

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در آغازگر الکتریکی بر پایه سیم پل داغ شونده

رضا سهرابی^۱، محمد ابوالقاسمی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد پژوهشگاه فضایی ایران
(تاریخ وصول: ۹۸/۱۱/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۱)

چکیده

آغازگر الکتریکی یک جزء مهم زنجیره انفجار است که با تبدیل جریان الکتریکی به گرما توسط سیم‌پل، انرژی لازم برای شروع یک واکنش شیمیایی را فراهم می‌کند. این آغازگر به علت وزن پایین و قابلیت اطمینان بالا، در حوزه صنایع هوافضا کاربرد گسترده‌ای در موتورهای سوخت جامد، سامانه‌های جدایش و ... دارد. در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد آغازگر الکتریکی معرفی شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با روش تفاضل محدود و داده‌های تجربی نشان داد که این مدل توانایی پیش‌بینی زمان آغازش و تعیین پروفایل دمای ناپایا در راستای محوری و شعاعی را دارد. مدل مذکور نشان داد که کاهش ضریب انتقال حرارت تماسی بین سیم‌پل و ماده آغازگر در مقایسه با افزایش آن تأثیر بیشتری بر زمان آغازش دارد. همچنین مشخص شد که با افزایش شدت جریان، تغییرات دما در راستای محوری کاهش و در راستای شعاعی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آغازگر الکتریکی، شبیه‌سازی انتقال حرارت، زمان آغازش، ضریب انتقال حرارت تماسی، سیم‌پل.

Numerical Simulation of the Heat Transfer in the Electric Hot Bridgewire Initiator

R. Sohrabi, M. Abolghasemi

Iranian Space Research Center

(Received: 01/30/2020, Accepted: 08/22/2020)

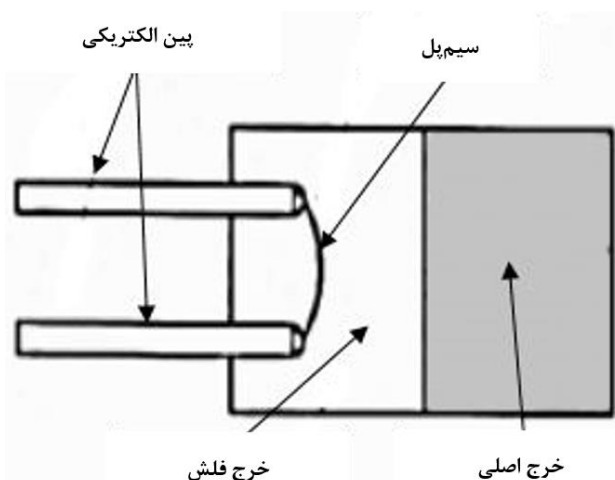
Abstract

The electric initiator is an important component of the explosive train which provides required energy to initiate a chemical reaction by converting the electric current to the heat via a bridgewire. This initiator is widely used in the field of aerospace industry in the solid rocket propellant motors, separation systems and etc due to its low weight and high reliability. In this research, a mathematical model has been introduced to investigate the effective parameters on the electric initiator performance. Comparison of numerical simulation results by finite difference method and experimental data showed that this model has the ability of the prediction of the ignition time and determine the transient temperature profile in axial and radial direction. The model showed that the reduction of the contact heat transfer coefficient between the bridgewire and the primer compared to its increase has a greater effect on the heat transfer rate. It was also found that with increasing the current, the temperature changes decreased along the axial direction and increased in radial direction.

Keywords: Electric Initiator, Heat Transfer, Numerical Simulation, Current, Temperature, Bridge Wire.

۱- مقدمه

جهت دستیابی به آغازش مناسب خرج فلش توسط انتقال حرارت از سیم‌پیل به آن، خرج باید در تماس بسیار نزدیک با سیم‌پیل قرار گیرد. از آنجایی که قطر سیم‌پیل کوچک است خرج فلش کاملاً آسیاب و همگن می‌گردد به طوری که مقدار و ترکیب مواد در همه جا در تماس با سیم‌پیل یکسان باشد. مهم‌ترین مؤلفه‌ای که باید در انتخاب خرج فلش لحاظ نمود، سازگاری بین سیم‌پیل و سایر اجزای آن و توانایی مجموعه در انجام عمل مناسب در زمان تحریک است. موادی که معمولاً به عنوان خرج فلش مصرف می‌شوند عبارت‌اند از: آزید سرب، استیفاتات سرب، مخلوط آمونیوم پراکرات و زیرکونیوم [۴]. در تحقیق حاضر از این پس، آغازگر الکتریکی بر پایه سیم‌پیل داغ به اختصار آغازگر الکتریکی نامیده می‌شود. شکل (۲) سطح مقطع عرضی یک آغازگر الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سطح مقطع عرضی یک آغازگر الکتریکی [۳].

مطالب ارائه شده در این مقاله مشتمل بر سه بخش است. ابتدا مدل ریاضی مربوط به پدیده انتقال حرارت دوبعدی در آغازگر الکتریکی به همراه فرضیات ساده کننده آن معرفی شده است. سپس معادلات دیفرانسیل بقای انرژی استخراج شده و شرایط مرزی آن، با استفاده از روش تفاضل محدود به فرم عددی درآمده و به کمک یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار متلب، حل شده است. در نهایت نتایج حاصل با استفاده از نمودارها توضیح داده شده است.

۲- شبیه‌سازی عددی آغازگر الکتریکی

۲-۱- انتقال حرارت در آغازگر الکتریکی

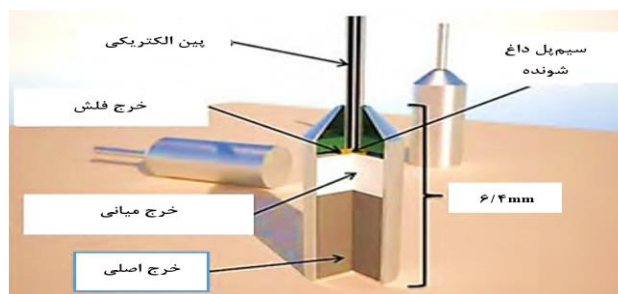
نخستین گام جهت طراحی یک آغازگر الکتریکی، تعیین میزان انرژی لازم جهت آغازش مواد اطراف سیم‌پیل است. این موضوع به عوامل متعددی همچون نوع خرج فلش و چگالی بارگذاری آن، جنس و قطر

هر وسیله‌ای که یک تحریک فیزیکی نظیر جریان الکتریکی، ضربه، اصطکاک، خراشیدن و... را به واکنش گرمازا در ماده شیمیایی تبدیل کند، آغازگر نامیده می‌شود. نتیجه واکنش به صورت فشار، گرما، موج شاک و یا ترکیبی از این موارد ظاهر می‌گردد. در یک تقسیم‌بندی کلی آغازگرها به دو دسته الکتریکی و مکانیکی تقسیم می‌شوند. آغازگرهای مکانیکی معمولاً عملکرد ساده‌تری دارند. اما در صورت نیاز به عملکرد سریع و یا کنترل از راه دور، آغازگر الکتریکی اولویت دارد [۱].

چندین روش برای آغازش مواد پراثرژی در آغازگرهای الکتریکی وجود دارد که عبارت‌اند از: استفاده از سیم‌پیل داغ، سیم‌پیل انفجاری، پل فیلمی و استفاده از جرقه ناشی از تخلیه الکتریکی بین دو الکترود. عمده‌ترین تفاوت این روش‌ها، اختلاف در مشخصات الکتریکی آن‌هاست. مبنای انتخاب هر روش، در نظر گرفتن عواملی همچون نوع ورودی و خروجی مطلوب، زمان عملکرد، قیمت، اندازه، وزن و قابلیت اطمینان است [۱].

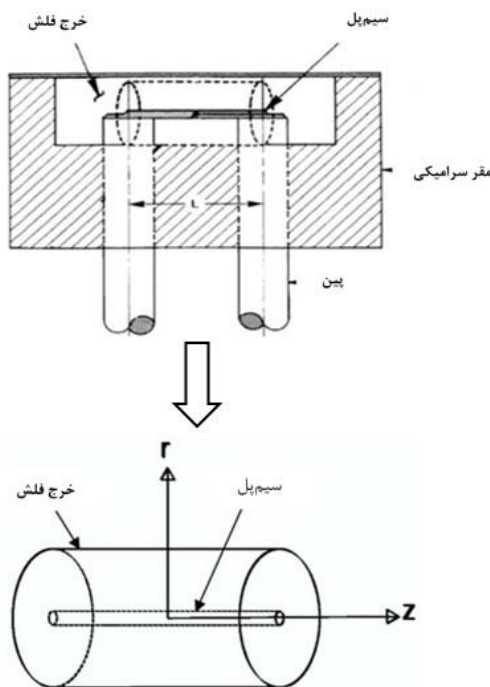
آغازگرهای الکتریکی بر پایه سیم‌پیل داغ، دسته مهمی از آغازگرهای الکتریکی هستند که در آن‌ها یک سیم کوچک درون یک ماده قابل اشتعال از نوع ماده منفجره آغازگر و یا پیروتکنیک قرار داده می‌شود. بر اساس قانون ژول - لنز، جریان الکتریکی سبب گرم شدن سیم و بالا رفتن دمای ماده منفجره تا نقطه اشتعال می‌شود. سپس واکنش سوختن، آغاز و تا رسیدن به جزء بعدی در زنجیره انفجار، که یک پیروتکنیک دیگر یا یک ماده منفجره است، ادامه می‌یابد. در شکل (۱) اجزای مختلف یک نمونه آغازگر الکتریکی با نام U.S. Army M55 نشان داده شده است. در این آغازگر از سه لایه مواد استفاده شده است. اولین لایه که در تماس مستقیم با سیم‌پیل قرار دارد خرج فلش یا ماده آغازگر نامیده می‌شود.

دو جزء سیم‌پیل و خرج فلش در همه انواع آغازگرهای با سازوکار سیم‌پیل داغ شونده مشترک بوده ولی از نظر ابعاد، شکل و جزئیات ساختاری، به‌طور قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر متفاوت‌اند [۲]. آغازش الکتریکی به وسیله سیم‌پیل داغ، ساده‌ترین راه آغازش به وسیله گرما است. چراکه حجم، مقاومت و ظرفیت گرمایی سیم‌پیل قابل اندازه‌گیری است. به بیان دیگر در این روش میزان انرژی لازم جهت آغازش خرج فلش به‌سادگی قابل محاسبه است [۱].



شکل ۱- نمای کلی از یک آغازگر الکتریکی [۳].

- 1- Hot Bridge Wire
- 2- Exploding Bridge Wire
- 3- Film Bridge
- 4- Spark Gap



شکل ۳- ساختار سیم پیل و خرج فلش در مدل ریاضی.

معادله کلی بقای انرژی برای یک المان دیفرانسیلی سامانه فوق با رابطه (۱) داده شده است [۱۱].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{A(r, z, t)}{K} \quad (1)$$

رابطه (۲) لاپلاسیان دما در مختصات استوانه‌ای را نشان می‌دهد [۱۱].

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

در جدول (۱) متغیرهای مربوط به معادله‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مربوط به معادله‌های (۱) و (۲).

ردیف	نام پارامتر	علامت پارامتر
۱	ضریب نفوذ حرارتی	$a = K/\rho c$
۲	ضریب هدایت حرارتی	K
۳	گرمای ویژه	c
۴	چگالی	ρ
۵	دما در لحظه t	T
۶	نرخ تولید گرما در واحد حجم در لحظه t	A

جملات معادله (۱) از چپ به راست به ترتیب نرخ افزایش دما در المان، نرخ خالص نفوذ گرما و نرخ خالص تولید گرما را نشان می‌دهند. با توجه به فیزیک مسئله، می‌توان یک سری فرضیات جهت حل ساده‌تر معادله بالا به کار برد که عبارتند از:

۱- مشخصات حرارتی ماده آغازگر (نظیر ظرفیت گرمایی، ضریب نفوذ حرارتی و ضریب هدایت حرارتی و...) مستقل از دما در نظر گرفته شده

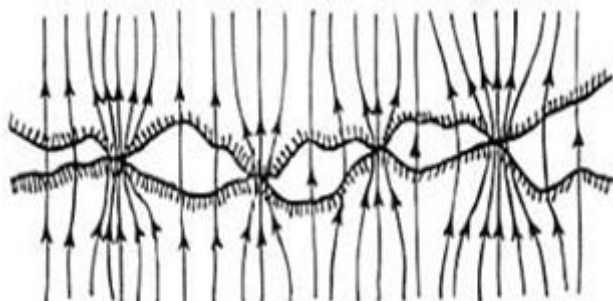
سیم پیل، زمان مطلوب جهت آغازش و نیز نحوه انتقال و اتلاف حرارت در سه بعد مکانی و... بستگی دارد. با توجه به گستردگی و تداخل این عوامل، تاکنون روش‌های متعددی جهت طراحی آغازگر الکتریکی توسعه یافته است. رزنتال [۵] برای نخستین بار تابعیت دمای سیم پیل برحسب زمان در آغازگر الکتریکی را مشخص نمود. استرسزو و همکارانش [۶] یک رابطه تجربی ارائه نمودند که در آن انرژی مورد نیاز آغازش به‌عنوان تابعی از قطر و طول سیم پیل در آغازگر الکتریکی بر پایه استیفات سرب مشخص می‌شود. نظر به ماهیت پیچیده انتقال حرارت از سیم پیل به ماده آغازگر و نیز دشواری آزمایش‌های تجربی در این حوزه، همواره مدل‌سازی ریاضی و شبه‌سازی عددی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. فاریا و همکارانش [۷] با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده و با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، یک معادله دیفرانسیل معمولی را برای تعیین وابستگی زمان عملکرد آغازگر به مقاومت سیم پیل و ظرفیت گرمایی آن توسعه دادند. آن‌ها همچنین با تطبیق این مدل بر نتایج تجربی، یک محدوده عملکردی ایمن برای آغازگر الکتریکی پیشنهاد کردند. میشررا و همکارش [۸] یک روش آزمایشگاهی تکرارپذیر برای تعیین طول سیم، محدوده پالس الکتریکی و انرژی مورد نیاز جهت عملکرد آغازگر الکتریکی به کار بردند. یک مدل ریاضی ایده‌آل توسط نان و همکارانش [۹] معرفی شده که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح، پاسخ آغازگر الکتریکی به تخلیه الکترواستاتیک را نشان می‌دهد. در این مدل از مقاومت حرارتی تماسی بین سیم پیل و خرج فلش صرف نظر شده و صحت نتایج شبه‌سازی عددی با استفاده از داده‌های تجربی تأیید شده است. شی و همکارانش [۱۰] سیم پیل را بدون ماده آغازگر در نظر گرفته و نتایج حل تحلیلی و عددی معادلات پایای انتقال حرارت و تطابق با داده‌های تجربی را صحت سنجی نموده‌اند.

در این تحقیق، یک مدل ریاضی جامع جهت تعیین توزیع دما در آغازگر الکتریکی معرفی شده است. در این مدل معادلات بقای انرژی معرفی شده و سپس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، توزیع دمای ناپایا در دو راستای محوری و شعاعی به دست آمده است. تقریباً همه عوامل مؤثر بر انتقال حرارت در آغازگر الکتریکی در این مدل در نظر گرفته شده و لذا برای هر دو منظور طراحی و ارزیابی عملکرد آغازگر الکتریکی قابل استفاده است.

۲-۲- مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی ریاضی عبارت است از توصیف یک سامانه با استفاده از زبان و ابزارهای علم ریاضی. در مدل‌سازی به‌کاررفته در این تحقیق، سیم پیل و ماده آغازگر اطراف آن به صورت دو استوانه هم‌مرکز در یک سامانه جامد ایزوتروپیک، هم‌گن و با گرمایش داخلی در دستگاه مختصات استوانه‌ای دوبعدی (راستای محوری و شعاعی) در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۳)، این مدل نشان داده شده است.

خالی است که در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل، فلش‌ها جهت انتقال گرما از سیم‌پل به ماده آغازگر را نشان می‌دهند [۱۲].



شکل ۴- نقاط اتصال و حفرات در محل تماس دو جسم جامد.

در نقاط اتصال، گرما از طریق هدایت منتقل می‌شود. جهت سهولت در استخراج معادلات مربوطه، فضاهای خالی به صورت دو صفحه موازی فرض می‌شوند که انتقال حرارت از طریق گاز محبوس در آن و با سازوکار هدایت انجام می‌شود [۱۲].

به دست آوردن ضریب انتقال حرارت تماسی بین دو جسم جامد موضوع پیچیده‌ای است که تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی آن انجام شده است. عوامل زیادی بر این پارامتر مؤثر هستند که عبارتند از: میزان چسبیدگی دو جسم به یکدیگر، ثوابت هندسی و مکانیکی مختص هر ماده، ضریب هدایت حرارتی دو جزء جامد و جرم مولکولی آن‌ها، تعداد حفرات و مشخصات فیزیکی گاز محبوس در آن‌ها همچون ظرفیت گرمایی و جرم مولکولی، مشخصات هندسی و مکانیکی حفرات و... [۱۲].

گفتنی است که عوامل مؤثر بر انتقال حرارت در آغازگر الکتریکی از قبیل مقاومت سیم‌پل و یا ابعاد هندسی آن، مشخصات فیزیکی ماده آغازگر همچون ضریب انتقال حرارت هدایتی و یا ظرفیت گرمایی آن و... پارامترهای کمی هستند که جزء خصوصیات ماده بوده و با روش‌های متداول آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری هستند. در این میان تنها ضریب انتقال حرارت تماسی است که اندازه‌گیری مقدار و بررسی تأثیر تغییرات آن، با آزمایش تجربی به سادگی امکان‌پذیر نیست. بنابراین یک کارکرد اساسی مدل ریاضی، توانایی آن برای نشان دادن تأثیرات ضریب انتقال حرارت تماسی به عنوان یک پارامتر کنترلی مهم در نرخ انتقال حرارت و به تبع آن عملکرد آغازگر الکتریکی است. مهم‌ترین گام برای کالیبراسیون مدل ریاضی نیز، تعیین مقدار ضریب انتقال حرارت تماسی متناسب با هر آغازگر از طریق تطبیق نتایج مدل بر داده‌های تجربی است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- تحلیل تفاضل محدود

در این تحقیق برای حل معادله‌های (۳) و (۴) از روش تفاضل محدود مرکزی پیشرو استفاده شده که خود بر دو نوع صریح و ضمنی است. روش ضمنی منجر به تشکیل یک دستگاه معادلات خطی در هر گام

است. برای هر یک از این متغیرها، می‌توان یک مقدار متوسط در محدوده دمایی مورد نظر لحاظ کرد.

۲- تقارن در هندسه استوانه‌ای در نظر گرفته شده است.

۳- از نقش فعل و انفعالات شیمیایی گرمازا در ماده منفجره قبل از رسیدن آن به دمای بحرانی آغازش صرف نظر شده است.

۴- دمای سیم‌پل در محل اتصال آن به پین، برابر دمای محیط در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن فرضیات فوق، رابطه (۱) برای ماده آغازگر و سیم‌پل به ترتیب با معادله‌های (۳) و (۴) نشان داده می‌شود [۹] و [۱۱]. اندیس p و b به ترتیب نمایانگر ماده آغازگر و سیم‌پل هستند. در این معادلات دمای آغازگر با T_p ، دمای سیم‌پل با T_b و دمای محیط با T_a نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که جهت سهولت در انجام محاسبات دمای محیط برابر صفر در نظر گرفته شده است. همچنین I شدت جریان، L برابر با طول استوانه، r_b شعاع سیم‌پل، r_{p1} و r_{p2} به ترتیب شعاع داخلی و خارجی ماده آغازگر، h ضریب انتقال حرارت تماسی، K_b ضریب هدایت حرارتی و σ_b مقاومت الکتریکی ویژه سیم‌پل است.

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = a_p \nabla^2 T_p = a_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial t} = a_b \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_b}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} \right) + \frac{I^2 \sigma_b}{\rho c \pi^2 r_b^4} \quad (4)$$

شرایط اولیه و مرزی معادلات فوق در روابط (۵-۹) نشان داده شده است.

$$T_b |_{t=0} = T_p |_{t=0} = T_a \quad (5)$$

$$T_b |_{z=\pm \frac{L}{2}} = T_p |_{z=\pm \frac{L}{2}} = T_p |_{r=r_{p1}} = T_a \quad (6)$$

$$-K \frac{\partial T_b}{\partial r} |_{r=r_b} = h (T_b |_{r=r_b} - T_p |_{r=r_b}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial z} |_{z=0} = \frac{\partial T_p}{\partial z} |_{z=0} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial r} |_{r=0} = 0 \quad (9)$$

۳-۲- ضریب انتقال حرارت تماسی

همان‌طور که معادله‌های (۳) و (۴) و شرایط مرزی آن‌ها نشان می‌دهند، انتقال حرارت در مدل نشان داده شده در شکل (۳)، در چهار مرحله رخ می‌دهد. نخست تولید گرما در داخل سیم‌پل، دوم انتقال آن در دو راستای محوری و شعاعی، سوم انتقال حرارت از سیم‌پل به خرج فلش در محل فصل مشترک، چهارم انتقال حرارت درون خرج فلش.

اگرچه همه مراحل مذکور مؤثر هستند اما مرحله سوم نسبت به سایر مراحل، کنترل‌کننده نرخ انتقال حرارت است. تماس بین سیم‌پل و خرج فلش به صورت کامل برقرار نمی‌شود و در واقع فصل مشترک این دو جزء در ابعاد میکروسکوپی، ترکیبی از نقاط اتصال کامل و فضاهای

۳-۲- اعتبار سنجی

در این قسمت جهت اطمینان از صحت روش عددی، از نتایج تجربی ارائه شده توسط مسی [۱۴] استفاده شده است. این محقق یک آغازگر الکتریکی با نام MARK 45 MOD O را مورد بررسی قرار داده و زمان آغازش آن را در شدت جریان های مختلف اندازه گیری نموده است. به طور کلی جهت اندازه گیری زمان آغازش، تغییرات شدت جریان مورد بررسی قرار می گیرد. با عبور جریان الکتریکی، دمای سیم پیل افزایش یافته و گرمای تولید شده به خرج فلش منتقل می شود تا اینکه خرج فلش به دمای آغازش برسد. در لحظه آغازش در محل فصل مشترک سیم پیل و خرج فلش، فرآیند انتقال حرارت (نرخ و جهت انتقال حرارت) به دلیل تغییر فاز خرج فلش از جامد به گاز به شدت تغییر می کند. این تغییر شدید در انتقال حرارت، دمای سیم پیل را نیز به شدت تحت تأثیر قرار داده که این موضوع نیز باعث تغییرات در مقاومت الکتریکی و شدت جریان می شود. با استفاده از یک منبع تغذیه، اسیلوسکوپ و حسگر جریان، شدت جریان الکتریکی عبوری از سیم پیل برحسب زمان اندازه گیری می شود و اولین تغییر ناگهانی موجود در نمودار شدت جریان برحسب زمان به عنوان لحظه شروع آغازش شناسایی می شود. مشخصات سیم پیل و خرج فلش مورد استفاده در این آغازگر الکتریکی به ترتیب در جدول های (۲ و ۳) نشان داده شده است [۱۴].

جدول ۲- مشخصات سیم پیل آغازگر الکتریکی MARK 45 MOD O.

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	طول (L)	۰/۲۸۴۷ cm
۲	شعاع (r _b)	۰/۰۰۹۰۱ cm
۳	مقاومت ویژه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس (σ _b)	۰/۰۰۰۰۰۱۰۹ Ω.m
۴	ضریب انتقال حرارت هدایتی (K _b)	۰/۰۵ cal/sec.cm.°C
۵	چگالی (ρ _b)	۸/۵۰ gm/cm ^۳
۶	ظرفیت گرمایی (c _b)	۰/۱۲۶ cal /gm.°C
۷	ضریب دمایی مقاومت ویژه (α)	۰/۰۰۰۱۸ °C ^{-۱}

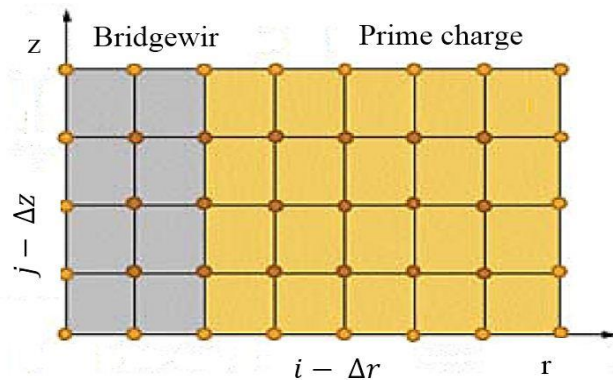
با توجه به توزیع دما در دو راستای شعاعی و محوری در خرج فلش، زمان رسیدن اولین نقطه به دمای آغازش، برابر زمان آغازش در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از مدل نشان داد که خرج فلش در مرکز فصل مشترک با سیم پیل نخستین نقطه ای است که به دمای آغازش می رسد. دمای این نقطه با T_{p_s} نشان داده می شود. در شکل (۶) تغییرات زمان آغازش برحسب شدت جریان که از دو روش آزمایش تجربی و تفاضل محدود به دست آمده مقایسه شده است. مقادیر طول و شعاع سیم و نیز شعاع خرج فلش در این آزمایش به ترتیب در جدول های (۲ و ۳) گزارش شده است.

زمانی می شود که با توجه به تعداد بالای مجهولات، حل این دستگاه نسبت به روش ضمنی پیچیده تر است. بنابراین با استفاده از روش صریح، در هر گام زمانی مقادیر دما در فواصل گسسته شده به دست آمده و این مقادیر معلوم برای تعیین دماهای مجهول در گام زمانی بعدی به کار می روند. شمارنده گره ها در راستای شعاع با i و در راستای طول با j نشان داده شده است. در واقع با استفاده از این روش جواب های معادله (۱) به فرم T=T(i,j,k) به دست می آیند که در آن i، j و k به ترتیب شمارنده گام های شعاعی، محوری و زمانی حل مسئله است.

بر اساس روش تفاضل محدود پیشرو مرکزی معادله های (۳ و ۴) به فرم عددی تبدیل شده و پس از مرتب سازی با روابط (۱۰ و ۱۱) نشان داده می شوند [۱۳]. در شکل (۵) نمای گسسته شده مدل نشان داده شده است.

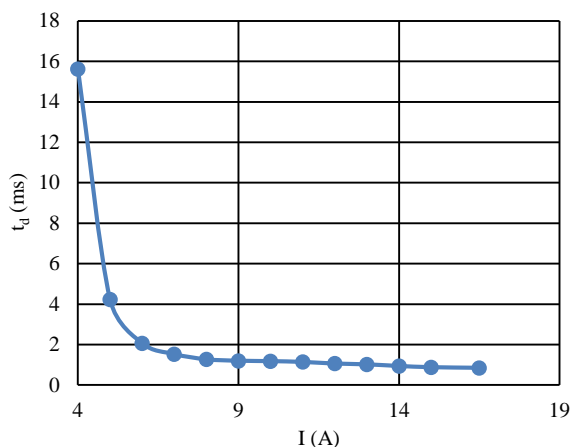
$$T_{P_{ij}}^{k+1} = \frac{a\Delta t(T_{P_{i+1,j}}^k - 2T_{P_{ij}}^k + T_{P_{i-1,j}}^k)}{\Delta r^2} + \frac{a_p\Delta t(T_{P_{i+1,j}}^k - T_{P_{i-1,j}}^k)}{2r_i\Delta r} + \frac{a_p\Delta t(T_{P_{i,j+1}}^k - 2T_{P_{ij}}^k + T_{P_{i,j-1}}^k)}{\Delta z^2} + T_{P_{ij}}^k \quad (10)$$

$$T_{b_{ij}}^{k+1} = \frac{a_b\Delta t(T_{b_{i+1,j}}^k - 2T_{b_{ij}}^k + T_{b_{i-1,j}}^k)}{\Delta r^2} + \frac{a_b\Delta t(T_{b_{i+1,j}}^k - T_{b_{i-1,j}}^k)}{2r_i\Delta r} + \frac{a_b\Delta t(T_{b_{i,j+1}}^k - 2T_{b_{ij}}^k + T_{b_{i,j-1}}^k)}{\Delta z^2} + T_{b_{ij}}^k + \frac{l^2\sigma_b}{\pi^2 r_b^4} \quad (11)$$

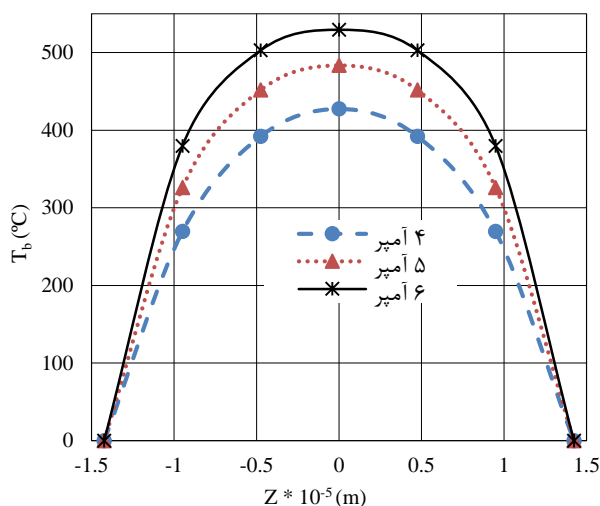


شکل ۵- گسسته سازی مجموعه سیم پیل و خرج فلش در راستای شعاعی و محوری.

با توجه به حجم بالای محاسبات روش صریح، در این تحقیق، یک برنامه رایانه ای با استفاده از نرم افزار متلب تهیه شده است که با به کارگیری آن می توان فرم عددی معادلات انتقال حرارت در آغازگر الکتریکی را حل کرده، توزیع مکانی و تاریخچه زمانی دما را در آن به دست آورد. در این برنامه با استفاده از یک دستور شرط، از لحظه اعمال جریان الکتریکی تا رسیدن دمای خرج فلش در محل تماس با سیم پیل به دمای آغازش، حل مسئله متوقف شده و زمان به دست آمده به عنوان زمان آغازش در نظر گرفته می شود. با استفاده از این برنامه رایانه ای می توان پارامترهای مختلف همچون شدت جریان، مقاومت سیم پیل، ضریب انتقال حرارت تماسی و... را تغییر داده و تأثیر این تغییرات بر عملکرد آغازگر الکتریکی را بررسی کرد.



شکل ۷- تغییرات اختلاف زمان آغازش محاسبه شده و زمان تجربی برحسب شدت جریان.



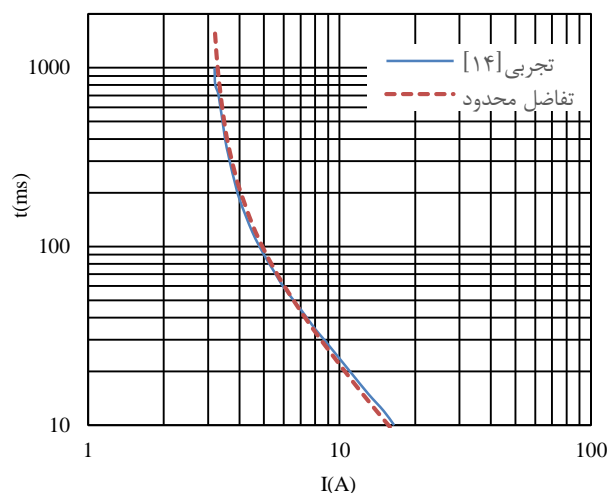
شکل ۸- توزیع دما در محور سیمپل در شدت جریانهای مختلف.

مرکز ماده آغازگر در محل فصل مشترک با سیمپل نخستین نقطه‌ای است که آغازش می‌شود. تغییرات دمای این نقطه با زمان در شدت جریانهای مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در جریان ۳ آمپر، دما به حالت پایا رسیده است. با استفاده از این نمودار می‌توان زمان آغازش خرج فلش را برحسب شدت جریانهای مختلف به‌دست آورد.

در آغازگرهای الکتریکی یک آزمون مهم جهت بررسی ایمنی، آزمون جریان ایمن است. در این آزمون یک شدت جریان ثابت در مدت زمان مشخص به آغازگر الکتریکی اعمال می‌گردد که در این مدت آغازگر نباید به دمای آغازش برسد. در شکل (۱۰) توزیع دما در راستای محوری و شعاعی در خرج فلش در جریان ۳ آمپر در حالت پایا (مدت زمان ۱۰ ثانیه) نشان داده شده است. در شرایط مذکور، حداکثر دمای خرج فلش و سیمپل به ترتیب به حدود ۲۵۰ و ۳۳۰ درجه سلسیوس می‌رسد. به‌عبارت‌دیگر خرج فلش به دمای آغازش نرسیده و آغازگر عمل نمی‌کند.

جدول ۳- مشخصات خرج فلش آغازگر الکتریکی MARK 45 MOD O.

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	طول (L_p)	۰/۲۸۴۷ cm
۲	شعاع خارجی (r_{p1})	۰/۰۷۸۷۵ cm
۳	شعاع داخلی (r_{p2})	۰/۰۰۹۰۱ cm
۴	ضریب انتقال حرارت هدایتی (K_p)	۰/۰۰۰۵۰۵ cal/sec.cm.°C
۵	چگالی (ρ_p)	۲/۵۲ gm/cm ^۳
۶	ظرفیت گرمایی (c_p)	۰/۲۴۶۱ cal/gm.°C
۷	دمای آغازش (T_i)	۲۷۰ °C
۸	ضریب انتقال حرارت تماسی بین سیمپل و خرج فلش (h)	۰/۱۱۶ cal/sec.cm.°C

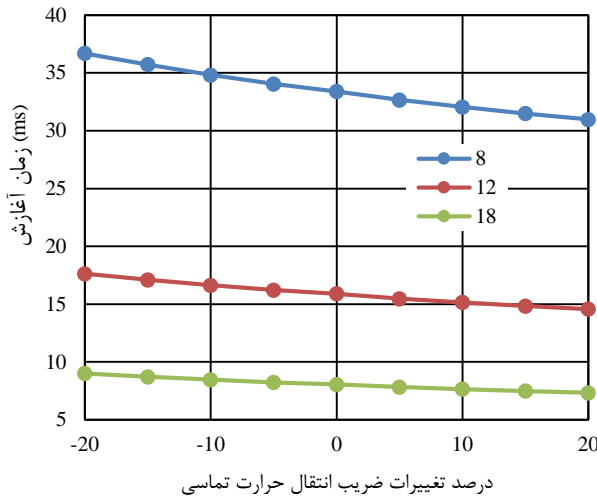


شکل ۹- زمان آغازش محاسبه شده و تجربی برحسب شدت جریان.

تغییرات اختلاف زمان آغازش که از دو روش تجربی و شبیه‌سازی عددی به‌دست آمده (t_d) برحسب تغییرات شدت جریان در شکل (۷) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش جریان، اختلاف نتایج کاهش می‌یابد. در شدت جریان ۴ آمپر، میزان خطا ۸ درصد و در شدت جریان بالای ۶ آمپر، به کمتر از ۴ درصد کاهش می‌یابد. دو شکل (۶ و ۷) نشان می‌دهند که روش تفاضل محدود توانسته با دقت بالایی نتایج تجربی را پیش‌بینی کند.

۴- نتایج و بحث

در این قسمت بر مبنای اطلاعات مربوط به آغازگر الکتریکی معرفی شده MARK 45 MOD O، برخی نتایج حاصل از برنامه رایانه‌ای ارائه شده است. همان‌طور که گفته شد دمای آغازش خرج فلش استفاده شده در این آغازگر الکتریکی ۲۷۰ درجه سلسیوس است. بر اساس شکل (۸) که تغییرات دما در طول محور سیمپل در شدت جریانهای مختلف را نشان می‌دهد، مشخص است که مرکز سیمپل بیش‌ترین دما را دارد.



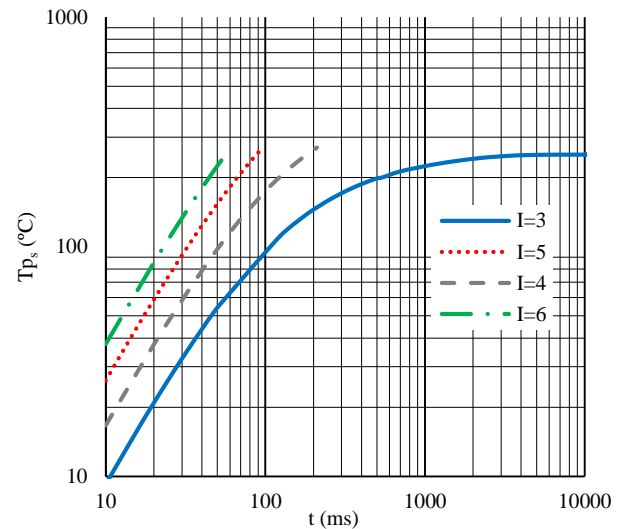
شکل ۱۱- تغییرات زمان آغازش برحسب درصد تغییرات ضربی انتقال حرارت تماسی.

برای درک بهتر این موضوع در شکل (۱۲) "درصد تغییرات زمان آغازش" برحسب "درصد تغییرات ضربی انتقال حرارت تماسی" رسم شده است. لازم به ذکر است که قدر مطلق درصد تغییرات مورد استفاده قرار گرفته است. از این نمودار دو نتیجه مهم حاصل می‌شود. نخست اینکه به‌طور کلی کاهش ضربی انتقال حرارت تماسی نسبت به افزایش آن تأثیر بیشتری بر زمان آغازش دارد. دوم اینکه با افزایش شدت جریان، وابستگی زمان آغازش به ضربی انتقال حرارت تماسی بیشتر می‌شود.

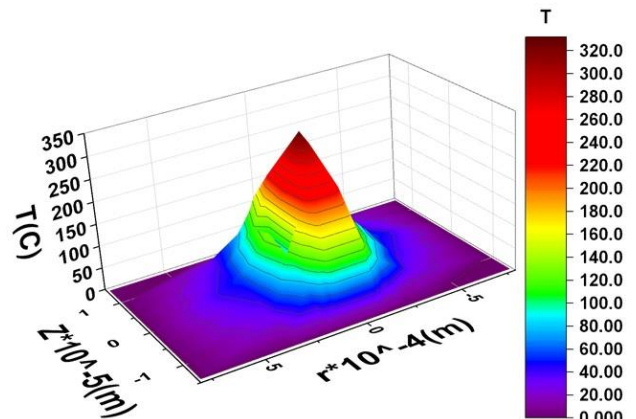
با توجه به شکل (۱۳) که پروفایل دمایی مرکز خرج فلش در راستای شعاع در لحظه آغازش را نشان می‌دهد، با افزایش شدت جریان، تغییرات دما در راستای شعاعی شدت می‌یابد.

شکل (۱۴) تغییرات دمایی مرکز سیم‌پیل برحسب تغییرات شدت جریان در لحظه رسیدن خرج فلش به دمایی آغازش را نشان می‌دهد. در این نمودار همچنین دمایی ذوب ماده تشکیل‌دهنده سیم‌پیل (نیکل-کروم یا نیکروم) نشان داده شده است. نقطه تقاطع این دو نمودار در جریان ۳۲ آمپر است. در شدت جریان‌های کمتر از این مقدار، دمایی سیم‌پیل در لحظه آغازش کمتر از دمایی ذوب آن است. اما در شدت جریان‌های بیشتر از ۳۲ آمپر، دمایی سیم‌پیل در لحظه آغازش از دمایی ذوب آن فراتر رفته است. یعنی قبل از اینکه خرج فلش به دمایی آغازش برسد، سیم‌پیل قطع می‌شود و آغازگر الکتریکی عمل نمی‌کند.

به‌عبارت دیگر در شدت جریان‌های بالا، عملاً گرمایش سیم‌پیل به‌صورت آدیاباتیک رخ داده و زمان کافی جهت انتقال حرارت از سیم به ماده آغازگر وجود ندارد. بدیهی است در این شرایط با ذوب شدن سیم‌پیل، آغازگر الکتریکی عمل نمی‌کند.



شکل ۹- تغییرات دمایی مرکز فصل مشترک خرج فلش برحسب زمان.



شکل ۱۰- توزیع دمایی پایا در خرج فلش و سیم‌پیل در شدت جریان ۳ آمپر.

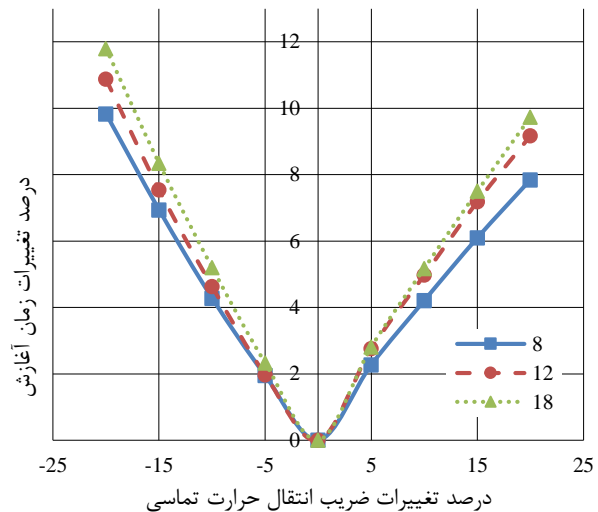
در شکل (۱۱) مقادیر زمان آغازش برحسب درصد تغییرات ضربی انتقال حرارت تماسی در شدت جریان‌های مختلف نشان داده شده است. مقدار ۰/۱۱۶ برای ضربی انتقال حرارت تماسی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده و به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به آن افزوده و کاسته شده است. هدف از این کار نیز مقایسه میزان حساسیت زمان آغازش در آغازگر الکتریکی به کاهش و افزایش ضربی انتقال حرارت تماسی است. به‌عبارت‌دیگر هدف این است که روشن شود کاهش ضربی انتقال حرارت تماسی بر زمان آغازش تأثیر بیشتری دارد یا افزایش آن. ملاحظه می‌شود که با افزایش ضربی انتقال حرارت تماسی زمان آغازش کاهش می‌یابد و بالعکس. دقت در این شکل نشان می‌دهد که شیب هر سه نمودار در سمت راست محور عمودی (مقادیر مثبت محور افقی) کمتر از سمت چپ نمودار است. به‌عبارت‌دیگر کاهش ضربی انتقال حرارت تماسی نسبت به افزایش آن تأثیر شدیدتری بر زمان آغازش دارد.

۵- نتیجه‌گیری

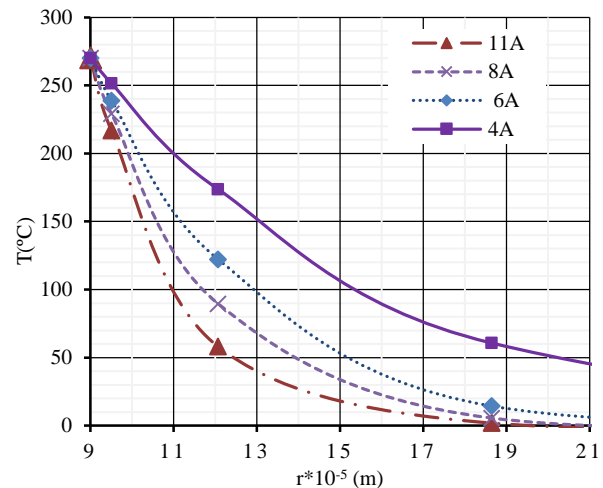
در این تحقیق، یک مدل ریاضی که پدیده انتقال حرارت دوبعدی در آغازگر الکتریکی را توصیف می‌کند معرفی شد. در این مدل، با در نظر گرفتن یک سری فرضیات ساده کننده، معادلات دیفرانسیل بقای انرژی استخراج شده و شرایط مرزی در این معادلات اعمال شد. با استفاده از روش تفاضل محدود مرکزی پیشرو، معادلات مذکور به فرم عددی درآمده و به کمک یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار متلب، این معادلات حل شده و توزیع دما در آغازگر الکتریکی به دست آمد. نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های مندرج در یک مرجع علمی مقایسه شده و تطابق مطلوبی مشاهده شد. این تطابق اثبات کرد که مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی زمان آغازش و تعیین پروفایل دمای دوبعدی ناپایا در آغازگر را دارد. مشخص شد که با برقراری جریان الکتریکی، مرکز سیم‌پل بیش‌ترین دما را دارد و بنابراین نخستین نقطه‌ای که در آن آغازش اتفاق می‌افتد، مرکز فصل مشترک سیم و خرج فلش است. همچنین با افزایش شدت جریان، از تغییرات دمای سیم‌پل در راستای محوری کاسته می‌شود. با افزایش شدت جریان، زمان آغازش کاهش یافته و شیب تغییرات دما در راستای شعاع در خرج فلش بیشتر می‌شود. همچنین در جریان ۳ آمپر آغازگر به دمای آغازش نرسیده و به دمای پایای کمتر از دمای آغازش (یا دمای بحرانی) می‌رسد. ضریب انتقال حرارت تماسی در فصل مشترک سیم‌پل و خرج فلش، پارامتری مؤثر بر نرخ انتقال حرارت است که تأثیر کاهش آن بر نرخ انتقال حرارت، بیش از افزایش آن است. همچنین با افزایش شدت جریان، وابستگی زمان آغازش به این ضریب بیشتر می‌شود و اختلاف دمای خرج فلش و سیم‌پل نیز افزایش می‌یابد. به‌منظور عملکرد آغازگر الکتریکی می‌بایست زمان کافی جهت انتقال گرما از سیم‌پل به خرج فلش وجود داشته باشد. در شدت جریان بالاتر از ۳۲ آمپر، زمان انتقال حرارت بسیار کاهش یافته و بنابراین قبل از رسیدن گرمای لازم به خرج فلش، سیم‌پل ذوب می‌شود. با توجه به استفاده از جریان متناوب در بعضی کاربردها همچون آزمون تخلیه الکترواستاتیک، می‌توان پارامتر شدت جریان را که در مدل ریاضی به‌صورت ثابت لحاظ شده است، متغیر با زمان در نظر گرفت. یک فرض ساده کننده در این تحقیق، صرف نظر کردن از تأثیر فعل و انفعالات شیمیایی گرمازا در ماده آغازگر قبل از رسیدن به دمای آغازش است که جهت افزایش دقت مدل، می‌توان این تغییرات دما را لحاظ نمود. همچنین با استفاده از این مدل پیش‌بینی عملکرد آغازگر الکتریکی در دماهای محیطی مختلف و در آزمون‌های الکتریکی متنوع No-Fire و All-Fire امکان‌پذیر است.

مراجع

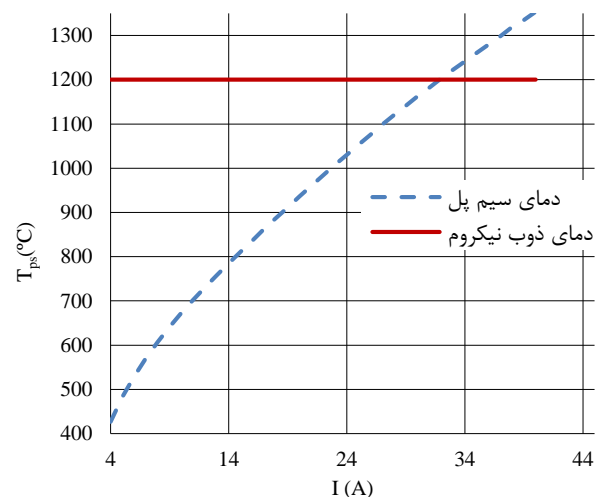
- [1] Lycas, C. J. "Engineering Design Handbook, Explosives Series: Explosive Trains"; AMCP-706-179, Hq., U.S. Army Material Command, 1974.
- [2] Cooper, P. W. "Explosives Engineering"; John Wiley & Sons Inc, New York, 1996.



شکل ۱۲- درصد تغییرات زمان آغازش برحسب درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت تماسی.



شکل ۱۳- پروفایل دمای مرکز خرج فلش در راستای شعاع و در لحظه آغازش.



شکل ۱۴- تغییرات دمای مرکز سیم پل در لحظه آغازش برحسب جریان.

- [9] Nan, Y.; Zhang, L.; Zhixing, L. "Simulation and Experiment on Pin-to-Pin Electrostatic Discharge Firing of Bridgewire EED"; IEEE Trans. Plasma Sci. 2018, 46, 110-116.
- [10] Shi, I.; Yang, A.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Li, Z. "Study on the Temperature of the Bridge Wire in the Initiator Used in Nuclear Explosion Valve"; J. Anal. Chem. 2016, 7, 908-917.
- [11] Carslaw, H. S.; Jaeger, J. C. "Conduction of Heat in Solids"; 2nd ed., Oxford: Clarendon Press, 1959.
- [12] Xian, Y.; Zhang, P.; Zhai, S.; Yuan, P.; Yang, D. "Experimental Characterization Methods for Thermal Contact Resistance: A Review"; Appl. Therm. Eng. 2018, 130, 1530-1548.
- [13] Ozisik, M. N.; Orlande, H. R. B.; Colaco, M. J.; Cotta R. M. "Finite Difference Methods in Heat Transfer"; 2nd Ed., CRC press, 2017.
- [14] Massey, J. M. Jr. "A Heat Transfer Model Study of the Hot Wire Initiator"; U. S. Naval Weapons Lab Dahlgren, NWL NO. 1919, 1964.
- [3] Oyler, K. D.; Mehta, N.; Cheng, G. "Overview of Explosive Initiators"; ARMET-TR-15017, November 2015.
- [4] Keller, R. B. Jr. "Solid Rocket Motor Igniters"; NASA SP-8051, March 1971.
- [5] Rosenthal, L. A. "Electro-Thermal Equations for Electro-Explosive Devices"; NAVORD-R- 6684, Naval Ordnance Lab., 1959.
- [6] Streszu, R. H.; Peterson, R.; Chamberlain, D. "Electrical and Thermal Considerations in the Design of Electroexplosive Devices"; Fifth Symposium on Electroexplosive Devices, The Franklin Institute, 1967, 2-10.
- [7] Faria, P. C. C. "An Analysis of the Initiation Process of Electroexplosive Devices"; J. Aerosp. Technol. Manag. 2012, 4, 45-50.
- [8] Mishra, K. K.; Babu, A. S.; Shetty, C. P.; Shekhar, H. "Method to Determine the Electrical Energy for Ignition of Electro-Explosive Devices"; J. Aerosp. Technol. Manag. 2015, 7, 285-288.