه شبکه به نسبت‌های ۰,۵، ۰,۲۵ و ۰,۱۲۵)

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

پارامترهای ثابت مدل مبنا و تغییرات این پارامترها جهت بررسی تاثیر آن‌ها در نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به ترتیب در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین به منظور تعیین زمان حداکثر تغییرات در پاسخ‌های سازه، تجزیه و تحلیل کلی سازه و بررسی رفتار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

پس از خرابی یک شبیه‌سازی با زمان تحلیل بالا از مدل مبنا انجام شده است.

جدول ۲ - پارامترهای ثابت مدل مبنا در شبیه‌سازی‌ها

وزن ماده منفجره	۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم
ضخامت شمع*	۲۰ میلیمتر
نوع خاک	ماسه متراکم
مقاومت بتن	۲۵ مگاپاسگال
مقاومت نهایی شمع	۵۲۰ مگاپاسگال
تزریق بتن در شمع	بدون تزریق بتن
شرایط اتصال شمع	گیردار
عمق ماده منفجره	۲ متری از سطح آزاد آب
تراز سطح آب	۴ متری از سطح بستر خاک

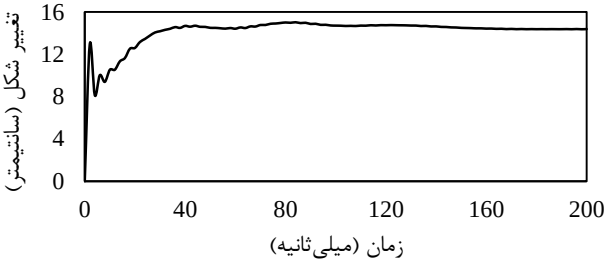
* تعیین شده بر اساس بخش ۴-۲ (تاثیر ضخامت شمع)

جدول ۳ - تغییرات پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی‌ها

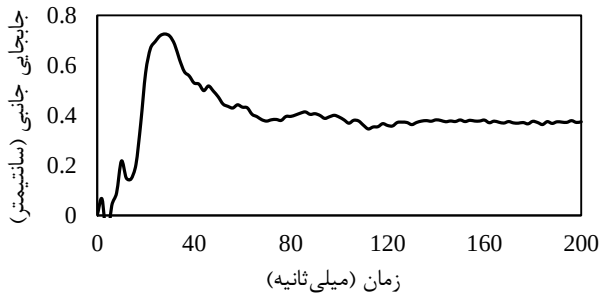
وزن ماده منفجره (کیلوگرم):	۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰
ضخامت شمع (میلیمتر):	۹، ۱۴، ۲۰، ۲۵ و ۳۰
نوع خاک: ماسه متراکم، ماسه متوسط، ماسه سست و ماسه رس‌دار	
مقاومت بتن (مگاپاسگال):	۲۵، ۳۵ و ۴۸
مقاومت نهایی شمع (مگاپاسگال):	۳۷۰، ۵۲۰ و ۶۸۵
تزریق بتن در شمع:	بدون تزریق بتن و با تزریق بتن
شرایط اتصال شمع:	گیردار و مفصلی

۴-۱ رفتار کلی سازه

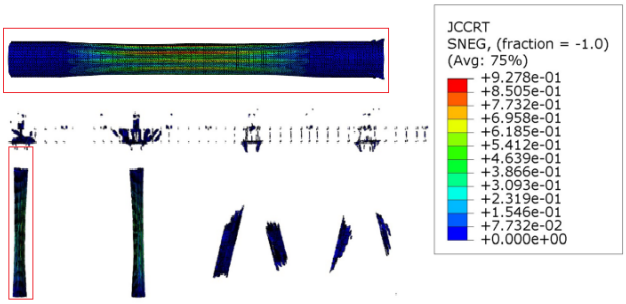
برای این کار مدل مبنا با زمان تحلیل ۲۰۰ میلی‌ثانیه به منظور تجزیه و تحلیل رفتار کلی سازه و بررسی رفتار پس از خرابی شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی از ماده منفجره TNT به وزن ۳۰۰ کیلوگرم استفاده شده است و سایر جزئیات مطابق مدل مبنا ذکر شده در جدول ۳ می‌باشد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ به ترتیب تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی شمع، جابجایی جانبی عرشه قاب فولادی و طیف آسیب به همراه نمایی از بخش‌های آسیب دیده قاب فولادی نشان داده شده است. در شکل ۱۲ مقدار آسیب متناظر با مقدار پارامتر خسارت ω جانسون – کوک ارائه شده در بخش ۲-۳ می‌باشد. در این شکل، جهت تمرکز روی نقاط با امکان آسیب‌پذیری بالا، فقط آسیب‌های بالای ۱ درصد آسیب نهایی نشان داده شده است. قابل ذکر است که معیار ۱ درصد، یک شاخص از رفتار سازه‌ای نمی‌باشد و صرفا جهت احتراز از نقاط غیر حساس از آن استفاده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی در یک جمع‌بندی کلی می‌توان آسیب رخ داده در اعضای مختلف اسکله شمع و عرشه را بصورت جدول ۴ خلاصه نمود.



شکل ۱۰ - تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی شمع



شکل ۱۱ - جابجایی جانبی عرشه قاب فولادی



شکل ۱۲ – طیف آسیب و نمایی از بخش‌های بیش از مقدار ۰٫۰۱ آسیب دیده قاب فولادی با توجه به معیار خرابی جانسون – کوک (قسمت‌های نشان داده نشده بیانگر آسیب کمتر از مقدار ۰٫۰۱ می‌باشد)

جدول ۴ - جمع بندی آسیب رخ داده در اعضای اسکله مورد مطالعه

شمع‌ها	آسیب موضعی شدید شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار
	ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار در شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار
	احتمال ایجاد مفصل پلاستیک و گسیختگی در محل اتصال شمع به عرشه
	خیز شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار در داخل خاک بستر
	عدم ایجاد تغییر شکل ماندگار و آ سیب جدی در شمع‌های دور از مرکز انفجار
قاب فولادی اسکله	جابجایی جانبی غیر قابل ملاحظه قاب اسکله به دلیل صلبیت زیاد
	جابجایی قائم محدود قاب اسکله در نزدیکی مرکز انفجار
عرشه بتنی	آسیب شدید عرشه بتنی در بالای شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار بر اثر تنش‌های خمشی
	جداشدگی و انقطاع عرشه در اثر برش یا کشش
	کنده شدن بتن بالای شمع (کنده شدن بتن زیرین عرشه)
	ترک خوردگی و گسیختگی فشاری و کششی عرشه بتنی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

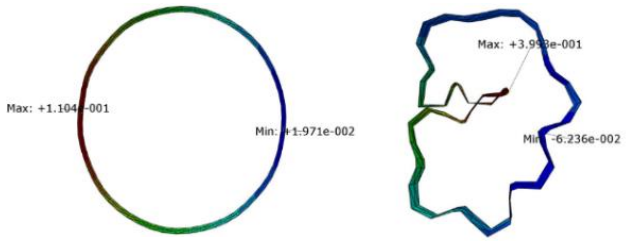
۴-۲ تاثیر ضخامت شمع

به منظور بررسی تاثیر ضخامت شمع، مدل‌سازی قاب اسکله شمع و عرشه مورد نظر برای چهار ضخامت شامل ضخامت نقشه اجرایی، ضخامت لازم برای کنترل کمانش موضعی لرزه‌ای اعضا با شکل‌پذیری متوسط، ضخامت لازم برای کنترل کمانش موضعی انفجاری و ضخامت‌های بیشتر از آن، یعنی مطابق جدول ۳ بر اساس ضخامت‌های ۹، ۱۴، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلیمتر صورت می‌گیرد. در این مدل‌ها وزن ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم و باقی شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان حداقل ضخامت اجرایی لازم برای آن که مقطع شمع فشرده و غیرلاغر باشد و همچنین نسبت پهنا به ضخامت از مقادیر مجاز برای کمانش لرزه‌ای اعضا با شکل‌پذیری متوسط تجاوز نکند، برابر ۱۴ میلیمتر در نظر گرفته شده است. (نسبت پهنا به ضخامت برای مقطع دایره‌ای توخالی شکل نباید از مقدار $\frac{E}{F_y}$ ۰٫۰۷ تجاوز نماید، که برای قطر ۰٫۵۰۸ متری شمع مدل مبنا این مقدار ۳۸٫۸ بدست آمده و ضخامت برابر ۱۳٫۱ میلیمتر می‌باشد).

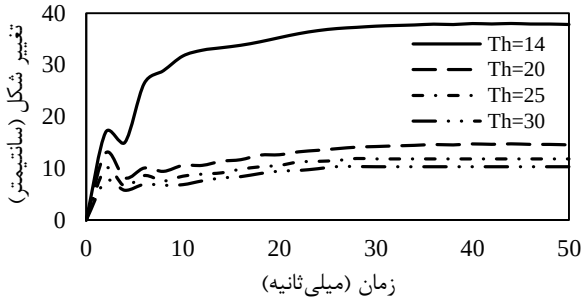
از طرفی مطابق آیین‌نامه UFC 3-340-02 [۲۵] نسبت عرض به ضخامت مقاطع فشرده جعبه‌ای و ورق‌های پوششی نباید از مقادیر معین $190/(f_y)^{1/2}$ بیشتر باشد (لازم به ذکر است که آیین‌نامه مذکور، برای مقاطع دایروی توخالی معیاری نداده است و در این تحقیق، از معیار قوطی برای مقاطع دایروی توخالی استفاده شده است). بنابراین حداقل ضخامت لازم برای آن که کنترل کمانش موضعی انفجاری جوابگو باشد، برابر ۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. (برای قطر ۰٫۵۰۸ متری شمع مدل مبنا مقدار $190/(f_y)^{1/2}$ بر اساس واحد ksi در حدود ۲۶٫۳ بدست آمده و ضخامت برابر ۰٫۷۶ اینچ یا ۱۹٫۳ میلیمتر می‌باشد).

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مدل‌های تغییر شکل حداکثر مقطع نزدیک‌ترین شمع به مرکز انفجار و نمودار تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی شمع برای ضخامت‌های مختلف شمع نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی داریم:

- در مدل ضخامت ۹ میلیمتر با توجه به غیرفشرده بودن مقطع شمع و بار اعمالی، شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار در زمان‌های اولیه تحلیل دچار کمانش پیچیشی و آسیب شدید می‌شوند. بنابراین نتایج حاصل از این مدل با سایر مدل‌ها تناسب مناسبی ندارد.
- با افزایش ضخامت شمع تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی مقطع شمع کاهش می‌یابد. اختلاف این کاهش با افزایش ضخامت از ۱۴ به ۲۰ میلیمتر بیشتر و حدود ۶۰٪ درصد می‌باشد، در ادامه با افزایش ضخامت از ۲۰ به ۳۰ این تغییر شکل به ترتیب ۲۳٪ و ۱۵٪ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳ - مدل‌های تغییر شکل حداکثر مقطع نزدیک‌ترین شمع به مرکز انفجار در ضخامت ۳۰ و ۱۴ میلیمتر



شکل ۱۴ – مقایسه نمودار تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی شمع برای ضخامت‌های مختلف شمع (Th = ضخامت)

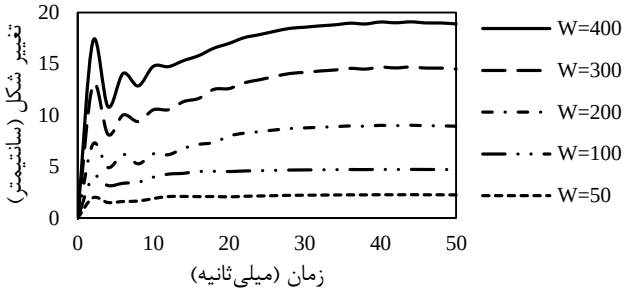
- درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی با افزایش ضخامت شمع از ۱۴ به ۳۰ در مجموع حدود ۱۵٪ درصد کاهش می‌یابد. این نتیجه برگرفته از اشکالی نظیر شکل ۱۲ برای ضخامت‌های مختلف می‌باشد، که در هر شکل درصد المان‌هایی با مقدار آسیب جانسون – کوک بیش از ۱ درصد نسبت به کل المان‌های قاب فولادی تعیین و در مجموع این درصدها مقایسه شده‌اند. این روند به دلیل آسیب شمع‌ها و اتصال‌های نزدیک به مرکز انفجار ناشی از بار ضربه‌ای بالا و آسیب موضعی حاصل از آن است.
- درصد آسیب کششی کل دال بتنی با افزایش ضخامت شمع از ۱۴ به ۳۰ در مجموع حدود ۵٪ درصد کاهش می‌یابد. این نتیجه نیز نظیر درصد آسیب قاب فولادی بر اساس درصد المان‌هایی با مقدار آسیب کششی بیش از ۹۰ درصد نسبت به کل المان‌های دال تخمین زده شده است.
- در مجموع با بررسی تاثیر ضخامت شمع بر پاسخ‌های سازه می‌توان دریافت که فشرده بودن مقطع شمع‌ها از نظر انفجاری تاثیر قابل توجه‌ای بر پاسخ‌های محلی سازه دارد. به عبارتی مدل مورد مطالعه با ضخامت ۹ میلیمتر (ضخامت نقشه اجرایی) در برابر بار انفجار ضعیف بوده و بهتر است کنترل کمانش موضعی انفجاری برای این گونه سازه‌ها در نظر گرفته شود.

۴-۳ تاثیر وزن ماده منفجره

برای بررسی اثر وزن ماده منفجره، مطابق جدول ۳ مقدار وزن ماده منفجره ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

است، و سایر شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. در شکل ۱۵ نمودار تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی شمع در وزن‌های مختلف ماده منفجره مقایسه شده است.



شکل ۱۵ – مقایسه نمودار تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی شمع در وزن‌های مختلف ماده منفجره (وزن ماده منفجره = W)

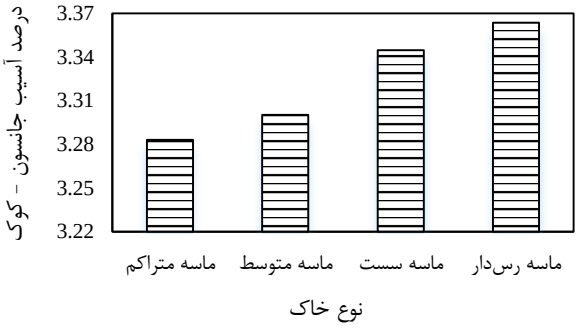
با توجه به نتایج شبیه‌سازی با افزایش وزن ماده منفجره داریم:

- همانطور که انتظار می‌رفت نزدیک‌ترین شمع‌ها به مرکز انفجار دچار آسیب موضعی بیشتری می‌شوند. بنابراین آسیب به دلیل موضعی بودن آن در نقاط دور از مرکز انفجار افزایش قابل توجه‌ای نمی‌یابد. نسبت افزایش آسیب موضعی در تغییر وزن ماده منفجره از ۵۰ به ۴۰۰ کیلوگرم به ترتیب ۲۳۳۶٪، ۱۳۵٪، ۳۲۵٪ و ۱۰۷٪ درصد می‌باشد (بر مبنای درصد المان‌هایی با مقدار آسیب جانسون - کوک بیش از ۱۰ درصد نسبت به کل المان‌های قاب فولادی).
- درصد آسیب کششی دال بتنی در حدود ۲۶٪ درصد افزایش می‌یابد. (بر اساس درصد المان‌هایی با مقدار آسیب کششی بیش از ۹۰ درصد نسبت به کل المان‌های دال). این افزایش در دهانه‌های نزدیک به مرکز انفجار بیشتر می‌باشد. این روند به دلیل افزایش تغییر مکان قائم عرشه فولادی نسبت به تغییر مکان تقریباً ثابت عرشه بتنی اتفاق می‌افتد.

۴-۴ تاثیر نوع خاک بستر

به منظور بررسی تاثیر نوع خاک بستر، مطابق جدول ۳ چهار نوع خاک در نظر گرفته شده است. در این مدل‌ها وزن ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم و باقی شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. در شکل ۱۶ درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی برای انواع مختلف خاک جهت مقایسه کیفی ارائه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی داریم:

- با کاهش مدول الاستیسیته و چگالی خاک، با توجه به رابطه بازتاب موج، مقدار موج بازتابی از سطح خاک افزایش می‌یابد و در ترکیب با موج شوک بار ضربه‌ای وارده بر شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار را کاهش می‌دهد (این تغییر ناچیز و غیرقابل توجه می‌باشد).



شکل ۱۶ – مقایسه درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی با آسیب بیش از ۰,۱ برای انواع مختلف خاک

- درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی با تغییر نوع خاک از ماسه متراکم به ماسه رس‌دار به مقدار بسیار کمی در حدود ۲,۵٪ درصد افزایش می‌یابد (بر اساس درصد المان‌هایی با مقدار آسیب جانسون - کوک بیش از ۱۰ درصد نسبت به کل المان‌های قاب فولادی). هدف از ارائه شکل ۱۶ این است که نشان دهد تغییر نوع خاک تاثیر قابل توجه و ویژه‌ای بر آسیب وارده بر سازه ندارد.

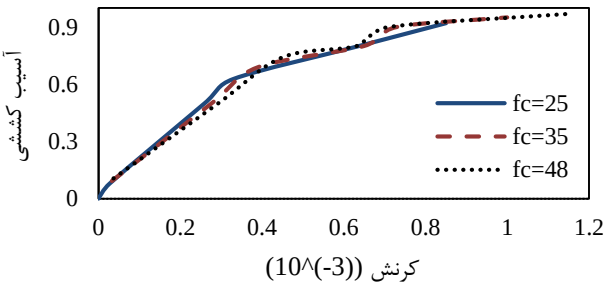
۵-۴ تاثیر مقاومت بتن عرشه

برای بررسی تاثیر نوع بتن، مطابق جدول ۳ سه نوع بتن با مقاومت مختلف در نظر گرفته شده است (همه خصوصیات بتن متناظر با مقاومت آن تغییر داده شده است). در این مدل‌ها وزن ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم و باقی شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی درصد آسیب کل عرشه بتنی با افزایش مقاومت بتن عرشه کاهش یافته و این کاهش آسیب در نواحی نزدیک به مرکز انفجار رخ می‌دهد. با افزایش مقاومت بتن عرشه از ۲۵ به ۳۵ و از ۳۵ به ۴۸ مگاپاسگال درصد آسیب کششی به ترتیب ۲۲٪ و ۲۸٪ درصد کاهش می‌یابد. با بررسی نمودار کرنش و آسیب کششی برای سه نوع بتن با مقاومت‌های مختلف ارائه شده در شکل ۱۷ می‌توان این نتیجه را تفسیر کرد.

همان‌طور که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود، نمودار کرنش- آسیب کششی بتن برای سه نوع مختلف بتن نزدیک به هم می‌باشد؛ یعنی با افزایش مقاومت بتن تغییری در این نمودار ایجاد نشده است. منتها مسئله حائز اهمیت این است که میزان آسیب وابستگی مستقیمی به میزان کرنش دارد؛ یعنی هر چه میزان کرنش ایجاد شده در المان بتنی بیشتر باشد، میزان آسیب نیز بیشتر خواهد بود و برعکس. حال در مورد دال بتنی، با افزایش مقاومت بتن، میزان مدول ارتجاعی نیز بیشتر شده و در نتیجه میزان کرنش‌ها کاهش خواهد یافت و کاهش یافتن میزان کرنش، بنا به نمودار مذکور، منجر به کاهش آسیب سازه بتنی خواهد شد. البته لازم به ذکر است که افزایش مقاومت بتن، با وجود آنکه منجر به افزایش مقاومت سازه‌ای و کاهش آسیب‌ها خواهد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

شد منتها افزایش بی‌رویه آن، می‌تواند سبب افزایش تردی در رفتار سازه شود. پس باید کلیه عوامل موثر با هم دیده شود.



شکل ۱۷- نمودار کرنش و آسیب کششی برای سه نوع بتن با مقاومت‌های مختلف

۴-۶ تاثیر مقاومت فولاد شمع

به منظور بررسی تاثیر نوع فولاد شمع، مطابق جدول ۳ سه نوع فولاد با مقاومت نهایی ۳۷۰، ۵۲۰ و ۶۸۵ مگاپاسگال در نظر گرفته شده است (همه خصوصیات فولاد متناظر با مقاومت آن تغییر داده شده است). در این مدل‌ها وزن ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم و باقی شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. در شکل ۱۸ درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی برای انواع مختلف فولاد مقایسه شده است.

شکل ۱۸ - مقایسه درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی با آسیب بیش از ۰٫۱ برای انواع مختلف فولاد

با توجه به نتایج شبیه‌سازی داریم:

- تغییر شکل نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار بر روی مقطع شمع با افزایش مقاومت شمع از ۳۷۰ به ۵۲۰ و از ۵۲۰ به ۶۸۵ به ترتیب ۲۱٪ و ۱۶٪ درصد کاهش می‌یابد.
- درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی با افزایش مقاومت شمع از ۳۷۰ به ۵۲۰ و از ۵۲۰ به ۶۸۵ به ترتیب ۱۴٪ و ۷۲٪ درصد کاهش می‌یابد (بر مبنای درصد المان‌هایی با مقدار آسیب جانسون - کوک بیش از ۱۰ درصد نسبت به کل المان‌های قاب فولادی). این کاهش آسیب در نواحی نزدیک به مرکز انفجار و بصورت موضعی بر روی شمع رخ می‌دهد.
- درصد آسیب کششی کل دال بتنی با افزایش مقاومت شمع حداکثر در حدود ۳۸٪ درصد افزایش می‌یابد (بر اساس درصد المان‌هایی با مقدار آسیب کششی بیش از ۹۰ درصد نسبت به کل المان‌های دال). این روند به دلیل انتقال بارگذاری به سایر شمع‌ها و گسترش آسیب به همه دهانه‌ها می‌باشد.

همانطور که در بخش ۲-۳ بیان شد برای تعریف معیار خرابی در فولاد، از معیار جانسون- کوک استفاده شده است. بر طبق این معیار، هر چه میزان کرنش پلاستیک ایجاد شده به کرنش خرابی نزدیک‌تر باشد میزان خرابی بیشتر خواهد شد. با توجه به اینکه پارامترهای موثر بر کرنش پلاستیک و کرنش خرابی زیاد می‌باشد امکان قضاوت بر این که، آیا افزایش مقاومت فولاد میزان خرابی را افزایش خواهد داد یا نه بسیار دشوار خواهد بود. کاهش آسیب رخ داده در این تحقیق با افزایش مقاومت فولاد، بیشتر در نواحی نزدیک به مرکز انفجار و بر روی شمع رخ می‌دهد (و قابل تعمیم به کل سازه نیست) و موجب می شود آسیب کل در مجموع کاهش یابد. البته لازم به ذکر است که دستورالعمل UFC، با در نظر گرفتن تمامی شرایط (از قبیل شکل‌پذیری، جوش‌پذیری و ...) توصیه می‌نماید از فولادهای با مقاومت کمتر ولی با شکل‌پذیری بالا در سازه‌های مقاوم در برابر انفجار استفاده شود.

۴-۷ تاثیر تزریق بتن داخل شمع

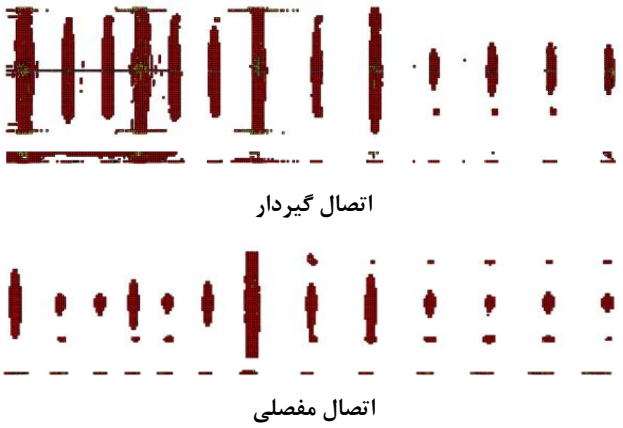
در این بخش تاثیر تزریق بتن به داخل شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌ها وزن ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم، داخل شمع‌ها با بتن ۲۵ مگاپاسگال پر شده و باقی شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی داریم:

- درصد آسیب جانسون – کوک کل قاب فولادی با تزریق بتن ۷۵ برابر کاهش می‌یابد (بر مبنای درصد المان‌هایی با مقدار آسیب جانسون - کوک بیش از ۱۰ درصد نسبت به کل المان‌های قاب فولادی).
- درصد آسیب کششی کل دال بتنی با تزریق بتن ۱۲٪ درصد افزایش می‌یابد (بر اساس درصد المان‌هایی با مقدار آسیب کششی بیش از ۹۰ درصد نسبت به کل المان‌های دال). در مدل بدون تزریق بتن بیشترین مقدار آسیب در دهانه‌های سمت مرکز انفجار رخ داده و سایر دهانه‌ها دچار آسیب بسیار کمتری شده‌اند. در مدل با تزریق بتن آسیب کمتری در دهانه‌ی شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار رخ داده است، اما بر خلاف مدل قبل سایر دهانه‌ها دچار آسیب بیشتری شده‌اند و خرابی در کل دال بتنی گسترش یافته است. این روند نیز به دلیل آسیب موضعی کمتر شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار و در نتیجه انتقال بارگذاری اعمالی به کل قاب فولادی می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

۴-۸ تاثیر شرایط اتصال شمع به عرشه

در این بخش تاثیر شرایط اتصال شمع‌ها به عرشه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مدل‌ها وزن ماده منفجره ۲۰۰ کیلوگرم، اتصال شمع‌ها به عرشه نیز یک بار بصورت گیردار (شرایط نقشه اجرایی) و بار دیگر بصورت مفصلی در نظر گرفته شده و باقی شرایط مشابه مدل مبنا می‌باشد. در شکل ۱۹ نمایی از سطح و عمق عرشه بتنی با آسیب کششی بیش از ۰٫۹ برای این دو مدل نشان داده شده است. (مقدار ۰٫۹، یعنی اینکه المان به ۹۰ درصد معیار آسیب کششی رسیده است و تعبیر دیگری ندارد).



شکل ۱۹ - نمایی از سطح و عمق عرشه بتنی با آسیب کششی بیش از ۰٫۹ برای دو مدل گیردار و مفصلی (بخش‌های نشان داده نشده دارای آسیب کششی کمتر از ۰٫۹ می‌باشند)

با توجه به نتایج شبیه‌سازی داریم:

- با تغییر شرایط اتصال آسیب بوجود آمده در قاب فولادی سازه تغییر قابل توجه‌ای نکرده (افزایش در حدود ۸٪ درصد) و همانطور که انتظار می‌رفت بصورت موضعی باقی می‌ماند.
- حداکثر درصد آسیب کششی کل دال بتنی با آسیب بیش از ۰٫۱ با تغییر شرایط اتصال شمع به عرشه از حالت گیردار به مفصلی حدود ۲/۳ کاهش می‌یابد (بر اساس درصد المان‌هایی با مقدار آسیب کششی بیش از ۱۰ درصد نسبت به کل المان‌های دال).
- در مدل با اتصال گیردار بیشترین مقدار آسیب در دهانه‌های سمت مرکز انفجار رخ داده و در کل عمق عرشه گسترش یافته است. در مدل با اتصال مفصلی تنها بخش‌های زیرین عرشه بتنی در محل اتصال به قاب فولادی دچار مقداری آسیب و ترک‌خوردگی شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار کلی و نقاط آسیب پذیر یک اسکله شمع و عرشه موردی تحت بار انفجار درون آب بررسی شده است. در مجموع مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که:

- اگر انفجار در حدی افزایش یابد که نزدیک‌ترین شمع به انفجار شروع به ورود به مرحله پلاستیک نموده و دچار خرابی‌های بالایی شود، سازه اسکله در این شمع‌ها بصورت موضعی آسیب می‌بینند.
- مود خرابی حاکم آسیب موضعی بوجود آمده در شمع‌ها و عرشه بتنی نزدیک به مرکز انفجار و ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار در بخشی از سازه می‌باشد.
- شمع‌های که از مرکز انفجار دور هستند تغییر شکل پسماند و آسیب قابل ملاحظه‌ای ندارند. و قاب فولادی اسکله نیز به دلیل صلبیت زیاد آن تقریباً جابجایی جانبی قابل توجه‌ای ندارد.
- نکته‌ای که حائز اهمیت می‌باشد این است که تنها بخشی از اسکله، که در محدوده نزدیک به مرکز انفجار، قرار دارد دچار تخریب و فروریزش شده اما این موجب از کاربری خارج شدن سایر بخش های اسکله و فروریزش کلی نمی‌گردد و می‌توان پس از حادثه بخش‌های آسیب دیده را بدون این که در فعالیت اسکله خلل جدی ایجاد شود، تعمیر و بهسازی نمود.
- همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش وزن ماده منفجره آسیب وارده بر قاب فولادی اسکله بطور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین آسیب عرشه بتنی افزایش یافته و ترک خوردگی در سراسر عرشه گسترش می‌یابد. این آسیب‌ها بیشتر در نزدیکی مرکز انفجار و بصورت موضعی رخ می‌دهند. با این حال سازه بطور کلی فرو نمی‌ریزد و سایر بخش‌های اسکله قابل استفاده می‌باشد.
- فشرده بودن مقطع شمع‌ها از نظر انفجاری تاثیر قابل توجه‌ای بر پاسخ‌های محلی سازه از جمله تغییر شکل شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار دارد (موجب کاهش تغییر شکل در حدود ۶۰٪ درصد می‌شود). با افزایش ضخامت مقطع شمع آسیب موضعی قاب فولادی حدود ۱۵٪ و آسیب عرشه بتنی حدود ۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین بهتر است کنترل کمانش موضعی انفجاری برای این گونه سازه‌ها در نظر گرفته شود، و با افزایش ضخامت آسیب وارده را کاسته و سازه را بهسازی نمود.
- کاهش مدول الاستیسیته و چگالی خاک تاثیر قابل توجه و تعیین کننده‌ای بر پاسخ‌های سازه از نظر مقدار آسیب و تغییر نقاط آسیب پذیر ندارد.
- با افزایش مقاومت بتن عرشه ترک خوردگی و آسیب دال بتنی کاهش یافته (در حدود ۳۳٪ درصد) و این آسیب کمتر به سایر نواحی عرشه گسترش می‌یابد. بنابراین افزایش مقاومت بتن عرشه برای بهسازی موثر می‌باشد. البته همانطور که در بخش ۴-۵ ذکر شد افزایش بی‌رویه آن، می‌تواند سبب افزایش تردی در رفتار سازه شود. پس باید کلیه عوامل موثر با هم دیده شود.
- افزایش مقاومت فولاد شمع‌ها آسیب وارده بر قاب فولادی سازه را تقریباً در حدود ۷۲٪ درصد کاهش می‌دهد، این کاهش بیشتر در نواحی نزدیک به مرکز انفجار و بر روی شمع رخ داده و قابل تعمیم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

به کل سازه نیست، اما آسیب وارده بر عرشه بتنی با این تغییر افزایش می‌یابد (حداکثر در حدود ۳۸٪ درصد). از این رو افزایش مقاومت فولاد شمع هم تاثیر مثبت و هم تاثیر منفی بر بهسازی سازه دارد.

- تزریق بتن درون شمع‌ها باعث کاهش آسیب وارده بر قاب فولادی اسکله شده (اختلافی در حدود ۷۵ برابر)، و آسیب عرشه بتنی را در حدود ۱۲٪ درصد افزایش می‌دهد. در نتیجه تزریق بتن می‌تواند به مقدار قابل توجه‌ای از آسیب وارده بر قاب فولادی و ایجاد تغییر شکل‌های پسماند در آن جلوگیری نماید، اما باید در نظر داشت که سطح بیشتری از عرشه بتنی و بتن درون شمع‌های نزدیک به مرکز انفجار آسیب می‌بینند. بنابراین تزریق بتن می‌تواند به عنوان گزینه‌ای موثر برای بهسازی در نظر گرفته شود.
- تغییر اتصال شمع به عرشه از حالت گیردار به مفصلی تاثیری قابل توجه‌ای بر آسیب قاب فولادی ندارد. اما مقدار آسیب وارده بر عرشه بتنی را به مقدار بسیار زیادی (در حدود ۲/۳) کاهش داده و از گسترش آن در سراسر عرشه بتنی جلوگیری می‌کند. در هر حالت سازه فرو نمی‌ریزد و سایر بخش‌های آن قابل بهره‌برداری می‌باشد. بنابراین با توجه به شرایط تعمیر سازه تغییر اتصال شمع به عرشه می‌تواند برای بهسازی در نظر گرفته شود.

کلید واژگان

1- Undex-Underwater Explosion
2- Acoustic
3- CDP-Concrete Damage Plasticity
4- Drucker-Prager
5- Isotropic
6- Johnson-Cook
7- Eulerian
8- Lagrangian
9- Hugoniot
10-Cole
11- Substructure method
12- Direct method
13- Wet Surface Approximation
14-DAA-Doubly Asymptotic Approximation
15- Solid
16- Truss
17- Shell

۶- مراجع

1- Wang, G. and Sherong Zhang, Sh., Mao, Yu., Hongbi, L. and Kong, Y., (2014), *Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries*, Journal of Applied Ocean Research, Vol.46, p.40-53.

2- Wang, Ch., Qiu, Sh. and Eliasson, V., (2014), *Investigation of shock wave focusing in water in a logarithmic spiral duct*, Journal of Ocean Engineering, Vol.102, p.174-184.

3- Li, J. and Rong, J.L., (2012), *Experimental and numerical investigation of the dynamic response of structures subjected to underwater explosion*, European Journal of Mechanics, Vol.32, p.59-69.

4- Hung, C.F., Lin, B.J., Hwang-Fuu, J.J. and Hsu, P.Y., (2009), *Dynamic response of cylindrical shell structures subjected to underwater explosion*, Journal of Ocean Engineering, Vol.36, p.564-577.

5- Jen, C.Y., (2009), *Coupled acoustic–structural response of optimized ring-stiffened hull for scaled down submerged vehicle subject to underwater explosion*, Theoretical *and Applied Fracture Mechanics*, Vol.52, p.96-110.

6- Ucar and Hakan, (2006), *Dynamic response of a catamaran-hull ship subjected to underwater explosions*, Thesis and Dissertation Collection, Naval Postgraduate, Monterey, California.

7- Zhang A-man, Yang Wen-shan, Yao Xiong-liang, (2012), *Numerical simulation of underwater contact explosion*, Applied Ocean Research, Vol.34, p.10-20.

8- LI Wang-hui, ZONG Zhi, SUN Lei, (2010), *A numerical study of underwater explosion induced waves and their effects on nearby marine structures*, Chinese Journal of Hydrodynamics.

9- Jankowiak, T. and Lodygowski, T., (2005), *Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model*, Poznan University of Technology, Poland.

10- Abaqus, (2016), *Analysis User's Manual*.

11- Khan, A., (1995), *Continuum Theory of Plasticity*, New York John Wiley & Sons.

12- Ghalei, N. and Halboian, A.M., (2008), *The behavior of three-dimensional synchronous liquid damper systems under the influence of two-dimensional stimuli using finite element method*, Fourth National Congress of Civil Engineering, Tehran. (In Persian)

13- Felippa, C.A. and DeRuntz, J.A., (1991), *Acoustic Fliud Volume Modeling By The Displacement Potential Formolation*, whith Emphasis on the Wedge Element, Journal of computers and structures, Vol.42, p.669-686.

14- Smith, P.D. and Hetherngton, J.G., (1994), *Blast and ballistic loading of structures*.

15- Patel .M.H, (1989), *Dynamics of Offshore Structures*, Butterworth.

16- Wolf, P., (1985), *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Englewood Cliffs, Berkeley: Prentice-Hall.

17- Gharangiyan, R. and Mohammadzadeh, H., (2014), *Numerical study of the interaction of water and submerged structures under the influence of underwater explosion*, National Conference on Passive Defense in Marine Science. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]

18- Shin Young, S., (2004), *Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion*, Journal of Computers and Structures, Vol.82.23, p 2211-2219.

19- Hosseini, DR.A. and Nasiri, B., (2018), *Determine the vulnerable points of pile-supported wharves against the blast load*, M.Sc thesis in the field of passive defense, Malek-Ashtar University of Technology. (In Persian)

20- Zhang, Sh. and Wang, G., (2014), *Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion*, Journal of Engineering Failure Analysis, Vol.36 ,p 49-64.

21- Kim, C.H. and Shin, Y.S., (2013), *Numerical simulation of surface shield effects to waterblast wave*, Journal of Ocean Engineering, Vol.60, p 99-114.

22- Shah Mohammadi, H. and Mohammadi, S., (2010), *Analysis of the effect the shock wave from the explosion of a submerged tube*, Journal of Civil Engineering and Surveying, Tehran Technical College, p. 61-72. (In Persian)

23- Kwon, Y.W. and Fox, P. K., (1993), *Underwater shock response of a cylinder subjected to a side-on explosion*, Journal of Computers & Structures, Vol.48, p 637-646.

24- Chakraborty, T., (2016), *Analysis of hollow steel piles subjected to buried blast loading*, Journal of Computers and Geotechnics, Vol.78, p 194-202.

25- UFC 3-340-02, (2014), *Structures to resist the effects of accidental explosion* , U.S. Army Corps of Engineers.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.6.4]