

شبیه‌سازی موج انفجار ضربه‌ای دهانه سلاح در فواصل مختلف

محمد حسین صادقی^۱، محمدرضا خدمتی^۲

khedmati@aut.ac.ir

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه کشتی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

اغلب تسلیحات پس از شلیک، یک موج انفجاری از دهانه خارج شده و با سرعت و فشار زیاد در هوا منتشر می‌گردد و در نهایت به سازه اطراف آن برخورد می‌کند. در تسلیحات سنگین با فرکانس بالای شلیک، ضربات متداول موج باعث ایجاد ارتعاش شدید به سازه و تجهیزات می‌شود. از طرفی این امواج بر روی انسان تاثیر سوء و در نتیجه کاهش کارکرد خدمه را در پی خواهد داشت.

در این مقاله با استفاده از روش مقیاس‌سازی، مدلی از موج انفجار ارائه و با استفاده از شکل موج فریدلندر برای بیان رفتار موج، مشخصات آن تخمین زده شد. برای تعریف موج انفجار از سه پارامتر زمان رسیدن موج از نقطه‌ی مورد نظر، فشار حداکثر و زمان ماندگاری در فاز مثبت، استفاده می‌شود. در مورد زمان رسیدن از رابطه‌ی نیمه تجربی استفاده شده است. برای محاسبه‌ی فشار برگشتی موج از سازه در زوایای کوچک از تئوری شوک مورب و در زوایای بزرگتر از روش تجربی همراه با میان‌یابی لاگرانژی استفاده شده است. روابط برای دو حالت فاصله‌ی ۱۰ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۴۰۰ برابر قطر لوله بدست خواهد آمد و با نتایج آزمایشگاهی سلاحی با کالیبر ۳۰ و تانکی با کالیبر ۱۰۵ میلی‌متری مقایسه می‌گردد. نتایج در مورد زمان رسیدن و فشار برگشتی بسیار مناسب و درباره‌ی زمان ماندگاری در فاز مثبت خطا نسبت به مقاله مرجع خطای کمتری دارد.

واژگان کلیدی

موج انفجار سلاح، زمان رسیدن، زمان ماندگاری در فشار مثبت، فشار ماکزیمم، فشار برگشتی

تاریخ دریافت مقاله : ۹۰/۸/۱۷

تاریخ پذیرفته شدن مقاله : ۹۱/۴/۲۱

۱- مقدمه

در هنگام شلیک سلاح، یک موج شوکی با فشار، سرعت زیاد و به شکل تقریباً کروی از دهانه خارج می‌شود. مشخصات موج انفجار ضربه‌ای خروجی به نوع سلاح و شرایط شلیک بستگی دارد. فشار حداکثر موج انفجار سلاح تاثیر مخربی بروی خدمه سلاح، سازه نزدیک و تجهیزات دارد. بطور معمول خدمه و برخی از تجهیزات در فاصله‌ای بین ۱۵ تا ۲۰ کالیبر (۲۰ برابر قطر لوله سلاح) قرار دارند [۵]. برای کنترل این اثر نیاز به تخمین جزئیات موج انفجار با استفاده از مشخصات سلاح از قبیل مواد پیشران، فشنگ و شرایط شلیک می‌باشد. این موج انفجاری ضربه‌ای پس از برخورد به سازه منعکس شده که نسبت به زاویه برخورد، انعکاس منظم یا ماخ رخ خواهد داد. به خاطر ماهیت این موج و فشار زیاد آن در زمان اثر بسیار کوتاه بر سازه، ارتعاش شدیدی ایجاد می‌شود. این ارتعاش در شلیکهای متناوب تاثیر مخرب‌تری دارد و باعث صدمات سازه‌ای و کاهش راندمان تجهیزات الکترونیکی و مکانیکی می‌شود.

در زمینه تاثیر موج انفجار ناشی از شلیک سلاح بر سازه مطالعات تئوری و عملی متعددی انجام شده است؛ اما با توجه به محدودیت‌های موجود در انتشار نتایج این مطالعات، اطلاعات کمی از کارها وجود دارد. از این رو برنامه کامپیوتری جهت محاسبه و مدلسازی موج انفجار ضربه‌ای سلاح تهیه گردید.

تیلور و لین در سال ۱۹۸۰ یک مدل عددی برای توصیف میدان موج ناشی از انفجار خمپاره‌انداز ارائه کردند [۱]. آنها از فرآیند ADI برای المان‌بندی و از معادله انتگرالی اویلر وابسته به زمان استفاده نمودند. همچنین اسمیت در سال ۱۹۸۱ برای یک سلاح با کالیبر ۲۰ میلی‌متری در محدوده سرعت شلیک گلوله ۲۶۰-۱۰۰۰ متربرثانیه، پارامترهای موج را محاسبه و با روشهای عددی و تحلیلی مقایسه نمود [۲]. پس از آن در سال ۱۹۸۵ هیپس یک برنامه کامپیوتری جهت محاسبه و تولید کانتورهای فشار و زمان برای

انواع مختلف سلاح برای فواصل ۱۰ تا ۵۰ کالیبر نوشت که نتایج برنامه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی قابل قبول بود [۳]. در سال ۱۹۹۳ فانسلر با استفاده از روشهای مقیاس‌سازی و شکل موج فریلندر مقادیر فشار و زمان را برای فواصل دورتر از دهانه سلاح محاسبه و برای معتبرسازی از نتایج آزمایشگاهی یک تانک استفاده کرد [۴-۵]. همچنین از جمله کارهای عددی انجام گرفته در این زمینه می‌توان به مقاله دکتر کلر اشاره کرد که در سال ۲۰۰۰ با استفاده از نرم‌افزار فلونت و کد DG موج انفجار را برای سلاح دارای شعله‌پوش به دست آورد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود [۶].

کیم و هان در سال ۲۰۰۶ برای سلاحهای ۳۰ و ۲۳ میلی‌متری کانتورهای فشار و زمان را برای فاصله ۱۰ تا ۵۰ کالیبر استخراج و پس از معتبرسازی نتایج، آن را روی بال هواپیما برای ۵۰ شلیک با فرکانس ۱۷ هرتز اعمال نمود [۷].

۲- مدلسازی موج انفجار ضربه‌ای در فواصل

نزدیک

پس از شلیک، موج انفجاری با سرعت و فشار زیاد از دهانه لوله خارج شده و در محیط گسترش می‌یابد. در صورت برخورد موج به سطح، موج منعکس شده، که فشار برگشتی موج با توجه به روابط شوک آیرودینامیکی دارای سرعت کمتر و فشار بیشتر است. این فشار باعث اعمال یک بار ضربه‌ای به سطح در زمان بسیار کم می‌شود. با توجه به زاویه برخورد موج، دو حالت انعکاس منظم یا ماخ رخ خواهد داد. در این مقاله به منظور محاسبه فشارها و زمانهای موج انفجار، برنامه‌ای نوشته شده که نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

۳- موج انفجار در فضای آزاد

با توجه نتایج مطالعات انجام شده بهترین تابعی که از فیزیک موج انفجار تبعیت می‌کند، شکل موج فریدلندر

$$l = (9.28 * 10^{-2}) D \left\{ \frac{P_m V_p}{(\gamma - 1) P_{\infty} a_{\infty}} \left[1 + \frac{\gamma(\gamma - 1) V_p^2}{2 a_m^2} \right] \right\}, \quad V_p > a_m \quad (3)$$

$$l' = l [\mu \cos \theta + (1 - \mu^2 \sin^2 \theta)^{1/2}] \quad (4)$$

$$Z = \left(\frac{r}{l'} \right)^{-1.1} \quad (5)$$

$$\bar{P}_I = 2.4Z \quad (6)$$

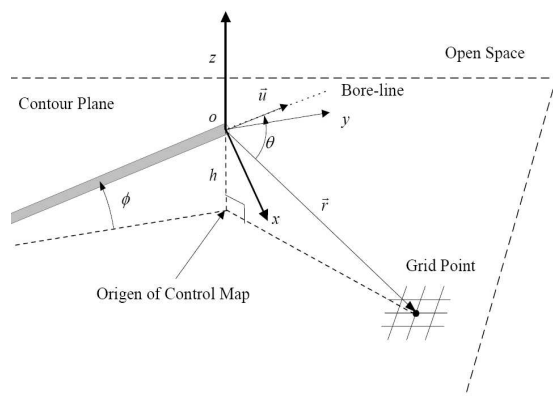
$$\bar{P}_I = 2.4Z \quad (7)$$

$$f(Z) = 1 + 10Z - (Z^2 / 1.2) + (Z^3 / 2.3) - (Z^4 / 3.4) + (Z^5 / 4.5) - (Z^6 / 5.6) \quad (8)$$

$$f(Z) = 1 + 10Z - (Z^2 / 1.2) + (Z^3 / 2.3) - (Z^4 / 3.4) + (Z^5 / 4.5) - (Z^6 / 5.6) \quad (9)$$

با توجه به روابط فوق، برای یک صفحه که در فاصله h از دهانه لوله قرار دارد، کانتورهای فشار ماکزیمم و زمانهای رسیدن و ماندگاری برای هر نقطه به دست می‌آید. برای این منظور با توجه به شکل (۲)، از دهانه لوله سلاح تا نقطه‌ای از صفحه، بردار \vec{r} وصل می‌شود که زاویه آن با راستای لوله سلاح θ در نظر می‌گیریم. برای یک نقطه به مختصات $(X, Y, -h)$ ، بصورت زیر بدست می‌آید:

$$r = (x^2 + y^2 + h^2)^{1/2} \quad (10)$$

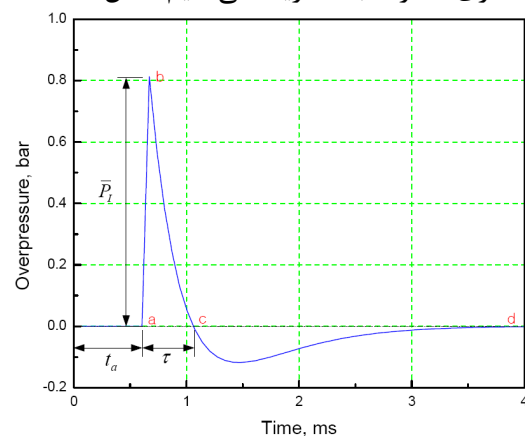


شکل (۲) هندسه شرایط شلیک [۷]

است. در این تابع از سه پارامتر ثابت استفاده می‌شود؛ که هر یک معرف یکی از مفاهیم موج انفجار است. تابع زیر برای توصیف فشار در فضای آزاد و بصورت بی‌بعد می‌باشد:

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

که برای هر نقطه در فضا، P_I ماکزیمم فشار برخوردی، زمان رسیدن موج را t_a و مدت زمان ماندگاری فشار مثبت تعریف می‌کنیم شکل (۱).



شکل (۱) تابع فریدلندر برای تخمین فشار [۷]

به دلیل کوچک بودن زمان ماندگاری (τ) و زیاد بودن فشار ماکزیمم (P_I)، موج انفجار را می‌توان به صورت بار ضربه‌ای در نظر گرفت. برای محاسبه ضرایب معادله (۱) در هر نقطه از فضا باید مشخصات سلاح و شرایط شلیک مشخص شده باشد. شکل (۲) شرایط مدل‌سازی مسئله را نشان داده و برای سادگی کار گسترش موج انفجار در فضا به صورت کروی فرض شده و در محاسبات از روش مقیاس‌سازی استفاده می‌شود.

روابط مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای معادله (۱) به شرح زیر است [۳]:

$$l = D \left\{ \frac{(8.62 * 10^{-3}) P_m a_m \left[1 + \frac{\gamma(\gamma - 1)}{2 a_m^2} \right]^*}{(\gamma - 1) P_{\infty} a_{\infty}} \right\}^{1/2}, \quad V_p \leq a_m \quad (2)$$

$$\left[\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{(\gamma - 1) V_p}{2 a_m} \right) \right]^{\frac{3\gamma - 1}{\gamma - 1}}$$

با توجه به شکل (۴)، P_I, P_∞ بترتیب فشار قبل و بعد از شوک عمودی است. در شوک برخوردی مقدار زاویه انحراف از معادله (۱۳) بدست می‌آید:

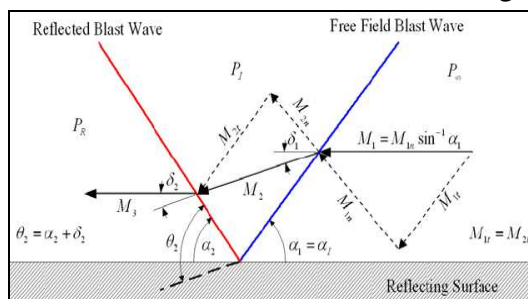
$$\tan(\delta_1) = 2 \cot(\alpha_1) \frac{M_1^2 \sin^2(\alpha_1) - 1}{M_1^2 (\gamma + \cos(2\alpha_1)) + 2} \quad (13)$$

عدد ماخ بعد از شوک با توجه به قوانین آیرودینامیک را نیز به صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$M_2 = \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \left(\frac{P_R - P_I}{P_I} \right) + 1 \right]^{1/2} / \sin(\theta_2) \quad (14)$$

$$\tan(\delta_2) = 2 \cot(\theta_2) \frac{M_2^2 \sin^2(\theta_2) - 1}{M_2^2 (\gamma + \cos(2\theta_2)) + 2} \quad (15)$$

برای ارضا شرایط مرزی در صورتی که جریان خروجی شوک، موازی سطح انعکاس باشد، باید مقدار انحراف در دو حالت را با یکدیگر برابر قرار داد ($\delta_1 = \delta_2$) شکل (۴).



شکل (۴) حرکت جریان در شوک ثابت [۷]

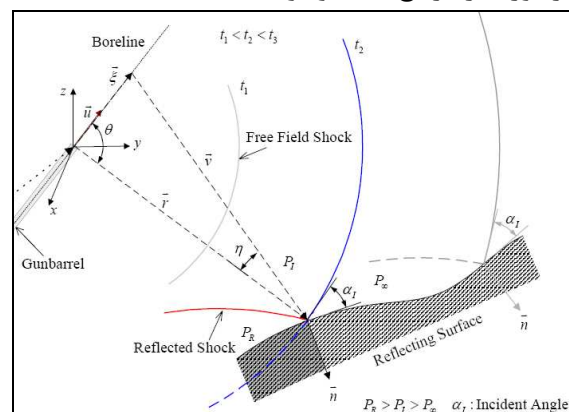
بنابراین با مساوی قرار دادن معادلات (۱۳) و (۱۵)، زاویه θ_2 به دست می‌آید. عدد ماخ برای حالت ۲ را می‌توان بر حسب فشار برگشتی نیز نوشت. فشار برگشتی در انعکاس منظم با استفاده از معادله (۱۴) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_R = P_I \left[\frac{2\gamma}{1+\gamma} (M_2^2 \sin^2(\theta_2) - 1) + 1 \right] \quad (16)$$

روابط ذکر شده فوق برای حالتی است که مقدار زاویه برخورد کوچکتر از حد مجاز باشد. بیشترین مقدار

۴- موج انفجار برگشتی

همانطور که گفته شد ماهیت موج تولید شده توسط سلاح یک موج ضربه‌ای است. این موج در صورت برخورد به سطح، با توجه به مقدار زاویه برخورد، به دو صورت انعکاس منظم و ماخ می‌توان در نظر گرفت. زاویه بین راستای انتشار موج انفجار و بردار نرمال سطح را زاویه برخورد (α_1) تعریف می‌کنند. در شکل (۳) نمایی از برخورد موج انفجار به سطح نشان می‌دهد. به منظور محاسبه راستای انتشار موج انفجار باید در لحظه برخورد موج (زمان رسیدن موج)، گرادیان t_a را به دست آورد. نحوه استخراج زاویه برخورد در مرجع [۳] موجود است.



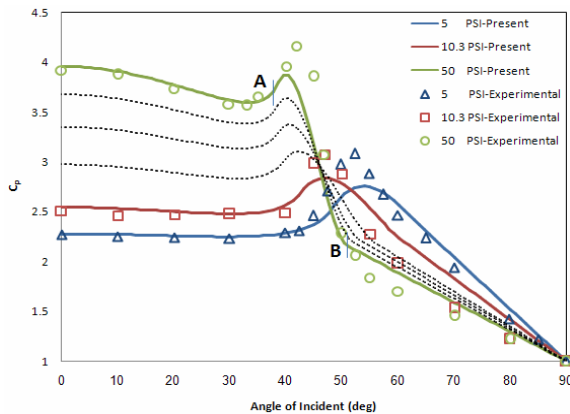
شکل (۳) برخورد موج انفجار به سطح و انعکاس [۷]

۵- تئوری شوک مورب

در صورتی که زاویه برخورد از مقدار مجاز کمتر باشد می‌توان از انعکاس منظم و تئوری شوک مورب استفاده کرد. با فرض اینکه ناظر روی موج شوک قرار دارد و با سرعت آن در حرکت است، می‌توان آن را به عنوان شوک ثابت در نظر گرفت. عدد ماخ قبل از شوک عمودی از رابطه زیر تبعیت می‌کند شکل (۴):

$$M_{1n} = \left[\frac{(\gamma-1)}{2\gamma} \left(\frac{P_I - P_\infty}{P_\infty} \right) + 1 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$M_{2n} = \left[\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{1n}^2 \right) / \left(\gamma M_{1n}^2 - \frac{(\gamma-1)}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$



شکل (۵) مقایسه بین ضریب فشار برگشتی در زوایای مختلف برخوردی با نتایج آزمایشگاهی

۷- مدلسازی موج انفجار در فواصل دور

روابط ارائه شده برای تخمین مشخصات فشار و زمان موج انفجار را برای فواصلی بین ۱۰-۵۰ برابر قطر لوله سلاح اعتبار دارد. در این قسمت روابطی برای بیان رفتار موج انفجار در مکانهایی به مراتب دورتر (۴۰۰ کالیبر) بدست آورده خواهد شد.

همانطور که می‌دانید در قسمت قبل برای تخمین فشار ماکزیمم در فضای آزاد از تقریب یک جمله‌ای استفاده گردید.

$$\bar{P} = A * Z^{-a}, \quad a > 1 \quad (23)$$

با استفاده از روش کوچکترین مربعات ضرایب معادله بدست می‌آید. در اینجا نیز برای تخمین فشار ماکزیمم معادله‌ای با دو ترم و نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در معادله زیر برای ضرایب A, B نیز با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود و کوچکترین مربعات ضرایب بدست آمد.

$$\bar{P} = A * Z^{-1} + B * Z^{-2} \quad (24)$$

در شکل (۵) یک سری فشار حداکثر برای سلاحهای مختلف بصورت بی‌بعد ارائه شده است.

جدول (۱) محاسبه فشار ماکزیمم به روش کوچکترین مربعات

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

زاویه برخورد برای انعکاس منظم (α_{1max}) با مشتق‌گیری از معادله (۱۳) نسبت به δ_1 به دست می‌آید:

$$\frac{-\frac{2}{\sin^2(\alpha_{1max})} AB + 4M_1^2(A+2B)\cos^2(\alpha_{1max})}{A^2} = 0 \quad (17)$$

$$A = M_1^2(\gamma + \cos(2B)) + 2 \quad (18)$$

$$A = M_1^2(\gamma + \cos(2B)) + 2 \quad (19)$$

۶- انعکاس ماخ

با افزایش زاویه برخورد، روشهای تحلیلی برای محاسبه فشار برگشتی وجود ندارد. بنابراین باید از روشهای عددی استفاده نمود. با استفاده از نتایج آزمایشات انجام شده برای فشار برگشتی می‌توان رفتار مشابهی برای آن تخمین زد. با توجه به شکل (۵) می‌توان دید که زاویه در $\alpha_I = 90$ ضریب فشار برگشتی برابر یک می‌شود. مقادیر فشار برگشتی در زوایای بزرگتر از زاویه ماکزیمم (α_{1max}) را می‌توان به دو صورت منحنی درجه سه و خطی در نظر گرفت [۳].

$$P_y(\alpha_x) = A_0 + A_1 \alpha_x + A_2 \alpha_x^2 + A_3 \alpha_x^3 \quad (20)$$

$$P_y(\alpha_x) = B_0 + B_1 \alpha_x \quad (21)$$

برای بدست آوردن ضرایب معادلات فوق باید نقاط A, B مشخص باشد (شکل ۵). با استفاده از تئوری شوک مورب برای حالت انعکاس منظم در زاویه (α_{1max}) مقدار و شیب نقطه A به دست می‌آید. در مورد نقطه B با استفاده از یک سری شیب‌های استاندارد بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و از روش عددی میان‌یابی لاگرانژی و مختصات نقطه A, مختصات نقطه B را تخمین زد [۳].

ضریب فشار برگشتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{P_R}{P_I} \quad (22)$$

که در آن:

$$X(Z) = \sqrt{Z^2 + A'Z + B'} \quad (29)$$

$$A' = \frac{2\gamma A}{\gamma + 1} \quad (30)$$

$$B' = \frac{2\gamma B}{\gamma + 1} \quad (31)$$

و $\gamma = 1.4$ ضریب گرمایی ویژه در هوای محیط است. مقدار اولیه زمانی \bar{t}_0 ، مرتبط با تغییر شکل طبیعی موج انفجار در فضا می‌باشد؛ که در زوایای مختلف ممکن است تغییر کند. این مقدار در لحظه خروج گلوله از سلاح صفر می‌باشد.

در نهایت با قرار دادن مقادیر A, B, γ در معادله (28) زمان رسیدن موج بدست می‌آید. مقدار \bar{t}_0 نیز بروش کوچکترین مربعات نیز تخمین زده شد.

$$\bar{t}_a = X(Z) - 0.52 \ln[2X(Z) + 2Z + 1.04] - 0.56 \quad (32)$$

$$X(Z) = \sqrt{Z^2 + 1.04Z + 1.88} \quad (33)$$

۹- مثال عددی و صحنه‌گذاری روش بکار رفته و

بررسی نتایج

برای اعتبارسازی و صحنه‌گذاری روش حل و برنامه نوشته شده مثال عددی برای دو سلاح مختلف با کالیبرهای کوچک و بزرگ ذکر خواهد شد. نتایج آزمایشگاهی سلاح چینی ۳۰ میلی‌متر و تانک ۱۰۵ میلی‌متری استفاده شده که در جدول (۲) مشخصات سلاح و شرایط شلیک برای دو مسئله آورده شده است.

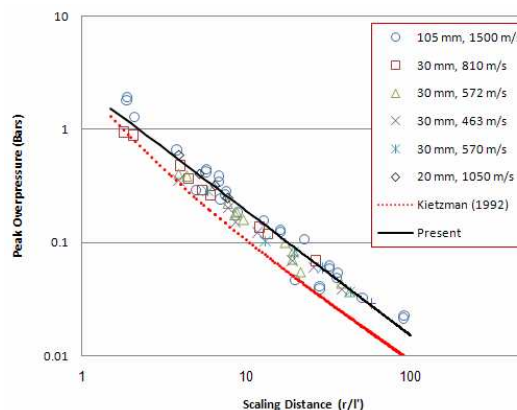
جدول (۲) مشخصات سلاح و شرایط شلیک

Parameter	Naval Gun	Tank	Unit
D	۳۰	۱۰۵	mm
h	۰/۲۳-۰/۲۶	۱/۲	m
a_m	۹۲۰	۱۰۵۰	m/s
a_∞	۳۴۰/۲۹۲	۳۴۰/۲۹۲	m/s
V_p	۷۸۰	۱۵۰۰	m/s
Φ	۰-۵	۰	deg
P_m / P_∞	۳۳۰	۷۰۵	-
γ	۱/۲۴	۱/۲۴	-
μ	۰/۷۸	۰/۶۵	-

پس از انجام یکسری تقریب که برخی از آنها در جدول (۱) آورده شده است؛ در نهایت معادله فشار ماکزیمم در فضای آزاد بصورت زیر خواهد بود.

$$\bar{P} = 0.89 * Z^{-1} + 1.61 * Z^{-2} \quad (25)$$

همانطور که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌کنید، تقریب دو ترمی فشار حداکثر رفتار بهتری نسبت به تقریب تک ترمی می‌باشد.



شکل (۶) مقایسه فشار ماکزیمم در سلاحهای مختلف با مرجع [۴]

۸- تخمین زمان رسیدن موج در تمام فواصل

پس از محاسبه فشار ماکزیمم می‌توان با استفاده از همین تقریب رابطه جدیدی برای زمان رسیدن موج بدست آورد.

همانطور که در قسمتهای قبل ذکر شد؛ رابطه پرش فشار ماخ بصورت زیر می‌باشد.

$$\bar{P} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_s^2 - 1) \quad (26)$$

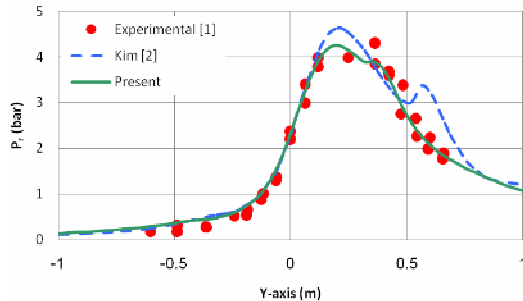
در معادله بالا برای فشار ماکزیمم می‌توان از معادله تقریبی (25) استفاده کرد. و M_s عدد ماخ حرکت شوک در هوای آرام می‌باشد. برای بدست آوردن زمان رسیدن موج در هر نقطه از فضا با استفاده از معادله زیر و انتگرالگیری تا نقطه مورد نظر بدست می‌آید.

$$dt_a / dr = 1 / M_s \quad (27)$$

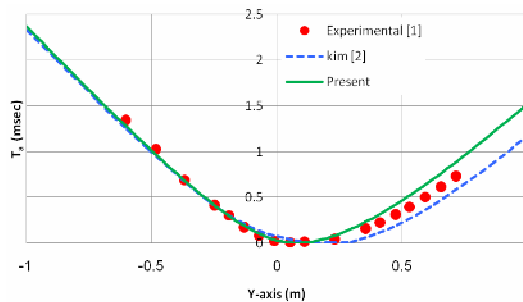
از قرار دادن معادله (25) در رابطه (26) و استخراج عدد ماخ (M_s)، از روشهای تحلیلی می‌توان مقدار زمان رسیدن را از رابطه (27) بدست آورد. پس از انجام انتگرال گیری خواهیم داشت:

$$\bar{t}_a - \bar{t}_0 = X(Z) - \frac{A'}{2} \ln[2X(Z) + 2Z + A'] \quad (28)$$

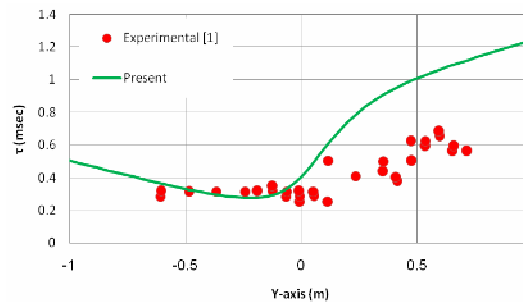
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقادیر فشار برگشتی، زمان رسیدن و زمان ماندگاری در فشار مثبت در راستای لوله سلاح با نتایج آزمایشگاهی و مراجع دیگر مقایسه شده است.



(الف)



(ب)



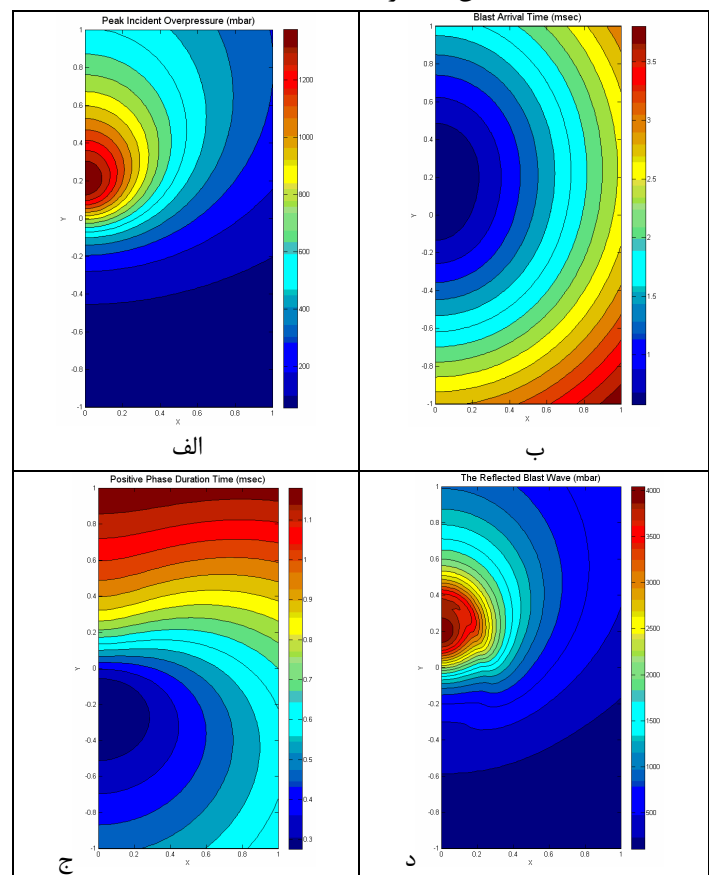
(ج)

شکل (۸) مقایسه نتایج سلاح ۳۰ میلی‌متری با آزمایشگاهی، (الف) فشار برگشتی، (ب) زمان رسیدن، (ج) زمان ماندگاری در فشار مثبت

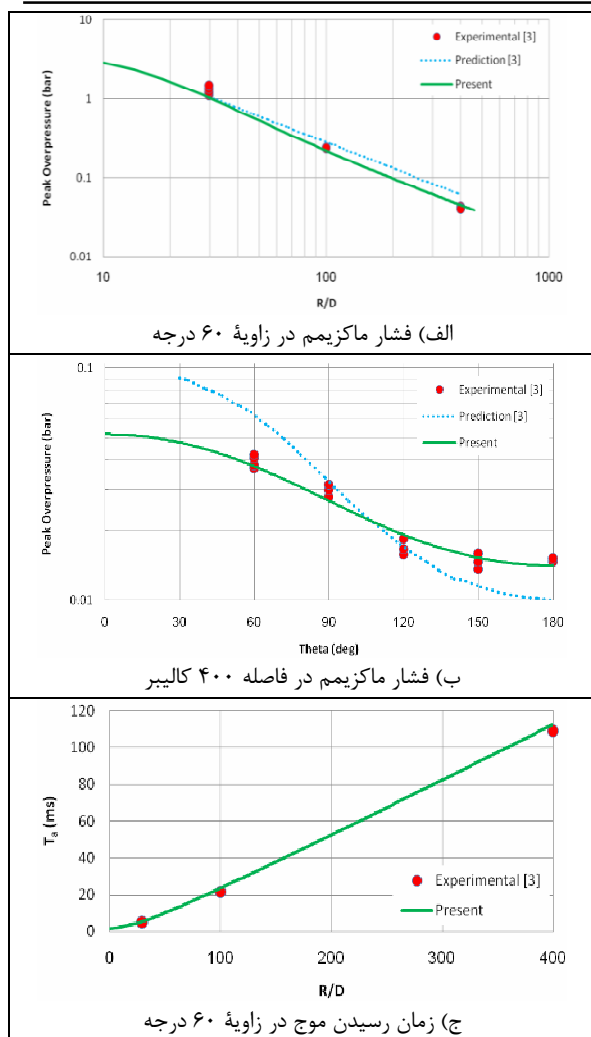
همانطور که مشاهده می‌شود روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی تطابق بهتری دارد و نسبت به روش مرجع [۳-۷] رفتار مناسبتری ارائه می‌کند. در مورد زمان رسیدن دو روش تخمین خوبی با حالت واقعی نشان می‌دهد. زمان ماندگاری در فشار مثبت برای فواصل پشت سلاح خطای کمی و با افزایش فاصله از

۱۰- نتایج

شکل (۷)، کانتورهای ماکزیمم فشار برخوردی، زمان رسیدن، زمان ماندگاری و ماکزیمم فشار برگشتی برای سلاح ۳۰ میلی‌متری را نشان می‌دهد. فشار ماکزیمم برخوردی و برگشتی در راستای لوله و جلوی آن نسبت به عقب بیشتر است و در فاصله کمی جلوتر از دهانه سلاح فشار بیشترین مقدار را دارد. با توجه به فرض گسترش کروی میدان موج انفجار، کانتورها نیز به صورت دایره‌ای با مرکزهای مختلف روی خطی در راستای لوله قرار دارند. در مورد زمان رسیدن موج، این قاعده تطابق بهتری دارد و در فواصل دورتر زمان به شدت افزایش می‌یابد. کانتور زمان ماندگاری در فشار مثبت به این نکته اشاره می‌کند که نرخ افزایش طول موج انفجار در راستای لوله جلوی دهانه سلاح نسبت به عقب آن بیشتر است.



شکل (۷) کانتورهای سلاح ۳۰ میلی‌متری (الف) فشار ماکزیمم، (ب) زمان رسیدن موج، (ج) زمان ماندگاری در فشار مثبت، (د) فشار برگشتی



شکل (۱۰) مقایسه نتایج تانک ۱۰۵ میلی‌متری با آزمایشگاهی

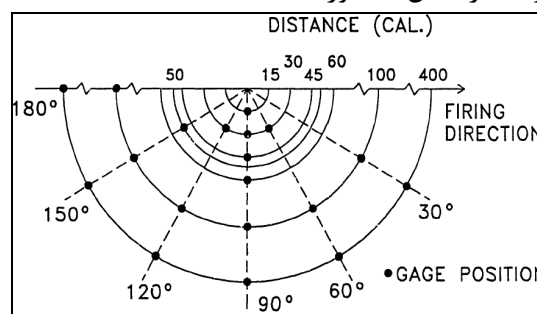
۱۱- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از روشهای تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی یک برنامه کامپیوتری جهت محاسبه توزیع فشار موج انفجار در سطوح مختلف بدست آمد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده مشاهده گردید که فشار برگشتی و زمان رسیدن موج تقریباً در تمامی فواصل با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. مدل ارائه شده جهت تخمین زمان ماندگاری در فشار مثبت در مناطق پشت دهانه مناسب و در مناطق دیگر با افزایش فاصله خطا نیز افزایش می‌یابد که نیازمند مطالعات بیشتر در این مورد می‌باشد.

جلوی سلاح مقدار خطا بیشتر شده که نیازمند بررسی‌های بیشتری در مورد این پارامتر است.

نتایج بیشتر برای فواصل نزدیک در مرجع [۸-۹] آورده شده است.

برای بررسی روابط بدست آمده در فواصل دور از دهانه سلاح از نتایج آزمایشگاهی موجود یک تانک ۱۰۵ میلی‌متری استفاده شد. شکل (۹) جانمایی قرارگیری حسگرها جهت اندازه‌گیری را نشان می‌دهد [۴]. مقادیر فشار ماکزیمم در زاویه ۶۰ درجه نسبت به راستای لوله در فواصل مختلف و فشار ماکزیمم در فاصله ۴۰۰ برابر قطر لوله و زوایای مختلف و همچنین زمان رسیدن موج در زاویه ۶۰ درجه در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل (۹) چیدمانی حسگرها جهت اندازه‌گیری پارمترهای موج

انفجار [۴]

همانطور که مشاهده می‌شود روابط ارائه شده برای تخمین فواصل دور مناسب و خطای قابل قبولی دارد. در تئوری‌های قبل با افزایش فاصله خطا افزایش می‌یافت که این مشکل با تقریب دو جمله‌ای فشار ماکزیمم تا حد زیادی برطرف گردید.

فهرست علائم

۱۲- مراجع

- [1] T.D. Taylor , T.C. Lin, "A numerical model for Blast Muzzle flow fields", Aerospace Corporation, 1980
- [2] E.M. Schmidt, E. J. Gion, K.S. Fansler, "A Parametric study of the muzzle blast from a 20mm Cannon", U. S. Army Ballistic Research Laboratory, 1981
- [3] Heaps, C. W., Fansler, K. S., and Schmidt, E. M., "Computer Implementation of a Muzzle Blast Prediction Technique," The Shock and Vibration Bulletin, Naval Research Laboratory, Washington, DC, Bulletin 56, 1986, p. 213-229.
- [4] J. Kitzman, K. S. Fansler, W. G. Thompson, "Muzzle Blast From 105mm M735 Round", US Army Research Laboratory, 1992, AD-A245 565
- [5] K.S. Fansler, " Description of Gun Muzzle Blast by Modified Ideal Scaling Models", Army Research Laboratory, 1997, ARL-TR-1434
- [6] D.L. Cler, N. Chevaugon, " Computational fluid dynamics application to gun muzzle blast a validation case study", U. S. Army Armament Research ,2003, ARCCB-TR-03011
- [7] Dae-Kwan Kim, Jae-Hung Han, " Establishment of Gun Blast Wave Model and Structural Analysis for Blast Load", AIAA Journal, 2006
- [۸] محمد حسین صادقی، محمدرضا خدمتی، منوچهر فدوی، "مدلسازی موج انفجار ضربه‌ای ناشی از شلیک سلاح"، یازدهمین همایش صنایع دریایی، ۱۳۸۸
- [۹] محمد حسین صادقی، محمدرضا خدمتی، مهدی فکوری، محمد رضایی سنگتایی "تحلیل اجزای محدود عرشه شناورهای آلومینیومی تحت اثر فشار موج ناشی از شلیک سلاح"، دوازدهمین همایش صنایع دریایی، ۱۳۸۹
- [۱۰] محمدرضا خدمتی، محمد حسین صادقی، "بررسی روشهای مختلف شبیه‌سازی و تخمین بارهای ضربه‌ای انفجاری موثر بر سازه‌ها"، دهمین همایش صنایع دریایی. ۱۳۸۷.
- 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)
- l' : طول مقیاس موثر (بی بعد)
- L : طول دهانه لوله سلاح (متر)
- M_e : عدد ماخ خروجی از دهانه سلاح
- M_s : عدد ماخ حرکت شوک در هوای آرام
- P_I : فشار موج انفجاری در هر نقطه از فضا (بار)
- P_m : فشار هوا در دهانه سلاح (بار)
- P_e : نسبت فشار خروجی به فشار اتمسفر
- \bar{P}_I : مقدار بی بعد شده ماکزیمم فشار هوا
- \bar{P}_I : مقدار ماکزیمم فشار هوا (بار)
- P_∞ : فشار اتمسفر (بار)
- r : فاصله تا نقطه مورد نظر (متر)
- RMS: باقیمانده کمترین مربعات
- t : زمان (ثانیه)
- t_a : زمان رسیدن ضربه موج انفجار به نقطه مورد نظر (ثانیه)
- \bar{t}_a : بی بعدسازی زمان رسیدن موج انفجاری ($\bar{t}_a = t_a \times a_\infty / l'$)
- \bar{t}_0 : ضریب اصلاحی زمان رسیدن موج
- V_p : سرعت خروج گلوله (متر بر ثانیه)
- Z : پارمتر مقیاس سازی
- τ : مدت زمان اثر فشار مثبت (ثانیه)
- $\bar{\tau}$: بی بعدسازی مدت زمان اثر فشار مثبت ($\bar{\tau} = \tau \times a_\infty / l'$)
- γ : نسبت گرمای ویژه
- γ_e : نسبت گرمای ویژه پیشران در خروجی
- μ : ممان مشخصه موج انفجار
- δ : پارامتر دمش به سمت پایین موج انفجار