نشریه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست

سال اول، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، (پیاپی ۲): صص ۲۹-۲۳

علمی

# استفاده از تئوری سیستم خاکستری در تعیین میزان تاثیر اجزای مختلف ماده منفجره پلاستیکی (PBX) بر خواص ایمنی

امیر حضرت‌پور[۱]، مهدی اشرفی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

## چکیده

تئوری سیستم خاکستری، یک مدل ریاضی موثر برای حل مسائل و موقعیت‌های نامشخص و نامطمئن است. سیستم‌هایی با اطلاعات محدود مانند مکانیزم انجام یک پدیده به سیستم‌های خاکستری بر می‌گردد. هدف استفاده از تئوری سیستم خاکستری فراهم کردن تئوری، روش‌ها، مفاهیم و ایده‌ها برای حل (آنالیز) سیستم‌های پنهان و پیچیده است. یکی از مزایای مهم تئوری سیستم خاکستری این است که می‌تواند برای مقادیر نسبتا کم داده و دارای متغیرهای زیاد، نتایج خوبی را ایجاد کند که این نتایج از طریق بالا بردن نظم و قاعده بین داده‌ها با یک روش و عملیات مناسب، به دست می‌آید. می‌توان از این تئوری در زمینه بررسی میزان تاثیر متغیرهای مختلف بر خواص مختلف پیشرانه جامد مرکب یا ماده منفجره پلاستیکی (PBX) استفاده نمود. در این مقاله با استفاده از تئوری سیستم خاکستری به بررسی میزان تاثیر درصد و نوع اجزای مختلف ماده منفجره پلاستیکی (PBX) بر خواص ایمنی (حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک) پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که در مورد حساسیت مکانیکی نمونه‌های تولید شده، MRDX>MEB>MAl به ترتیب بیشترین تاثیر منفی را بر حساسیت به ضربه و همچنین MAP>MIB >MEB به ترتیب بیشترین تاثیر منفی، مثبت، منفی را بر حساسیت به اصطکاک دارند.

**کلید واژه‌ها:** تئوری سیستم خاکستری، مدل ریاضی، ماده منفجره پلاستیکی، حساسیت به ضربه، حساسیت به اصطکاک

[۱] پژوهشگر مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران
[۲] دکتری شیمی آلی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران- (mhdashrafi@yahoo.com)- نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

تئوری سیستم خاکستری[1] توسط جولونگ دنگ[2] در سال ۱۹۸۲ ایجاد شد. این تئوری روشی جدید جهت مطالعه سیستم‌های دارای نمونه‌های کم یا اطلاعات محدود است [۱-۳].

در ابتدای کار، زمانی که تئوری سیستم خاکستری پیشنهاد داده شد، پروفسور دنگ جهت ترکیب عدد خاکستری با اصول کنترل سیستم جهت آنالیز روند توسعه سیستم و استخراج اطلاعات خاکستری تلاش کرد تا به تصمیم گیرندگان جهت اتخاذ تصمیمات درست و هدایت کنترل سیستم در جهت درست کمک نماید [۳].

از مفهوم رابطه خاکستری می‌توان برای به دست آوردن همبستگی بین عوامل اصلی و مرجع با عوامل دیگر مورد مقایسه در یک سیستم استفاده کرد. تحلیل رابطه خاکستری روابط نامعین بین یک عامل اصلی را با تمام عوامل موجود دیگر در یک سیستم داده شده، تجزیه و تحلیل می‌کند. تئوری سیستم‌های خاکستری به طور کلی شامل حل مسائلی در موقعیت‌هایی است که مبهم یا نامشخص (نامطمئن) همراه با داده‌های گسسته و همچنین ناقص بر مبنای درجه شباهت یا تفاوت روندهای توسعه در بین داده‌ها می‌باشد. یکی از مزایای مشهور تئوری سیستم خاکستری این است که می‌تواند برای مقادیر نسبتا کم داده و با متغیرهای زیاد، نتایج رضایت بخشی را ایجاد کند. این نتایج از طریق بالا بردن نظم قاعده بین داده‌ها با یک روش و عملیات مناسب به دست می‌آیند. درست شبیه مجموعه فازی، تئوری خاکستری نیز یک مدل ریاضی موثر برای حل مسائل و موقعیت‌های نامشخص و نامطمئن است [۴-۶].

به عنوان مثال، مساله‌ای را فرض کنید که شما مدیرعامل یک شرکت هستید و می‌خواهید فردی را استخدام کنید. معیارهایی مانند سابقه کاری، میزان حقوق و سن را در نظر می گیرید. بنابراین معیار سابقه کار از نوع مثبت است، یعنی هرچقدر بیشتر باشد بهتر است. معیار میزان حقوق منفی است، یعنی هر چقدر حقوق کمتر بدهید برای شما بهتر است. اما معیار سن دیگر معنی ندارد که هر چقدر بیشتر باشد یا کمتر باشد بهتر است مثلا سن را تعیین می‌کنید هر چقدر به ۳۰ سال نزدیک باشد بهتر است. اینجاست که مفهوم تحلیل رابطه خاکستری مطرح می‌شود [۶].

«سیستم‌های خاکستری» بر پایه رنگ موضوعات تحت بررسی نام گذاری شده است. به گونه ای که میزان روشنی رنگ‌ها نشان دهنده میزان وضوح اطلاعات و داده‌ها است. بر این اساس سیستم‌های با اطلاعات کاملاً معلوم را «سیستم سفید»، سیستم‌های با اطلاعات ناشناخته و یا بدون داده «سیستم سیاه» و سیستم‌های با اطلاعات بخشی معلوم و بخشی ناشناخته را «سیستم خاکستری» می‌نامند. همچنین تئوری خاکستری از برخی مفروضه‌ها و اصول اصلی شامل اصول اختلاف، غیر یکتایی در جواب، حداقل اطلاعات، شناخت محوری، اولویت اطلاعات جدید و خاکستری بودن اطلاعات تبعیت می‌کند [۷, ۸].

از این رابطه علاوه بر تحلیل و آنالیز سیستم‌های مختلف (مانند بدن انسان، کشاورزی، اقتصاد، و تجهیزات نظامی)، در حوزه مواد پرانرژی نیز جهت تحلیل و آنالیز خواص پیشرانه جامد مرکب[3] و ماده منفجره پلاستیکی[4] (PBX) نیز استفاده شده‌است. برای مثال در تحقیقی کین چائو و همکاران[5] [۹] به بررسی عوامل موثر بر حساسیت پیشرانه پلی‌اتر نرم‌شده با نیترات استر[6] (NEPE) با استفاده از آنالیز رابطه خاکستری پرداخته‌اند. در این تحقیق درصد اجزای سازنده پیشرانه NEPE شامل درصد بار جامد، درصد آمونیوم پرکلرات[7] (AP)، درصد آلومینیوم[8] (Al)، درصد سیکلو تترامتیلن تترانیترامین[9] (HMX) و نسبت نرم‌کننده به پلیمر ($M_{Pl}/M_{Po}$) به عنوان توالی قابل قیاس و خواص ایمنی شامل حساسیت به ضربه، حساسیت به اصطکاک، حساسیت به تخلیه الکتریسیته ساکن و غیره به عنوان توالی مرجع در نظر گرفته شده‌است و با استفاده تئوری سیستم خاکستری رابطه مابین آن‌ها مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته‌است. در پژوهشی دیگر یالون سان و همکاران[10] [۱۰] به ارزیابی ایمنی پیشرانه NEPE در طی کهولت آن با استفاده از تئوری سیستم خاکستری و منطق فازی[11] پرداخته‌اند. با استفاده از این روش آن‌ها دریافتند میزان حساسیت پیشرانه NEPE بعد از ۴۰ روز کهولت در دمای ۷۰ $^{o}C$ شروع به افزایش یافتن می‌کند. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مطابقت مناسبی داشته‌است. در ادامه به روش تحقیق مورد استفاده در این کار پرداخته می‌شود.

## ۲- روش تحقیق

مواد منفجره پلاستیکی (PBX)، ترکیباتی هستند که در آن جز انفجاری HMX، RDX یا غیره در بستر یک بایندر خنثی (IB)[12] یا بایندر پرانرژی (EB)[13] قرار می‌گیرد. البته در فرمولاسیون برخی از مواد منفجره پلاستیکی به میزان کمی از آمونیوم

[1] Grey System Theory
[2] Julong Deng
[3] Composite Solid Propellant
[4] Plastic Bonded Explosive
[5] Qin Chao et al.
[6] Nitrate Ester polyether
[7] Ammonium perchlorate
[8] Aluminium.
[9] Cyclotetramethylene Tetranitramine
[10] Yalun Sun et al.
[11] Fuzzy Logic
[12] Inert Binder (IB)
[13] Energetic Binder (EB)

پرکلرات (AP) به عنوان اکسید کننده و از آلومینیوم (Al) به عنوان سوخت فلزی نیز استفاده می‌شود.

هدف از استفاده از بایندر در این مواد محصور نمودن هر کریستال انفجاری در تماس با دیگری است. بنابراین با این روش از آغازش نقاط داغ[1] در اثر گرمای ناشی از اصطکاک یا ضربه جلوگیری می‌شود. از این‌رو بررسی دو ویژگی ایمنی حساسیت به ضربه[2] و حساسیت به اصطکاک[3] موضوع مهمی است. حساسیت به ضربه با میزان حداکثر فشاری که ماده منفجره یا پیشرانه می‌تواند تحت تاثیر آن قرار بگیرد تعریف می‌شود و با تعیین حداکثر فاصله‌ای که وزنه‌ی استانداردی با وزن مشخص بر روی نمونه ماده منفجره یا پیشرانه جهت انجام آغازش رها می‌شود مشخص می‌گردد. حساسیت به اصطکاک نیز با میزان حداکثر اصطکاکی که ماده منفجره یا پیشرانه می‌تواند تحت تاثیر آن قرار بگیرد شرح داده می‌شود و با تعیین میزان حداکثر وزنه‌ای که بر روی نمونه ماده منجره یا پیشرانه خراشیده می‌شود و سبب (آغازش، انفجار یا جدا شدن یا ترک خوردن نمونه می‌شود) مشخص می‌گردد. در این تحقیق از روش BAM جهت تعیین میزان حساسیت نمونه‌های PBX نسبت به ضربه و اصطکاک استفاده شده‌است [۱۱].

در این کار تحقیقاتی ابتدا روش ایجاد سیستم خاکستری و روابط حاکم در زمینه تعیین ضریب و رتبه خاکستری متغیرهای تاثیرگذار بر یک سیستم نامعلوم مورد بررسی قرار گرفته‌است. در ادامه با استفاده از روش مذکور میزان بزرگی تاثیر هر متغیر (مانند درصد آمونیوم پرکلرات (AP)، درصد آلومینیم (Al) یا درصد سیستم بایندر خنثی یا پرانرژی) بر حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک ترکیبات تولیدی مورد تحقیق قرار گرفته‌است. کاربرد سیستم خاکستری در تعیین همبستگی بین عوامل اصلی و مرجع با عوامل دیگر مورد مقایسه در یک سیستم می‌باشد. با این روش می‌توان میزان تاثیر هر متغیر بر روی یک خاصیت مانند حساسیت به ضربه یا حساسیت به اصطکاک را مورد مقایسه قرار داد.

## ۲-۱- روش ایجاد سیستم خاکستری

فرآیند تحلیل رابطه‌ی خاکستری به شرح زیر می‌باشد:

الف) ایجاد رابطه خاکستری

ب) تعریف سری‌های هدف مرجع

ج) محاسبه ضریب رابطه‌ی خاکستری

د) محاسبه رتبه خاکستری

با توجه به یکسان نبودن جنس و ماهیت داده‌ها، بایستی نسبت به بی‌مقیاس سازی آن‌ها اقدام نمود تا امکان ارزیابی و مقایسه از منظر همه شاخص‌ها فراهم گردد. زمانی که واحدهای اندازه‌گیری عملکرد برای شاخص‌های مختلف با یکدیگر متفاوتند، ممکن است تأثیر برخی از شاخص‌ها نادیده گرفته شوند. زمانی که برخی شاخص‌های عملکرد از دامنه گسترده‌ای برخوردار باشند، ممکن است چنین اتفاقی روی دهد. همچنین، اگر هدف یا جهت این شاخص‌ها با هم تفاوت داشته باشند، به ایجاد نتایج نادرست در تحلیل‌ها منجر می‌گردد. بنابراین، تبدیل کلیه ارزش‌های عملکردی برای هر گزینه به یک "ارزش بی مقیاس" ، در فرآیندی با نام نرمالیزه کردن، امری ضروری به نظر می‌رسد. در این گام باید عمل نرمال‌سازی صورت گیرد. نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از فرمول‌های زیر صورت می‌گیرد [۶].

با عمل نرمال‌سازی کلیه داده‌های مساله بین صفر و یک قرار می‌گیرند [۱, ۶]. در رابطه‌های زیر $x_{ij}$ نشان دهنده مقدار نرمال هر متغیر، $y_{ij}$ نشان دهنده مقدار حقیقی هر متغیر و $y^*$ نشان دهنده ارزش مطلوب می‌باشد.

رابطه (۱)، هرچه بزرگتر بهتر:

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij})}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (۱)$$

رابطه (۲)، هرچه کوچکتر بهتر:

$$x_{ij} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (۲)$$

رابطه (۳)، هرچه به ارزش مطلوب $y^*$ نزدیکتر بهتر:

$$x_{ij} = \frac{|y_{ij} - y^*|}{max\{\max(y_{ij}) - y^*,\ y^* - \min(y_{ij})\}} \quad (۳)$$

## ۲-۲- محاسبه ضریب رابطه خاکستری

با استفاده از رابطه (۴) ضریب رابطه خاکستری[4] را محاسبه می‌کنیم. ضریب $\rho$ را ضریب تشخیص می‌نامند که عددی بین صفر و یک است. در بیشتر پژوهش‌ها آن را مقدار متوسط ۰/۵ در نظر می‌گیرند [۶, ۹]. ضریب رابطه‌ی خاکستری برای تعیین میزان نزدیکی $x_{ij}$ (عدد نرمال متغیر ij) به $x_{0j}$ (عدد نرمال متغیر 0j) می باشد. هر چه ضریب رابطه‌ی خاکستری بزرگتر باشد، $x_{ij}$ به $x_{0j}$ نزدیکتر خواهد بود [۱, ۹]. رابطه (۴):

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \xi_0(k) = \frac{\Delta min + \rho \times \Delta max}{\Delta_0(k) + \rho \times \Delta max} \quad (۴)$$

[1] Hot Spots
[2] Impact Sensitivity
[3] Friction Sensitivity
[4] Grey Relational Coefficient

$i= 1,2,\ldots,m$ و $j=1,2,\ldots,n$ می‌باشد، $\gamma(x_{0j}\ ,\ x_{ij})$ همان ضریب خاکستری بین $x_{ij}$ و $x_{0j}$ می‌باشد.

$$\Delta_{ij}= |x_{0j} - x_{ij}|$$
$$\Delta_{\min=Min\{\Delta_{ij},i=1,2,\ldots,m;j=1,2,\ldots,n\}} \quad (۵)$$
$$\Delta_{\max=Max\{\Delta_{ij},i=1,2,\ldots,m;j=1,2,\ldots,n\}}$$

Δmin: کمترین مقدار در بین تمامی مقادیر شاخص‌ها.

Δmax: بیشترین مقدار در بین تمامی مقادیر شاخص‌ها [۱, ۹].

## ۲-۳- رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

در این گام کافیست با استفاده از رابطه زیر امتیاز نهایی گزینه‌ها را محاسبه نمود و بر اساس آن گزینه‌ها را رتبه‌بندی کرد. رابطه (۶):

$$\Gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (۶)$$

در رابطه بالا $\gamma(x_0\ ,\ x_i)$ بیانگر رتبه خاکستری بین $x_i$ و $x_0$ است که نشان دهنده‌ی سطح همبستگی مابین توالی مرجع (ویژگی) و توالی قابل قیاس (عامل تاثیرگذار بر آن ویژگی) می‌باشد.

در واقع رتبه رابطه خاکستری در حقیقت بیانگر تشابه میان هریک از گزینه‌ها با گزینه مرجع (ایده آل iام) است. بدیهی است به هر میزانی که رتبه رابطه خاکستری محاسبه شده برای گزینه مقدار بیشتری داشته باشد آن گزینه دارای اولویت بالاتری بوده و بحرانی‌تر محسوب می‌گردد [۱, ۹].

## ۲-۴- فرمولاسیون‌ها و خواص ایمنی نمونه‌های مواد منفجره پلاستیکی (PBX) تولید شده

در کار تجربی انجام شده ۵ فرمولاسیون مختلف ماده منفجره پلاستیکی (PBX) با پلیمرها و درصدهای اجزا مختلف تولید شده‌است. در جدول (۱) ترکیب درصد و خواص ایمنی فرمولاسیون‌های PBX تولید شده ارائه شده‌است. در جدول (۱) میزان درصد وزنی باندر خنثی با نماد $M_{IB}$ و میزان درصد وزنی باندر پرانرژی با نماد $M_{EB}$ نشان داده شده‌است.

**جدول (۱):** ترکیب درصد و خواص ایمنی نمونه‌های PBX تولید شده

| کد نمونه | درصد اجزای سازنده | | | | | | خواص ایمنی | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $M_{IB}$ | $M_{EB}$ | $M_{RDX}$ | $M_{HMX}$ | $M_{AP}$ | $M_{Al}$ | حساسیت به ضربه (J) | حساسیت به اصطکاک (N) |
| PBX-01 | - | ۱۶ | ۴۵ | - | ۱۹ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۶۰ |
| PBX-02 | ۱۴ | - | ۶۵ | - | - | ۲۱ | ۲۰ | >۳۶۰ |
| PBX-03 | - | ۱۶ | ۴۵ | - | ۱۹ | ۲۰ | ۱۲/۵ | ۱۶۸ |
| PBX-04 | ۱۳ | - | ۸۷ | - | - | - | ۲۵ | ۲۸۴ |
| PBX-05 | - | ۱۶ | - | ۸۵ | - | - | ۲۲/۵ | ۳۶۰ |

نمونه‌های PBX مختلفی تولید و خواص ایمنی آن‌ها (شامل حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک) با انجام آزمون‌های مربوطه اندازه‌گیری شده‌است. جهت انجام آزمون‌های حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک به ترتیب از استانداردهای SATANAG-4489 و STANAG-4487 استفاده شده‌است. در این کار تحقیقاتی به بررسی تاثیر درصد هر جزء سازنده از ترکیب PBX بر خواص ایمنی نمونه‌های تولید شده پرداخته می‌شود. درصد اجزای ترکیب به عنوان توالی قابل قیاس و خواص ایمنی (حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک) به عنوان توالی مرجع در نظر گرفته می‌شوند.

## ۳- نتایج و بحث

ابتدا و قبل از هرکاری می‌بایست داده‌های موجود در جدول (۱) شامل توالی‌های قابل قیاس و مرجع را نرمال‌سازی کرده و آن‌ها را به اعدادی مابین [۱ ۰] تبدیل نماییم. برای این کار می‌بایست از رابطه (۱) برای متغیرهایی که تاثیر مثبت در افزایش میزان عدد حاصل از آزمون حساسیت به ضربه برحسب (J) و آزمون حساسیت به اصطکاک برحسب (N) یا در واقع تاثیر مثبت در کاهش میزان حساسیت به ضربه و اصطکاک دارند استفاده کرد. در این مورد تحقیقاتی تنها میزان درصد سیستم باندر خنثی (پیش پلیمر علاوه نرم کننده خنثی) با نماد IB تاثیر مثبت در افزایش توالی مرجع یا اعداد حاصل از آزمون حساسیت به ضربه و

اصطکاک دارد. یعنی افزایش درصد این ماده در فرمولاسیون سبب کاهش میزان حساسیت به ضربه و اصطکاک خواهد شد. در مورد مابقی اجزا به دلیل پرانرژی بودن و ذاتا حساس بودن این مواد، افزایش درصد آن‌ها در فرمولاسیون به منزله‌ی افزایش میزان حساسیت نمونه‌های PBX تولید شده نسبت به ضربه و اصطکاک یا کاهش عدد حاصل از آزمون حساسیت نسبت به ضربه و اصطکاک در نظر گرفته شده‌است.

برای نرمال‌سازی متغیرهایی که تاثیر منفی در افزایش میزان عدد حاصل از آزمون حساسیت به ضربه برحسب (J) و آزمون حساسیت به اصطکاک برحسب (N) یا در واقع تاثیر منفی در کاهش حساسیت به ضربه و اصطکاک دارند نیز می‌بایست از رابطه (۲) استفاده کرد. در این مورد تحقیقاتی این پیش فرض در نظر گرفته شده‌است که افزایش میزان درصد بایندر پرانرژی (EB)، درصد RDX، درصد HMX، درصد Al و درصد AP تاثیر منفی در افزایش توالی مرجع یا اعداد حاصل از آزمون حساسیت به ضربه و اصطکاک دارند. یعنی افزایش درصد هریک از این مواد سبب افزایش حساسیت به ضربه خواهد شد. از آنجایی که می‌بایست همه ردیف‌های موجود در جدول (۱) داده کمی داشته باشند در مورد عدم آغازش نمونه در آزمون حساسیت به اصطکاک، کمترین میزان حساسیت نسبت به اصطکاک (بزرگتر و مساوی N ۳۶۰) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر نرمالیزه درصد اجزا، حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک نمونه‌های PBX محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده‌است.

**جدول (۲):** مقادیر نرمالیزه درصد اجزا، حساسیت به ضربه و حساسیت به اصطکاک نمونه‌های PBX

| کد نمونه | داده‌های نرمال شده | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $M_{IB}$ | $M_{EB}$ | $M_{RDX}$ | $M_{HMX}$ | $M_{AP}$ | $M_{Al}$ | حساسیت به ضربه (J) | حساسیت به اصطکاک (N) |
| PBX-01 | ۰ | ۰ | ۰/۴۸۳ | ۱ | ۰ | ۰/۰۴۸ | ۰/۲ | ۰ |
| PBX-02 | ۱ | ۱ | ۰/۲۵۳ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰/۶ | ۱ |
| PBX-03 | ۰ | ۰ | ۰/۴۸۳ | ۱ | ۰ | ۰/۰۴۸ | ۰ | ۰/۰۴ |
| PBX-04 | ۰/۹۲۹ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰/۶۲ |
| PBX-05 | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰/۸ | ۱ |

در مرحله بعد می‌بایست ابتدا $\Delta_{ij}$ ها و سپس ضریب خاکستری توالی‌های قابل قیاس را محاسبه کرد. برای محاسبه ضریب خاکستری از رابطه (۴) استفاده شده‌است. به عنوان نمونه در جدول (۳) $\Delta_{ij}$ درصد RDX و حساسیت به ضربه (J) و ضریب خاکستری *یا* $\xi(k)$. *درصد RDX در زمینه حساسیت به ضربه ارائه شده‌است.*

**جدول (۳):** $\Delta_{ij}$ و ضریب خاکستری $M_{RDX}$ برای حساسیت به ضربه نمونه‌های PBX

| داده‌های نرمالیزه شده | | $\Delta_{ij}=\lvert x_{0j}-x_{ij}\rvert$ | ضریب خاکستری $\xi(k)$. |
|---|---|---|---|
| $M_{RDX}$ | حساسیت به ضربه (J) | | |
| ۰/۴۸۳ | ۰/۲ | ۰/۲۸۳ | ۰/۸۹۴ |
| ۰/۲۵۳ | ۰/۶ | ۰/۳۴۷ | ۰/۸۲۶ |
| ۰/۴۸۳ | ۰ | ۰/۴۸۳ | ۰/۷۱۲ |
| ۰ | ۱ | ۱ | ۰/۴۶۷ |
| ۱ | ۰/۸ | ۰/۲ | ۱ |

در نهایت رتبه خاکستری گزینه‌ها با استفاده از رابطه مقابل محاسبه شده‌است:

$$\Gamma(x_0,x_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\gamma(x_0(k),x_i(k))=\frac{3.899}{5}=0.780 \qquad (۷)$$

در رابطه بالا $\gamma(x_0 , x_i)$ بیانگر رتبه خاکستری بین $x_i$ و $x_0$ است که نشان دهنده‌ی سطح همبستگی مابین توالی مرجع (ویژگی) و توالی قابل قیاس (عامل تاثیرگذار بر آن ویژگی) می‌باشد. عدد به دست آمده در واقع رتبه خاکستری درصد RDX را در میان متغیرهای تاثیرگذار بر میزان حساسیت به ضربه نشان می‌دهد. با همین روش و طی همین مراحل میزان تاثیر متغیرهای دیگر بر حساسیت به ضربه یا همان میزان رتبه خاکستری Al، AP، HMX، IB و EB در زمینه حساسیت به ضربه محاسبه (با توجه به طولانی بودن محاسبات از نوشتن همه محاسبات در سند پرهیز شده) و نتایج در جدول (۴) ارائه شده‌است.

**جدول (۴):** رتبه خاکستری درصد وزنی اجزای مختلف نمونه‌های PBX برای حساسیت به ضربه

| ویژگی | رتبه خاکستری | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $M_{Al}$ | $M_{AP}$ | $M_{RDX}$ | $M_{HMX}$ | $M_{EB}$ | $M_{IB}$ |
| حساسیت به ضربه | ۰/۶۹۲ | ۰/۶۶۷ | ۰/۷۸۰ | ۰/۵۳۲ | ۰/۷۰۰ | ۰/۶۷۰ |

با توجه به مقادیر ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت:

$$M_{RDX}>M_{EB}>M_{Al}>M_{IB}>M_{AP}>M_{HMX} \quad (۸)$$

به ترتیب بیشترین همبستگی را با توالی مرجع یا همان حساسیت به ضربه دارند. رابطه مقایسه‌ای بالا در واقع قدر مطلق تاثیر توالی‌های قابل قیاس را برروی توالی مرجع حساسیت به ضربه نشان می‌دهد، البته باید به این نکته توجه نمود $M_{IB}$ تاثیر مثبت برروی حساسیت به ضربه دارد یعنی با افزایش آن، عدد حاصل از آزمون حساسیت به ضربه برحسب (J) افزایش می‌یابد اما سایر اجزا تاثیر منفی دارند، یعنی با افزایش درصد اجزای دیگر، عدد حاصل از آزمون حساسیت به ضربه برحسب (J) کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج به دست آمده $M_{RDX}$ بیشترین همبستگی را با توالی مرجع حساسیت به ضربه داراست. بعد از این ماده، $M_{(EB)}$ ، $M_{Al}$، $M_{IB}$،$M_{AP}$ و $M_{HMX}$ به ترتیب بیشترین همبستگی را با توالی مرجع حساسیت به ضربه دارند.

جهت محاسبه رتبه خاکستری متغیرها در زمینه حساسیت به اصطکاک نیز عینا از روش بالا استفاده شده‌است. میزان درصد وزنی سیستم باینـدر خنثی $M_{IB}$ تاثیر مثبت در افزایش عدد حاصل از آزمون حساسیت به اصطکاک بر حسب (N) و $M_{EB}$، $M_{HMX}$،$M_{RDX}$ ،$M_{AP}$ و $M_{Al}$ تاثیر منفی برروی این عدد دارند. با توجه به اینکه توضیحات لازم در مورد روش استفاده از تئوری خاکستری ارائه شده‌است، از نوشتن محاسبات در این قسمت اجتناب شده و فقط نتایج حاصل از محاسبات در جدول (۵) ارائه شده‌است.

**جدول (۵):** رتبه خاکستری درصد وزنی اجزای مختلف نمونه‌های PBX برای حساسیت به اصطکاک

| رابطه خاکستری | رتبه خاکستری | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $M_{Al}$ | $M_{AP}$ | $M_{RDX}$ | $M_{HMX}$ | $M_{(EB)}$ | $M_{(IB)}$ |
| حساسیت به اصطکاک | ۰/۷۵۹ | ۰/۸۳۲ | ۰/۵۲۰ | ۰/۵۱۵ | ۰/۷۶۵ | ۰/۷۷۵ |

توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۵) می‌توان نتیجه گرفت ترتیب همبستگی توالی قابل قیاس (اجزا ترکیب) و توالی مرجع (حساسیت به اصطکاک) در نمونه‌های PBX تولید شده به صورت زیر است:

$$M_{AP}>M_{IB}>M_{EB}>M_{Al}>M_{RDX}>M_{HMX}$$

رابطه مقایسه‌ای بالا در واقع قدر مطلق تاثیر توالی‌های قابل قیاس را برروی توالی مرجع حساسیت به اصطکاک نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده $M_{AP}$ بیشترین همبستگی را با توالی مرجع یا همان حساسیت به اصطکاک (از نظر منفی) و بعد از آن میزان $M_{IB}$ بیشترین همبستگی را با توالی مرجع یا همان حساسیت به اصطکاک (از نظر مثبت) داراست. بعد از این دو جز، $M_{EB}$، $M_{Al}$، $M_{RDX}$، $M_{HMX}$ به ترتیب بیشترین همبستگی (از نظر منفی) را با توالی مرجع یا همان حساسیت به اصطکاک نمونه‌های PBX دارند.

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به عنوان یک مورد مطالعاتی از رابطه خاکستری در زمینه پیش‌بینی میزان همبستگی بین حساسیت به ضربه ماده منفجره پلاستیکی یا حساسیت به اصطکاک ماده منفجره پلاستیکی به عنوان توالی مرجع با میزان درصد اجزای سازنده به عنوان توالی قابل قیاس، استفاده شده‌است. با استفاده از این روش می‌توان بزرگی یا قدر مطلق تاثیر درصد هریک از اجزای سازنده ماده منفجره پلاستیکی برروی حساسیت به ضربه یا حساسیت به اصطکاک آن را تعیین کرد و اطلاعات به دست آمده را در طراحی فرمولاسیون‌های بعدی و رعایت الزامات ایمنی مد نظر قرار داد. مشخص است بیشتر بودن تعداد نمونه‌های تولید شده و داده‌های حاصل از آزمون‌های ایمنی سبب به دست آوردن نتایج دقیق‌تری با استفاده از تئوری سیستم خاکستری خواهد شد. در این کار تحقیقاتی، تئوری سیستم خاکستری در زمینه تحلیل خواص ایمنی پنج نمونه ماده منفجره پلاستیکی تولید شده به کار گرفته شد. یکی از الزامات استفاده از سیستم خاکستری این است که می‌بایست نحوه تاثیر توالی قابل قیاس (درصد اجزای سازنده) بر توالی مرجع (حساسیت به ضربه یا حساسیت به اصطکاک) مشخص شود. برای مثال افزایش متغیری مانند درصد باینـدر خنثی (IB) تاثیر مثبت بر کاهش حساسیت به ضربه یا افزایش عدد برحسب (J) حاصل از آزمون حساسیت به ضربه دارد. اما افزایش متغیرهایی مانند درصد AP، درصد باینـدر پرانرژی (EB)، درصد Al، درصد RDX و درصد HMX به دلیل پرانرژی بودن و حساسیت ذاتی این مواد سبب افزایش میزان حساسیت به ضربه یا کاهش عدد برحسب (J) حاصل از آزمون حساسیت به ضربه می‌شوند.

با توجه به نتایج به دست آمده در زمینه حساسیت به ضربه نمونه‌های تولید شده، می‌توان گفت به ترتیب $M_{RDX}>M_{EB}>M_{Al}$ بیشترین تاثیر منفی را بر حساسیت به ضربه نمونه‌های PBX تولید شده دارند. یعنی افزایش درصد این مواد به ترتیب سبب افزایش بیشتر حساسیت به ضربه (کاهش عدد حاصل از آزمون) می‌شود. اما در این میان، با استفاده از تئوری سیستم خاکستری مشخص گردید که بزرگی یا قدر مطلق تاثیر درصد RDX بر حساسیت به ضربه نمونه‌های PBX تولید شده بیشتر از درصد EB و بزرگی یا قدر مطلق تاثیر درصد EB بیشتر از تاثیر درصد Al می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده در زمینه حساسیت به اصطکاک نمونه‌های تولید شده نیز می‌توان گفت به ترتیب $M_{AP}>M_{IB}>M_{EB}$ بیشترین تاثیر را برروی حساسیت به اصطکاک دارند. در این میان با توجه به مطالب ارائه شده تاثیر $M_{AP}$ و $M_{EB}$ برروی حساسیت به اصطکاک منفی و تاثیر $M_{IB}$ مثبت می‌باشد. یعنی افزایش میزان درصد AP و EB سبب افزایش حساسیت به اصطکاک (کاهش عدد حاصل از آزمون) و افزایش میزان درصد IB سبب کاهش حساسیت به اصطکاک (افزایش عدد حاصل از آزمون) می‌شود. اما از نظر بزرگی یا قدر مطلق، تاثیر میزان درصد AP بر حساسیت به اصطکاک نمونه‌های PBX تولید شده بیشتر از قدر مطلق تاثیر درصد IB و تاثیر میزان درصد IB بیشتر از قدر مطلق تاثیر درصد EB است.

با استفاده از تئوری سیستم خاکستری بزرگی یا قدر مطلق تاثیر درصد مواد مختلف بر حساسیت به ضربه و اصطکاک نمونه‌های PBX تولید شده تعیین گردید. به طور مشابه می‌توان از تئوری سیستم خاکستری در تعیین بزرگی یا قدر مطلق تاثیر متغیرها در سیستم‌های نامعلوم و نامشخص دیگر به خصوص در حوزه مواد پرانرژی مانند تاثیر متغیرهای مختلف بر خواص مکانیکی، رئولوژی، کهولت و سایر خواص پیشرانه جامد مرکب استفاده کرد.

## ۵- مراجع


[1] D. Julong, "Introduction to grey system theory," The Journal of Grey System, vol. 1, no. 1, pp. 1-24, 1989.

[2] S. Liu, Y. Yang, N. Xie, and J. Forrest, "New progress of grey system theory in the new millennium," Grey Systems: Theory and Application, vol. 6, no. 1, pp. 2-31, 2016.

[3] N. Xie, "Explanations about grey information and framework of grey system modeling," Grey Systems: Theory and Application, vol. 7, no. 2, pp. 179-193, 2017.

[4] J.-K. Chen and I.-S. Chen, "Grey relation analysis for leisure service industry reputation measurement," Business Renaissance Quarterly, vol. 3, no. 1, p. 77, 2008.

[5] I. Lu, S. J. Lin, and C. Lewis, "Grey relation analysis of motor vehicular energy consumption in Taiwan," Energy Policy, vol. 36, no. 7, pp. 2556-2561, 2008.

[۶] میرغفوری، س. ح، رودپشتی، م. ش و ندافی، غ، " ارزیابی عملکرد مالی با رویکرد تحلیل رابطه خاکستری (مورد: شرکت‌های مخابرات استانی)"، فصلنامه علمی پژوهشی دانش مالی تحلیل اوراق بهادار، ۱۶، ۷۵-۶۱، ۱۳۹۱.

[7] X. Xia, "Scientific view in grey system theory," Asian Social Science, vol. 8, no. 8, pp. 103-106, 2012.

[۸] محمدی، ع و مولایی، ن، "کاربرد تصمیم‌گیری چند معیاره خاکستری در ارزیابی عملکرد شرکت‌ها"، مدیریت صنعتی، ۲(۴)، ۱۴۲-۱۲۵، ۱۳۸۹.

[9] C. Qin, X. Zhao, and J. Li, "Grey relational analysis in influencing factors of NEPE propellant sensitivity," Hanneng Cailiao(Chinese Journal of Energetic Materials), vol. 20, no. 6, pp. 762-765, 2012.

[10] Y. Sun, H. Ren, and Q. Jiao, "Augmenting Fuzzy and Grey Methods for Safety Failyre Decision of NEPE Propellant."

[11] 11. J. P. Agrawal, High energy materials: propellants, explosives and pyrotechnics. John Wiley & Sons, 2010.