

تحلیل ترمومکانیکی و اپتیکی تفنگ الکترونی تیوب شتاب دهنده خطی ۶ مگا الکترون ولت

اصغر مهدیان^۱، احسان شیری و رنما خواستی^۲، و داود صالحی^۲

۱. مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

۲. شرکت بهیار صنعت سپاهان، شهرک علمی و تحقیقاتی، اصفهان

پست الکترونیکی: asmahdian@chmail.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵)

چکیده:

در این پژوهش، رفتار حرارتی و اپتیکی تفنگ الکترونی مورد استفاده در یک شتاب دهنده خطی با انرژی ۶ مگا الکترون ولت به صورت جامع بررسی شد. کاتد آزمایشی در شرایط خلاء نزدیک به کار (10^{-5} میلی بار) تا دمای عملیاتی 1050°C درجه سانتی گراد گرم شد و توزیع دما با استفاده از ترموکوپل و پیرومتر اندازه گیری شد. نتایج تجربی در توان های مختلف، مبنای اعتبارسنجی الگوسازی عددی انجام شده با نرم افزار کامسول قرار گرفت و صحت شبیه سازی حرارتی با انطباق دقیق نتایج، تأیید شد. در ادامه، تحلیل های ترمومکانیکی بر اساس نتایج دمایی انجام شد و هندسه قطعات برای کاهش تنش های ناشی از تغییر شکل حرارتی در اجزای بدنه بهینه سازی شد. مهم ترین بخش این پژوهش، بررسی اثرات دمایی بر ابعاد هندسی کاتد و تأثیر آن بر مشخصات باریکه الکترونی خروجی بود که با نرم افزار CST الگوسازی شد. با مقایسه باریکه خروجی در حالت سرد و گرم، ابعاد کاتد به گونه ای اصلاح گردید که ابعاد آن در شرایط گرم با ابعاد متناظر در حالت سرد مطابقت داشته باشد. این بهینه سازی ابعادی موجب شد که پرتوی الکترونی خروجی در شرایط عملیاتی مختلف، با مشخصات پرتو طراحی شده در حالت مرجع (سرد) برابر شود. این رویکرد مبتنی بر اعتبارسنجی تجربی، کارایی تفنگ الکترونی را تحت شرایط توان بالا تضمین می کند.

واژه های کلیدی: تفنگ الکترونی، تحلیل ترمومکانیکی، کامسول، CST، بهینه سازی

۱. مقدمه

یکی از چالش های بنیادین در عملکرد این تفنگ ها، ماهیت گرمایی آن است؛ کاتد تفنگ الکترونی برای دستیابی به گسیل الکترونی^۱ باید در دماهای بسیار بالا (حدود 1000°C درجه سانتی گراد) قرار گیرد. این دمای عملیاتی بالا منجر به پدیده ای به نام تغییر شکل حرارتی در اجزای مجاور، به ویژه در بخش های الکتروود کنترل کننده (ولنت)^۲ و ساقه می شود [۳]. هرگونه تغییر هندسی ناشی از نوسانات دمایی درون تفنگ، مستقیماً بر پارامترهای پرتوی خروجی تأثیر گذاشته و می تواند کارایی شتاب دهنده را تضعیف کند [۴]. در محیط خلأ تفنگ الکترونی، انتقال حرارت عمدتاً از طریق هدایت و تابش صورت

تفنگ های الکترونی به عنوان اجزای حیاتی در طیف وسیعی از دستگاه های الکترونی، از جمله لامپ های خلأ، شتاب دهنده های خطی، و میکروسکوپ های الکترونی، نقشی محوری ایفا می کنند. وظیفه اصلی این سامانه ها، تولید و شکل دهی دقیق یک پرتوی الکترونی است که برای عملکرد بهینه دستگاه های مزبور ضروری است [۱]. در واقع، کارایی کلی، طول عمر و قابلیت اطمینان دستگاه های مبتنی بر پرتو الکترونی وابستگی شدیدی به عملکرد تفنگ الکترونی به کار گرفته شده دارد [۲].

۱. Electron Emission

۲. Wehnelt

می‌گیرد [۵].

به‌منظور تحلیل دقیق رفتار ترمومکانیکی این سامانه‌ها در دماهای عملیاتی بالا، تحلیل المان محدود به ابزاری ارزشمند تبدیل شده است. این روش امکان مطالعه توزیع دما، شار حرارتی، تنش‌ها و تغییر شکل‌های قطعات مختلف تحت بارهای حرارتی را فراهم می‌کند [۶].

یائو و همکاران، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس، میدان دمایی حالت پایدار و تغییر شکل حرارتی یک تفنگ الکترونی را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از نرم‌افزار TWT CAD برای محاسبه تغییرات عملکرد اپتیک الکترونی تحت تغییر شکل حرارتی شبیه‌سازی شده استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که تغییر شکل حرارتی باعث تغییراتی در پارامترهای مهم پرتو الکترونی، مانند جریان کاتد، حداقل شعاع پرتو^۱ و حداقل موقعیت پرتو^۲ می‌شود. به طور مشخص، جریان کاتد از ۱/۴ آمپر به ۱/۴۵ آمپر افزایش یافت، حداقل شعاع باریکه، R_{min} ، کمی از ۰/۷۹۳ میلی‌متر به ۰/۷۹۷ میلی‌متر افزایش یافت و حداقل موقعیت پرتو، Z_{min} ، به دلیل تغییر شکل، به طور قابل توجهی از ۲۲/۹ میلی‌متر به ۲۳/۸ میلی‌متر افزایش یافت [۷].

در مطالعه دیگری توسط یائو و همکاران، تحلیل حرارتی یک تفنگ الکترونی را با استفاده از انسیس برای تعیین توزیع دما، با در نظر گرفتن رسانایی حرارتی، تابش و خواص مواد وابسته به دما ارائه شد. سپس، تحلیل ساختاری برای ارزیابی تغییر شکل اجزا تحت بارهای حرارتی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مربوط به توزیع دما و کرنش حرارتی از طریق اندازه‌گیری‌های دمای تجربی به‌وسیله ترموکوپل‌ها تأیید شد. مقایسه نتایج، به جز در دماهای پایین کاتد که احتمالاً به دلیل رسانایی از طریق کاوه‌های اندازه‌گیری است، توافق خوبی را نشان دادند. تحلیل تغییر شکل حرارتی با استفاده از نرم‌افزار MTSS، تغییرات کمتر از ۱۰٪ را برای پارامترهای پرتو مانند شعاع گلوئی و جریان نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که برای دستیابی به عملکرد قابل اعتماد تفنگ الکترونی تحت بارهای حرارتی عملیاتی، تنها اصلاحات هندسی محدودی در طراحی آن مورد

نیاز است [۲].

سو و همکاران، الگوهای حرارتی-مکانیکی جفت شده از یک تفنگ الکترونی را با استفاده از تحلیل المان محدود انسیس توسعه دادند. در تحلیل حرارتی، تماس نزدیک میان اجزا در نظر گرفته شد و مقاومت حرارتی فصل مشترک‌ها نادیده گرفته شد. در نتیجه، دماهای پیش‌بینی شده بالاتری در مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی به‌دست آمد. با این وجود، تحلیل ساختاری انجام‌شده بر اساس بارهای حرارتی محاسبه‌شده، اطلاعات مفیدی در مورد تنش‌ها و تغییر شکل‌های بالا ارائه داد. نتایج شبیه‌سازی نیز برای بهینه‌سازی طراحی و افزایش قابلیت اطمینان تفنگ مورد استفاده قرار گرفتند [۸].

اقبال و همکاران، یک تفنگ الکترونی سه قطبی با کاتد گرمایونی^۳ را برای شتاب‌دهنده خطی BEPCII بررسی کردند. تحلیل المان محدود در انسیس، انبساط حرارتی تفنگ را در دماهای عملیاتی تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد شبیه‌سازی کرد. تغییر شکل‌های شعاعی کوچک تا ۰/۱۶۵ میلی‌متر در اجزایی مانند کاتد و شبکه ایجاد شد. شبیه‌سازی‌های پرتوی EGUN، این تغییر شکل‌ها را برای مقایسه پارامترهای پرتو گرم و سرد در نظر گرفت. تغییرات ناچیز در جریان، واگرایی و نفوذپذیری، تأیید کرد که طراحی تفنگ می‌تواند اثرات انبساط حرارتی را بدون تأثیر منفی بر ویژگی‌های پرتو الکترونی مورد نیاز برای شتاب‌دهنده، تحمل می‌کند [۶].

جانگ و همکاران، یک تحلیل ترمومکانیکی جامع از یک تفنگ الکترونی مورد استفاده در کلاسترون‌های پر قدرت ارائه کردند. مطالعه آنها شامل الگوسازی المان محدود با انسیس برای شبیه‌سازی تغییر شکل ساختاری ناشی از گرمایش کاتد بود که هندسه تفنگ الکترونی تغییر یافته در اثر حرارت را تعیین می‌کرد. شبیه‌سازی‌های ذرات با استفاده از نرم‌افزارهای EGUN و CST، اپتیک پرتو را بین طرح‌های اصلی و اصلاح‌شده مقایسه کردند. نتایج نشان داد که خواصی مانند نفوذ تا ۱۷٪ افزایش یافته و شعاع پرتو بیش از ۲۵٪ به دلیل اعوجاج‌های ایجاد شده در طول عملیات تغییر کند. این مطالعه اهمیت در نظر گرفتن

۱. R_{min}

۲. Z_{min}

۳. Triode electron gun with Thermionic cathode

اثرات حرارتی در طراحی تفنگ الکترونی را از طریق تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی‌های چندفیزیکی برجسته می‌کند [۳].
باندیوپادیا و همکاران، شبیه‌سازی‌های حرارتی یک تفنگ الکترونی چند پرتوی را برای یک کلایسترون باند Ku با استفاده از نرم‌افزار سالدورکس^۱ انجام دادند. بهینه‌سازی هندسه، توزیع دمای یکنواخت ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد را در سراسر کلیدهای انتشار با توان ورودی ۶ تا ۸ وات تضمین کرد. نتایج همچنین حداکثر جابه‌جایی صفحه کاتد را در دماهای عملیاتی حدود ۰/۴۴۸ میلی‌متر پیش‌بینی کرد. در این مطالعه، رفتار و تغییر شکل‌های ترمومکانیکی با هدف حفظ گسیل پایدار الکترون و عملکرد مناسب کلایسترون بررسی شد [۹].

او و همکاران، یک تجزیه و تحلیل ترمومکانیکی از یک تفنگ الکترونی انجام دادند تا اثرات تغییرات دما بر خواص پرتو الکترونی را درک کنند. در این مطالعه، هندسه واقعی سامانه ساده‌سازی و گسسته‌سازی شد و خواص مواد جدید تعریف شد. تجزیه و تحلیل آن‌ها به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل شد که با استفاده از الگوریتم L-BFGS حل شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که L-BFGS در پیش‌بینی توزیع دما و مقادیر در نقاط کلیدی، دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، درحالی‌که زمان محاسباتی و مصرف حافظه کمتری دارد. این امر به بهینه‌سازی طراحی تفنگ برای افزایش طول عمر عملیاتی در شرایط توان بالا کمک کرد [۵].

روی و همکاران، با استفاده از انسیس و تحلیل مکانیکی حالت پایدار تغییر شکل، تحلیل حرارتی سازه را انجام دادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های دمای تجربی با استفاده از یک پیرومتر مقایسه شد تا شبیه‌سازی‌ها اعتبارسنجی شوند. ردیابی ذرات با استفاده از CST-PS نشان داد که تغییر شکل، اندازه گلوئی پرتو و انتقال آن را تغییر می‌دهد. این تغییرات، با تنظیم اولیه کاتد و موقعیت الکترومترکز و اعمال ولتاژ بایاس الکترونیکی رو به جلو در شبیه‌سازی‌ها جبران شد و منجر به همان پرتو بهینه بدون تغییر شکل شد [۱۰].

عملکرد یک تفنگ الکترونی گرمایونی با دمای عملیاتی بالای آن (تقریباً ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد)، به دلیل تغییر شکل حرارتی

می‌تواند منجر به تغییرات اندازه در اجزای مختلف آن شود. از این‌رو، در این پژوهش ابتدا یک تحلیل حرارتی برای محاسبه این تغییرات اندازه و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر خروجی پرتو الکترونی انجام می‌شود. سپس، ابعاد جدید بر اساس ابعاد گرم (ابعاد در طول دمای عملیاتی) تعیین می‌شوند و تغییرات در پرتو الکترونی به طور کامل بررسی می‌شود. بخش ۲، بر ویژگی‌های حرارتی یک کاتد نمونه تمرکز دارد که به طور خاص برای تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف در طول آزمایش‌های مختلف ساخته شده است. بخش ۳، به بررسی ویژگی‌های حرارتی خود تفنگ الکترونی گرمایونی می‌پردازد. در این بخش، توزیع گرمای تولید شده در طول عملکرد تفنگ و تأثیرات آن بر اجزای تفنگ بررسی می‌شود.

در بخش ۴، تغییر شکل‌های حرارتی ناشی از تغییرات دما در اجزای تفنگ به دقت بررسی شده و ابعاد گرم تفنگ الکترونی گرمایونی محاسبه می‌شود. تغییرات در خروجی پرتو الکترونی از تفنگ الکترونی گرمایونی، با در نظر گرفتن ابعاد سرد و گرم، در بخش ۵ با استفاده از نرم‌افزار CST تجزیه و تحلیل می‌شود. در بخش ۶، روشی برای جبران هرگونه انحراف در پرتوی خروجی معرفی می‌شود و روش‌های بهینه‌سازی برای تفنگ الکترونی گرمایونی بررسی می‌شوند.

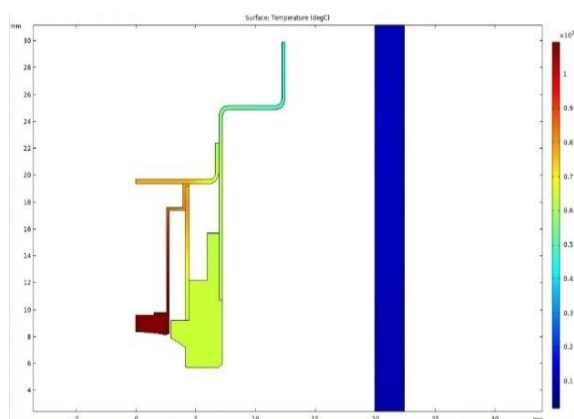
۲. آزمون‌های تجربی

یک سامانه آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی داده‌های شبیه‌سازی در شرکت بهیار صنعت سپاهان، بر اساس پیکربندی نشان داده شده در شکل ۱، توسعه داده شده است. این سامانه شامل قرار دادن کاتد مورد بررسی در داخل یک لوله شیشه‌ای و تخلیه محفظه آن تا فشار تقریبی 10^{-6} تور^۲ بود.

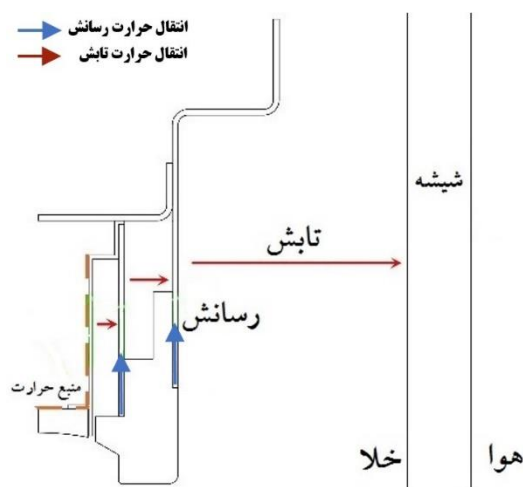
هدف از این مرحله، شبیه‌سازی شرایط عملیاتی تفنگ الکترونی و به حداقل رساندن مؤثر برهم‌کنش‌های گازی و پراکندگی الکترون بود. پس از آن، عنصر گرمایش با ولتاژ الکتریکی تغذیه شد تا اجزا به دمای عملیاتی تعیین شده خود برسند. برای حفظ شرایط پایدار، زمان لازم برای رسیدن به تعادل حرارتی و دمای

۱. Solidworks

۲. Torr



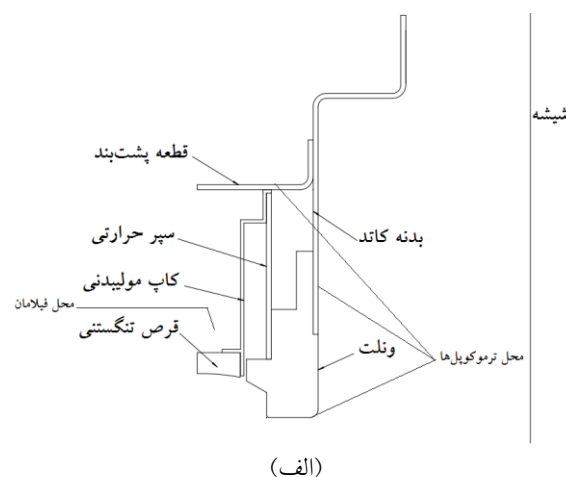
شکل ۲. طرح‌واره انتقال حرارت در سامانه مورد مطالعه.



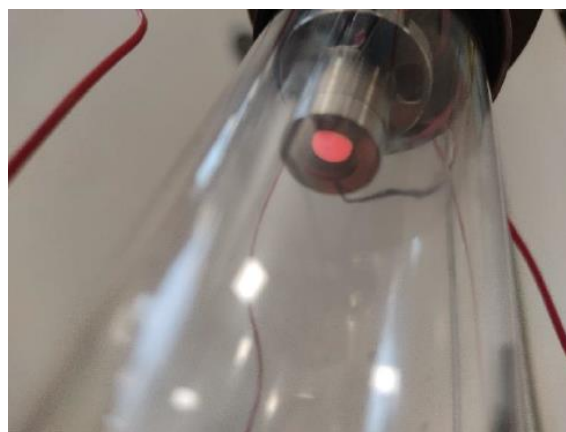
شکل ۳. توزیع دمای قطعات هنگام شبیه‌سازی در توان ۲۵/۹۶ وات.

طیف وسیعی از مسائل است. تجزیه و تحلیل حرارتی شامل دو مرحله است: تجزیه و تحلیل کاتد در محفظه شیشه‌ای و مطالعه مجموعه کامل تفنگ الکترونی. از آنجایی که سامانه در محیط خلاء کار می‌کند، همرفت وجود ندارد و انتقال حرارت عمدتاً از طریق رسانایی و تابش رخ می‌دهد. بار حرارتی به سطوح داخلی اجزای کاتد که با رشته در تماس هستند اعمال می‌شود، در حالی که شرایط مرزی تابش برای سطوح اجزا در نظر گرفته می‌شود. سطح بیرونی لوله در معرض انتقال حرارت همرفتی با هوای محیط با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد. مقاومت حرارتی در نقاط تماس بین اجزا در این تحلیل نادیده گرفته شده است. شکل ۲، طرح‌واره انتقال حرارت را نشان می‌دهد و جدول ۲ مواد مورد استفاده در اجزا، از جمله خواص وابسته به دما که از کتابخانه مواد کامسول به دست آمده است، را ارائه می‌دهد.

شکل ۳، توزیع دما در اجزا را نشان می‌دهد و مشخصات دمای



(الف)



(ب)

شکل ۱. (الف) طرح‌واره کاتد و محل ترموکوپل، (ب) نمونه ساخته شده را نشان می‌دهد.

مربوطه با استفاده از ترموکوپل‌های نشان داده شده در شکل ۱ و همچنین یک پیرومتر حرارتی، اندازه‌گیری شد. این ابزارها، پایش دقیق تغییرات دما در سراسر سامانه را تسهیل کردند. اطلاعات دقیق در مورد دمای اجزای مختلف تفنگ الکترونی در سطوح مختلف توان را می‌توان در جدول ۱ یافت.

۳. تحلیل حرارتی

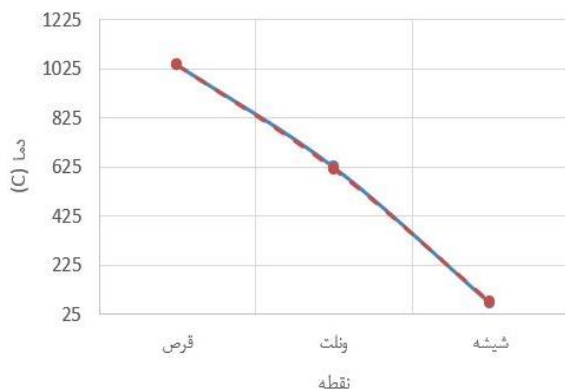
برای تسهیل گسیل الکترون، کاتد تا دمای تقریبی ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شود. در نتیجه، اجزای اطراف، از جمله الکتروود کنترل‌کننده (ونلت)، نگهدارنده کاتد و سایر عناصر، تغییر شکل حرارتی را تجربه می‌کنند. تغییر شکل و جابه‌جایی نسبی این اجزا تأثیر مستقیمی بر مشخصات پرتوی الکترونی خروجی دارد. برای بررسی انتقال حرارت در حالت پایدار، از نرم‌افزار اجزای محدود کامسول استفاده کردیم که قادر به حل

جدول ۱. دمای اندازه‌گیری شده نقاط مختلف، در توان‌های مختلف.

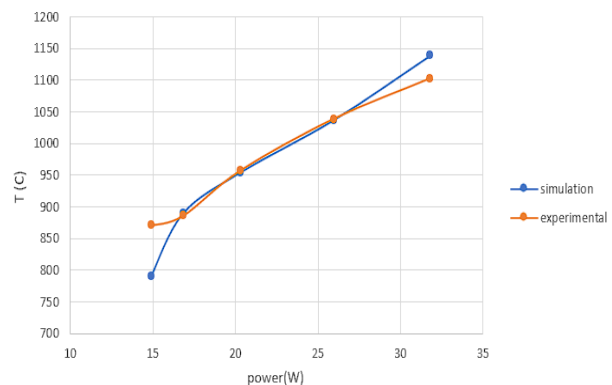
توان (W)	۷	۱۴/۹	۱۶/۸۳	۲۰/۳	۲۲/۴	۲۵/۹۶	۳۱/۷۹
دمای کاتد (C)	-	۸۷۰/۶	۸۸۵/۵۶	۹۵۷	۹۳۷/۷۸	۱۰۳۸/۶	۱۰۳۸/۱
دمای ونلت (C)	۳۷۱	۵۲۰	۵۴۹	۵۷۸	۵۷۹	۶۱۵	۶۶۸/۳

جدول ۲. مواد مورد استفاده برای اجزا.

قطعه	قرص	ونلت	کاپ مولیبدنی	سپر حرارتی	بدنه کاتد	پشت‌بند
جنس	تنگستن	استیل ۳۰۴	مولیبدن	استیل ۳۰۴	استیل ۳۰۴	استیل ۳۰۴

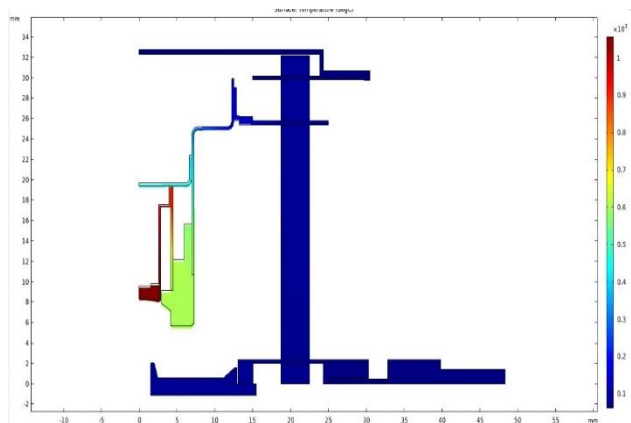


(ب)

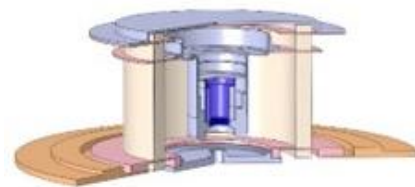


(الف)

شکل ۴. (الف) دمای کاتد در توان‌های مختلف در شبیه‌سازی و حالت تجربی، (ب) دمای نقاط مختلف در شبیه‌سازی و حالت تجربی.



(ب)

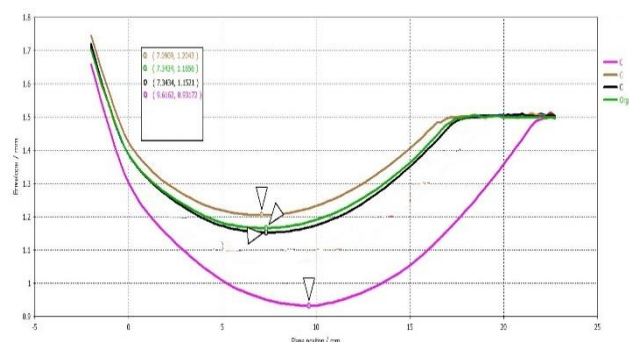


(الف)

شکل ۵. (الف) تفنگ الکترونی طراحی شده، (ب) توزیع دما در قطعات داخلی تفنگ الکترونی.

است. در نهایت، یک تحلیل حرارتی حالت پایدار روی تفنگ الکترونی در سطوح مختلف توان انجام شد. توان حرارتی ۱۴/۵ وات برای دستیابی به دمای عملیاتی مطلوب کاتد، یعنی ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد، تعیین شد. شکل ۵. (الف) طراحی تفنگ الکترونی را نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۵. (ب) بینشی در مورد توزیع دما در اجزای مختلف ارائه می‌دهد.

شبیه‌سازی شده کاتد با نتایج تجربی در شکل ۴ مقایسه شده است. به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی، دمای اجزای مختلف با استفاده از ترموکوپل‌ها اندازه‌گیری و نتایج در کنار داده‌های شبیه‌سازی ارائه شده‌اند. توافق نزدیک بین داده‌های شبیه‌سازی و تجربی، به ویژه در اندازه‌گیری غیرتماسی دمای کاتد، نشان می‌دهد که هرگونه تغییر دمایی مشاهده شده در اندازه‌گیری‌های ترموکوپل، عمدتاً به دلیل رسانایی حرارتی سیم‌های ترموکوپل



شکل ۹. شعاع پرتو به فاصله از کاتد.



شکل ۶. انبساط حرارتی.

جدول ۳. مشخصات پرتو در حالت سرد و گرم.

حالت	شعاع پرتو (میلی متر)	موقعیت گلوپی پرتو (میلی متر)	جریان پرتو (میلی آمپر)
حالت سرد	۱/۱۶	۷/۳۴	۵۰۱
حالت گرم	۰/۹۳	۹/۶۱	۴۶۵

جدول ۴. مشخصات پرتو خروجی.

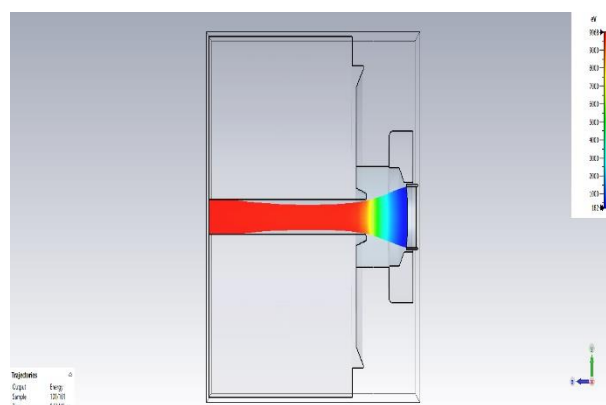
حالت	شعاع پرتو (میلی متر)	موقعیت گلوپی پرتو (میلی متر)	جریان پرتو (میلی آمپر)
حالت سرد	۱/۱۶	۷/۳۴	۵۰۱
حالت گرم ۱	۰/۹۳	۹/۶۱	۴۶۵
حالت گرم ۲	۱/۲	۷/۰۹	۵۲۵
حالت گرم ۳	۱/۱۵	۷/۳۴	۵۰۰

جدول ۵. تغییرات قطر کاتد.

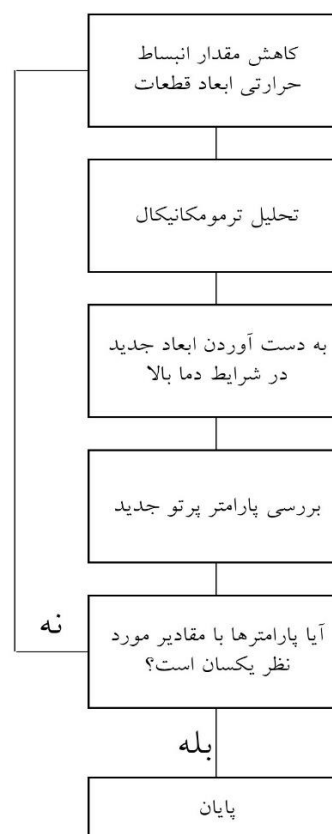
حالت	سرد	گرم ۱	گرم ۲	گرم ۳
قطر کاتد (میلی متر)	۵/۶	۵/۵۸	۵/۶۲	۵/۶۴

۴. تحلیل مکانیکی

بر اساس نتایج تحلیل حرارتی شبیه سازی شده، انبساط حرارتی اجزای مختلف تفنگ الکترونی با استفاده از نرم افزار کامسول محاسبه شد. در این تحلیل، جابه جایی عمودی سطح پایینی تفنگ الکترونی به عنوان یک شرط مرزی در جهت ارتفاع محدود شد. رویکرد جفت شده دما-جابه جایی به کار گرفته شد که شامل خواص مکانیکی مانند مدول یانگ، نسبت پواسون، ضریب انبساط حرارتی و سایر خواص وابسته به دما به دست آمده از کتابخانه مواد در نرم افزار کامسول است. شکل ۶، انبساط حرارتی کاتد را در مقایسه با ابعاد اصلی، که با ضریب ۱۰ افزایش یافته است، نشان می دهد. این تحلیل نشان داد که



شکل ۷. نمایه پرتو.



شکل ۸. مراحل اصلاح ابعاد.

بدیهی است که نتایج نهایی به نتایج اولیه مطلوب بسیار نزدیک هستند و اختلاف بین آن‌ها حداقل است.

۷. نتیجه گیری

در این تحقیق تحلیل ترمومکانیکی تفنگ الکترونی انجام شد و نتایج نشان داد که دمای قطعات شبیه سازی شده با داده های تجربی همخوانی بسیار خوبی دارد. دمای قرص تنگستنی که با استفاده از روش اندازه گیری غیر تماسی به دست آمده بود، با نتایج شبیه سازی مطابقت داشت و دمای سایر نقاط نیز با وجود کمی اختلاف، به دلیل استفاده از ترموکوپل، از دقت قابل قبولی برخوردار بود.

ابعاد و دمای نهایی کاتدها در حالات مختلف مشابه بود، به طوری که تغییر شکل ایجاد شده در آن‌ها تقریباً برابر بود، و تنها تفاوت مشاهده شده در فاصله کاتدها تا آند ناشی از تغییر شکل حلقه نگهدارنده کاتد بود. تفاوت ضریب انبساط حرارتی قطعات مختلف موجب شد که تنش و تغییر ابعاد اجزای کاتد متفاوت باشد. به ویژه، محفظه مولیبدنی نگهدارنده قرص تنگستنی نسبت به سایر قطعات طول متفاوتی پیدا کرد که بر ابعاد سرد مراحل بعدی اثرگذار بود. در ابتدا تغییرات طولی قطعات تأثیر محدودی بر عملکرد تفنگ داشت، اما با اعمال اصلاحات شعاعی، توزیع دما و تنش بهبود یافت و نتایج مطلوب تری حاصل شد.

این نتایج نشان می دهد که شبیه سازی ترمومکانیکی همراه با بررسی دقیق تغییر شکل و تنش ها می تواند در بهینه سازی طراحی تفنگ الکترونی و اطمینان از عملکرد پایدار آن در شرایط عملیاتی مؤثر باشد.

حداکثر کرنش حرارتی در امتداد طول کاتد 0.33% میلی متر، و حداکثر کرنش حرارتی در امتداد عرض 0.07% میلی متر است.

۵. تحلیل اپتیکی پرتو

نتایج شبیه سازی مکانیکی در نرم افزار CST برای بررسی تأثیر تغییر شکل حرارتی بر ویژگی های پرتو الکترونی خروجی، از جمله شعاع پرتو، موقعیت گلوئی و جریان خروجی، استفاده شد. شکل ۷، به صورت تصویری نمایه پرتوی گسیل شده از تفنگ الکترونی را نشان می دهد، در حالی که جدول ۳ شرح مفصلی از چگونگی تأثیر تغییر شکل حرارتی اجزا بر پرتو الکترونی ارائه می دهد. دمای بالاتر باعث تغییرات ابعادی در داخل تفنگ الکترونی می شود که منجر به تغییر 0.23% میلی متر در شعاع پرتو و 2.27% میلی متر در موقعیت گلوئی می شود.

۶. بهینه سازی تفنگ الکترونی

به منظور جبران تغییرات پارامترهای پرتو خروجی، تغییراتی در ابعاد اولیه کاتد انجام شد تا اثرات تغییر شکل حرارتی کاهش یابد. روند این فرایند در شکل ۸ نشان داده شده است. در این روش، با کم کردن اختلاف بین ابعاد حاصل از تغییرات دما و ابعاد اولیه، شبیه سازی تکرار شد. این فرایند تکراری دو بار انجام شد تا نتایج نهایی با نتایج اولیه همسو شوند.

مشخصات پرتو الکترونی خروجی در جدول ۴ و تغییرات ابعاد کاتد در جدول ۵ ارائه شده اند، در حالی که شکل ۹ نمودار پوششی پرتو الکترونی را در وضعیت های مختلف نشان می دهد.

مراجع

1. A Leggieri, D Passi, F Di Paolo, B Spataro, E Dyunin, *Vacuum*, **122** (2015).
2. L Yao, K Zhang, H Yu, T Huang, B Li, *Rev. Sci. Instrum.* **83** (2012) 024701.
3. K H Jang, K Y Oang, I H Baek, et al., *J. Korean Phys. Soc.* **73** (2018) 466.
4. M Iqbal, Z Wasy, A Wasy, M A K Lodhi, *Rev. Sci. Instrum.* **84** (2013) 56113.
5. Y Ou, W Liu, L L Yang, et al., *NEMO*, **18** (2020).
6. M Iqbal, A Wasy, G U Islam, Z Zhou, *Rev. Sci. Instrum.* **85** (2014) 023304.
7. L Yao, L Xiao, Z Yang, *High Power Laser Pratical Beams*, **16** (2004) 10.
8. W Sue, J Zhu, R Liu, F Song, *ICRMS*, **12** (2014).
9. A K Bandyopadhyay, A Nagaraju, R Guha, et al., *IVEC*, **12** (2019).

-
10. L Rui, J Wang, et al., IEEE Trans. *Electron Devices*, **67** (2020) 684.