

تحلیل جریان و انتقال حرارت در لامپ تخلیه الکتریکی فشار بالا در حالت دو بعدی و سه بعدی

سیروس آقا نجفی، علیرضا دهقانی، مریم فلاح عباسی
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

در این مقاله تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت در لامپ بخار جیوه فشار بالا برای حالت افقی ارائه شده است. برای به واقعیت نزدیکتر شدن شبیه‌سازی عددی علاوه بر انتقال حرارت به روشهای جابجایی و هدایت از انتقال حرارت تشعشعی در باندهای طول موجی مختلف نیز استفاده گردیده است. تحلیل در حالات دو بعدی و سه بعدی و برای گازهای پرکننده مختلف با فشارهای مختلف انجام گرفته است که یکی از این نتایج با مقادیر تجربی آن نیز مقایسه گردیده است. ضمناً اثر دمای محیط بر روی دمای آرک تیوب نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت تشعشعی، لامپ تخلیه الکتریکی و آرک تیوب

مقدمه

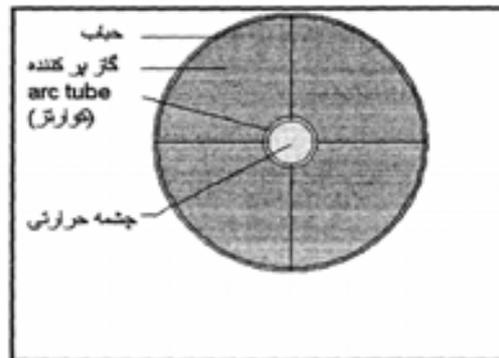
از لامپ‌های تخلیه الکتریکی به دلیل راندمان و عمر نسبتاً بالایی که دارند، استفاده زیادی می‌گردد. یکی از انواع این لامپ‌ها، لامپ تخلیه الکتریکی بخار جیوه با فشار بالا می‌باشد. در بعضی موارد این لامپ‌ها هنگام کارکرد در حالت افقی قرار می‌گیرند که به دلیل توزیع دما روی دیواره آرک تیوب مرکز تخلیه الکتریکی آنها را دچار انحراف نموده و کاهش راندمان و عمر آنها را در پی دارد. ضمناً افزایش دمای آرک تیوب و حباب باعث کریستاله شدن آرک تیوب و کاهش ضریب عبور، راندمان و تغییر شکل در آنها می‌گردد [۱ و ۲].

اهداف اصلی انجام این تحلیل به شرح ذیل می‌باشد:

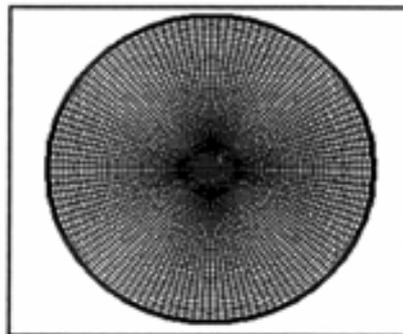
- ۱- بدست آوردن توزیع دما روی آرک تیوب و حباب
- ۲- نتیجه‌گیری در مورد دلیل تغییر شکل آرک تیوب
- ۳- مقایسه پروفیل دما و سرعت با گازهای پرکننده مختلف در فشارهای مختلف.
- ۴- مقایسه نتایج دو بعدی و سه بعدی.

هندسه مسأله و مش‌بندی

مش‌بندی و هندسه مسأله در حالت دو بعدی طبق اشکال ۱ و ۲ می‌باشد که قطر خارجی آرک تیوب و حباب به ترتیب ۱۲ و ۸۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره‌های آنها ۱ میلی‌متر می‌باشد. در آن از ۵۰۴۰ سلول استفاده شده است. همچنین برای حالت سه بعدی از هندسه و مش‌بندی ارائه شده در شکل ۳ استفاده شده است. در این جا به دلیل تقارن نصف مدل اصلی مورد تحلیل قرار گرفته و برای این کار، ناحیه محاسباتی به ۳۵۱۳۷ سلول تقسیم شده است.



شکل ۱- هندسه مسأله در حالت دو بعدی



شکل ۲- شبکه تولید شده برای انجام تحلیل در حالت دو بعدی

خواص فیزیکی مواد

در این تحلیل از چهار نوع گاز پرکننده ذکر شده در جدول ۱، در فشارهای ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۵ و ۱/۰ بار استفاده شده است [۳ و ۴]. طبق این جدول فرض شده است که تغییرات گرمای ویژه گازها نسبت به دما ثابت بوده و ضریب انتقال حرارت آنها به صورت خطی با دما تغییر می‌کند. ضمناً فرض شد که ضریب لزجت بر طبق قانون ساترلند با دما متغیر می‌باشد [۵].

جدول ۱- خواص گازهای پرکننده

خواص / نوع گاز	Cp(j/kg.k)	K _{r..} (w/m.k)	K _{۱۵۰.} (w/m.k)	μ _{r..} (kg/m.s)	M (جرم مولکولی)
N _۲	۱۰۴۱	۰/۰۲۴۲	۰/۰۹۱	۱/۶۶ × ۱۰ ^{-۴}	۲۸
Ar	۵۱۹	۰/۰۱۵۸	۰/۱۱۴	۲/۱۳ × ۱۰ ^{-۴}	۴۰
%۷۵Ar + %۲۵N _۲	۶۱۹	۰/۰۱۸	۰/۱۳۱	۲ × ۱۰ ^{-۴}	۳۷/۷
%۹۰Ar + %۱۰ Ne	۵۴۸	۰/۰۱۷	۰/۱۴۵	۲/۱ × ۱۰ ^{-۴}	۳۹

با توجه به اینکه فشارهای فوق در دمای محیط می‌باشند، ابتدا با استفاده از رابطه $\rho = P / (R \times T_{amb})$ چگالی گاز را محاسبه نموده و سپس با استفاده از همین رابطه و دمای حدسی گاز که می‌تواند با سعی و خطا تصحیح گردد فشار اعمالی (operating pressure) بدست می‌آید. خواص آرک تیوب و حباب نیز از مرجع [۶] بدست آمده که در جدول ۲ ارائه شده است، بطوریکه در آن a و ρ' ، n به ترتیب ضرایب جذب، پخش و شکست می‌باشند.

جدول ۲- خواص آرک تیوب و حباب

خواص نوع	ρ (kg/m ³)	Cp(j/kg.k)	K(w/m.k)	a(1/m)	ρ' (1/m)	N
کوارتز	۲۲۰۰	-----	۱/۹	۰/۰۵	۰/۰۲	۱/۴۴
حباب	۲۳۰۰	۸۵۶	۱/۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۱/۴

شبیه‌سازی تشعشعی

برای شبیه‌سازی تشعشعی ناشی از لامپ بخار جیوه از باندهای طول موجی مختلف استفاده شده است. بدین صورت که ضریب عبور سطح داخلی شیشه کوارتزی فقط در محدوده تابش لامپ جیوه‌ای غیرصفر می‌باشد و عبور اشعه‌های با طول موجهای دیگر امکان‌پذیر نمی‌باشد. این اشعه‌ها آن قدر برگشت کرده تا کل توان لامپ تنها در محدوده طول موجهای تشعشعی لامپ جیوه‌ای و یا از طریق هدایت در شیشه کوارتزی مصرف گردد که حالت واقعی نیز همین می‌باشد.

باندهای مختلف و مقدار ضریب عبور سطوح برای آنها که با توجه به مراجع [۶ و ۷] انتخاب گردیده است در جدول ۳ آمده است (در این جدول طول موجها بر حسب میکرومتر می‌باشد). برای مدل نمودن مقدار توان لامپ از یک چشمه حرارتی جامد حجمی استفاده شد. مقدار آن به صورتی است که با احتساب کل حجم آرک تیوب برابر با توان لامپ گردد. در این مورد با توجه به مقدار توان لامپ که ۱۲۵ وات می‌باشد و با احتساب حجم آرک تیوب (۶/۲۵cm³) مقدار توان چشمه حرارتی برابر با (۲۰ W/cm³) انتخاب گردید.

جدول ۳- مقدار ضریب عبور سطوح در باندهای طول موجی مختلف

باندها نوع	باند ۱ (۰/۱۷-۰/۲۶)	باند ۲ (۰/۲۶-۰/۳۵)	باند ۳ (۰/۳۵-۰/۵۵)	باند ۴ (۰/۵۵-۵/۰)	باند ۵ (۵/۰-۱۰۰)
سطح داخلی کوارتز	۰/۰	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۰	۰/۰
سطح خارجی کوارتز	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۸	۰/۰
سطوح حبابی	۰/۰	۰/۰	۰/۹	۰/۹	۰/۹

محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سطح بیرونی حباب

با استفاده از مرجع [۸] و با فرض یکسان بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی حول حباب با سیلندر هم قطر آن مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی به ازای دماهای مختلف محیط به دست آمد که به ازای

۲۰- درجه ۹/۱ و به ازای ۴۰ درجه ۸/۹۱ می‌باشد. بنابراین به دلیل اختلاف ناچیز از مقدار ۹ برای آن استفاده شد.

معادلات حاکم بر مسأله

برای بدست آوردن دانسیته به دلیل تغییرات کم آن از فرض گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر استفاده شد. معمولاً برای شبیه‌سازی جریانهای جابجایی آزاد با اختلاف زیاد دما بین سطوح از این روش استفاده می‌گردد [۸].

با توجه به اینکه در این مسأله از اجسام نیمه شفاف و باندهای طول موجی مختلف استفاده شده است برای اعمال معادلات انتقال تشعشعی از روش Discrete ordinate استفاده شد [۸].

معادله انتقال انرژی تابشی تولید شده در مرکز آرک تیوب به شکل زیر است:

$$\frac{di'_\lambda}{dS} = -a_\lambda i'_\lambda(S) - \sigma_{s\lambda} i'_\lambda(S) + a_\lambda i'_{\lambda b}(S) + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_{\omega_i=4\pi} i'_\lambda(S, \omega_i) \Phi(\lambda, \omega, \omega_i) d\omega_i$$

با ساده‌سازی معادله انتقال انرژی تابشی با توجه به شرایط حاکم و فرضیات انجام شده می‌توان نوشت:

$$\frac{di}{dS} = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \left[\frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} - \sigma_{s\lambda} - a \right] . i(S)$$

در نهایت با حل معادله انتقال شدت تابش صادره از آرک تیوب و لحاظ کردن شرایط مرزی، معادله تابش برای هر نقطه از آرک تیوب به صورت زیر خواهد بود:

$$i(S) = \frac{\left(e \left[\frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} - \sigma_{s\lambda} - a \right] . S \right) \left(\frac{a\sigma T^4}{\pi} + \left(\frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} - \sigma_{s\lambda} - a \right) . i(2 \times 10^{-3}) \right) - a\sigma T^4}{\left(\frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} - \sigma_{s\lambda} - a \right)}$$

همچنین پس از ساده‌سازی معادلات ناویر استوکس داریم:

قانون بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\rho r V_r) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v_\theta) = 0$$

قانون بقای مومنتم

$$\frac{\partial(\rho V_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\rho r V_r^2) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho V_r V_\theta) - \rho \frac{V_\theta^2}{r} = \rho g_r + \frac{\partial(r \cdot \tau_{rr})}{r \partial r} + \frac{\partial(r \cdot \tau_{r\theta})}{r \partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r}$$

$$\frac{\partial(\rho V_\theta)}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\rho r V_r V_\theta) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho V_\theta^2) + \rho \frac{V_\theta V_r}{r} = \rho g_\theta + \frac{\partial(r \cdot \tau_{\theta\theta})}{r \partial r} + \frac{\partial(r \cdot \tau_{r\theta})}{r \partial \theta} + \frac{\tau_{r\theta}}{r}$$

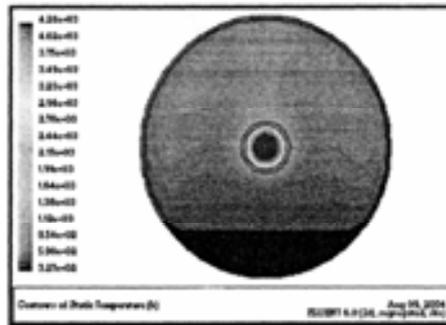
قانون بقای انرژی

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} [r e V_r] + \frac{\partial}{r \partial \theta} [e V_\theta] = \rho g_r V_r + \rho g_\theta V_\theta + \frac{\partial}{r \partial r} [r V_r \tau_{rr} + r V_\theta \tau_{r\theta}] + \frac{\partial}{r \partial \theta} [V_r \tau_{r\theta} + V_\theta \tau_{\theta\theta}] - \frac{\partial(r \dot{q}_r)}{\partial r}$$

بحث و بررسی نتایج

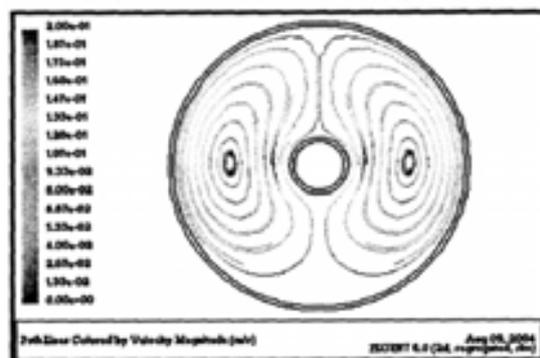
۱- در حالت دو بعدی

در این حالت ۶۴ دفعه تحلیل انجام شده است (۴ نوع گاز با ۴ فشار مختلف در ۴ دمای محیطی مختلف). به دلیل یکسان بودن پروفیل کلی دما و سرعت برای گازهای مختلف منحنی‌های دما و سرعت ارائه شده مربوط به دمای محیطی ۲۵ درجه سانتیگراد و گاز پرکننده نیتروژن می‌باشد که از بقیه تحلیل‌ها در رسم نمودار تأثیر دمای محیطی بر دمای متوسط آرک تیوب استفاده شده است.
الف - طبق شکل ۴ گازهای سرد به دلیل چگالی زیادتر در پایین و گازهای گرم به دلیل چگالی کمتر در بالای حباب قرار گرفته‌اند.

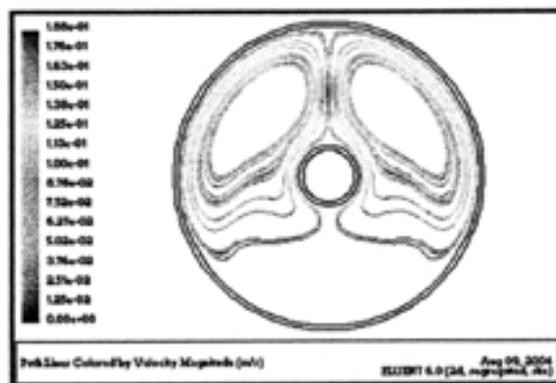


شکل ۴- پروفیل دما برای گاز نیتروژن در فشار ۰/۱۵ بار

ب - شکل‌های ۶ و ۵ خطوط جریان را در فشارهای ۰/۱۵ و ۱/۰ بار نشان می‌دهد. در شکل ۶ به دلیل فشار بالاتر و ضریب انتقال حرارت جابجایی زیادتر گاز سریعتر در دیواره حباب سرد شده و به سمت مرکز و بالا حرکت می‌کند. به همین دلیل گردابه ایجاد شده در فشارهای زیادتر به سمت بالا می‌رود.

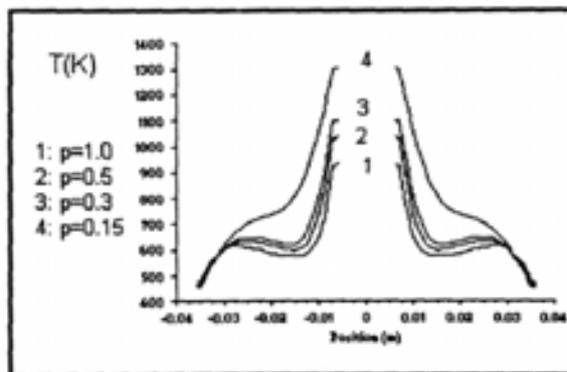


شکل ۵- خطوط جریان برای گاز نیتروژن در فشار ۰/۱۵ بار



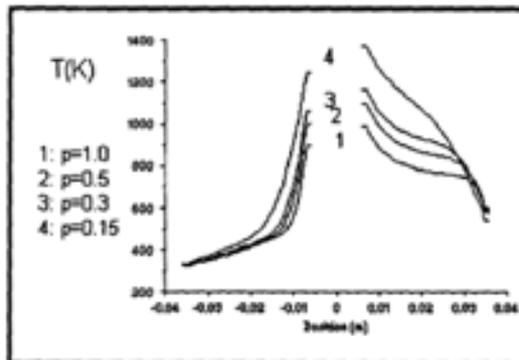
شکل ۶- خطوط جریان برای گاز نیتروژن در فشار ۱/۰ بار

ج - در شکل ۷ توزیع دما در راستای افقی و برای گاز نیتروژن و در فشارهای مختلف ارائه شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود افزایش فشار به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی باعث کاهش دما می‌گردد.



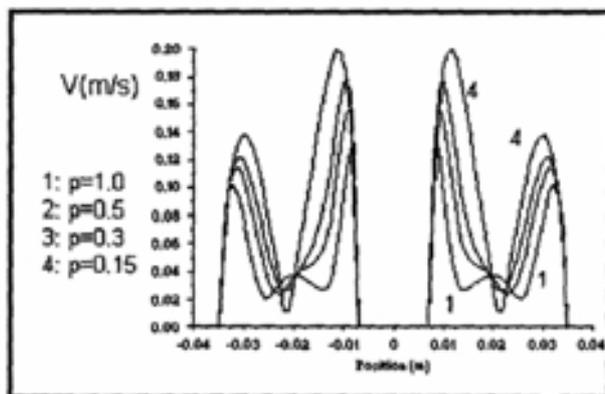
شکل ۷- توزیع دما در راستای افقی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف

د- گازهای سردتر با رسیدن به سطح آرک تیوب در پایین آن شروع به گرم شدن و حرکت به سمت بالا می‌کنند که همین عمل باعث گرم‌تر شدن آرک تیوب در بالای آن می‌شود و منحنی‌دار شدن آرک تیوب نیز به همین دلیل می‌باشد. این مسأله در شکل ۸ نشان داده شده است.

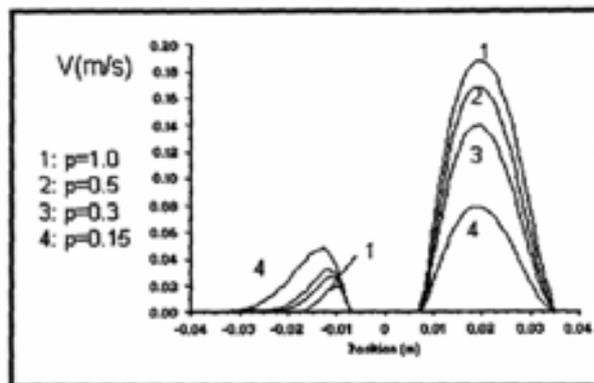


شکل ۸- توزیع دما در راستای عمودی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف

ه- اشکال ۱۰ و ۹ سرعت جریان گاز در جهات افقی و عمودی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف را نشان می‌دهد. هرچه فشار گاز زیادتر می‌گردد گردابه‌ها به سمت بالا حرکت کرده و با نزدیک شدن گردابه‌ها به بالای حباب سرعت در بالای حباب افزایش و در پایین آن کاهش می‌یابد. به همین دلیل سرعت در راستای افقی کمتر و در راستای عمودی زیادتر می‌گردد.

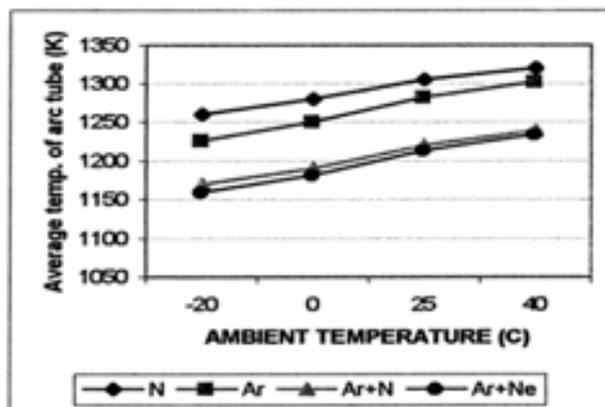


شکل ۹- توزیع سرعت در راستای افقی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف



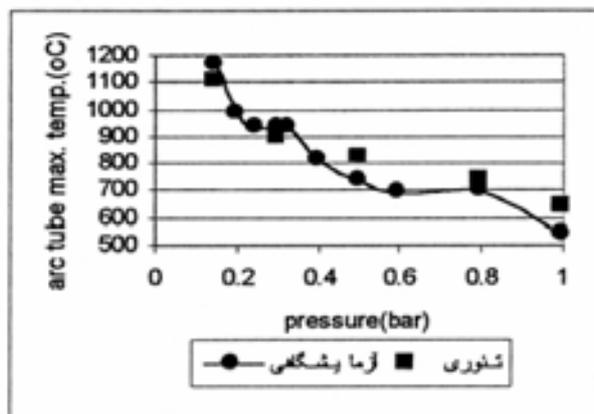
شکل ۱۰- توزیع سرعت در راستای عمودی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف

و- شکل ۱۱ نشان می‌دهد که دمای محیط تأثیر کمی بر دمای متوسط آرک تیوب دارد (کمتر از ۱۰۰ درجه) و به دلیل زیادتر بودن دما در فشار ۰/۱۵ بار و بحرانی‌تر بودن آن، منحنی‌ها برای این دما رسم شده است.



شکل ۱۱- تأثیر دمای محیط بر دمای متوسط آرک تیوب برای گازهای مختلف در فشار ۰/۱۵ بار

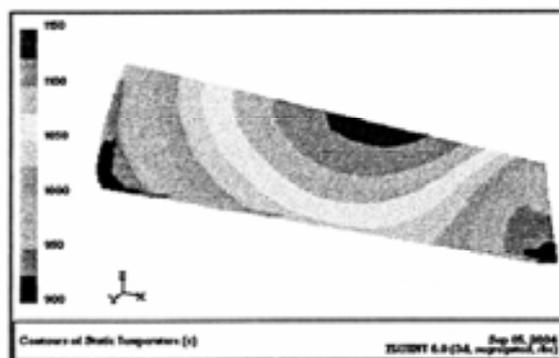
ز- در شکل ۱۲ نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دمای حداکثر آرک تیوب بر حسب فشار و با گاز پرکننده نیتروژن با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در بدترین حالت اختلاف آنها حدود ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.



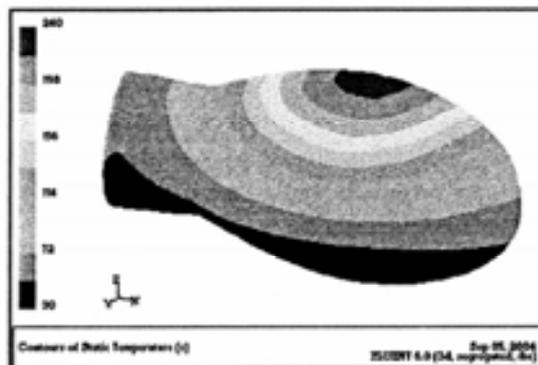
شکل ۱۲- حداکثر دمای آرک تیوب برای گاز نیتروژن در دمای محیط

۲- در حالت سه بعدی

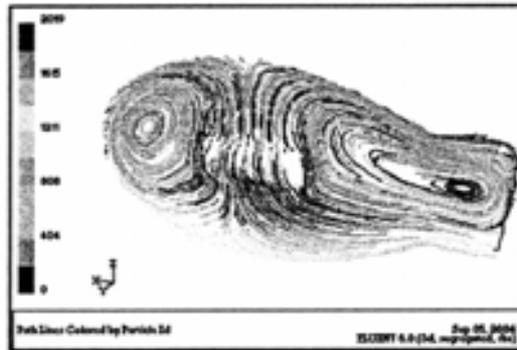
اشکال ۱۴ و ۱۳ توزیع دمای روی سطح داخلی آرک تیوب و حباب را برای مخلوط گاز آرگون - نیتروژن نشان می‌دهد. همانطوری که دیده می‌شود در هر دو شکل ماکزیمم دما در قسمت بالا و وسط قرار دارد و در دو انتها و پایین آنها دما کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه دما در وسط زیادتر و در دو انتهای لامپ کمتر می‌باشد یک سری جریانهای گردابی نیز در دو انتهای لامپ بوجود می‌آید که در شکل ۱۵ این جریانها نشان داده شده است.



شکل ۱۳- توزیع دمای آرک تیوب برای گاز آرگون - نیتروژن در فشار ۰/۱۵ بار بر حسب سانتیگراد



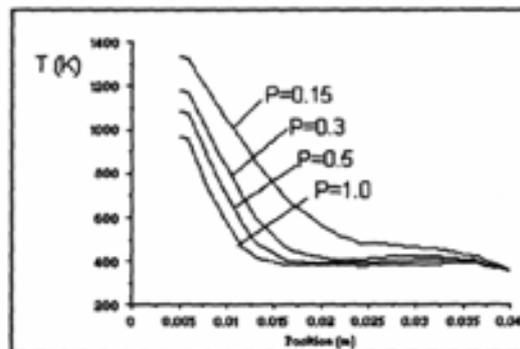
شکل ۱۴- توزیع دمای حباب برای گاز آرگون - نیتروژن در فشار ۰/۱۵ بار بر حسب سانتیگراد



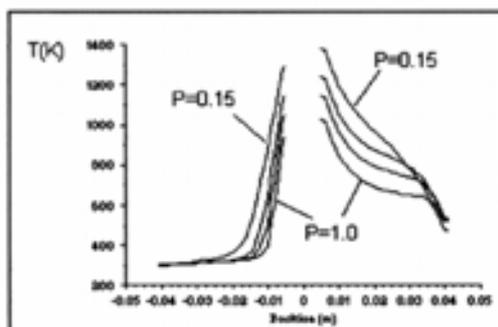
شکل ۱۵- خطوط جریان در مقطع عمودی و در وسط لامپ

۳- مقایسه تحلیل دو بعدی و سه بعدی

همانطوریکه در اشکال ۱۴ و ۱۳ مشخص می‌باشد مقطع وسط لامپ یعنی جایی که تحلیل دو بعدی انجام گرفته است تقریباً می‌تواند دمای حداقل و حداکثر روی آرک تیوب و حباب را نشان دهد. اشکال ۱۶ و ۱۷ دما در جهات افقی و عمودی برای گاز آرگون در فشارهای مختلف برای حالت سه بعدی را نشان می‌دهند. طبق این اشکال پروفیل کلی دما مثل حالت دو بعدی می‌باشد. به همین دلیل از ارائه منحنی‌های مربوط به گازهای دیگر صرفنظر شده است.



شکل ۱۶- دما در راستای افقی برای گاز آرگون در فشارهای مختلف بر حسب کلونین



شکل ۱۷- دما در راستای عمودی برای گاز آرگون در فشارهای مختلف بر حسب کلوین

با توجه به مطلب فوق و اهمیت مقدار حداکثر دما بر روی آرک تیوب این مقدار برای گازهای مختلف و در فشارهای مختلف در حالات دو بعدی و سه بعدی با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در جدول ۴ ارائه گردیده است که اختلاف حدود ۴ درصد را نشان می‌دهد.

۲۶

جدول ۴- مقایسه دمای حداکثر آرک تیوب در حالات دو و سه بعدی (دما بر حسب کلوین)

گاز پراکننده	فشار گاز (بار)	دمای ماکزیمم (۲D)	دمای ماکزیمم (۳D)
نیتروژن	۰/۱۵	۱۳۷۲	۱۳۹۳
	۰/۳	۱۱۶۸	۱۲۴۳
	۰/۵	۱۱۰۰	۱۱۵۵
	۱/۰	۹۹۳	۱۰۳۳
آرگون	۰/۱۵	۱۳۳۳	۱۳۸۰
	۰/۳	۱۱۴۷	۱۲۳۹
	۰/۵	۱۰۸۶	۱۱۴۶
	۱/۰	۹۷۹	۱۰۲۸
نیتروژن - آرگون	۰/۱۵	۱۳۲۶	۱۳۶۰
	۰/۳	۱۱۴۱	۱۱۷۹
	۰/۵	۱۰۷۸	۱۱۰۶
	۱/۰	۹۷۹	۱۰۱۱
آرگون - نئون	۰/۱۵	۱۳۰۹	۱۳۴۵
	۰/۳	۱۱۳۸	۱۲۳۲
	۰/۵	۱۰۸۱	۱۱۳۹
	۱/۰	۹۸۱	۱۰۰۶

نتیجه‌گیری

الف - فشار گاز پر کننده در موارد مورد بررسی نباید کمتر از $0/3$ بار باشد زیرا باعث گرم شدن بیش از حد آرک تیوب (کوارتز) می‌گردد که این خود می‌تواند دلیل بر تغییر شکل و کریستاله شدن آرک تیوب باشد.

ب - در مورد گازهای مورد بررسی، مخلوط گازهای آرگون - نئون و آرگون - نیتروژن ارجح می‌باشند.

پیشنهادات

الف - پیشنهاد می‌گردد که با توجه به قسمت ۴ گازهای دیگری مانند هلیم نیز اگر از نظر اقتصادی با صرفه می‌باشد مورد تحلیل قرار گیرند.

ب - با توجه به اینکه وقتی گاز داخل حباب گرم می‌شود، فشار آن نیز افزایش می‌یابد. فشار ۱ بار گاز پرکننده در حالت عملکرد به حدود دو بار افزایش می‌یابد که باید تحمل سازه حباب و خطرات احتمالی آن، بررسی گردد.

ج - در صورت احتیاج به دقت زیادتر می‌توان با ابزار و روش دقیق‌تر و با توجه به اختلاف دما در زیر و بالای آرک تیوب به صورت دقیق‌تری دمای آن اندازه‌گیری و گزارش گردد. سپس با سعی و خطا مقدار ضریب انتقال حرارت چشمه حرارتی تصحیح گشته و از آن برای بقیه گازها نیز استفاده گردد.

د - مقدار ضریب انتقال حرارت هدایتی گازها در مقدار دمای آرک تیوب خیلی مؤثر می‌باشد به همین دلیل باید مقدار آنها متغیر با دما داده شود.

ه - به دلیل ذکر شده در فوق گازهایی مانند هلیم که نرخ افزایش ضریب هدایتی آنها نسبت به دما زیاد می‌باشد حتماً می‌توانند خنک‌کننده‌های خوبی برای آرک تیوب باشند.

منابع

1. W. Elenbass, "High Pressure Mercury Vapour Lamps and Their Application", Cleaver-Hume Press Ltd, 1956.
2. W. Elenbass, "The High Pressure Mercury Vapour Discharge", North-Holland Amsterdam, 1951.
3. C.R. Tottle. "an encyclopedia of metallurgy and materials", Macdonald and Evans, 1984.
4. Philip G. Hill & Carl R. Peterson, "Mechanics and thermodynamics of propulsion", 1992.
5. Fluent user manual ver. 6.0.12.
6. <http://www.GE quartz.com>
7. J.F. Waymouth, "electric discharge lamps", MIT press 1971.
8. M.NECATI OZISIK, "Heat transfer- a basic approach", Mc Graw- Hill, 1988.