

بهینه‌سازی فرمولاسیون فوم انفجاری بر پایه نیترومتان

سامان شمسی اناری، حسین فخرانیان*^۲

تهران - دانشگاه امام حسین (ع)

*E-mail: Fakhraian@yahoo.com

(تاریخ وصول: ۸۹/۸/۲۴، تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۲۳)

چکیده

فوم انفجاری مایع^۳ بر پایه نیترومتان برای مین زدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق پارامترهای بهینه سازی شامل افزایش چگالی، و کاهش جدایی فاز در فرمولاسیون متشکل از نیترومتان، نیتروسولوز، استاریل الکل و استاریل الکل اتوکسیله مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از کابوسیل^۴ در فرمولاسیون، جدایی فاز تقریباً به صفر رسید و علاوه بر آن، درصد نیترومتان نیز افزایش قابل توجهی پیدا کرد. خواص انفجاری وابستگی زیادی به چگالی ماده منفجره دارد و در این فرمولاسیون با صفر شدن جدایی فاز، چگونگی افزایش چگالی فوم در طول زمان تعیین شد. افزایش پودر آلومینیم و جایگزینی ۵۰٪ از نیترومتان به وسیله TNT نیز منجر به فوم‌های بسیار پایداری شد که حساسیت خوبی به انفجار با چاشنی از خود نشان می‌دادند ولی سرعت انفجار به ترتیب ۲۴۰۰ و ۲۹۰۰ متر بر ثانیه برای آنها اندازه‌گیری شد. محاسبه سرعت و فشار انفجار با استفاده از نرم‌افزار چیتا^۵ برای ۴ فرمولاسیون (بدون کابوسیل، با کابوسیل، با کابوسیل و آلومینیم و با کابوسیل و ۵۰٪ TNT بجای نیترومتان) نشان داد که افزایش کابوسیل به فرمولاسیون منجر به افزایش ۲۰٪ نیترومتان و باعث افزایش سرعت انفجار می‌شود در صورتی که افزایش آلومینیم به فرمولاسیون بهینه (با کابوسیل) تفاوتی در سرعت و فشار انفجار ایجاد نمی‌کند، ولی جایگزینی ۵۰٪ نیترومتان توسط TNT منجر به کاهش سرعت و فشار انفجار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فوم انفجاری مایع، نیترومتان، مین‌زدایی، کابوسیل، چیتا.

۱- مقدمه

برای مین زدایی، استفاده از مواد منفجره، برای خنثی سازی و انفجار مین‌های بجا مانده از جنگ‌ها است [۱-۴]. در این بین نیترومتان به عنوان یک ماده منفجره‌ی غیر حساس شناخته شده است [۵ و ۶] و

پاکسازی مناطق مین‌گذاری شده از اهمیت خاصی در تمام دنیا و بخصوص مناطق جنگ‌زده برخوردار است. یکی از روش‌های متداول

3- Liquid explosive foam

4- Cab-o-Sil

5- CHEETAH

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

منفجره جدید و تعیین خواص مواد منفجره امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. یک برنامه کامپیوتری همه معادلات ترمودینامیکی (مانند پتانسیل شیمیایی، آنتالپی، انرژی گیبس) را برای تمام گونه‌های ممکن حاصل از محصولات گازی انفجار را در نظر می‌گیرد و براساس حل معادلات ترمودینامیکی برای محصولات ایجاد شده از انفجار، خواص انفجار را پیش بینی می‌کند. یکی از این نوع روش‌های محاسباتی، نرم‌افزار چیتا می‌باشد [۱۳]. نرم‌افزار چیتا با در نظر گرفتن محصولات گازی حاصل از انفجار و حل معادلات حالت، خواص انفجار از قبیل فشار و سرعت انفجار را با دقتی حدود ۵ تا ۱۰ درصد پیش‌بینی می‌کند. پارامترهای مورد بررسی در سنجش عملکرد مواد منفجره با استفاده از روش‌های محاسباتی شامل گرمای تشکیل، دانسیته مواد منفجره و معادلات حالت محصولات انفجار می‌باشد. معروف ترین معادله حالتی که برنامه چیتا از آن استفاده می‌کند معادله حالت^۱ BKW می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق از بین بردن جدایی فاز فوم که موجب کاهش پایداری فوم در طول زمان می‌شود و همچنین افزایش ترکیب درصد نیترومتان در فرمولاسیون فوم می‌باشد. جایگزینی بخش زیادی از نیترومتان که در ایران تولید نمی‌شود، با TNT تولید داخل و همچنین بالا بردن حساسیت فوم با افزایش آلومینیوم نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

کپسول‌های تحت فشار شیشه‌ای برای بهینه سازی فرمولاسیون به کار رفتند. سپس از کپسول‌های تحت فشار فلزی با حجم ۱۰۰ و ۷۰۰ سانتی‌متر مکعب برای آزمایشات پخش فوم در محیط بعد از تحت فشار قرار دادن فرمولاسیون با هوای فشرده استفاده شد.

فوم سازی و هوادهی مواد منفجره از جمله نیترومتان برای افزایش خواص آنها نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۷]. فوم‌ها دارای انواع مختلفی بوده و به طرق متفاوت تهیه و مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از موارد استفاده فوم‌ها در زمینه‌های نظامی است. آسانترین و اقتصادی‌ترین کاربرد مواد منفجره‌ی متخلخل، به صورت فوم‌های انفجاری می‌باشد. کاربرد ماده منفجره‌ی نیترومتان، به شکل‌های مختلف برای مین زدایی پیشنهاد شده است [۱۲-۱۰].

توسعه نیترومتان با دانسیته پایین، منجر به تولید فوم انفجاری مایع شده است. این نوع فوم به منظور انفجار مین‌های کار گذاشته شده در زمین و مهمات منفجر نشده و عمل نکرده استفاده می‌شود. مزایای فوم بر پایه نیترومتان نسبت به دیگر مواد منفجره عبارتند از: دسته بندی به عنوان مواد آتش زا (نه منفجره)، حمل و نقل و انبارداری، قابلیت خنثی سازی مین‌ها در زیر خاک، ایمنی بالا، هزینه‌ی پایین و سهولت کاربرد در شرایط متفاوت است.

تحقیقات مختلفی با استفاده از نیترومتان، نیتروسولوز و مقادیر مختلف از سورفکتانت‌های متفاوت (سلیکون سورفکتانت، تریتون، استاریل الکل اتوکسیله ۱۷ مولار و لوریل الکل اتوکسیله ۶۷ مولار) و فوم‌سازهای متفاوت (دی‌متیل اتر، HCFC-22، کلرومتان، بوتان و پروپان) گزارش شده که در نهایت فومی با فرمولاسیون ۷۸۰ میلی‌لیتر (۸۶٪ وزنی) نیترومتان، ۱۴ گرم (۱/۴٪ وزنی) نیتروسولوز، ۳۶ گرم (۳/۵٪ وزنی) استاریل الکل اتوکسیله شده و ۹۲ گرم (۸/۹٪ وزنی) استاریل الکل (فرمولاسیون ۱) تهیه شده است [۱]. تست‌های گودکنندگی این فرمولاسیون فوم انفجاری با استفاده از چاشنی شماره ۴ با موفقیت به انجام رسیده (شکل ۱) و سرعت انفجار این نوع فوم نیز با دانسیته‌های متفاوت از ۲۸۰۰ m/s تا ۶۰۰۰ m/s اندازه‌گیری شده است [۱۴ و ۱]. استفاده از روش‌های محاسباتی برای طراحی مواد



شکل ۱- تاثیر حدود ۵۰ گرم فوم انفجاری پخش شده بر روی صفحه فولادی به ابعاد ۲۰ در ۲۰ و ضخامت ۱ سانتی‌متر [۱].

1- Becker-Kistiakowsky-Wilson

TNT) بررسی شد. کلیه محاسبات با معادله حالت و بانک داده BKW انجام شد.

۳- نتایج و بحث

در واقع به نظر می‌رسد که لایه‌های مسطح استاریل الکل در هنگام فوم شدن فرمولاسیون به همراه نیتروسولوز، سورفکتانت و بخش کوچکی از استاریل الکل حل شده در فرمولاسیون، شبکه‌ای مشبک را تشکیل می‌دهند که نیترومتان را در خود جای می‌دهند. این شبکه بر اساس چگونگی آزادسازی فوم کاملاً بدون منفذ نیست و در شرایط مختلف و در طی زمان‌های متفاوت منجر به آزادسازی بخش مایع فرمولاسیون می‌شود.

هر قدر شرایط عملیاتی آزادسازی فوم (دمای محیط، سرعت آزادسازی فوم و دمای نمونه فرموله شده) مناسب‌تر باشد، شبکه بدون منفذ استاریل الکل تشکیل شده و فوم در طول زمان پایدارتر خواهد بود در غیر این صورت بر اساس پایداری فوم در طول زمان بخش مایع فوم از بخش جامد به تدریج جدا شده و ته نشین می‌شود. فوم ایجاد شده به صورت یک فاز متخلخل می‌باشد و فرایند جدایی فاز باعث می‌شود محلول پلیمری به دو فاز، یک فاز جامد (فاز غنی از استاریل الکل و استاریل الکل اتوکسیله) و یک فاز مایع (فاز غنی از نیترومتان) تبدیل شود.

برای کاهش جدایی فاز فوم از کابوسیل استفاده شد. با اضافه نمودن کابوسیل در فرمولاسیون کاهش قابل توجهی در جدایی فاز مشاهده شد. استفاده از کابوسیل به دلیل داشتن سطح مقطع بالا (در حدود $300 \text{ m}^2/\text{gr}$) و تشکیل پیوند هیدروژنی بین اتم‌های SiO_2 باعث جذب و به دام انداختن نیترومتان می‌شود. این دو عامل باعث افزایش ویسکوزیته و کاهش جدایی فاز در فوم می‌شود. جدا نشدن نیترومتان در طول زمان از فوم که با کاهش حجم و افزایش چگالی فوم بدون کاهش در خاصیت فوم‌شوندگی همراه است باعث افزایش خواص انفجاری فوم می‌شود. افزایش مقدار کابوسیل باعث صفر شدن جدایی فاز در فرمولاسیون‌های فوم با ۲۰ تا ۴۰ میلی‌لیتر نیترومتان و کاهش قابل توجه جدایی فاز برای فوم با ۵۰ میلی‌لیتر نیترومتان شد (شکل ۲).

نیترومتان، استاریل الکل و کابوسیل از شرکت مرک و استاریل الکل اتوکسیله ۱۷ مولار از یک شرکت تولید کننده داخلی تهیه شدند. نیتروسولوز (۱۱/۱۱٪) استفاده شده تولید پارچین بود و گاز پروپان در مخزن‌های ۲۵۰ کیلویی از شرکت بوتان‌گاز تهیه شد.

۲-۲- روش تهیه فوم انفجاری

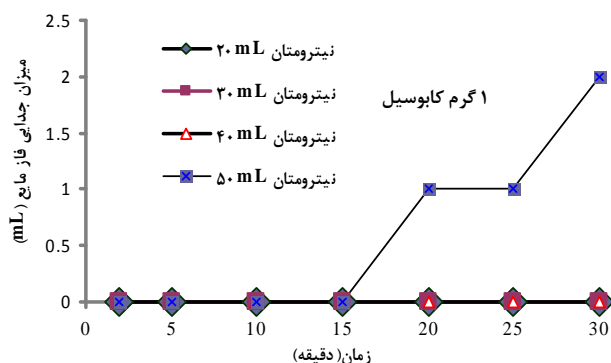
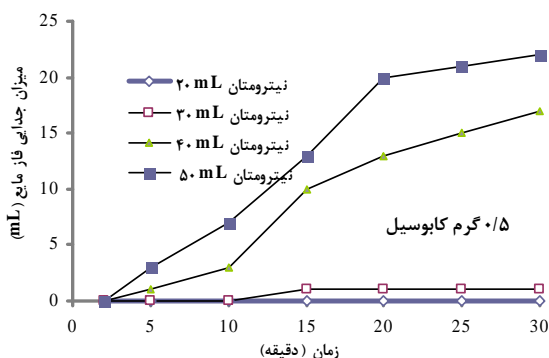
مقادیر متفاوتی از نیترومتان، استاریل‌الکل، استاریل‌الکل اتوکسیله، نیترو سلولز و کابوسیل در یک مخزن به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته شده سپس پروپان به آن اضافه گردید و به مدت یک ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در داخل آون حرارت داده شد. مخلوط دو فازی تشکیل شده شامل یک فاز استاریل الکل مایع و فاز دیگر شامل نیتروسولوز، استاریل الکل اتوکسیله، نیترومتان و مقدار ناچیز از استاریل الکل بود که در دمای محیط هم زده شد تا به یک سوسپانسیون یکنواخت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تبدیل شود. هم‌زدن مخلوط برای پیشگیری از کلوخه شدن و شرکت تمام استاریل الکل در تولید فوم و دستیابی به فومی با جدایی فاز کم و پایدار بسیار ضروری است. سپس به مخلوط فوق که در یک ظرف با تحمل فشار بالا ریخته شده بود، پروپان مایع (به عنوان پیشرانه) تزریق شد و در نهایت، مخلوط با سرعت‌های رهایش متفاوت از ظرف تحت فشار تخلیه و پارامترهای فوم ایجاد شده، مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۲- تعیین سرعت انفجار فوم انفجاری

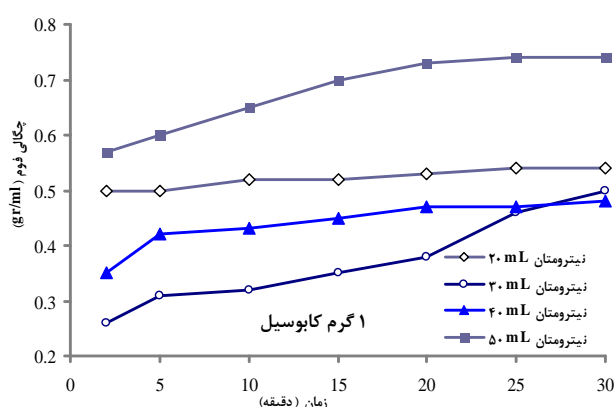
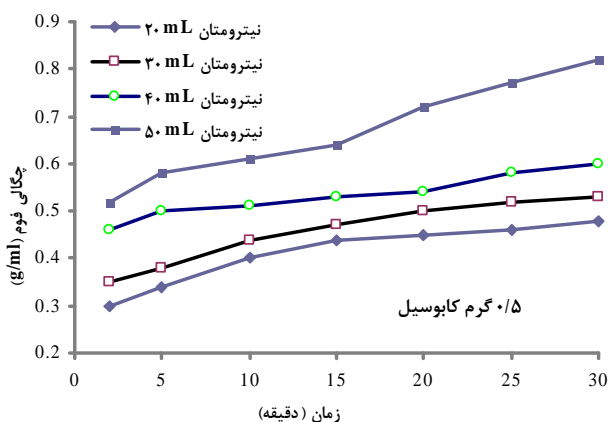
سرعت انفجار فوم در داخل لوله‌هایی از جنس پلیکا به طول ۱۵ سانتی متر و قطر ۲/۵ سانتی متر اندازه گیری شد. در این لوله‌ها در فواصل ۲/۵ سانتی متری از لبه لوله دو سوراخ با فاصله ۱۰ سانتی متر از یکدیگر برای عبور سنسور تعبیه شد.

۲-۴- محاسبه سرعت و فشار انفجار با نرم افزار چیتا

برای اندازه‌گیری تاثیر چگالی در سرعت انفجار و فشار انفجار از نرم‌افزار چیتا برای محاسبات پارامترهای انفجاری استفاده شد. همچنین با استفاده از نرم افزار چیتا میزان تغییرات در خواص انفجاری با تغییر در فرمولاسیون فوم (افزایش کابوسیل، آلومینیوم و



شکل ۲- نمودار جدایی فاز فوم مایع در حضور مقادیر متفاوت از نیترومتان و کابوسیل.



شکل ۳- چگالی فوم در طول زمان در حضور مقادیر متفاوت از نیترومتان و کابوسیل.

بالایی بود. در هنگام رهایش فوم، دمای مخزن حاوی فوم در ۲۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شد و مشاهده گردید که با افزایش دمای محیط چگالی فوم نیز افزایش پیدا می‌کند. فرمولاسیون تهیه شده در شرایط سرد بدون روانروی بوده و رهاسازی در این شرایط منجر به تهیه فوم نسبتاً پایدارتری شد که کاهش حجم و جدایی فاز کمتری از خود نشان می‌داد. هر چقدر دمای فرمولاسیون در لحظه رهایش بیشتر باشد به دلیل تشکیل نشدن ساختارهای کلوئیدی استاریل الکل، در لحظه اولیه رهایش چگالی فوم زیادت می‌شود اما با گذشت زمانی در حدود یک ساعت به دلیل ناپایداری فوم، خصوصاً در دمای بالاتر از ۴۰°C، جدایی فاز بالایی مشاهده می‌گردد.

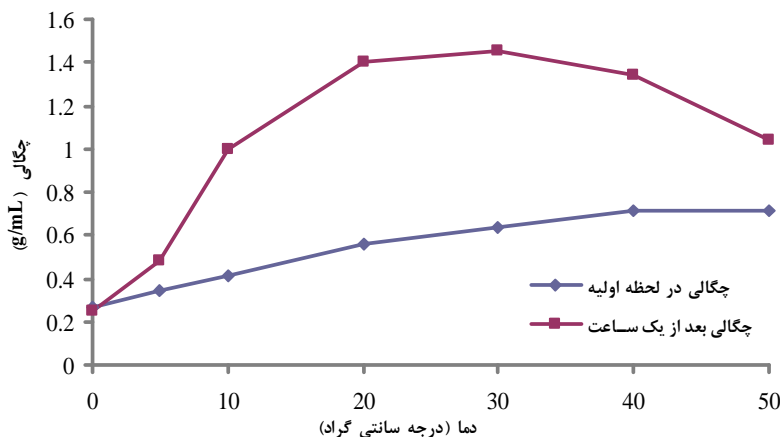
فوم‌های تهیه شده در شرایط سرد و گرم در ظروف در بسته و در طول زمان (حتی بعد از سه روز) بدون کاهش حجم همراه بودند ولی بخش مایع فرمولاسیون از بخش جامد جدا می‌شد و فومی متخلخل ایجاد می‌کرد.

با توجه به ثابت بودن جرم فوم تولید شده، اندازه‌گیری کاهش حجم در طول زمان منجر به شناخت تغییرات چگالی (نسبت جرم به حجم) فوم می‌گردد. نمودار افزایش چگالی در طول زمان با دو مقدار متفاوت از کابوسیل منجر به شناخت بهترین زمان ممکن برای انفجار با چگالی دلخواه گردید (شکل ۳).

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، می‌توان نتیجه گرفت که فوم تهیه شده با ۵۰ میلی‌لیتر نیترومتان و یک گرم کابوسیل دارای بیشترین مقدار ماده منفجره و کمترین جدایی فاز (در حدود ۲ میلی‌لیتر) در مدت زمان کمتر از ۳۰ دقیقه را به دنبال دارد و با توجه به چگالی بالای این فوم و دارا بودن بیشترین مقدار عامل انفجاری در خود به احتمال زیاد دارای بیشترین سرعت انفجار خواهد بود.

۳-۱- تاثیر دما بر چگالی فوم

فوم‌های انفجاری به دو روش سرد (دمای محیط) و گرم تهیه و رهاسازی شدند. فرمولاسیون تهیه شده در شرایط گرم دارای روانروی



شکل ۴- چگالی فوم با ۰/۵ گرم کابوسیل در ابتدا و یک ساعت پس از تشکیل فوم در دماهای مختلف.

مقدار نیترومتان و کمترین جدایی فاز تهیه شده و با توجه به بررسی‌های صورت گرفته (شکل‌های ۲ و ۳)، در نهایت فرمولاسیون ۲ شامل ۵۰ میلی لیتر (۹۳/۵٪ وزنی) نیترومتان، ۰/۲۸ گرم (۰/۵٪ وزنی) نیتروسولوز، ۰/۷۲ گرم (۱/۲۷٪ وزنی) استاریل‌الکل‌اتوکسیله شده، ۱/۸۴ گرم (۳/۲۵٪ وزنی) استاریل‌الکل و ۱ گرم کابوسیل (۱/۷٪ وزنی) تهیه گردید. برای افزایش حساسیت فوم به چاشنی پودر آلومینیوم به فرمولاسیون اضافه شد (فرمولاسیون ۳).

آلومینیوم در روند تهیه فوم و شرایط فوم شونگی هیچ گونه تغییری ایجاد نکرد. درصد اجزاء در این فرمولاسیون عبارت بودند از: نیترومتان (۹۲٪)، استاریل‌الکل (۳٪)، آلومینیوم (۱/۶۵٪)، کابوسیل (۱/۶۵٪)، استاریل‌الکل‌اتوکسیله (۱/۷۱٪) و نیتروسولوز (۰/۴۵٪). TNT به خوبی با نسبت وزنی یکسان در نیترومتان حل می‌شود.

با توجه به اینکه TNT در داخل کشور تولید می‌شود ولی نیترومتان ماده‌ای وارداتی است، سعی شد حداقل قسمتی از نیترومتان با TNT جایگزین شود. فرمولاسیون حاوی TNT (فرمولاسیون ۴) شامل نیترومتان (۵۵٪)، استاریل‌الکل (۱/۸۴٪)، کابوسیل (۰/۲٪)، TNT (۴۰٪)، نیتروسولوز (۰/۲۸٪)، استاریل‌الکل‌اتوکسیله (۰/۷۲٪) بود که بهترین شرایط از لحاظ پایدار و جدایی فاز فوم را فراهم می‌کرد.

۳-۳- تست گودکنندگی

برای انجام تست‌های گودکنندگی، فرمولاسیون‌های ۲ و ۳ را در لوله‌های پلیمری به طول ۱۵ و قطر ۲/۵ سانتی‌متر تخلیه کردیم و

این امر در مورد فرمولاسیون تهیه شده در شرایط گرم بسیار بارز بود و بعد از چند ساعت اتفاق می‌افتاد در حالی که در مورد فرمولاسیون تهیه شده در شرایط سرد بسیار کند بود. بنابراین فرمولاسیون تهیه شده در شرایط سرد هم از لحاظ روانروی و هم از لحاظ پایداری بر فرمولاسیون گرم ارجحیت دارد.

در دمای صفر درجه در لحظه اولیه خاصیت فوم شونگی کمی مشاهده شد که با گذشت زمان و افزایش دمای فوم، آزاد شدن پروپان باعث افزایش حجم فوم و در نتیجه کاهش چگالی فوم می‌گردید. در دمای بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش چگالی فوم با سپری شدن مدت زمان یک ساعت افزایش قابل توجهی یافت که به علت کاهش حجم فوم در طول زمان بود. روند کاهشی چگالی در دمای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان بعد از یک ساعت بیشتر ناشی از جدایی فاز بود. در واقع در دمای بالا و با سپری شدن زمان، فوم به مایع تبدیل می‌شود. بیشترین اختلاف چگالی فوم در لحظه رهاش و بعد از یک ساعت مربوط به دمای بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود که نشان دهنده میزان فوم‌شونگی بالای فوم در این دما می‌باشد (شکل ۴).

۳-۲- فرمولاسیون‌های بهینه فوم انفجاری بر پایه

نیترومتان

افزایش ۰/۳ گرم کابوسیل به فرمولاسیون ۱ [۱] باعث افزایش پایداری و کاهش جدایی فاز این فرمولاسیون شد. با تغییر درصد نیترومتان و کابوسیل و ثابت نگاه داشتن بقیه اجزا تلاش شد فومی با بیشترین

فرمولاسیون با چگالی در حدود ۰/۵ تا ۰/۷ به ترتیب ۲۴۰۰ و ۲۹۵۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

لوله‌ها را بر روی صفحه فولادی به ضخامت ۰/۴ سانتی متر قرار دادیم (شکل ۵). کلیه تست‌های انفجاری این مرحله با چاشنی شماره ۸ انجام شد. تاثیر انفجار در محل تماس لوله پلیمری حاوی فوم با صفحه فولادی مشاهده می‌شود (شکل ۶).

۴- محاسبه سرعت و فشار انفجار فوم‌های انفجاری بر پایه نیترومتان

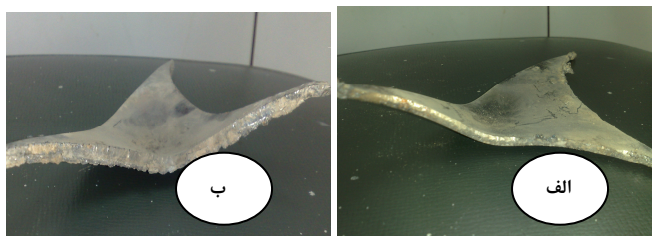
محاسبات سرعت و فشار انفجار برای فوم‌های انفجاری بر پایه نیترومتان بدون کابوسیل (فرمولاسیون ۱) و با کابوسیل (فرمولاسیون ۲) به همراه آلومینیوم (فرمولاسیون ۳) و TNT (فرمولاسیون ۴) با نرم افزار چیتا انجام گرفت (جدول ۱).

۴-۳- اندازه‌گیری سرعت انفجار

انواع مختلف فوم‌ها (فرمولاسیون ۴-۲) با چاشنی شماره ۸ منفجره شدند. اندازه‌گیری سرعت انفجار برای دو فرمولاسیون ۳ و ۴ در صنایع شهید شاه آبادی صورت گرفت. سرعت اندازه‌گیری شده برای این دو



شکل ۵- لوله‌های پلاستیکی پر شده با فوم بهینه.



شکل ۶- تاثیر ۳۰ گرم فوم بر روی صفحه فولادی به ضخامت ۰/۴ سانتی متر. (الف) فرمولاسیون ۲، (ب) فرمولاسیون ۳ (با ۲٪ آلومینیوم)

جدول ۱- داده‌های محاسباتی فرمولاسیون با چگالی‌های متفاوت با نرم افزار چیتا.

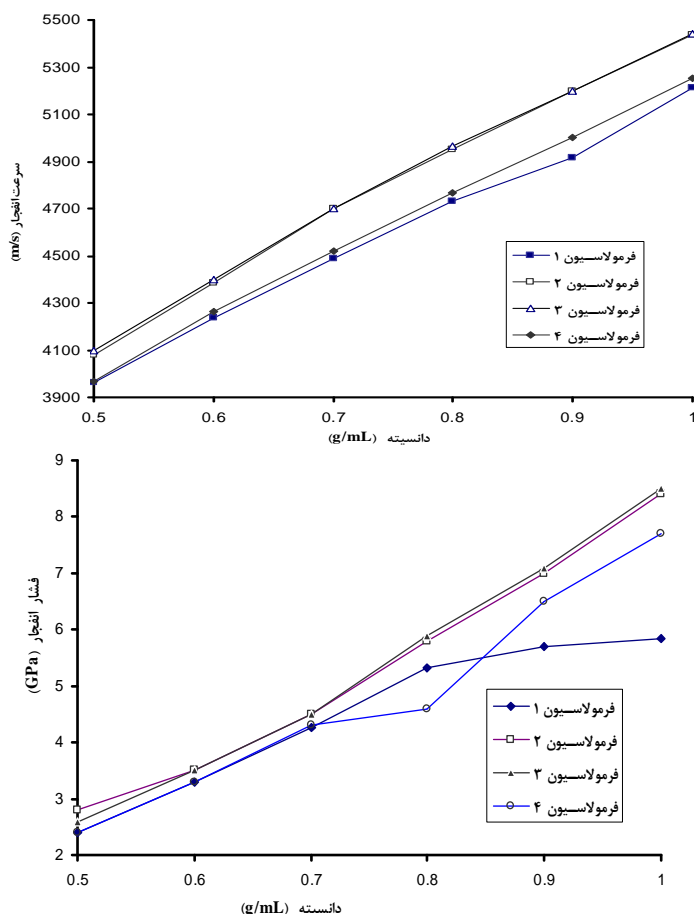
چگالی (gr/cm ³)						
۱	۰/۹	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	
۵۲۱۲	۴۹۱۶	۴۷۳۰	۴۴۹۰	۴۲۳۷	۳۹۶۴	سرعت انفجار (m/s)
۵/۸۴	۵/۷	۵/۳۳	۴/۲۷	۳/۳	۲/۴	فشار انفجار (GPa)
۵۴۳۷	۵۲۰۰	۴۹۵۳	۴۷۰۰	۴۳۸۵	۴۰۷۹	سرعت انفجار (m/s)
۸/۴	۷	۵/۸	۴/۵	۳/۵	۲/۸	فشار انفجار (GPa)
۵۴۴۰	۵۲۰۰	۴۹۶۷	۴۷۰۰	۴۴۰۰	۴۱۰۰	سرعت انفجار (m/s)
۸/۵	۷/۱	۵/۹	۴/۵	۳/۵	۲/۶	فشار انفجار (GPa)
۵۲۵۳	۵۰۰۰	۴۷۶۶	۴۵۲۱	۴۲۶۵	۳۹۶۸	سرعت انفجار (m/s)
۷/۷	۶/۵	۴/۶	۴/۳	۳/۳	۲/۴	فشار انفجار (GPa)

فرمولاسیون ۱: نیترومتان (۸۶٪)، استاریل الکل (۸/۹٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۳/۵٪)، نیتروسولوز (۰/۴۶٪)
 فرمولاسیون ۲: نیترومتان (۹۳/۵٪)، استاریل الکل (۳٪)، کابوسیل (۱/۶۵٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۱/۲٪)، نیتروسولوز (۰/۴۶٪)
 فرمولاسیون ۳: نیترومتان (۹۲٪)، استاریل الکل (۳٪)، آلومینیوم (۱/۶۵٪)، کابوسیل (۱/۶۵٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۱/۷۱٪)، نیتروسولوز (۰/۴۵٪)
 فرمولاسیون ۴: نیترومتان (۵۵٪)، استاریل الکل (۱/۸۴٪)، کابوسیل (۲٪)، TNT (۰/۴۰٪)، نیتروسولوز (۰/۲۸٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۰/۷۲٪)

۵- نتیجه گیری

فوم تهیه شده بدون کابوسیل فوم شوندگی ضعیفی دارد و جدایی فاز (مایع از فوم) در آن به سرعت اتفاق می افتد. شرایط مختلف دمایی و مقادیر فوم ساز در خواص فوم تاثیر زیادی می گذارد. مشخص گردید که دانسیته بالا و پایداری مناسب در دمای فرمولاسیون حدود 20°C تا 40°C محقق می گردد. از طرف دیگر سرعت رهایش نیز در دانسیته فوم حاصل موثر بود و در سرعت های رهایش کندتر فوم با دانسیته بالاتر ایجاد می شد. کابوسیل شرایط فوم شوندگی فرمولاسیون را تغییر داد. استفاده از کابوسیل جدایی فاز را تقریباً به صفر رسانده و علاوه بر آن، درصد نیترومتان نیز افزایش قابل توجهی پیدا کرد.

در فرمولاسیون ۲ نسبت به فرمولاسیون ۱ افزایش سرعتی در حدود 100 m/s تا 200 m/s مشاهده می شود که ناشی از افزایش ۷ درصدی نیترومتان (ماده منفجره) در فرمولاسیون می باشد. محاسبات براساس نرم افزار چیتا بیان گر افزایش سرعت و فشار انفجار با افزایش چگالی فوم می باشد. افزایش کابوسیل به فرمولاسیون افزایش درصد نیترومتان در ترکیب فوم را به همراه دارد که باعث افزایش سرعت و فشار انفجار می شود. این محاسبات همچنین نشان می دهد افزایش TNT تاثیر قابل توجهی بر سرعت انفجار در چگالی های مختلف ندارد اما افزایش آلومینیوم به فرمولاسیون باعث بالا رفتن سرعت انفجار می شود.



شکل ۷- تغییرات سرعت و فشار انفجار محاسبه شده با نرم افزار چیتا بر حسب دانسیته فرمولاسیون های ۱ تا ۴.

فرمولاسیون ۱: نیترومتان (۸۶٪)، استاریل الکل (۸۹٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۳۵٪)، نیتروسولوز (۴۶٪)؛
 فرمولاسیون ۲: نیترومتان (۹۳٪)، استاریل الکل (۳٪)، کابوسیل (۶۵٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۱۲٪)، نیتروسولوز (۴۶٪)؛
 فرمولاسیون ۳: نیترومتان (۹۲٪)، استاریل الکل (۳٪)، آلومینیوم (۶۵٪)، کابوسیل (۶۵٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۱۷٪)، نیتروسولوز (۴۵٪)؛
 فرمولاسیون ۴: نیترومتان (۵۵٪)، استاریل الکل (۸۴٪)، کابوسیل (۲٪)، TNT (۴۰٪)، نیتروسولوز (۲۸٪)، استاریل الکل اتوکسیله (۷۲٪)

شوندگی بالا نسبت به فرمولاسیون قبلی، میزان استاریل الکل به یک سوم کاهش یافت و مقدار نیترومتان نیز حدود ۷٪ افزایش پیدا کرد. محاسبه سرعت و فشار انفجار توسط نرم‌آزار چیتا نشان داد که افزایش کابوسیل و در نتیجه کاهش استاریل الکل و افزایش نیترومتان در فرمولاسیون، باعث افزایش سرعت انفجار و فشار انفجار می‌شود. همین محاسبات نشان داد که افزایش آلومینیم به فرمولاسیون بهینه با کابوسیل تفاوتی در سرعت و فشار انفجار ایجاد نمی‌کند ولی جایگزینی ۵۰٪ نیترومتان توسط TNT منجر به کاهش سرعت و فشار انفجار می‌شود. با وجود این سرعت های انفجار اندازه‌گیری شده به طریق تجربی در مورد فرمولاسیون‌های با آلومینیوم و TNT به مراتب کمتر از آنچه محاسبات نشان می‌دادند، بودند.

خواص انفجاری وابستگی زیادی به چگالی ماده منفجره دارد و در این فرمولاسیون با صفر شدن جدایی فاز چگونگی افزایش چگالی فوم را در طول زمان تعیین شد. در مقادیر کابوسیل کمتر از یک درصد، جدای فاز بیشتری مشاهده شد و فوم ناپایدارتر بود. از طرف دیگر، کابوسیل نیاز به هم‌زدن زیاد فرمولاسیون تا دمای محیط را که برای پیشگیری از کلوخه شدن استاریل الکل لازم بود، بر طرف کرد و در نتیجه باعث شرکت تقریباً تمام استاریل الکل در فرایند فوم شوندگی - شد. بهترین فرمولاسیونی که دارای جدایی فاز بسیار پایین و پایداری بالا بود شامل ۵۰ میلی‌لیتر (۹۳/۵٪ وزنی) نیترومتان، ۰/۲۸ گرم (۰/۵٪ وزنی) نیتروسولولز، ۰/۷۲ گرم (۱/۲۷٪ وزنی) استاریل الکل اتوکسیله شده، ۱/۸۴ گرم (۳/۲۵٪ وزنی) استاریل الکل و ۱ گرم کابوسیل (۱/۷٪ وزنی) بود. در این فرمولاسیون، علاوه بر خواص فوم

منابع

- [۱]. حسین فخرانیان، حسام حاج قنبری، حسین چلابی، علی اکبر جمالی، عباس طاهری، عادل عبادی و کیومرث فرهادی "تهیه و تست میدانی فوم های انفجاری مایع ضد مین" نشریه تحقیق و توسعه مواد پر انرژی، صفحه ۳، شماره ۲، پاییز و زمستان ۸۷.
- [۲]. علی سلمانی و حسین فخرانیان "بررسی فومهای انفجاری" نشریه تحقیق و توسعه مواد پر انرژی، صفحه ۶۷، شماره ۲، پاییز و زمستان ۸۵.
- [۳]. حسین فخرانیان و عباس طاهری "روشهای احتراقی و انفجاری در خنثی سازی مین ها" نشریه تحقیق و توسعه مواد پر انرژی، صفحه ۶۳، شماره ۲، پاییز و زمستان ۸۷.
- [4]. Vosburgh, A.; Burke, S.; Patel, D. L. "Operational Evaluation Test Mine Neutralization System."; 2005.
<http://www.itep.ws/pdf/finalreportneutsysseval.pdf>.
- [5]. Dremin, A. N.; Rozanov, O. K.; Trofimov, V. S. "On the Detonation of Nitromethane."; *Combustion and Flame* 1963, 7, 153-162.
- [6]. Odier, S.; Blain, M.; Vauthier, E.; Fliszar, S. "Influence of the Physical State of an Explosive on its Sensitivity. Is Nitromethane Sensitive or insensitive."; *J. Mol. Structure: THEOCHEM*. 1993, 27, 233-238.
- [7]. Stark, H. J. "Low Density Cellular Foam Explosive and Products Made There From."; US patent 2,845,025, 1958 and US patent 3,049,454, 1962.
- [8]. Brockbank, S. M.; Clay, R. B. "Aerated Explosive Slurry Containing a Foam Promoting and Viscosity Increasing Agent and Method of Making Same."; US patent 3,582,411, 1971.
- [9]. Chandler, O. "Nitromethane Explosive with a Foam and Microspheres of Air."; US patent 3,794,534, 1974.
- [10]. USA Army, "Final Scientific and Technical Report on the High-Performance Hand-held Foamed Nitromethane System."; 2003.
http://www.itep.ws/pdf/NMX_report.pdf.
- [11]. Patel, D. L.; Briggs, B. D. "Performance Characterization of LEXFOAM from Hand-held Systems."; Technical report, NIST order number: ADA458400, 2006
- [12]. Baker, M. A.; Anderson, C. J. "Foamed Nitroparaffin Explosive Composition.."; US patent 4,925,505, 1990 and Fr patent 2,657,868, 1991.
- [13]. Ping, L. J. "Evaluation of the Thermochemical Code -CHEETAH 2.0 for Modeling Explosives Performance."; DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.