

مدل سازی بارهای ضربه‌ی انفجاری مؤثر بر عرشه‌ی شناورها و تحلیل پاسخ محلی سازه‌ی در مقابل آن‌ها

محمدحسین صادقی (کارشناس ارشد)

محمد رضا خدمتی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی دپه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

امین نجفی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف
دوره ۳-۲۸، شماره ۱، ص. ۴۷-۵۶

در این نوشتار چگونگی مدل سازی بارهای انفجاری منتهی از شلیک تسلیحات عرشه‌ی شناورها مورد مطالعه قرار گرفته است. در آغاز با بهبود یک روش مدل سازی موجود، تخمینی بهتر از توزیع بارهای ضربه‌ی ناشی از شلیک تسلیحات عرشه ارائه می شود. سپس صحت نتایج حاصل از کاربرد مدل بهبود یافته، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود ارزیابی می شود. آنگاه، ضمن تخمین توزیع بارهای ضربه‌ی انفجاری مؤثر بر عرشه یک شناور آلومینیومی تخمین، پاسخ محلی سازه‌ی عرشه به این نوع بارها مورد مطالعه قرار می گیرد. مشاهده می شود که ورق‌ها در میانه‌ی مرزهای خود مستعد تسلیم شدن هستند و با افزایش فرکانس شلیک در معرض افزایش ارتعاشات قرار می گیرند. در فرکانسی خاص از شلیک (حدود نصف فرکانس طبیعی سازه)، بحرانی ترین حالت برای ورق اتفاق می افتد.

واژگان کلیدی: بار ضربه‌ی انفجاری، پاسخ دینامیکی غیرخطی گذرا، میرایی سازه، منطقه‌ی تفتیده، روش اجزاء محدود، روش مقیاس گذاری.

sadeghi.zisa@yahoo.com
khedmati@aut.ac.ir
najfi.sharif@yahoo.com

مقدمه

عرشه‌ی شناورهای رزمی مکانی مناسب برای نصب تسلیحات مورد نیاز در مقاصد رزم یا دفاع است. همگام با توسعه‌ی فناوری، انواع تسلیحات با قابلیت‌های بالای نواخت تیر نیز ساخته شده‌اند. پس از انجام فرایند شلیک در این نوع تسلیحات، گلوله در داخل لوله به وسیله‌ی یک جبهه‌ی هوای گرم پرفشار به سمت جلو رانده می شود. در آستانه‌ی خروج گلوله از دهانه‌ی سلاح، هوای پرفشار در معرض هوای آزاد قرار گرفته و در الگویی تقریباً کروی، و نیز متقارن، در فضا انتشار می یابد. این گونه امواج کروی را اصطلاحاً «امواج انفجاری»^۱ ناشی از شلیک سلاح می نامند. امواج انفجاری منتهی از شلیک تسلیحات ماهیت ضربه‌ی دارند و از جمله ویژگی‌های آن‌ها می توان به مواردی همانند فشار بیشینه، دمای بالا و سرعت زیاد اشاره کرد. به عبارت دیگر، این نوع بارها در دسته بارهای متغیر سریع^۲ مؤثر بر سازه‌ی کشتی‌ها قرار می گیرند. دمای شعله‌ی آتش خروجی از دهانه‌ی لوله‌ی سلاح بین ۱۷۰۰ تا ۳۷۰۰ سانتی گراد خواهد بود. طبق روابط آذرودینامیک، در صورت برخورد موج انفجاری به یک سطح، موج برگشتی به مراتب پرفشارتر، و در قیاس با موج برخوردی نیز کم سرعت تر خواهد بود. فشار بیشینه‌ی موج انفجاری سلاح، آثاری مخرب بر خدمه‌ی سلاح، سازه و تجهیزات نزدیک به سلاح دارد. به طور معمول خدمه و برخی از تجهیزات در فاصله‌ی بین ۱۵ تا ۲۰ کالیبر (قطر لوله سلاح) قرار دارند.^{۱]}

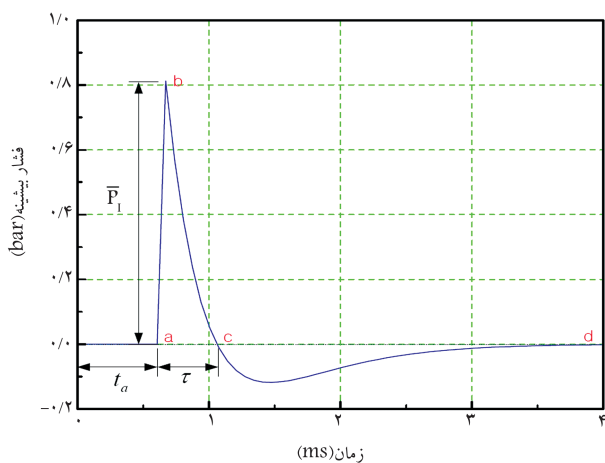
* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۵/۲۵، اصلاحیه ۱۳۸۹/۹/۷، پذیرش ۱۳۸۹/۱۱/۲۳.

جنس مصالح مورد استفاده در ساخت شناورهای رزمی بستگی به عواملی همچون ابعاد، سرعت و کاربری شناور دارد، اما عموماً از فولاد یا آلیاژهای آلومینیم یا مواد مرکب انتخاب می شود. در این میان، ضرورت دستیابی به نسبت بالایی از استحکام به وزن در شناورهای تندرو باعث شده تا در ساخت این دسته از شناورها از مصالح آلومینیومی فراوان با کاربری‌های مختلف استفاده شود. از جمله عیوب منتهی از کاربرد جوشکاری در ساخت شناورهای آلومینیومی، تشکیل مناطق یا نواحی تفتیده متأثر از جوشکاری در اتصالات اجزای سازه‌ی است.

برای طراحی بهینه‌ی سازه‌ی عرشه‌ی شناورهای رزمی واقع در معرض بارهای ضربه‌ی ناشی از شلیک سلاح، تخمین و محاسبه‌ی امواج انفجاری در محیط اطراف ضرورت می یابد. در مجامع تحقیقاتی - نظامی دنیا تاکنون مطالعات گوناگونی انجام شده که نتایج محدودی از آن‌ها انتشار یافته است.

تخمین موج انفجار ناشی از شلیک سلاح، بر مبنای روش‌های عددی، تحلیلی یا آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. پژوهش‌های تحلیلی نیز خود به دو شاخه‌ی «مطالعات مبتنی بر روش مقیاس گذاری»^۳ یا «مطالعات مبتنی بر نظریه‌ی انفجار» قابل تفکیک است. تخمین امواج انفجاری ناشی از شلیک سلاح‌های سبک یا متوسط -- برای فواصل نزدیک -- پیش از این مورد بررسی قرار گرفته است.^[۲] در این تحقیق با استفاده از روش مقیاس گذاری، امواج انفجاری منتهی از شلیک تسلیحات سنگین برای فواصل دور تخمین زده شده است.



شکل ۱. منحنی تغییرات فشار در فضای آزاد. [۵]

است:

$$P_I = P(r, P_\infty, a_\infty, dE/dt) \quad (2)$$

از سوی دیگر، نرخ کاهش انرژی چنین محاسبه می شود:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\gamma_e P_e u_e}{\gamma_e - 1} \left[1 + \frac{(\gamma_e - 1)}{2} M_e^2 \right] A_e \quad (3)$$

پیش تر برای تعریف مقدار فشار بیشینه از یک تابع یک جمله ای نمایی استفاده می شد که در آن Z پارامتر مقیاس گذاری بود: [۲۱]

$$\bar{P} = A \times Z^{-a}, \quad a > 1 \quad (4)$$

براساس بررسی های انجام شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روابط ارائه شده تنها برای فواصل ۱۰-۵۰ کالیبر قابلیت کاربرد دارند. [۲۱] از این رو، برای سلاح هایی با کالیبر بالا و فواصل دورتر نیازمند توسعه روابط مناسب تری هستیم. یادآور می شود تنها تعداد محدودی از مراجع، روابطی ارائه کرده اند که هرکدام نقاط ضعف و قوتی دارند. [۲۱]

مدل سازی موج انفجار در فواصل دور

برای محاسبه موج انفجار تا فاصله ای حدود ۴۰۰ کالیبر، مدل جدیدی از موج انفجار ارائه می شود. به منظور دست یابی به این مهم با استفاده از تقریب دوجمله ای از فشار و نتایج آزمایشگاهی موجود برای سلاح های مختلف در فواصل دورتر، ضرایب معادله ای تقریب به دست خواهد آمد.

$$\bar{P} = A \times Z^{-1} + B \times Z^{-2} \quad (5)$$

ضرایب A و B در معادله ۵، با استفاده از روش کم ترین مربعات و نتایج آزمایشات انجام شده توسط وزارت دفاع آمریکا تعیین می شود. در جدول ۱ نتایج محاسبات انجام شده با استفاده از روش کم ترین مربعات، برای دست یابی به حالت بهینه ی معادله ی فشار بیشینه ارائه شده است.

$$\bar{P} = 0.189 \times Z^{-1} + 1.61 \times Z^{-2} \quad (6)$$

چنان که مشاهده می شود تقریب فشار بیشینه با استفاده از معادله ی دوجمله ای، نسبت به تابع یک جمله ای، رفتار بهتری دارد.

در سال ۱۹۹۲ میدان فشار بیشینه ی اطراف لوله ی تانک M۶۸ با کالیبر ۱۰۵ میلی متر مورد مطالعه قرار گرفت. [۲۱] مقایسه ی نتایج تجربی استخراج شده با نتایج روش تخمین توسعه یافته نشان داد که میزان اختلاف در نتایج با افزایش فاصله ی نقطه ی مورد مطالعه از دهانه ی لوله ی تانک، رو به فزونی می گراید. در نتیجه، می بایست به طریقی دقت روش تخمین پارامترهای امواج انفجاری -- از جمله فشار بیشینه ^۴، زمان رسیدن فشار ماکزیمم ^۵ و زمان ماندگاری فشار مثبت ^۶ -- را در فواصل دورتر بهبود داد. [۲۱]

در سال ۱۹۹۷، فانسلا پارامترهای موج انفجار را در فواصل دورتری از دهانه ی لوله ی سلاح با روش مقیاس گذاری به دست آورد. مدل وی برای سلاح های دریایی با کالیبر بالا مناسب بود. [۲۱]

در سال ۲۰۰۵، موراتا با تکیه بر دینامیک گازها حلی دقیق برای تخمین مشخصات موج انفجاری ارائه داد. او برای این کار چگالی گاز در جلوی دهانه ی سلاح را برابر با چگالی اتمسفر فرض کرد و رابطه یی برای محاسبه ی پارامترهای موج انفجاری برحسب فاصله ی نقطه ی مورد مطالعه از دهانه ی منبع شلیک بیان کرد. او این فرایند را آدیاباتیک و انرژی کل موج را ثابت در نظر گرفت. [۵]

کیم و هان در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش مقیاس گذاری «میدان موج آزاد» را محاسبه کردند و برای تعیین موج منعکس شده نیز، از نظریه ی شوک مورب در زوایای کوچک بهره گرفتند. آنان همچنین برای دست یابی به مشخصات موج منعکس شده در زوایای بزرگ تر از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند. [۶]

از دیدگاه استحکام سازی، هالستون و همکارش در سال ۱۹۸۷ پاسخ دینامیکی غیرخطی پانلی از یک کشتی رزمی را تحت اثر موج انفجاری مورد بررسی قرار دادند. آن ها آزمایشات مختلفی انجام دادند و نتایج هر حالت را با نتایج حل عددی خود مقایسه کردند. [۷]

در سال ۱۹۹۸، لوکا و همکارانش بر روی سازه ی یک سکوی فراساحلی که در معرض انفجار چاه های نفتی قرار گرفته بود، مطالعاتی را انجام دادند. آن ها حل نظریه ی معادله ی انرژی و حل عددی حاصل از نرم افزار تجاری اجزای محدود آباکوس ^۷ را برای ورقی فولادی با دو تقویت کننده به دست آوردند. [۸]

مدل سازی موج انفجار دهانه ی سلاح در فضای آزاد^۸

آزمایش های انجام شده حاکی از تبعیت رفتار فشار موج در هر نقطه از فضای تابع موج فریدلندر^۹ است. [۲۱] از این رو محققین پایه ی مدل سازی موج انفجار منتشره از دهانه ی لوله ی سلاح را تعیین پارامترهای موجود در تابع موج فریدلندر قرار داده اند. در هر نقطه از فضا، تا قبل از رسیدن موج انفجار، فشار نسبی صفر است و پس از مدت زمان معینی (زمان رسیدن) فشار نسبی به شدت افزایش می یابد و به مقدار فشار بیشینه می رسد. بعد از مدت زمانی کوتاه (زمان ماندگاری در فشار مثبت) فشار نسبی صفر می شود و پس از آن، خلاء نسبی در پشت موج به وجود می آید (شکل ۱). تابع موج فریدلندر به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tilde{P}_I = (P_I - P_\infty) / P_\infty = \begin{cases} 0 & t < t_a \\ \bar{P}_I [1 - (t - t_a) / \tau] e^{(t - t_a) / \tau} & t > t_a \end{cases} \quad (1)$$

چنان که از رابطه ی ۱ برمی آید، برای تخمین موج انفجار تعیین سه کمیت مهم ضروری است. «فشار بیشینه ی موج» خود تابعی از تغییرات انرژی، شرایط محیطی و فاصله

مدل	A	B	RMS
۱	۰٫۸	۱٫۹۹	۰٫۲۸۳
۲	۰٫۸۹	۱٫۵۶	۰٫۲۵۶
۳	۰٫۸۹	۱٫۶۱	۰٫۲۴۹
۴	۰٫۸۴	۱٫۶۱	۰٫۲۶۸
۵	۰٫۸۸	۱٫۵۹	۰٫۲۵۹

تخمین زمان ماندگاری در فاز مثبت در فواصل دور

از آنجا که فشار بیشینه پس از رسیدن به نقطه‌ی مورد نظر افزایش و سپس کاهش می‌یابد، زمانی را که در آن مقدار فشار نسبی مجدداً صفر می‌شود، می‌توان به صورت بی‌بعد از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\bar{t}_c = Z + G \quad (15)$$

که در آن G رابطه‌ی مستقیم با δ دارد:

$$\delta = \frac{L a_{\infty}}{V_p l} \quad (16)$$

نحوه‌ی محاسبه‌ی مقادیر l' و l پیش‌بینی شده است.^[۲] از تفاضل رابطه‌ی ۱۵ با زمان رسیدن موج (t_a)، زمان ماندگاری در فاز مثبت به دست می‌آید:

$$\bar{\tau} = \bar{t}_c - \bar{t}_a \quad (17)$$

با جایگذاری روابط ۱۳ و ۱۵ زمان ماندگاری در فاز مثبت به صورت جزیی‌تر زیر محاسبه خواهد شد:

$$\bar{\tau} = Z - X(Z) + \frac{A'}{\gamma} \ln[2X(Z) + 2Z + A'] - \bar{t}_a + G \quad (18)$$

مقدار پارامتر G با استفاده از روش کم‌ترین مربعات و به صورت تقریبی زیر پیشنهاد می‌شود:^[۱]

$$G = 0.09 - 0.00379\delta + 0.007[1 - 0.36 \exp(-0.49Z)] \frac{l}{l'} \quad (19)$$

تا اینجا، تمامی پارامترهای منحنی فشار-زمان (از جمله فشار بیشینه، زمان رسیدن موج و زمان ماندگاری در فشار مثبت) برای فواصل میدانی دور و نزدیک مورد محاسبه قرار گرفت. مشخصات فشار برگشتی از برخورد با سطح نیز با استفاده از نظریه‌ی شوک مورب، نظریه‌ی شوک ماخ و نتایج تجربی محاسبه می‌شود.^[۲]

بر مبنای روابط و فرایندهای بسط یافته، یک برنامه‌ی رایانه‌ی در محیط نرم‌افزار مطلب (MATLAB) تهیه شد که در ادامه به تشریح برخی نتایج آن می‌پردازیم. برنامه‌ی رایانه‌ی تدوین شده، از قابلیت نمایش نتایج در الگوهای تصویری و جدولی برخوردار است و در این خصوص تسهیلات متعددی را در معرض استفاده‌ی کاربر قرار می‌دهد.

تحلیل مدل برای سلاح ۱۰۵ میلی متری

برای صحنه‌گذاری بر مدل ارائه شده در فواصل دور از دهانه، از نتایج آزمایشگاهی موجود برای سلاح ۱۰۵ میلی متری^[۳] استفاده شده است (جدول ۲). در این آزمایش دهانه‌ی لوله‌ی سلاح در ارتفاع ۱٫۲ متری از سطح مورد بررسی قرار دارد و برای ثبت نتایج، ۱۹ حسگر در زوایا و فواصل مختلف نصب شده است (شکل ۲). توزیع پارامترهای موج انفجار ضربه‌ی براساس نرم‌افزار تدوین شده در اشکال ۳ و ۴ ارائه شده است. در ادامه، نتایج فشار بیشینه، زمان رسیدن و زمان ماندگاری در فاز مثبت با نتایج آزمایشگاهی^[۳] مقایسه شده است.

نتایج در دو حالت ارائه شده است: ۱. زاویه ثابت و فواصل مختلف؛ ۲. فاصله ثابت و زوایای مختلف. در شکل ۵، توزیع فشار بیشینه در فواصل مختلف و در

تخمین زمان رسیدن موج در تمام فواصل

پس از محاسبه‌ی فشار بیشینه می‌توان با استفاده از همین تقریب رابطه‌ی جدید برای زمان رسیدن موج به دست آورد. در مباحث آئروپنماتیک، برای جهش فشار ماخ رابطه‌ی ۷ ارائه شده است:^[۱]

$$\bar{P} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_s^2 - 1) \quad (20)$$

برای مقدار فشار بیشینه در معادله‌ی ۷، می‌توان از معادله‌ی ۶ استفاده کرد. از سوی دیگر، زمان رسیدن موج در هر نقطه از فضا با استفاده از معادله‌ی ۸ قابل محاسبه است:

$$dt_a/dr = 1/M_s \quad (21)$$

اینک معادله‌ی ۶ را در رابطه‌ی ۷ جایگزین کرده و از آنجا عدد ماخ (M_s) را استخراج می‌کنیم. آنگاه از طریق انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۸ تا نقطه‌ی مورد نظر، زمان رسیدن موج به ترتیب زیر به دست می‌آید:

$$\bar{t}_a - \bar{t}_0 = X(Z) - \frac{A'}{\gamma} \ln[2X(Z) + 2Z + A'] \quad (22)$$

که در آن:

$$X(Z) = \sqrt{Z^2 + A'Z + B'} \quad (23)$$

$$A' = \frac{2\gamma A}{\gamma + 1} \quad (24)$$

$$B' = \frac{2\gamma B}{\gamma + 1} \quad (25)$$

$\gamma = 1.4$ ضریب گرمایی ویژه در هوای محیط است. مقدار اولیه‌ی زمانی ($\bar{t}_0$) مرتبط با تغییر شکل طبیعی موج انفجار در فضا است که در زوایای مختلف ممکن است تغییر کند. این مقدار در لحظه‌ی خروج گلوله از سلاح صفر است.

در نهایت با قرار دادن مقادیر A, B, γ در معادله‌ی ۹، زمان رسیدن موج به دست می‌آید. مقدار ($\bar{t}_0$) نیز براساس روش کم‌ترین مربعات و نتایج آزمایشگاهی، ۰٫۵۶- تخمین زده شده است. بنابراین خواهیم داشت:

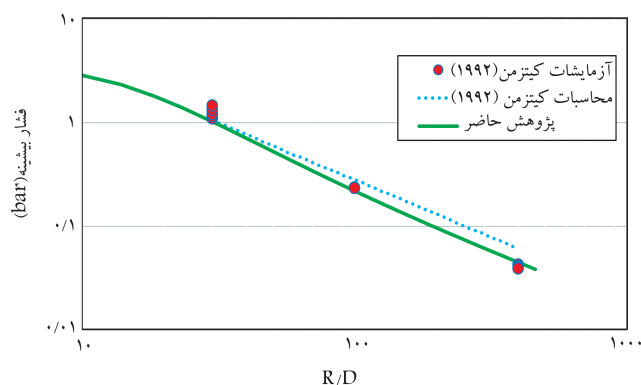
$$\bar{t}_a = X(Z) - 0.52 \ln[2X(Z) + 2Z + 1.04] - 0.56 \quad (26)$$

که در آن:

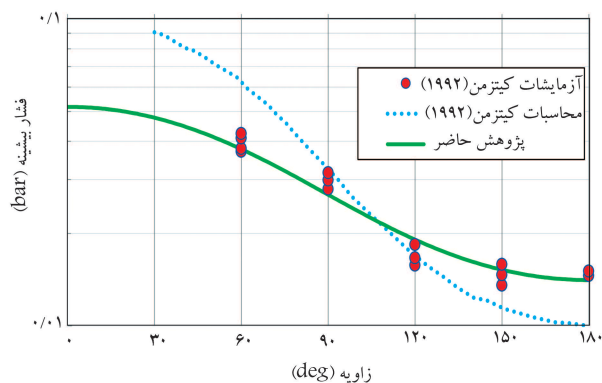
$$X(Z) = \sqrt{Z^2 + 1.04Z + 1.88} \quad (27)$$

جدول ۲. مشخصات سلاح و شرایط شلیک.

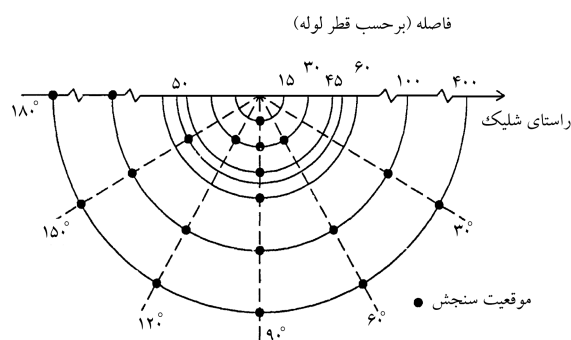
کمیت	مقدار	واحد
D	۱۰۵	mm
h	۱/۲	m
a_m	۱۰۵۰	m/s
a_∞	۳۴۰/۲۹۲	m/s
V_p	۱۵۰۰	m/s
Φ	۰	Deg
P_m/P_∞	۷۰۵	-
γ	۱/۲۴	-
μ	۰/۶۵	-



شکل ۵. فشار بیشینه در زاویه ۶۰ درجه.



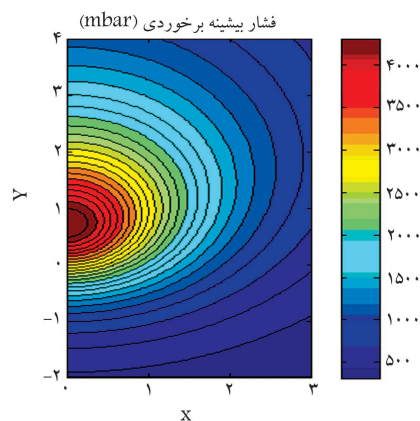
شکل ۶. فشار بیشینه در فاصله ی ۴۰۰ برابر قطر لوله.



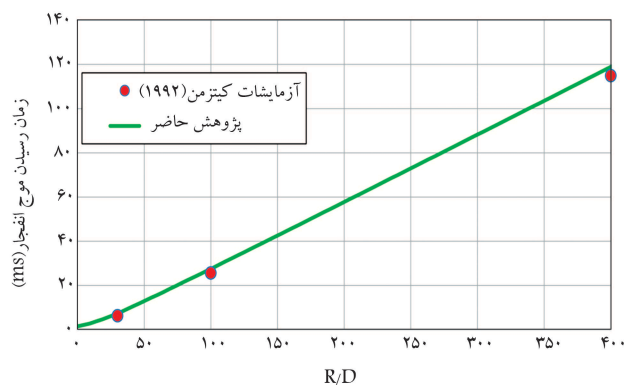
شکل ۷. چیدمان حس گر ها برای اندازه گیری پارامتر های موج انفجار. [۳]

زاویه ی ۶۰ درجه نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود، نتایج حاصل از کاربرد نرم افزار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، از دقت مطلوبی برای فواصل متعدد برخوردار است.

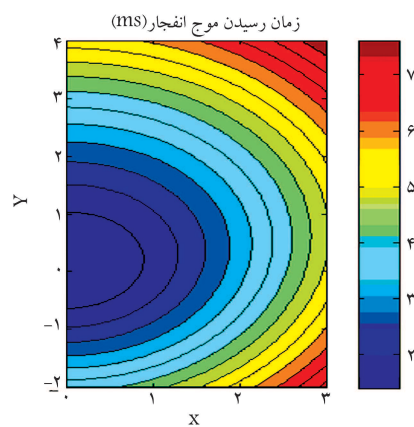
همچنین می توان در شکل ۳ تغییرات فشار بیشینه را روی نیم دایره هایی با شعاع ثابت بررسی کرد. با توجه به شکل ۶ تغییرات فشار بیشینه با افزایش زاویه کاهش می یابد و در زوایای ۶۰ الی ۱۲۰ درجه با شدت بیشتری کاهش می یابد. با افزایش فاصله، نرخ تغییرات نسبت فشار بیشینه در جلو و عقب دهانه ی سلاح کاهش می یابد. در محاسبه ی زمان رسیدن موج، خطا تقریباً ناچیز است (شکل ۷). برای محاسبه ی زمان ماندگاری در فاز مثبت در فاصله ی ۱۰۰ کالیبر و زاویه ی ۹۰ درجه، تخمین ارائه شده در نزدیک دهانه مناسب است ولی با افزایش فاصله خطا افزایش می یابد (شکل ۸).



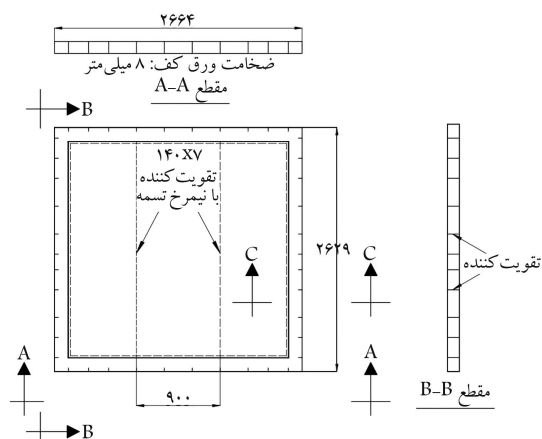
شکل ۸. فشار بیشینه در فضای آزاد.



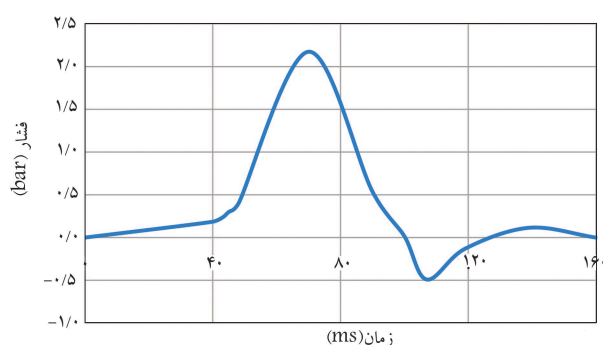
شکل ۹. زمان رسیدن موج در زاویه ی ۱۲۰ درجه.



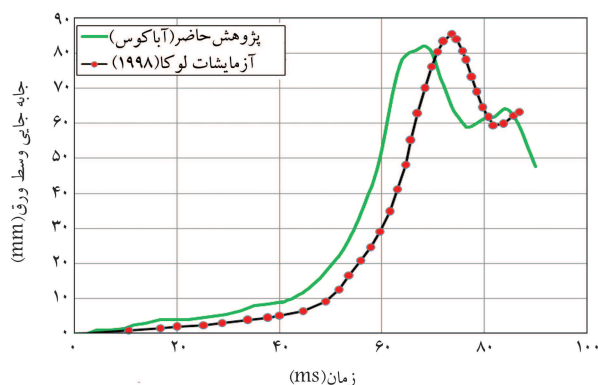
شکل ۱۰. زمان رسیدن موج.



شکل ۹. هندسه‌ی مدل ورق فولادی تقویت شده. [۸]



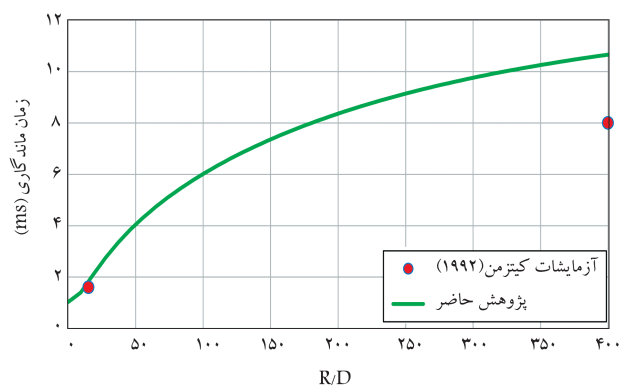
شکل ۱۰. منحنی فشار وارده بر سازه. [۸]



شکل ۱۱. جابه‌جایی مرکز ورق در گذر زمان.

فیزیک مسئله مورد نظر برای تحلیل سازه

بر روی عرشه‌ی یک فروند شناور رزمی مورد مطالعه، یک سلاح دریایی ۳۰ میلی‌متری نصب شده است. سازه‌ی زیر سلاح با کمک تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی تقویت شده است. از آنجا که موج انفجار از تابع موج فویردندر تبعیت می‌کند و از طرفی پارامترهای این موج در هر نقطه از سطح ورق متغیر است، لذا برای کاهش زمان تحلیل، توزیع فشار اعمالی بر هر آلمان -- به صورت آنچه که در شکل ۱۲ نشان داده شده -- ساده‌سازی شده است. مقدار پارامترهای این منحنی برای نقاط گوناگون، بستگی به موقعیت آن نقاط نسبت به دهانه‌ی سلاح دارد. علت استفاده از این اعمال فشار، بررسی تأثیر فشار منفی (خلأ نسبی) است که به صورت جدولی وارد نرم‌افزار مورد استفاده در تحلیل‌ها داده می‌شود.



شکل ۸. زمان ماندگاری در فاز مثبت برای زاویه‌ی ۹۰ درجه.

تا این مرحله با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیلی و روش‌های نیمه‌تجربی پارامترهای موج انفجار شلیک سلاح به دست آمد. از جمله دلایل استفاده از این راهکار سرعت و زمان کم تحلیل و دقت مناسب آن نسبت به سایر روش‌هاست. [۱۲] این مدل برای سلاح‌هایی با فشنگ‌های پرتابه‌ی قابل استفاده است. یادآور می‌شود اعتبار مدل برای فواصل کم تر از ۱۰ کالیبر و بیشتر از ۴۰۰ کالیبر باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

تحلیل سازه‌ی آلومینیومی عرشه‌ی یک شناور تندرو رزمی

تحت اثر موج انفجاری ناشی از شلیک سلاح

یکی از اهداف این تحقیق، مدل‌سازی عرشه‌ی شناورهای آلومینیومی به روش اجزای محدود، تحت اثر موج انفجاری ضربه‌ی ناشی از شلیک سلاح است. با استفاده از تحلیل اجزای محدود می‌توان توزیع تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها، دامنه‌ی ارتعاشات و مودهای جابه‌جایی ناشی از بارگذاری ضربه‌ی را تعیین کرد.

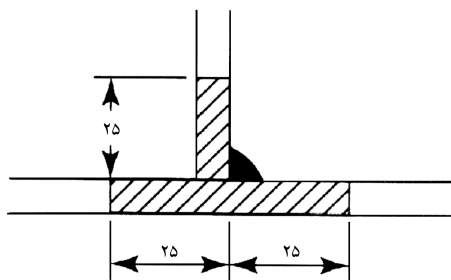
یکی از ویژگی‌های این نوع بارگذاری، برخورد موج انفجار به صورت ضربه‌ی در مدت زمان بسیار کم و به صورت تکرارشونده است که به ایجاد ارتعاشات شدید در سازه و در مواردی بروز پدیده‌ی تشدید در سازه منجر می‌شود. از این رو برای بررسی این پدیده از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از برنامه‌ی نوشته‌شده برای سلاح مورد نظر و شرایط شلیک، پارامترهای موج انفجاری (بار وارده) را استخراج و سپس با استفاده از یک زیربرنامه برای عرشه‌ی مورد نظر، یک فایل متنی برای استفاده در نرم‌افزار آباکوس تهیه می‌شود. با توجه به بار ضربه‌ی وارده باید از تحلیل دینامیکی غیرخطی گذرا^[۸] استفاده کرد.

برای صحه‌گذاری بر فرایند تحلیل، ابتدا یک نمونه تحقیق انجام شده در مورد سازه‌ی یک سکوی نفتی که در معرض انفجار چاه‌های نفت قرار گرفته، بررسی می‌شود. این کار توسط لوکا، در سال ۱۹۹۸ و با انجام آزمایشات مختلف انجام گرفت. وی یک ورق تقویت‌شده‌ی فولادی را تحت اثر مواد منفجره قرار داد و تغییر شکل وسط ورق را اندازه‌گیری کرد. ورق فولادی دارای تنش نهایی ۵۳۱ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰٫۳، مدول یانگ ۲۰۰ گیگاپاسکال و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌بود. مشخصات هندسی مدل در شکل ۹ ارائه شده است. [۸]

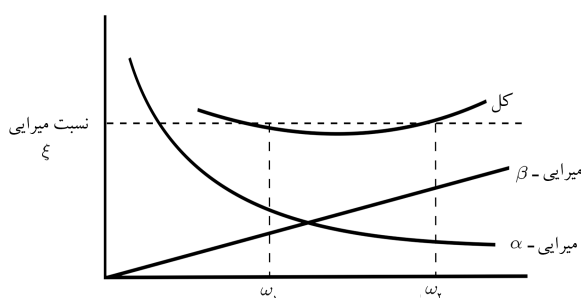
در شکل ۱۰ منحنی فشار انفجاری اعمالی به سازه برحسب زمان (در آزمایشات لوکا) نشان داده شده است. [۸] نتیجه‌ی حاصل از تحلیل با کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس در مقایسه با نتیجه‌ی آزمایشگاهی، در شکل ۱۱ آورده شده است. مشاهده می‌شود بیشترین خطا در حدود ۵٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی است.

جدول ۳. خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۶۰۸۲-T۶.

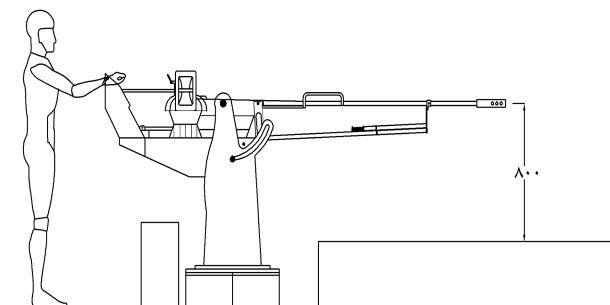
مقدار	کمیت
$E = 70745 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	مدول کشسانی
$\nu = 0.3$	ضریب پواسون
$\sigma_y = 206 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	تنش تسلیم معادل ماده اصلی
$\sigma_y^* = 135 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	تنش تسلیم ماده در منطقه تفتیده



شکل ۱۴. نحوه ی اعمال قانون یک اینچم.



شکل ۱۵. تغییر ضریب میرایی نسبت به فرکانس.



شکل ۱۶. نمایی از قرارگیری سلاح.

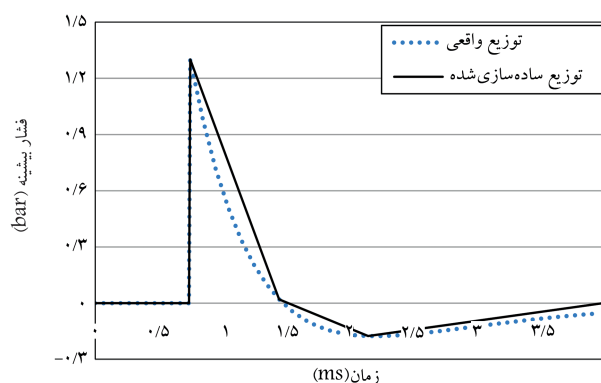
به صورت رابطه ی ۲۰ تعریف می شود که در آن α ، β و ω_i به ترتیب عبارت اند از: نسبت جرمی، نسبت سفتی و فرکانس طبیعی سازه.

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (20)$$

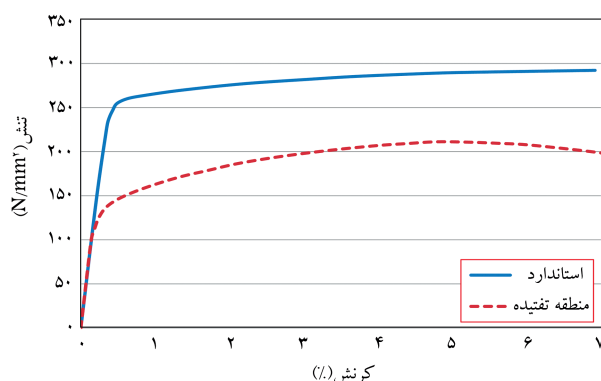
مقادیر α و β در فرکانس های مختلف متغیر است. با توجه به شکل ۱۵ مقدار ضریب β (نسبت سفتی) در فرکانس های پایین تقریباً صفر در نظر گرفته می شود. [۱۹] در آزمایشات انجام شده ضریب میرایی سازه های آلومینیمی در حدود $0.02-0.04$ تعیین شده است. [۱۱]

فرکانس طبیعی سازه برای هر مدل، از تحلیل نمایی^{۱۴} (تحلیل مودال) به دست می آید و با مشخص بودن ضریب میرایی و فرض صفر بودن ضریب β ، مقدار ضریب نسبت میرایی جرمی (α) تعیین می شود. در این تحقیق ضریب میرایی سازه ی آلومینیمی ۲٪ در نظر گرفته شده است. [۶]

شناور مورد مطالعه از جنس آلومینیم، و ضخامت ورق عرشه نیز ۴ میلی متر است و با دو جفت تقویت کننده ی طولی و عرضی تقویت شده است. تقویت کننده های عرضی T شکل، و طولی ها تخت اند (شکل های ۱۶ و ۱۷). شرایط مرزی ورق به دلیل اتصال به فریم و کناره ی شناور، گیردار در نظر گرفته شده است (شکل ۱۸).



شکل ۱۲. منحنی فشار انفجار مدل شده برای تحلیل سازه یی.



شکل ۱۳. منحنی تنش-کرنش آلیاژ آلومینیم ماده اصلی و تفتیده.

عرشه ی شناور از جنس آلیاژ آلومینیم ۶۰۸۲-T۶ است که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۳ آورده شده است. در این تحلیل، تأثیر منطقه ی تفتیده^{۱۱} با کاهش خواص مکانیکی مواد در این ناحیه مدل سازی شده است. منحنی تنش-کرنش آلومینیم ماده اصلی و منطقه ی تفتیده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این دو منحنی برای انجام تحلیل کشسانی-خمیری و بررسی تغییرات در توزیع تنش در مدل های تحلیل شده، به عنوان بخشی از ورودی های نرم افزار به آن داده می شوند. برای مدل سازی مناطق تفتیده از «قانون یکا-اینچم^{۱۲}» استفاده می شود. این قانون ساده، عرض منطقه ی تفتیده را برابر با ۱ اینچ (۲۵ میلی متر) در هر طرف خط جوش فرض می کند. در شکل ۱۴ نحوه ی کاربرد این قانون برای مدل سازی عرض منطقه ی تفتیده ارائه شده است.

در حالت واقعی تمامی سازه ها بر اثر بارهای متغیر با زمان، پس از مدت زمانی به حالت سکون برمی گردند. این پدیده به یک پارامتر ذاتی در سازه برمی گردد که به آن «میرایی سازه» می گویند. محققین برای بیان میرایی سازه مدل های مختلفی ارائه کرده اند که یکی از مدل های معروف، مدل میرایی ریلی^{۱۳} است. میرایی ریلی

جدول ۴. ابعاد سازه‌ی عرشه.

ردیف	عنوان	ابعاد (mm)
۱	عرض ورق	۱۵۰۰
۲	طول ورق	۱۵۰۰
۳	تقویت‌کننده‌ی عرضی	۵۰ × ۱۰۰
۴	تقویت‌کننده‌ی طولی	۱۲ × ۵۰
۵	ضخامت ورق	۴

نتایج و بحث

الف) تحلیل کشسانی - خمیری سازه‌ی عرشه

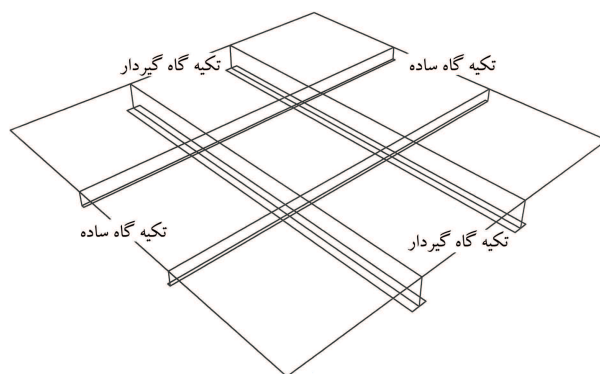
تحلیل‌های کشسانی - خمیری روی عرشه در بارگذاری‌های مختلف انجام شده و تأثیر پدیده‌ی منطقه‌ی حرارت‌دیده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت واقعی و عملیاتی اغلب سلاح‌های نصب‌شده روی عرشه‌ی شناورها، در تعداد بالا و فرکانس خاص سلاح شلیک می‌کنند. با توجه به فرکانس طبیعی سازه و فرکانس نواخت تیر سلاح، ممکن است سازه دچار ارتعاش شدید یا کم شود. در این تحقیق تأثیر جوشکاری، کاهش استحکام سازه و همچنین تعداد شلیک بالا با یک فرکانس مشخص بر روی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۸ توزیع تغییر شکل و توزیع تنش فون میسس در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل متفاوت بودن توزیع فشار در هر المان، تغییر شکل سازه نیز در هر لحظه از زمان و در المان‌های گوناگون متفاوت است. لذا ممکن است یک المان در حال کشش و المان مجاور تحت تنش‌های فشاری قرار گیرد.

بیشترین مقدار تنش در وسط دهانه‌ی مرزها و وسط تقویت‌کننده‌های عرضی است (شکل ۱۸). تحلیل‌های انجام شده حاکی از بحرانی بودن نقطه‌ی حد واسط دهانه‌ی مرزهاست. در شکل ۱۹ نمودار جابه‌جایی راستای Z در وسط ورق و تنش فون میسس نقطه‌ی بحرانی، در گذر زمان برای حالت یک‌بار شلیک نشان داده شده است.

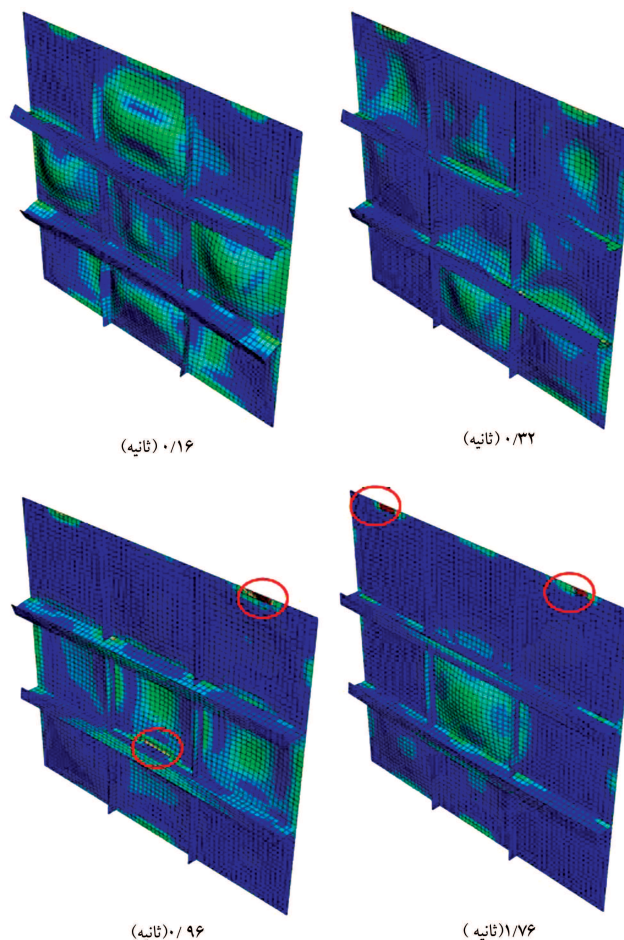
چنان که مشاهده می‌شود در حالتی که منطقه جوش در نظر گرفته نمی‌شود، مقادیر جابه‌جایی و تنش کاهش می‌یابد و ارتعاش سازه سریعاً میرا می‌شود. با اعمال مناطق جوش در محل اتصال تقویت‌کننده‌ها به ورق و لبه‌های مرزها، زمان ارتعاش سازه به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد و ارتعاش آن دیرتر میرا می‌شود (شکل ۲۰). اگرچه مقدار تنش فون میسس در وسط لبه‌ی مرز برای حالت تکیه‌گاه گیردار به‌شدت افزایش یافته، سازه در ناحیه‌ی کشسان است.

نتایج حاصله برای ۴۰ بار شلیک با فرکانس ۱۵ هرتز (۹۰۰ تیر در دقیقه) در هر دو حالت -- با/بدون مدل‌سازی منطقه‌ی حرارت‌دیده -- در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ ارائه شده است. در این حالت ارتعاش شدیدی با دامنه‌ی بالا به سازه وارد شده که در نتیجه مقادیر جابه‌جایی حدود ۸٪ افزایش می‌یابند. در هر دو حالت، تنش پسماند در سازه باقی می‌ماند. در صورت اعمال منطقه‌ی حرارت‌دیده در محاسبات، در حالت ۴۰ بار شلیک با فرکانس ۱۵ هرتز، سازه در وسط دهانه‌ی مرز عرضی دچار تسلیم‌شدگی می‌شود. باید توجه داشت که نتایج حاصله برای حالتی است که سازه هیچ‌گونه اعوجاج و تنش پسماندی در ابتدا نداشته باشد. در شرایط واقعی عملیاتی، تأثیر موج انفجار سلاح در حالتی که قسمتی هرچند کوچک از سازه وارد منطقه‌ی خمیری شود، بسیار مخرب‌تر است. با توجه به متغیر بودن توزیع فشار در هر

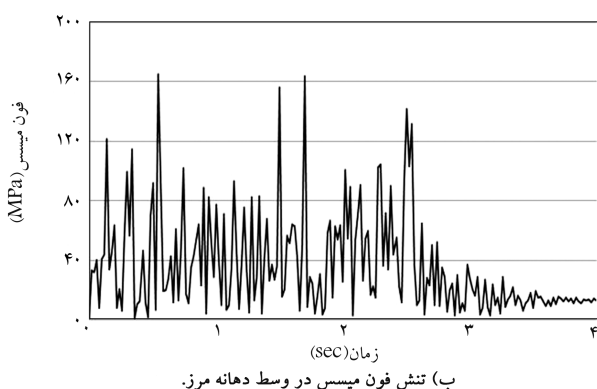
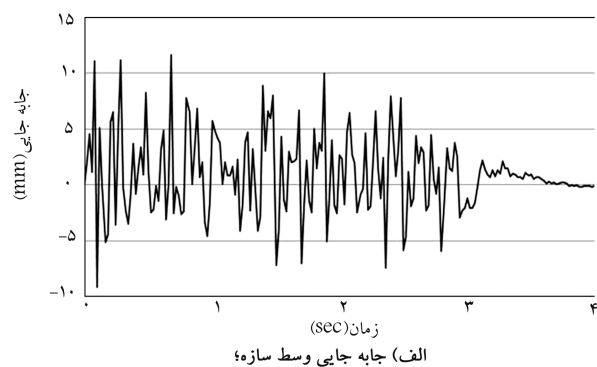
در مدل‌سازی مسئله از المان پوسته‌ی چهارگره‌ی بی با شش درجه آزادی (S^4R) برای ورق و تقویت‌کننده‌ها استفاده شده که تنش‌های خمشی و غشایی را مدل می‌کند. [۸] ابعاد هندسی ورق و تقویت‌کننده‌های عرشه‌ی مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. محل اتصال تقویت‌کننده‌ها به ورق و لبه‌های مرز (به طول ۲/۵ سانتی‌متر) به‌عنوان مناطق حرارت‌دیده در نظر گرفته شده است. مشخصات سلاح ۳۰ میلی‌متری در جدول ۲ نشان داده شده است. اعتبار نتایج سلاح ۳۰ میلی‌متری با نتایج آزمایشگاهی پیشین مقایسه شده است. [۲]



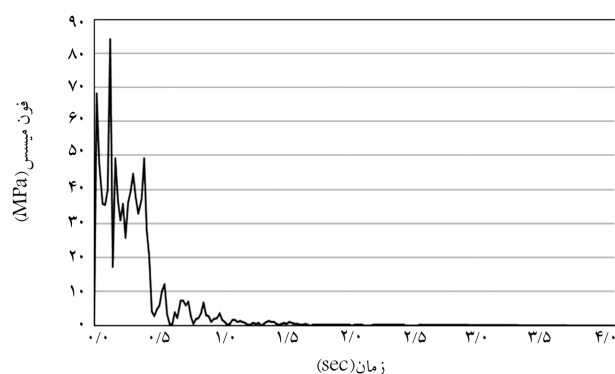
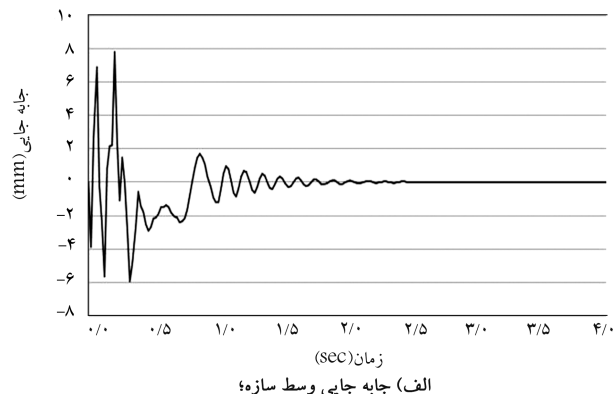
شکل ۱۷. نمایی از سازه‌ی عرشه‌ی مورد مطالعه.



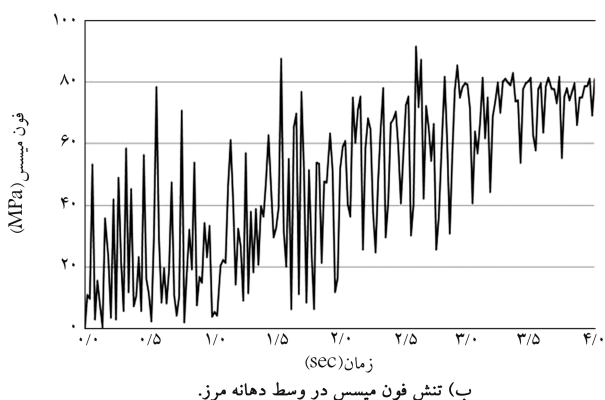
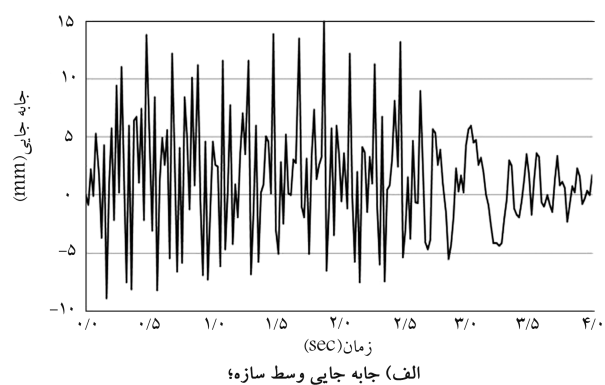
شکل ۱۸. تغییر شکل سازه با مدل‌سازی منطقه‌ی جوش و یک‌بار شلیک سلاح.



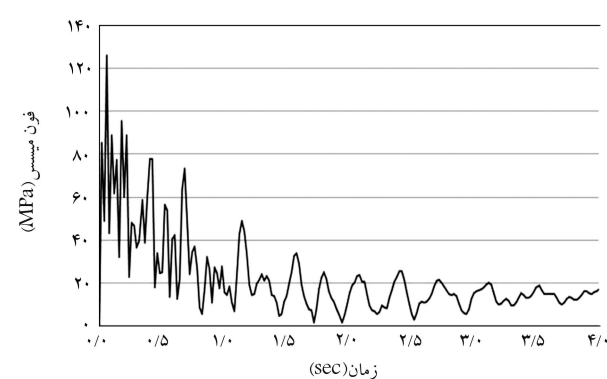
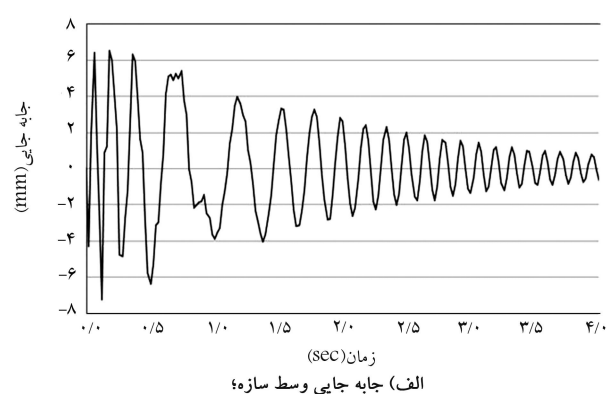
شکل ۲۱. نتایج تحلیل کشسانی -خمیری برای ۴۰ بار شلیک با فرکانس ۱۵ هرتز بدون منطقه جوش.



شکل ۱۹. نتایج تحلیل کشسانی -خمیری برای یک بار شلیک بدون منطقه جوش.



شکل ۲۲. نتایج تحلیل کشسانی -خمیری برای ۴۰ بار شلیک با فرکانس ۱۵ هرتز با اعمال منطقه جوش.



شکل ۲۰. نتایج تحلیل کشسانی -خمیری برای یک بار شلیک با اعمال منطقه جوش.

نقطه -- ممکن است در المانی فشار مثبت و در المان مجاور فشار منفی باشد -- محدوده‌ی کوچکی از سازه وارد ناحیه‌ی خمیری می‌شود.

ب) تأثیر فرکانس‌های مختلف شلیک در رفتار سازه

به‌طور معمول در مسائل دینامیکی، پدیده‌ی «تشدید» عامل بسیار مخربی است که باعث ایجاد ارتعاش شدید در سازه می‌شود. این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که فرکانس طبیعی سازه با فرکانس بار وارده هم‌فاز شده و دامنه‌ی ارتعاش سازه به‌شدت افزایش می‌یابد.

به‌طور معمول فرکانس طبیعی سازه‌ی عرشه‌ی شناور مورد مطالعه از فرکانس بار وارده‌ی ناشی از شلیک سلاح بالاتر است؛ به‌همین دلیل این سازه‌ها به حالت

نتیجه‌گیری

برای تخمین موج انفجار ضربه‌ی ناشی از شلیک سلاح، مناسب‌ترین روش تحلیلی موجود، ترکیب روش مقیاس‌گذاری و روش‌های نیمه‌تجربی است. در نظریه‌های گذشته، با افزایش فاصله، خطای تخمین افزایش می‌یافت؛ ولی نظریه‌ی ارائه شده در فواصل دور، از خطای کم‌تری برخوردار است. مدل پیشنهادی برای فشار بیشینه و زمان رسیدن موج بسیار مناسب است، ولی درمورد زمان ماندگاری در فشار مثبت دارای خطای قابل ملاحظه‌ی است که نیاز به تحقیقات بیشتری است.

ارتعاش وارده به سازه‌ی عرشه شناورهای آلومینیومی برای یک‌بار شلیک بدون درنظرگرفتن منطقه‌ی حرارت دیده، به‌سرعت میرا می‌شود؛ ولی با فرض تأثیر مناطق حرارت دیده ارتعاشات دیرتر میرا و مقادیر تنش و جابه‌جایی به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد. در تعداد شلیک و فرکانس بالا، سازه به‌شدت مرتعش شده و در وسط دهانه‌ی عرضی مرز، سازه وارد منطقه‌ی خمیری می‌شود. با افزایش فرکانس شلیک سلاح، پاسخ سازه به‌طور نوسانی تغییر می‌کند که بحرانی‌ترین حالت در فرکانس شلیکی برابر با نصف فرکانس طبیعی اتفاق می‌افتد. برای کاهش اثر این پدیده، در فرایند ساخت پس از جوشکاری، عملیات حرارتی مناسب می‌بایست انجام گیرد.

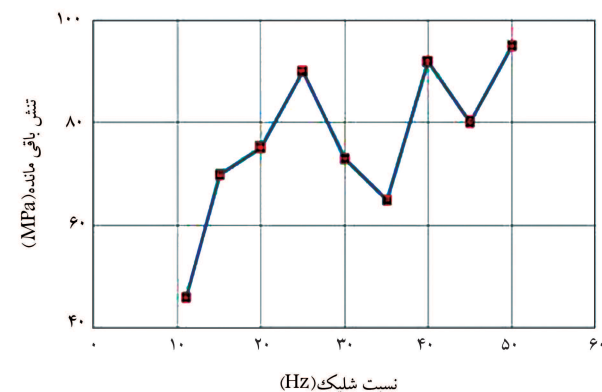
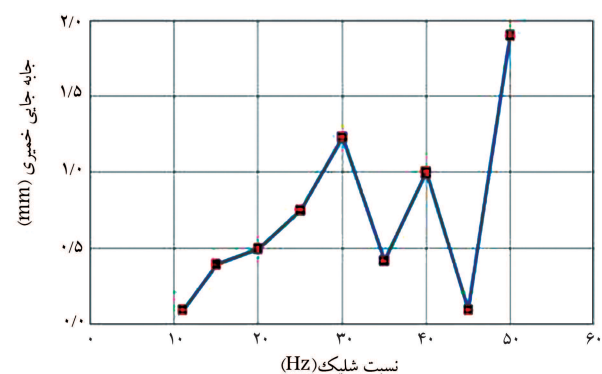
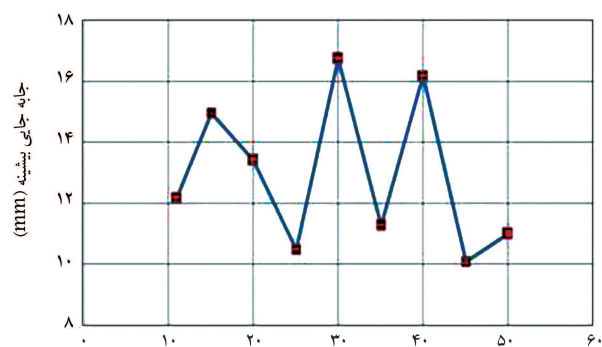
پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق

برای ادامه‌ی تحقیق در این زمینه و استخراج نتایج کاربردی‌تر پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- محاسبه و بررسی حرارت ناشی از شلیک سلاح؛
- اصلاح مدل برای سلاح‌هایی با دو لوله آتش؛
- استخراج رابطه‌ی بین فرکانس شلیک سلاح و فرکانس طبیعی سازه.

فهرست علائم

- A_e : سطح مقطع داخلی لوله (مترمربع)
 a_m : سرعت صوت خروجی در دهانه آتش (متر بر ثانیه)
 a_∞ : سرعت صوت در فضای آزاد (متر بر ثانیه)
 E : انرژی جنبشی (ژول)
 h : فاصله دهانه لوله از صفحه مورد نظر (متر)
 l : طول مقیاس برای انفجار (بی بعد)



شکل ۲۳. تحلیل رفتار سازه در فرکانس‌های مختلف شلیک.

t : زمان (ثانیه)	l' : طول مقیاس موثر (بی بعد)
t_a : زمان رسیدن ضربه موج انفجار به نقطه مورد نظر (ثانیه)	L : طول دهانه لوله‌ی سلاح (متر)
$\bar{t}_a$: بی‌بعدسازی زمان رسیدن موج انفجاری ($\bar{t}_a = t_a \times a_\infty / l'$)	M_e : عدد ماخ خروجی از دهانه سلاح
$\bar{t}_0$: ضریب اصلاحی زمان رسیدن موج	M_s : عدد ماخ حرکت شوک در هوای آرام
V_p : سرعت خروج گلوله (متر بر ثانیه)	P_I : فشار موج انفجاری در هر نقطه از فضا (بار)
Z : پارامتر مقیاس‌سازی	P_m : فشار هوا در دهانه سلاح (بار)
τ : مدت زمان اثر فشار مثبت (ثانیه)	P_e : نسبت فشار خروجی به فشار اتمسفر
$\bar{\tau}$: بی‌بعدسازی مدت زمان اثر فشار مثبت ($\bar{\tau} = \tau \times a_\infty / l'$)	$\tilde{P}_I$: مقدار بی بعد شده بیشینه فشار هوا
γ : نسبت گرمای ویژه	$\bar{P}_I$: مقدار بیشینه فشار هوا (بار)
γ_e : نسبت گرمای ویژه پیشران در خروجی	P_∞ : فشار اتمسفر (بار)
μ : ممان مشخصه موج انفجار	r : فاصله تا نقطه مورد نظر (متر)
δ : پارامتر دمش به سمت پایین موج انفجار	RMS: باقیمانده کم‌ترین مربعات

پانویس

1. blast waves
2. rapidly varying loads
3. scaling approach
4. peak overpressure
5. time of arrival
6. positive phase duration
7. ABAQUS
8. free field muzzle blast wave
9. Friedlander waveform
10. transient nonlinear explicit analysis
11. heat affected zone
12. one-inch rule
13. rayleigh damping
14. modal analysis

منابع (References)

1. Fansler. K.S., *Description of Gun Muzzle Blast by Modified Ideal Scaling Models*, Army Research Laboratory (1997).
2. Sadeghi, M.H., Khedmati, M.R. and Fadavie, M. "Modeling gun wave blast loads", *Eleventh Conference on Marine Industries* (2008).
3. Kitzman, J.; Fansler, K.S. and Thompson. W.G., *Muzzle Blast from 105mm M735 Round*, US Army Research Laboratory, AD-A245 565 (1992).
4. Pater, L.L., *Gun Blast Far Field Peak Overpressure Contours*, TR 79-442, Naval Surface Weapons Center, Dahlgren, VA (March 1981).
5. Murata, S., *New Exact Solution of the Blast Wave Problem in Gas Dynamics*, Department of Physics, Nagoya University (2005).
6. Kim, D.K. and Han. J.H. "Establishment of gun blast wave model and structural analysis for blast load", *AIAA Journal*, (2006).
7. Houlston, R. and Desrochers, G. "Nonlinear structural response of ship panels subjected to air blast loading", *Computers & Structures*, **26**(1/2), pp. 1-15 (1987).
8. Louca, L.A. and Pan, Y.G. "Response of stiffened plate under blast load", *Engineering Structures*, **20**(12), pp. 1079-1086 (1998).
9. Sadeghi, M.H. "Finite Element Analysis of Deck Structures subjected to Blast Pressure Loads", *Master Degree Thesis, Department of Marine Technology*, Amirkabir University of Technology (2008).
10. Kandge, G., *Influence of Mode Dependent Rayleigh Damping on Transient Stress Response*, Master Degree Thesis (2007).
11. Irvine, T., *Damping Properties of Materials*, Revision C (2004).

MODELLING OF BLAST WAVE LOADS IMPOSED ON SHIP DECKS AND THEIR LOCAL STRUCTURAL RESPONSE

M.H. Sadeghi

sadeghi_zisa@yahoo.com

M.R. Khedmati*

khedmati@aut.ac.ir

**Dept. of Marine Technology
Amirkabir University of Technology
A. Najafi**

najfi.sharif@yahoo.com

**School of Mechanical Engineering
Sharif University of Technology**

Sharif Mechanical Engineering Journal
Volume 28, Issue 3, Page 47-56, Original Article

© Sharif University of Technology

Abstract

In this paper, a method for modelling blast loads, induced as a result of firing guns installed on ship decks, and also their local structural response have been studied. First, it is attempted to give a better estimation of the distribution of the impulsive loads induced through firing deck guns, by improving an existing modelling method based on a scaling approach. Formulation of a free field muzzle blast wave using Friedlander waveform is discussed. The values of the parameters involved in the Friedlander waveform function, including the pick incident overpressure, blast arrival time and phase dura-

tion, are then expanded in detail. The formulation is further extended for far fields. The developed formulations are implemented in a computer code, enabling the user to obtain the distributions of pick incident overpressure, blast arrival time and phase duration for different locations lying on the surface of the structure under consideration. The outputs of the computer code are available in either graphical or tabular formats. The developed code, in combination with a finite element code, may be used for structural assessment of blast loaded structures. Then, the accuracy of the developed algorithm is evaluated against experimental data for a stiffened steel plate subjected to lateral blast loads. The values of maximum deflections obtained numerically and experimentally for the stiffened plate are compared against each other. It is revealed that the developed algorithm is capable of performing useful analyses for modelling blast loads and investigating their effect on structures. In the next step, using the expanded modelling procedure, the distribution of blast wave loads affecting the deck of an aluminium boat is estimated and, then, the local structural response of the deck structure to such loads is studied applying a non-linear finite element method. The analyses performed are of a non-linear transient dynamic type, and the effects of structural damping, and also heat affected zones due to welding, are considered in them.

Key Words: blast wave load, non-linear transient dynamic response, structural damping, heat affected zone, finite element method, scaling approach.

* corresponding author

Received 16 August 2010; received in revised form 28 November 2010; accepted 12 February 2011.