

شبیه‌سازی عددی مسیر حرکت بمب برای تخمین عمق نفوذ

بمب‌های عمل نکرده ضمن مطالعه موردی

حسن رادمرد^{۱*}، حسام‌الدین ابن‌الدین حمیدی^۲، حسین خدارحمی^۳

۱- مربی دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع) ۲- استادیار ۳- دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۱۱/۰۷، پذیرش: ۹۴/۰۱/۲۷)

چکیده

حدود یک ربع قرن از جنگ تحمیلی عراق علیه ایران گذشته اما متأسفانه هنوز مناطقی از کشور آلوده به مین و بمب‌های عمل نکرده و باقی‌مانده از جنگ بوده و گاهی نیز خسارات جبران‌ناپذیری به کشور تحمیل می‌شود. با توجه به محدودیت برد تجهیزات مین‌یاب مغناطیسی و برای حصول اطمینان کافی از عدم وجود بمب‌های عمل نکرده، ضروری است عمق نفوذ بمب با دقت قابل قبولی برآورد شود. در این مقاله، ابتدا مدل ریاضی حرکت بمب در هوا و در خاک نوشته شده و سپس در نرم‌افزار متلب بر مبنای استاندارد TM و هندبوک نظامی امریکا، حرکت بمب شبیه‌سازی شده است. در ادامه با مطالعه موردی نفوذ بمب‌های عمل نکرده در میدان نفتی آزادگان، نتایج شبیه‌سازی و مقاله میزوهو با هم مقایسه و اثر زاویه حمله در میزان عمق نفوذ بررسی شده است. در نهایت با تحلیل کلیه پارامترهای مؤثر، میزان صحیح عمق نفوذ برآورد و عدم اعتبار نتایج مقاله میزوهو نشان داده شده است. حفاری‌های بعدی انجام شده در منطقه و عدم برخورد به بمب‌های عمل نکرده در عمق بیش از شش متر نیز عملاً نتایج این تحقیق را به اثبات رسانده است.

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی، حرکت پرتابه، بمب‌های عمل نکرده، عمق نفوذ.

Prediction of UXO's Penetration Depth Using Numerical Simulation Bomb Trajectory with Case Study

H. Radmard, H. Ebnodin Hamidi, H. Khodarahmi*

Imam Hossein University

(Received: 27/01/2015; Accepted: 16/04/2015)

Abstract

About a quarter of a century has passed since the IRAK-IRAN war but unfortunately, some areas of the country still remains contaminated by mines and unexploded bombs and sometimes irreparable damage is inflicted. Due to the limitation of magnetic mine detectors, penetration depth should be estimated with reasonable accuracy. In this paper, the mathematical model of the bomb motion in the air and soil is written. The bomb motion is simulated based on TM and military handbook with MATLAB. Then UXO penetration depth in Azadegan oilfield was Investigated as a case study and simulation results are compared with MIZUHO results. The effect of the bomb angle of attack in the penetration depth is also determined. Finally, regarding all effectives parameters, the correct depth is estimated and invalidity of MIZUHO results is shown. Subsequent excavations carried out in the field and non-observation of UXO in more than six meters deep proved obtained results.

Keywords: Simulation, Projectile Trajectory, UXO, Penetration Depth.

* Corresponding Author E-mail: hassan.radmard@gmail.com

۱. مقدمه

پاکسازی در منطقه»، «بررسی علمی و تجربی مسیر حرکت بمب در هوا و خاک»، «مکانیک و مدل‌های نفوذ پرتابه در خاک» و «برنامه‌نویسی و محاسبات عددی» تشکیل شد. ترکیب تیم مشاوره شامل شش نفر با تحصیلات دکترا از اساتید دانشگاه با سابقه حضور در پست‌های مدیریتی در جنگ، چهار نفر کارشناس ارشد و دو نفر کارشناس در موضوعات تخصصی فوق بود. علاوه بر این از مشاوره و تجربیات خلبانان و فرماندهان دفاع مقدس همچنین سوابق پاکسازی منطقه که قبلاً در این شرکت انجام شده بود نیز استفاده لازم به عمل آمد. تحقیق حاضر نتایج به‌دست آمده در کمیته‌های بررسی علمی مسیر حرکت بمب و کمیته برنامه‌نویسی و شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

در این مقاله پس از مدل‌سازی ریاضی مسئله، مسیر حرکت بمب در هوا و خاک با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و با فرضیات وزن، ارتفاع، سرعت و زاویه رهاسازی مختلف بمب، زاویه حمله و میزان نفوذ بررسی شده است. آنگاه با در نظر گرفتن فرضیات منطقی و احتمالات ممکن، مقاله مؤسسه میزوهو در این خصوص مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. با عنایت به نتایج تحقیق حاضر و غیر منطقی بودن گزارش میزوهو، تصمیم مسئولین امر بر آن شد که شرکت خارجی خلع ید و کار حفاری توسط نیروهای داخلی انجام پذیرد. در حفاری‌های انجام شده بعدی در عمل صحت نتایج این تحقیق صحه‌گذاری شده و طی عملیات حفاری به هیچ بمب عمل نکرده در عمق بیش از شش متر برخورد نشد و صحت نتایج این تحقیق عملاً اثبات شد.

در مورد تخمین عمق نفوذ بمب در زمین روش تحلیلی دقیقی تاکنون مطرح نشده و اکثر مطالعات بر مبنای آزمایش‌های تجربی و تعیین روابط تجربی برای محاسبه عمق نفوذ است [۲].

در زمینه استخراج روابط تجربی نفوذ در خاک تحقیقاتی انجام گرفته است. به عنوان نمونه فروستال معادلات نفوذ در هدف خاک برای پرتابه‌های با دماغه اجابو پس از برخورد عمودی را توسعه داده است [۳]. چن و لی عمق نفوذ یک پرتابه تغییر شکل ناپذیر با مشخصات هندسی مختلف را برای سرعت برخوردهای مختلف، دماغه‌های مختلف و اهداف بتونی، خاکی یا فلزی بررسی کرده و مدل‌های موجود را با آزمون‌های تجربی مورد بررسی و ارزیابی قرار داده و تطابق خوبی با واقعیت مشاهده کرده‌اند [۴]. وارن نفوذ پرتابه‌های فولادی با دماغه اجابو در اهداف سنگ آهکی شبیه‌سازی نموده است. در این تحقیق روش نیمه تجربی فروستال برای اهداف سنگ آهکی برای تغییر شکل‌های یاب و پیچ توسعه داده شده است [۵]. هیوزی در مورد نفوذ پرتابه‌ها در خاک و سنگ مطالعات تجربی و تحلیلی انجام داده و برنامه رایانه‌ای مختلف برای مدل‌سازی نفوذ در مواد مختلف و سرعت‌های مختلف ارائه کرده است [۶]. امیدوار و همکاران در مقاله‌ای اثر و خواص پرتابه و رفتار خاک در میزان نفوذ از بعد ریز ساختاری و ماکرومکانیک مورد بررسی قرار داده و مبانی فیزیکی نفوذ پرتابه در شن و ماسه را مطالعه کرده‌اند [۷].

آلودگی‌های ناشی از بمب‌ها و گلوله‌های عمل نکرده (UXO)^۱ در منطقه‌های جنگی از موانع جدی توسعه اقتصادی اجتماعی این منطقه‌ها به شمار می‌رود. از این رو قبل از انجام هر پروژه در این منطقه‌ها می‌بایست به پاک‌سازی محل پرداخته و از عدم وجود این آلودگی‌ها تا حد قابل قبولی اطمینان حاصل نمود. به عنوان نمونه، منطقه نفتی دشت آزادگان در زمان دفاع مقدس جزء منطقه‌های عملیاتی بوده و بمب‌ها و مهمات عمل نکرده زیادی نیز در آنجا کشف شده که برای انجام پروژه‌های اکتشاف و استخراج نفت می‌بایست از عدم وجود بمب‌های عمل نکرده اطمینان حاصل نمود.

پیچیدگی سازوکار نفوذ و برآورد عمق آلودگی به گونه‌ای است که ریسک عملیات در منطقه‌های آلوده به طور کامل قابل حذف نیست. اما می‌بایست ریسک عملیات در حد استاندارد آلارپ^۲ کاهش یابد. در زمینه اقدامات منطقی و قابل اجرا به ویژه مرز عمق جستجو و کشف آلودگی، آراء متفاوت است. بدیهی است با توجه به وسعت منطقه و محدودیت تجهیزات شناسایی بمب‌های عمل نکرده در عمق، انجام هر اقدام اضافی که حتی در جهت کاهش ریسک باشد، به دلیل افزایش غیر منطقی هزینه‌ها قابل قبول نیست. بنابراین می‌بایست با فرضیات و روش مستدل و منطقی، حداکثر عمق نفوذ محتمل را برآورد نموده و با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان، عمق مذکور را مبنای پاک‌سازی قرار داد.

در سال ۱۳۸۴ شرکت اینپکس^۳ به عنوان برنده مناقصه عملیات اکتشاف و حفاری میدان نفتی آزادگان، مؤسسه میزوهوی ژاپن را مأمور مطالعه و بررسی عمق نفوذ بمب‌های عمل نکرده در این میدان نفتی نمود. مؤسسه میزوهو طی گزارشی [۱] با در نظر گرفتن یک سری فرضیات و روش تجربی-تحلیلی عمق نفوذ بمب‌های عمل نکرده را پانزده متر برآورد کرده و نتیجه گرفت با توجه به اینکه تجهیزات مین‌یاب سطحی قادرند عملیات جستجو را تا عمق شش متری انجام دهند. می‌بایست در کل منطقه تا عمق ۱۶ متری گمانه^۴ حفر شده و عملیات جستجو در عمق انجام شود تا اطمینان کامل از عدم وجود بمب عمل نکرده حاصل شود. با این فرض با توجه به وسعت منطقه و شعاع عملکرد تجهیزات مغناطیسی مین‌یاب می‌بایست تعداد ۱۶۰۰۰ گمانه حفاری می‌شد. با توجه به هزینه سرسام‌آور حفاری و آزمون این تعداد گمانه و از طرفی حصول اطمینان قابل قبول از عدم وجود بمب‌های عمل نکرده، مأموریت بررسی گزارش میزوهو به شرکت اندیشه و عمران محیط واگذار شد. در این شرکت برای بررسی موضوع فوق هفت کمیته تخصصی «زمین‌شناسی، ژئوتکنیک و ژئوفیزیک»، «جغرافیا و تاریخ جنگ در منطقه»، «مطالعه تاکتیک‌های عملیات هوایی»، «بررسی سوابق

^۱ Unexploded Ordnance

^۲ ALARP: As Low As Reasonably Practicable

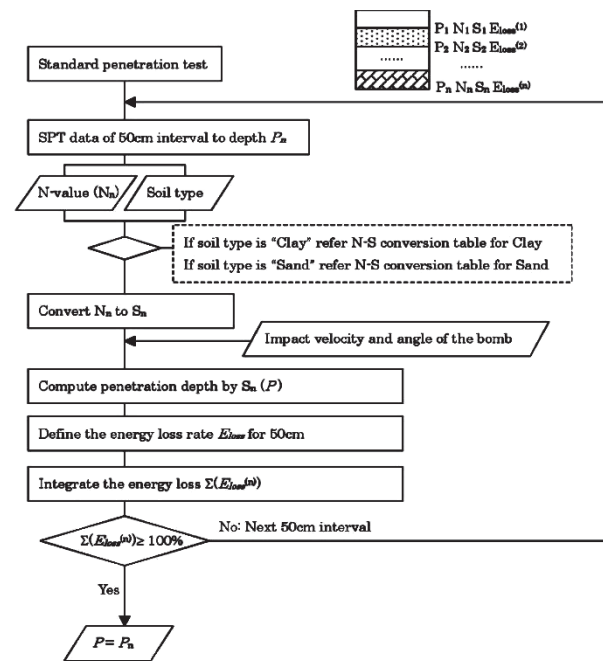
^۳ Inpex

^۴ Bore Hole

ریاضی بیان کننده قوانین فیزیکی و روند پیشرفت پدیده است. مدل شامل فاکتورهایی از قبیل جرم، آیرودینامیک، هدایت و کنترل و معادلات لازم برای محاسبه وضعیت و مسیر پرواز است. مدل هدف، شامل اطلاعات لازم برای تعیین آن است. قوانین فیزیکی شبیه‌سازی شامل مواردی مانند هدف و زیرسامانه‌هاست.

معادلات حرکت، شتاب‌ها، سرعت‌ها و موقعیت را براساس نیروهای جاذبه، رانش و آیرودینامیک ارائه می‌دهد. معادلات دیگری نیز برای شبیه‌سازی زیرسامانه‌ها مانند هدف و کنترل ارائه شده است. منطق شبیه‌سازی، کنترل اتفاقات را تأمین می‌نماید؛ اتفاقاتی از قبیل آشکار شدن هدف، رهگیری و تغییر در شرایط هدایت، نمونه‌ای از اتفاقات شرطی هستند. گاهی اوقات اتفاقاتی که به فعالیت‌های دیگر وابسته باشند، لازم و ضروری هستند. شرایط اولیه وضعیت و موقعیت در لحظه شروع شبیه‌سازی نمونه‌ای از ورودی‌ها هستند.

اطلاعاتی که به ندرت تغییر می‌کنند، به صورت ثابت در برنامه لحاظ می‌شوند. برای مثال، یک وسیله خاص به اطلاعات توصیفی نیاز دارد. معمولاً در شبیه‌سازی، شرایط محیطی مانند چگالی اتمسفر به عنوان تابعی از ارتفاع، در نظر گرفته می‌شود. گاهی یک اتمسفر غیر استاندارد یا سایر متغیرهای محیطی (مانند حرکات و شتاب‌های وضعی یا متغیرهای سامانه کنترل) ممکن است بنا به نیاز مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱. جریان نمای تعیین عمق نفوذ UXO [۱]

مدل ریاضی: مدل یک واحد بمب برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. سه دسته از اطلاعات اولیه داده شده برای شبیه‌سازی استفاده شده است. سری متغیرهای حالت طولی استفاده شده در این شبیه‌سازی به صورت زیر است:

$$x_{long} = [u \ w \ x \ z \ q \ \theta]^T \quad (1)$$

در مورد روش‌های تشخیص و تعیین موقعیت بمب‌های عمل نکرده در زمین به روش مغناطیسی نیز تحقیقاتی انجام گرفته که به برخی از آنها اشاره می‌شود.

بیلینگز و بران در مورد اندازه‌گیری تجربی تغییرات شوک ناشی از مغناطیس کردن مهمات منفجر نشده تحقیق کرده‌اند [۸]. ژانگ و همکاران در مورد تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنج گمانه برای تشخیص و شناسایی بمب‌های منفجر نشده تحقیقی انجام داده‌اند [۹]. امیدوار و همکاران نیز در مورد نفوذ پرتابه‌ها به اهداف دانه‌ای مانند زمین سنی و ماسه‌ای تحقیقی انجام داده و پاسخ هدف دانه‌ای را در برابر نفوذ سریع پرتابه مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰].

در مورد شبیه‌سازی مسیر حرکت موشک نیز تحقیقاتی انجام شده است. کرونسکا در تحقیقی یک روند برای حل و برنامه‌ریزی معادلات نیوتنی حرکت یک موشک هوا به هوا ارائه کرده است [۱۱]. لانگ نیز الزامات مورد نیاز شبیه‌سازی نیمه‌فیزیکی یک موشک به صورت عباراتی از حرکت نسبی بین موشک و هدفش را تعریف نموده است [۱۲].

۲. روش تحقیق

شبیه‌سازی حرکت بمب شامل دو بخش می‌شود. بخش اول حرکت بمب در هوا پس از رهاسازی از هواپیما است که میزان عمق نفوذ، به زاویه برخورد، زاویه حمله و سرعت برخورد به زمین و همچنین وزن بمب بستگی دارد. بخش دوم نیز حرکت بمب در داخل زمین است که به ساختار زمین (سنگ، خاک رسی، آب گرفته، گل و لای و ...) و زاویه برخورد بمب با زمین و جرم بمب بستگی دارد. در تحقیق حاضر که به شبیه‌سازی حرکت بمب پرداخته می‌شود، داده‌های مسئله شامل ارتفاع رهاسازی و زاویه بمب با محور افق و سرعت هواپیما با توجه به سناریوهای پروازی و نتایج پاک‌سازی منطقه و مصاحبه با چهار تن از خلبانان با تجربه دفاع مقدس به دست آمد. آنگاه برای تعیین پارامترهای زاویه و سرعت برخورد در ارتفاعات مختلف رهاسازی، نرم‌افزار شبیه‌سازی پرواز براساس مراحل شبیه‌سازی ارائه شده در استاندارد Military Handbook تهیه شد. این شبیه‌ساز پرواز، مسیر پرواز و پارامترهای مهم یک پرنده را از لحظه جدایی تا برخورد به هدف محاسبه می‌کند.

در مطالعات میزوهو، روند محاسبه عمق نفوذ به صورت شکل (۱) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود سرعت و زاویه برخورد بمب به عنوان ورودی برنامه محاسبه عمق نفوذ، مورد نیاز می‌باشد. در تحقیق حاضر جهت بررسی صحت و سقم فرضیات مقاله مذکور برای سرعت و زاویه برخورد از برنامه شبیه‌ساز عددی مسیر حرکت بمب استفاده شده است.

۳. شبیه‌سازی عددی مسیر حرکت یک بمب

شبیه‌سازی بر اساس مدل ریاضی وسیله، هدف و محیط است. مدل

زاویه پیچش در مختصات بدنه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{q} = M / I_y \quad (۹)$$

معادله اسمی استفاده شده به صورت زیر است:

$$\dot{q} = M_{qq} + M_{uu} \quad (۱۰)$$

این مدل ریاضی و روش شبیه‌سازی بر اساس هندبوک نظامی شماره MIL-HDBK-1211 NOT 1 در مورد شبیه‌سازی پرواز موشک است.

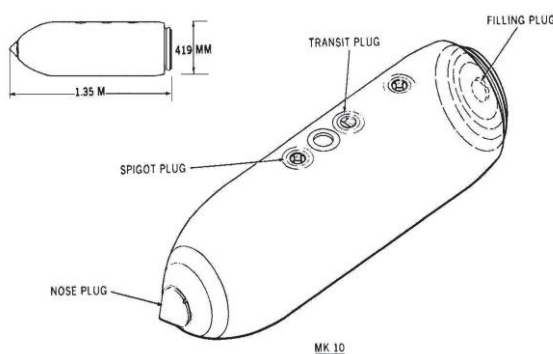
شبیه‌سازی: برای شبیه‌سازی حرکت بمب از نرم‌افزار متلب به عنوان محیط برنامه‌نویسی با گام زمانی یک‌صدم ثانیه استفاده شده است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر نیز به کمک مدل دقیق آیرودینامیکی قابل انجام است. پس از شبیه‌سازی حرکت پرتابه، عملکرد آن روی خمپاره و راکت مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد خوب این برنامه نشان داده شد. در ادامه، اطلاعات داده شده در سه حالت مورد بررسی و استفاده قرار گرفت. ابتدا مقادیر اولیه برای ارتفاعات، سرعت و زاویه‌های متفاوت، داده شده سپس مسیر حرکت بمب و سرعت و زاویه برخورد با زمین محاسبه شد. طی پرواز، همه متغیرهای حالت ذخیره شده و تعدادی از آن‌ها نمایش داده شدند.

ورودی‌های برنامه: در جدول (۱) داده‌های ورودی برنامه شامل ارتفاع و زاویه‌های بمب طبق مقاله میزوهو ارائه شده است.

مشخصات بمب: بمب در نظر گرفته شده در مطالعات میزوهو، بمب ۱۰۰۰ پوندی مدل US MK-10 به طول ۱/۳۵ متر و قطر ۴۱۹ میلی‌متر نشان داده شده در شکل (۳) می‌باشد.

۴. نتایج و بحث

پس از انجام شبیه‌سازی حرکت بمب در هوا، نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج میزوهو برای مقایسه در جدول (۱) ارائه شده است. نمودارهای سرعت بر حسب زمان و ارتفاع رهاسازی بر حسب موقعیت بمب برای سرعت رهاسازی ۲۰۰ و ۲۵۰ متر بر ثانیه و زاویه رهاسازی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه نیز در شکل‌های (۴ و ۵) ارائه شده است.



شکل ۳. مشخصات هندسی بمب US MK-10 [۱]

مدل ریاضی بمب مورد نظر سه درجه آزادی بوده و شش متغیر حالت دارد. بمب به صورت صلب در نظر گرفته شده و دو صفحه تقارن عمود برهم دارد. موقعیت و سرعت در مختصات اینرسی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{X} = V \quad (۲)$$

$$\dot{V} = T_{\psi\theta\phi} \begin{bmatrix} \dot{u} & \dot{w} \end{bmatrix}^T \quad (۳)$$

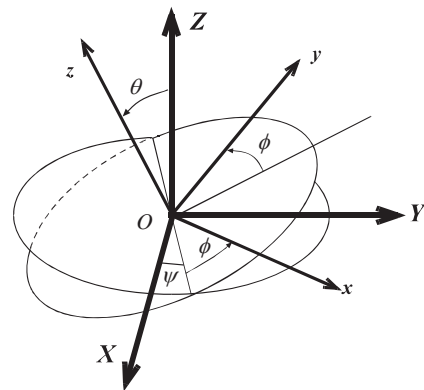
$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (۴)$$

در این رابطه،

$$X = \begin{bmatrix} X & Z \end{bmatrix}^T \quad (۵)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_x & V_z \end{bmatrix}^T$$

و T_{θ} ماتریس تبدیل مختصات از بدنه به سامانه محورهای اینرسی و θ زاویه اوپلری است (شکل (۲)).



شکل ۲. مختصات بدنه و اینرسی و زوایای اوپلری

مؤلفه‌های سرعت در مختصات بدنه‌اند که دینامیک آن‌ها به صورت زیر است:

$$L = \frac{1}{2} \rho A u^2 C_L \quad (۶)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho A u^2 C_D$$

$$\dot{u} = (L \times \sin(\alpha) - D \times \cos(\alpha)) / m - q \times w - g \times \sin(\theta),$$

$$\dot{w} = (-L \times \cos(\alpha) - D \times \sin(\alpha)) / m + u \times q + g \times \cos(\theta),$$

که در این رابطه، ρ چگالی هوا، R شعاع بدنه بمب، ضرایب C_L و C_D پسا و برآ، و α زاویه حمله است. دینامیک وضعیت مدل به صورت زیر است:

$$\dot{\theta} = q \quad (۷)$$

با مشتق‌گیری از این معادله خواهیم داشت:

$$(۸)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{q}$$

بررسی‌ها نشان داد که در مورد بمب هزار پوندی تطابق بسیار خوبی میان نتایج میزوهو و نتایج تحقیق حاضر ملاحظه می‌شود. اما با بررسی سوابق پاکسازی منطقه چنین بمبی یافت نشده است [۱۳].

سوابق ستاد پاکسازی وزارت دفاع در منطقه خوزستان، نشان می‌دهد بزرگ‌ترین بمب در شهر هویزه و با وزن ۷۵۰ پوند بوده است. همچنین بیشترین عمق بمب، عمق یک و نیم متری بوده است که بمب در محل زباله‌دانی شهر خرمشهر مشاهده شده است و این عمق به دلیل ریخته شدن زباله روی مهمات بوده است و نه نفوذ بمب در زمین، سایر موارد مشاهده شده، در سطح زمین بوده است. البته سوابق سایر سازمان‌های فعال در پاکسازی نشان می‌دهد که در منطقه آزادگان بمبی با بیش از وزن ۷۵۰ پوندی کشف نشده است [۱۳]. شکل (۷) نمونه‌ای از بمب ۵۰۰ پوندی که در منطقه دشت آزادگان کشف و منهدم شده را نشان می‌دهد.



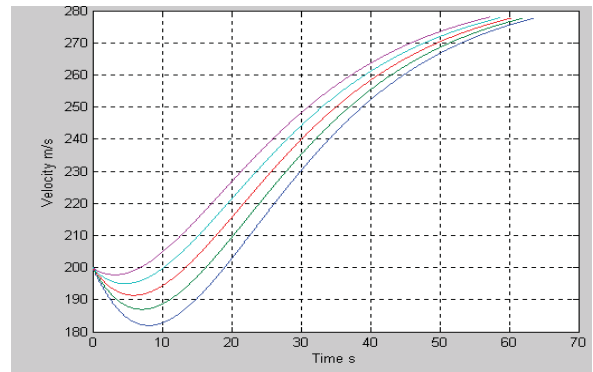
شکل ۷. نمونه‌ای از بمب ۵۰۰ پوندی کشف شده در منطقه دشت آزادگان [۱۳]

اصولی‌ترین عملیات پاکسازی در منطقه نفتی دشت آزادگان به منظور لرزه‌نگاری و اکتشاف نفت انجام شد. این عملیات در گستره‌ای به ابعاد ۵۷ کیلومتر در ۳۳ کیلومتر و تا عمق ۴ متر در معابر تعیین شده با استاندارد قابل قبول صورت گرفت. نتایج گزارش‌های این پاکسازی نشان می‌دهد که به تعداد ۲۷۷۰۴ عدد مهمات عمل نکرده جمع‌آوری و منهدم شده است. بر اساس گزارش‌های پاکسازی در این مرحله و با توجه به تعداد زیاد مهمات جمع‌آوری شده و تنوع در نوع، اندازه و وزن آن‌ها، اعلام گردیده که تمام موارد کشف شده در سطح زمین بوده است. تقریباً یک‌هشتم از کل محدوده پاکسازی شده تا عمق شش متر کاوش شده و هیچ‌گونه مهماتی در اعماق زیرین پیدا نشده است [۱۳].

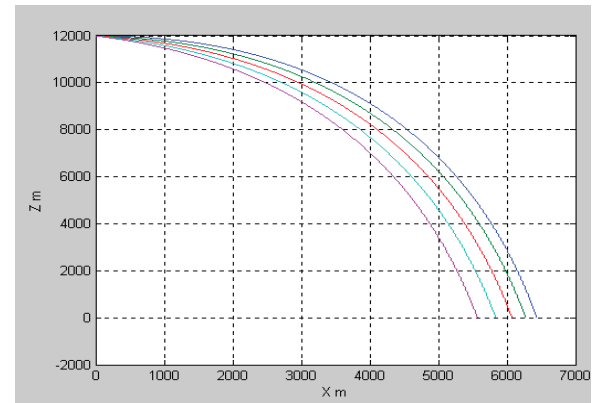
برای ارتفاعات کمتر از ۶۰۰۰ متر، زاویه برخورد و سرعت محاسبه شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی تحقیق حاضر کمتر از مقداری است که در مقاله میزوهو آمده است. بنابراین به دلیل کم بودن زاویه، احتمال کم‌کردن بسیار زیاد بوده و یا اینکه عمق نفوذ بسیار کمتر از مقدار محاسبه شده مقاله میزوهو بوده است.

جدول ۱. سرعت و زاویه برخورد، ارتفاع و زاویه رهاسازی و نتایج شبیه‌سازی برای بمب ۱۰۰۰ پوندی.

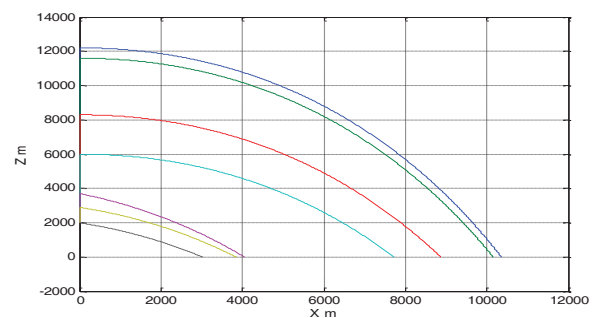
زاویه برخورد		ارتفاع رهاسازی		زاویه رهاسازی		سرعت رهاسازی V(m/s)	نتایج شبیه‌سازی	
Rad	deg	m	Rad	deg	سرعت برخورد v (m/s)		زاویه برخورد Angle (deg)	
۱/۲۳۹	۷۱	۱۲۲۰۰	۰	۰	۳۸۰	۴۰۱	۷۵	
۱/۱۳۴	۶۵	۱۱۶۰۰	۰	۰	۳۷۷	۳۹۶	۷۰	
۱/۰۴۷	۶۰	۸۳۰۰	۰	۰	۳۶	۳۶۶	۶۵	
۰/۹۶۰	۵۵	۶۰۰۰	۰	۰	۳۴۹	۳۳۹	۶۱	
۰/۸۷۳	۵۰	۳۷۰۰	۰/۴۳۶	۲۵	۳۳۷	۳۱۵	۳۰	
۰/۷۸۵	۴۵	۲۹۰۰	۰/۳۴۹	۲۰	۳۲۷	۳۰۰	۳۱	
۰/۶۹۸	۴۰	۲۰۰۰	۰/۳۴۹	۲۰	۳۱۸	۲۸۴	۲۵	



شکل ۴. منحنی‌های سرعت بر حسب زمان (سرعت رهاسازی ۲۰۰ m/s و زاویه رهاسازی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه)



شکل ۵. منحنی‌های ارتفاع رهاسازی بر حسب موقعیت (سرعت رهاسازی ۲۰۰ m/s و زاویه رهاسازی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه)



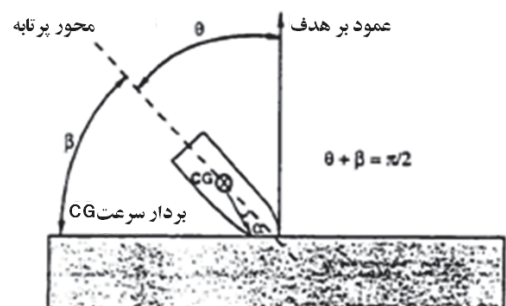
شکل ۶. منحنی‌های ارتفاع رهاسازی بر حسب موقعیت بمب برای بمب هزار پوندی با سرعت رهاسازی ۲۵۰ m/s

۴-۱. اثر زاویه حمله در نفوذ بمب

در گزارش فنی^۱ TM، در مورد اثر زاویه حمله در نفوذ بمب در خاک آمده است:

«بقای سازه پرتابه، تا حد زیادی به زاویه تمایل^۲ و زاویه حمله بستگی دارد. زاویه حمله چنددرجه‌ای باعث می‌شود پرتابه هنگام برخورد به یک هدف سخت نظیر بتون بشکند. عملاً ترکیب زوایای حمله و زاویه تمایل در بارگذاری بسیار زیاد ایجاد می‌شود که این مسئله در حفظ سازه و قابلیت نفوذ پرتابه تأثیر می‌گذارد.»

با توجه به اثر زاویه حمله در نفوذ بمب در خاک و در سیال، این اثر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. زوایای حمله، تمایل و برخورد طبق شکل (۸) به صورت زیر تعریف می‌شود:

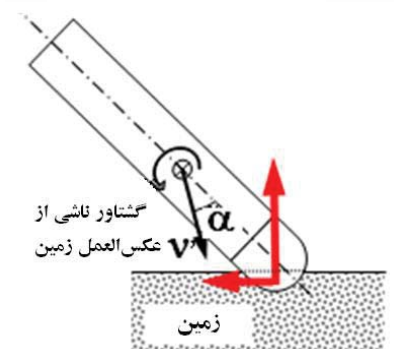
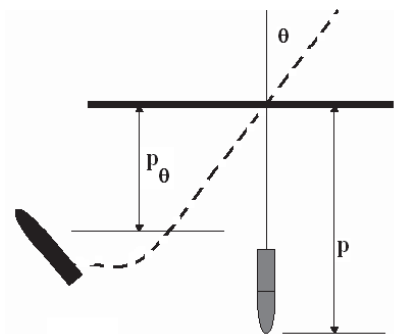


شکل ۸. تعریف زوایای حمله تمایل و برخورد

θ : زاویه تمایل؛ از محور قائم تا محور بمب

β : زاویه برخورد؛ از محور بمب تا محور افقی

α : زاویه حمله بمب؛ زاویه بین محور بمب و بردار سرعت مرکز ثقل



شکل ۹. اثر زاویه حمله در نفوذ بمب در خاک (حرکت J شکل در خاک)

هنگام برخورد بمب به سطح خاک، مؤلفه افقی از نیرو وجود ندارد و بر اثر اصطکاک این مؤلفه به وجود می‌آید. ضریب اصطکاک بین خاک و آهن بیش از ۰/۳ است. بنابراین، این ضریب به اندازه‌ای بزرگ است که مانع سر خوردن می‌شود. اگر زاویه حمله کم باشد، بمب می‌تواند نفوذ کند، ولی مؤلفه‌ای از نیروی عمودی وجود دارد که باعث چرخش و حرکت J شکل بمب می‌شود. همان‌طور که در گزارش می‌زوهو ذکر شده، این اثر باعث کم شدن عمق نفوذ می‌شود.

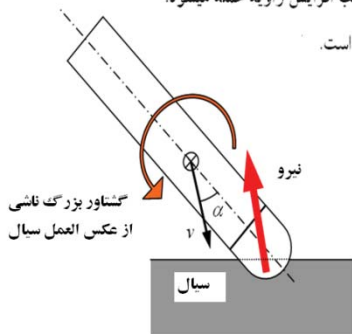
۴-۲. تأثیر زاویه حمله در نفوذ بمب در سیال

هنگام برخورد بمب به سطح آب، هیچ مؤلفه افقی از نیرو وجود نخواهد داشت که این مسئله باعث ناپایداری و چرخش بمب رو به بالا در حین نفوذ می‌شود. به همین سبب، در گزارش فنی TM ذکر شده است:

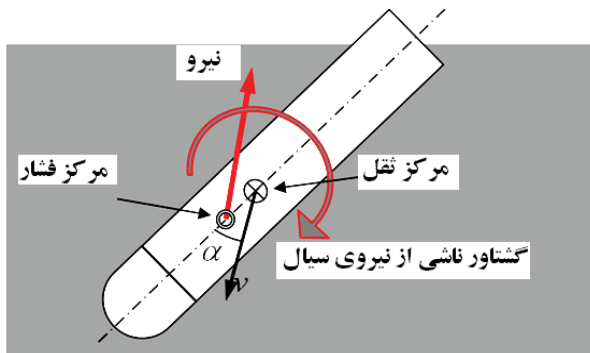
«وقتی عدد S بزرگ‌تر از حدود ۷۵ باشد - همانند گل و لای دریا - عملکرد آن به رفتار سیال بیشتر شباهت دارد تا خاک. استفاده از معادلات تحت چنین شرایطی صحیح نیست و از این معادلات برای نفوذ در آب استفاده نکنید.»

در لحظه برخورد بمب به سطح آب نیروی وارد شده فاصله زیادی تا مرکز ثقل دارد که باعث گشتاور قوی و چرخش زیاد بمب و افزایش زاویه حمله می‌شود. اما پس از ورود بمب به داخل سیال، مرکز فشار به مرکز ثقل نزدیک می‌شود، ولی هرگز به آن نمی‌رسد.

- گشتاور پیچشی بزرگ موجب افزایش زاویه حمله می‌شود.
- نیروی افقی سیال بسیار کم است.



شکل ۱۰. اثر زاویه حمله در نفوذ بمب در سیال



شکل ۱۱. اثر زاویه حمله در نفوذ بمب به داخل آب (در حالتی که بمب کاملاً داخل آب قرار دارد).

^۱ US Army Technical Manual (TM 5-855-1).

^۲ Angle of Obliquity

۳-۴. شبیه‌سازی حرکت بمب در برخورد به سطح آب

طی یک شبیه‌سازی، اثر زاویه حمله در برخورد بمب به آب بررسی شد. شرایط اولیه از بخش اول گزارش مربوط به شبیه‌سازی مسیر بمب، به دست آمده است. شکل‌های (۱۲-۱۴) زاویه برخورد، سرعت و زاویه حمله بمبی را نشان می‌دهد که از ارتفاعات متفاوت و با سرعت‌های گوناگون رها شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، در هر ارتفاع رهاسازی بمب با کاهش سرعت زاویه برخورد افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود تا ارتفاع رهاسازی ۳۰۰۰ متری، پس از رهاسازی سرعت بمب کاهش و زاویه حمله افزایش می‌یابد و این به معنی کاهش عمق نفوذ می‌باشد. ولی در ارتفاع رهاسازی بالای ۳۰۰۰ متر، با کاهش سرعت زاویه حمله نیز کاهش یافته و عمق نفوذ افزایش می‌یابد. در شکل (۱۴) نمودار تغییرات سرعت برخورد نسبت به سرعت رهایی در ارتفاعات مختلف رهاسازی نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، در ارتفاع رهاسازی ۱۰۰۰ متر، سرعت رهاسازی تقریباً با سرعت برخورد برابر است ولی با افزایش ارتفاع رهاسازی، سرعت برخورد کاهش می‌یابد. در شکل (۱۵) نمودار تغییرات زاویه حمله در حین پرواز بمب به نمایش در آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود زاویه حمله بمب بیشینه‌ای دارد که در ثانیه دهم پرواز بمب رخ داده است. در لحظات بعدی به مرور زاویه حمله کاهش و در نتیجه عمق نفوذ افزایش می‌یابد.

شبیه‌سازی حرکت بمب در برخورد به سطح آب با سه زاویه حمله اولیه ۱، ۵ و ۱۰ درجه انجام شد. سرعت اولیه و زاویه برخورد ۳۵۰ متر در ثانیه و ۵۵ درجه است. معادلات حرکت به صورت زیر است:

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad \text{نیروی هیدرودینامیکی:}$$

$$\dot{V} = \frac{F}{m} \quad \text{شتاب مرکز ثقل بمب:}$$

$$M = Fl \sin(\alpha) \quad \text{گشتاور پیچشی:}$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{I} (M) \quad \text{شتاب زاویه‌ای:}$$

منظور از «سیال»، ماده‌ای بین آب خالص و خاک است. هنگامی که بمب وارد آب می‌شود L (طول) و A (سطح) تغییر می‌کنند. در این معادلات:

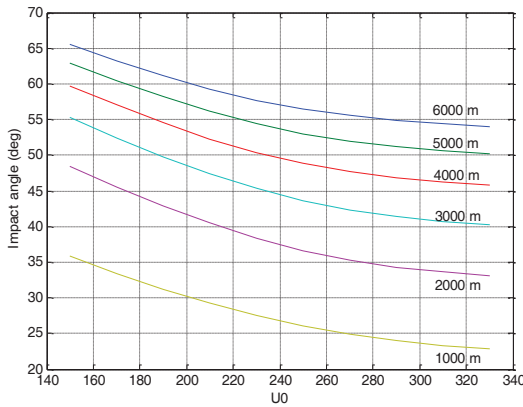
ρ چگالی آب (برابر ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب).

A سطح بمب برابر است با $A = \pi R^2 / \cos \alpha$ که R شعاع بدنه بمب و $C_D = 0.8$ ضریب نیروی پسا است.

برای C_D مقدار زیادی در نظر گرفته شده که علت آن جدایش جریان در پشت بمب به سبب سرعت زیاد آن است. واضح است که بمب می‌چرخد و زاویه حمله زیادی در حین نفوذ در آب خواهد داشت. نیروی مقاوم قوی به سبب این زاویه حمله ایجاد می‌شود که سرعت بمب را متوقف خواهد کرد. اگر زیر آب، سطح خاک وجود

داشته باشد، بمب با زاویه حمله زیادی به آن برخورد خواهد کرد و نفوذ بسیار کمی خواهد داشت.

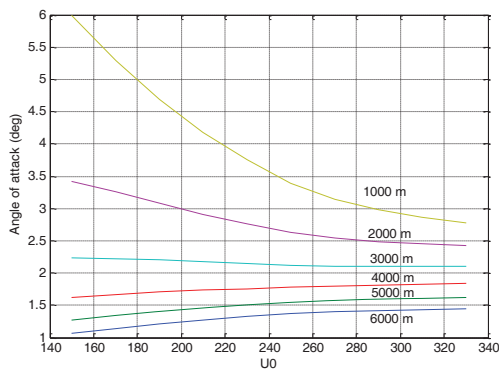
تأثیر زاویه حمله در میزان عمق نفوذ به خوبی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر چه قدر زاویه حمله اولیه رهاسازی کمتر باشد، عمق نفوذ بیشتر خواهد شد.



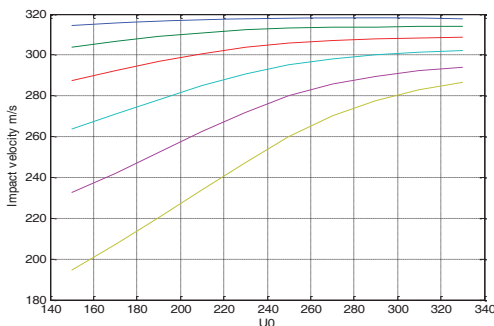
شکل ۱۲. تغییرات زاویه برخورد با سرعت اولیه و ارتفاع

۴-۴. نفوذ بمب با زاویه حمله در صفر در آب

اگر بمب با زاویه حمله صفر به سطح آب برخورد کند، نیروی هیدرودینامیکی قوی به وجود می‌آید که سرعت را کاهش می‌دهد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در گزارش فنی TM آمده است که روابط نفوذ در خاک برای نفوذ در سیال بی اعتبارند.



شکل ۱۳. ارتباط زاویه حمله با سرعت اولیه و ارتفاع



شکل ۱۴. تغییرات سرعت برخورد با سرعت رهایی و ارتفاع

می باشد:

$$F = \sigma A + KAx + 1/2\rho C_D AV^2 \quad (11)$$

از طرفی معادله ساده حرکت پرتابه به صورت زیر است:

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = m \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dV}{dx} = mV \frac{dV}{dx} \quad (12)$$

با قرار دادن مقدار F از رابطه (۱) در معادله حرکت پرتابه داریم:

$$\sigma A + KAx + 1/2\rho C_D AV^2 = mV \frac{dV}{dx}$$

بنابراین داریم:

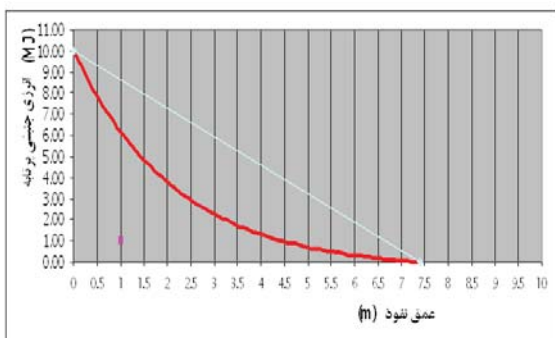
$$\frac{dV}{dx} = \frac{\sigma A + KAx + 1/2\rho C_D AV^2}{mV} \quad (13)$$

رابطه (۳)، معادله دیفرانسیل مرتبه اول غیرخطی سرعت (V) بر حسب جابه جایی (X) است که شرایط اولیه آن در $V=V_0, X=0$ خواهد شد.

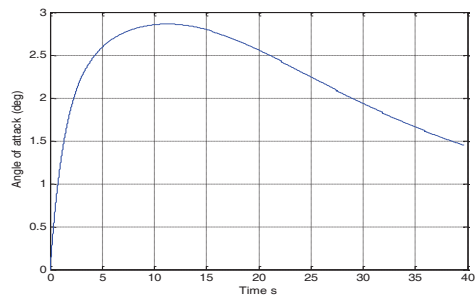
از حل این معادله دیفرانسیل، می توان سرعت V بر حسب عمق نفوذ X را به دست آورد و سپس مقدار انرژی جنبشی پرتابه ($1/2mV^2$) را بر حسب عمق نفوذ X محاسبه و در مورد تغییرات انرژی بر حسب عمق نفوذ، بحث کرد. با استفاده از مقادیر پارامترهای نمونه ای که در صفحه ۹ مقاله میزوهو ذکر شده است و از حل معادله دیفرانسیل فوق، منحنی تغییرات سرعت-نفوذ ($V-x$) و منحنی تغییرات انرژی جنبشی-نفوذ ($E-x$) به دست می آید که در شکل های (۱۸ و ۱۹) نمودار آن ارائه شده است.



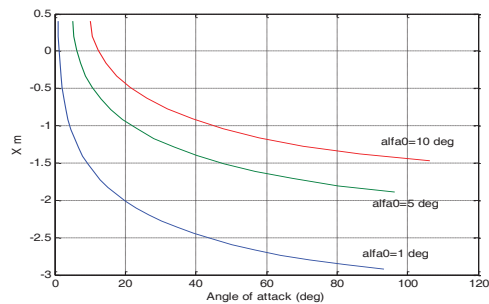
شکل ۱۸. منحنی تغییرات سرعت پرتابه بر حسب عمق نفوذ



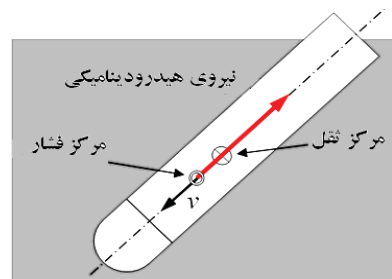
شکل ۱۹. منحنی تغییرات انرژی پرتابه بر حسب عمق نفوذ



شکل ۱۵. تغییرات زاویه حمله در حین پرواز بمب



شکل ۱۶. تغییرات زاویه حمله با عمق در زاویه حمله اولیه مختلف



شکل ۱۷. نفوذ بمب در آب با زاویه حمله صفر

شبیه سازی عددی نفوذ بمب در آب با زاویه حمله صفر انجام شد تا اثر نیروی پسا در حین نفوذ مشخص شود. شبیه سازی با سرعت اولیه ۳۵۰ متر بر ثانیه و زاویه برخورد ۵۵ درجه آغاز شد. در معادلات حرکت:

ρ چگالی آب ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است؛ هر چند که به سبب مخلوط بودن آب و خاک می بایست بیشتر از این باشد.

سطح در نظر گرفته شده برابر $A = \pi R^2$ است که R شعاع بدنه بمب و ضریب پسا برابر 0.3 است. می بایست مقادیر بزرگ تری از C_D لحاظ می شد که علت آن هم جدایش جریان شدید در پشت بمب است. همچنین می بایست مقادیر بالاتری برای سطح ضریب پسا و چگالی در نظر گرفته می شد تا باعث کاهش نفوذ شود، اما به سبب ضریب اطمینان مقادیر کمتری استفاده شده است.

۴-۵. محاسبات افت انرژی

ارتباط انرژی جنبشی پرتابه بر حسب میزان عمق نفوذ، طی فرایند نفوذ، به صورت زیر تعیین می شود. با استفاده از رابطه (۱) در مقاله میزوهو، رابطه نیروی مقاوم خاک در برابر پرتابه به صورت زیر

خطی خواهد شد. دلیل این امر سختی لایه‌های اولیه خاک در اثر وجود رسوبات گچی و نمکی است.

۴-۶- حل معادله دیفرانسیل حرکت پرتابه

در معادله دیفرانسیل به‌دست آمده مقدار dv افت سرعت پرتابه بر حسب مقدار نفوذ dx به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$dv = \frac{dx}{mv} \left[\sigma A + KAX + 1/2 \rho C_D AV^2 \right]$$

با توجه به شرایط اولیه مسئله نمونه داریم:

$$V_0 = 200m/s, K = 0.05MPa/m,$$

$$\sigma = 0.2MPa, \rho = 2500Kgr/m^3,$$

$$C_D = 0.3, m = 500Kgr, A = 0.3m^2$$

برای حل معادله فوق از یک روش تکرار متوالی ساده استفاده شده است. در این روش، به ازای مقدار عمق نفوذ $dx = 0.5m$ در هر مرحله، میزان کاهش سرعت پرتابه از رابطه فوق و سرعت پرتابه برای مرحله بعدی به‌دست می‌آید. بنابراین، رابطه فوق را می‌توان برای مرحله n محاسبات به شکل زیر نوشت:

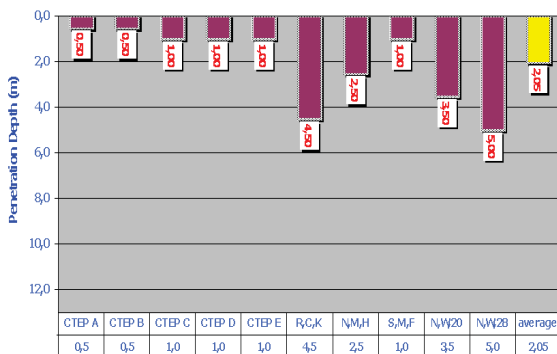
$$dv_{(n)} = \frac{dx}{mv_{(n)}} \left[\sigma A + KAX_{(n)} + 1/2 \rho C_D AV_{(n)}^2 \right]$$

در هر مرحله مقادیر سرعت و نفوذ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{(n+1)} = V_{(n)} - dV_{(n)}$$

$$X_{(n+1)} = X_{(n)} + dX$$

و در مرحله $(n+2)$ با استفاده از مقادیر $v_{(n+1)}$ و $x_{(n+1)}$ میزان افت سرعت در مرحله $(n+1)$ حساب شده و این روند تکرار می‌شود تا لحظه‌ای که مقدار سرعت به صفر برسد و پرتابه متوقف شود. در این لحظه $x(n)$ به‌دست آمده عمق نفوذ نهایی است که برابر $۲/۷۵$ متر خواهد بود. لازم به ذکر است که برای حل این معادله دیفرانسیل و محاسبه عمق نفوذ، یک برنامه رایانه‌ای تهیه و نتایج عمق نفوذ به دو روش حاضر و روش مقاله میزوهو محاسبه شده است (شکل‌های (۲۰) و (۲۱)).



شکل ۲۰. محاسبه متوسط عمق نفوذ در چاهک‌های مختلف به روش حاضر

همان‌طور که از منحنی شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، تغییرات انرژی جنبشی پرتابه، طی نفوذ خطی نبوده و اختلاف آن با فرض خطی در ابتدای نفوذ بسیار زیاد است.

انرژی جنبشی اولیه پرتابه در این مسئله نمونه برابر است با:

$$E_0 = 1/2 m V_0^2 = 1/2 \times 500 \times (200)^2 = 10000000J$$

اختلاف میزان افت انرژی پرتابه در $۰/۵$ متر نفوذ با استفاده از

منحنی واقعی در مقایسه با فرض خطی به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$E_{True} \Big|_{x=0.5} = 7.96 \times 10^6$$

$$\Rightarrow \Delta E \Big|_{x=0.5} = E_0 - E_{true} \Big|_{x=0.5} = 2.06 \times 10^6 J$$

$$E_{Linear} \Big|_{x=0.5} = 9.36 \times 10^6$$

$$\Rightarrow \Delta E \Big|_{x=0.5} = E_0 - E_{Linear} \Big|_{x=0.5} = 0.64 \times 10^6 J$$

بنابراین نسبت افت انرژی در $۰/۵$ متر اولیه نفوذ به انرژی اولیه در دو حالت منحنی واقعی و فرض خطی عبارت است از:

$$True \rightarrow \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{2.06 \times 10^6}{1 \times 10^6} = 0.206 = 20.6\%$$

$$Linear \rightarrow \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{0.64 \times 10^6}{1 \times 10^6} = 0.064 = 6.4\%$$

از منحنی سرعت- نفوذ شکل (۱۸) می‌توان عمق نفوذ پرتابه را برای لحظه‌ای که سرعت صفر می‌شود به‌دست آورد، که مقدار آن برابر $P_\theta = 7.75m$ به‌دست می‌آید، بنابراین مقدار افت انرژی خطی از رابطه:

$$E_{Loss} = \frac{0.5}{P_\theta}$$

نیز خواهد شد:

$$E_{Loss} = \frac{0.5}{7.75} = 0.0645 = 6.45\%$$

این محاسبات نشان می‌دهد که درصد افت انرژی پرتابه در $۰/۵$ متر نفوذ از منحنی واقعی بسیار بیشتر از فرض خطی است و نسبت آن‌ها به صورت زیر است:

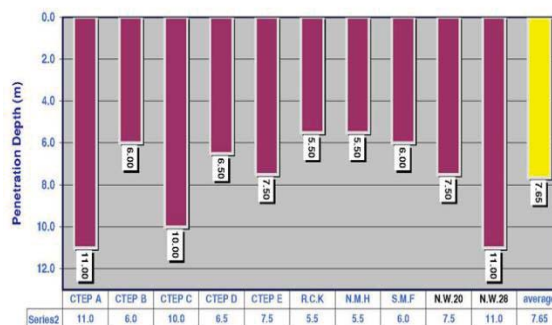
$$\frac{(\Delta E/E_0)_{True}}{(\Delta E/E_0)_{Linear}} = \frac{20.6}{6.4} = 3.22$$

یعنی در $۰/۵$ متر اول درصد افت انرژی از منحنی واقعی بیش از سه برابر فرض خطی به‌دست می‌آید و به طور کاملاً شفاف و روشن نشان می‌دهد که فرض خطی بودن افت انرژی توأم با خطای فاحش است. بنابراین مقاله میزوهو که افت انرژی برای هر مقدار N را با فرض خطی ارائه داده و بر مبنای آن مجموع افت انرژی در لایه‌های مختلف، عمق نفوذ به‌دست آمده است، صحیح نمی‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه میزان افت انرژی در لایه‌های میانی در منحنی واقعی به مراتب بیش از مقدار فرض خطی است، عمق نفوذ به‌دست آمده از منحنی واقعی نیز به مراتب کمتر از مقدار به‌دست آمده از فرض

تخمین عمق نفوذ بمب در شرایط اولیه بمب‌های دیگر (جرم، سرعت و زاویه رهاسازی بمب) و ساختار زمین منطقه‌های دیگر (آب‌گرفتگی، گل و لای، خاک و ...) و شبیه‌سازی حرکت بمب قابل استفاده می‌باشد.

۶. مراجع

- [1] Mizuho Information & Research Institute, "Estimation of Penetration Depth of Unexploded Bombs in AZ Oilfield"; Ver. 5, Nov 30, 2004.
- [1] Young, C. W. "Penetration Equations"; Applied Research Associated Inc. 1997
- [2] Forrestal, M. J.; Luk, V. K. "Penetration into Soil Targets"; Int. J. Impact Eng. 1992, 12, 427-444.
- [3] Chen, X. W.; Li, Q. M. "Deep Penetration of a Non-deformable Projectile with Different Geometrical Characteristic"; Int. J. Impact Eng. 2002, 27, 619-637.
- [4] Warren, T. L. "Simulations of the Penetration of Limestone Targets by Ogive-Nose 4340 Steel Projectiles"; Int. J. Impact Eng. 2002, 27, 475-496.
- [5] Heuze, F. E. "An Overview of Projectile Penetration into Geological Materials with Emphasis on Rocks"; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. 1990, 27, 1, 1-14.
- [6] Choudhury, M. A.; Siddiqui, N. A.; Abbas, H. "Reliability Analysis of a Buried Concrete Target under Missile Impact"; Int. J. Impact Eng. 2002, 27, 791-806.
- [7] Billings, S.; Beran, L. "Experimental Measurements of Shock Induced Changes to the Magnetization of Unexploded Ordnance"; J. Applied Geophysics 2014, 105, 138-146.
- [8] Zhang, Q.; Al-Nuaimy, W.; Huang, Y. "Interpretation of Borehole Magnetometer Data for the Detection and Characterization of Unexploded Bombs"; J. Applied Geophysics 2007, 61, 206-216.
- [9] Omidvar, M.; Iskander, M.; Bless, S. "Response of Granular Media to Rapid Penetration"; Int. J. Impact Eng. 2014, 66, 60-82.
- [10] Krunska, D. G.; Hovanseeian, S. A. "Digital Computer Trajectory Simulation of an Air-to-Air Missile"; Comput. & Elect. Eng. 1973, 1, 43-54.
- [11] Lange, A. S. "Semi-Physical Simulation of Guided Missiles"; Comput. & Elect. Eng. 1973, 1, 119-142.
- [12] ESC Co. Final Report "Study and Investigation of UXO Penetration in Azadegan Oil Field"; 2004.



شکل ۲۱. محاسبه متوسط عمق نفوذ در چاهک‌های مختلف به روش میزوهو.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از مدل‌سازی ریاضی مسئله، مسیر حرکت بمب در هوا و خاک با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و با فرضیات وزن، ارتفاع، سرعت و زاویه رهاسازی مختلف بمب، زاویه حمله و میزان نفوذ بررسی شده است. آنگاه با در نظر گرفتن فرضیات منطقی و احتمالات ممکن، مقاله مؤسسه میزوهو در این خصوص مورد نقد و بررسی قرار گرفته و مشخص شده که در مورد بمب هزار پوندی تطابق بسیار خوبی میان نتایج موجود در گزارش میزوهو و نرم‌افزار شبیه‌سازی دیده می‌شود. برای ارتفاعات کمتر از ۶۰۰۰ متر، زاویه برخورد و سرعت کمتر از مقداری است که در مطالعات میزوهو آمده است. بنابراین، به دلیل کم بودن زاویه، احتمال کمانه کردن بسیار زیاد است یا اینکه عمق نفوذ بسیار کمتر از مقدار محاسبه‌شده توسط میزوهو است.

از طرف دیگر مشخص شد که تأثیر زاویه حمله در آب و خاک متفاوت است و معادلات تجربی برای نفوذ بمب در سیال قابل استفاده نیستند. در واقع، بمب هنگام نفوذ به سیال، چرخش و کاهش سرعت شدیدی خواهد داشت که می‌تواند باعث از بین رفتن آن یا عمق نفوذ کم شود. در این گزارش، اثر نیروهای هیدرودینامیک در کاهش سرعت نشان داده شده و میزان انرژی از دست رفته بسیار بیشتر از مقدار ذکر شده در گزارش میزوهو است. نتایج به‌دست آمده در این مقاله برای منطقه خاص مورد مطالعه می‌باشد؛ اما روش تحقیق برای