پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک **ISME2007**
ایران ، تهران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر ۲۵-۲۷ اردیبهشت ۱۳۸۶
ISME2007-1359

بررسی عددی و تحلیلی تاثیر شکل دیواره روی پارامترهای هیدرودینامیکی یاتاقان های لغزنده صفحه ای

محمد حسن جوارشکیان
دانشیار- دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک
djavaresh@tabrizu.ac.ir

محمد تقی شروانی تبار
دانشیار- دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک
msherv@tabrizu.ac.ir

قیام اسلامی
sahand_m1000@yahoo.com

وحید فرهنگ مهر
Vahid_farhangmehr@yahoo.com
کارشناس ارشد- دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده:
در این تحقیق تاثیرشکل دیواره یاتاقان بر روی توزیع سرعت، فشار، تنش برشی در میدان جریان دو بعدی توسط یک روند عددی بررسی شده است. در روند عددی فوق از یک الگوریتم فشار مبنا برای حل معادله ناویر استوکس استفاده شده و گسسته سازی شار ها در روی سطوح سلول با دقت مرتبه دو بالا دست انجام گرفته است. شکل دیوارههای بالائي هندسه مورد مطالعه خطی، نمائي و همگرا-واگرا در نظر گرفته و دیواره پایین با سرعت ثابت حرکت می نماید. بمنظور اعتبار بخشیدن به نتایج شبیه سازی فوق، روند تحقیق بصورت تحلیلی نیز انجام گرفته است. مقایسه نتایج عددی و تحلیلي، نشان می دهد که اختلاف فشارایجاد شده در حالتی که دیواره بالایی همگرا-واگرا باشد نسبت به حالت دیواره خطی و نمایی بیشتر هست و نیز وجود توئمان همگرایی و واگرایی در فاصله بین دو دیواره یاتاقان در حالت فوق، باعث تولید فشارمنفی، جریان معکوس و در نتیجه ایجادپدیده کاویتاسیون می شود.

کلمات کلیدی: روغنکاری لایه ای- کاویتاسیون- جریان استوکس- دیواره خطی، نمایی و همگرا-واگرا- نسبت همگرایی(hl/h0)

مقدمه

روغنکاری لایه ای نازک، جهت کاهش اصطکاک و خوردگی و دفع حرارت ما بین اجزای متحرک در بسیاری از تجهیزات مکانیکی از جمله یاتاقان ها، بادامک ها، پیروها، رینگ های پیستون و درسایر اجزای موتور، تحت بارها و سرعت های نامنظم و متناوب بکار می رود. در مورد بررسی عملکرد یاتاقان های لغزنده، تعیین توزیع سرعت و فشار روغن مورد نیاز بوده و یکی از معادلات مشهوری که از حل آن می توان به توزیع فشار روغن دست یافت، معادله رینولدز می باشد. فرض اساسی در بدست آوردن این معادله حذف اینرسی است، چرا که این ترم در بیشتر شرایط کارکرد در مقابل نیروهای ناشی از تنش های برشی(نیروهای لزج) کوچک بوده و می توان از آن صرف نظر کرد. یک مرجع مناسب جهت مقایسه این دو نیرو، عدد رینولدزمی باشد که بصورت $Re = \rho UL / \mu$ در یاتاقان های لغزنده تعریف می شود. هنگامی که این عدد بزرگ است، نیروی اینرسی قابل ملاحظه بوده و لذا استفاده از معادله رینولدز از دقت کافی برخوردار نخواهد بود.

از جمله مطالعات انجام گرفته جهت بررسی تاثیر اینرسی، حل عددی معادلات حاکم بر جریان روغن در یاتاقانهای ژورنال از طریق تئوری ورتکس و تئوری جریان آرام توسط Pan & Vohr [۱] می باشد. همچنین معادلات حاکم بر جریان روغن در داخل یاتاقان های لغزنده صفحه ای، با عنایت به تاثیرنیروهای اینرسی توسط Anvar [۲] حل گردید. اثر نیروی اینرسی در یاتاقانهای کف گرد ازطریق حل عددی معادلات پیوستگی و مومنتم توسط Launder & Leschziner [۳] انجام پذیرفت . در همه مطالعات مذکور نتیجه گرفته شده است، که در محدوده اعداد رینولدز کم، اثر اینرسی قابل ملاحظه نیست.
در سالهای اخیربرخی محققین به بررسی تاثیر خواص روغن روی پارامترهای هیدرودینامیکی یاتاقانها پرداخته اند. Qu Qingwen [۴] در سال ۲۰۰۱ با مطالعه تحلیلی اثرتغییر ویسکوزیته، نتیجه می گیردکه تغییر ویسکوزیته روغن در مجاورت دیوار، تاثیر محسوسی روی توزیع سرعت دارد.Wang.Mei [۵] در سال۲۰۰۲ ، ضخامت لایه مولکولی چسبیده به دیواره ها را به عنوان یک پارامتر اساسی در مطالعه روغنکاری لایهای، با استفاده از تئوری جذب سطحی (Absorption theory) مورد مطالعه قرار داده است. در تحقیقات انجام شده کمتر به در نظر گرفتن اثر نیروی اینرسی و شکل هندسی دیواره روی اختلاف فشار بوجود آمده و توزیع پارامترهای هیدرودینامیکی سیال، پرداخته شده است.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر شکل هندسی دیواره یاتاقان بر روی توزیع پارامترهای هیدرودینامیکی جریان، نظیر فشار، سرعت روغن و تنش برشی دیوارهها و همچنین ارزیابی فرض حذف نیروی اینرسی از معادلات حاکم می- باشد. شکل هندسی دیواره الف) خطی، ب) نمایی، ج) همگرا-واگرا در نظر گرفته شده و برای شناخت تاثیر نیروی اینرسی، نتایج مربوط به حل تحلیلی و عددی با همدیگر مقایسه شده است، با این توضیح که برای دستیابی به حل تحلیلی، ترم های اینرسی از معادلات حاکم حذف شده اند، ولی در حل عددی هیچ عبارتی از معادلات حاکم حذف نشده است.

حل تحلیلی

در يک مساله روغن کاري، هر دو ديوار بالايي و پاييني ممکن است به طور افقي و عمودي حرکت داشته و جريان سه بعدي باشد. با فرض اينکه ديواره ها در جهت z حرکتي نداشته باشند، رابطه کامل براي توزيع فشار به صورت زير خواهد بود [۶] :

$$\frac{\partial}{\partial x}(h^3\frac{\partial p}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial z}(h^3\frac{\partial p}{\partial z})=6\mu\frac{\partial}{\partial x}[h\{U(0)+U(h)\}]+12\mu[V(h)-V(0)] \quad (۱)$$

درمعادله فوق فاصله دو ديواره کم($h(x) << L$) فرض شده است. در اين شبيه سازی فشار در ورودی و خروجی منطقه ثابت و فاصله ديواره از ورودی (h_0) تا خروجی (h_l) کاهش مي يابد(شکل ۱). با فرضهای فوق پروفيل سرعت محلي، بر طبق جريان ترکيبي پوازيه- کوئت مطابق زيربدست مي آيد:

$$u(x,y)=\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}y(y-h)+U(1-\frac{y}{h}) \quad (۲)$$

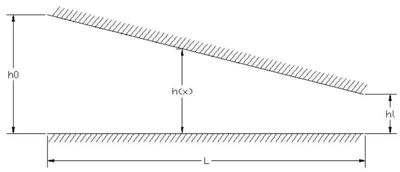
توزيع درست p(x) به گونه‌اي است که در همه جا معادله پيوستگي ارضا می شود.

$$\int_0^h\frac{\partial u}{\partial x}dy=-\int_0^h\frac{\partial \upsilon}{\partial y}dy=-\upsilon(h)+\upsilon(0) \quad (۳)$$

با جاگذاري سرعت از معادله (۲) و محاسبه انتگرال موجود در رابطه (۳) به يک معادله ديفرانسيلي درجه دو براي فشار دست خواهيم يافت .

$$\frac{\partial}{\partial x}(h^3\frac{\partial p}{\partial x})=6\mu U\frac{\partial h}{\partial x} \quad (۳)$$

h در معادلات بالا فاصله دو صفحه را مشخص می نمايد (شکل ۱). بعبارت ديگر تابع شکل ديواره ياتاقان را بصورت تابعی از h استخراج و در معادله فوق قرار می دهيم تا امکان محاسبه توزيع فشار در روي ديواره ممکن شود.



شکل۱: قسمتی از ديواره ياتاقان نوع خطی

با بکار گيري فرضيات بالا برای شکل۱ و درنظر گرفتن شکل خطی برای ديواره بالايی، فاصله دو ديواره به فرم معادله۴ بيان می شود.

$$h(x)=h_0+(h_L-h_0)\frac{x}{L} \quad (۴)$$

با جايگزاری معادله (۴) در معادله (۳) و انتگرالگيری از معادله فوق توزيع فشار بدون بعد در طول ديواره خطی بدست مي آيد(معادله (۵)).

$$p^*=\frac{p-p_\infty}{\frac{\mu UL}{h_0^{\,2}}}=\frac{6(\frac{x}{L})(1-\frac{x}{L})(1-\frac{h_l}{h_0})}{(1+\frac{h_l}{h_0})[1-(1-\frac{h_l}{h_0})\frac{x}{L}]^2} \quad (۵)$$

با مشتق گيری از رابطه (۵) و جايگزاری آن در معادله (۲) توزيع سرعت سيال در فاصله دو صفحه مطابق معادله (۶) می باشد.

$$u(x,y)=m[\frac{1-\frac{2x}{L}}{(1-\frac{nx}{L})^2}+\frac{\frac{2nx}{L}(1-\frac{x}{L})}{(1-\frac{nx}{L})^3}]y(y-h(x))+U(1-\frac{y}{h(x)}) \quad (۶)$$

برای شکل نمائی ديواره (شکل۲ -الف)، تابع به $h(x)=a\exp(bx)$ ازدونقطه ثابت (L,h_L) و $(0,h_0)$ عبور داده شده است. يک محاسبه ساده نشان می دهد: $a=h_0,\ b=\frac{1}{L}\ln(\frac{h_L}{h_0})$ می باشد، که درنتيجه فاصله بين دو ديواره مطابق معادله (۷) بدست می آيد :

$$h(x)=h_0\exp[\frac{1}{L}\ln(\frac{h_L}{h_0})x] \quad (۷)$$

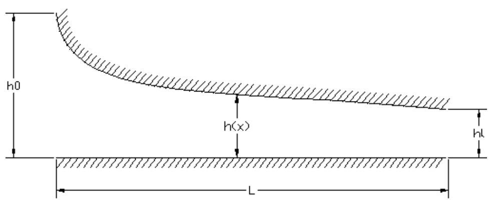
با جاگذاری معادله (۷) در معادله (۳) و حل آن توزيع فشار بصورت زير استخراج می شود :

$$P=C_1+C_2\exp(-3bx)-\frac{3\mu U}{bh_0^{\,2}}\exp(-2bx) \quad (۷)$$

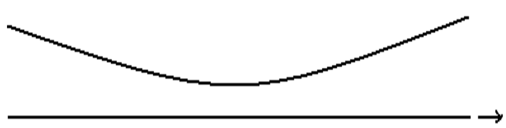
$$C_1=P_\infty+\frac{3\mu U}{bh_0^{\,2}}[1-\frac{1-\exp(-2bL)}{1-\exp(-3bL)}] \quad (۸)$$

(9-c)

$$C_2=\frac{3\mu U}{bh_0^{\,2}}\frac{1-\exp(-2bL)}{1-\exp(-3bL)} \quad (۹)$$



شکل۲-الف: قسمتی از ديواره ياتاقان نوع نمائی



شکل۲-ب: قسمتی از ديواره ياتاقان نوع همگرا- واگرا

معادلات اساسی و الگوریتم حل

معادلات اساسی برای جریان دائمی، دو بعدی و تراکم ناپذیر آرام در مختصات کارتزین عبارتند از:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial \upsilon}{\partial y}=0 \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x}=u\frac{\partial u}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y}=u\frac{\partial \upsilon}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial y}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left(\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \upsilon}{\partial y^2}\right) \qquad (۶)$$

این معادلات پس از گسسته سازی به روش المانهای حجمی محدود توسط الگوریتم SIMPLEC حل گردیده است. بمنظور افزایش دقت محاسبات از تکنیک برون یابی یا درون یابی مرتبه دو در محاسبه شارها روی سطوح سلول استفاده شده است. در روند شبیه سازی معیار همگرائي برای ماگزیمم باقي مانده ها ی شار جرمی ، ممنتوم و انرژی کمتر از 10^{-5} انتخاب شده که تمام نتایج با این شرط ارضا گردیده است.

نتایج

در این تحقیق جریان سیال در داخل سه مجرای اشاره شده به شکل عددی حل و نتایج با حل تحلیلی مقایسه شده است. مطابق شکل (۱)، در هندسه مورد مطالعه دو پارامتر $h_0 = 0.1mm$ ، $L = 40mm$ با مشخصات داده شده ثابت در نظر گرفته و h_l بستگی به شکل دیواره مشخص می شود. در اولین شبیه سازی جریان در فاصله بین دو یاتاقان که شکل دیواره آن خطی است مورد مطالعه قرار گرفته و به ازای شبکه های 10×80، 10×100 و 10×160 توزیع ضریب فشار بدون بعد بدست آمده است، همانطور که از شکل ۳ مشاهده می شود نتایج در شبکه 10×100 استقلال دارند.

شکل (۴) توزیع فشار بدون بعد را بر روی مقطع میانی هندسی مورد مطالعه در حالي که دیواره بالائی خطی و h_l تغییر داده شده را نشان می دهد، که در شکل فوق نتایج عددی با تحلیلی مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد اگر h_L / h_0 بزرگ باشد تا عدد رینولدز ۶۱۵ اختلاف نتایج دو روش قابل تشخیص نمی باشد بعبارت دیگر در عدد رینولدز مذکور اثر اینرسی ناچیز می باشد و دو روش توانسته اند جوابهای یکسانی را تولید نمایند.

شکلهای ۵، ۶، ۷و ۸ مقایسه ای بین فشار بی بعد حلهای تحلیلی و عددی برای دیواره خطی و اعداد رینولدز ۱۲۳۰، ۳۰۷۵، ۴۶۱۲ و ۶۱۵۰ را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود هنگامی که عدد رینولدز از ۶۱۵ زیادتر می شود اختلاف دو نتایج تحلیلی و عددی قابل ملاحظه می باشد که این اختلاف همانطور که اشاره گردید ناشی از ناچیز گرفتن نیروی اینرسی در روش تحلیلی می باشد.

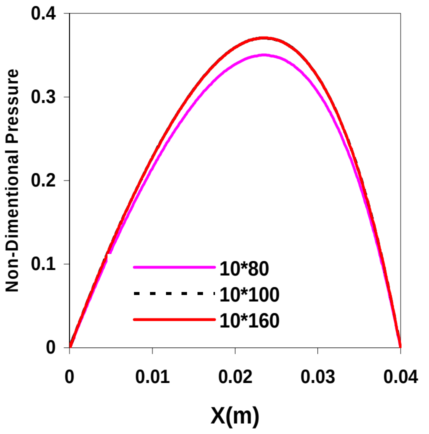
شکل (۹) توزیع تنش برشی بر روی دیواره بالائی برای سه هندسه مختلف را نشان می دهد همانطور که ملاحظه می شود تفاوت قابل ملاحظه در توزیع تنش برای شکل دیواره همگرا-واگرا با دو شکل دیگر دیده می شود. که این اختلاف ناشی از شدت جدایش جریان در مجراهای فوق می باشد بعبارت دیگر همانطور که ملاحظه می شود، ابتدا" تنش برشی کاهش یافته، درنقطهx=17.5mm صفر شده و پس از آن افزایش می یابد. دلیل این رفتارهمانطور که از بردارهای سرعت نشان داده شده در شکل۱۰ پیداست، وجود جریان برگشتی تا نقطه مزبور می باشد. رفتاری مشابه برای تنش برشی روی دیواره نمایی وجود دارد که در شکل فوق قابل مشاهده است. برای دیواره یاتاقان از نوع همگرا و واگرا، مقدار تنش برشی در دو نقطه تقریبیx=17.5,35.5mm صفر شده چرا که جدایش جریان هم در قسمت همگرایی و هم در قسمت واگرائی اتفاق می افتد. همچنین نقطه ماگزیمم تنش برشی مبین تغییر تقعر سرعت می باشد.

شکل ۱۱- توزیع تنش برشی بی بعد روی دیواره خطی با نسبت همگرائی های مختلف را نشان می دهد، ملاحظه می شود که جدایش در نسبت همگرائي پایین تر (۰/۳) که مبین تغییر شدید درز بین دو دیواره یاتاقان می باشد اتفاق می افتد.

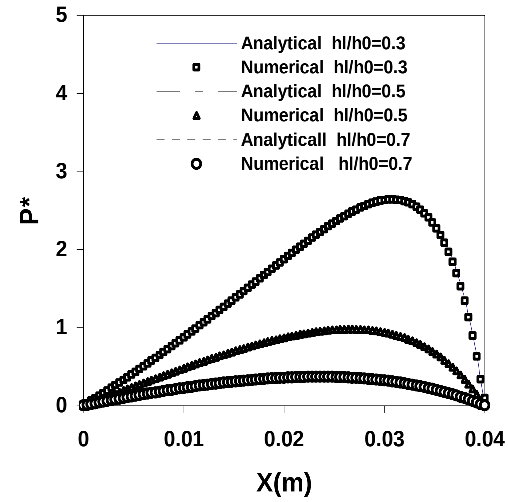
شکل ۱۲- توزیع فشار بی بعد روی دیواره نوع خطی و نمایی در سرعت ۵۰ متر بر ثانیه را نشان می دهد. ملاحظه می شود که فشار ماکزیمم برای دیواره نمایی حدود ۱۵% نسبت به دیواره خطی بیشتر بوده و نیز فشار بالا در محدوده وسیعتری نسبت به دیواره خطی اتفاق می افتد که این نشانگر مطلوبیت دیواره نمایی نسبت به دیواره خطی است.

نتیجه گیری

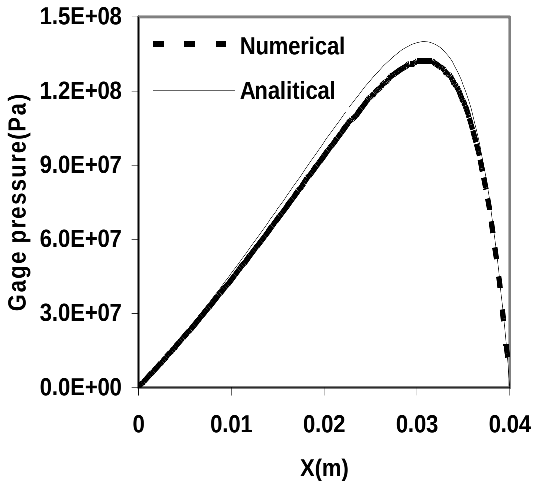
نتایج این تحقیق نشان می دهد۱- که کاهش نسبت همگرایی هندسه یاتاقان باعث افزایش تاثیر نیروی اینرسی در جریان سیال ما بین دو دیواره یاتاقان می شود. ۲-برای دیواره همگرا-واگرا به دلیل وجود توئمان همگرايي و واگرايي در هندسه شکل، تولید فشار منفي اجتناب ناپذیربوده و کاویتاسیون رخ خواهد دادکه درطراحي یاتاقان باید مورد توجه قرار گیرد. ۳- حالت دیواره نمایی به دلیل بالا بودن مقدارفشار ماکزیمم در یک محدوده وسیعتر و نیز عدم وجود فشار منفی(عدم ایجاد کاویتاسیون) نسبت به دو حالت دیگر مطلوبتر است. ۴- نتایج این تحقیق نشان می دهد که در اعداد رینولدز کمتر ۶۱۵ اختلافی بین نتایج تحلیلی و عددی وجود ندارد که مبین ناچیز بودن نیروهای اینرسی در این محدوده می باشد، اما با افزایش عدد رینولدز اختلاف نتایج در دو روش محسوس شده و هر چه عدد فوق بیشتر می شود اختلاف قابل ملاحظه تر می گردد. ۵- تغییر شدید هندسه فاصله بین دو یاتاقان جدایش سیال از سطح دیواره را بدنبال دارد.



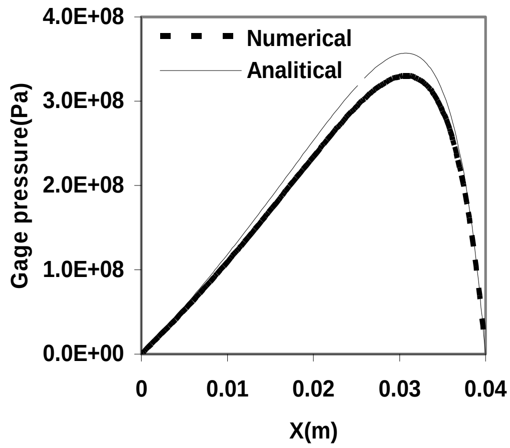
شکل ۳: استقلال شبکه



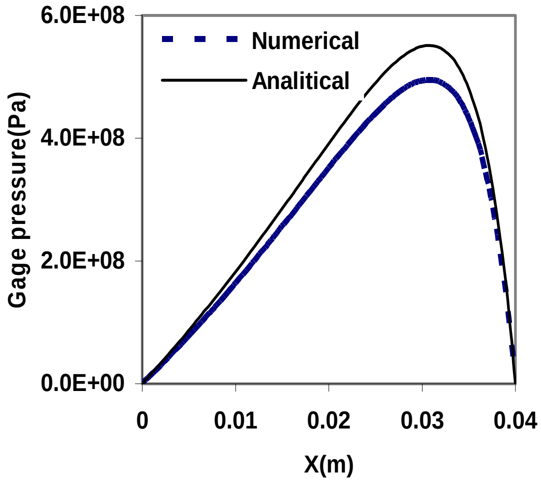
شکل ۴: مقایسه فشار بی بعد مربوط به حل تحلیلیو عددی
برای دیواره خطی با نسبت همگرایی هندسه های مختلف



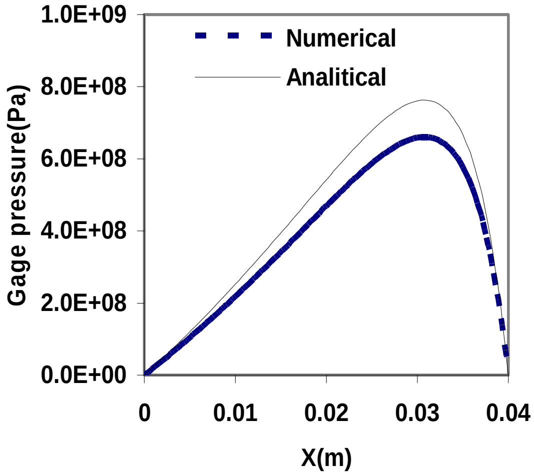
شکل ۵: مقایسه فشار نسبی حل تحلیلیو عددی
برای دیواره خطی برای عدد رینولدز ۱۲۳۰



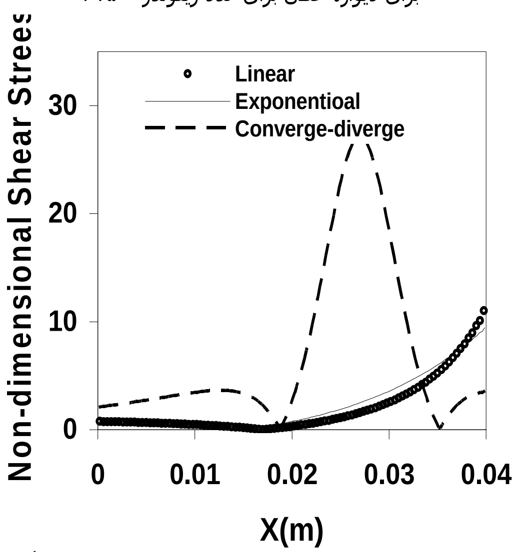
شکل ۶: مقایسه فشار نسبی حل تحلیلیو عددی
برای دیواره خطی برای عدد رینولدز ۳۰۷۵



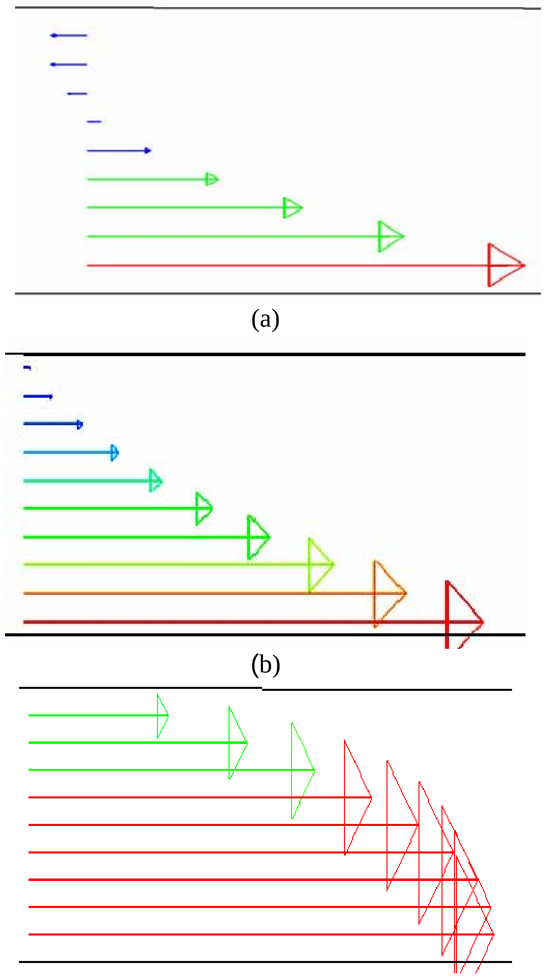
شکل ۷: مقایسه فشار نسبی حل تحلیلیو عددی
برای دیواره خطی برای عدد رینولدز ۴۶۱۲



شکل ۸: مقایسه فشار نسبی حل تحلیلیو عددی
برای دیواره خطی برای عدد رینولدز ۶۱۵۰



شکل ۹: توزیع تنش برشی بی بعد روی دیواره خطی، نمایی وهمگرا-واگرا

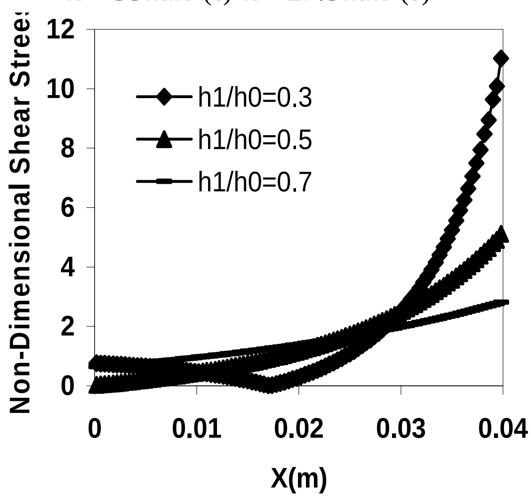


(a)

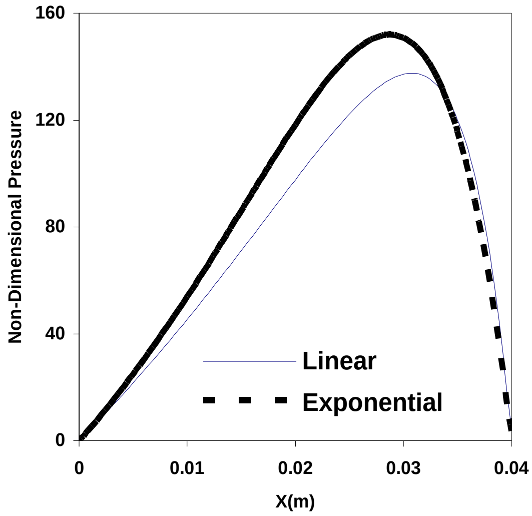
(b)

(c)

شکل ۱۰-توزیع پروفیل سرعت برای دیواره نمائی در(a) $x = 5mm$ (b) $x = 17.5mm$ (c) $x = 35mm$



شکل ۱۱: توزیع تنش برشی بی بعد روی دیواره خطی با نسبت همگرائی های مختلف



شکل ۱۲-توزیع فشار بی بعد روی دیواره نوع خطی و نمایی در رینولدز ۳۰۷۵

منابع

1 -Pan, T., Vohr. H.”Super-Laminar Flow in Bearings and Seals.”The symposium on lubrication in nuclear application.pp.216-245

2- Anvar. M.I. (1971)”Inertia and Convective Effects in Hydrodynamic Lubrication of a Slider Bearing”.Journal of Lubrication Technology pp.313-315

3-B.E.Launder , M.Leschziner.”Flow in Finite-Width, Trust Bearing Including Inertia Effects.”Transaction of the ASME pp 330-338(1978)

4- Qu Qingwen.”Velocity Analysis for Layred Viscosity model under Thin Film Lubrication”Tribology International pp 517-521(2001)

5- Wang.Mei”A Contious Viscosity Model for Thin Film Lubrication” pp 459-465(2002)

6- Frank M. White, Jack B. Evett, Fredrick S. Sherman, ‘ Viscouse fluid Flow, Second edition (1991)