

شبیه‌سازی پاسخ موج‌شکن توده‌سنگی تحت انفجار زیر آب و بررسی مودهای خرابی

سید احمد حسینی^{۱*}، امیر فلاح^۲، مهدی عجمی^۳

۱- استادیار، مجتمع پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد سازه‌های امن، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

موج‌شکن‌ها به‌عنوان سازه‌های حفاظت سواحل از اهمیت خاصی برخوردارند لیکن اهمیت مضاعف موج‌شکن‌ها در کشور ما، بیشتر به دلیل ایجاد پناهگاه‌های کوچک و بزرگ برای شناورهای مختلف می‌باشد. علاوه بر این، سازه‌های دریایی و از جمله موج‌شکن در معرض انواع مختلفی از تهدیدها و حملات مطرح از جمله حمله‌های هوایی، دریایی و زیرسطحی می‌باشند. لذا، توجه به ملاحظات پدافند غیرعامل در طراحی موج‌شکن‌ها در برابر تهدیدات و خسارات ناشی از آن اهمیت زیادی دارد. یکی از مهم‌ترین این تهدیدات، تهدیدات تروریستی و انفجاری از سمت دریا می‌باشد. در این تحقیق، پاسخ موج‌شکن توده سنگی و مودهای خرابی آن‌ها تحت اثر انفجار زیر آب، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از نرم‌افزار المان محدود اتوداین، جهت شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ‌ها استفاده شد. روش شبیه‌سازی اولیتر-لاگرانژ درگیر و نوع آن حل دینامیکی صریح بوده است. برای صحت‌سنجی، ابتدا نحوه‌ی انتشار امواج ناشی از انفجار زیر آب و اثر خرابی آن بر یک سازه‌ی سد بتنی ارزیابی گردید و پس‌از آن، پاسخ مدل پیشنهاد شده برای شبیه‌سازی موج‌شکن با استفاده از نرم‌افزار برای تغییرات وزن ماده منفجره و پارامترهایی هندسی چون عمق محیط آب، عمق انفجاری رویداد، تغییر شیب سازه‌ی موج‌شکن و اندازه‌ی ابعاد بلوک‌های لایه‌ی آرمور بررسی گردید. نتایج نشان داد، هرچه عمق انفجار بیشتر و فاصله‌ی مقیاسی نسبت به سازه از $0.533 \text{ kg/m}^{1/3}$ کمتر شود، خرابی کوتاه‌مدت بیشتر می‌شود. در شبیه‌سازی میان‌مدت، مشاهده گردید با کاهش ابعاد بلوک‌های بتنی لایه‌ی آرمور از $2/4$ متری به $0/6$ متر، مقدار خرابی بلوک‌های بتنی از 47 درصد به 23 درصد کاهش یافته و نیز برای زاویه‌ی شیب سازه-ای موج‌شکن، با کاهش زاویه از 45 درجه به 26 درجه، میزان تخریب حدود 50 درصد کاهش یافته است. محدوده‌ی بحرانی انفجار در فاصله کمتر از 8 متری از سازه و عمق بحرانی انفجار 2 متر بدست آمد که در این فواصل آسیب وارده قابل توجه بوده و ضرورت تمهیدات تعمیر بلوک‌های بتنی آرمور وجود دارد.

کلمات کلیدی: انفجار زیر آب، موج‌شکن توده‌سنگی، مودهای خرابی، شبیه‌سازی عددی، اندرکنش سازه-سیال.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.154733.1699	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2019.154733.1699	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۱۱/۱۵	۱۳۹۷/۱۱/۱۰	۱۳۹۷/۰۸/۱۲
			*نویسنده مسئول:		سید احمد حسینی
			پست الکترونیکی:		hoseini@mut.ac.ir

Simulation of the Rubble Mound Breakwater Response to the Underwater Explosion and Assessment of Failure Modes

Ahmad Hosseini^{1*}, Amir Fallah², mahdi adjami³

- 1- Assistant Professor, Passive Defense Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
 2- Master of Safe Structures, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
 3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Environment, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran

ABSTRACT

Breakwaters are of great importance as coastal protection structures, but the double importance of breakwaters in our country is due to the creation of small and large shelters for different vessels. In addition, marine structures, including breakwaters, are subject to a variety of threats, including air, sea and submarine attacks. Therefore, attention to passive defense considerations is important in designing and operating breakwaters against threats and damage. One of the most important of these threats is the terrorist and explosive threats from the sea. In this research, the response of rubble mound breakwaters and their failure modes subjected to the underwater explosion was evaluated. Thus AUTODYN finite element software was used for the simulation and analysis of breakwater responses under the underwater blast loading. The used simulation and analysis method were the Coupling Euler-Lagrange process and explicit dynamical solving, respectively. For verification, first, the wave propagation from underwater explosion and its damaging effect on a concrete dam structure were evaluated. Then, The proposed model response of the breakwater using the software under the variation of explosive mass, water depth, event explosive depth, structure breakwater slope and size of armor layer blocks were investigated. The results showed, the greater the depth of the explosion and the shorter the scaled distance was less than $0.533 \text{ kg/m}^{1/3}$, the greater the short-term damage would be. In the medium time simulation, was observed that by increasing the dimensions of concrete blocks of Armor layer from 2.4 m to 0.6 m, percentage failure decreased from 47% to 23%, and as well as for the structural slope of breakwater, with reducing the angle from 45 degrees to 26 degrees, the failure amount was reduced by about 50%. Generally, within the scope of this research, the critical explosion range was less than 8 meters from the structure.

ARTICLE INFO

Received: 03 November 2018
Revised: 30 January 2019
Accepted: 04 February 2019

Keywords:

"Underwater explosion", "Rubble mound breakwater", "Failure modes", "Simulation", "Fluid-Structure Interaction"

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.154733.1699

*Corresponding author: Ahmad Hosseini
 Email address: hoseini@mut.ac.ir

۱- مقدمه

توجه به لزوم حفاظت از آرامش و امنیت بنادر، لزوم تأمین امنیت تأسیسات آن‌ها، اهمیت استراتژیک و اقتصادی بنادر و لزوم عملکرد مستمر آن‌ها جهت واردات و صادرات کالاهای اساسی، وجود موج‌شکن‌ها اهمیت می‌یابد. در کنار این مسئله با توجه به شیوع پدیده‌ی شومی بنام تروریسم و حملات انتحاری و تروریستی در جهان بالأخص منطقه‌ی غرب آسیا و توطئه‌های دشمنان کشور و نظام جهت ضربه زدن به فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی و نیز ایجاد ناامنی از طرفی دیگر، لازم است بنادر و سازه‌های بندری در اولویت بررسی الزامات پدافند غیرعامل قرار گیرد. در تحقیق پیش رو به بررسی پاسخ موج‌شکن توده‌سنگی به انفجار زیرآب و ارزیابی مودهای خرابی آن پرداخته - شد. در زمینه‌ی شبیه‌سازی امواج انفجار زیرآب و اثرات آن بر موج‌شکن‌ها با بررسی‌های دقیقی که صورت گرفت تاکنون هیچ پژوهش و تحقیقی انجام‌نشده یا به دلیل طبقه‌بندی، اطلاعاتی از آن‌ها در دسترس نمی‌باشد، و در ادامه برای بررسی و ارزیابی مطالعات مرتبط و موضوعات دارای شباهت محتوایی و عنوانی، از قبیل انفجار زیرآب، اندرکنش بین سازه و آب، شبیه‌سازی انفجار زیرآب و پدیده‌های مرتبط با آن، شبیه‌سازی اثرات انفجار زیرآب بر سازه‌ها، پرداخته شد.

نتایج پژوهش ونگ و همکاران در بررسی مقایسه‌ای پاسخ دینامیکی سدهای بتنی وزنی تحت انفجار در هوا و زیرآب، وجود تضاد چشمگیری در ویژگی‌های انتشار موج بین آب‌وهوا را نشان داده است. همچنین در پژوهش آن‌ها مشخص گردید که در یک انفجار زیرآب، پدیده کاویتاسیون در آب، که ناشی از بازتاب موج شوک در یک سطح آزاد بوده تأثیر قابل‌توجهی بر سازه در مجاورت سطح آزاد آب می‌گذارد [۱].

طبق نتایج تیان تنگ در شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سد بتنی تحت تماس بار انفجار زیرآب، با توجه به تحلیل آسیب، به این نتیجه رسیده شد که آسیب زمانی که مواد منفجره در آب بوده در مقایسه با زمانی که بر روی سطح و یا در بالاتر از سطح آب باشد شدیدتر است [۲].

لی و همکاران، در بررسی اثرات سطح آب مخزن سد بر عملکرد ایمن سیستم سد بتنی وزنی - مخزن - بستر سد، مشخصات انتشار موج شوک بر این سیستم و پاسخ دینامیکی، ارزیابی خرابی و عملکرد ایمن آن را ارزیابی نمودند. مشاهده شد که سطح آب در مخزن سد به طور ویژه در عملکرد ایمن سد بتنی وزنی نسبت به انفجار زیرآب موثر بوده و هر چه سطح آب پایین‌تر باشد، آسیب در سد به صورت متناظر کاهش می‌یابد [۳].

در تحقیق زنگ و همکاران با عنوان شبیه‌سازی عددی حالات شکست سدهای بتنی وزنی به انفجار زیرآب، با مقایسه اوج فشار و ضربه برای مش بندی‌های مختلف نشان داده شد که تفاوت بین نتایج عددی برای اندازه‌های مختلف با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. و نیز نشان داده شد که مش ۱۰۰ میلی‌متر به‌اندازه کافی برای تحلیل انتشار موج در انفجار زیرآب دقیق است. مقایسه حالات شکست سد بین مش‌ها کوچک و بزرگ نشان داده که مش‌های بزرگ تا ۴۰۰ میلی‌متر، تخمین دقیقی از حالت‌های شکست سد در معرض انفجار زیرآب به دست می‌دهند [۴].

در تحقیق سایتو و همکاران با عنوان مطالعات تجربی و عددی میرایی موج شوک در زیرآب، مشاهده‌شده که میرایی موج شوک برای امواج شوک قوی‌تر بزرگ‌تر است. اگرچه مدل ریاضی به کار گرفته در این مطالعه برای میرایی شوک نسبتاً ساده بوده، روش عددی در این مطالعه نتایجی که توافق خوب با داده‌های تجربی دارد را داده است [۵].

در تحقیقات شاشا و همکاران تعامل یک موج شوک رویداد با چهار موانع مختلف، به‌صورت عددی بررسی شده است. نتایج عددی نشان داده که دلیل مستقیم میرایی شوک رویداد، تأثیر جهت و منحنی موج شوک رویداد است. از طرف دیگر، تعامل با امواج منعکس شده و امواج گسترده همچنین می‌تواند از شدت افزایش شوک رویداد کاسته و باعث کاهش آن گردد [۶].

علاوه بر تحقیقات ذکرشده، تحقیقات دیگری نیز در حوزه‌های انفجار زیرآب، اثر آن بر سازه‌هایی چون سدهای بتنی، اندرکنش سازه-سیال و... انجام‌شده است [۷-۲۱].

۲- مبانی علمی و نظری تحقیق

۲-۱- انفجار زیر آب

انفجار زیر آب یک واکنش شیمیایی بوده که همراه با خود مقادیر زیاد انرژی به صورت امواج فشاری منتشر شده و گرما آزاد می‌نماید. وقتی یک انفجار زیر آب رخ می‌دهد، مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. این انرژی فشار را به طور ناگهانی افزایش داده و به یک موج فشاری معروف به موج شوک تبدیل شده و در محیط آب منتشر می‌شود. در واقع دو پالس فشاری ایجاد می‌شود: موج شوک همراه با تمام انفجارها، و یک پالس حباب گاز به دنبال موج که با انفجار ایجاد شده بزرگ می‌شود [۲۲].

مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روابط تجربی محاسبه‌ی فشار شوک اولیه، رابطه‌ی است که کول^۱ و اسویسداک^۲ به صورت زیر ارائه داده‌اند:

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad t \geq \theta \quad (1)$$

$$P_m = k_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\alpha_1} \quad (2)$$

$$\theta = k_2 \cdot W^{1/3} \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\alpha_2} \quad (3)$$

در روابط بالا P_m فشار حداکثر موج شوک بر حسب مگا پاسکال، θ ثابت نمایی میرایی زمان، W وزن خرج منفجره بر حسب کیلوگرم، R فاصله مستقیم از مرکز خرج بر حسب متر، $\alpha_1 = 1/13$ و $\alpha_2 = -0/22$ ، $k_1 = 52/16$ ، $k_2 = 96/5$ ، ثابت‌هایی وابسته به پارامترهای شوک خرج منفجره هستند [۲۴ و ۲۲].

در مورد انفجار زیر آب با توجه به مشخصه‌ها و ویژگی‌هایی چون عمق محیط آب، عمق انفجار روی داده، وزن خرج منفجره، فاصله از سطح آزاد آب و فاصله از سازه مورد نظر که هر کدام منجر به وقوع واکنش‌ها و پدیده‌های مختلف و پیچیده‌ای می‌شوند، تقسیم‌بندی‌هایی انجام گرفته است که شامل انفجار آب کم عمق و عمیق، انفجار نزدیک سطح آزاد آب و دور از سطح آزاد و انفجار محدوده نزدیک و محدوده دور نسبت به سازه می‌باشند [۲۲-۲۴].

۲-۲- موج شکن توده سنگی و مودهای خرابی آن‌ها

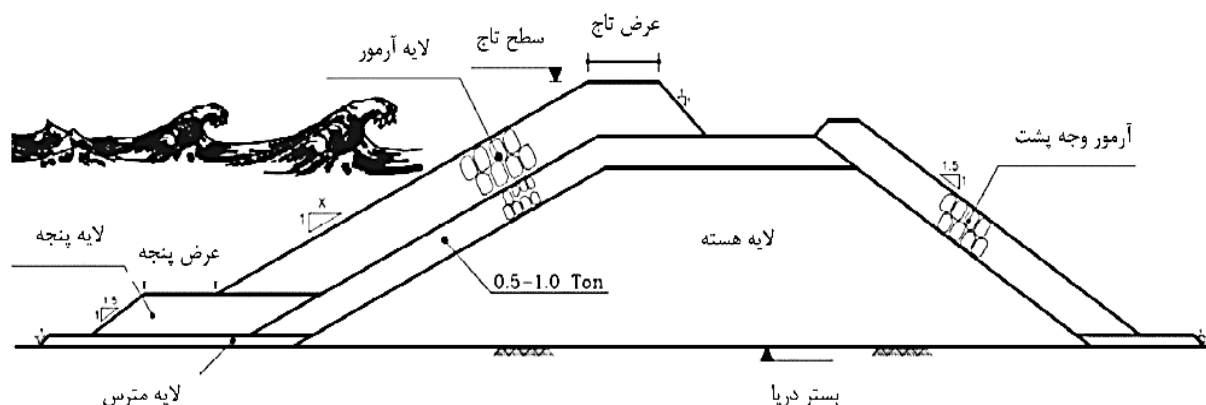
در ابتدا لازم است تا در ضمن معرفی ساختار سازه‌ای موج شکن توده سنگی، مودها و مکانیزم‌های خرابی معمول موج شکن تحت اثر بارهای متداولی چون امواج آب معرفی گردد، چراکه وقوع برخی از این خرابی‌ها در اثر انفجار زیر آب نیز محتمل می‌باشند.

۲-۲-۱- ساختار سازه‌ای موج شکن توده سنگی

موج شکن توده سنگی سازه‌ای است که بیشتر از قطعات سنگی ریخته شده یا قرار داده شده بر روی بستر دریا تشکیل می‌شود. لایه خارجی این سازه با استفاده از قطعات سنگی دارای وزن بیشتر نسبت به سایر لایه‌ها و یا قطعات بتنی ساخته می‌شود. این لایه، لایه آرمور اولیه (لایه محافظ) نامیده می‌شود. معمولاً یک لایه آرمور دیگر در زیر این لایه قرار می‌گیرد، که به لایه آرمور ثانویه معروف است. سنگ‌های این لایه از سنگ‌های لایه آرمور اولیه سبک‌تر هستند. وظیفه لایه یا لایه‌های آرمور فوق، حفاظت از سنگ‌های سبک‌تر هسته سازه در مقابل حمله امواج است. گاهی از یک سازه بتنی به نام دیواره تاج بر روی تاج موج شکن استفاده می‌شود. موج شکن‌های توده سنگی را می‌توان به دو نوع معمول و غیرمعمول تقسیم کرد. موج شکن‌های نوع دوم به نام شکل‌پذیر معروف هستند موج شکن‌های توده سنگی سنتی یا معمولی رایج‌ترین انواع موج شکن‌ها هستند که معمولاً از سه قسمت اصلی تشکیل شده‌اند (شکل ۱) [۲۵].

¹ Cole

² SWISDAK



شکل ۱: مقطع شماتیک از موج شکن توده سنگی متداول [۲۶].

۲-۲-۲- مودهای خرابی موج شکن توده سنگی

مواردی که منجر به تخریب موج شکن توده سنگی می شوند عبارتند از:

- لغزش افقی
- لغزش شیروانی
- خرابی لایه آرمور
- نشست کلی
- شکستگی پای سازه و سکو
- نشست جزئی
- آب شستگی درونی
- خرابی و لغزش

عمده عوامل ایجادکننده این شکستها عبارتند از موج، جریان، وزن سازه و قسمت‌های مختلف آن، گرادیان هیدرولیکی، جزر و مد و زلزله [۲۵].

۲-۳- رفتار مواد در انفجار

۲-۳-۱- بتن

در این مدل سازی جهت پیش بینی رفتار غیرخطی بتن و لحاظ آثار کاهش مقاومت بتن ناشی از خرابی، از مدل آر اچ تی^۳ استفاده شده است. این مدل مخصوصاً برای مدل کردن بتن و دیگر مواد شکننده از قبیل سنگ و سرامیک که تحت بارگذاری دینامیکی شدید قرار گرفته اند، بسیار کارآمد می باشد. عملکرد و روابط این مدل بر اساس مقادیر ثابتی بوده که به عوامل معادله حالت و مدل های مقاومت، شکست و فرسایش آنها نسبت داده می شود. در این مدل سخت شونده گی کرنشی و وابستگی به نامتغیر سوم برای نصف النهار کششی و فشاری مدنظر قرار گرفته و جهت مدل سازی آسان، رفتار نرم شدگی سطح مقاومت شکست غیر وابسته ایجاد شده است و نیز مقاومت کششی هیدروستاتیکی بتن وابسته به نرخ ایجاد شده می باشد [۲۷].

۲-۳-۲- آب

آب در تحلیل ها با استفاده از دو معادله فاز- حالت- گسترده و یک معادله حالت چند جمله ای مدل شده است. معادله حالت آب، معادله ای چند جمله ای^۴ که حالت کلی معادله می-گرونایزن^۵ بوده که روابط آن در حالت فشار و کشش متفاوت است. این معادله در دو حالت فشار و کشش توسط روابط زیر بیان می شود:

$$\text{برای فشار } \mu > 0$$

$$(4)$$

$$P = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e$$

$$\text{برای کشش } \mu < 0$$

$$(5)$$

$$P = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e$$

³ RHT (Riedel, Hiermaier, and Thoma)

⁴ Polynomial

⁵ Mie-GRUNEISEN

e مؤلفه‌ی انرژی درونی ویژه که می‌توان به صورت ذیل توصیف نمود:

$$e = \frac{\rho gh + p_0}{\rho B_0} \quad (6)$$

ρ چگالی و h عمق آب، g شتاب زمین و p_0 فشار اتمسفر می‌باشند [۱].

۲-۳-۳- خاک

برای شبیه‌سازی لایه‌ی مارل که در زیر لایه‌ی ماسه‌ای بستر آب قرار دارد از مدل رفتاری دراگر-پراگر استفاده شده است. این مدل دربرگیرنده رفتار غیرخطی بوده و می‌تواند معیار تسلیم برای خاک را بر اساس شکل سطح تسلیم در صفحه تنش-کرنش در نظر بگیرد [۲۷].

۲-۳-۴- ماده منفجره

خرج انفجاری معمولاً توسط مدل استاندارد معادله حالت جونز، ویلکینز و لی^۶ که مرجع انتخاب معادله حالت برای خرج‌های پراثری در اغلب محاسبات هیدرودینامیک شامل انفجار می‌باشد.

مدل حالت معادله جی دلبیو ال، فشار تولیدشده توسط انرژی شیمیایی در یک انفجار است. که می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$P = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (7)$$

که v حجم ویژه از انفجار تولیدی بیش از حجم ویژه‌ی خرج منفجرشده، E انرژی درونی ویژه، C_1 ، C_2 ، R_1 ، R_2 ، ω ثابت‌های مواد هستند [۱].

۲-۳-۵- هوا

هوا بر اساس معادله حالت گاز ایده آل است که توسط قانون گاما به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (8)$$

که در آن P فشار، γ نسبت ضرایب گرمای ویژه در حالت فشار ثابت به حجم ثابت تعریف می‌شود و برای گازهای دو اتمی مانند هوا برابر با $1/4$ می‌باشد. همچنین ρ چگالی جریان و ρ_0 دانسیته اولیه هوا بوده که در حدود $1/255 \text{ kg/m}^3$ است. E نیز انرژی درونی اولیه می‌باشد که در فشار استاندارد $101/3 \text{ kpa}$ برابر $253/4 \text{ kJ/m}^3$ است [۱].

۲-۳-۶- ماسه

برای مدل کردن ماسه، معادله حالت فشاری مواد متخلخل مطابق رابطه‌ی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله شکل خاصی از معادله می-گرونایزن می‌باشد که مؤلفه‌ی دوم آن حذف شده است:

(۹)

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H)$$

در معادله فوق P فشار (مجموع فشار منفذی و مؤثر) در اسکلت خاک، ρ چگالی فعلی خاک، Γ پارامتر گاما گرانشین، e چگالی انرژی داخلی و زیرنویس H استفاده شده معنای مرجع شوک هوگونیت سطح، یک کمیت قاب محاسبه و مبتنی بر معادله‌ای است که فرآیند شوک را با استفاده از خواص ترمودینامیکی نشان می‌دهد [۲۸].

۲-۳-۷- سنگ

برای شبیه‌سازی لایه‌های سنگی فیلتر و هسته‌ی موج‌شکن از مدل رفتاری دراگر-پراگر استفاده شده است. این مدل دربرگیرنده رفتار غیرخطی بوده و می‌تواند معیار تسلیم برای سنگ را بر اساس شکل سطح تسلیم در صفحه تنش-کرنش در نظر بگیرد [۲۷].

⁶ Jones, Wilkins, and Lee (JWL)

۲-۶- روش اوپلر-لاگراژ درگیر

شبکه‌های لاگراژی و اوپلری با یک روش خیلی کلی و قوی می‌توانند به یکدیگر برخورد نمایند. یک سطح تماس لاگراژی ممکن است از میان شبکه اوپلری ثابت در یک وضعیت اختیاری عبور نماید. شبکه‌های اوپلری قطع شده توسط سطوح لاگراژی یک پروفیل تنش برای رئوس مرزی لاگراژی ایجاد می‌نماید. در عوض، سطوح لاگراژی، یک قید هندسی نسبت به جریان مواد در شبکه لاگراژی ایجاد می‌کند. زمانی که شبکه‌ی لاگراژی از میان شبکه‌ی اوپلری عبور می‌کند، حجم‌های کنترلی اوپلری می‌تواند بسیار کوچک شود و زمانی که به‌طور کامل پوشش داده شود، تمایل به صفر شدن دارد. برای برقراری پایداری، یک نرم‌افزار هیدروکود همانند اتوداین به‌طور خودکار و دینامیکی یک حجم کنترل کوچک^۷ را با حجم‌های کنترلی بزرگ‌تر مجاور ترکیب^۸ نموده و با این کار یک حجم کنترل بزرگ‌تر واحد به دست می‌آید. طرح و روش درگیر کردن اوپلر-لاگراژ یک روش بسیار قوی برای مدل‌سازی مسائل برخورد سازه-سیال و سازه-گاز می‌باشد [۲۹].

۲-۷- شاخص خرابی

خروجی Damage شاخصی است که بیانگر شاخص خرابی است و مقدار آن مابین ۰ تا ۱ را اختیار می‌کند و از مقدار رابطه ذیل قابل محاسبه است:

$$D_c = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (10)$$

در این معادله $\Delta \varepsilon_p$ و $\Delta \mu_p$ بیانگر تغییرات کرنش معادل پلاستیک و کرنش حجمی پلاستیک می‌باشد و همچنین:

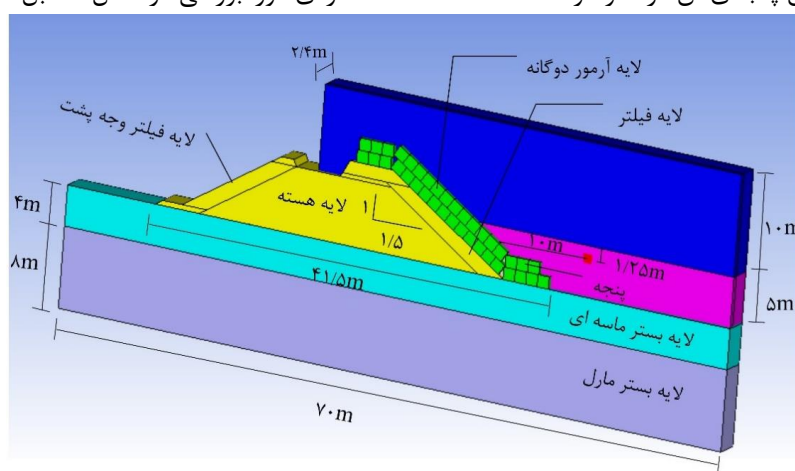
$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P + T)^{D_2} \quad (11)$$

بیانگر کرنش پلاستیک کل برای شکست تحت فشار ثابت P می‌باشند و D_1 و D_2 ثابت‌های ماده هستند [۳۰]. در تحقیق پیش‌رو خرابی کل لایه‌ی آرمور بر حسب معیار شاخص خرابی و درصد خرابی اشاره شده در بخش‌های بعد، از جمع شاخص خرابی ایجاد شده در بلوک‌های بتنی بر حسب درصد بدست آمده است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- تعریف مسئله

مدل مورد بررسی در این تحقیق، یک موج‌شکن توده‌سنگی با لایه‌ی آرمور بتنی بوده که تحت انفجار زیرآب قرار می‌گیرد. برای بررسی رفتار موج‌شکن، پارامترهای مختلفی چون وزن خرج انفجار، عمق انفجار، فاصله و فاصله‌ی مقیاسی انفجار، عمق محیط آب، شیب سازه، ابعاد آرمورهای سازه و چینش پنجه‌ی آن در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات سازه‌ی مورد بررسی در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲: مدل موج‌شکن توده‌سنگی با لایه‌ی آرمور بتنی شبیه‌سازی شده.

⁷ Cell

⁸ Clump

۲-۳- مدل سازی در نرم افزار اتوداین

برای مدل سازی، از نرم افزار اتوداین استفاده شده است. در این مدل سازی جهت ایجاد هندسه ی مدل، المان سالیید بکار رفته است و با توجه به تقارن صفحه ای و هندسه ی بارگذاری، یک دوم هندسه ایجاد گردیده است. برای شبکه بندی سیال و سازه از روش شبکه بندی اوپلر- لاگرانژ درگیر (همبسته) استفاده شده است. شکل مش ها هشت وجهی و برای محیط آب، هوا، ماده منفجره، سازه و بلوک های آرمور به ابعاد ۱۰ سانتی متر، و برای محیط بستر ۲۰ سانتی متر تعریف شده است. نوع آرمور موج شکن از نوع بلوک های مکعبی بتنی با مقاومت ۳۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده و برای حل از روش تحلیل اجزاء محدود به روش دینامیکی صریح استفاده شده است. اندرکنش های سازه-سیال بین آب، ماده منفجره و هوا با کل سازه موج شکن و لایه ی بستر و اندرکنش سازه-خاک بین اجزاء سازه ای موج شکن شامل لایه های آرمور، فیلتر و هسته با یکدیگر و با بستر ماسه ای آن تعریف شده است. همان طور که در بخش ۲-۳ بیان شد، مصالح استفاده شده در مدل اصلی عبارتند از: مدل RHT برای بتن، مدل سه فاز برای لایه ی ماسه و دراگر-پراگر برای مارل و بدنه ی موج شکن، مدل JWL برای خرج منفجره، مدل گاز ایده آل برای هوا، مدل حالت چند جمله ای برای آب، که پارامترهای آن ها به تفصیل در مرجع [۳۱] آمده است.

لازم به ذکر است که در این تحقیق، تمام اجزاء موج شکن توده سنگی مدل سازی گردیده است اما جهت جلوگیری از افزایش غیر قابل کنترل زمان تحلیل و همچنین لزوم پرداختن به رفتار قسمت های حساس سازه، از آوردن رفتار مصالح هسته خودداری گردید. علاوه بر این، با توجه به این نکته که دانه بندی مصالح لایه های فیلتر و هسته متغیر بوده و مدل سازی آنها در نرم افزار مربوطه در عین دشوار بودن باعث افزایش بسیار زیاد حجم مدل نهایی شده و رسیدن به جواب را طولانی نموده و بررسی اثر پارامترهای مختلف را تقریباً غیر ممکن میسازد لذا مصالح مربوطه یکپارچه فرض شده و از بررسی پاسخ آنها صرف نظر گردید. از طرف دیگر، با توجه به تحلیل های اولیه انجام شده در این تحقیق و در این محدوده انفجار، مدل سازی دقیق یا غیر دقیق هسته تاثیر در پاسخ کلی موج شکن ندارد و رفتار اصلی موج شکن و مودهای خرابی آن، وابسته به رفتار لایه آرمور و پنجه دارد.

۳-۳- راستی آزمایی و صحت سنجی مدل عددی

برای اینکه بتوان به تحلیل ها و نتایج داده شده در این تحقیق اعتماد کرد لازم است تا از صحت مدل پیشنهادی، اطمینان حاصل کرد. تایید و صحت گذری می تواند شامل فعالیت های زیر باشد:

-انجام محاسبات جایگزین،

-مقایسه مشخصات یک طرح جدید با مشخصات طرح های مشابه که درستی آنها به اثبات رسیده است،

-انجام تست ها و نشان دادن نتایج و

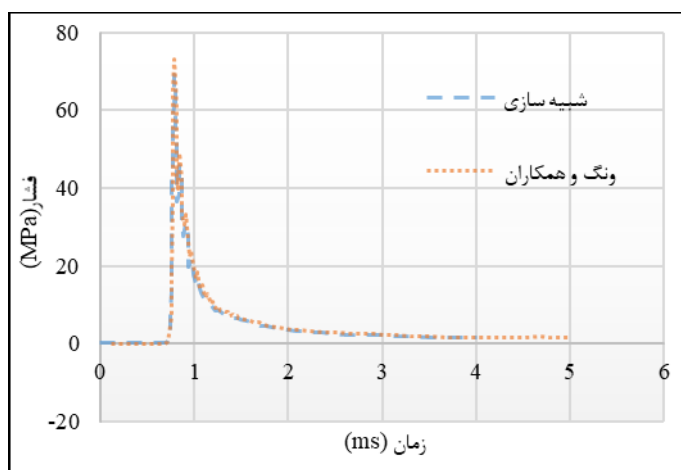
- بازنگری مستندات پیش از انتشار. مطالعات تجربی و آزمایشگاهی نیز بسیار گران قیمت هستند و همچنین به لحاظ ایمنی می توانند خطر آفرین باشند. بنابراین استفاده از روش های حل جایگزین نظیر روش های عددی ضرورت می یابد. لذا با توجه به این مسئله، در پژوهش پیش رو ارزیابی پاسخ سازه در برابر انفجار با مقایسه ی نتایج مدل های حاصل از شبیه سازی عددی معتبر و نیز روابط تجربی راستی آزمایی صورت می گیرد. به دلیل عدم وجود تحقیقات معتبر راجع به موج شکن ها تحت بار انفجار زیر آب، برای صحت سنجی مدل موج شکن از یک تحقیق راجع به انفجار زیر آب و نتایج کاویتاسیون و موج شوک در آن و یک تحقیق در مورد پاسخ یک سد بتنی وزنی تحت انفجار تحت بار انفجار استفاده شده است.

۳-۳-۱- صحت سنجی انفجار زیر آب و پدیده های مرتبط با آن

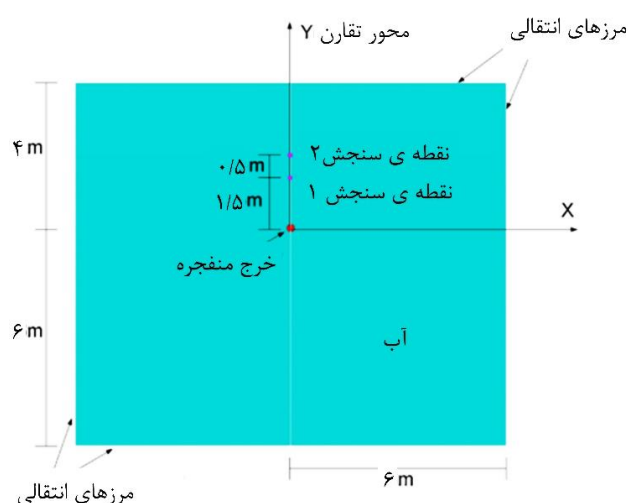
برای صحت سنجی انتشار موج و کاویتاسیون ناشی از انفجار زیر آب از مطالعات ونگ و همکاران [۳۲] استفاده شده است.

الف- صحت سنجی انتشار موج شوک ناشی از انفجار زیر آب

در شکل ۳ جزئیات مدل میدان آزاد انفجار زیر آب، مکان نقاط و نوع مرزها آمده است. وزن خرج کرووی انفجاری ۸ کیلوگرم تی ان تی و تقارن حول محور Y می باشد. همان طور که در شکل ۳ مشخص می باشد، فشار ناشی از انفجار زیر آب در دو نقطه ۱ و ۲ محاسبه شده است. برای نمونه در شکل ۴، مقایسه ی فشار انفجار بین تحقیقات ونگ و همکاران و شبیه سازی انجام شده در این تحقیق، در نقطه ۱ نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۴ مشخص می باشد، خطای بین نتایج کار ونگ و همکاران و شبیه سازی صورت گرفته در این تحقیق در حدود ۶ درصد بوده که نتیجه ای قابل قبول و مناسب می باشد. در روند انتشار موج شوک در میدان آزاد نیز بین دو تحقیق اختلاف ناچیز است.



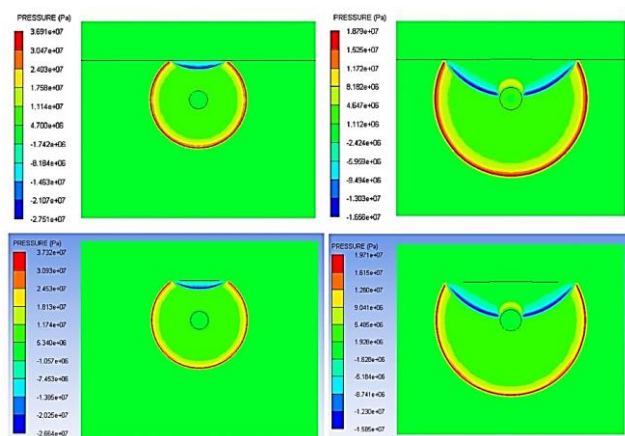
شکل ۴: مقایسه ی فشار انفجار زیر آب بین تحقیقات ونگ و همکاران و شبیه سازی انجام شده در این تحقیق در نقطه ۱.



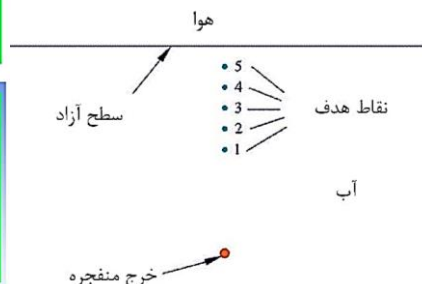
شکل ۳: مدل محاسباتی از یک انفجار میدان آزاد [۳۲]

ب- صحت سنجی انتشار موج شوک و کاویتاسیون ناشی از انفجار زیر آب

در ادامه مطالعات ونگ و همکاران، کاویتاسیون ناشی از انفجار زیر آب و انتشار موج شوک بررسی شده است. پس از انفجار زیر آب از یک خرج منفجره، موج شوک ممکن است به دو نوع مرز اصلی سطح آزاد آب و سطح مشترک سیال-سازه نزدیک شود. وجود این مرزها اثر قابل توجهی بر پدیده انتشار موج داشته، و منجر به کاویتاسیون بالک نزدیک سطح آزاد یا کاویتاسیون محلی در سطح سازه می شوند. در ادامه صحت سنجی این پدیده بررسی می شود.

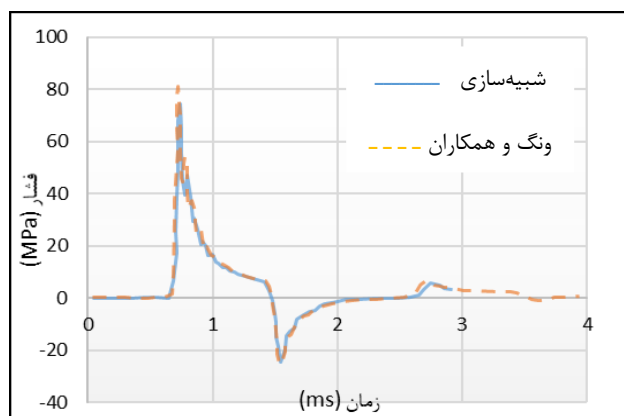


شکل ۶: مقایسه انتشار موج شوک به همراه اندرکنش سطح آزاد در مطالعات ونگ و همکاران [۳۲] (شکل بالا) و شبیه سازی انجام شده (شکل پایین).



شکل ۵: نمایی از مکان نقاط هدف نسبت به منبع انفجار و سطح آب [۳۲].

مشخصات مدل همانند مشخصات ذکر شده در بخش الف بوده و تنها تفاوت در اضافه شدن هوا به مدل می باشد. در شکل ۶، مقایسه بین کانتورهای فشار در فرایندهای زمانی که نشان دهنده انتشار موج شوک می باشند به همراه اندرکنش سطح آزاد و تکامل تدریجی کاویتاسیون دیده می شوند. در شکل ۵، نمایی از نقاط گنج گذاری شده و در راستای مرکز خرج تا سطح آزاد را نشان می دهد. مطابق شکل ۵ می توان رابطه ی بین موقعیت انفجار و سطح آزاد را مشاهده نمود. به عنوان مثال طبق شکل ۷ برای فشار در نقطه ۳ می توان دید که تطابق خوبی بین نتایج فشار اوج موج شوک در مطالعات ونگ و همکاران و شبیه سازی این تحقیق وجود دارد. در جدول ۱، مقایسه فشار حداکثر در نقاط ۱ تا ۵ بین نتایج ونگ و همکاران و شبیه سازی صورت گرفته در این تحقیق آمده است.



شکل ۷: مقایسه ی فشار انفجار در نقطه ی ۳ مطالعات ونگ و همکاران و شبیه سازی این تحقیق [۳۲].

جدول ۱: مقادیر فشار در نقاط ۱ تا ۵ مطالعات ونگ و همکاران و شبیه سازی صورت گرفته

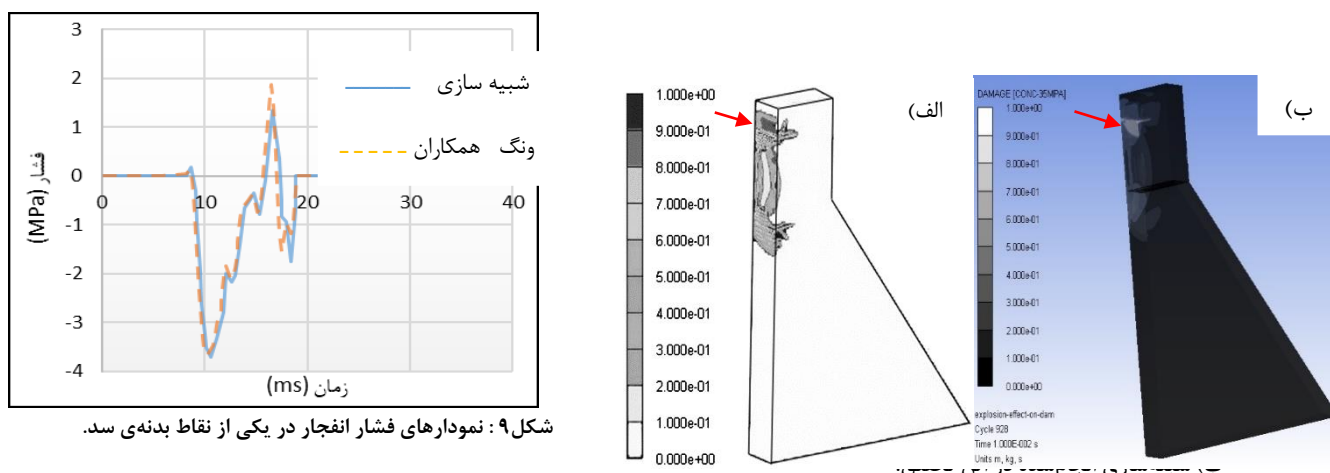
نقاط	فشار حداکثر (MPa)			درصد اختلاف
	شبیه سازی	ونگ و همکاران	اختلاف	
۱	۱۲۰/۳۵	۱۳۲	۰/۰۸۸۲۵	۸/۸۲۵
۲	۹۴/۴	۱۰۰/۹	۰/۰۶۴۴۲	۶/۴۴۲
۳	۷۴/۵	۸۱	۰/۰۸۰۲۴	۸/۰۲۴
۴	۶۱/۶	۶۶/۶	۰/۰۷۵۰	۷/۵
۵	۵۲/۰۸	۵۶/۴	۰/۰۷۶۶	۷/۶۶
		جمع		۳۸/۴۶
		میانگین		۷/۶۹

مشاهده می شود که بین نتایج شبیه سازی و کار ونگ و همکاران طبق جدول ۱ در مقدار فشار منتشر شده در حدود ۷/۷ درصد اختلاف وجود دارد که نسبتاً کم و قابل قبول است. در روند انتشار موج شوک و تشکیل کاویتاسیون نیز تفاوت قابل ملاحظه ای دیده نمی شود و از این لحاظ نتایج قابل قبول هستند.

۳-۳-۲- صحت سنجی پاسخ و خرابی سازه تحت اثر انفجار زیر آب

در این بخش به صحت سنجی پاسخ و خرابی سازه تحت اثر انفجار زیر آب پرداخته می شود. در همین جهت پژوهش ونگ و همکاران در شبیه سازی عددی پاسخ سازه ای یک سد بتنی نسبت به انفجار در زیر آب و هوا [۱] بررسی می گردد. در تحقیق مذکور، از یک روش کامل

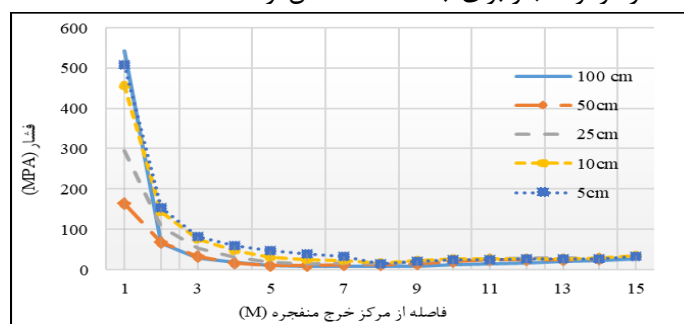
عددی با روش اویلر و لاگرانژ درگیر جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی یک سد بتنی ثقیلی نسبت به انفجار زیرآب با لحاظ سطح مشترک آب-هوا و اندرکنش سازه-موج شوک استفاده شده است. در پژوهش حاضر مدل خسارت دینامیکی RHT برای بتن و مدل جانسون-هولمکوئست^۹ (JH-2) برای سنگ بستر سد استفاده شده است. در شکل ۸ و ۹، به ترتیب مقایسه خرابی بدنه سد تحت انفجار زیرآب و نمودار فشار انفجار در یکی از نقاط بدنه‌ی سد در مطالعات ونگ و همکاران و شبیه‌سازی این تحقیق آمده است. همان‌طور که از شکل ۸ و ۹ مشخص است تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی این تحقیق و نتایج مطالعات ونگ و همکاران در شبیه‌سازی محاسبه پاسخ و خرابی سازه‌ای وجود دارد.



۳-۴- تحلیل حساسیت

۳-۴-۱- ابعاد شبکه

به منظور تعیین ابعاد شبکه‌ی مش، اندازه آن از ۱۰۰ تا ۵ سانتی‌متر کاهش پیدا کرد تا مش بهینه جهت مدل‌سازی تعیین گردد. در شکل ۱۰، نمودار فشار در نقاط بافاصله واحد از مرکز انفجار برای ابعاد مختلف مش ارائه شده است.



شکل ۱۰: نمودارهای فشار نقاط با مش بندی‌های مختلف.

مطابق شکل ۱۰ دیده می‌شود که بهترین مش با توجه به همگرایی نزدیک بین مش‌های ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بوده که به جهت حجم مدل و مدت‌زمان شبیه‌سازی کمتر، مش ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد.

۳-۴-۲- ابعاد مدل و مرزهای جاذب

ابعاد محیط‌های مختلف آب، هوا، خاک و سازه باید به گونه‌ای تعیین شود تا ضمن کمتر شدن حجم مدل و کوتاه‌تر شدن محاسبات و زمان شبیه‌سازی، به صحت و دقت نتایج خللی وارد نگردد. برای این امر در کنار تعیین تقارن صفحه‌ای برای مدل، با توجه به محیطی که نقش اصلی را در حدود مدل ایفا می‌نماید مراحل حساسیت‌سنجی معلوم می‌گردد.

الف- ابعاد حوزه خاکی

⁹ Johnson-Holmquist

برای تعیین ابعاد حوزه خاکی لایه‌ی مارل، شبیه‌سازی برای ابعاد ۸، ۱۲ و ۱۶ متر صورت گرفت و با توجه به وجود همگرایی در نتایج، ابعاد ۸ متر برای لایه‌ی مارل انتخاب شد.

ب- عرض محیط آب

برای مرزهای وجوه خارجی محیط‌های آب و هوا، شرایط مرزی فشار رو به بیرون اعمال شده تا اجازه عبور آزاد امواج شوک و تنش را بدون بازتاب بدهد، اما جهت اطمینان از عدم انعکاس موج از مرزهای خارجی، حساسیت‌سنجی در این مکان‌ها نیز انجام گرفت. برای اینکه عرض مناسب برای محیط آب به دست آید لازم است تا آن قدر عرض محیط آبی افزایش یابد که فشار در نقاط مختلف آب به یک مقدار پایا برسد. زمانی که این عرض مناسب به دست آمد به‌عنوان عرض مبنای طرح انتخاب خواهد شد، که با بررسی انجام‌گرفته، مقدار ۲۴ متر به‌عنوان عرض آب انتخاب شد.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

بخش اول: رفتار در فاز کوتاه مدت سازه (کمتر از ۳۰ میلی ثانیه)

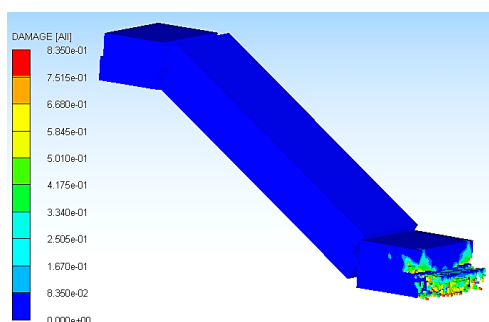
در این قسمت، تأثیر پارامترهای مختلف روی رفتار سازه‌ی موج‌شکن در اثر انفجار زیرآب و خرابی‌های رخ داده در آن بررسی شد. خلاصه این مطالعات در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مطالعات پارامتری انجام‌شده در این تحقیق.

پارامترهای مورد بررسی	عمق انفجار (m)	فاصله مستقیم از سازه (m)	عمق محیط آب (m)	وزن خرج (kg)
۱-۴- وزن خرج منفجره	۱/۲۵	۱۵	۵	۲۰۰-۴۰۰-۶۰۰-۸۰۰-۱۰۰۰
۲-۴- عمق انفجار	۱-۰/۷۵-۱-۱/۲۵-۱-۱/۵-۲-۱/۷۵	۸	۵	۱۰۰۰
۳-۴- فاصله از سطح سازه	۱/۲۵	۳-۵-۱۰-۲۰	۵	۲۰۰-۴۰۰-۸۰۰-۱۰۰۰
۱-۴-۴- عمق محیط آب	۱/۲۵	۱۲/۵-۹-۱۱/۵-۸-۶/۵	۸-۷-۶-۵-۴	۱۰۰۰
۲-۴-۴- عمق ماده منفجره	۴/۲۵-۳/۲۵-۲/۲۵-۱/۲۵	۸	۸-۷-۶-۵	۱۰۰۰

۴-۱- تأثیر وزن خرج

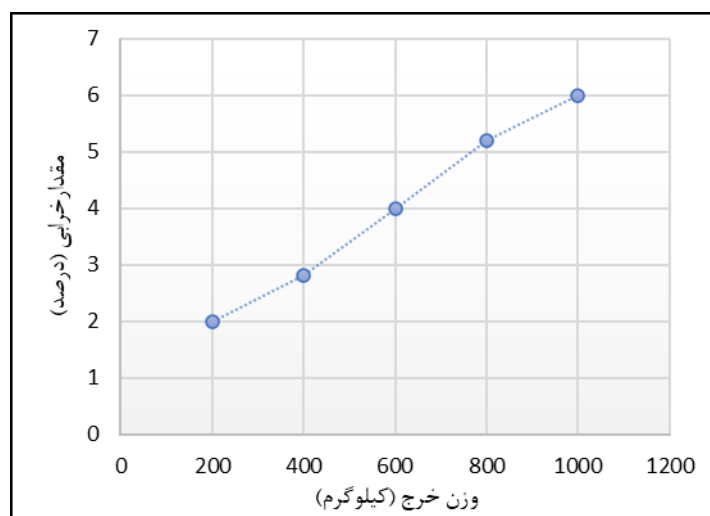
برای ارزیابی تأثیر وزن خرج بر رفتار سازه و خرابی‌های به وجود آمده ناشی از آن، پنج وزن به ترتیب جدول ۲ در نظر گرفته شده و نتایج آسیب ناشی از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. به‌عنوان نمونه، نتایج خرابی موج‌شکن برای خرج ۹۹۰ کیلوگرمی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: خرابی ناشی از انفجار خرج ۱۰۰۰ کیلوگرمی.

در شکل ۱۲، درصد خرابی لایه‌ی آرمور و پنجه در وزن‌های مختلف خرج انفجاری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است در فاصله‌ی ثابت هر چه وزن خرج بیشتر می‌شود خرابی نیز بیشتر می‌شود اما میزان و شدت آن زیاد نیست. با وقوع انفجار در عمق کم و ایجاد پدیده‌هایی چون کاویتاسیون و برش سطح و اثر بازتاب شوک از سطح و بستر آب، فشار رسیده به سطح سازه شدیداً کاهش می‌یابد که نهایتاً موج‌شوکه رسیده به سازه بر خرابی در آن منجر می‌شود با بررسی نتایج تأثیر وزن خرج بر خرابی موج‌شکن (برای

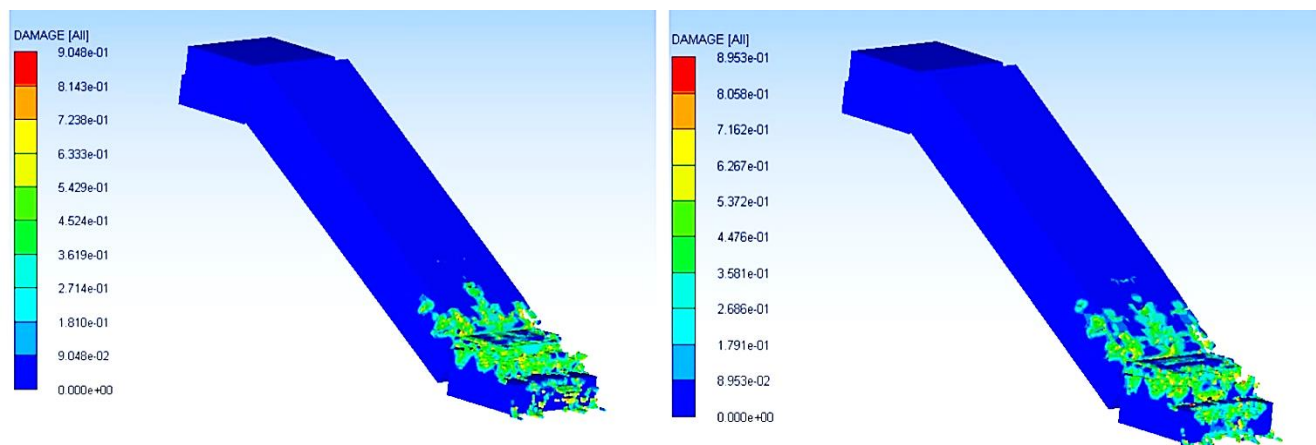
نمونه شکل ۱۱) مشخص است که عمده‌ی خرابی ناشی از انفجارها در فاصله‌ی ۱۵ متری از سازه مربوط به ناحیه‌ی پنجه‌ی موج‌شکن بوده و آسیب مشخصی به لایه‌ی آرمور وارد نمی‌آید.



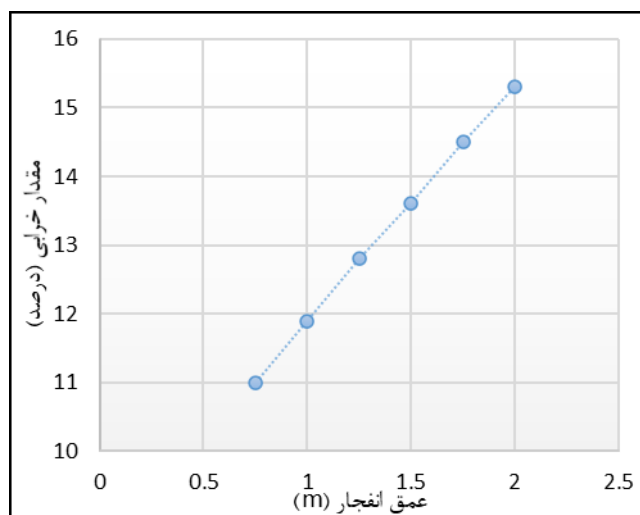
شکل ۱۲: درصد خرابی لایه‌ی آرمور و پنجه در وزن‌های مختلف خرج انفجاری.

۴-۲- عمق خرج انفجار از سطح آب

در ادامه‌ی بررسی اثر مؤلفه‌های مختلف بر خرابی و پاسخ سازه، اثرات عمق انفجار بررسی شد. جهت این بررسی، همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، با ثابت فرض کردن وزن خرج منفجره (۱۰۰۰ کیلوگرم) و فاصله‌ی افقی آن از سازه ۸ متر، تأثیر عمق‌های مختلف ماده منفجره لحاظ گردید. در شکل ۱۳ خرابی ایجادشده در عمق ۲ متری و عمق ۰/۷۵ متری ماده منفجره نشان داده شده است.



شکل ۱۳: مقایسه درصد خرابی‌های در آرمور موج‌شکن در عمق‌های مختلف انفجاری، عمق ۲ متر (سمت راست) و عمق ۰/۷۵ متر (سمت چپ).

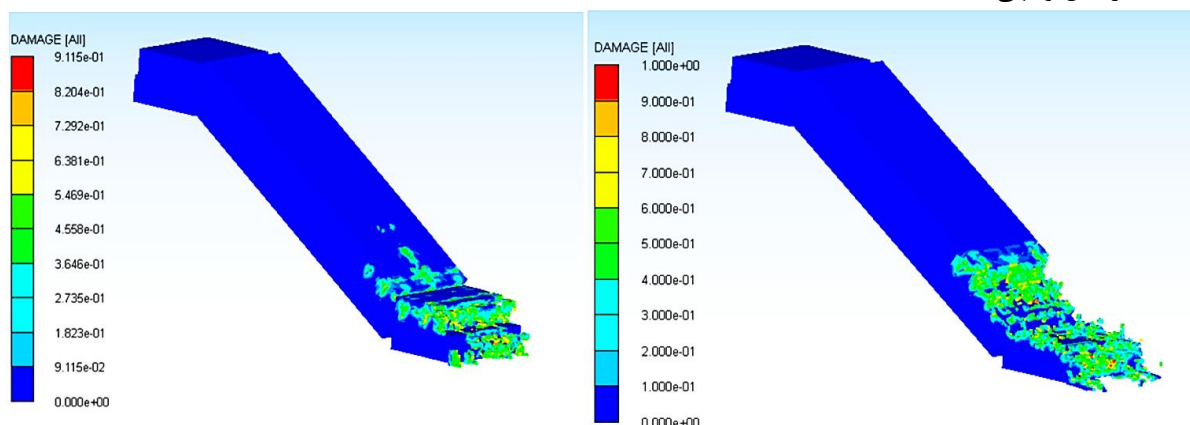


شکل ۱۴: درصد خرابی لایه‌ی آرمور و پنجه در عمق‌های مختلف انفجار.

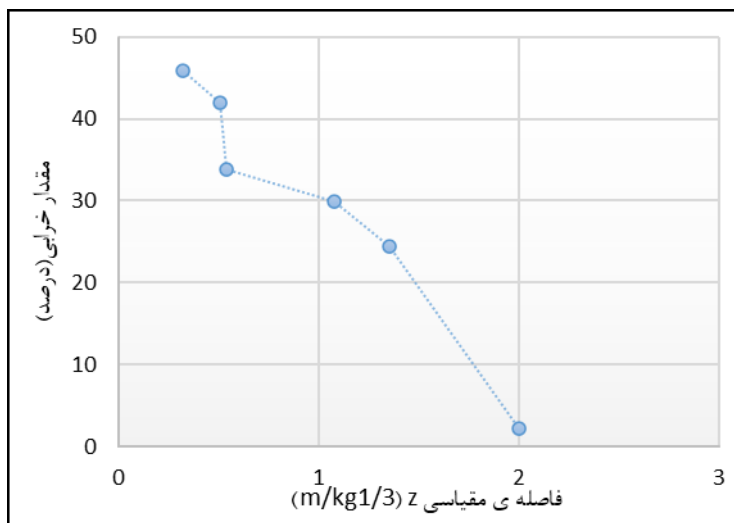
مطابق شکل ۱۴، هر چه عمق انفجار بیشتر شده است درصد خرابی نیز بیشتر می‌گردد به این خاطر که محیط انفجار همگن‌تر و اثرات تضعیفی موج شوک همانند برش سطحی و بازتاب از سطح آب دیرتر رخ می‌دهد؛ بنابراین موج شوک رسیده به سطح سازه قوی‌تر و خرابی ایجاد می‌شود. همچنین حداکثر خرابی مطابق شکل ۱۳، برابر ۱۵ درصد و حداقل آن برابر ۱۱ درصد بلوک‌های بتنی می‌باشد. دیده می‌شود که با افزایش هر ۰/۲۵ متر به عمق انفجار، تنها حدود یک درصد به خرابی بلوک‌های لایه‌ی آرمور افزوده می‌گردد. لذا با توجه به اینکه در این بررسی فاصله خرج از سازه نسبت به عمق خرج از سطح آب خیلی بیشتر می‌باشد بنابراین پارامتر عمق انفجار نسبت به پارامترهایی چون وزن و فاصله تأثیر چندانی نداشته است. در اینجا نیز بیشترین آسیب مربوط به پنجه‌ی موج‌شکن و درصد کمی از لایه‌ی بالایی آرمورها می‌باشد.

۳-۴- تأثیر فاصله افقی خرج از موج‌شکن

با توجه به جدول ۲، تأثیر فواصل مختلف افقی خرج از سازه روی پاسخ موج‌شکن و خرابی‌های رخ داده در آن بررسی شده است. به عنوان نمونه، در شکل ۱۵، خرابی‌های ایجاد شده برای فواصل ۱۰ و ۵ متری نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت و به وضوح از شکل ۱۵، مشخص است با کم شدن فاصله، عمق و وسعت خرابی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۶، مقایسه بین درصد خرابی‌های رخ داده در آرمور برای فواصل افقی مختلف ارائه شده است. با مقایسه‌ی بین خرابی در حالت تغییر فاصله و تغییر عمق (بخش قبل)، میزان اهمیت و تأثیرگذاری فاصله به وضوح مشخص می‌شود، همان‌طور که از شکل ۱۶ مشخص است در فاصله‌ی که متناظر با فاصله‌ی مقیاسی $(m/kg^{1/3})$ ۰/۵۳۵ یک شکستگی رخ داده و بعد از آن روند نزولی خرابی ادامه می‌یابد در واقع در این فاصله درصد خرابی به مقدار حدود ۱۰ درصد افت می‌کند که مقدار قابل توجهی است.



شکل ۱۵: خرابی ناشی از انفجار خرج ۸۰۰ کیلوگرمی در فاصله‌ی ۵ متری (سمت راست) و فاصله‌ی ۱۰ متری (سمت چپ).



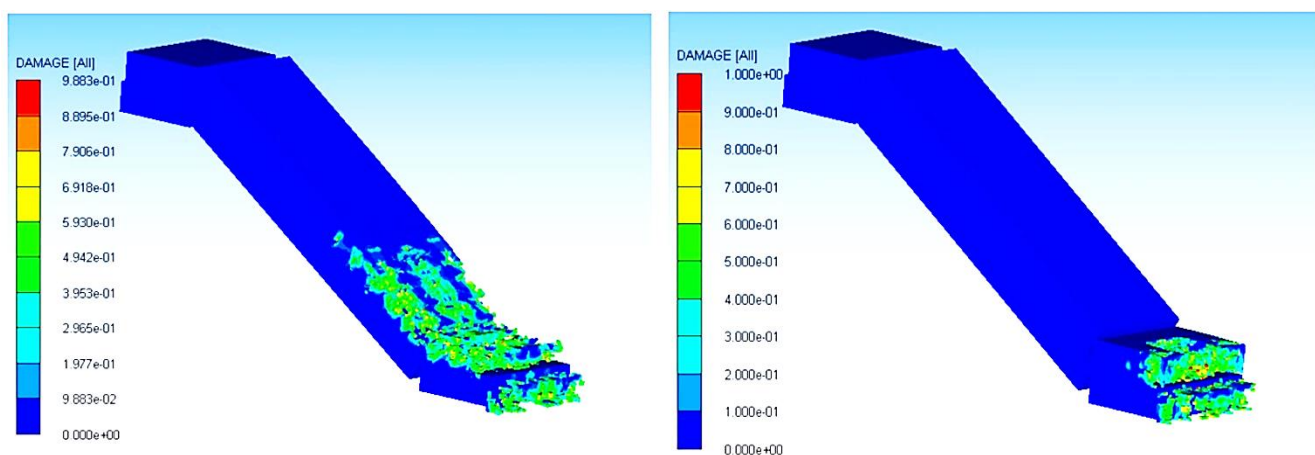
شکل ۱۶: درصد خرابی لایه‌ی آرمور در Z های مختلف.

۴-۴- عمق محیط آب

با توجه به جدول، تأثیر عمق‌های مختلف آب با وزن خرج و فاصله‌ی افقی ثابت بررسی شد. مکان خرج نسبت به سطح آب در دو حالت ارزیابی گردید که به صورت ذیل می‌باشد.

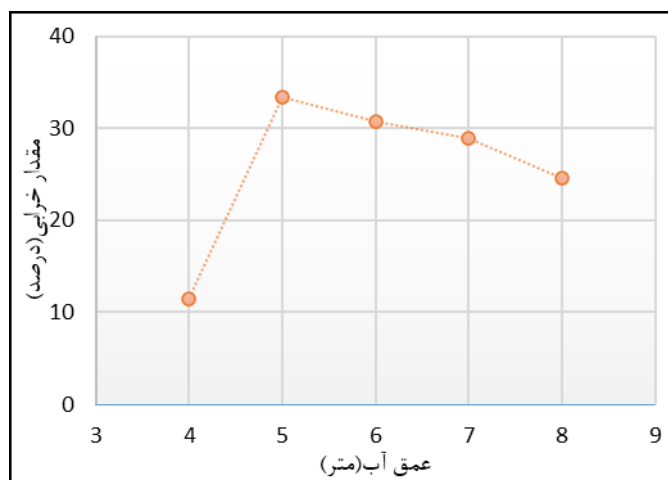
حالت اول: موقعیت خرج منفجره نسبت به سطح آب ثابت

در این حالت عمق انفجار و مکان خرج نسبت به سطح آب ۱/۲۵ متر ثابت بوده و تنها عمق آب از ۴ تا ۸ متر افزایش یافته است. برای نمونه در شکل ۱۷ و ۱۸، آرمور برای عمق آب‌های ۴ و ۸ متری ارائه شده است. عواملی که در این بررسی بر میزان خرابی آرمورها تأثیر گذار است فاصله خرج از پنجه و فاصله آن از بستر می‌باشد. هر چه فاصله خرج از پنجه کمتر شود و یا فاصله از بستر کمتر باشد (به علت تأثیر بازتاب‌های تقویتی از بستر) انفجار مخرب‌تر خواهد بود. چون فاصله از سطح آب و همچنین فاصله از آرمورها یکسان می‌باشد این عوامل تأثیر چندانی بر تغییر در میزان خرابی‌ها نخواهند داشت. همان‌طور که از شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشخص است با افزایش عمق آب تا ۵ متر، درصد خرابی سریع افزایش یافته و از آن به بعد رشد درصد خرابی کاهش می‌یابد. به این علت که امواج شوک تا عمق ۵ متر نزدیک‌ترین فاصله را با پنجه موج‌شکن دارند و در نتیجه بیشترین آسیب را به موج‌شکن و پنجه آن وارد خواهند کرد. اما با بالاتر رفتن سطح آب به علت آنکه فاصله‌ی خرج نسبت به پنجه افزایش و نسبت به آرمورها ثابت می‌ماند و از طرف دیگر فاصله خرج از بستر افزایش یافته و موج‌های بازتاب تقویتی از بستر کاهش می‌یابد، در نتیجه خرابی با افزایش هر چه بیشتر عمق از ۵ متر، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۷: خرابی لایه‌ی آرمور برای عمق آب ۴ متر (سمت راست) و عمق آب ۸ متر (سمت چپ).

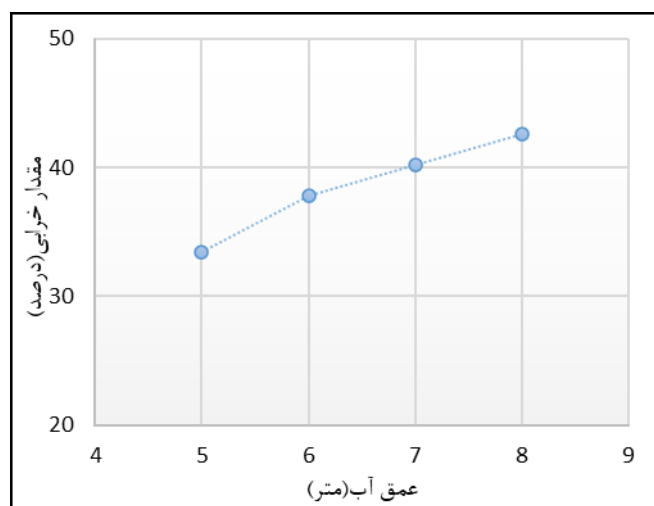
در شکل ۱۸، درصد خرابی آرمور برای عمق‌های مختلف آب باهم مقایسه شده است.



شکل ۱۸: درصد خرابی لایه‌ی آرمور برای عمق‌های مختلف آب.

حالت دوم: عمق خرج منفجره متغییر نسبت به سطح آب

در این حالت، عمق آب تغییر می‌نماید اما موقعیت خرج ثابت نگه‌داشته می‌شود و با افزایش عمق آب از ۵ تا ۸ متر، عمق انفجار نیز از ۱/۲۵ تا ۴/۲۵ متر افزایش می‌یابد. در شکل ۱۹، مقایسه بین درصد خرابی‌ها (بیش از ۱۰ درصد) برای حالات مختلف عمق آب ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۱۹، مشخص است با افزایش عمق و ثابت بودن مکان خرج و در نتیجه افزایش عمق خرج، میزان خرابی‌ها برای هر متر افزایش عمق آب حدود ۵ درصد می‌یابد. علت این امر با توجه به استدلال انجام‌شده در بخش قبل قابل تفسیر می‌باشد. با توجه به اینکه عوامل مؤثر بر میزان خرابی‌ها، فاصله خرج از سطح آب و بستر و همچنین فاصله خرج از آرمور و پنجه می‌باشد؛ فلذا به علت ثابت بودن فاصله خرج از بستر، پنجه و آرمور، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار فاصله از سطح آب می‌باشد. با افزایش عمق آب و افزایش فاصله از سطح آب، تأثیر کاهش سطح آب کاهش یافته و در نتیجه میزان خرابی‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹: درصد خرابی لایه‌ی آرمور برای عمق‌های مختلف آب.

بخش دوم: رفتار در فاز میان‌مدت سازه (کمتر از ۳۰۰ میلی ثانیه)

در این قسمت، تأثیر پارامترهای مختلف سازه‌ای مانند، شیب لایه‌های مختلف سازه، ابعاد بلوک‌های لایه‌ی آرمور، روی رفتار سازه‌ای موج-شکن در اثر انفجار زیرآب و خرابی‌های رخ داده در آن بررسی می‌شود. خلاصه این مطالعات در جدول ۳ ارائه شده است. به این علت این زمان

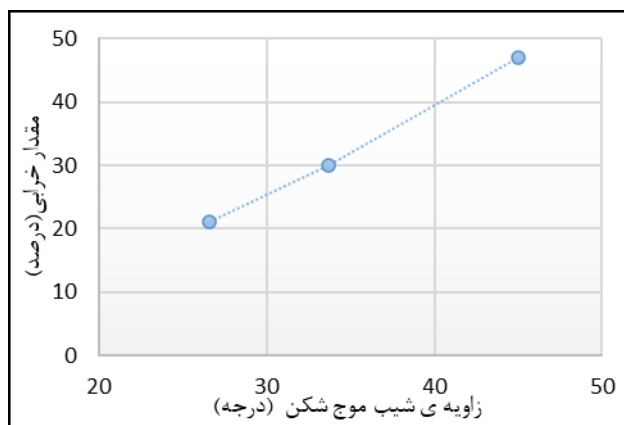
فاز میان مدت نامیده شده که سازه هنوز خرابی پایا و ماندگار خود را نشان نداده، فلذا هنوز فاز بلندمدت و پایا رخ نداده و درعین حال مدت زمان نسبت به فاز کوتاه مدت، بسیار بیشتر (حدود ۱۰ برابر) هست.

جدول ۳: خلاصه نتایج شبیه سازی میان مدت.

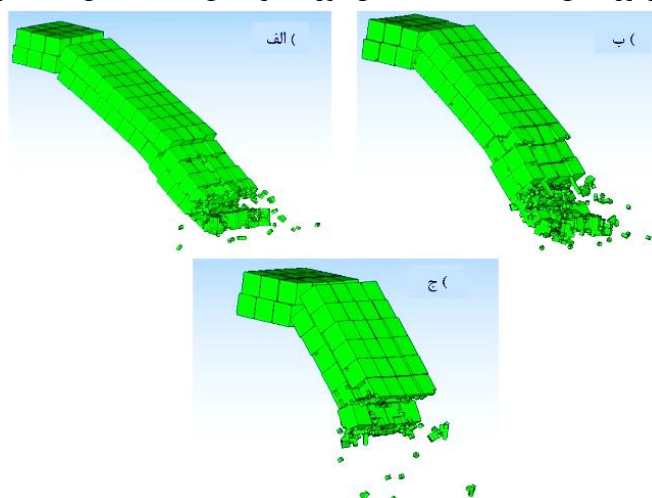
پارامترهای مورد بررسی	زاویه ی شیب موج شکن (درجه)	ابعاد آرمور (m)	تعداد لایه ی پنجه	نوع خرابی سازه (تقریب)
۴-۶- زاویه ی شیب موج شکن	۲۷	۱/۲	۲	عمدتاً در پنجه و کمتر از ۱۰ درصد از بلوک های لایه ی آرمور
	۳۴	۱/۲	۲	پنجه و کمتر از ۲۰ درصد بلوک های لایه ی آرمور
	۴۵	۱/۲	۲	پنجه و کمتر از ۳۵ درصد بلوک های لایه ی آرمور
۴-۷- اثر ابعاد آرمور	۳۳/۶۹	۰/۶	۴	پنجه و کمتر از ۱۵ درصد بلوک های لایه ی آرمور
	۳۳/۶۹	۱/۲	۲	پنجه و کمتر از ۲۰ درصد بلوک های لایه ی آرمور
	۳۳/۶۹	۲/۴	۱	پنجه و کمتر از ۳۰ درصد بلوک های لایه ی آرمور

۴-۶- زاویه ی شیب موج شکن

طبق جدول ۳ برای لحاظ اثر شیب موج شکن، سه شیب ۳۴ درجه (شیب اولیه)، ۴۵ درجه و ۲۷ درجه بررسی شد. آسیب وارده به موج شکن در شکل ۲۰ نشان داده شده است. وزن خرج انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم و فاصله از سازه ۸ متر می باشد. در شکل ۲۰، درصد خرابی آرمور نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۲۱ مشخص است هرچه زاویه ی شیب موج شکن افزایش یابد، مقدار خرابی بیشتر می شود.



شکل ۲۱: درصد خرابی برای حالت های مختلف شیب موج شکن.



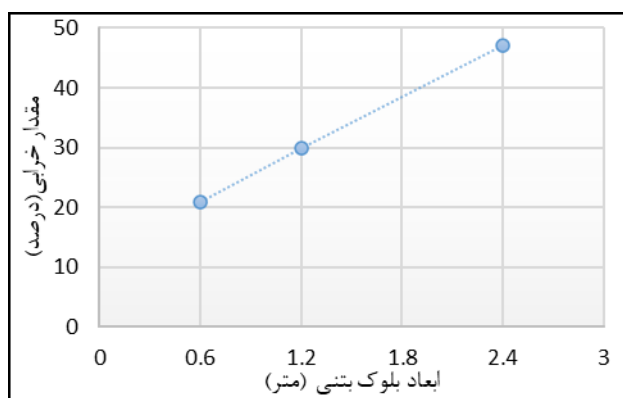
شکل ۲۰: خرابی موج شکن (الف) با شیب ۲۷ درجه

(ب) شیب ۳۴ درجه، (ج) شیب ۴۵ درجه.

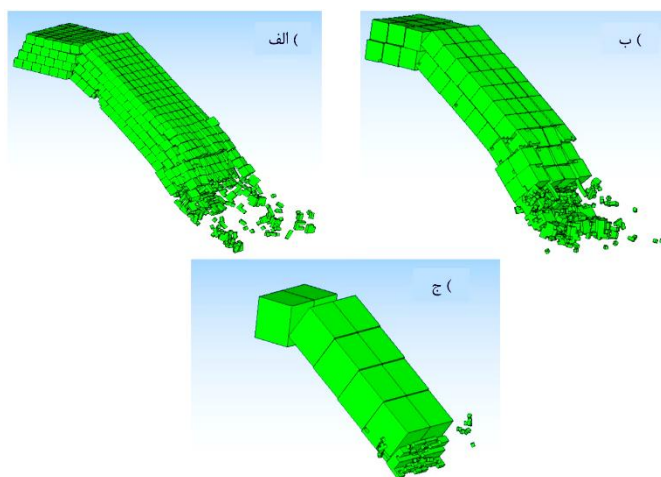
علت این پدیده، این می باشد که با افزایش هر چه بیشتر شیب موج شکن، درست است که حجم مصالح کاهش می یابد و طرح اقتصادی تر می شود منتها در عوض علاوه بر کاهش پایداری شیب، زاویه برخورد موج انفجار به آرمور به عمود نزدیک تر شده و در نتیجه خرابی نیز افزایش می یابد. همچنین با بررسی نمودارهای تنش در آرمورها، می توان تنش کششی را مهم ترین عامل خرابی آرمورها دانست که با افزایش شیب و کاهش زاویه ی برخورد امواج شوک با راستای قائم مقادیر آن نیز افزایش یافته است.

۴-۷- اثر ابعاد آرمور:

برای بررسی اثر ابعاد آرمور در خرابی نهایی آرمورها، طبق جدول ۳ ابعاد ۰/۶، ۱/۲ و ۲/۴ متری لحاظ گردید. وزن خرج انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم و فاصله از سازه ۸ متر می‌باشد. در شکل ۲۲ و ۲۳، به ترتیب نحوه خرابی و درصد خرابی برای ابعاد مختلف آرمور نشان داده شده است. هرچه اندازه‌ی آرمورها بیشتر شده، تنش کششی در آرمور نیز بیشتر شده، با دو برابر شدن اندازه از ۰/۶ متر به ۱/۲، تنش کششی از ۱۴ مگا پاسکال به ۱۹ مگا پاسکال افزایش پیدا کرده و در آرمور به‌اندازه ۲/۴ متر مقدار تنش به حدود ۶۰ مگا پاسکال رسیده است. یعنی با افزایش هر چه بیشتر بلوک بتنی آرمور، جذب انرژی انفجار بیشتر شده و در نتیجه میزان تنش کششی و خرابی نیز افزایش خواهد یافت.

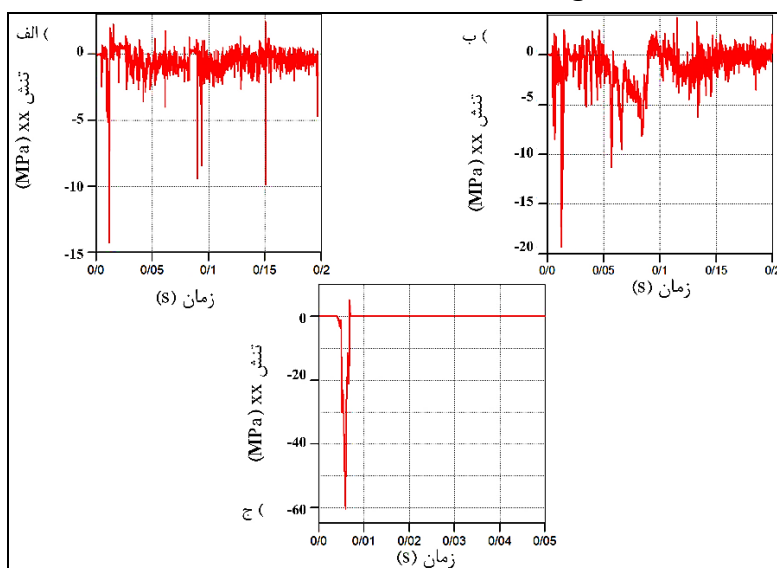


شکل ۲۳: درصد خرابی آرمورها برای ابعاد مختلف آرمور.



شکل ۲۲: نحوه خرابی موج شکن (الف) آرمور مکعب ۰/۶ متری (ب) آرمور ۱/۲ متری، (ج) آرمور ۲/۴ متری.

همان‌طور که از شکل ۲۲ و ۲۳ به‌وضوح مشخص است هرچه ابعاد آرمورهاى موج‌شکن افزایش یافته، مقدار خرابی بیشتر می‌شود. در شکل ۲۴، میزان تنش xx برای المان مقابل خرج انفجاری ارائه شده است.



شکل ۲۴: میزان تنش xx گيج در المان مقابل خرج انفجاری (الف) آرمور ۰/۶ متری، (ب) آرمور ۱/۲ متری، (ج) آرمور ۲/۴ متری.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، پاسخ موج شکن های توده سنگی و موده های خرابی آن ها تحت اثر انفجار زیر آب، مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از نرم افزار المان محدود اتوداین، جهت شبیه سازی و تحلیل پاسخ ها استفاده شد. برای صحت سنجی، ابتدا نحوه ی انتشار امواج ناشی از انفجار زیر آب و اثر خرابی آن بر یک سازه ی سد بتنی ارزیابی گردید و پس از آن، پاسخ مدل پیشنهاد شده برای شبیه سازی موج شکن با استفاده از نرم افزار برای تغییرات وزن ماده منفجره و پارامترهایی هندسی چون عمق محیط آب، عمق انفجاری رویداد، تغییر شیب سازه-ای موج شکن و اندازه ی آرمور آن بررسی گردید. خلاصه نتایج این تحقیق به شرح ذیل می باشد

۱- در فاصله ی ثابت و خارج از محدوده ی نزدیک انفجار از سازه، هر چه وزن خرج بیشتر شود خرابی نیز بیشتر شده اما میزان و شدت آن زیاد نبوده و حداکثر ۶ درصد کل بلوک های بتنی پنجه و آرمور را شامل می شود.

۲- دیده شد با ثابت بودن عمق محیط آب، هر چه عمق انفجار بیشتر شده است درصد خرابی نیز بیشتر می شود و حداکثر خرابی در این حالت برابر ۱۵ درصد بلوک های بتنی به دست آمد.

۳- همچنین مشخص گردید که با کم شدن فاصله ی مقیاسی انفجار از سازه، عمق و وسعت خرابی بیشتر شده و در این حالت بیشترین مقدار خرابی ۴۵ درصد بلوک های بتنی شد.

۴- با افزایش عمق محیط آب و ثابت بودن مکان خرج و در نتیجه افزایش عمق انفجار، میزان خرابی ها برای هر متر افزایش عمق آب حدود ۵ درصد افزایش یافته و حداکثر خرابی ایجاد شده، حدود ۴۳ درصد بلوک های بتنی می باشد.

۵- نقاط آسیب پذیر برای موج شکن نسبت به انفجار زیر آب شامل پنجه و آرمورهای واقع در زیر آب و در راستای مستقیم انفجار و در نزدیکی پنجه می باشد.

۶- در فاز کوتاه مدت، بحرانی ترین حالت خرابی برای عمق انفجار بیشتر و برای فواصل مقیاسی مختلف مربوط به محدوده ی انفجار نزدیک به سازه و فاصله ی مقیاسی کمتر از $0.535 \text{ (m/kg}^{1/3})$ می باشد.

۷- در فاز میان مدت، بیشترین مقدار خرابی ۴۷ درصد به دست آمده برای حالتی که بلوک بتنی بزرگترین اندازه خود با ابعاد ۲/۴ متر باشد و ۴۶ درصد برای حالتی که شیب سازه ای ۴۵ درجه است. با توجه به نمودارهای به دست آمده، مشاهده گردید با کاهش یک چهارمی ابعاد بلوک های بتنی میزان خرابی حدود دو برابر کاهش یافته و نیز با نصف شدن زاویه ی شیب لایه های موج شکن، خرابی ایجاد شده در آن ها حدود یک دوم برابر می گردد.

۸- برای فاز میان مدت شبیه سازی، خرابی با افزایش هر چه بیشتر شیب لایه های سازه ای موج شکن و یا اندازه بلوک های بتنی لایه ی آرمور بیشتر خواهد شد و لذا ایمن ترین حالت برای موج شکن با بلوک های کوچک تر لایه ی آرمور و سازه با شیب کمتر (با رعایت الزامات دیگر طراحی و اجرا) است.

۹- به طور کلی محدوده ی بحرانی انفجار در فاصله کمتر از ۸ متری از سازه، عمق بحرانی محیط آب ۵ متر و عمق بحرانی انفجار ۲ متر بدست آمده که در این فواصل آسیب وارده به سازه قابل توجه بوده و منجر به لزوم تمهیدات تعمیر، تعویض و جبرانی بلوک های بتنی لایه ی آرمور می شود.

۱۰- مشخص شد عامل اصلی خرابی در آرمورهای بتنی خرابی کششی بتن ناشی از انفجار می باشد که جهت بهبود عملکرد آن ها می توان از آرماتورهای کششی محاسبه شده و یا استفاده از بتن با مقاومت های بالاتر فشاری و کششی استفاده گردد.

مراجع

- [1] Wang, G., Zhang, S., Yuan, Kong., & Li, H. (2015). Comparative Study of the Dynamic Response of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater and Air Explosions. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29 (4), 589-605.
- [2] Tiantang, Yu. (2009). Dynamical Response Simulation of Concrete Dam Subjected to Underwater Contact Explosion Load. *WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 769-774.
- [3] Li, Q., Wang, G., Lu, W., Niu, X., Chen, M., & Yan, P. (2018). Influence of Reservoir Water Levels on the Protective Performance of Concrete Gravity Dams Subjected to Underwater Explosions. *Journal of Structural Engineering*, 144(9),
- [4] Zhang, S., Wang, G., Chao, W., Bohui, P., & Chengbo, D. (2014). Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion. *Engineering Failure Analysis*, 36, 49-64.

- [5] Saito, T., Marumoto, M., Yamashita, H., Hosseini, S.H.R., Nakagawa, A., T. Hirano., & Takayama, K. (2003). Experimental and numerical studies of underwater shock wave attenuation, *Shock Waves*, 13(2), 139-148.
- [6] SHA, S., Zhihua, C., Xiaohai, J., & Junli, H. (2012). Numerical investigations on blast wave attenuation, *obstacles Procedia Engineering* 45, 453 – 457.
- [7] Zhang, A., Yang, W., & Yao, X. (2012). Numerical simulation of underwater contact explosion. *Ocean Research* 34, 10-20.
- [8] Saadatfar, S., & Zahmatkesh, A. (2018). Evaluation of Underwater Blast on Concrete Gravity Dams Using Three-Dimensional Finite-Element Model. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(1), 69-78.
- [9] Chen, J., Liu, X., & Xu, Q. (2016). Numerical Simulation of Damage Mode of Concrete Gravity Dam under Close-in Explosion. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-11.
- [10] Zhao, X., Wang, G., Lu, W., Chen, M., Yan, P., & Zhou, Chuangbig. (2018). Effects of close proximity underwater explosion on the nonlinear dynamic response of concrete gravity dams with orifices. *Engineering Failure Analysis*, 92, 566-586.
- [11] Zhang, A., Zeng, L., Cheng, X., Wang, S., & Chen, Yu. (2011). The evaluation method of total damage to ship in underwater explosion. *Ocean Research*. 33(4), 240-251.
- [12] Parkes, J., (2014). Impact of Explosions on Embankment Dams and Levees, Senior Professional Associate, *Geotechnical & Tunneling*, Parsons Brinckerhoff.
- [13] XU, T., (2015). Numerical Simulation of Embankment Dams Subjected to Blast Loadings, Master of Science, Hong Kong University of Science and Technology.
- [14] Can Ulker, M.B., Tatlioglu, E., & Aysen Lav, M. (2018). Dynamic response and liquefaction analysis of seabed-rubble mound breakwater system under waves. *Applied Ocean Research* 78, 75-87.
- [15] Jafarian, Y., Alielahi, H., Sadeghi, A., & Vakili, R., (2010). Seismic Numerical Simulation of Breakwater on a Liquefiable Layer: IRAN LNG Port. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 348-360.
- [16] Cihan, K., & Yuksel, Y. (2013). Deformation of breakwater Armored Artificial Units under Cyclic Loading. *Applied Ocean Research* 42, 79–86.
- [17] Cihan, K., & Yuksel, Y. (2011). Deformation of Rubble-Mound Breakwaters under Cyclic Loads. *Coastal Engineering*, 58(6) 528–539.
- [18] Zhang, J. M., Zhang, J.H., Wang, G., & Chen, Y. (2009). Safety Evaluation of Breakwaters Based on Physical and Numerical Modelling. *Ocean Engineering*, 36(11), 852–862.
- [19] Zhao, H.Y., Liang, Z.D., Jeng, D.-S., Zhu, J.F., Guo, Z., & Chen, W.Y. (2018). Numerical investigation of dynamic soil response around a submerged rubble mound breakwater. *Ocean Engineering* 156, 406-423.
- [20] Pak, A., & Sarfaraz, M. (2014). A Novel Force-Based Approach for Designing Armor Blocks of High-Crested Breakwaters, *Scientia Iranica*, 21(3), 534-547.
- [21] Ye, J.H., & Jeng, S. (2013). Three-Dimensional Dynamic Transient Response of a Poro-Elastic Unsaturated Seabed and A Rubble Mound Breakwater due to Seismic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 14–26.
- [22] Smith, P. D., & Hetherington, J. G. (1994). **Blast and Ballistic Loading of Structures**. First published, Butterworth-Heinemann Ltd.
- [23] Cole, R. H. (1948). **Underwater Explosions**. New York, Dover Publications, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [24] Swisdak, M. M. (1978). **Explosion Effects and Properties. Part II. Explosion Effects in Water. DTIC Document, 25-29.**
- [25] Ministry of Roads and Transportation (1384). *Ports and Marine Structures Design Manual (Breakwaters and Coastal Protection Structures 300-5)*, 64-75.
- [26] Shafiei, M., Sedaghi, M., & Soadaei, H. (1390). *Report of Revision of Studies and Design of Phase one & two of Goiter Breakwaters*. 174.
- [27] Salehi, A., & Moradlo, J. (1392). Numerical investigation of Nonlinear Behavior Concrete Gravity Dams under Explosive Loading, *Seventh Congress of Civil Engineering*, Zahedan, 3.
- [28] **ANSYS Autodyne**, materials library.
- [29] **ANSYS Autodyne, User's Manual**, Release 17.0, ANSYS, November 2015.
- [30] Lu, G., Li, X., & Wang, K. (2012). A Numerical Study on the Damage of Projectile Impact on Concrete Targets. *Computer and Concrete* 9(1), 21-33.
- [31] Fallah, A. (2018). Simulation Response of the Rubble Mound Breakwater Subject to Explosion of the Terrorism Boat. Master of Science, Malek Ashtar University of Technology.
- [32] Wang, G., Zhang, S., Yu, M., Li, H., & Kong, Y. (2014). Investigation of the Shock Wave Propagation Characteristics and Cavitation effects of underwater explosion near boundaries. *Ocean Research*, 46, 4