



## بررسی انتقال حرارت نانوسیال پایه روغن موتور در میکروکانال حلقوی با پله موجود در مسیر جریان

علیرضا پیرمحمدی<sup>۱</sup>، مهرانگیز قاضی<sup>۲</sup>، محمد نیکیان<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشجوی کارشناسی ارشد

alpimoh@gmail.com

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، دانشکده مهندسی مکانیک، استادیار.

mhrghazi@gmail.com

۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، دانشکده مهندسی مکانیک، استادیار.

m.nikian@gmail.com

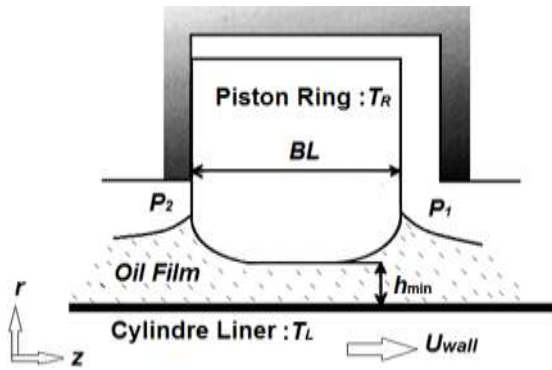
**چکیده:** در این پژوهش اثر غلظت نانوذرات اکسید مس در افزایش انتقال حرارت جابجایی روغن موتور در میکروکانال حلقوی بین رینگ فوقانی پیستون و دیواره سیلندر یک موتور احتراق داخلی بررسی شده است. انتقال حرارت جابجایی در یک زاویه لنگ دلخواه، با ضخامت مشخص فیلم روغن و با فرض جریان دو بعدی و پایا در طول رینگ با روش عددی تحلیل شده است. نتایج حاصل از حل عددی انتقال حرارت در غلظت های ۰/۲، ۰/۵، ۱ و ۲/۵ درصد نشان می دهد، با افزایش غلظت نانوذرات، نرخ شارش گرما از رینگ و انتقال حرارت جابجایی از آن افزایش می یابد، به طوری که در کسر حجمی ۲/۵٪ بیشترین نرخ انتقال حرارت و بیش از ۷/۳٪ مشاهده شده است.

**واژه های کلیدی:** انتقال حرارت، نانوسیال، میکروکانال، روغن موتور، اکسید مس

اتفاقی و همکاران [۱] در مطالعه تجربی خود اثر غلظت نانوذرات اکسید مس را در افزایش لزجت و هدایت حرارتی روغن موتور SAE 20W50 در غلظت های ۰/۱٪ الی ۰/۵٪ و برای دماهای ۴۰°C و ۱۰۰°C بررسی نمودند. نتایج کار آن ها نشان داد، در دمای ۱۰۰°C بیشترین افزایش ضریب هدایت در غلظت ۰/۵٪ حرارتی شامل ۳٪ و بیشترین نرخ رشد لزجت در دمای ۴۰°C مشاهده شد و شامل ۵/۷٪ افزایش بود. در بررسی انتقال حرارت جابجایی فیلم روغن در رینگ پیستون یافته هایی چندانی در دسترس نمی باشد، از مطالعات نادر در این زمینه می توان به مطالعه عددی سوزوکی و همکاران [۲] اشاره نمود. آن ها با کوپل معادله رینولدز یک بعدی و معادله دو بعدی انرژی، ضخامت فیلم روغن موتور پایه SAE30 و اثرات حرارتی را در فیلم روغن تحلیل نمودند. آنها توزیع دمای فیلم روغن و شار حرارتی از رینگ به فیلم روغن را در زاویه لنگ ۲۷° و دور ۱۶۰۰ rpm در شرایط بی باری برای یک موتور دیزل ۴ زمانه به دست آوردند. از حل معادله رینولدز ضخامت فیلم روغن در این موقعیت ۸ μm به دست آمده بود. مطالعه حاضر در توسعه مطالعه [۲] با تمرکز بر نقش نانوسیال در انتقال حرارت و اثر غلظت نانوذرات اکسید مس در افزایش انتقال حرارت جابجایی فیلم روغن موتور

## ۱ - مقدمه

در سامانه های حرارتی، افزایش نرخ انتقال حرارت سیالات به عنوان یک نیاز اساسی مورد مطالعه بوده است. از یکسو دغدغه ضریب هدایت حرارتی پایین سیالات، با ظهور نانوسیالات که مخلوطی از نانوذرات و سیال پایه می باشد، تا حدودی کاهش یافته است. در این میان افزایش انتقال حرارت روغن موتور به عنوان یک عامل مهم و موثر در افزایش راندمان، طول عمر و کاهش مصرف انرژی، بیش از پیش مورد توجه می باشد. با تشکیل میکرو فیلم روغن در فضای بین رینگ پیستون و دیواره سیلندر، امکان روان کاری و دفع حرارت رینگ به وجود می آید. با کاهش دمای فیلم روغن، لزجت روغن کاهش یافته و موجب کاهش ضخامت فیلم و افزایش نرخ فرسایش موتور می شود. اخیرا با خیزش نانوفن آوری در صنعت خودرو و با افزودن برخی نانوذرات در روغن موتور پایه، امکان افزایش انتقال حرارت روغن موتور به وجود آمده است. تاکنون مطالعات اندک و پراکنده ای در خصوص اثر نانوذرات در بهبود انتقال حرارت روغن موتور انجام شده و بیشتر شامل بررسی انتقال حرارت نانو سیال پایه روغن موتور، در شرایط محدود کننده نظیر لزجت ثابت و یا در هندسه و دمای غیر کارکردی بوده است.



شکل ۲: مدل روانکاری بین رینگ پیستون و دیواره سیلندر

در این مطالعه برای ورود به شبیه سازی انتقال حرارت نانوسیال، ضخامت فیلم روغن و شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی از نتایج تحقیق [۲] استخراج شده است، که مطابق با آن در موقعیت مورد مطالعه، حداقل ضخامت فیلم روغن  $8 \mu m$  و دمای دیواره سیلندر از روابط همبستگی که تابعی از کورس بوده به دست می آید و دمای رینگ در طول کورس  $116/3^\circ C$  ثابت می ماند.

## ۲-۱ معادلات حاکم بر جریان نانوسیال و شرایط مرزی پایستاری مونتتم

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

### ۲-۱-۱ شرایط مرزی هیدرودینامیکی

در ورود روغن به کانال  $z = 0$ :

$$p = p_2 = p_{atm}$$

در خروج روغن از کانال  $z = B$ :

$$p = p_1 = p_{atm} \text{ و } \frac{dp}{dz} = 0$$

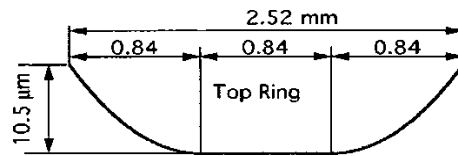
### ۲-۲ پایستاری انرژی

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \phi \quad (3)$$

به انجام رسیده است. مشخصات موتور و هندسه رینگ پیستون برای مدل سازی انتقال حرارت در سیاهه (۱) و شکل (۱) نشان داده شده است.

### سیاهه ۱: مشخصات فنی موتور و روغن موتور

مشخصات موتور	4-stroke NA DI diesel engine	
	Bore=110 mm	
	Stroke=125 mm	
هندسه رینگ	Connection rod length=198 mm	
	BL=3 mm	
	e = 10.5 $\mu m$	
مشخصات روغن موتور پایه	P <sub>e</sub> =154.4 KPa	
	K=0.143 W/(mK)	
	C=1.985 KJ/(KgK)	
	$\rho = 872 \text{ kg/m}^3$	
	SAE30	
Kinematic viscosity	92.76 mm <sup>2</sup> /s(40°C)	
	92.76 mm <sup>2</sup> /s (100°C)	



شکل ۱: هندسه رینگ پیستون

## ۲ مدل سازی

مدل روانکاری هیدرودینامیکی رینگ پیستون در شکل (۲) نشان داده شده است. جریان حلقوی فیلم روغن در میکرو کانال بین رینگ پیستون و دیواره سیلندر با فرضیات در پی آمده مدل سازی شده است.

۱- روغن موتور یک سیال نیوتنی و غیر قابل تراکم است.

۲- جریان آرام و دو بعدی است.

۳- گرمای ویژه، هدایت حرارتی و چگالی روغن موتور ثابت و لزجت روغن تابع دمای متوسط در طول رینگ است.

۴- فیلم روغن در رینگ فاقد حفره و به طور پیوسته جریان دارد.

۵- از چرخش و حرکت رینگ چشم پوشی شده است.

که در آن  $\emptyset$  تولید حرارت ناشی از تلفات لزجی است و از رابطه (4) به دست می آید.

$$\emptyset = 2 \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{v_r}{r} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 +$$

$$T_L(S_{CA=270^\circ}) = 92.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### ۴-۲ سرعت جریان در موقعیت مورد مطالعه

جهت حل عددی پروفیل سرعت جریان، لازم است سرعت رینگ در موقعیت مورد مطالعه تعیین شود. در این شبیه سازی دیواره سیلندر متحرک و رینگ پیستون ثابت فرض شده است. سرعت پیستون در نقاط مختلف کورس متغیر بوده و در موقعیت هر زاویه لنگ از رابطه (۶) به دست می آید.

$$v_p = \frac{2\pi \times \text{rpm}}{60} \times \left( -S/2 \sin\alpha + \frac{S^2/g \sin 2\alpha}{l^2 - S^2/4 \sin^2\alpha} \right) \quad (6)$$

که در آن  $v_p$ ،  $S$ ،  $\alpha$ ،  $l$  و rpm به ترتیب سرعت حرکت پیستون در زاویه لنگ دلخواه  $\alpha$ ، کورس پیستون، زاویه لنگ، طول شاتون و دور موتور می باشد. مقدار سرعت رینگ در زاویه لنگ  $270^\circ$  از رابطه (۶) و داده های سیاهه (۱)  $10/47 \text{ m/s}$  به دست آمده است.

#### ۵-۲ تعیین خواص فیزیکی نانوسیال پایه روغن موتور

در این مطالعه عددی، برای مدل سازی انتقال حرارت نانوسیال روغن موتور، لازم است خواص فیزیکی و ترموفیزیکی از مدل های کاربردی موجود تخمین زده شود. در این تحقیق، چگالی، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال پایه روغن موتور ثابت و لزجت روغن تابع درجه حرارت متوسط فیلم روغن در نظر گرفته شده و نانوسیال به عنوان یک سیال تک فاز مدل سازی شده است.

#### ۱-۵-۲ چگالی نانوسیال

در این مطالعه چگالی نانوسیال پایه روغن موتور به صورت تابعی از کسر حجمی، چگالی سیال پایه و نانوذرات، از رابطه یک و چو [۳] تخمین زده شده است.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (7)$$

#### ۲-۵-۲ لزجت وابسته به دمای روغن موتور پایه

از آن جا که لزجت روغن موتور، به شدت وابسته به دما می باشد، در این مطالعه لزجت وابسته به دمای روغن موتور از مدل پیشنهادی ووگل [۴ و ۱] تخمین زده شده است.

$$\mu(T) = a_0 \exp[\theta_1 / (\theta_2 + T)] \quad (8)$$

که در آن  $a_0$ ،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  فراسنجه های همبستگی بوده و از سیاهه (۳-۳) به دست می آید.

#### ۱-۲-۲ شرایط مرزی حرارتی

در خروج روغن از کانال  $z = BL$ :

$$\frac{dT}{dz} = 0$$

در دیواره سیلندر  $r = r_0$ :

$$T = T_L$$

بر سطح تماس رینگ با روغن  $r = r_i$ :

$$T = T_R$$

در ورودی روغن به کانال  $z = 0$ :

$$T = T_L$$

#### ۳-۲ درجه حرارت دیواره ها در موقعیت مورد مطالعه

در این مطالعه درجه حرارت رینگ مقدار ثابت  $116/3 \text{ }^\circ\text{C}$  و درجه حرارت دیواره سیلندر تابعی از فاصله رینگ از نقطه مرگ بالا بوده و با استفاده از نتایج [۲] از رابطه همبستگی زیر به دست می آید.

$$T_L(s) = m_0 + m_1 \exp\left(-\frac{m_2 s}{S}\right) \quad (5)$$

که در آن  $S$  و  $S_0$  به ترتیب، موقیت و کورس پیستون و  $m_0, m_1, m_2$  ضرایب همبستگی بوده و در دور  $1600 \text{ rpm}$  از داده های سیاهه ۲ به دست می آید.

سیاهه ۲: مقادیر همبستگی رابطه (۵)

rpm	$m_0$	$m_1$	$m_2$
1600	75.275	27.225	0.90397

با توجه با این که در زاویه لنگ  $270^\circ$  پیستون، در میانه کورس خود قرار دارد  $S/S_0 = 0.5$ ، با جاگذاری مقادیر همبستگی سیاهه (۲) در رابطه (۵) دمای دیواره سیلندر در زاویه لنگ مورد نظر به صورت زیر به دست می آید.

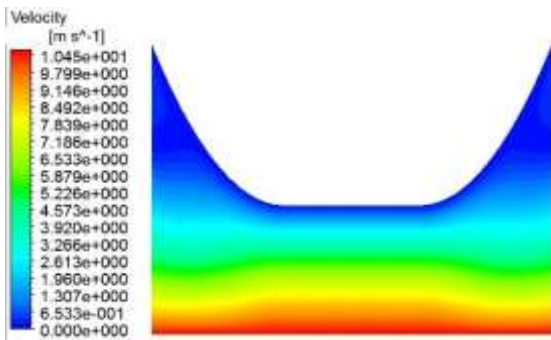
خواص	اکسید مس (CuO)
دانسیتته (Kg/m <sup>3</sup> )	6315
هدایت حرارتی (W/mK)	76.5
ظرفیت گرمایی ویژه (j/KgK)	535.6

سیاهه ۳: مقادیر همبستگی مدل وابسته به دمای ووگل برای تخمین لزجت روغن موتور

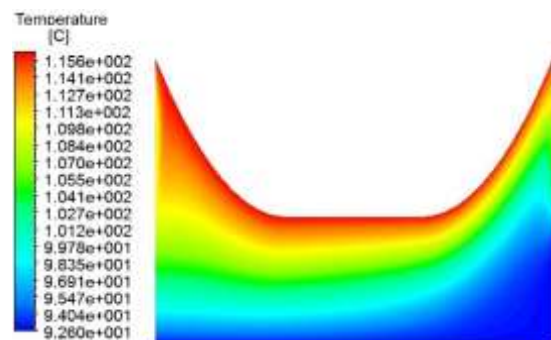
a <sub>0</sub> (mPa)	θ <sub>1</sub> (°C)	θ <sub>2</sub> (°C)
0.0488628	1123.35	111.562

### ۳ حل عددی

مدل سازی، شبکه بندی و حل عددی معادلات با روش حجم محدود و توسط نرم افزار تجاری انسیس فلوننت انجام شده است. پروفیل سرعت و توزیع دمای فیلم روغن در غلظت ۲/۵٪ نانوذرات اکسید مس در روغن موتور پایه SAE30 در زاویه لنگ ۲۷۰° در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل ۳: توزیع سرعت فیلم روغن در غلظت ۲/۵٪



شکل ۴: توزیع دمای فیلم روغن در غلظت ۲/۵٪

۳-۱ اثر غلظت نانوذرات اکسید مس در دفع حرارت از رینگ

مطابق با شکل (۵) با افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس، شارش گرما از رینگ افزایش پیدا می کند، بیشترین افزایش دفع حرارت از رینگ در غلظت ۲/۵٪ مشاهده شده است.

### ۲-۵-۳ لزجت نانوسیال

برای تخمین لزجت نانوسیال به صورت تابعی از کسر حجمی و لزجت روغن موتور پایه می باشد از رابطه برینکمن [۵] برای کسر حجمی کوچکتر از ۴٪ داریم:

$$\eta_{nf} = \eta_f \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (9)$$

### ۲-۵-۴ لزجت تابع دمای نانوسیال

در این شبیه سازی برای تخمین لزجت نانوسیال روغن موتور، لازم است اثر همزمان وابستگی دمایی روغن موتور پایه و کسر حجمی نانوذرات در طول مسیر جریان تعیین شود. به این منظور با تعریف تابع کاربر در نرم افزار انسیس فلوننت اثر همزمان کسر حجمی و لزجت تابع دمای رابطه همبستگی ووگل لحاظ شده است.

### ۲-۵-۵ هدایت حرارتی نانوسیال

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از مدل ماکسول [۶] مطابق از رابطه (۱۰) زیر تخمین زده شده است .

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_f - 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f + (k_p - k_f)\phi} \right] k_{bf} \quad (10)$$

### ۲-۵-۶ ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال

برای تخمین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، رابطه زان و روتزل [۷] به کار رفته است.

$$Cp_{nf} \rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f Cp_f + \phi \rho_p Cp_p \quad (11)$$

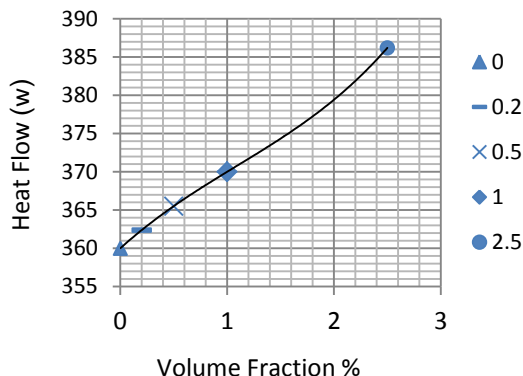
### ۲-۵-۷ مشخصات فیزیکی نانو ذرات

در این پژوهش جهت بررسی اثر نانوذرات در انتقال حرارت فیلم روغن موتور، نانوذرات اکسید مس مورد مطالعه واقع شده است. مشخصات فیزیکی نانوذرات اکسید مس مطابق با داده های سیاهه ۲ می باشد.

سیاهه ۲: مشخصات فیزیکی نانوذرات اکسید مس

#### ۴ بحث و نتیجه گیری

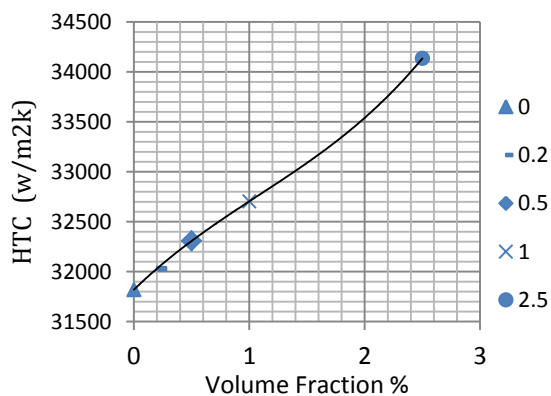
در این پژوهش با هدف بررسی اثر نانوذرات اکسید مس، در افزایش انتقال حرارت جابجایی روغن موتور SAE30 مدل سازی و حل عددی به روش حجم محدود و با نرم افزار انسیس فلونت انجام شد. برای بررسی انتقال حرارت جابجایی لازم بود انتقال حرارت در موقعیتی با حداکثر ضخامت فیلم روغن مورد مطالعه قرار گیرد. به این منظور بررسی انتقال حرارت در ناحیه اگزااست در موقعیت لنگ  $270^\circ$  در موقعیتی با بیشترین ضخامت فیلم روغن مورد مطالعه واقع شد. این در حالیکه در سایر موقعیت ها، به سبب کاهش ضخامت فیلم روغن موتور، انتقال حرارت غالب از نوع هدایتی می باشد. پس از شبیه سازی و حل عددی، مشهود بود در نانوسیال روغن موتور حاوی نانوذرات اکسید مس انتقال حرارت بیشتری نسبت به سیال پایه روغن موتور وجود دارد. بیشترین نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در کسر حجمی  $2/5\%$  حدود  $7/3\%$  درصد رخ داد. ملاحظه شد، با افزایش غلظت نانوذرات فراسنجه های فیزیکی جریان از قبیل لزجت از خود افزایش نشان می دهد. با ریز کردن متوالی شبکه از عدم وابستگی پاسخ های حل عددی به شبکه بندی اطمینان حاصل شده است. جهت اطمینان از اعتبار نتایج عددی به دست آمده، نتایج در غلظت  $0\%$  با نتایج شار حرارتی رینگ توسط مطالعه [۲] مقایسه شده که از تطابق قابل قبولی برخوردار بوده است. قدر مسلم، افزایش غلظت های بالاتر نانوذرات اکسید مس می تواند نرخ انتقال حرارت را بیش از این افزایش دهد و این درحالیست که با افزایش غلظت، امکان ته نشینی ذرات و افزایش بیش از حد لزجت و در نتیجه اثرات مخرب نظیر سایس وجود خواهد داشت، که هرگز مطلوب شرایط کاری یک نانوسیال و مناسب برای کارایی مورد نیاز در روغن موتور نخواهد بود.



شکل ۵: اثر غلظت نانوذرات اکسید مس در افزایش دفع حرارت از رینگ

#### ۳-۲ اثر غلظت نانوذرات اکسید مس در افزایش انتقال حرارت جابجایی از رینگ

از نتایج این مطالعه مشهود است ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش می یابد. در شکل (۶) روند افزایش ضریب جابجایی با افزایش غلظت نشان داده شده است. بیشترین میزان افزایش در غلظت  $2/5\%$  بوده است.



شکل ۶: اثر غلظت نانوذرات اکسید مس در ضریب انتقال حرارت جابجایی از رینگ

نمادها			
$T_L$	دمای دیواره سیلندر، °C		
$h$	ضخامت فیلم روغن، $m$		
$T_R$	دمای رینگ فوقانی، °C		
$h_{min}$	کمینه ضخامت فیلم روغن میان رینگ و دیواره سیلندر		
$T_m$	دمای متوسط سیال، °C		
$HTC$	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $wm^{-2}K^{-1}$		
$BL$	سطح عبور جریان از رینگ، $m$		
$\emptyset$	غلظت حجمی نانوذرات	فشار گاز در محفظه احتراق، $kpa$	$p_1$
$\alpha$	ضریب پخش حرارتی، $m^2s^{-1}$	فشار ورودی پشت رینگ، $kpa$	$p_2$
$\vartheta$	لزجت سینماتیکی سیال، $m^2s^{-1}$	فشار سطح رینگ، $kpa$	$P_e$
$\mu$	لزجت دینامیکی سیال، $Nsm^{-2}$	کورس پیستون، $m$	$S$
$\omega$	سرعت زاویه ای میل لنگ، $rad s^{-1}$	موقعیت رینگ فوقانی پیستون از نقطه	$s$
$CA$	زاویه لنگ	مرگ بالا، $m$	

۶ مراجع

[۷] M. Takiguchi ,Y. Harigaya M. Suzuki, Analysis of Oil Film Thickness on a Piston Ring of Diesel Engine: Effect of Oil Film Temperatur ASME 125 (2003) 596.

[۱] M. Ghazvini, M. A. Akhavan-Behdadi, E. Rasouli, and M. Raisee, Heat Transfer Properties of Nanodiamond–Engine Oil Nanofluid in Laminar Flow Heat Transfer Engineering, 33(6)( 2012)525–532.

[3] B.C. Pak, Y.I. Cho, Exp. Heat Tran. 11 (1998) 151.

[4] Wakuri, Y., Kitahara, T., Hamatake, T., Soejima, M., and Ide, S., 1998, “Friction Characteristics of Piston and Piston Rings,” Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 64(618) 676.

[5] B.H.C. J. Chem. Phys. 20 (1952) 5.

[6] J.C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford University Press, Cambridge, 1904.

[7] Y. Xuan, W. Roetzel, Int. J. Heat Mass Tran. 43 (2000) 3701.