J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 1, 2022: 55-72

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ص: ۵۵-۷۲

DOR: xx.xxxx.x.xxxxxxxx.xxxx.x.x.x.x

# مطالعه‌ی تجربی اثر لایه‌الکتریکی دوگانه در انتقال گرما به میکرولوله گرمایی با مقطع مثلثی

**مریم فلاح عباسی [۱]، حسین شکوهمند [۲و*] و مرتضی خیاط [۳]**

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mar.fallah@gmail.com
*۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ho.shokouhmand@gmail.com
۳- استاد، مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، khayat.morteza@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵

**چکیده**

در تحقیق حاضر، انتقال حرارت در میکرو لوله حرارتی به دو روش حل تجربی و حل عددی بررسی شده است. میکرو لوله حرارتی با مقطع مثلثی شکل با شرایط و محدودیتهای صنعتی در ابعاد بسیار کوچک طراحی و ساخته شده است. با توجه به اندازه بسیار کوچک لوله مسی اولیه، فرآیند ساخت مستلزم دقت و تکنولوزی پیشرفته است. ابتدا نمونه های ریز لوله مسی موجود در بازار تهیه و طی فرآیند گرما و کشش همزمان به ضخامت و قطر مورد نظر رسانده شده است. در نهایت با استفاده از گوه‌های تهیه شده سطع مقطع مناسب بدست آمده است. بار حرارتی معادل ۱ وات تا ۵ وات در قسمت اواپراتور اعمال شده و برای اندازه‌گیری مقاومت حرارتی از ۵ عدد ترموکوپل نصب شده بر روی بدنه استفاده شده است. به منظور بررسی تاثیر لایه الکتریکی دوگانه بر انتقال حرارت از آب معمولی و آب یونیزه و همچنین محلول با درصد ترکیب مختلف آب و الکل استفاده شده است. نتایج بدست آمده، تاثیرات قابل ملاحظه لایه دوگانه الکتریکی بر کارکرد میکرو لوله حرارتی در اندازه‌های نمونه‌های تست شده را نشان می‌دهد. این اثرات در ترکیبات مختلف محلول آب و الکل به روش عددی و تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** ho.shokouhmand@gmail.com

**کلمات کلیدی:** انتقال گرما، میکرولوله گرمایی، لایه دوگانه الکتریکی، میدان مغناطیسی.

## ۱- مقدمه

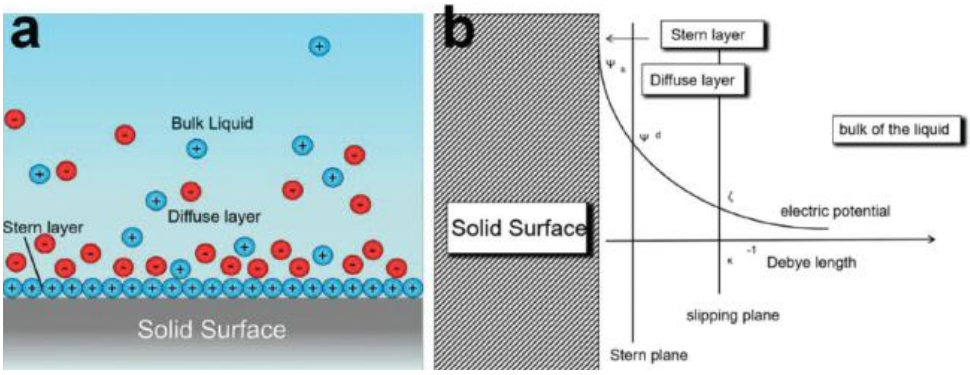
در دهه‌های اخیر، با ظهور تکنولوژی های ساخت ابزار ریز در مقیاس میکرون، امکانات بسیاری در زمینه کار با سیال در حد نانو لیتر پدید آمده و بررسی جریان سیال در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، که معروفترین این ابزار میکرولوله‌های گرمایی می‌باشد. میکرولوله‌های گرمایی وسایل بسیار کوچکی هستند که در اثر تغییر فاز سیال درون آن‌ها، انرژی گرمایی را انتقال می‌دهند. قطر نامی میکرو لوله‌ها حدود ۱,۲ تا ۱,۵ میلیمتر می‌باشد و طول آنها معادل چند سانتی‌متر است و اغلب برای دفع گرمای ایجاد شده در پکیج‌های الکترونیکی کوچک به کار می‌روند. میکرو لوله‌ها علاوه بر آنکه قابلیت انتقال زیادی گرما را دارند. باعث توزیع یکنواخت دما نیز می‌شوند، که این امر ناشی از جریان دوفازی سیال در داخل آن‌هاست[۱ و ۲ ].

**نحوه استناد به این مقاله**: مریم فلاح عباسی، حسین شکوهمند و مرتضی خیاط. مطالعه تجربی اثر لایه‌الکتریکی دوگانه در انتقال‌گرما میکرولوله گرمایی با مقطع مثلثی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۱) : ۵۵-۷۲.



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

با کوچک شدن حجم سیال نسبت به محیط آن، برخی از پدیده‌های فیزیکی نظیر بار سطحی و کشش سطحی اهمیت پیدا می‌کنند که در اندازه‌های متداول قابل صرف‌نظر هستند. زمانی که یک جامد در معرض مایع قرار می گیرد، دو لایه بار تشکیل می شود (شکل ۱). به لایه درونی که شامل یون های جذب شده روی سطح جامد ، لایه استرن می گویند. لایه بیرونی، لایه پراکنده نامیده می شود. یون های این لایه به طور سست با جامد در ارتباط هستند و با مایع حرکت می کنند. بنابراین، تحت یک نیروی محرکه خارجی، در صورت وجود اختلاف فشار یا اختلاف غلظت، یک جریان الکتریکی ناشی از جریان یون به دست می‌آید که با جریان استریمینگ نامگذاری می‌شود [۳و ۴]




**شکل ۱- شماتیک فصل مشترک مایع و جامد. ب) لایه دوگانه الکتریکی [۳]**

تانگ و همکاران مقالات مختلف در خصوص میکرو لوله های گرمایی بسیار نازک مدیریت گرمایی از تجهیزات الکترونیکی را بررسی کرده‌اند[۵]. جانگ و هانگ بو انتقال حرارت و جرم در یک میکرو لوله حرارتی را با یک مدل عددی اصلاح‌شده برای MHP تحلیل کردند.نتایج لدست آمده از مدل ددی توسه یافته توسط آنها با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشت [۶]. هوآن مون و همکاران به بررسی کامل انتقال گرما در میکرو لوله گرمایی پرداختند. نتایج آن‌ها با سطح مقطع میکرو لوله مسی مربع و مثلث شکل نشان داد که که اختلاف درجه گرما بین اواپراتور و کندانسور با افزایش بار گرمایی در درجه گرما خاص افزایش یافت. این موضوع به این علت بود که سرعت جریان بخار با افزایش بار گرمایی افزایش می‌یابد. بنابراین نیروی اصطکاک در فصل مشترک بخار مایع و افت فشار در جریان مایع، افزایش می‌یابد. از آنجا که فضا برای جریان بخار در میکرو لوله گرمایی باریک‌تر از لوله گرمایی معمولی است، افت فشار حاصل از اصطکاک در فصل مشترک مایع- بخار تا حد زیادی ممکن است عملکرد میکرو لوله گرمایی را تحت تاثیر قرار دهد[۷]. احمد سلیل و همکاران جریان الکترو اسمتیک در میکرو کانال با مانع مثلثی را به صورت عددی بررسی کردند و نشان دادند، به دلیل پتانسیل زتا، یک لایه دوگانه الکتریکی (EDL) در مجاورت سطح دیواره ایجاد می‌شود. نتایج بررسی آنها نشان داد که بازده تحت‌تاثیر، ضخامت EDL بود. با توجه به همپوشانی لایه الکتریکی دوگانه در میکرو کانال، بازده برابر با ۵۲,۷ ٪ بدست آمد[۸].

با توجه به اینکه ضرایب گرمائی ویژه سیال عامل تابعی از دما بوده و نسبت به آن متغیر می‌باشد، لذا در این تحقیق، تحلیل ترمودینامیکی و عددی سیکل استاندارد اتو با استفاده از کد کامپیوتری نوشته شده در زبان برنامه‌نویسی فورترن و در سه حالت ضرایب گرمائی ویژه الف) مقدار ثابت، ب) تابع خطی دما و ج) تابع چند جمله‌ای دما به کمک روشهای عددی مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای عملکردی سیکل شامل راندمان حرارتی و کار خروجی سیکل و نیز زمان محاسباتی و حافظه کامپیوتری مورد نیاز برای سه حالت فوق محاسبه و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردیده است.

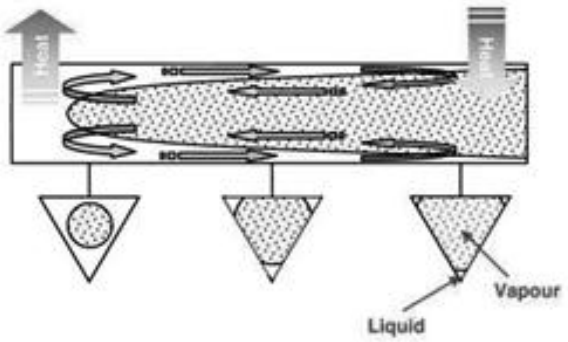


[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

## ۲- معادلات حاکم

عملکرد میکرو لوله‌های گرمایی بسیار شبیه لوله‌های گرمایی معمولی است. تبخیر سیال عامل در بخش اواپراتور باعث جذب گرما از منبع گرمایی می‌شود. بخار به سمت کندانسور حرکت می‌کند و در آنجا متراکم شده و گرمای نهان خود را آزاد می‌کند. میکرو لوله‌های گرمایی بر خلاف لوله‌های گرمایی برای برگشت سیال از اواپراتور به کندانسور، بجای استفاده از فتیله متخلل، از شیارها و یا لبه‌های تیز استفاده می‌کنند (شکل ۲).




**شکل ۲ - شماتیک عملکرد میکرو لوله گرمایی و استفاده از شیار برای برگردانیدن سیال از اواپراتور به کندانسور**

ناحیه حل دارای دو فاز مایع و بخار است، همچنین نواحی الکتریکی بوجود آمده در تمامی ناحیه حل تاثیر گذار است. برای ردیابی سطح مشترک مابین دو فاز مایع و بخار دو روش لاگرانژی و اویلری موجود است. دامنه کاربرد روش لاگرانژی محدود به جریان‌هایی است که تغییرات شکل سطح در آنها شدید نباشد. روش اویلری دارای دقت کمتری نسبت به روش لاگرانژی است ولی می‌تواند جریان‌های با سطح مشترک پیچیده و دارای تغییرات زیاد سطح مشترک (در اینجا بخار- مایع) را شبیه‌سازی کند. از معروفترین روش‌های اویلری، روش حجم سیال است. که از نقطه نظر عددی به صورت کسر حجمی سیال در سلول شبکه‌ی حل محاسباتی، تعریف شده است. اگر سلول حاوی سیال نباشد، مقدار کسر حجمی صفر است و اگر کاملا از سیال پر شده باشد مقدار آن، یک است. اگر سیال قسمتی از سلول را پر کرده باشد، کسر حجمی عددی مابین صفر و یک خواهد بود. در این روش، ناحیه تماس مابین فازهای مایع و بخار همانند شکل ۳ بدست خواهد آمد.

### ۲-۱- معادله پیوستگی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \qquad (۱)$$

### ۲-۲ معادله ممنتوم

معادله ممنتوم در محیط چند فازی به دو گونه مختلف نوشته می‌شود. در حالت اول، معادله مذکور برای هر فاز و بر اساس کسر حجمی همان فاز به طور مجزا نوشته می‌شود و سپس معادلات گسسته‌سازی شده و با هم حل می‌گردند [۹-۱۱]. در حالت دوم، که به تخمین حجم مایع یانگز معروف است . از متوسط جرم حجمی و ویسکوزیته بر اساس کسر حجمی برای فازهای مایع و بخار استفاده شده و فقط یک معادله ممنتوم شامل جرم حجمی و ویسکوزیته مذکور نوشته می‌شود .[۱۲-۱۳]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla \mathrm{p} + \nabla \cdot \tau + \rho g + F + \underbrace{\sigma \kappa \nabla \alpha}_{\text{اثر کشش سطحی}} \qquad (۲)$$



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

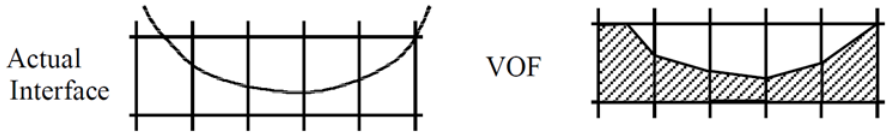
در معادله (۲)، $\boldsymbol{\tau}$ شدت تانسور کرنش و $\boldsymbol{F}$ نیروی حجمی (همانند نواحی الکتریکی) و$\boldsymbol{\kappa}$ انحنای متوسط سطح تماس و $\boldsymbol{\sigma}$ ضریب کشش سطح تماس است. انحنای متوسط سطح تماس از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۱۴]

$$\kappa = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|}\right) \quad (۳)$$

همچنین مقدار شدت تانسور کرنش به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\tau = \mu(\nabla v + \nabla v^T) \quad (۴)$$

که T ترانهاد برداری ماتریس و $\boldsymbol{\mu}$ ویسکوزیته دینامیک مخلوط و در نهایت برای معادله ممنتوم که معادله‌ای مناسب برای میکروتیوب‌ها است عبارت خواهد بود از [۱۵]




**شکل ۳- محل تماس دو فاز در حالت واقعی (بالا) و با روش اویلری حجم مایع (پایین)**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla \mathrm{p} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + (\nabla v) \cdot \nabla \mu + \rho g + F + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (۵)$$

### ۳-۲ معادله روش حجم مایع

معادله روش حجم مایع بر اساس انتقال کسر حجمی $\boldsymbol{\alpha}$ به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (v\alpha) = 0 \quad (۶)$$

و خواص فیزیکی مخلوط به صورت روابط (۷) و (۸) خواهد بود [۱۶]

$$\rho = \alpha \rho_l + (1-\alpha)\rho_g \quad (۷)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1-\alpha)\mu_g \quad (۸)$$

حال بر اساس داشتن دو فاز مایع و بخار، روش اویلری معادله روش حجم مایع بر اساس کسر حجمی $\boldsymbol{\alpha}$ و سرعت دو فاز مایع و بخار به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۶-۱۸]

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (v_l \alpha) = 0 \quad (۹)$$

$$\frac{\partial (1-\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [v_g (1-\alpha)] = 0 \quad (۱۰)$$

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

که اندیس‌های $l$ و $g$ به ترتیب نمایش دهنده سرعت فاز در بخش‌های مایع و بخار هستند، که با توجه به بیان گفته شده، می‌توان یک بیان وزنی برای سرعت کل و بر اساس سرعت دو فاز مایع و بخار و به شرح زیر ارایه داد. [۱۶]

$$v = \alpha v_l + (1-\alpha)v_g \quad (۱۱)$$

همچنین معادله کلی روش حجم مایع برای ناحیه دو فازی مایع و بخار به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (v\alpha) + \nabla \cdot [v_r \alpha(1-\alpha)] = 0 \quad (۱۲)$$

### ۲-۴ معادله انرژی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \nabla \cdot \left(v(\rho c_p T + p)\right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (۱۳)$$

در رابطه بالا، ترم $S_h$هر منبع تولید کننده گرما شامل تشعشع و $k_{eff}$ هدایت گرمایی موثر است که برای سلول حاوی دو فاز همانند معادلات ۴ و ۵ محاسبه می‌شود. T بیانگر دما بوده و برای فازهای مایع و بخار از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$T = \alpha T_l + (1-\alpha)T_g \quad (۱۴)$$

### ۲-۵ انتقال گرما هدایتی (جداره)

بخش جداره دارای انتقال گرما هدایتی می‌باشد که معادله حاکم بر آن عبارت است از

$$q''' + \nabla(k_s \nabla T) = (\rho C_p)_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱۵)$$

که در آن $q'''$گرمای تولیدی توسط منبع گرمایی و $k_s$ضریب انتقال گرمایی هدایتی دیوار (Solid) و $C_p$ گرمای ویژه می‌باشد.

### ۲-۶ اثر نیروهای حجمی

اگر ϕ پتانسیل الکتریکی خارجی بر میکرو لوله گرمایی باشد، نیروی حجمی حاصل از آن به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۹]

$$f_1 = \rho_e E = \rho_e \nabla \phi \quad (۱۶)$$

$$\rho_e = \varepsilon \varepsilon_0 k^2 \psi_1 \quad (۱۷)$$

$$k = \sqrt{\frac{F^2}{\varepsilon RT} \sum_i z_i^2 c_{i,0}} \quad (۱۸)$$

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

در روابط بالا، $k$ معکوس طول Debye و $F$ ثابت فارادی، $R$ ثابت گازها، $T$ دمای مطلق، $c_{i,0}$ غلظت توده‌ای یون iام، $z_i$ والانس iام ذره و $\psi_1$ پتانسیل حاصل از شارژ دیواره است. پتانسیل الکتریکی $\psi_2$ دانسیته شارژ حجمی $\rho_e$ از لایه الکتریکی دوگانه، حاصل از تماس مایع و جامد با شرط تقارن، توسط معادله پویزن - بلولتزمن و به شرح زیر بیان می‌گردند [20-22]

$$\nabla^2\psi_2 = -\frac{2n_0ze}{\varepsilon}sinh\left(-\frac{ze\psi_2}{k_bT}\right) \quad (۱۹)$$

$$\rho_e = -\varepsilon\nabla^2\psi_2 = -2n_0zesinh\left(-\frac{ze\psi_2}{k_bT}\right) \quad (۲۰)$$

که $\varepsilon$ ثابت دی‌الکتریک، $n_0$غلظت یون توده‌ای ، $z$ والانس یون‌ها، $e$شارژ پروتون، $k_b$ ثابت بولتزمن و $T$ دمای مطلق هستند. نیروی حجمی از حاصل از لایه الکتریکی دوگانه مابین فاز مایع و جامد از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$f_2 = \rho_eE \quad (۲۱)$$

E نیروی الکترو ویسکوز است. نیروی حجمی حاصل از لایه الکتریکی دوگانه مابین فاز مایع و بخار عبارت است از [۲۳]

$$f_1 = \underbrace{-\frac{a}{2}\psi_3^2+\frac{b}{4}\psi_3^4-cz_ieV_e\psi_3}_{\text{سیستم همگن}}+\underbrace{\frac{d}{2}(\nabla\psi_3)^2}_{\text{سیستم غیر همگن}} \quad (۲۲)$$

$$a=\frac{U_{sum}-4k_sT}{l^3}, b=\frac{16k_sT}{3l^3}, c=\frac{1}{2l^3}, d=\frac{U_{sum}}{2l^3}$$

که $U_{sum}$ مربوط به پتانسیل بین مولکولی و $z_i$شماره شارژ و $e$ شارژ اولیه و $V_e$ پتانسیل الکترواستاتیکی و مقدار $\psi_3$ از رابطه زبر بدست می‌آید [۲۴]

$$\mu^S = \mu^{-S} + q\psi_3 \quad (۲۳)$$

در رابطه بالا $\mu^S$ پتانسیل شیمیایی یون‌ها در سطح تماس و $q$میزان شارژ یون است. در تحقیق حاضر به غیر از نیروی گرانش دارای نیروهای مختلف الکتریکی هستیم که بر روی ممنتوم تاثیر گذارند. که همه این نیروها عبارتند از :

$$F = f_1 + f_2 + f_3 \quad (۲۴)$$

### ۳- چیدمان مورد استفاده در تحقیق

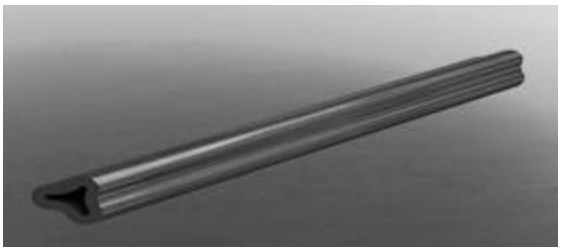
ساخت میکرو لوله گرمایی به دلیل کوچک بودن ابعاد دارای پیچیدگی زیادی می‌باشد. در این تحقیق از دو میکرو لوله مسی با سطح مقطع مربع و مثلث که از لوله استوانه‌ای تجاری موجود تهیه شده بود استفاده شده است. بدلیل لزوم تعیین دمای دقیق در مناطق مورد نظر سطح مقطع و قطر لوله قبل از تغییر شکل با استفاده از گرما و کشش به ابعاد مورد نظر رسانده شد (شکل ۴). پس از طراحی و ساخت میکرو لوله، چگونگی شارژ سیال عامل در اولویت دوم اهمیت قرار دارد. وجود گازهای غیر قابل چگالش منجر به اختلال در حرکت سیال درون لوله گرمایی می‌شود و کارایی لوله گرمایی را مختل می‌نماید. در بدترین



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

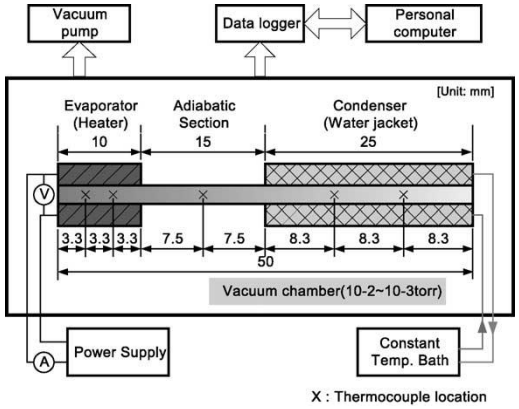
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

شرایط، گردش سیال به طور کامل متوقف شده و لوله گرمایی کارایی خود را از دست داده و همانند یک رسانا عمل می‌نماید. برای اجتناب از این حالت در ساخت نمونه های مورد نیاز ابتدا انتهای نمونه میکرو لوله گرمایی با طول بیشتر از جدول فوق کاملا مسدود شده و وکیوم از طرف دیگر انجام گردید. سپس به میزان ۲۰٪ حجم میکرو لوله مورد نیاز سیال عامل تزریق شده و پس از قطع بخش اضافه و مسدود نمودن ابتدای میکرو لوله تست نشتی انجام پذیرفت.

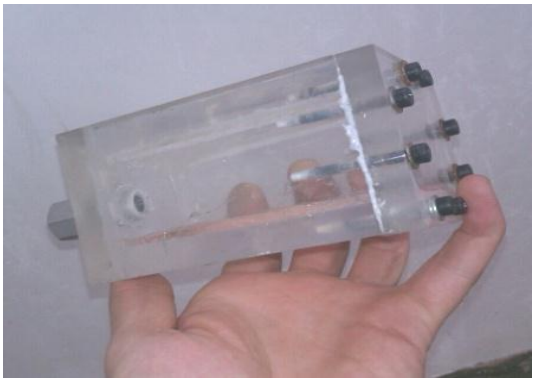


**شکل ۴- مقطع عرضی میکرو لوله گرمایی (مثلثی)**

دستگاه آزمایش عملکرد گرمایی میکرو لوله گرمایی، از یک محفظه خلا، یک سیستم انتقال گرما برای خنک کردن کندانسور، اواپراتور به همراه یک گرمکن که از سیمی با قطر ۰,۳۶ و ۱۰ X / M مقاومت در هر متر برای تامین بار گرمایی ثابت، سیستم ثبت اطلاعات و ترموکوپل هایی برای اندازه گیری دما تشکیل شده است (شکل ۵). محفظه خلاء ساخته شده از اکریلیک برای به حداقل رساندن تلفات گرما به محیط مورد استفاده قرار گرفت که در شکل ۶ نشان داده شده است.




**شکل ۵ چیدمان آزمایش مورد استفاده در تحقیق**



**شکل ۶- محفظه خلا مورد استفاده در تست**

ترموکوپل نوع K ( ۰,۰۸ میلی متر) توسط لحیم کاری در دو دوبخش در دیوار اواپراتور، یک نقطه در بخش آدیاباتیک، و دو نقطه در کندانسور قرار داده شدند. مکان های این ترموکوپل به عنوان X در شکل ۵ نشان داده شده است که این ابعاد برای برای میکرو لوله گرمایی با طول کل ۵۰ میلی متر میباشد. که درمورد طول ۱۰۰ میلی متر، فاصله ترموکوپل ها دو برابر خواهد بود (شکل ۷). میکرو لوله گرمایی از جنس مس فاقد اکسیژن ساخته شده و ضخامت دیوار آن بین ۰,۲۷ و ۰,۲۸ میلی‌متر است. آب بعنوان سیال کاری، که دارای کشش سطحی نسبتا بزرگ و گرمای نهان ویژه بین ۳۰ تا ۱۶۰ درجه سلسیوس دمای کارکرد است مورد استفاده قرار گرفت. نسبت پر شدن سیال ۲۰٪حجم داخلی میکرو لوله بود. منطقه مسدود شدن مایع که در آن بخار امکان‌پذیر نیست ممکن است در کندانسور ایجاد شود. انتقال گرما توسط تغییر فاز سیال کاری در منطقه مسدود شدن مایع نمی‌تواند کامل شود. درجه گرما انتهای کندانسور است ۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس کمتر از منطقه

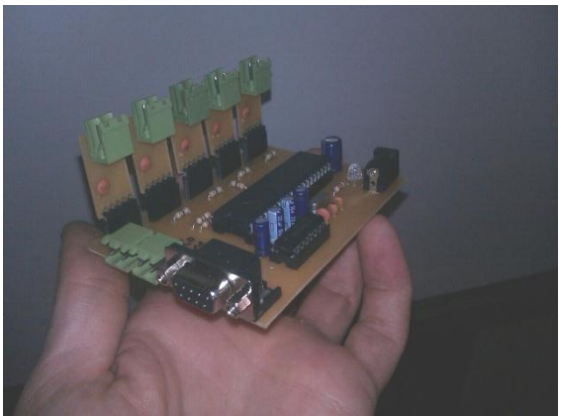


[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

مجاور به کندانسور است، و نرخ انتقال گرما از میکرو لوله گرمایی به علت مسدود شدن مایع کاهش یافته است. بنابراین مقدار غیر فعال از سیال کاری با توجه به مسدود شدن مایع باید در مرحله طراحی میکرو لوله گرمایی برای محاسبه نسبت پر شدن سیال در نظر گرفته شود. مکانیزم ایجاد مسدود شدن مایع به جزئیات در هر هیچ مقاله ای گزارش نشده است و هنوز هم به عنوان یک حوزه توسعه نیافته باقی مانده است. میکرو لوله گرمایی از جنس مس فاقد اکسیژن ساخته شده و ضخامت دیوار آن بین ۰,۲۷و ۰,۲۸ میلی‌متر است. آب خالص و نیز آب معمولی و در مرحله بعد ترکیبات مختلف آب و الکل بعنوان سیال کاری، که دارای کشش سطحی نسبتا بزرگ و گرمای نهان ویژه بین ۳۰ تا ۱۶۰ درجه سلسیوس دمای کارکرد است مورد استفاده قرار گرفت. نسبت پر شدن سیال ۲۰٪ حجم داخلی میکرو لوله گرمایی بود. منطقه مسدود شدن مایع که در آن بخار امکان‌پذیر نیست ممکن است در کندانسورایجاد شود. انتقال حرارت توسط تغییر فاز سیال کاری در منطقه مسدود شدن مایع نمی‌تواند کامل شود. درجه حرارت انتهای کندانسور ۵ تا ۲۰ n کمتر از منطقه مجاور به کندانسور است و نرخ انتقال حرارت از میکرو لوله گرمایی به علت مسدود شدن مایع کاهش یافته است. بنابراین مقدار غیر فعال از سیال کاری با توجه به مسدود شدن مایع باید در مرحله طراحی میکرو لوله گرمایی برای محاسبه نسبت پر شدن سیال در نظر گرفته شود. مکانیزم ایجاد مسدود شدن مایع به جزئیات در هر هیچ مقاله ای گزارش نشده است و هنوز هم به عنوان یک حوزه توسعه نیافته باقی مانده است. جهت کالیبره کردن به‌منظور نمایش نتایج سنسورهای بکار رفته از آداپتور مطابق شکل ۸ استفاده شده است.



**شکل ۷ -محل قرارگیری و نصب ترموکوپل ها**



**شکل ۸ -اداپتر میکرو لوله حرارتی**

## ۴-ویژگیهای انتقال حرارت در میکرو لوله حرارتی مثلثی

لوله گرمایی می‌تواند مقدار زیادی از حرارت با اختلاف درجه حرارت کمی بین اواپراتور و کندانسور انتقال دهد. به طورکلی، یکی از روش‌های آزمون برای بررسی اینکه آیا یک گازغیر قابل تراکم در لوله حرارتی وجود دارد یا یک لوله حرارتی به خوبی پس از پایان فرآیند تولید کار می‌کند اندازه گیری اختلاف درجه حرارت بین اواپراتور و کندانسور است. با این‌حال، ما باید به یاد داشته باشیم هر لوله حرارتی یک اختلاف دما مخصوص خود دارد. در مورد لوله های حرارتی کوچک مثل مطالعه حاضر، فنآوری های دقت بالا در فرآیند تولید نیاز دارد، چرا که حضور گازهای غیرقابل میعان یا آلاینده حتی با مقدار بسیار کم می‌تواند برای عملکرد لوله های حرارتی مضر باشند.

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

**جدول ۱- مشخصات نمونه های میکرو لوله های گرمایی در آزمایش تجربی**

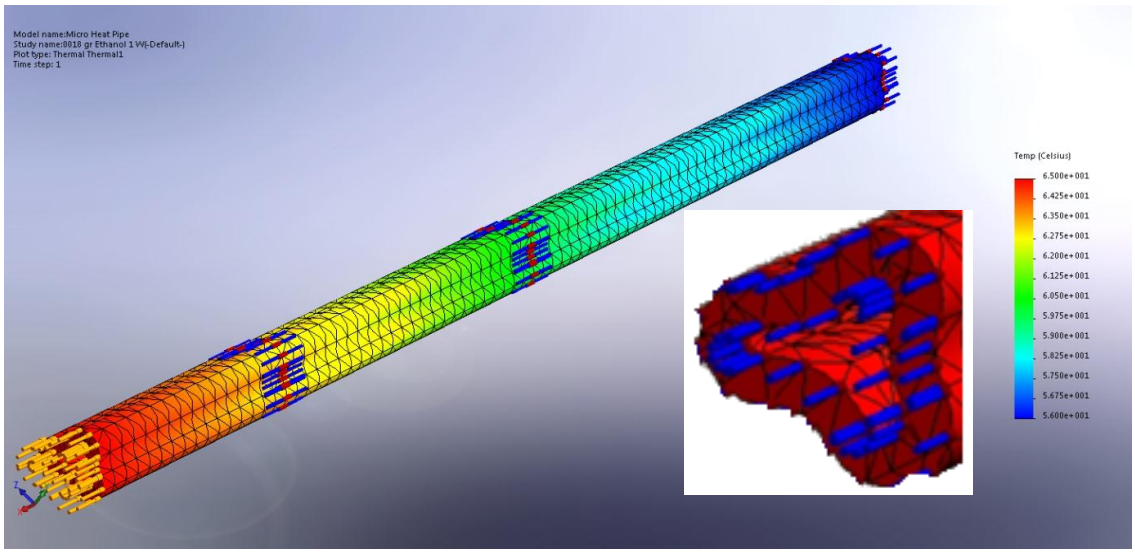
| شکل سطح مقطع | مثلث |
|---|---|
| طول کل نمونه | (mm) 50/100 |
| طول قسمت اواپراتور | (mm) 10 |
| طول قسمت آدیاباتیک | (mm) 15 |
| طول قسمت کندانسور | (mm) 25 |
| سیال عامل | آب/مخلوط آب و اتانول |
| جنس میکرو لوله | مس فاقد اکسیژن |

## ۵-مدل شبیه سازی شده با نرم افزار

با توجه به شرایط عملکردی نمونه مورد تحقیق و نیز معادلات بسط داده شده در بخش ۲ ، شبیه سازی با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت انجام گردیده است. شایان ذکر است که در شرایط اثر لایه مرزی دوگانه الکتریکی توسط نرم افزار در نظر گرفته نمی‌شود. برای ترسیم هندسه میکرولوله از محیط نرم‌افزاری اتوکد به منظور داشتن مختصات اصلی محیط حل استفاده شده است و سپس هندسه مذکور از طریق خروجی استاندارد دی ایکس اف به یک برنامه تحت نرم افزار فلوئنت معرفی شده است. از نرم‌افزار اکسل برای ترسیم منحنی‌ها استفاده شده است.

### ۵-۱ شبکه بندی

نرم افزار انسیس فلوئنت، قابلیت کار با مش‌های پویا را دارد، که این پویایی توانایی حل مسائل با استفاده از مش‌های بی‌ساختار و هندسه‌های پیچیده را در بر می‌گیرد. انواع مش‌های قابل شناسایی به صورت المان های دو بعدی، مثلثی ، مربعی و یا المان های سه بعدی چهار ضلعی ، هگزا هدرال ، هرمی ، گوه‌ای ، چندوجهی ، ترکیبی یا پیوندی هستند. برای تحلیل سه بعدی می توان در ابتدا مش بندی دوبعدی انجام شود و سپس سه بعدی شود و یا از همان ابتدا از مش بندی سه بعدی استفاده شود. دراینجا از مش بندی سه بعدی چهار وجهی استفاده شده است. شکل ۸ مش بندی استفاده شده برای تحلیل را نشان می‌دهد.



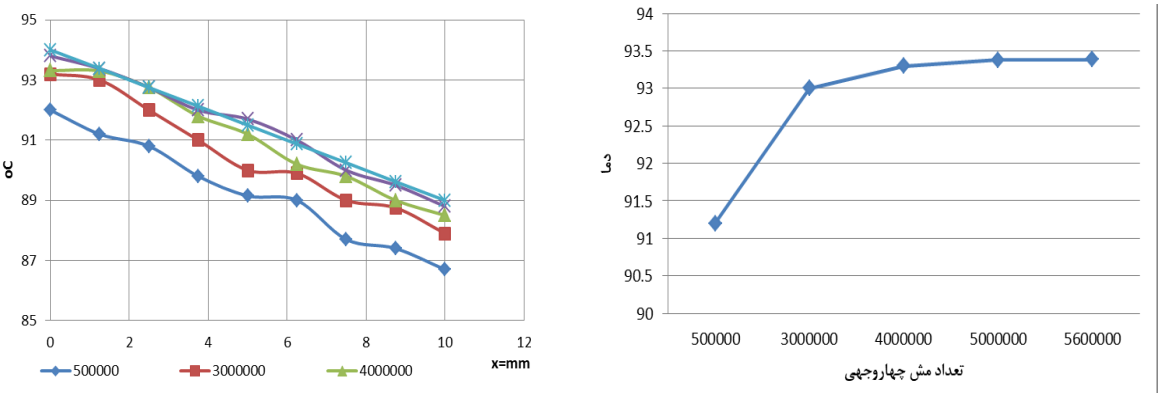

**شکل ۸- برشی از سطح مقطع و نحوه مش بندی مورد استفاده در شرایط مرزی مسئله**



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

### ۵-۲ استقلال حل از شبکه

استقلال از شبکه به بیان ساده عبارت است از بررسی تعداد شبکه دامنه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این شبکه است. به عبارتی بایستی برای دامنه حل با تعداد شبکه های مختلف حل عددی صورت می گیرد و نشان داده شود که این حل برای تمام شبکه ها جواب یکسان و نزدیک دارد و حل مورد نظر به تعداد شبکه وابستگی ندارد. به منظور بررسی استقلال حل از مش بندی نتایج با نتایج حاصل از مش بندی شش وجهی و همچنین مش بندی درشت ترمقایسه گردیده است ( شکل ۹).



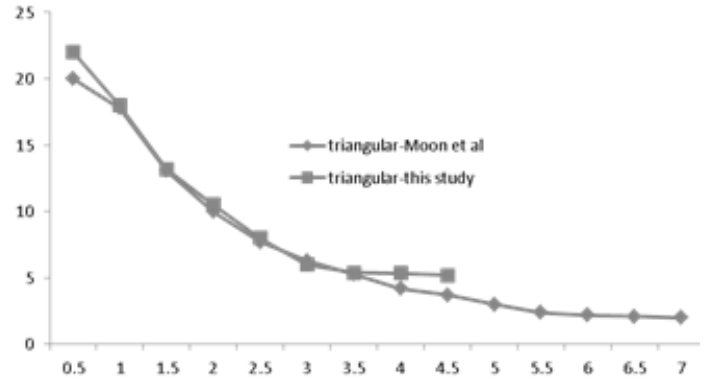

**شکل ۹ -مقایسه توزیع دما در سایزها و تعداد مختلف مش چهاروجهی**

### ۶-بررسی و تحلیل نتایج

میکرو لوله گرمایی های با مقطع چند ضلعی قابل استفاده در دستگاه های الکترونیکی با ساختار نازک ساخته و تست شد. سودآوری بالا و فرآیند تولید ساده برای استفاده های آینده در نظر گرفته شد. میکرو لوله گرمایی ساخته شده با سیال عامل آب خالص خواص هم‌دمای خوبی را در کل طول لوله نشان داد، و تفاوت دما بین اواپراتور و کندانسور در حدود ۱۱ تا ۱۶درجه سلسیوس بود. اثر زاویه شیب بر عملکرد حرارتی کم بود و مشخصه های حرارتی از حالت گرمایش بالا به حالت گرمایش پایین پایدار بود. اثر طول کل لوله بر عملکرد حرارتی میکرو لوله گرمایی مثلثی برجسته بود. در استفاده از آب معمولی دمای دیواره مقدار بیشتری داشته است. این موضوع نشان دهنده اثر لایه دوگانه الکتریکی در صورت استفاده از آب معمولی می-باشد در مطالعه حاضر ظرفیت اتلاف حرارتی بالایی را نشان داد و همچنین نشان داد که در ابعاد ریز لوله های مورد استفاده اثر لایه الکترکی دوگانه به میزان ۲۰٪ بر عملکرد لوله حرارتی اثر منفی می‌گذارد. در نتیجه قادر خواهد بود که به طور گسترده در دستگاه‌های یکپارچه الکترونیکی به عنوان یک واحد خنک کننده استفاده شود. بمنظور صحه گذاری چیدمان مورد استفاده و مقایسه نتایج با مراجع و تحقیقات قبلی ابتدا مجموعه لوله حرارتی‌های مورد نظر با سیالات مشابه تحقیقات مرجع [۷] تست شد و صحت عملکرد مجموعه لوله های حرارتی ساخته شده مورد تایید قرار گرفت (شکل ۱۰).

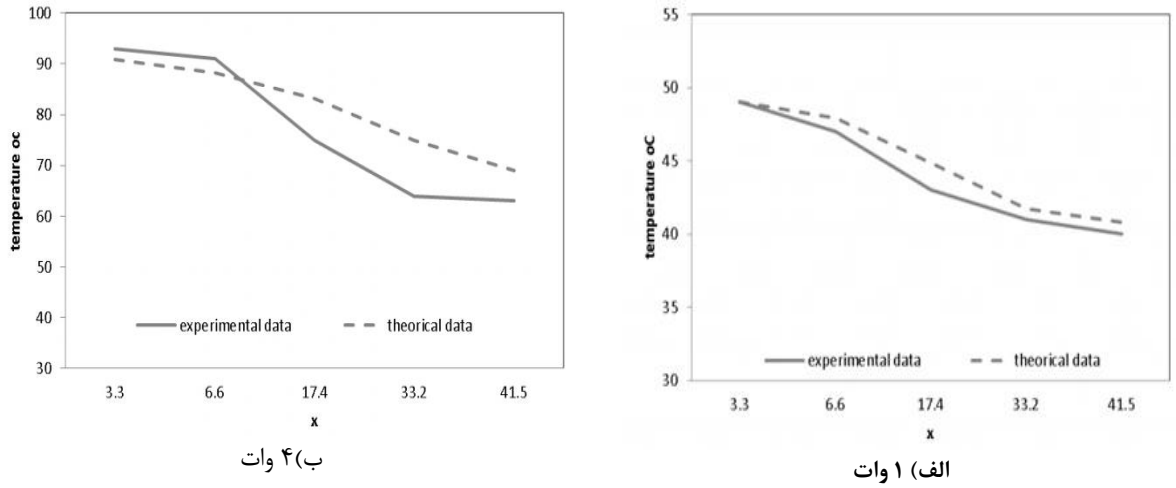
[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]




**شکل ۱۰ -اعتبار سنجی مقاومت حرارتی نمونه تست شده در این مسئله با سوابق و تحقیقات قبلی**

به منظور سنجش اثر لایه الکتریکی دوگانه بر انتقال حرارت در داخل میکرو لوله حرارتی، با توجه به تاثیر غلظت الکل در محلول آب و الکل، در تست‌های تجربی و حل عددی محلول های مختلفی از ترکیب آب و الکل مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به ابعاد بسیار کوچک میکرو لوله حرارتی فرآیند ساخت و تزریق محلول ها با پیچیدگی‌های خاصی همراه بوده که با دقت و صرف زمان زیاد انجام گرفته است. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری در حالت سیال عامل و توان ورودی ۱ وات مخلوط آب با ۱ قطره اتانول معادل ۰,۰۱۸ گرم اتانل مشاهده گردید اختلاف بین نتایج بطور میانگین کمتر از ۰,۷ درجه و بیشترین اختلاف در ناحیه آدیاباتیک و در حدود ۴٪ بود. با افزایش توان ورودی از ۱ به ۴ وات ملاحظه شد که اختلاف بین نتایج تجربی با داده های استخراج شده از حل تئوری افزایش یافت، بطوریکه کمترین اختلاف بیش از ۲٪ و در بدترین حالت به ۱۷٪ رسید. در این حالت برای توان‌های ورودی ۱ وات و ۲ وات اختلاف زیادی بر اثر لایه الکتریکی دوگانه مشاهده نگردید. ولی در توان ۴ وات علاوه بر اختلاف نتایج تجربی و داده های استخراج شده به دلیل وجود عامل لایه الکتریکی دوگانه اختلاف درجه حرارت بین اواپراتور و کندانسور نیز در حدود ۲۷٪ افزایش یافت (شکل ۱۱).




ب)۴ وات

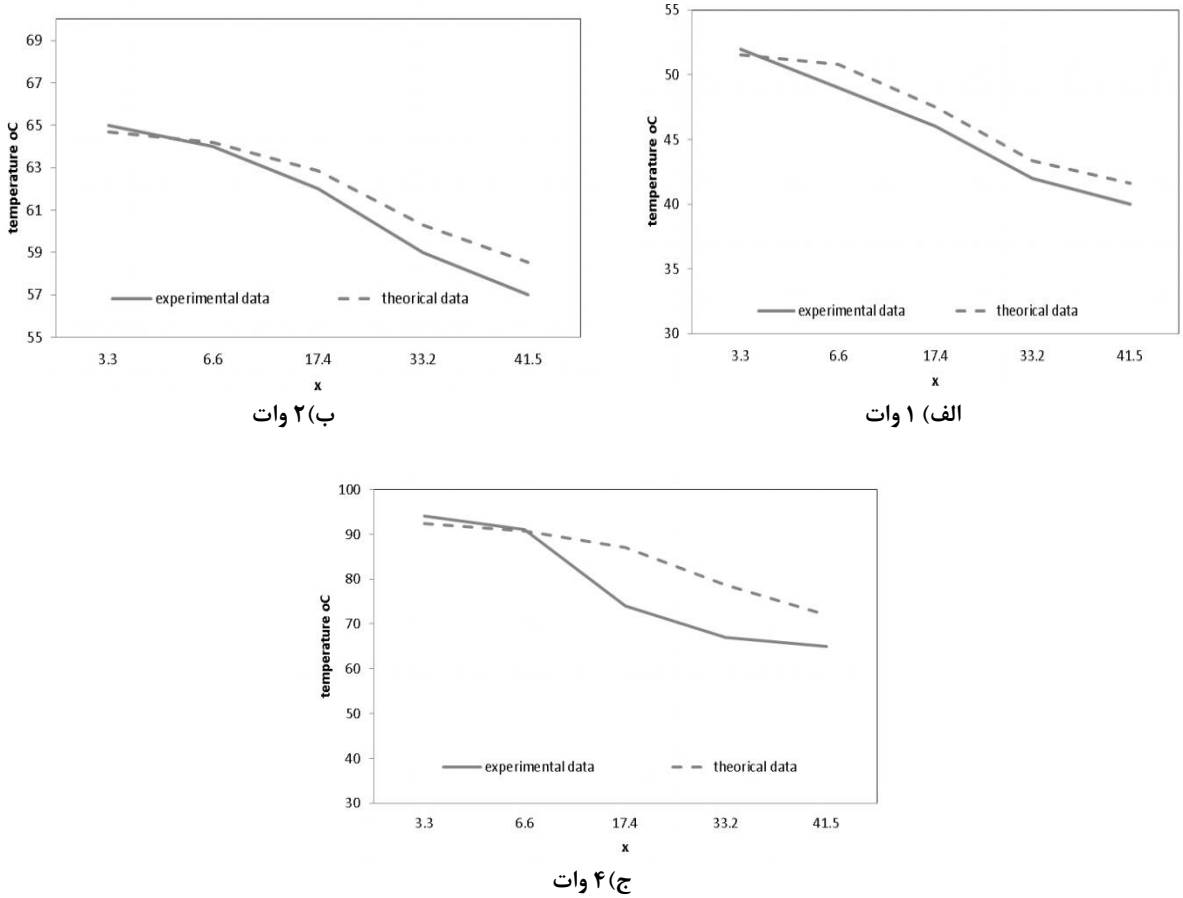
**الف) ۱ وات**

**شکل ۱۱- مقایسه نتایج تجربی و تئوری دمای دیوارسیال عامل آب و ۰,۰۱۸ گرم اتانول**

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

با توجه به اینکه انتظار می‌رود، اثر لایه الکتریکی دوگانه با افزایش غلظت الکل بیشتر شود ، غلظت اتانول به ۳ برابر افزایش داده شد در محلول آب و ۰،۰۵۴ گرم الکل در ۱ وات اختلاف نتایج آزمایشگاهی و نظری نیز افزایش قابل تحملی یافت بطوری بطور میانگین ۵٪ اختلاف بین نتایج دیده شد. در تمامی نمودارها و در تمام توان‌ها این اختلاف مشاهده گردید. اختلاف دمای دو سر میکرو لوله در حالت عملی و تئوری با افزایش غلظت و توان ورودی افزایش یافت بطوریکه این اختلاف در توان ۴ وات به ۳۰٪ رسید. که می‌تواند ناشی از تغییر فاز بیشتر در جریان بالاتر باشد. (شکل ۱۲).

در بیشترین غلظت یعنی محلول آب و ۰،۱۸ الکل، همان‌گونه که در نمودارها مشاهده می‌گردد در حالت نظری در تمامی توان‌های ورودی اختلاف دمای کمتری بین اواپراتور و کندانسور وجود داشت. با افزایش توان ورودی این اختلاف نیز افزایش یافت (شکل ۱۳).




الف) ۱ وات

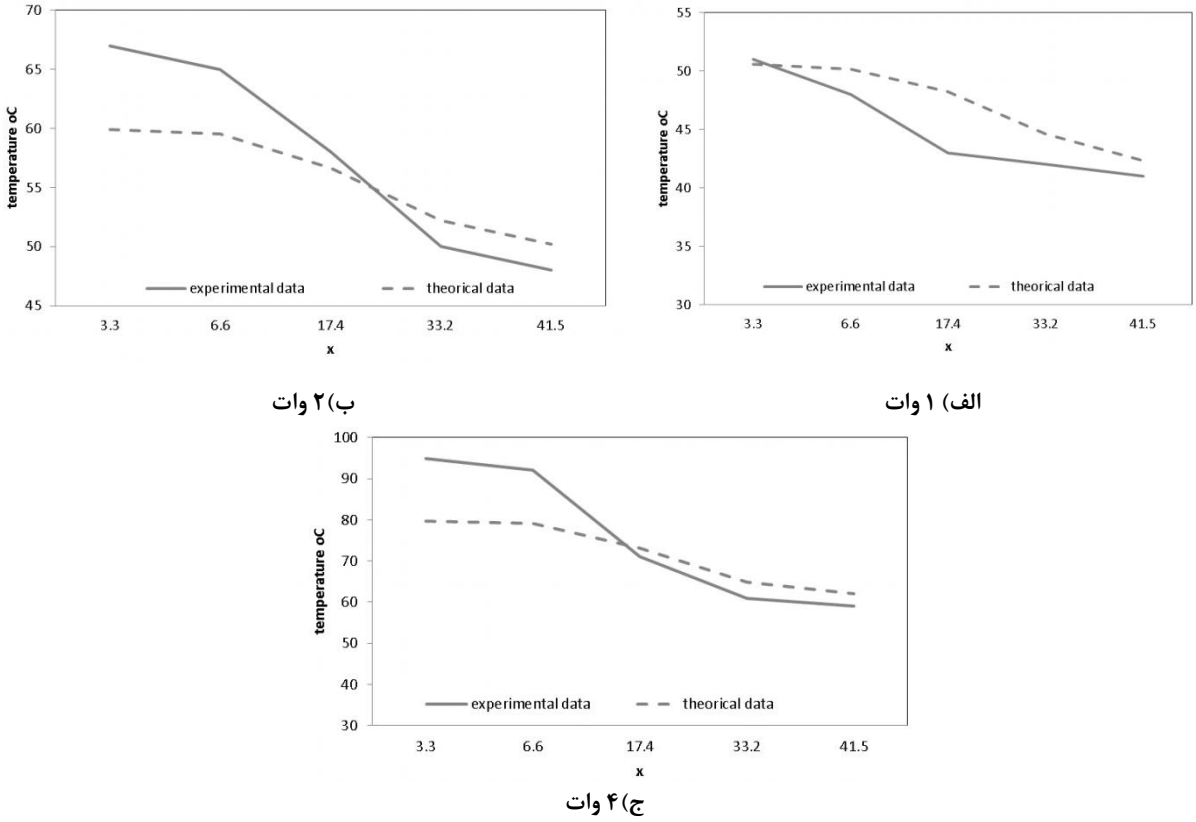
ب) ۲ وات

ج) ۴ وات

**شکل ۱۲- مقایسه نتایج تجربی و تئوری دمای دیوارسیال عامل آب و ۰،۰۵۴ گرم اتانول**

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]




الف) ۱ وات

ب) ۲ وات

ج) ۴ وات

**شکل ۱۳- مقایسه نتایج تجربی و تئوری دمای دیوارسیال عامل آب و ۰،۱۸ گرم اتانول**

با توجه به نمودارها و نتایج بدست آمده با کوچک شدن ابعاد میکرو لوله اثر لایه الکتریکی غیر قابل صرف نظر کردن است به گونه ای که، وجود لایه الکتریکی دوگانه ، ۲۰٪ بر عملکرد میکرو لوله حرارتی اثر منفی می گذارد. این تاثیر به گونه است که گویا سیال با لزجت بیشتری درون میکرو لوله جریان دارد. در محلول های آب و الکل اتانول اثرات لایه الکتریکی دوگانه به مراتب بیشتر از آب معمولی است . با افزایش غلظت الکل اثرات منفی لایه الکتریکی دوگانه نیز افزایش می یابد. در کمترین غلظت محلول اختلاف درجه حرارت بین اواپراتور و کندانسور در توان ورودی ۲۷ ٪ و اختلاف بین نتایج عملی و تئوری به ۱۷٪ می شود. با افزایش غلظت اختلاف درجه حرارت بین اواپراتور و کندانسور به مراتب بیشتر می شود و به ۳۰٪ می رسد. همچنین اختلاف بین داده های تجربی و عملی نیز افزایش محسوسی می یابد.

اضافه کردن حل شونده به حلال سبب پایداری آن در فاز مایع خواهد بود و پتانسیل شیمیایی حلال را کاهش می‌دهد اینکار سبب کاهش تمایل مولکول ها به حرکت به فاز مایع یا گاز می‌شود. اثرات لایه الکتریکی دوگانه با افزایش توان ورودی در اواپراتور، افزایش محسوسی می‌یابد. همان‌طور که در بالا اشاره شد افزایش غلظت محلول موجب افزایش اثرات لایه الکتریکی دوگانه می شود که در توان های بالا به مراتب بیشتر می‌گردد.

## ۶-۱ نتیجه گیری

با کوچک شدن حجم سیال نسبت به محیط آن، برخی از پدیده‌های فیزیکی نظیر بار سطحی و کشش سطحی اهمیت پیدا می‌کنند که در سایزهای متداول قابل صرفنظر هستند. ایجاد بار سطحی در سطح تماس فاز جامد و مایع موجب تشکیل لایه دوگانه الکتریکی و توزیع غیر یکنواخت یون‌های سیال در کنار سطح می‌شود. در انتقال یک الکترولیت به روش



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

فشار- محرک درون یک میکرولوله، تشکیل لایه دوگانه الکتریکی و حرکت بارهای موجود در آن بهمراه سیال عامل، جریان الکتریکی موسوم به جریان استریمینگ را در طول لوله پدید می‌آورد . در صورت تجمع بارها در انتهای میکرولوله، ولتاژی در طول میکرولوله پدید می‌آید که به یون‌های موجود در لایه دوگانه نیرو وارد می‌کند. این نیرو که با حرکت یون‌ها و به تبع سیال اطرافشان مخالفت می‌کند، میدان الکتریکی القایی از طریق رسانش الکتریکی الکترولیت تخلیه می‌شود و تعادل الکتریکی برقرار می‌گردد. هدایت الکتریکی سیال توسط مهاجرت یونها انجام می‌پذیرد و افزایش غلظت یون ها در لایه دوگانه الکتریکی افزایش ضریب هدایت الکتریکی سیال را در پی دارد.

مطالعه‌ی حاضر نشان داد که در ابعاد میکرو لوله های مورد استفاده ، اثر لایه الکتریکی دوگانه به میزان ۲۰٪ بر عملکرد لوله حرارتی اثر منفی می‌گذارد. علی الخصوص در توان ها و غلظت بالای سیال عامل ، وجود این لایه بر عملکرد میکرو لوله حرارتی مورد تست تاثیرمنفی بیشتری داشته است که می‌تواند ناشی از تغییر فاز بیشتر در جریان بالاتر باشد. در حالت نظری در تمامی توان‌های ورودی اختلاف دمای کمتری بین اواپراتور و کندانسور بدست آمد. در حالت بیشترین غلظت که مورد آزمایش قرار گرفت یعنی محلول آب و ۰،۱۸ الکل با افزایش توان ورودی این اختلاف نیز افزایش یافت. اضافه کردن حل شونده به حلال در تست های انجام شده ، سبب پایداری آن در فاز مایع گردید و پتانسیل شیمیایی حلال را کاهش داد. اینکار سبب کاهش تمایل مولکول ها به حرکت به فاز مایع یا گاز گردید. در میکرو لوله های حرارتی مورد مطالعه بهترین عملکرد در هر سه غلظت سیال عامل در توان ورودی ۲ وات حاصل شد.

**فهرست علائم :**

| | |
|---|---|
| ثابت جهانی گاز((8.314×103 J/(mol.K) | $R$ |
| منبع گرمایی( $W/m^3$ ) | $S_h$ |
| ترانهاده ماتری‌س | $\boldsymbol{T}$ |
| دما (K) | $T$ |
| زمان (s) | $t$ |
| سرعت بخار ( m/s) | $v_g$ |
| سرعت مایع ( m/s) | $v_l$ |
| سرعت جری‌ان مخلوط دو فازی | $v_m$ |
| سرعت نسبی فاز مایع و بخار ( m/s) | $v_l - v_g$ |
| سرعت ظاهری فاز گاز | $v_{sg}$ |
| سرعت ظاهری فاز مایع | $v_{sl}$ |
| سرعت لغزش بی‌ن فازها | $v_s$ |

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

| | |
|---|---|
| کسر مولی اتانول در مایع | $x_{\text{اتانول}}$ |
| کسر مولی آب در مایع | $x_{\text{آب}}$ |
| کسر مولی اتانول در بخار | $y_{\text{اتانول}}$ |
| کسر مولی آب در بخار | $y_{\text{آب}}$ |
| والانس یون ها | $z$ |

## نماد یونانی

| | |
|---|---|
| کسر حجمی | $\alpha$ |
| ضریب دی الکتریک( $C/m^3$ ) | $\varepsilon$ |
| ویسکوزیته دینامیک( Pa.s ) | $\mu$ |
| پتانسیل شیمیایی یون ها در سطح تماس( J/mole ) | $\mu^S$ |
| دانسیته Density ( $Kg/m^3$ ) | $\rho$ |
| شارژ حجمی لایه الکتریکی دوگانه( $C/m^2$ ) | $\rho_e$ |
| تنش سطحی تماس(N/m) | $\sigma$ |
| تانسور کرنش | $\tau$ |
| پتانسیل الکتریکی خارجی(V) | $\phi$ |
| پتانسیل شارژ دیواری(V) | $\psi_1$ |
| پتانسیل الکتریکی(V) | $\psi_2$ |

## مراجع

[1]G.Li,T.M.O.Diallo,Y.Golizadeh,A.S.Shittu,X.Zhaoa,X.iMa,Y.Wang, Simulation and experiment on thermal performance of a micro-channel heat pipe under different evaporator temperatures and tilt angles, Energy, Vol. 179 ,pp 549-557, 15 July 2019

[۲] ک. مهدی پور و م. قلم باز، مدلسازی جذب حرارت با استفاده از لوله های حرارتی مغروق در مواد تغییر فازدهنده بهبودیافته با نانوذرات، نشریه علمی-تخصصی انرژی (JEED)،دوره ۴ ، شماره۴، زمستان ۱۳۹۶

[3] W.Tang,B.D. Chen,Z.Lin Wang, Recent Progress in Power Generation from Water/Liquid Droplet Interaction with Solid Surfaces, Advanced Functional Materials, Vol. 29 , October 10, 2019

[4] Y.Li,W.Z,B.Li,L.Yang, Simulation study on the flow behaviors of weak electrolyte solutions in nano-sized and micron-sized pores considering electric double layer interactions,Energy Sources, Vol. 44, pp3532-3543, 27 Apr 2022.



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

[5] H.Tang, Y.Tang, Z.Wan, J.Li, W.Yuan, L.Lu, Y.Li, K.Tang,Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling,Applied Energy,Volume 223, Pages 383-400, 2018.

[6] G. Jung , J.H.Boo, A numerical modeling for the steady-state performance of a micro heat pipe using thin liquid film theory, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 126, Part A, Pages 557-566, November 2018.

[7] S. H. Moon, G. Hwang, S. C. Ko, Y. T. Kim, Experimental study on the thermal performance of micro-heat pipe with cross-section of polygon, Microelectronics Reliability, Vol. ۴۴, No. ۲, pp. ۳۱۵-۳۲۱, ۰۱/۰۲/۲۰۰۴/, .۲۰۰۴

[8] Saleel C, A., et al., Numerical investigation on pressure-driven electro osmatic flow and mixing in a constricted micro channel by triangular obstacle, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2020.

[9] T. P. M. II, effect of volume fraction evolution on the mathematical model for compressible multiphase flows, AIP Conference Proceedings, Vol. ۱۱۹۵, No. ۱, pp. ۹۵-۹۸, .۲۰۰۹

[10] A. Mikelić, An existence result for the equations describing a gas–liquid two-phase flow, Comptes Rendus Mécanique, Vol. ۳۳۷, No. ۴, pp. ۲۲۶-۲۳۲, ۰۱/۰۴/۲۰۰۹/, .۲۰۰۹

[11] V. Stevanović, S. Prica, B. Maslovarić, Multi-Fluid Model Predictions of GasLiquid Two-Phase Flows in Vertical Tubes, FME Transactions Vol. ۳۵, No. No ۴, ۲۰۰۷pp. .۲۰۰۷ ۱۷۳-۱۸۱

[12] D. L. Youngs, Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion, Numerical Methods for Fluid Dynamics, ۱۹۸۲, .۱۹۸۲

[13] Y.Lei, Z.Chen, Numerical Study of Condensation Heat Transfer in Curved Triangle

Microchannels,Procedia Engineering, 22 October 2017

[14] K. Yan, D. Che, A coupled model for simulation of the gas–liquid two-phase flow with complex flow patterns, International Journal of Multiphase Flow, Vol. ۳۶, No. ۴, pp. ۳۳۳-۳۴۸, ۰۱/۰۴/۲۰۱۰/, .۲۰۱۰

[15] Lei, Y., et al., Analysis of Condensation Heat Transfer Performance in Curved Triangle Microchannels Based on the Volume of Fluid Method. 2017. 29(6): p. 433-443.

[16] K. Fukagata, N. Kasagi, P. Ua-arayaporn, T. Himeno, Numerical simulation of gas–liquid two-phase flow and convective heat transfer in a micro tube, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. ۲۸, No. ۱, pp. ۷۲-۸۲, ۰۱/۰۲/۲۰۰۷/, .۲۰۰۷

[17] Nikolaos D. Katopodes, Chapter 12 - Volume of Fluid Method, 2019, Pages 766-802

[18] E. Berberović, N. P. van Hinsberg, S. Jakirlić, I. V. Roisman, C. Tropea, Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution, Physical Review E, Vol. ۷۹, No. ۳, pp. ۰۳۶۳۰۶, ۱۸/۰۳/, .۲۰۰۹

[19] G. Černe, S. Petelin, I. Tiselj, Coupling of the Interface Tracking and the Two-Fluid Models for the Simulation of Incompressible Two-Phase Flow, Journal of Computational Physics, Vol. ۱۷۱, No. ۲, pp. ۷۷۶-۸۰۴, ۱۰/۰۸/۲۰۰۱/, .۲۰۰۱

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

[20] P. Zhang, H. H. Qiu, Investigation of the patterned surface modification on ۳D vortex flow generation in a micropipe, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. ۱۸, No. ۱۱, pp. ۱۱۵۰۳۰, ۲۰۰۸.

[21] L. Gong, J.-k. Wu, L. Wang, K. Chao, Periodical streaming potential and electro-viscous effects in microchannel flow, Applied Mathematics and Mechanics, Vol. ۲۹, No. ۶, pp. ۷۱۵-۷۲۴, June ۰۱, ۲۰۰۸.

[22]L. Gong, J.-k. Wu, L. Wang, Electro-osmotic non-isothermal flow in rectangular channels with smoothed corners, Thermal Science and Engineering Progress ,2020

[23] L. Ren, D. Li, W. Qu, Electro-Viscous Effects on Liquid Flow in Microchannels, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. ۲۳۳, No. ۱, pp. ۱۲-۲۲, ۰۱/۰۱/۲۰۰۱/, ۲۰۰۱.

[24] MASS TRANSFER -ADVANCED ASPECTS, Croatia Janeza Trdine ۲۰۱۱I .

[25] D. Y. C. Chan, D. J. Mitchell, The free energy of an electrical double layer, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. ۹۵, No. ۱, pp. ۱۹۳-۱۹۷, ۰۱/۰۹/۱۹۸۳/, ۱۹۸۳.

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]

**چکیده انگلیسی**

# Experimental study of the Effect of EDL on heat transfer of micro heat pipe with triangular cross section

**Maryam FallahAbbasi[1], Hossein Shokouhmand[2*], Morteza Khayat[1]**

1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*2- School of Mechanical Engineering, College of Eng. University of Tehran, Tehran, Iran

Received: February 2022 Accepted: May 2022

**Abstract**

Due to the reduced dimensions of electronic equipment and the need for thermal management of these equipments, In order to increase efficiency and longevity of component, heat sinks with micro aspects are very important. In this study, heat transfer of micro heat pipe has been studied experimentally. For this purpose, firstly the micro heat pipe that is suitable for industrial conditions and restrictions for the production of very small size triangular section was designed and built. According to the very small size of the primary copper tube, the manufacturing process requires precision and advanced technology. In such a way, at first the samples of fine copper tube available in the market was provided and during the process of heat and tension was brought, at the same time, to the desired thickness and diameter and then by using provided wedge the appropriate cross section is achieved. To apply thermal load, a set of various thermal flux was applied to the evaporator and temperature distribution achieved via five thermocouples which were installed on the body in accordance with the set-up and heat resistance was measured. Water and different solution mixture of water and ethanol were used to investigate effect of the electric double layer heat transfer. It was noticed that the electric double layer of ionized fluid has caused reduction of heat transfer.

**Key words:** Heat transfer, Micro heat pipe, Electrical double layer, Magnetic field

*corresponding author: ho.shokouhmand@gmail.com

**Cite this article as:** Maryam FallahAbbasi, Hossein Shokouhmand, Morteza Khayat. Experimental study of the Effect of EDL on heat transfer of micro heat pipe with triangular cross section. Journal of Energy Conversion, 2022, 9(1), 55-72.

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.2.3 ]