

### چکیده

در این مقاله تحلیل جریان سیال و انتقال حرارت در لامپ بخار جبوه 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 کازهای 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

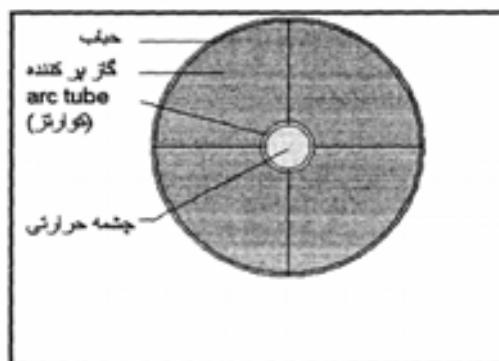
از لامپ‌های تخلیه الکتریکی به دلیل راندمان و عمر نسبتاً بالایی که دارند، استفاده زیادی می‌گردد. یکی از انواع این لامپ‌ها، لامپ تخلیه الکتریکی بخار چیوه با فشار بالا می‌باشد. در بعضی موارد این لامپ‌ها هنگام کارکرد در حالت افقی قرار می‌گیرند که به دلیل توزیع دما روی دیواره آرک تیوب مرکز تخلیه الکتریکی 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 ضربی عبور، راندمان و تغییر شکل در آنها می‌گردد [۱ و ۲].

اهداف اصلی انجام این تحلیل به شرح ذیل می‌باشد:

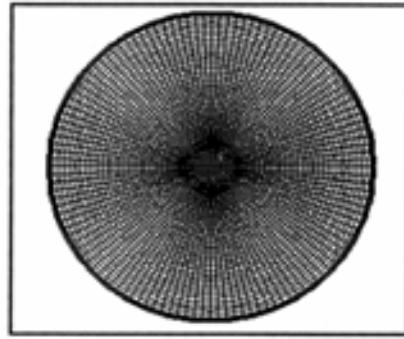
- ۱- بدست آوردن توزیع دما روی آرک تیوب و حباب
- ۲- نتیجه‌گیری در مورد دلیل تغییر شکل آرک تیوب
- ۳- مقایسه پروفیل دما و سرعت با گازهای پرکننده مختلف در فشارهای مختلف.
- ۴- مقایسه نتایج دو بعدی و سه بعدی.

## هندسه مسئله و مشبندی

مشبندی و هندسه مسئله 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 دیوارهای 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 اینجا 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 مسئله 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  $0/۰۵$ ،  $۰/۰۳$  و  $۰/۰$  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 ساترلن德 با دما متغیر می‌باشد [۵].

جدول ۱- خواص گازهای پرکننده

خواص نوع گاز	$C_p(j/kg.k)$	$K_{۰..}(w/m.k)$	$K_{۱۵..}(w/m.k)$	$\mu_{..}(kg/m.s)$	$M$ (جرم مولکولی)
N <sub>۲</sub>	۱۰۴۱	۰/۰۲۴۲	۰/۰۹۱	$۱/۶۶ \times ۱۰^{-۰}$	۲۸
Ar	۵۱۹	۰/۰۱۵۸	۰/۱۴	$۲/۱۳ \times ۱۰^{-۰}$	۴۰
%۷۵Ar + %۲۵N <sub>۲</sub>	۶۱۹	۰/۰۱۸	۰/۱۲۱	$۲ \times ۱۰^{-۰}$	۳۷/۷
%۹۰Ar + %۱۰Ne	۵۴۸	۰/۰۱۷	۰/۱۴۵	$۲/۱ \times ۱۰^{-۰}$	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 خطأ 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  $'a$ ، به ترتیب ضرایب جذب، پخش و شکست می‌باشند.

جدول ۲- خواص آرک تیوب و حباب

خواص \ نوع	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp(j/kg.k)	K(w/m.k)	a(1/m)	$\rho'$ (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 شبیه 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 شبیه کوارتزی مصرف گردد که حالت واقعی نیز همین می‌باشد.

باندهای مختلف و مقدار ضریب عبور سطوح برای آنها که با توجه به مراجع [۷ و ۶] انتخاب گردیده است در جدول ۲ آمده است (در این جدول طول موجها بر حسب میکرومتر می‌باشد). برای مدل نمودن مقدار توان لامپ از یک چشمۀ 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 (۶/۲۵ cm<sup>3</sup>) مقدار توان چشمۀ حرارتی برایر با (۲۰ W/cm<sup>3</sup>) انتخاب گردید.

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

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

#### 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

### معادلات حاکم بر مسئله

۲۰- درجه ۹/۱ و به ازای ۴ درجه ۸/۹۱ می‌باشد. بنابراین به دلیل اختلاف ناچیز از مقدار ۹ برای آن استفاده شد.

برای بدست آوردن دانسیته به دلیل تغییرات کم آن از فرض گاز ایده‌آل تراکمندیزیر 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 مسئله 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:

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

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 مومنت

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

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

### قانون بقای انرژی

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} [reV_r] + \frac{\partial}{\partial \theta} [eV_\theta] &= \rho g_r V_r + \rho g_\theta V_\theta + \frac{\partial}{r \partial r} [rV_r \tau_{rr} + rV_\theta \tau_{r\theta}] + \frac{\partial}{r \partial \theta} \\ &[V_r \tau_{r\theta} + V_\theta \tau_{\theta\theta}] - \frac{\partial(r \dot{q}_r)}{\partial r} \end{aligned}$$

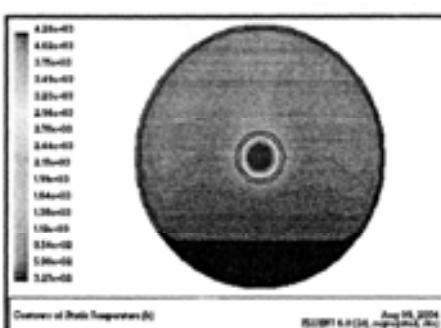
### بحث و بررسی نتایج

#### ۱- در حالت دو بعدی

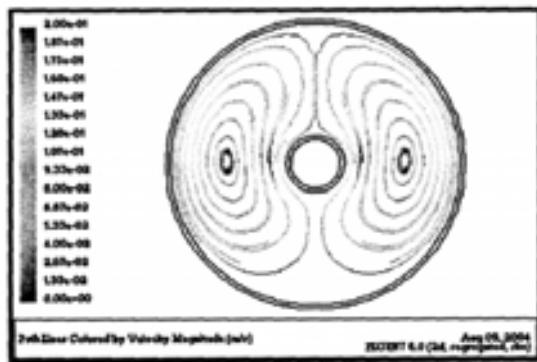
در این حالت ۶۴ دفعه تحلیل انجام شده است (۴ نوع گاز با ۴ فشار مختلف در ۴ دمای محیطی مختلف).  
به دلیل یکسان بودن پروفیل کلی دما و سرعت برای گازهای مختلف منحنی های دما و سرعت ارائه شده  
مربوط به دمای محیطی ۲۵ درجه سانتیگراد و گاز پرکننده نیتروژن می باشد که از بقیه تحلیل ها در رسم  
نمودار تأثیر دمای محیطی 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 گرفته اند.

۱۹

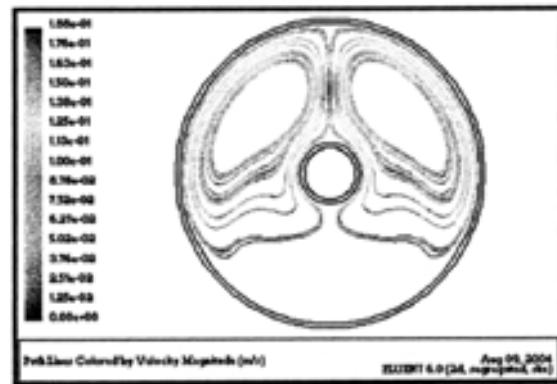
نشریه انرژی ایران / سال نهم / شماره ۴۲/ ایان ۱۳۸۴



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

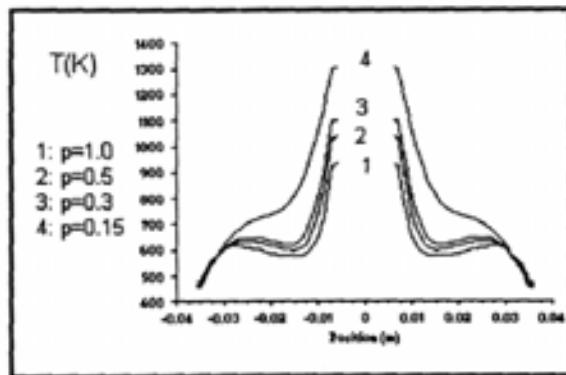


شکل ۵- خطوط جریان برای گاز نیتروژن در فشار ۰/۱۵ بار



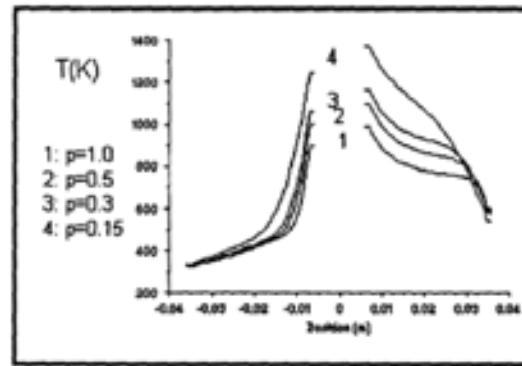
شکل ۶- خطوط جریان برای گاز نیتروژن در فشار ۰/۱۰ بار

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.



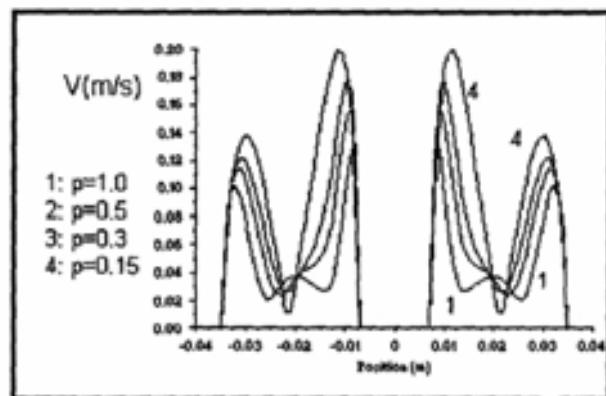
شکل ۷- توزیع دما در راستای افقی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف

د- گازهای سریعتر 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 منحنی دار شدن آرک تیوب نیز به همین دلیل می‌باشد. این مسأله در شکل ۸ نشان داده شده است.

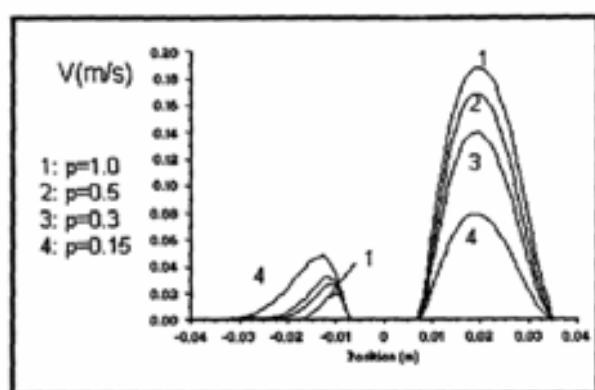


شکل ۸- توزیع دما در راستای عمودی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف

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 گردابهای با سمت بالا حرکت کرده و با نزدیک شدن گردابهای 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.

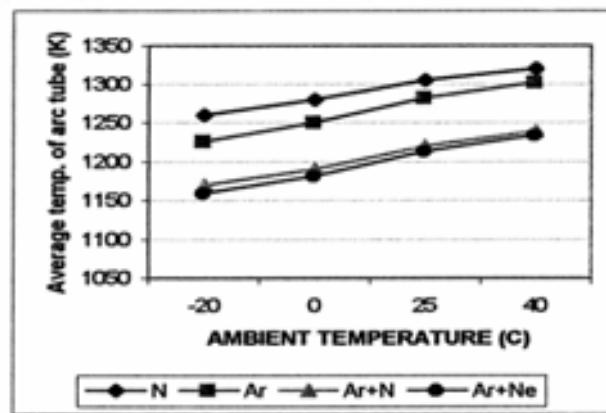


شکل ۹- توزیع سرعت در راستای افقی برای گاز نیتروژن در فشارهای مختلف



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

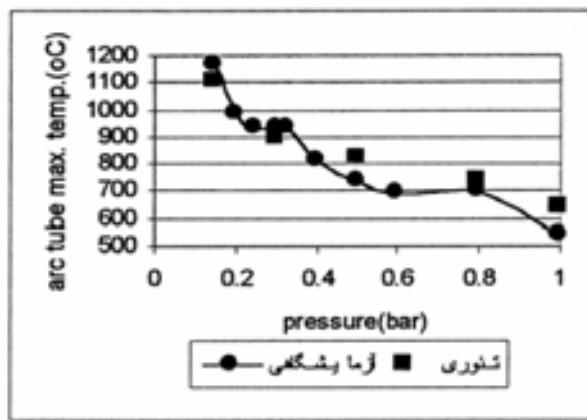
و- شکل ۱۱ نشان می دهد که دمای محیط تأثیر کمی بر دمای متوسط آرک تیوب دارد (کمتر از ۱۰۰ درجه) و به دلیل زیادتر بودن دما در فشار ۱۵/۰ بار و بحرانی تر بودن آن، منحنی ها برای این دما رسم شده است.



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

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

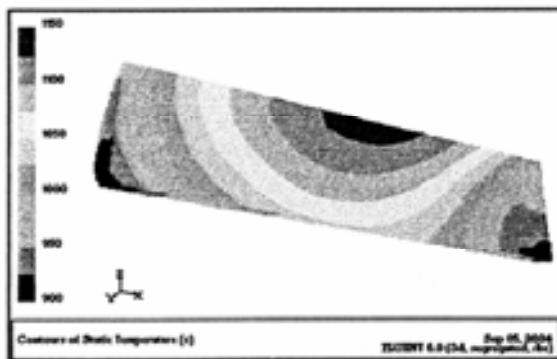
۲۳



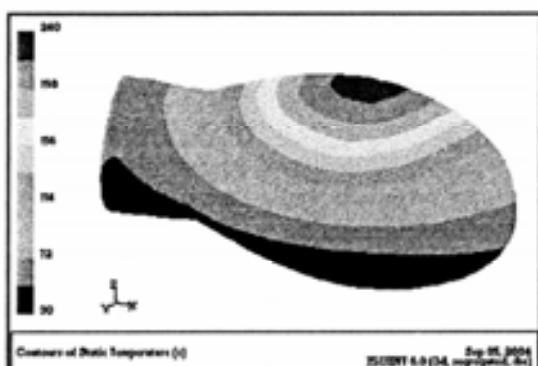
شکل ۱۲- حداقل دمای آرك تیوب برای کاز نیتروژن در دمای محیط

## ۲- در حالت سه بعدی

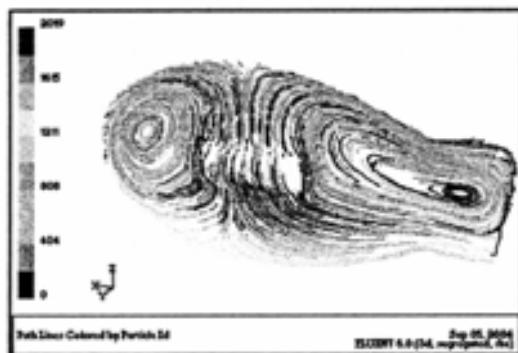
اشکال ۱۴ و ۱۳ توزیع دما روی سطح داخلی آرک تیوب و حباب را برای مخلوط گاز آرگون - نیتروژن نشان می‌دهد. همانطوری که دیده می‌شود در هر دو شکل ماکریتم دما در قسمت بالا و وسط قرار دارد و در دو انتهای و پایین آنها دما کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه دما در وسط زیادتر و در دو انتهای لامپ کمتر می‌باشد یک سری جریانهای 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 ۱۵/۰ بار بر حسب سانتیگراد



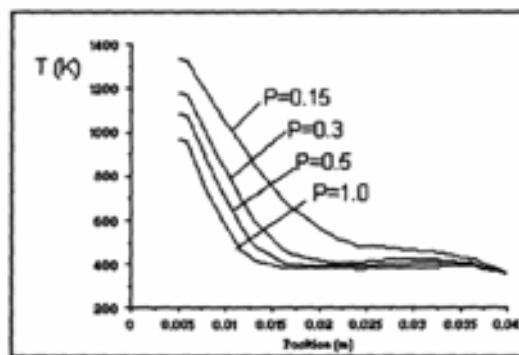
شکل ۱۴- توزیع دمای حباب برای گاز آرگون - نیتروژن در فشار ۱۵/۰ بار بر حسب سانتیگراد



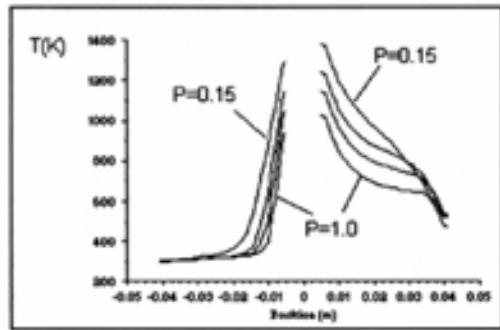
شکل ۱۵- خطوط جریان در مقطع عمودی و در وسط لامپ

### 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.  
۲۵ اشکال ۱۷ و ۱۶ 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 کلوین



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

با توجه به مطلب فوق و اهمیت مقدار حداقل دما بر روی آرك 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.

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

کاز پرکننده	فشار گاز (بار)	دمای ماکریم (۲D)	دمای ماکریم (۳D)
نیتروژن	۰/۱۵	۱۳۷۲	۱۲۹۳
	۰/۳	۱۱۶۸	۱۲۴۳
	۰/۵	۱۱۰۰	۱۱۵۵
	۱/۰	۹۹۳	۱۰۳۳
آرگون	۰/۱۵	۱۲۲۳	۱۲۸۰
	۰/۳	۱۱۴۷	۱۲۲۹
	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 ۳/۰ 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 می‌باشدند.

## 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 خطاء ۲۷ مقدار ضریب انتقال حرارت چشمۀ 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 Amesterdam, 1951.
3. C.R. Tottle, "an encyclopedia of metallurgy and materials", Macdonald and Evans, 1984.
4. Philip G. Hill & Carl R. Peterson." Mechanics and thermodyamics 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.