

## تبیین رفتار نرخ خطر عملکرد بالستیک داخلی یک سلاح کالیبر بزرگ بر اساس تحلیل مدل های بهینه قابلیت اطمینان

مهدی کرباسیان<sup>۱</sup>، حمید دلائلی<sup>۲</sup>، بیژن خیام‌باشی<sup>۳</sup>، ام‌البنین یوسفی<sup>۳</sup>

۱ دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، mkarbasi@mut-es.ac.ir

۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۳ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

### چکیده

چون برای ارزیابی عملکرد بالستیک لازم است تمامی الزامات با دقت زیاد از یک نمونه آماری محدود به دست آید، همواره موضوعی چالشی است. تکنیک‌های ارزیابی پایداری بالستیکی پرتابه‌ها که به تازگی در پژوهش‌های متعددی برای اندازه‌گیری نرخ ایجاد سوراخ (پرفوراسیون) بر پوسته سلاح در تمامی سرعت‌های ممکن به کار گرفته شده، بر این فرض بنا شده‌اند که سرعت پرتابه از توزیع نرمال پیروی می‌کند. در این پژوهش، با انجام آزمایشات استاندارد، برازش مدل‌های آماری نرمال و غیرنرمال به داده‌های واقعی یک نوع پرتابه بررسی و مقایسه شده است. هدف دیگر این مطالعه انتخاب مدل قابلیت اطمینان مناسب، بررسی رفتار تابع نرخ خطر داده‌ها و بررسی شاخص‌های کارایی فرایند برای داده‌های بالستیک داخلی پرتابه است. نتایج نشان می‌دهد که از میان مدل‌های طول عمر کلاسیک و مدل‌های میکسچر منتخب، مدل نرمال میکسچر برآوردهای بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برای پارامتر سرعت ارائه می‌دهد.

### واژگان کلیدی

بالستیک داخلی، مدلسازی قابلیت اطمینان، رفتار نرخ خطر، کارایی فرایند

### ۱. مقدمه

عملکردی بالستیک داخلی پرتابه‌ها، به مدلسازی فرایند تصادفی سرعت پرتابه پرداخته شده است. در آزمایشات انجام‌شده، تعداد پرفوراسیون<sup>۱</sup> و تعداد آثار جزئی بر پوسته سلاح ناشی از احتراق اولیه و برخورد گلوله و بدنه لوله در حین حرکت، بر اساس سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری شده و فرکانس تجربی<sup>۲</sup> برابر با

بالستیک داخلی به آغاز حرکت گلوله و تأثیر عوامل مختلف بر حرکت گلوله تا زمانی که تحت تأثیر انرژی اولیه پرتاب ناشی از احتراق خرج اولیه قرار دارد، می‌پردازد. هدف از این بحث، دستیابی به سرعت مناسب توام با بیشترین پایداری و کمترین انحراف گلوله در دهانه سلاح است [۱]. در این پژوهش، با مطالعه ساختار

داخل غلاف آلومینیومی قرار دارد، مشتعل و انرژی حاصل از طریق سوراخ‌های روی بدنه (نافی) منتقل شده و خرج اصلی شروع به سوختن می‌کند و به گازهای داغ تبدیل می‌شود. یکی از وظایف فشنگ پرتاب آن است که خرج اصلی پرتاب را به صورت همزمان بسوزاند. وقتی خرج پرتاب محترق می‌شود، اجزای تشکیل دهنده آن بسته به نوع آنها به سرعت تجزیه شده و با هم واکنش می‌دهند. در نتیجه گازهای دارای انرژی را که فشار و حرارت زیادی داخل محفظه احتراق سلاح ایجاد می‌کنند، تولید می‌نمایند. انرژی پتانسیل شیمیایی ذخیره شده در گازهای داغ و پرفشار و تبدیل آن به انرژی جنبشی عامل تحرک گلوله در داخل قبضه است. همان‌گونه که گلوله در لوله پیش می‌رود، در پشت خود حجم فزاینده‌ای برجای می‌گذارد که با گازهای پرفشار ناشی از احتراق خرج پر می‌شود. در این موقع خرج هنوز در حال سوختن است و آنقدر گاز پرفشار تولید می‌کند که حرکت گلوله نمی‌تواند با افزایش حجم، آن را جبران کند. در نتیجه فشار همچنان رو به افزایش می‌نماید تا به فشار حداکثر (فشار پیک) برسد. دو عامل عمده فشار پیک را تعیین می‌کنند: اول آزاد شدن سریع گازهای دارای انرژی در مرحله اول شلیک و دوم جرم زیاد گلوله. معمولاً فشار پیک زمانی ایجاد می‌شود که گلوله تقریباً ۱۰ درصد طول لوله را پیموده است. خروج گاز از دهانه لوله که بدنبال خروج گلوله صورت می‌گیرد، مجدداً در مسافتی کوتاه سبب شتاب گرفتن گلوله می‌شود. بنابراین گلوله تا زمانی که از دهانه لوله فاصله نگرفته است، به حداکثر سرعت خود نمی‌رسد [۱].

عوامل متعددی در بالستیک داخلی بر پایداری حرکت گلوله اثر می‌گذارند. این عوامل مطابق روش هایدن رایش<sup>۳</sup> که بر مبنای منحنی‌های شکل‌گیری فشار و سرعت در رابطه با مسافت و یا زمان شکل گرفته است عبارت‌اند از [۱]:

۱. فشار متوسط در طول لوله ( $\bar{P}$ )
۲. حداکثر فشار تولید شده در لوله سلاح ( $P_{max}$ )
۳. نسبت فشار که فاکتوری مهم برای سلاح است و از راه‌های آزمایشی و تجربی به دست می‌آید ( $\gamma_p = \frac{\bar{P}}{P_{max}}$ )
۴. سرعت در زمان (مکان) وقوع فشار حداکثر ( $V_{max}$ )
۵. مقدار زمان طی شده از زمان شلیک (شروع حرکت) تا زمان حداکثر فشار ( $t_{max}$ )
۶. فاصله‌ای از انتهای لوله که در آنجا فشار حداکثر به وجود می‌آید ( $X_{max}$ )

حاصل تقسیم تعداد پرفوراسیون بر آثار جزئی در نظر گرفته شد. اخیراً پژوهش‌های متعددی براساس تکنیک‌های ارزیابی پایداری بالستیک پرتابه‌ها انجام شده است که در آن برای تمامی سرعت‌های ممکن احتمال پرفوراسیون اندازه گیری شده است که از مهمترین این پژوهش‌ها می‌توان به تحقیق مایوچانت و همکاران (۲۰۱۱) در این زمینه اشاره کرد [۲]. این تکنیک‌ها برای برآورد میانگین و انحراف استاندارد پرفوراسیون جهت برازش به مشاهدات واقعی به کار رفته‌اند. مشکل اصلی تمامی این پژوهش‌ها استفاده از فرض نرمال بودن است که براساس آن سرعت دهانه از توزیع نرمال  $V \sim N(\nu, \sigma^2)$  پیروی می‌کند که در آن میانگین  $\sigma^2$  واریانس سرعت دهانه است. بنابراین سایر رفتار بالستیک هر پرتابه‌ای، با استفاده از مشخصات تعریف شده توزیع نرمال برآورد شده است. مطالعه حاضر مدل‌هایی را مورد بررسی قرار داده که درک بهتری از چگونگی نیکوئی برازش به داده‌های سرعت دهانه ارائه دهند. در این مطالعه مدل قابلیت اطمینان بهینه و تابع نرخ خطر مربوطه جهت درک بهتر چگونگی تغییرات عملکردی پرتابه از لحاظ رفتار نرخ خطر به کار گرفته شده است.

## ۲. ساختار عملکردی بالستیک داخلی

بالستیک داخلی شامل بررسی طرز اشتعال و احتراق خرج، فشار گازهای حاصل از احتراق خرج پرتاب در محفظه خرج، استحکام لوله در مقابل فشار بیشینه، نوع، مقدار ترکیب خرج و سرعت گلوله در طول لوله است. مسئله اساسی بالستیک داخلی، دستیابی به سرعتی مطلوب تحت محدودیت‌های فشار است. نخستین کسی که به اندازه‌گیری فشار گازهای ناشی از انفجار پرداخت، رامفورد آمریکایی (۱۷۹۲ م) بود که طی آزمایش‌های خود موفق به استنتاج رابطه‌ای بین فشار گازها و چگالی آنها شد. در اواخر قرن هجدهم، متخصصان بالستیک قادر بودند رابطه میان فشار و مسافت طی شده را با توجه به رابطه ارائه شده به وسیله رامفورد و با توجه به این فرض که خرج گلوله قبل از پرتاب آن کاملاً سوخته شده باشد، محاسبه نمایند. با جمع‌آوری منحنی‌های فشار - مسافت طی شده توانستند سرعت خروج گلوله از دهانه سلاح را محاسبه و با نتایج آزمایش‌های خود مقایسه کنند [۱].

مراحل شلیک: پس از ورود گلوله در قبضه (محفظه پرتاب) سندان توسط ضربه مکانیکی چاشنی را فعال می‌نماید. بر اثر اشتعال چاشنی، باروت داخل فشنگ پرتاب توسط پرایم‌رتیوب، که

$$7. \text{ ضریب هایدن رایش } (\lambda = \frac{x}{x_{max}})$$

### ۳. پیشینه پژوهش

تاهنتی و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه ساختار عملکردی بالستیک داخلی پرتابه‌ها، به مدلسازی فرایند تصادفی سرعت پرتابه با استفاده از معادلات دیفرانسیل و بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه ناشی از برخورد های سرعت‌های بالا یا پایین که به‌ندرت اتفاق می‌افتد، پرداختند [۳]. جانسون و همکاران (۲۰۱۴) بر آزمایشات پایداری بالستیکی که در دپارتمان دفاعی ایالات متحده انجام می‌شود تمرکز شدند. این آزمایشات جهت برآورد این است که شلیک یک پرتابه بدنه سلاح تحت آزمایش را سوراخ خواهد کرد یا نه؟ این پژوهشگران روش‌ها، برآوردگرها و معیارهای آماری مورد استفاده را بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه مورد بررسی قرار داده و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برآوردهای دقیق‌تر و کارآتری را جهت بررسی پایداری بالستیکی یک پرتابه بخصوص ارائه نمودند [۴]. نگوین (۲۰۱۴) تحلیلی جامع برای ارزیابی اثربخشی بالستیک داخلی ارائه کرد. این تحلیل توسط به‌کارگیری چندین تکنیک از جمله ویژگی‌های فرایندهای تصادفی، استفاده از برنامه‌ریزی پویا و کاربردهای مکانیک مداری بر فرض نرمال بودن سرعت دهانه انجام گرفت [۵]. چنگ و ژانگ (۲۰۱۲) با مطالعه محدودیت‌های طراحی خرج پرتاب در بالستیک داخلی پرتابه‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از الگوریتم ژنتیک و سایر روش‌های بهینه‌سازی مستقیم، منجر به ارائه برآوردهایی می‌شود که در پیش‌بینی سرعت و دقت عملکرد پرتابه ضعیف هستند. بنابراین یک الگوریتم بهینه‌سازی خرج پرتاب بر مبنای یک روش هندسی و یک روش بهینه‌سازی چندهدفه فازی جهت بهینه کردن طراحی خرج پرتاب در بالستیک داخلی پرتابه‌ها بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه ارائه نمودند [۶]. توایوولا و همکاران (۲۰۱۱) در مقاله‌ای جهت بررسی عملکرد پرتابه در بالستیک داخلی، آثار عملگرهای فشار، قدرت و کشش را در پرتابه‌های کالیبر بزرگ اندازه‌گیری نمودند. برآورد فشار لوله سلاح بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه از روی کشش لوله مورد ارزیابی قرار گرفت و روش محاسبه فشار که شامل جبران استرس دائمی بود برای پرتابه اثبات گردید [۷]. مایوچانت و همکاران (۲۰۱۱) برای بررسی عملکرد بالستیک داخلی نوعی اسلحه یک تحلیل آماری برای داده‌های محدوده بالستیک انجام دادند. ایشان

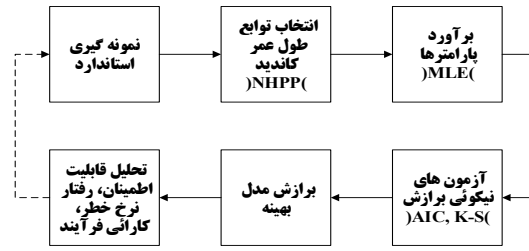
بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه با استفاده از مدل‌های رگرسیونی سعی در فهم بهتر اینکه کدام مدل در محیط‌های مختلف به‌خوبی به تعداد پرفوراسیون برازش می‌شود نمودند. از این طریق توانستند با مقایسه مدل لجیت<sup>۴</sup>، مدل پروبیت<sup>۵</sup> و مدل لگ لگ<sup>۶</sup> نشان دهند تفاوت چندان بین نتایج رگرسیونی داده‌های بالستیکی این مدل‌ها وجود ندارد [۲]. آچاریا و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی جهت تعیین اثر دمای محیط بر عملکرد بالستیک داخلی یک پرتابه کالیبر بزرگ به این یافته رسیدند که آثار فشار-زمان و سرعت‌های دهانه بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه دارای همبستگی معناداری هستند. [۸]. اشमित و همکاران (۲۰۰۹) به مدلسازی مکانیکی بالستیک داخلی پرتابه‌های کالیبر بزرگ جهت پیش‌بینی حساسیت فشار و سرعت دهانه بر مبنای نرمال بودن آن پرداختند. این محققان تأثیر هفت متغیر وزن خرج پرتاب، قدرت پرتابه، قطر باروت، نرخ سوختن خرج پرتاب، ضریب توان، ظرفیت کمکی<sup>۷</sup> و وزن پرتابه را بر این پارامتر در پرتابه ارزیابی نموده و یک تحلیل حساسیت بر متغیرهای ورودی محفظه سلاح انجام دادند [۹].

با توجه به مطالعات اخیر، داده‌های بالستیک داخلی و همچنین اهمیت عملکرد مناسب پرتابه‌ها در شرایط عملیاتی و محیطی، در ادامه به بررسی این داده‌ها در یک پرتابه کالیبر بزرگ و ارائه یک بینش قابلیت اطمینان به عملکرد بالستیک داخلی بر مبنای نرمال بودن سرعت دهانه پرداخته شده است.

### ۴. مراحل پژوهش

در این پژوهش، نمونه‌گیری داده‌های بالستیکی و انجام آزمایشات مربوطه مطابق استاندارد ملی دفاعی (IDS 084) ایران صورت گرفت. سپس با بررسی یک نمودار تجربی از خانواده فرایندهای پواسن غیرهمگن (NHPP)<sup>۸</sup> نوع توابع طول عمر داوطلب تعیین، و برای هر مدل داوطلب به‌کار گرفته شده، از روش ماکسیمم درست‌نمایی (MLE)<sup>۹</sup> جهت برآورد پارامترها استفاده گردید. نتایج برآورد هر مدل با آزمون‌های متفاوت نیکوئی برازش برای انتخاب مدلی با بهترین برآوردها از عملکرد بالستیکی پرتابه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. این روش مدلسازی که در شکل ۱ نشان داده شده است برای ایجاد و تعمیم بینش قابلیت اطمینان نسبت به عملکرد بالستیکی این پرتابه به‌خصوص و همچنین سایر پرتابه‌ها به‌کار گرفته شد [۱۰].

فولاد آلیاژی با ضخامت ۵/۶ میلی‌متر است و نتایج آزمایشات در جدول ۲ ارائه شده است. گفتنی است ستون F در این جدول مربوط به فرکانس تجربی و حاصل تقسیم تعداد پرفوراسیون بر تعداد آثار جزئی است [۳].



شکل ۱. مراحل پژوهش [۱۰]

جدول ۱. تعداد نمونه بر اساس کران‌های قابلیت اطمینان

ردیف	تعداد نمونه	کران پایین <sup>۱۱</sup>	کران بالا <sup>۱۱</sup>
۱	۵	۰/۷۰۵۸	۰/۹۹۸۱
۲	۱۰	۰/۷۵۲۱	۰/۹۸۵۰
۳	۱۵	۰/۷۷۱۸	۰/۹۷۲۳
۴	۲۰	۰/۷۹۳۲	۰/۹۶۲۸
۵	۲۵	۰/۷۹۸۴	۰/۹۵۷۰
۶	۳۰	۰/۸۰۵۲	۰/۹۴۶۴
۷	۳۵	۰/۸۱۵۸	۰/۹۴۳۳
۸	۴۰	۰/۸۲۶۱	۰/۹۴۱۵

جدول ۲. نتایج داده‌های مربوط به آزمایش محدوده بالستیک داخلی

$\hat{\theta}$	کمینه سرعت	بیشینه سرعت	تعداد سوراخ Perforation	تعداد آثار Impact	F
۱	۲۹۵	۳۰۰	۰	۷	۰
۲	۳۰۰	۳۰۵	۳	۵۴	۰/۰۵۵۶
۳	۳۰۵	۳۱۰	۳۲	۱۱۶	۰/۲۷۵۹
۴	۳۱۰	۳۱۵	-	-	-
۵	۳۱۵	۳۲۰	۱۲۷	۱۴۸	۰/۸۵۸۱
۶	۳۲۰	۳۲۵	۵۹	۶۵	۰/۹۰۷۷
۷	۳۲۵	۳۳۰	۲۶	۲۶	۱

### ۶. ارزیابی مدل‌ها و شناسایی مدل‌های داوطلب

معیارهای مختلف نیکویی برازش برای ارزیابی مدل‌های قابلیت اطمینان این داده‌ها استفاده گردید. هدف انجام این تحلیل‌ها شناسایی مدل‌های داوطلب و انتخاب مدلی است که بهترین برآوردها را از عملکرد بالستیکی پرتابه ارائه دهد.

#### ۶-۱. نمودار تجربی TTT<sup>۱۲</sup>

از یک نمودار تجربی (TTT) جهت انتخاب مدل‌های داوطلب استفاده شد. این نمودار برای شناسایی شکل تابع نرخ خطر به کار گرفته می‌شود. متغیرهای این نمودار (TTT) به صورت زیر قابل تعریف است:

$$T(r/n) = (\sum_{i=1}^r Y_{i:n} + (n-r)Y_{r:n}) / \sum_{i=1}^n Y_{i:n} \quad (2)$$

حالات مختلف از نتایج نمودار (TTT) در جدول ۳ ارائه شده است [۱۲]. نتیجه این بررسی در ارتباط با نمونه گرفته شده از داده‌های بالستیک داخلی پرتابه در شکل ۲ آمده است.

### ۵. آزمایشات و نمونه‌گیری داده‌ها

داده‌های بالستیکی در آزمایشگاه تحقیق و توسعه یکی از مجتمع‌های صنعتی کشور تحت شرایط استاندارد ملی دفاعی (IDS 084) ایجاد شد. این شرایط یکسان شامل موارد زیر است:

۱. تمامی مجموعه‌های پرتاب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۱ درجه سلسیوس قرار گرفتند
۲. شلیک تحت زاویه ۴۵ درجه صورت گرفت
۳. تمامی سرعت‌ها ثبت گردید
۴. تمامی پرتاب‌ها به صورت خرج افزایشی صورت گرفت
۵. گلوله‌ها با وزن مساوی بودند
۶. باد نمی‌وزید
۷. سکوی پرتابه کاملاً به طور افقی مستقر گردید
۸. هدف در سطح افقی پرتابه قرار داشت
۹. سایر شرایط و عوامل اثرگذار در سرعت پرتابه به جز میزان شارژ، ثابت در نظر گرفته شدند

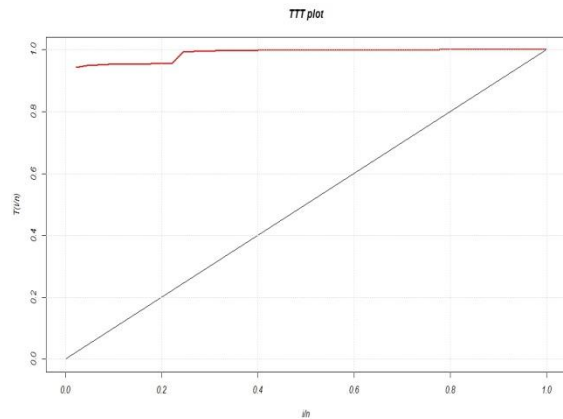
این فرایند آزمایش جهت به دست آوردن خروجی‌هایی مرکب از شلیک‌های با عملکرد پایدار و سایر شلیک‌ها طراحی گردید. در مطالعات نمونه‌گیری قابلیت اطمینان گاو و همکاران [۱۱]، حجم نمونه برای آزمایشات مربوط به طول عمر پدیده‌ها براساس توزیع وایبل با مدل قابلیت اطمینان زیر ارائه شده است:

$$R(x|\lambda, \alpha) = \exp\{-(\lambda x)^\alpha\}, \lambda, \alpha, x \geq 0 \quad (1)$$

لذا براساس نمونه‌گیری اولیه از سرعت گلوله به عنوان یک متغیر مثبت و پیوسته  $x$  (جایگزین طول عمر)، که نشان‌دهنده برازش مدل وایبل به داده‌های سرعت گلوله در دهانه سلاح بود، برای دستیابی به کران پایین قابلیت اطمینان بالاتر از ۸۲ درصد، مطابق جدول ۱ تعداد نمونه بیش از ۴۰ عدد به دست آمد. در نتیجه برای هر آزمایش شلیک، سرعت گلوله ثبت شد و پایداری گلوله‌ها از طریق بررسی تعداد پرفوراسیون و تعداد آثار جزئی بر پوسته سلاح ارزیابی گردید. پوسته سلاح در این آزمایشات نوعی

جدول ۳. حالات مختلف نتایج نمودار TTT

ردیف	شکل نمودار	تابع نرخ خطر متناظر
۱	خطی (منطبق بر $y = x$ )	ثابت
۲	محدب (زیر $y = x$ )	کاهشی
۳	مقعر (بالای $y = x$ )	افزایشی
۴	اول محدب بعد مقعر	وانی شکل
۵	اول مقعر بعد محدب	وانی شکل وارون



شکل ۲. نمودار TTT داده‌های بالستیک داخلی

بر اساس نتایج نمودار TTT، شکل نمودار مقعر بوده و نشان‌دهنده افزایشی بودن تابع نرخ خطر متناظر با نمونه گرفته‌شده از داده‌های بالستیکی است.

## ۶-۲. شناسایی مدل‌های داوطلب

بر مبنای نتایج حاصل از نمودار TTT، مدل‌های طول عمر کلاسیک که می‌توانند افزایشی بودن تابع نرخ خطر را تبیین کنند، به‌عنوان مدل‌های داوطلب جهت ارزیابی معیارهای نیکویی برازش و ارائه بهترین برآوردها از عملکرد بالستیکی پرتابه بررسی گردیدند [۱۳]. از این بین ۱۰ مدل که نزدیک‌ترین برآوردها به داده‌ها را ارائه نمودند به شرح زیر است:

۱. توزیع گاما<sup>۱۳</sup>

۲. توزیع وایبل<sup>۱۴</sup>

۳. توزیع نمایی ارتجاعی<sup>۱۵</sup>

۴. توزیع نمایی کجی<sup>۱۶</sup>

۵. توزیع گامای تعمیم‌یافته<sup>۱۷</sup>

۶. توزیع وایبل ارتجاعی<sup>۱۸</sup>

۷. توزیع وایبل کجی<sup>۱۹</sup>

۸. توزیع F تعمیم‌یافته<sup>۲۰</sup>

۹. توزیع لجستیک لگاریتمی<sup>۲۱</sup>

۱۰. توزیع نرمال لگاریتمی<sup>۲۲</sup>

از روش ماکسیمم درست‌نمایی (MLE) جهت برآورد پارامترهای مدل‌های داوطلب استفاده شد. برآورد پارامترها از این روش، در مورد اکثر مدل‌های داوطلب، نیازمند برنامه‌نویسی پیشرفته برای داده‌های بالستیکی بود. پکیج نرم افزار آماری R برای برآورد پارامترها از روش ماکسیمم درست‌نمایی، تحلیل داده‌ها و برازش مدل‌های داوطلب بکار گرفته شد. نتایج به پیوست در جدول ۴ ارائه شده است.

## ۷. معیارهای ارزیابی مدل برتر و انتخاب مدل بهینه

هنگامی که یک مدل به داده‌های مشاهده شده برازش می‌شود، بررسی اعتبار واقعی مدل برازش‌شده بسیار ضروری است. معیارهای نیکویی برازش آماری برای مقایسه مدل‌های مختلف برازش داده شده استفاده می‌گردد. از بین تمامی معیارهای نیکویی برازش ارائه‌شده در متون جدید علمی و همچنین در نرم‌افزار R دو معیار زیر برای مقایسه مدل‌های برازش شده مورد بررسی قرار گرفت. نرم‌افزار R یک زبان برنامه‌نویسی و محیط نرم‌افزاری برای محاسبات آماری و علم داده‌هاست، که براساس زبان‌های اس و اسکیم پیاده‌سازی شده است. نرم‌افزار R حاوی محدوده گسترده‌ای از تکنیک‌های آماری (از جمله مدلسازی خطی و غیرخطی، آزمون‌های کلاسیک آماری، تحلیل سری‌های زمانی، رده‌بندی، خوشه‌بندی و غیره) و قابلیت‌های گرافیکی است.

## ۷-۱. معیار AIC<sup>۲۳</sup>

آکائیکه [۱۴] معیاری اطلاعاتی برای انتخاب مشخصه‌های مختلف داده‌ها تعریف کرد که به AIC معروف است. این معیار علاوه بر لگاریتم درست‌نمایی، پارامترهای مدل برازش داده شده را نیز به حساب می‌آورد. فرمول محاسبه AIC به صورت زیر است:

$$AIC = -2 \log L + 2p \quad (3)$$

که در آن  $\log L$  تابع لگاریتم درست‌نمایی برای برآورد پارامترها و  $p$  تعداد پارامترهای مدل است. مقادیر کمتر AIC با برازش‌های بهتر همراه هستند. این معیار برای تمامی مدل‌های داوطلب محاسبه، و مدل با کمترین AIC به‌عنوان نزدیک‌ترین به واقعیت ناشناخته که داده‌ها می‌تواند از آن تولید شده باشد انتخاب گردید.

۷-۲. معیار کلموگروف - اسمیرنوف<sup>۲۴</sup>

آزمون ناپارامتریک K-S [۱۵] یکی دیگر از آزمون‌هایی است که از آن برای ارزیابی نیکویی برازش داده‌ها استفاده می‌شود. این آزمون در نیمه اول قرن بیستم توسط دو ریاضی‌دان روس ارائه شد و فرض صفر آن برازش داده‌ها با توزیع مورد نظر است. نتایج مقایسه مدل‌های برازش داده‌شده بر اساس این دو معیار نشان می‌دهد مدل گامای تعمیم‌یافته در معیار AIC کمترین مقادیر را دارا بوده، اما در آزمون K-S تفاوت معناداری در مقدار احتمال را نشان نمی‌دهد. بنابراین با توجه به نمودار هیستوگرام داده‌ها (شکل ۳) و برازش نموداری مدل گامای تعمیم یافته (شکل ۴) می‌توان نتیجه گرفت اگرچه این مدل در بین مدل‌های کلاسیک به‌عنوان بهترین مدل معرفی می‌گردد، اما جهت انتخاب مدل بهینه که نزدیک‌ترین برآوردها از داده‌های عملکرد بالستیک داخلی را ارائه دهد باید از مدل‌های میکسچر<sup>۲۵</sup> استفاده نمود.

بررسی گردیدند. این مدل‌ها می‌توانند افزایشی بودن تابع نرخ خطر را نیز تبیین نمایند:

۱. توزیع گامای میکسچر<sup>۲۶</sup>
۲. توزیع وایبل میکسچر<sup>۲۷</sup>
۳. توزیع نرمال میکسچر<sup>۲۸</sup>

مشابه مرحله قبل از روش ماکسیمم درست‌نمایی (MLE) جهت برآورد پارامترهای مدل‌های داوطلب مرحله دوم استفاده شد. نتایج به پیوست در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج مقایسه مدل‌های برازش داده شده نشان می‌دهد مدل نرمال میکسچر در معیار AIC کمترین مقادیر را دارا بوده و در آزمون K-S نیز بیشترین مقدار احتمال را نشان می‌دهد و بنابراین این مدل به‌عنوان مدل بهینه که نزدیکترین برآوردها به داده‌های عملکرد بالستیک داخلی پرتابه مورد مطالعه را ارائه می‌دهد انتخاب گردید.

۸. برازش مدل بهینه (توزیع نرمال میکسچر)

مدل نرمال میکسچر عبارت است از:

$$f(x|\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, p) = pf_1(x|\mu_1, \sigma_1^2) + (1-p)f_2(x|\mu_2, \sigma_2^2) \quad (4)$$

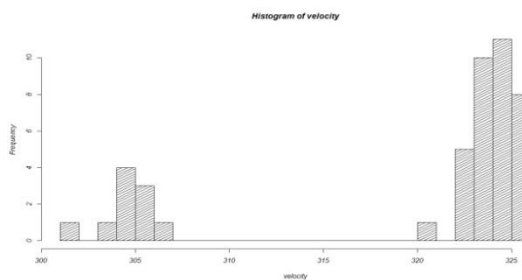
با توجه به نتایج حاصل از برآورد پارامترهای این مدل (که در جدول ۵ به‌صورت پیوست ارائه شده است)، تابع چگالی بهینه که نزدیک‌ترین برآوردها به سرعت دهانه پرتابه مورد مطالعه باشد به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$f(x|\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, p) = 0.2222f_1(x|304.61, 1.2306) + 0.7778f_2(x|324.17, 1.2306) \quad (5)$$

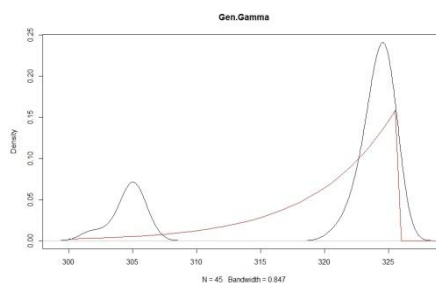
$$f_1(x|304.61, 1.2306) = \frac{1}{\sqrt{2.4612\pi}} e^{-\frac{(x-304.61)^2}{2.4612}}, x \in R \quad (6)$$

$$f_2(x|324.17, 1.2306) = \frac{1}{\sqrt{2.4612\pi}} e^{-\frac{(x-324.17)^2}{2.4612}}, x \in R \quad (7)$$

در شکل ۵ نمودار برازش این مدل روی هیستوگرام داده‌های واقعی عملکرد بالستیک داخلی ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار هیستوگرام داده‌های بالستیک داخلی



شکل ۴. نمودار برازش مدل گامای تعمیم‌یافته به داده‌های بالستیک داخلی

۹. مدل قابلیت اطمینان و تبیین رفتار تابع نرخ خطر

داده‌های بالستیکی

قابلیت اطمینان به‌عنوان احتمالی که یک تجهیز وظایف هدفش را به‌طور رضایت‌بخش برای یک دوره زمانی مشخص و تحت شرایط عملیاتی مشخص انجام داد تعریف می‌گردد. بر اساس این تعریف قابلیت اطمینان به‌عنوان یک احتمال

۷-۳. بررسی مدل‌های میکسچر و انتخاب مدل بهینه

بر مبنای نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های طول عمر کلاسیک (که در جدول ۴ به‌صورت پیوست ارائه شده است)، مدل میکسچر گاما و مدل میکسچر وایبل به‌عنوان مدل‌های داوطلب در مرحله دوم و بر اساس بررسی نمودار هیستوگرام داده‌ها و مدل میکسچر نرمال به‌عنوان مدل رقیب جهت ارزیابی معیارهای نیکویی برازش



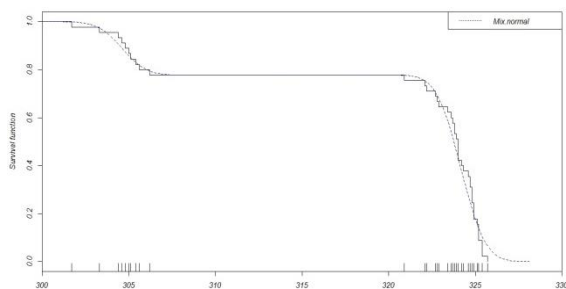
قابلیت اطمینان بر اساس مدل نرمال میکسچر در سرعت  $305/2$  متر بر ثانیه:

$$R(x|x = 305.2) = 1 - F(x|x = 305.2) = 0.8439 \quad (10)$$

قابلیت اطمینان بر اساس مدل نرمال میکسچر در سرعت  $326/4$  متر بر ثانیه:

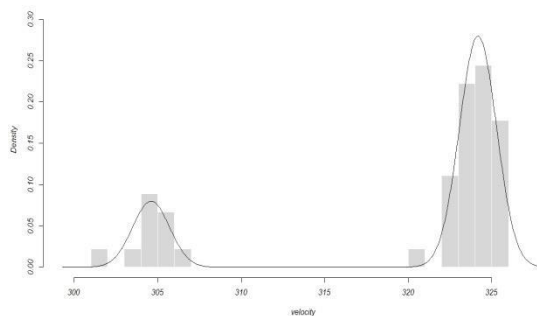
$$R(x|x = 326.4) = 1 - F(x|x = 326.4) = 0.01732 \quad (11)$$

در نتیجه قابلیت اطمینان اهداف ماموریتی پرتابه به صورت احتمال اینکه مجموعه تجهیزات پرتاب بتواند کلیه عملیات ماموریت بالستیک داخلی را با موفقیت انجام دهد بر اساس این مدل در سرعت  $305/2$  متر بر ثانیه نزدیک ۸۵ درصد بوده و در سرعت  $326/4$  متر بر ثانیه کمتر از ۲ درصد است.



شکل ۵. نمودار برازش مدل نرمال میکسچر بر هیستوگرام داده‌های بالستیک داخلی

اندازه‌گیری می‌شود. وظیفه هدف یک تجهیز به‌طور فرضی درک شده و میزان موفقیت عملکرد تجهیز نسبت به وظیفه اصلی قابل اندازه‌گیری است. بنابراین به‌سادگی رضایت‌بخش بودن یا نبودن عملکرد را می‌توان استنتاج نمود [۱۰]. یکی از روش‌هایی که می‌توان برای معنادار شدن الزام قابلیت اطمینان تعریف نمود احتمال موفقیت (مستقل از زمان) است. این تعریف برای تعیین قابلیت اطمینان سیستم‌هایی است که یک بار عمل می‌کنند و عملکرد آنی دارند [۱۶].



شکل ۶. نمودار مقایسه قابلیت اطمینان مدل نرمال میکسچر با داده‌های سرعت دهانه

### ۹-۱. قابلیت اطمینان داده‌های بالستیک داخلی

مدل قابلیت اطمینان تابع چگالی نرمال میکسچر عبارت است از:

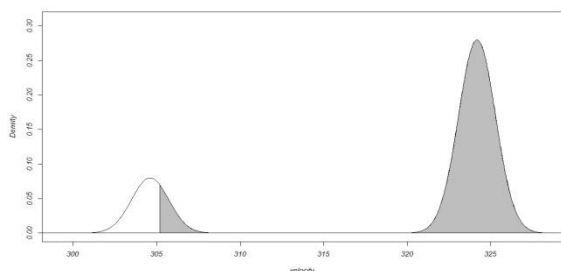
$$R(x) = 1 - F(x) = \bar{F}(x) = p\bar{F}_1(x) + (1-p)\bar{F}_2(x) \quad (8)$$

بنابراین مدل بهینه قابلیت اطمینان عملکرد پرتابه در بالستیک داخلی عبارت است از:

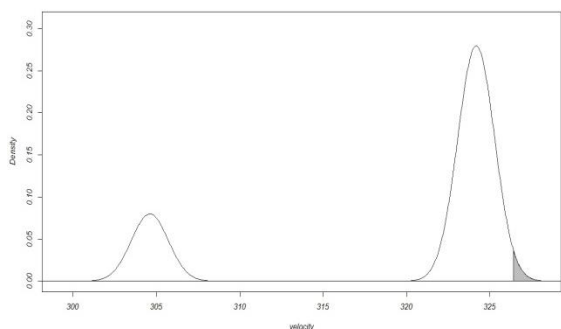
$$R(x) = 1 - F(x) = \bar{F}(x) = 0.2222\bar{F}_1(x) + 0.7778\bar{F}_2(x) \quad (9)$$

در شکل ۶ نمودار مقایسه روند قابلیت اطمینان داده‌های سرعت دهانه در مدل نرمال میکسچر ارائه شده است. نمودار تابع قابلیت اطمینان برآورد شده نشان‌دهنده برآزش مناسب این مدل به داده‌های بالستیکی بوده به‌گونه‌ای که هرچه سرعت پرتابه افزایش یافته، قابلیت اطمینان بالستیک داخلی در عدم ایجاد پرفوراسیون کاهش یافته است.

چون مأموریت پرتابه در بالستیک داخلی شامل دستیابی به میزان سرعت دهانه مناسب توام با بیشترین پایداری و عدم ایجاد پرفوراسیون است، مطابق با اهداف طراحی شده باید عملکرد پرتابه در سرعت  $305/2$  متر بر ثانیه و نیز سرعت  $326/4$  متر بر ثانیه از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار باشد. بر این اساس قابلیت اطمینان در این اهداف بصورت زیر برآورد شده است:



شکل ۷. نمودار مدل نرمال میکسچر در احتمال  $P(x > 305.2)$



شکل ۸. نمودار مدل نرمال دوگانه‌ای در احتمال  $P(x > 326.4)$

۹-۲. رفتار نرخ خطر داده‌های بالستیک داخلی

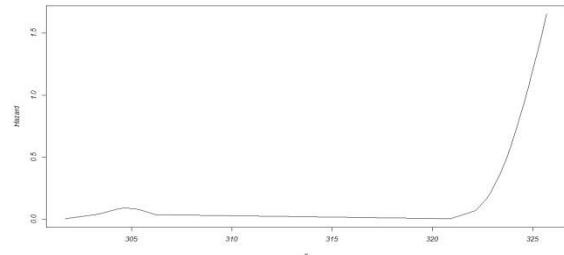
تابع نرخ خرابی متغیر  $t$  عبارت است از خرابی قطعه در بازه زمانی  $[t_1, t_2]$  که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (12)$$

که در آن  $f(t)$  تابع چگالی متغیر  $t$  و  $F(t)$  تابع توزیع تجمعی متغیر  $t$  خواهد بود. بنابراین نرخ خرابی عبارت است از احتمال اینکه یک خرابی در هر واحد زمانی رخ دهد و اهمیت آن این است که با استفاده از تابع چگالی قابل محاسبه بوده و می‌توان مرحله استهلاک اجزای را مدل کرد [۱۲]. با توجه به اینکه در این پژوهش احتمال موفقیت مبنای تحلیل قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده، بررسی رفتار نرخ خطر به معنای بررسی نسبت تعداد پرفوراسیون به تعداد آثار جزئی با توجه به افزایش سرعت پرتابه است. تابع نرخ خطر بر اساس مدل نرمال میکسچر برابر است با:

$$H(x|\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, p) = \frac{pf_1(x|\mu_1, \sigma_1^2) + (1-p)f_2(x|\mu_2, \sigma_2^2)}{pF_1(x|\mu_1, \sigma_1^2) + (1-p)F_2(x|\mu_2, \sigma_2^2)} \quad (13)$$

بنابراین مدل بهینه نرخ خطر عملکرد پرتابه در بالستیک داخلی بر اساس مدل نرمال میکسچر عبارت است از:



شکل ۹. نمودار تابع نرخ خطر داده‌های بالستیک داخلی بر اساس مدل

نرمال میکسچر

نمودار تابع نرخ خطر برآورد شده مؤید روند افزایشی نرخ خرابی است به گونه‌ای که شیب نرخ خطر تا حدود ۳۲۰ متر بر ثانیه بسیار کم و بیشتر از آن دارای شیب شدید نرخ خطر است. چون ماموریت پرتابه در بالستیک داخلی (مطابق با اهداف طراحی شده) عملکرد پرتابه در سرعت ۳۰۵/۲ متر بر ثانیه و نیز سرعت ۳۲۶/۴ متر بر ثانیه است، بر این اساس نرخ خطر عملکرد پرتابه در این اهداف به صورت زیر برآورد شده است:

$$h(x|x = 305.2) = \frac{f(305.2)}{F(305.2)} = \frac{0.06937}{0.8439} = 0.082 \quad (14)$$

$$h(x|x = 326.4) = \frac{f(326.4)}{F(326.4)} = \frac{0.03718}{0.01732} = 2.1466 \quad (15)$$

در نتیجه نرخ خطر اهداف مأموریتی پرتابه به صورت احتمال اینکه پرتاب روی پوسته سلاح سوراخ ایجاد نکند بر اساس این مدل در سرعت ۳۰۵/۲ متر بر ثانیه نزدیک ۸ درصد بوده و در سرعت ۳۲۶/۴ متر بر ثانیه بیش از ۲۱۴ درصد است.

۱۰. ارزیابی شاخص‌های کارایی فرایند بالستیک

داخلی

نمودارهای کنترلی به‌عنوان مهمترین ابزار در کنترل آماری فرایند مطرح هستند. این نمودارها با فراهم نمودن اطلاعات مورد نیاز، امکان کاهش تغییرات را فراهم می‌آورند. از طرفی شاخص‌های کارایی فرایند<sup>۲۹</sup> با در نظر گرفتن الزامات تعیین شده از سوی مشتری و استانداردها و داده‌های واقعی اخذ شده از فرایند، امکان مقایسه آنچه که رخ داده در مقایسه با آنچه باید باشد را فراهم می‌نماید. مهمترین شاخص‌های کارایی فرایند تک‌متغیره شامل شاخص‌های  $C_p$ ،  $C_{pk}$  و  $C_{pkm}$  هستند. شاخص  $C_p$  در مرجع [۱۷] به صورت زیر تعریف شده است:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (16)$$

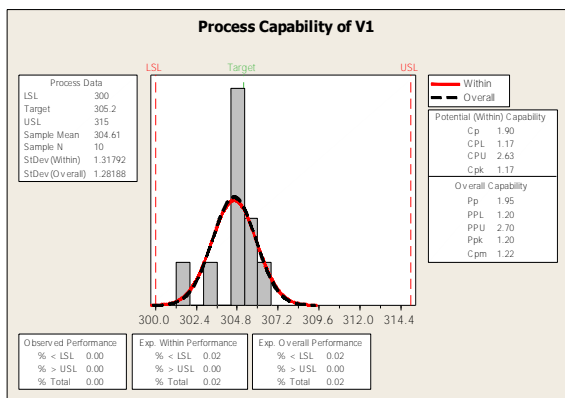
در این رابطه  $USL$  و  $LSL$  به ترتیب حد بالای مشخصه فنی<sup>۳۰</sup> و حد پایین مشخصه فنی<sup>۳۱</sup> هستند و  $\sigma$  برابر با انحراف معیار فرایند است. شاخص کارایی فرایند  $C_p$  به مکان واقع شدن میانگین فرایند نسبت به حدود مشخصات فنی توجهی ندارد. در صورتی که عدم تمرکز میانگین فرایند باعث کاهش کارایی فرایند می‌گردد. جهت رفع این نقیصه شاخص  $C_{pk}$  در مرجع [۱۷] به صورت زیر تعریف شده است:

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right\} \quad (17)$$

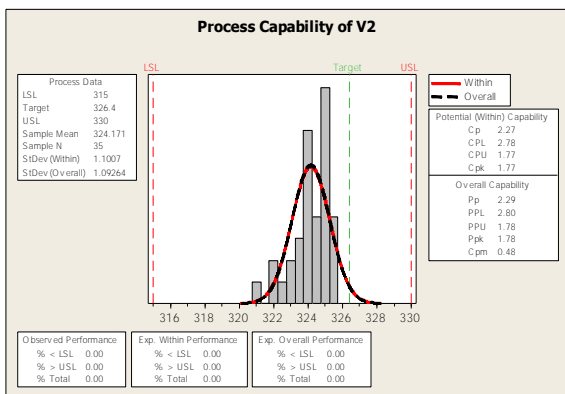
در این رابطه  $\mu$  برابر با میانگین فرایند است. مطالعات کارایی فرایند به منظور پایش قابلیت یک فرایند استفاده می‌شود. به همین دلیل قبل از ارزیابی قابلیت مربوط به یک فرایند، تحت کنترل بودن فرایند مورد نظر باید بررسی شود. در صورتی که فرایند تحت کنترل نباشد، برآوردهای نادرستی از کارایی فرایند به دست خواهد آمد. فرض دیگری نیز که در مطالعه شاخص‌های کارایی فرایند باید بررسی شود، نرمال بودن توزیع داده‌هاست [۱۸]. تمامی شاخص‌های معمول  $C_p$ ،  $C_{pk}$  و  $C_{pkm}$  برای استفاده از داده‌هایی که دارای توزیع نرمال هستند طراحی شده‌اند. این فرض، یک فرض اساسی برای شاخص‌های کارایی فرایند است و بدین معناست که تمامی خصوصیات آماری، شامل رابطه این شاخص‌ها



بر ثانیه) است. هر دو طرف دم نمودار در حدود مشخصات فنی قرار گرفته، به این معنا که هیچگاه سرعت کمتر از ۳۱۵ متر بر ثانیه و بیش از ۳۳۰ متر بر ثانیه در این دامنه از داده‌ها نمایان نشده است. در اینجا  $C_{p2} = 2.27$  است. کمترین مقدار قابل قبول برای این شاخص  $1/33$  معرفی شده است [۲۰]. شاخص  $C_{pk2}$  نیز که باید به طور معمول بیشتر از  $1/33$  باشد برابر  $C_{pk2} = 1.77$  است. لذا از تحلیل همزمان این دو شاخص این استنباط می‌شود که داده‌ها در حدود تولرانس بوده و توانا هستند و همچنین حفظ مرکزیت، فرایند سازگار بوده و نیازی به تعدیل میانگین فرایند نیست. اندازه‌گیری سایر شاخص‌ها در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۰. نمودار قابلیت فرایند تابع کناری اول (سرعت بین ۳۰۰ تا ۳۱۵ متر بر ثانیه)



شکل ۱۱. نمودار قابلیت فرایند تابع کناری دوم (سرعت بین ۳۱۵ تا ۳۳۰ متر بر ثانیه)

### ۱-۳. ارزیابی شاخص‌های کارایی فرایند کل

با توجه به نتایج حاصل از برآورد پارامترهای مدل میکسچر نرمال (مطابق بند ۸)، تابع چگالی بهینه که نزدیکترین برآوردها به

با بازده فرایند، به این فرض وابسته است. بنابراین در مواقعی که داده‌ها دارای توزیع نرمال نیستند، یا باید با استفاده از روش تبدیل، توزیع داده‌ها را به توزیع نرمال تبدیل نمود و یا از بعضی متدهای پیشنهادی برای محاسبه قابلیت مربوط به داده‌های غیر نرمال استفاده کرد [۱۹]. در خصوص داده‌های بالستیک داخلی پرتابه مورد مطالعه، که (مطابق بند ۸) دارای توزیع نرمال میکسچر هستند، ابتدا شاخص‌های کارایی فرایند به صورت جداگانه برای هر یک از توابع کناری که دارای توزیع نرمال هستند اندازه‌گیری، و سپس امید ریاضی شاخص‌های کارایی فرایند کل، بر مبنای رابطه توزیع نرمال میکسچر ارزیابی گردید [۱۹].

### ۱-۱۰. ارزیابی شاخص‌های کارایی فرایند تابع کناری اول

حدود پایین و بالای مشخصات فنی سرعت ایده‌آل برای تابع کناری اول با ادعای متخصصین صنعت ۳۰۰ و ۳۱۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نمودار شکل ۱۰ میزان انطباق داده‌ها با منحنی نرمال را نشان می‌دهد اما مشاهده می‌شود که میانگین داده‌ها (۳۰۴/۶۱ متر بر ثانیه) کمتر از میزان هدف مورد نظر (۳۰۵/۲ متر بر ثانیه) است. هر دو طرف دم نمودار در حدود مشخصات فنی قرار گرفته، به این معنی که هیچگاه سرعت کمتر از ۳۰۰ متر بر ثانیه و بیش از ۳۱۵ متر بر ثانیه در این دامنه از داده‌ها نمایان نشده است. در اینجا  $C_{p1} = 1.90$  است. در کاربردهای متداول  $C_p$ ، کمترین مقدار قابل قبول برای این شاخص  $1/33$  معرفی شده است [۲۰]. شاخص  $C_{pk1}$  نیز که باید به طور معمول بیشتر از  $1/33$  باشد برابر  $C_{pk1} = 1.17$  است. لذا از تحلیل همزمان این دو شاخص این استنباط می‌شود که با وجود اینکه داده‌ها در حدود تولرانس بوده و توانا هستند ولی به دلیل گستردگی (واریانس)، سازگار نبوده و میانگین فرایند باید تعدیل شود. اندازه‌گیری سایر شاخص‌ها در شکل ۱۰ ارائه شده است.

### ۱-۲. ارزیابی شاخص‌های کارایی فرایند تابع کناری دوم

حدود پایین و بالای مشخصات فنی سرعت ایده‌آل برای تابع کناری دوم با ادعای متخصصان صنعت ۳۱۵ و ۳۳۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نمودار شکل ۱۱ میزان انطباق داده‌ها با منحنی نرمال را نشان می‌دهد اما مشاهده می‌شود که میانگین داده‌ها (۳۲۴/۱۷ متر بر ثانیه) کمتر از میزان هدف مورد نظر (۳۲۶/۴ متر

می‌تواند تمامی برآوردها در خصوص انحرافات، فواصل اطمینان و مقادیر پرفوراسیون را برای هر سرعت دلخواه ارائه نماید. هدف ثانویه این مطالعه بررسی قابلیت اطمینان و رفتار نرخ خطر مأموریت بالستیک داخلی پرتابه مطابق اهداف طراحی شده شامل دستیابی به میزان سرعت مناسب توام با بیشترین پایداری و عدم ایجاد سوراخ بر پوسته سلاح بود. همچنین نمودار توابع قابلیت اطمینان برآورد شده نشان دهنده‌ی برازش مناسب مدل نرمال دو نمایی به داده‌های بالستیکی بوده به گونه‌ای که هرچه سرعت پرتابه افزایش یافته، قابلیت اطمینان بالستیک داخلی کاهش یافته است. نمودار تابع نرخ خطر برآورد شده مؤید افزایشی بودن نرخ خطر است به گونه‌ای که شیب نرخ خطر تا حدود ۳۲۰ متر بر ثانیه بسیار کم و بیشتر از آن دارای شیب صعودی شدید نرخ خطر است. در این پژوهش مهمترین شاخص‌های کارایی فرایند تک متغیره شامل شاخص‌های  $C_p$  و  $C_{pk}$ ، برای توابع کناری به دست آمده از تحقیق، به صورت جداگانه بررسی، و بر این اساس شاخص کارایی فرایند کل نیز تحلیل گردید. از مقایسه تحلیل کارایی فرایند و قابلیت اطمینان این نتیجه حاصل شد که با توجه به سازگاری و توانایی فرایند در سرعت‌های بالاتر، هرچه سرعت گلوله در دهانه سلاح بیشتر شود، نتایج حاصل از قابلیت اطمینان و ارزیابی نرخ خطر داده‌های بالستیک داخلی ارائه شده در این پژوهش قابل اعتمادتر هستند.

### قدردانی

این مقاله حاصل مشارکت ساصد و دانشگاه صنعتی مالک اشتر است و لازم است از حسن همکاری نخبگان صنعت و نیز تلاش اعضای هیئت علمی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی مالک اشتر جهت پیشبرد مطالعات تقدیر و تشکر عرض نمایم.

داده‌های سرعت دهانه پرتابه مورد مطالعه باشد به صورت زیر ارائه گردید:

$$f(x|\mu_1, \mu_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, p) = 0.2222f_1(x|304.61, 1.2306) + 0.7778f_2(x|324.17, 1.2306) \quad (18)$$

چنانچه شاخص‌های کارایی فرایند کل را با  $C_{pkT}$  و  $C_{pT}$  نشان دهیم آنگاه داریم:

$$E(C_{pT}) = 0.2222 E(C_{p1}) + 0.7777E(C_{p2}) = 2.1874 \quad (19)$$

$$E(C_{pkT}) = 0.2222 E(C_{pk1}) + 0.7777E(C_{pk2}) = 1.6364 \quad (20)$$

در اینجا  $E(C_{pT}) = 2.1874$  است. در کاربردهای متداول  $C_p$ ، کمترین مقدار قابل قبول برای این شاخص  $1/33$  معرفی شده است [۲۰]. شاخص  $C_{pkT}$  نیز که باید به طور معمول بیشتر از  $1/33$  باشد، برابر  $E(C_{pT}) = 1.6364$  است. لذا از تحلیل همزمان این دو شاخص این استنباط می‌شود که داده‌ها به صورت کلی در حدود تولرانس بوده و توانا هستند و همچنین با حفظ مرکزیت، فرایند کل سازگار است.

### ۱۱. نتیجه گیری

مدلسازی قابلیت اطمینان یکی از ابزارهای شناخته شده در تحلیل فرایندهای مهندسی است. در این مقاله یک روش مدلسازی ارزیابی عملکرد بالستیک ارائه گردید و از تحلیل‌های پارامتریک و ناپارامتریک مانند AIC و K-S برای آزمون مدل‌ها استفاده شد. این مقاله نشان داد که مدل‌های طول عمر نقش مهمی در برآورد پارامترها برای داده‌های آزمایشات واقعی و عینی مربوط به عملکرد بالستیک داخلی پرتابه‌ها دارند. نتایج ارزیابی مدل‌های داوطلب کلاسیک و مدل‌های میکسچر نشان داد مدل نرمال میکسچر در معیار AIC کمترین مقادیر را دارا بوده و در آزمون K-S نیز بیشترین مقدار احتمال را ارائه می‌دهد. بنابراین این مدل

### ۱۲. پیوست

جدول ۴. نتایج برآورد پارامتر مدل‌های کلاسیک طول عمر از روش درستمائی ماکسیمم و معیارهای نیکوئی برازش

ردیف	Distribution	Parameter estimation with MLE method	Log – likelihood	AIC	P-value of Kolmogorov-Smirnov Tests
۱	$Gamma(\lambda, \nu)$	$\hat{\lambda} = 0.21553$ $\hat{\nu} = 1483.854$	-159.087	322.175	0
۲	$Weibull(\lambda, \alpha)$	$\hat{\lambda} = 0.00309$ $\hat{\nu} = 69.9755$	-146.906	297.813	0.00038

ردیف	Distribution	Parameter estimation with MLE method	Log – likelihood	AIC	P-value of Kolmogorov-Smirnov Tests
۳	<i>Exponential.Resilience</i> ( $\lambda, \eta$ )	$\hat{\lambda} = 0.03199$ $\hat{\eta} = 24350.81$	-201.814	407.628	0
۴	<i>Exponential.Tilt</i> ( $\lambda, \gamma$ )	$\hat{\lambda} = 0.03206$ $\hat{\gamma} = 23508.55$	-218.361	440.722	0
۵	<i>Generalized.Gamma</i> ( $\lambda, \alpha, \nu$ )	$\hat{\lambda} = 0.003069$ $\hat{\alpha} = 11899.29$ $\hat{\nu} = 0.004498$	-125.529	257.05	0.00015
۶	<i>Weibull.Resilience</i> ( $\lambda, \alpha, \eta$ )	$\hat{\lambda} = 0.00307$ $\hat{\alpha} = 273.415$ $\hat{\eta} = 0.18539$	-133.213	272.427	0.0451
۷	<i>Weibull.Tilt</i> ( $\lambda, \gamma, \alpha$ )	$\hat{\lambda} = 0.003154$ $\hat{\alpha} = 56.21968$ $\hat{\gamma} = 18.53919$	-138.677	283.354	0.0324
۸	<i>Generalized.F</i> ( $\lambda, \alpha, \zeta, \theta$ )	$\hat{\lambda} = 0.002983$ $\hat{\alpha} = 240.091$ $\hat{\zeta} = 0.19464$ $\hat{\theta} = 945.850$	-135.878	279.757	0
۹	<i>Log.normal</i> ( $\mu, \sigma$ )	$\hat{\mu} = 5.76743$ $\hat{\sigma} = 0.02611$	-159.343	322.687	0
۱۰	<i>Log.Logistic</i> ( $\lambda, \alpha$ )	$\hat{\lambda} = 73.4197$ $\hat{\alpha} = 321.655$	-158.396	320.792	0.0013

جدول ۵. نتایج برآورد پارامتر مدل‌های میکسچر از روش درست‌نمایی ماکسیمم و معیارهای نیکویی برازش

ردیف	Distribution	Parameter estimation with MLE method	Log – likelihood	AIC	P-value of Kolmogorov-Smirnov Tests
۱	<i>Mixture.Normal</i> ( $\mu, \sigma, p$ )	$\hat{\mu} = (304.61, 324.17)$ $\hat{\sigma}^2 = (1.2306, 1.2306)$ $\hat{p} = (0.2222, 0.7778)$	-92.35	194.7	0.65478
۲	<i>Mixture.gamma</i> ( $\mu, \sigma, p$ )	$\hat{\mu} = (304.71, 324.33)$ $\hat{\sigma}^2 = (1.119, 0.894)$ $\hat{p} = (0.222, 0.778)$	-101.14	204.8	0.49217
۳	<i>Mixture.weibul</i> ( $\mu, \sigma, p$ )	$\hat{\mu} = (304.109, 324.712)$ $\hat{\sigma}^2 = (2.342, 0.381)$ $\hat{p} = (0.222, 0.778)$	-102.1	205.4	0.47455

۱۳. مأخذ

[1] C. Farrar, D. W. Leeming, *Military Ballistics-A Basic Manual*, Royal Military College of Science, Shrivenham, UK: Brassey's Defence Publishers, 1982.  
[2] D. Mauchant, K. D. Rice, M. A. Riley, D. Leber, D. Samarov, A. L. Forster, *Analysis of Three*

*Different Regression Models to Estimate the Ballistic Performance of New and Environmentally Conditioned Body Armor, U.S. Department of Commerce & National Institute of Standards and Technology*, 2011.

- [3] B. Tahenti, F. Coghe, R. Nasri, M. Pirlot, Armor's Ballistic Resistance Simulation Using Stochastic Process Modeling, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 102, pp. 140-146, 2017.
- [4] T. H. Johnson, L. Freeman, J. Hester, J. L. Bell, A Comparison of Ballistic Resistance Testing Techniques in the Department of Defense, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 2, pp. 1442-1455, 2014.
- [5] B. U. Nguyen, Assessment of a Ballistic Missile Defense System, *Defense & Security Analysis*, vol. 30, no. 1, pp. 4-16, 2014.
- [6] C. Cheng, X. B. Zhang, Interior ballistic charge design based on a modified particle swarm optimizer, *Struct Multidisc Optim*, vol. 46, pp. 303-310, 2012.
- [7] J. Toivola, S. Moilanen, H. R. Jussila, Force, Pressure and Strain Measurements for Traditional Heavy Mortar Launch Cycle, *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)* vol. 44, no 4, pp. 309-329, 2011.
- [8] R. Acharya, K. K. Kuo, Performance Dependency of 120mm Mortar System on Ambient Temperature Conditions, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 77, pp. 051401-1 to 051401-9, 2010.
- [9] J. R. Schmidt, M. J. Nusca, Progress Toward a Multidimensional Representation of Mortar Interior Ballistics. *Weapons and Materials Research Directorate, U.S. Army Research Laboratory*, ATTN: AMSRD-ARL-WM-BD. Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, ARL-TR-4839, 2009.
- [10] W. Kuo, M. J. Zuo, *Optimal Reliability Modeling, Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2003.
- [11] H. Guo, E. Pohl, A. Gerokostopoulos, Determining the Right Sample Size for Your Test: Theory and Application, *Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE Transactions on Reliability, 2013.
- [12] M. V. Aarset, How to Identify a Bathtub Hazard Rate, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. (R-36), nO. 1, 1987.
- [13] A. W. Marshall, I. Olkin, *Life Distributions Structure of Nonparametric, Semiparametric, and Parametric Families*, Springer Series in Statistics, 2007.
- [14] H. Akaike, A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, no. 6, pp. 716-723, 1974.
- [15] Daniel, W. Wayne, Kolmogorov-Smirnov one-sample test, *Applied Nonparametric Statistics*, 2<sup>nd</sup> ed., Boston: PWS-Kent, 1990.
- [16] A. Birolini, *Reliability Engineering, Theory and Practice*, 5<sup>th</sup> Edition, Springer, 2007.
- [17] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 3th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [18] S. Kotz, W. L. Pearn, *Encyclopedia and Handbook of Process Capability Indices, a Comprehensive Exposition of Quality Control Measures*, World Scientific, 2006.
- [19] S. E. Somerville, D. C. Montgomery, Process Capability Indices and Non-Normal Distributions, *Quality Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 305-316, 1996.
- [20] K. Rezaie, B. Ostadi, M.R. Taghizadeh, Applications of Process Capability and Process Performance Indices, *Journal of Applied Sciences*, vol 6, Issue 5, pp.1186-1191, 2006.

### پی‌نوشت

1. perforations
2. experimental frequency
3. Heydenrich
4. Logit
5. Probit
6. log-log
7. Covolume

8. non-homogeneous Poison process (NHPP)
9. maximum likelihood estimation (MLE)
10. lower bound
11. upper bound
12. total time on test
13. gamma
14. Weibull

- 
15. exponential Resilience
  16. exponential Tilt
  17. generalized gamma
  18. Weibull Resilience
  19. Weibull Tilt
  20. generalized F
  21. log-logistic
  22. log-normal
  23. Akaike's information criterion
  24. Kolmogorov-Smirnov tests
  25. mixture
  26. mixture gamma
  27. mixture weibull
  28. mixture normal
  29. process capability
  30. upper specification limit
  31. lower specification limit