

بهبود شاخصه‌های فیزیکی ماده منفجره خمیری RDX/DOS/PIB با بهینه کردن مقادیر کلاس‌های مختلف RDX به روش طراحی آزمایش سطح پاسخ

حمید رضا پوراعتدال^{۱*}، روزبه سعید^۲، علی موسوی آذر^۳

۱- استاد، ۲- کارشناسی ارشد، ۳- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶)

چکیده

خواص فیزیکی، از جمله شاخص‌های کنترل کیفیت مواد منفجره خمیری هستند. بهینه‌سازی درصد اجزای تشکیل دهنده یک ماده منفجره خمیری کامپوزیتی، می‌تواند در بهبود این شاخصه‌ها، تأثیر چشمگیری داشته باشد. در این پژوهش، تأثیر نسبت مقادیر کلاس‌های مختلف RDX با توزیع اندازه ذرات مختلف در ماده منفجره خمیری RDX/DOS/PIB با نسبت ۷/۵ : ۲/۵ : ۹۰ بر سه شاخصه فیزیکی پلاستیسیته، چگالی و درصد نشت بایندر، مورد مطالعه قرار گرفت. روش طراحی آزمایش سطح پاسخ برای بهینه نمودن مقدار هر کدام از کلاس‌های مختلف RDX استفاده شد. توزیع اندازه ذرات RDX در کلاس‌های مختلف به روش FE-SEM، بررسی شد. میانگین اندازه ذرات RDX در کلاس‌های ۱، ۳ و ۵، به ترتیب، ۱۴۴/۹، ۴۴۱ و ۳/۶ میکرون، به دست آمد. نتایج نشان داد که در مقادیر بهینه ۵۲/۵، ۷/۵ و ۳۰ درصد وزنی از RDX، به ترتیب، از کلاس‌های ۱، ۳ و ۵ در یک نمونه ۱۰۰ گرمی ماده منفجره خمیری، پلاستیسیته ۰/۰۲۹، چگالی ۱/۵۱۳ g/cm³ و درصد نشت بایندر ۰/۰۳۴ برای نمونه تهیه شده، حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ماده منفجره RDX، پلی ایزوبوتیلن، اندازه ذرات، پلاستیسیته، چگالی، نشت بایندر.

Improving the Physical Characteristics of RDX/DOS/PIB Paste Explosive by Optimizing the Amounts of Different Classes of RDX Using the Experimental Design-Response Surface Method

H. R. Pouretdal^{*}, R. Said, A. Mousaviazar

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 09/06/2023, Accepted: 10/08/2023)

Abstract

Physical properties are among the quality control characteristic of paste explosives. Optimizing the proportional amounts of component in a composite paste explosive can have a significant effect on improving the physical properties. In this research, the effect of the amounts of different classes of RDX with different particle sizes distribution is studied on the physical properties (plasticity, density and binder leakage) of paste explosive RDX/DOS/PIB (90:2.5:7.5). The experimental design - response surface method was used to optimize the amount of each classes of RDX. The particle size distribution of RDX classes has been investigated by FE-SEM method. The average size of RDX particles in classes 1, 3 and 5 were obtained as 144.9, 441 and 3.6 microns, respectively. Plasticity of 0.029, density of 1.513 g/cm³ and the binder leakage of 0.034% are obtained for the optimal amounts of 52.5, 7.5 and 30 grams of RDX from classes 1, 3 and 5 respectively, in 100 gram sample of the proposed paste explosive.

Keywords: RDX Explosive, Polyisobutylene, Particle Size, Plasticity, Density, Binder Leakage.

۱- مقدمه

مواد منفجره با پیوند پلیمری^۱ (PBXs)، حاوی یک ماده منفجره در ماتریس پلیمری با نسبت وزنی تقریباً ۹۰ به ۱۰، می‌باشند [۱]. ویژگی مهم PBXها، کاهش حساسیت مواد منفجره به محرک‌های محیطی مانند ضربه، اصطکاک و شوک می‌باشد. همچنین، شکل پذیری و قالب پذیری PBXها، از ویژگی‌های آن‌هاست [۲ و ۳]. خواص فیزیکی - مکانیکی و عملکردی یک ماده منفجره PBX به ماهیت، مقدار و ویژگی‌های اجزای تشکیل دهنده بستگی دارد. از جمله خواص فیزیکی PBXs می‌توان به چگالی، پلاستیسیته، مدول الاستیسیته، خواص تنش-کرنش، سختی، دمای انتقال شیشه‌ای، پایداری حرارتی در خلأ و پایداری حرارتی در شرایط طبیعی، اشاره نمود. مقدار هر کدام از خواص ذکر شده، به اجزای تشکیل دهنده و درصد هر یک از اجزاء در ترکیب نهایی بستگی خواهد داشت. یکی از اجزای اصلی PBXها، ماده منفجره RDX است که به‌عنوان پرکننده نیز نامیده می‌شود. مورفولوژی ذرات پرکننده RDX مانند اندازه و ساختار کریستالی آن‌ها تأثیر زیادی بر خواص ماده منفجره PBX حاصله خواهد داشت [۴ و ۵].

ماده منفجره C-4، زیرمجموعه PBXها است که در آن از RDX و پلیمر پلی ایزوبوتیلن استفاده می‌شود [۶]. ماده منفجره RDX^۲ یک ترکیب آلی با فرمول $(CH_2O_2N_2)_3$ است و به‌عنوان یک نیتروآمین طبقه‌بندی می‌شود. RDX اغلب در مخلوط با سایر مواد منفجره و نرم کننده‌ها استفاده می‌شود [۷ و ۸]. دانه بندی RDX در هشت کلاس مختلف و مطابق با MIL-DTL-398D، طبقه‌بندی می‌شود. RDX در کلاس‌های ۱، ۳، ۸ و به ویژه کلاس ۵ در تهیه ماده منفجره C-4 معرفی شده است. از نظر اندازه، ابعاد ذرات RDX کلاس ۵ در ابعاد میکرون هستند در حالی که دانه بندی RDX در کلاس‌های ۱، ۳ و ۸ معمولاً ذرات درشت دانه (با اندازه ذرات بیش از ۳۰۰ میکرون) هستند [۹ و ۱۰]. به دلیل قیمت بالا، در استفاده از میکرو ذرات RDX در تهیه C-4 محدودیت وجود دارد. همچنین، نشت بایندر و تغییرات پلاستیسیته در طول زمان انبارداری، از جمله محدودیت‌های دیگر ماده منفجره C-4 است. بنابراین استفاده از کلاس‌های مختلف می‌تواند راه حلی برای کاهش این محدودیت‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های تولید باشد.

در علم مواد، پلاستیسیته به‌عنوان تغییر شکل پلاستیک، شناخته شده و توانایی یک ماده جامد را برای تغییر شکل دائمی و تغییر شکل غیر قابل برگشت در پاسخ به نیروهای اعمال شده، نشان می‌دهد [۱۱]. چگالی یک ماده منفجره کامپوزیتی بر قدرت انفجار تأثیر داشته و در انتخاب ماده منفجره به آن توجه می‌شود. برای افزایش قدرت انفجار، معمولاً یک ماده منفجره متراکم لازم است [۱۲]. یکی از معایب مواد منفجره PBX، نشت بایندر است. اثرات نشت منجر به ایجاد شکاف در

قالب مواد منفجره می‌شود. نسبت وزنی اجزاء و کیفیت اختلاط آن‌ها، بر این محدودیت تأثیر می‌گذارد [۱۳].

در این کار پژوهشی، از سه کلاس ۱، ۳ و ۵ از ماده منفجره RDX در تهیه کامپوزیت RDX/PIB/DOS مشابه با C-4 استفاده شد. مقادیر هر کدام از این کلاس‌ها به روش طراحی آزمایش، بهینه شد تا بیشترین پلاستیسیته و چگالی و کمترین درصد نشت بایندر از کامپوزیت، حاصل شود و بنابراین شاخصه‌های فیزیکی محصول بهبود یابد.

۲- بخش تجربی

ماده منفجره RDX در کلاس‌های مختلف از صنایع شیمیایی ایران تهیه شد. سپس، ذرات RDX مجدداً متبلور شدند تا کلاس‌های مختلف ۱، ۳ و ۵ با اندازه‌های مختلف مطابق با استاندارد MIL-DTL-398D تهیه شوند [۱۰]. حداقل ۹۷ درصد RDX کلاس ۵ باید کمتر از ۴۴ میکرون باشد. در حالی که، نزدیک به ۹۰٪ از RDX کلاس ۱، اندازه ذرات بیش از ۲۹۷ میکرون دارند. همچنین بیش از ۹۵ درصد RDX کلاس ۳، دارای اندازه ذرات بیش از ۵۰۰ میکرون است. بنابراین، ترتیب اندازه ذرات RDX، به ترتیب، کلاس ۳ < کلاس ۱ < کلاس ۵ است. بایندر پلی ایزوبوتیلن (با وزن مولکولی متوسط ۵۰۰۰۰) از شرکت سیگما - آلد ریچ خریداری شد. نرم کننده دی ((۲-اتیل هگزیل) سیبسات) (DOS) برای پوشش ذرات RDX استفاده شد و از سیگما - آلد ریچ خریداری شد.

در ابتدا، ذرات RDX از سه کلاس منتخب ۱، ۳ و ۵ و در درصد‌های وزنی برگزیده، توزین شده و به یک ظرف منتقل می‌شوند. با اضافه کردن ماده روان نرم کننده DOS و استفاده از اختلاط فیزیکی، ذرات RDX کاملاً با هم مخلوط شده و از طرف دیگر، غیر حساس می‌شوند. سپس با افزودن PIB به آن و مخلوط کردن در مخلوط کن Sigma-Blade به مدت ۳۰ دقیقه، ماده منفجره خمیری RDX/PIB/DOS (با نسبت وزنی ۲/۵ : ۷/۵ : ۹۰)، تهیه می‌شود.

از روش گسیل میدانی - میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ (FE-SEM) توسط دستگاه VEGA-Mira 3-XMU برای بررسی توزیع اندازه ذرات RDX در سه کلاس و بررسی شکل ظاهری ذرات، استفاده شد.

انعطاف پذیری^۵ نمونه‌های تهیه شده بر اساس روش MIL-STD-650 211.1 تعیین می‌شود [۱۴]. نمونه‌های تهیه شده با وزن ± 0.05 گرم در قالب فشرده شدند تا نمونه‌ای با قطر ۵۰/۸ میلی‌متر و ضخامت ۱۹/۰ میلی‌متر تشکیل شود. نمونه‌ها تحت فشار یک وزنه ۵ کیلوگرمی به مدت ۲۰ دقیقه، قرار می‌گیرند. با استفاده از معادله (۱)، پلاستیسیته نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. پارامتر A، لگاریتم بر پایه ۱۰ ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر در زمان صفر و B، لگاریتم بر پایه ۱۰ ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر در پایان ۲۰ دقیقه است.

3- Di(2-Ethylhexyl) Sebacate)

4- Field Emission - Scanning Electron Microscope

5- Flexibility

1- Polymer-Bonded Explosives

2- Research Department Explosive or Royal Demolition Explosive

نمونه اندازه‌گیری شده و به‌عنوان متغیر پاسخ استفاده می‌شوند. داده‌های جمع‌آوری شده در جدول (۱) ارائه شده است. به‌عنوان مثال برای تهیه نمونه ۱ به ترتیب از مقادیر ۵/۵۲، ۵/۷ و ۳۰ گرم (مجموع ۹۰ گرم) از RDX-1، RDX-3 و RDX-5 استفاده شده است.

نمودارهای پارتو^۲ حاصل از طراحی آزمایش، برای پاسخ‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. بیشترین وابستگی شاخصه پلاستیسیته به مقدار میکروذرات RDX-5 می‌باشد. در حالی که برای شاخصه‌های چگالی و درصد نشت بایندر، کلاس‌های RDX-5 و RDX-3 (میکروذرات و ذرات درشت)، تأثیرگذارتر هستند.

داده‌های آنالیز واریانس^۳ (ANOVA) متغیرهای بهینه شده در جدول‌های (۲، ۳ و ۴)، به ترتیب، برای متغیرهای پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر آورده شده است. مقادیر P-value برای هر سه متغیر پیش‌بینی کننده و برای هر سه پاسخ جمع‌آوری شده، کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد که تأثیر معنی‌دار کلاس‌های مختلف RDX را بر شاخصه‌های فیزیکی ماده منفجره خمیری نشان می‌دهد. معادلات رگرسیون، نشان دهنده ارتباط هر پاسخ با متغیرهای پیش‌بینی کننده است (معادلات (۲ تا ۴)).

$$\text{Plasticity} = 0.0120 + 0.000254 \text{ RDX-1} - 0.000705 \text{ RDX-3} + 0.001221 \text{ RDX-5} \quad (۲)$$

$$\text{Density} = 1.5550 - 0.00134 \text{ RDX-1} - 0.001008 \text{ RDX-3} + 0.00076 \text{ RDX-5} \quad (۳)$$

$$\text{Binder leakage \%} = -0.0114 + 0.00085 \text{ RDX-1} - 0.001063 \text{ RDX-3} + 0.001702 \text{ RDX-5} \quad (۴)$$

مقادیر R² (ضرایب رگرسیون) معادلات رگرسیون برای متغیرهای وابسته پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۹۴ و ۰/۹۶ به‌دست آمده است. ضرایب رگرسیون نشان می‌دهد که داده‌های تجربی با مدل‌های پیشنهادی (به ویژه برای پلاستیسیته و نشت بایندر) برازش می‌شوند.

مدل پیشنهادی برای پلاستیسیته (معادله (۲)) نشان می‌دهد که افزایش میکروذرات RDX-5 و ذرات RDX-1 منجر به افزایش انعطاف پذیری ماده منفجره خمیری شده است. در حالی که افزودن ذرات درشت RDX-3، منجر به کاهش انعطاف پذیری می‌شود. به عبارت دیگر، انعطاف پذیری و شکل پذیری ماده منفجره خمیری، با افزایش اندازه ذرات RDX کاهش می‌یابد.

ضریب مثبت RDX-5 در معادله رگرسیون (معادله (۳)) نشان می‌دهد که افزایش درصد وزنی میکرو ذرات RDX-5 منجر به افزایش چگالی محصول می‌شود که می‌تواند حاکی از فشردگی محصول باشد. افزایش چگالی مواد منفجره منجر به افزایش قدرت انفجار آن‌ها می‌شود. همچنین، کیفیت ماده منفجره خمیری، به نشت بایندر آن‌ها در حین نگهداری نیز بستگی دارد. نشت بایندر باعث ایجاد ترک در محصول نهایی می‌شود. افزایش ذرات درشت RDX-3 می‌تواند نشت بایندر را به

$$\text{Plasticity} = (A-B)/1.3 \quad (۱)$$

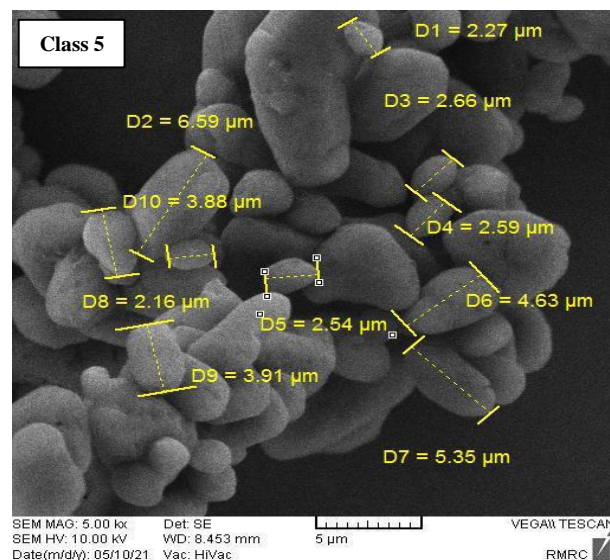
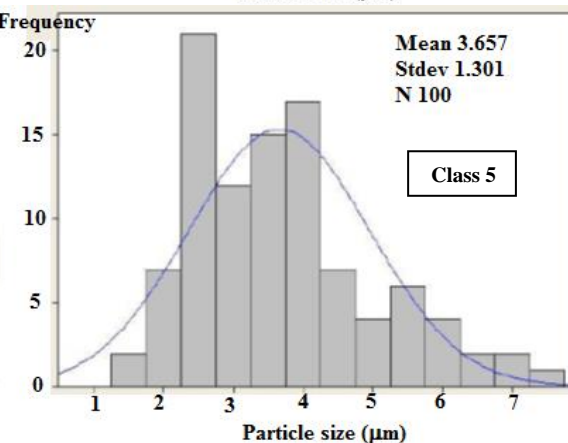
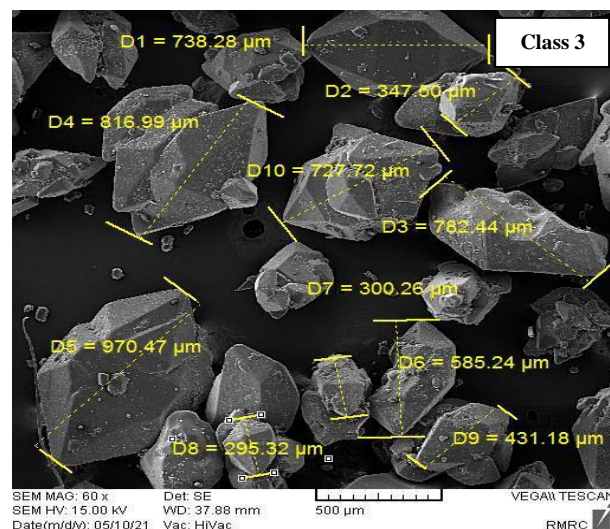
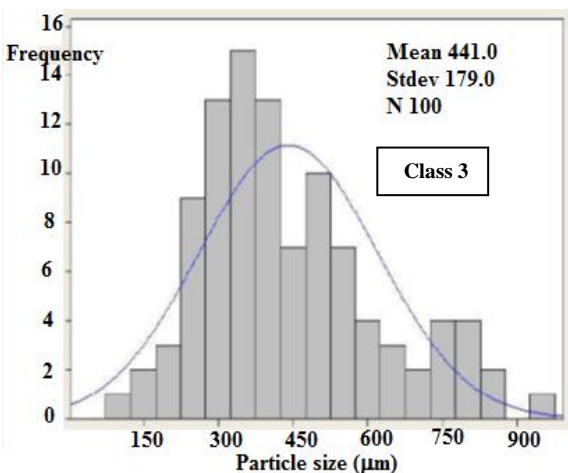
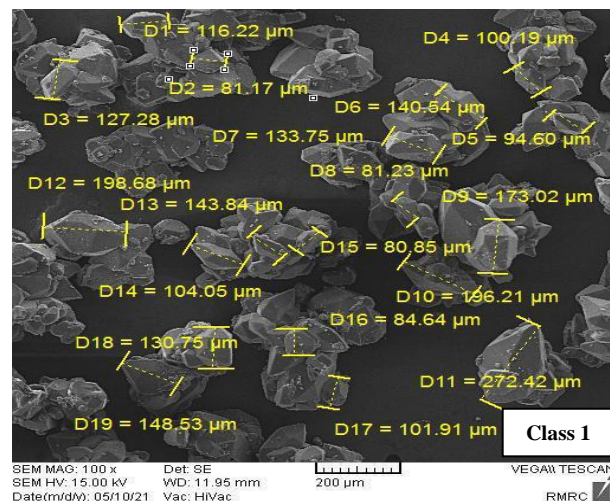
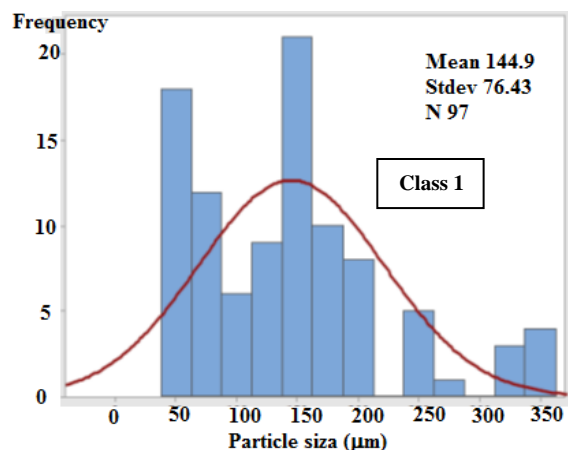
برای تعیین چگالی ظاهری، از یک قالب مناسب استفاده شد تا نمونه‌ها با وزن ۰/۰۵ ± ۲۰/۰۰ گرم، ضخامت ۶۹/۳۴ میلی‌متر و قطر ۲۴/۰۰ میلی‌متر تهیه شده و سپس تحت فشار ۱ تن قرار گیرند. نسبت جرم به حجم قالب آماده شده نشان دهنده چگالی ظاهری است [۱۴]. برای اندازه‌گیری نشتی نمونه‌ها، قالب قرص مانند با ضخامت ۶۹/۳۴ میلی‌متر و قطر ۲۴/۰۰ میلی‌متر تهیه شده و در یک کاغذ صافی بسته‌بندی می‌شود. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس مطابق با استاندارد MIL - W - 20553D قرار داده شدند. برای محاسبه درصد نشت بایندر، وزن اولیه و نهایی نمونه‌ها و کاغذ صافی ثبت شد [۱۴]. مطابق با استاندارد ذکر شده، کاهش وزن اولیه قالب نمونه و افزایش وزن کاغذ صافی، تعیین کننده درصد نشت بایندر می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

جهت تعیین توزیع اندازه ذرات RDX در سه کلاس ۱، ۳ و ۵، از تکنیک FE-SEM استفاده شد. تصاویر SEM در شکل (۱) و منحنی‌های توزیع اندازه ذرات در شکل (۲) نمایش داده شده است. از تصاویر SEM مشاهده می‌شود که ذرات RDX دارای اشکال نامنظم و توزیع متنوع اندازه هستند. همچنین می‌توان دید که اندازه ذرات به ترتیب کلاس ۳ < کلاس ۱ < کلاس ۵ است. همچنین هیستوگرام توزیع اندازه ذرات RDX در کلاس‌های ۱، ۳ و ۵، میانگین ذرات را به ترتیب ۱۴۴/۹، ۴۴۱/۰ و ۳/۶۵۷ میکرون نشان می‌دهند. همچنین توزیع اندازه ذرات RDX از ۵۰ تا ۳۵۰، ۱۵۰ تا ۸۰۰ و ۲ تا ۷ میکرون برای کلاس‌های ۱، ۳ و ۵، حاصل شده است [۱۵ و ۱۶].

برای تهیه نمونه‌های مختلف از ماده منفجره خمیری RDX/PIB/DOS با نسبت وزنی ۲/۵ : ۷/۵ : ۹۰، و برای تأمین RDX، از ۳ کلاس مختلف آن استفاده شد که در یک نمونه ۱۰۰ گرمی، مجموع وزن RDXها، ۹۰ گرم می‌باشد. توزیع اندازه ذرات RDX بر کیفیت محصول، شاخصه‌های فیزیکی آن و هزینه تمام شده، تأثیرگذار است. برای بهینه نمودن درصد هر کلاس از RDX (شامل RDX-1، RDX-3 و RDX-5)، از روش طراحی آزمایش [۱۷] با استفاده از طراحی مرکب سطح مرکزی پاسخ^۱ (CCD) در محیط نرم‌افزار Minitab 19 استفاده شد. نسبت وزنی از RDXها (RDX-1، RDX-3 و RDX-5) به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده یا مستقل، استفاده می‌شوند. حد بالا و حد پایین هر نوع RDX بر اساس نتایج آزمایش‌های اولیه تعیین می‌شود. حد بالا برای RDX-1، RDX-3 و RDX-5 به ترتیب ۷۰، ۳۰ و ۴۰ درصد بود. همچنین حد پایین RDX-1، RDX-3 و RDX-5 به ترتیب ۵۰، ۱۰ و ۲۰ درصد می‌باشد. پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر هر

حداقل برساند (معادله (۴)). ذرات درشت به عنوان یک جاذب عمل می کنند و با جذب بایندر از نشت جلوگیری می کنند [۲۰-۱۸].



شکل ۲- توزیع اندازه ذرات RDX در کلاس های ۱، ۳ و ۵.

نمودارهای کانتور پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر بر حسب متغیرهای پیش بینی کننده، در شکل های (۴، ۵ و ۶) نشان داده شده است. طرح کانتور یک تکنیک گرافیکی برای نمایش یک سطح ۳ بعدی با رسم برش های z ثابت، به نام خطوط، در قالب دو بعدی است. یعنی با توجه به مقدار z، خطوطی برای اتصال مختصات (x,y) در جایی که مقدار z رخ می دهد ترسیم می شود [۲۱]. نمودارهای کانتور نشان می دهد که مقدار میکروذرات RDX-5 بیشترین تأثیر را بر روی انعطاف پذیری کامپوزیت خمیری دارد. در حالی که چگالی ماده

شکل ۱- تصاویر FE-SEM ذرات RDX در کلاس های ۱، ۳ و ۵.

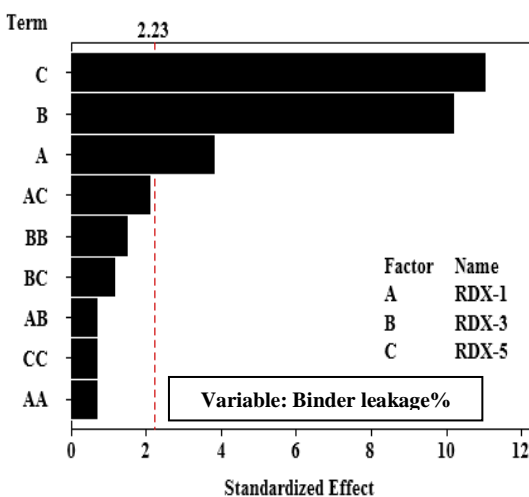
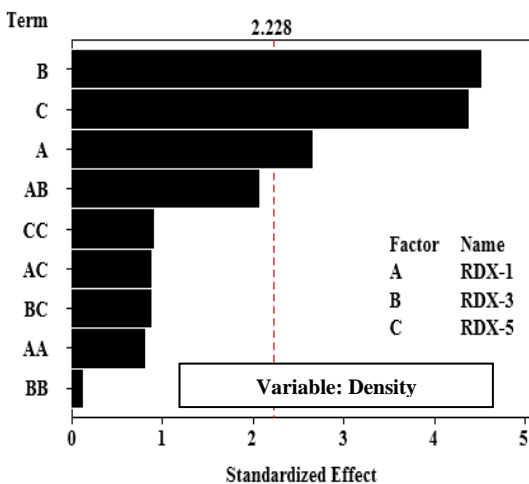
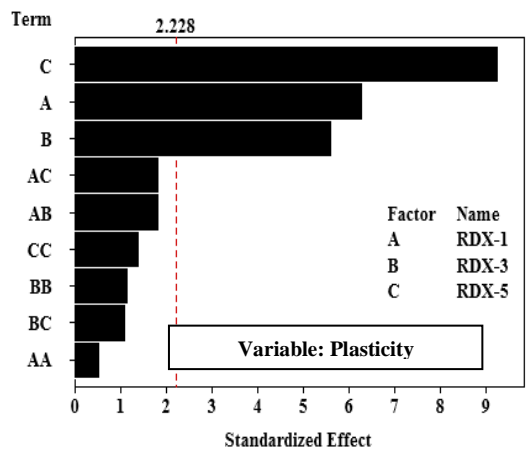
منفجره حاصله، به مقدار ذرات درشت RDX بستگی دارد. همچنین، میکروذرات و ذرات درشت RDX بر نشت بایندر نمونه‌های آماده شده تأثیرگذار هستند [۲۲-۲۴].

جدول ۱- متغیرهای پیش‌بینی کننده (درصد RDX) در طراحی آزمایش به روش CCD و پاسخ‌های اندازه‌گیری شده.

No.	RDX-1	RDX-3	RDX-5	Plasticity	Density (g/cm ³)	Binder leakage%
1	70	10	40	0.028	1.510	0.032
2	70	20	30	0.025	1.524	0.025
3	60	20	30	0.028	1.521	0.026
4	50	10	40	0.036	1.516	0.041
5	70	10	20	0.025	1.525	0.025
6	60	20	30	0.028	1.521	0.026
7	50	10	20	0.027	1.519	0.025
8	60	20	20	0.023	1.520	0.021
9	50	30	20	0.025	1.525	0.019
10	60	20	30	0.028	1.521	0.026
11	60	20	40	0.030	1.517	0.032
12	60	20	30	0.028	1.521	0.026
13	60	20	30	0.028	1.521	0.026
14	60	10	30	0.030	1.516	0.035
15	60	20	30	0.028	1.521	0.026
16	50	30	40	0.029	1.516	0.028
17	70	30	20	0.022	1.529	0.016
18	60	30	30	0.026	1.524	0.022
19	50	20	30	0.029	1.518	0.028
20	70	30	40	0.027	1.526	0.025

جدول ۲- داده‌های ANOVA متغیر پاسخ پلاستیسیته در بهینه‌سازی مقادیر کلاس‌های مختلف RDX.

Source	DF	Plasticity			
		Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.000154	0.000017	18.72	0.000
Linear	3	0.000143	0.000048	52.33	0.000
RDX-1	1	0.000036	0.000036	39.52	0.000
RDX-3	1	0.000029	0.000029	31.64	0.000
RDX-5	1	0.000078	0.000078	85.83	0.000
Square	3	0.000003	0.000001	1.13	0.384
RDX-1*RDX-1	1	0.000000	0.000000	0.30	0.593
RDX-3*RDX-3	1	0.000001	0.000001	1.40	0.264
RDX-5*RDX-5	1	0.000002	0.000002	2.02	0.186
2-Way Interaction	3	0.000007	0.000002	2.69	0.103
RDX-1*RDX-3	1	0.000003	0.000003	3.42	0.094
RDX-1*RDX-5	1	0.000003	0.000003	3.42	0.094
RDX-3*RDX-5	1	0.000001	0.000001	1.23	0.293
Error	10	0.000009	0.000001		
Lack-of-Fit	5	0.000009	0.000002	6.29735 E+28	0.000
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000163			



شکل ۳- نمودارهای پارتو حاصل از طراحی آزمایش برای پاسخ‌های پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر در مقدار آلفا برابر با ۰/۰۵.

شکل (۷) اثرات متغیرهای پیش‌بینی کننده را بر پاسخ‌های بهینه نشان می‌دهد. مقادیر بهینه تجربی برای RDX-1، RDX-3 و RDX-5 به ترتیب ۵۲/۵، ۷/۵ و ۳۰ گرم در ۱۰۰ گرم ماده منفجره خمیری RDX/PIB/DOS با نسبت وزنی ۲/۵ : ۷/۵ : ۹۰، می‌باشند. در شرایط بهینه، نمونه تهیه شده به ترتیب پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر را به ترتیب ۰/۰۲۹، ۱/۵۱۳ g/cm³ و ۰/۰۳۴ درصد نشان می‌دهد که

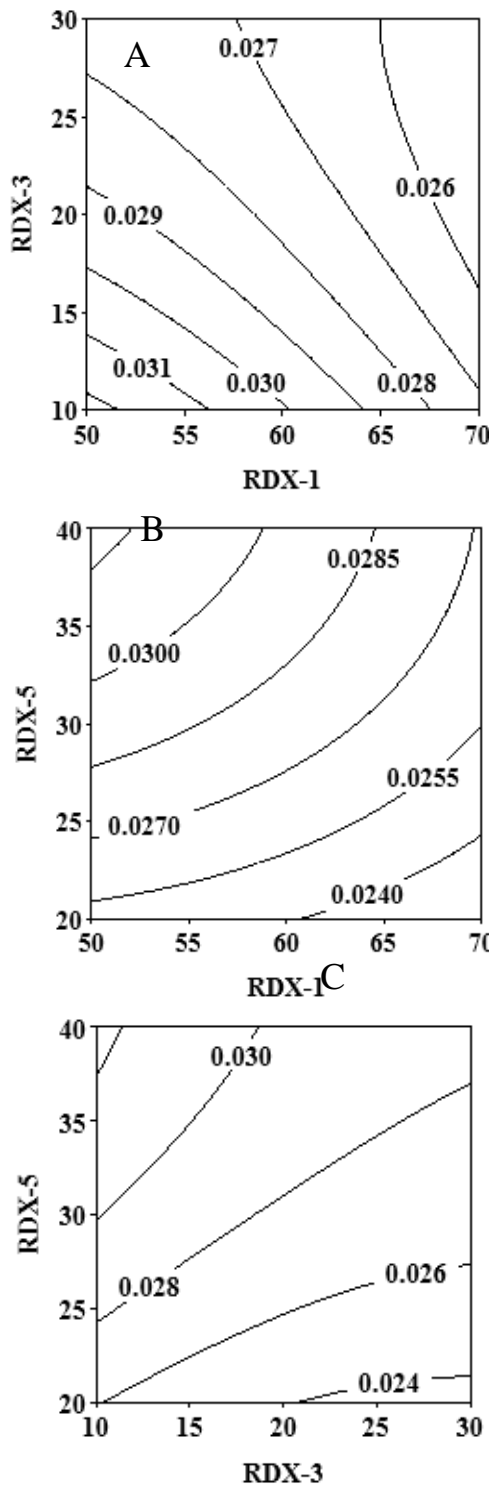
مطابق با استانداردهای ماده منفجره C-4 بر طبق استاندارد MIL-5023B DTL می‌باشند. مقادیر استاندارد بیشتر از ۰/۰۲ و کمتر از ۰/۰۸ برای پلاستیسیته، چگالی بیش از ۱/۵۰ g/cm³ و نشت بایندر کمتر از ۰/۰۵٪ برای C-4 گزارش شده است. بنابراین، انتظار می‌رود با استفاده از سه کلاس RDX شامل میکروذرات و ذرات درشت، هزینه‌های تولید کاهش یابد.

جدول ۳- داده‌های ANOVA متغیر پاسخ چگالی در بهینه‌سازی مقادیر کلاس‌های مختلف RDX.

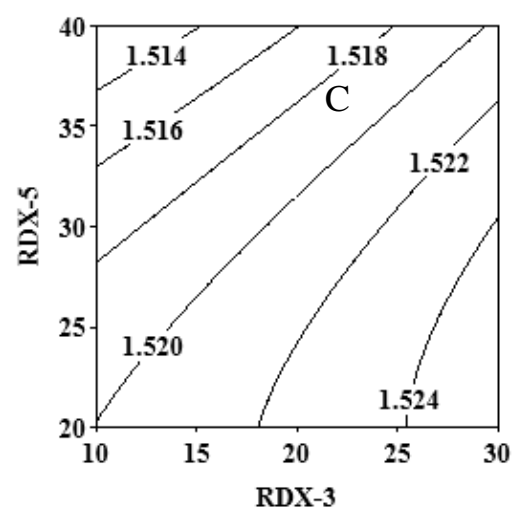
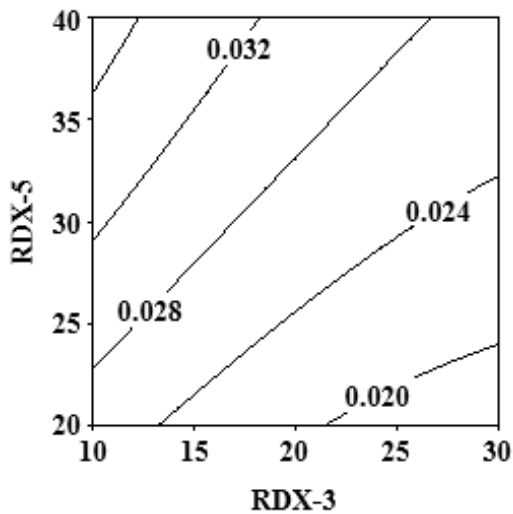
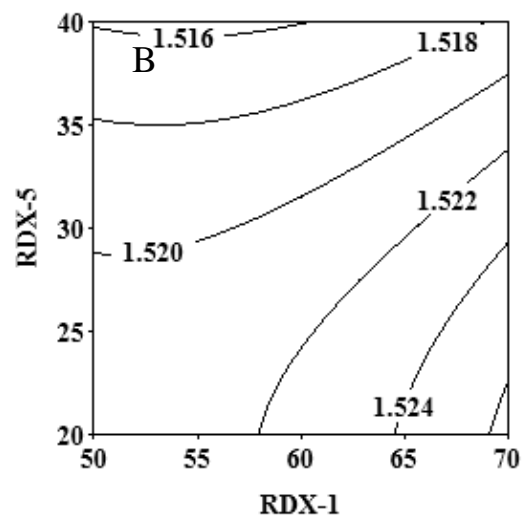
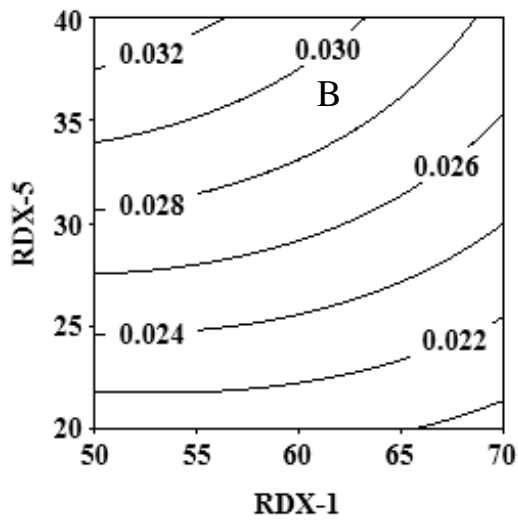
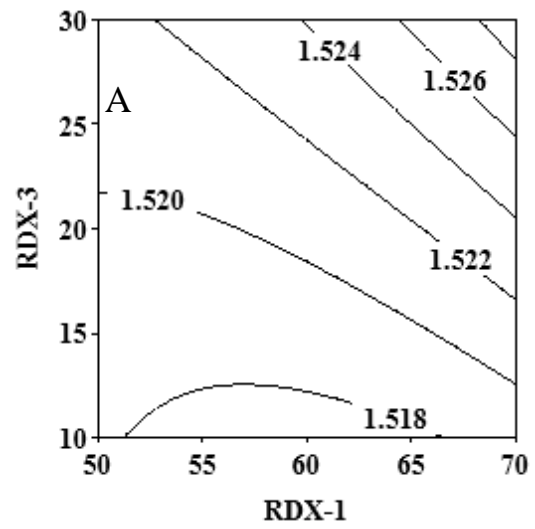
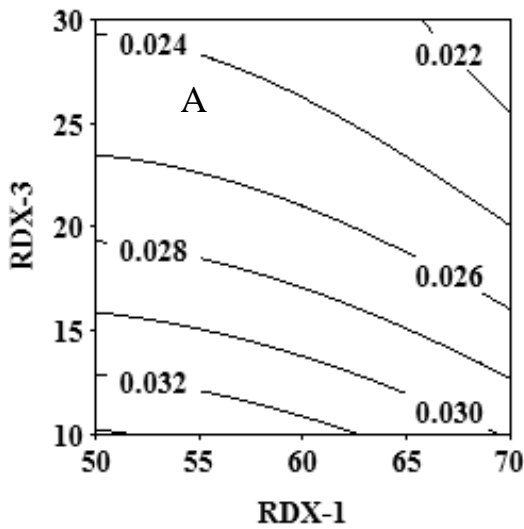
		Density			
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.000304	0.000034	5.97	0.005
Linear	3	0.000264	0.000088	15.57	0.000
RDX-1	1	0.000040	0.000040	7.07	0.024
RDX-3	1	0.000116	0.000116	20.42	0.001
RDX-5	1	0.000109	0.000109	19.24	0.001
Square	3	0.000006	0.000002	0.37	0.774
RDX-1*RDX-1	1	0.000004	0.000004	0.68	0.429
RDX-3*RDX-3	1	0.000000	0.000000	0.02	0.902
RDX-5*RDX-5	1	0.000005	0.000005	0.84	0.380
2-Way Interaction	3	0.000034	0.000011	1.97	0.182
RDX-1*RDX-3	1	0.000025	0.000025	4.33	0.064
RDX-1*RDX-5	1	0.000005	0.000005	0.79	0.394
RDX-3*RDX-5	1	0.000005	0.000005	0.79	0.394
Error	10	0.000057	0.000006		
Lack-of-Fit	5	0.000057	0.000011	5.17971E+26	0.000
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000361			

جدول ۴- داده‌های ANOVA متغیر پاسخ نشت بایندر در بهینه‌سازی مقادیر کلاس‌های مختلف RDX.

		Binder leakage			
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.000553	0.000061	27.85	0.000
Linear	3	0.000533	0.000178	80.56	0.000
RDX-1	1	0.000032	0.000032	14.69	0.003
RDX-3	1	0.000230	0.000230	104.44	0.000
RDX-5	1	0.000270	0.000270	122.57	0.000
Square	3	0.000005	0.000002	0.81	0.517
RDX-1*RDX-1	1	0.000001	0.000001	0.50	0.494
RDX-3*RDX-3	1	0.000005	0.000005	2.32	0.159
RDX-5*RDX-5	1	0.000001	0.000001	0.50	0.494
2-Way Interaction	3	0.000014	0.000005	2.17	0.155
RDX-1*RDX-3	1	0.000001	0.000001	0.51	0.491
RDX-1*RDX-5	1	0.000010	0.000010	4.59	0.058
RDX-3*RDX-5	1	0.000003	0.000003	1.42	0.261
Error	10	0.000022	0.000002		
Lack-of-Fit	5	0.000022	0.000004	1.04432E+29	0.000
Pure Error	5	0.000000	0.000000		
Total	19	0.000575			



شکل ۴- نمودارهای کانتور پلاستیسیته نسبت به متغیرهای پیش‌بینی کننده. (A) نسبت به RDX-1 در مقدار ثابت ۳۰٪ از RDX-5، (B) RDX-5 نسبت به RDX-1 در مقدار ثابت ۲۰٪ از RDX-3 و (C) RDX-5 نسبت به RDX-3 در مقدار ثابت ۶۰٪ از RDX-1.

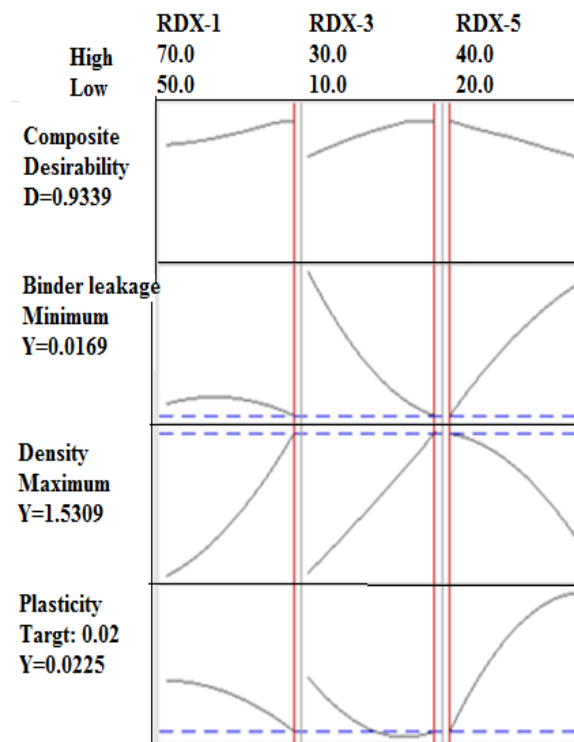


شکل ۶- نمودارهای کانتور درصد نشت بایندر نسبت به متغیرهای پیش‌بینی کننده. (A) نسبت به RDX-1 در مقدار ثابت ۳۰٪ از RDX-3، (B) RDX-5 نسبت به RDX-1 در مقدار ثابت ۲۰٪ از RDX-3 و (C) RDX-5 نسبت به RDX-3 در مقدار ثابت ۶۰٪ از RDX-1.

شکل ۵- نمودارهای کانتور چگالی نسبت به متغیرهای پیش‌بینی کننده. (A) RDX-3 نسبت به RDX-1 در مقدار ثابت ۳۰٪ از RDX-5، (B) RDX-5 نسبت به RDX-1 در مقدار ثابت ۲۰٪ از RDX-3 و (C) RDX-5 نسبت به RDX-3 در مقدار ثابت ۶۰٪ از RDX-1.

مراجع

- [1] Kumar, A. S.; Rao, V. B.; Sinha, R. K.; Rao, A. S. "Evaluation of Plastic Bonded Explosive (PBX) Formulations Based on RDX, Aluminum, and HTPB for Underwater Applications"; Propellants Explos. Pyrotech. 2010, 35, 359-364.
- [2] Elbeih, A.; Elshenawy, T.; Amin, H.; Hussein, A. K.; Hammad, S. M. "Preparation and Characterization of a New High-Performance Plastic Explosive in Comparison with Traditional Types"; Int. J. Chem. Eng. 2019, Article ID 4017068.
- [3] Hobbs, M. L.; Kaneshige, M. J.; Erikson, W. W. "Modeling the Measured Effect of a Nitroplasticizer (BDNPA/F) on Cookoff of a Plastic Bonded Explosive (PBX 9501)"; Combustion Flame 2016, 173, 132-150.
- [4] Guo, H.; Luo, J.; Shi, P.; Xu, J. "Research on the Fracture Behavior of PBX under Static Tension"; Defence Tech. 2014, 10, 154-160.
- [5] عباسی، سعید؛ محمودی نژاد، محمود رضا "بررسی تأثیر میزان و اندازه ذرات AP و RDX بر سرعت سوزش و خواص مکانیکی نوعی سوخت XLDB با دود کاهش یافته؛" مجله علمی پژوهشی مواد پراورزی، ۱۳۹۰، سال ششم، شماره ۳، صفحه ۵۸-۵۳.
- [6] DETAIL SPECIFICATION COMPOSITION C-4, MIL-DTL-45010B, 2014.
- [7] Pouretedal, H. R.; Damiri, S.; Shahsavan, A. "Modification of RDX and HMX Crystals in Procedure of Solvent/Anti-Solvent by Statistical Methods of Taguchi Analysis Design and MLR Technique"; Defence Tech. 2018, 14, 59-63.
- [8] Pouretedal, H. R.; Damiri, S.; Forati Ghaemi, E. "Non-Isothermal Studies on the Thermal Decomposition of C-4 Explosive Using the TG/DTA Technique"; Central European J. Energetic Mater. 2014, 11, 405-416.
- [9] Pouretedal, H. R.; Damiri, S.; Nickmehr, S.; Kazemi, M. "Aging Study of a Paste Explosive Based on RDX/RTV (Cyclotrimethylenetrinitramine/Room Temperature Vulcanizing) Silicone Using Rheological Property"; Russian J. Appl. Chem. 2021, 94, 1267-1274.
- [10] DETAIL SPECIFICATION RDX (CYCLOTTRIMETHYLENETRINITRAMINE), MIL-DTL-398D, 1996.
- [11] Khai, D. M.; Tuan, N. M.; Anh, N. T.; Nhan, P. D.; Vuong, L. Q. "Evaluation of the Characteristics of Plastic Explosive Adhered by Liquid Natural Rubber"; Vietnam J. Sci. Tech. 2020, 58, 557-564.
- [12] دمیری، سجاد؛ لایینی، باقر؛ موسوی آذر، علی؛ حیاتی، مهرا "بهبود پایداری حرارتی و مطالعه رفتار سینتیک تخریب ماده منفجره پلاستیکی C4 در حضور آنتی‌اکسیدان ایرگانوکس ۱۰۱۰؛" مجله علمی پژوهشی مواد پراورزی، ۱۳۹۶، سال دوازدهم، شماره ۱، صفحه ۲۳-۱۱.
- [13] Gao, X.; Zhao, T.; Luo, G.; Zheng, B.; Huang, H.; Han, X.; Ma, R.; Chai, Y. "Thermal and Mechanical Reinforcement of a Novel Paraffin-Based Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (HTPB) Binder Containing a Three-Dimension (3D) Diurea-Paraffin Wax (DU-PW) for Prevention of PW Leakage"; RSC Adv. 2018, 8, 1047-1054.
- [14] U.S. Department of Defense - MIL-STD- 650 - Explosive: Sampling, Inspection and Testing, Headquarters, DSA, Standardization Division, Washington, 1962.
- [15] Kumar, R.; Siril, P. F.; Soni, P. "Preparation of Nano-RDX by Evaporation Assisted Solvent/Antisolvent Interaction"; Propellants Explos. Pyrotech. 2014, 39, 383-389.
- [16] Pouretedal, H. R.; Damiri, S.; Zandi, A. "Study the Operating Conditions on Agglomeration of RDX Particles in Anti-Solvent Crystallization by Using Statistical Optimization"; Defence Tech. 2019, 19, 233-240.



شکل ۷- اثرات متغیرهای پیش‌بینی کننده بر پاسخ‌های بهینه شده.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده هم‌زمان از کلاس‌های مختلف RDX شامل RDX-1، RDX-3، RDX-5 و توزیع اندازه ذرات مختلف، نشان داد که اندازه ذرات پرکننده RDX بر انعطاف پذیری، چگالی و نشت بایندر در ماده منفجره RDX/PIB/DOS تأثیر می‌گذارد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد میکروذرات RDX-5، ماده منفجره خمیری حاصله، انعطاف پذیری مطلوب و شکل پذیری خوبی خواهد داشت. از طرف دیگر، درصد بیشتر RDX دانه درشت (RDX-1 و RDX-3) باعث کاهش چگالی محصول نهایی می‌شود. زیرا ذرات درشت باعث کاهش تراکم محصول می‌شوند. با این حال، هم ذرات ریز و هم ذرات درشت RDX در جلوگیری از نشت نرم کننده محصول مؤثر هستند. مقادیر بهینه RDX-1، RDX-3، RDX-5 به ترتیب ۵/۵، ۲۲/۵ و ۱۵ گرم (مجموع ۹۰ گرم) در ۱۰۰ گرم ماده منفجره خمیری منفجره RDX/PIB/DOS می‌باشد. این ماده منفجره PBX به ترتیب حاوی ۹۰، ۷/۵ و ۲/۵ گرم RDX، بایندر پلی‌ایزوبوتیلن (PIB) و نرم کننده دیوکتیل سبسات (DOS) است. در مقادیر بهینه کلاس‌های مختلف RDX، پاسخ‌های پلاستیسیته، چگالی و نشت بایندر به ترتیب برابر با ۰/۰۲۲، ۱/۵۳۱، ۰/۰۱۷ بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۰۱۷ درصد است. بنابراین استانداردهای C-4 با بهینه‌سازی پیش ماده‌های RDX در فرمولاسیون پیشنهادی همراه با کاهش هزینه‌های تولید به دست می‌آید.

- [21] Pouretedal, H. R.; Bashiri, Z.; Nasiri, M.; Arab, A. "Photo-Treatment of TNT Wastewater in Presence of Nanocomposite of WO_3/Fe_3O_4 "; *Particulate Sci. Tech.* 2021, 39, 971-980.
- [22] Zhao, X.; Qian, W.; Zhang, M.; Li, Z.; Zhang, Q.; Yang, Z. "Dye-Assembled Two-Dimensional Porous HMX for Enhanced Energy Release and Safety Performance"; *Energetic Mater. Frontiers* 2021, 2, 139-146.
- [23] Siviour, C. R.; Gifford, M. J.; Walley, S. M.; Proud, W. G.; Field, J. E. "Particle Size Effects on the Mechanical Properties of a Polymer Bonded Explosive"; *J. Mater. Sci.* 2004, 39, 1255-1258.
- [24] Majiet, F.; Mostert, F. J. "Investigation on the Influence of the Initial RDX Crystal Size on the Performance of Shaped Charge Warheads"; *Defence Tech.* 2019, 15, 802-807.
- [17] Pouretedal, H. R.; Shamsi, M.; Arabiyan, D. "Statistical Optimization of Nitrocellulose Removal from Industrial Wastewater by Electrocoagulation Using Response Surface Method"; *Desalin. Water Treat.* 2021, 212, 212-219.
- [18] Herman, M. J.; Woznick, C. S.; Scott, S. J.; Tisdale, J. T.; Yeager, J. D.; Duque, A. L. "Composite Binder, Processing, and Particle Size Effects on Mechanical Properties of Non-Hazardous High Explosive Surrogates"; *Powder Technol.* 2021, 391, 442-449.
- [19] Schedlbauer, F.; Kretschmer, A. "The Influence of Particle Size and Mechanical Properties on the Sensitivity of High Explosive Charges (PBX)"; *Proc. 10th Int. Detonation Symposium (Eds JM Short & DG Tasker)* 1995, 876-881.
- [20] Fu, S.; Feng, X.; Lauke, B.; Mai, Y. "Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate-Polymer Composites"; *Compos. B Eng.* 2008, 39, 933-961.