ISME

حل عددي كامل روانكاري الاستو هيدروديناميک جريان غير دايم و همدما روي پروفيل هاي رايـج بادامک

ژياوه قريشي[۱]
كارشناس ارشد

داود جلالي وحيد[۲]
دانشيار

دراين مقاله فرايند روانكاري الاستوهيدروديناميک جريان غيـر دايـم تمـاس خـط محدود و همدما با استفاده از حل همزمان معادله رينولدز و معادله الاستيک سطح با روش عددي تفاضل محدود و نيوتن رافسون روي سه نوع بادامک با پروفيل های سيكلوئيدي، هارمونيكي و چند جمله اي درجه هشتم در شـرايط يكسـاني شـبيه سازي شده است. نتايج نشان مي دهند كه پروفيـل هـارمونيكي در ناحيـه دماغـه بادامک بحراني ترين شرايط و پروفيل سيكلوئيدي، چهـار نقطـه بحرانـي در طـول سيكل، به لحاظ فقر فيلم و سايش بيشتر دارنـد. ازاينـرو پروفيـل چنـد جملـه اي درجه هشتم براي شرايط يكسان ديناميكي و هندسي نسبت به دو پروفيـل ديگـر، وضعيت مناسب تري را از لحاظ روانكاري داراست.

واژه های راهنما: سيكلوئيدي- هارمونيكي- چند جمله اي درجه هشتم- معادله الاستيک- معادله رينولدز

۱- مقدمه

مطالعه تريبولوژي تماس بين بادامک و پيرو در موتورهاي احتراق داخلي بسيار حائز اهميت است. در سـيكل اول كاري از بادامک و پيرو ميزان بار و سرعت متغير مي باشند ازاينرو ضخامت فيلم روغن مي تواند بسـرعت تغيير كند. در يک طراحي بهينه ضخامت فيلم روغن باعث جدايش پيوسته بادامک از پيرو در شـرايط كـاري متفاوت خواهد شد. مسايل تماس دو جسم الاستيک بيضوي شكل در حـال تمـاس بـراي اولـين بـار توسـط Hertz در سال۱۸۸۱ حل شد[۱].Hertz توانست با بكار گيري فرضياتي رابطه اي براي توزيع فشار در حالـت تماس بيضوي ارائه دهد.

درسال ۱۹٤۹ Grubin، با درنظرگرفتن تغيير فرم الاستيک سطوح و تغييرات لزجت با توجه به تغييـرات فشار، اولين نتايج رضايت بخش در زمينه روانكاري الاستو هيدروديناميک درحالـت تمـاس خطـي را بدسـت آورد[۲]. در سال ۱۹۵۹ تفسير جامعي براي حل عددي روانكاري الاستوهيدروديناميک سيلندرهاي الاستيک در شرايط دما ثابت توسط Dowson و Higginson ارائه شد[۳]. آنها موفق شدند بـا اسـتفاده از روش تكـرار،

[۱] نويسنده مسئول، عضوهيئت علمي، گروه مهندسي مكانيك، دانشگاه آزاد اسلامي واحد سقز، zhia_gh@yahoo.com
[۲] دانشيار، دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي سهندتبريز

اندازه كمينه ضخامت فيلم روانكار و ميزان توزيع فشار در ناحيه تماس را براي بارگذاريهاي مختلف در حالت تماس خطي و نقطه اي بدست آورند. در اين تحقيق Dowson و همكاران به بررسي تاثيرات تراكم پذيري روانكار و سرعت روي حالت الاستوهيدروديناميک پرداختند. در سال ۱۹٦٦، Archard و همكارانش روش عددي جديدي براي بارهاي زياد و سرعت پايين در حالت تماس نقطه ای ارائه دادند[٤]. درسال ۱۹۷۰ Cheng براي حل معادله رينولدز از روش تفاضل محدود استفاده نمود[٥]. او با فرض اينكه تغيير شكل سطح مطابق تئوري هرتزين باشد، اين كار را انجام داد. همچنين در سال ۱۹۸۲، Gohar and Mostofi براي تحليل روانكاري الاستوهيدروديناميک از روش نيوتن رافسون استفاده كردند[٦]. در سال ۱۹۸۹، حل جامعي براي روانكاري الاستوهيدروديناميک توسط Xiaolan و Haiqing ارائه شد[۷]. آنها نشان دادند كه تغييرات بار، سرعت نسبي و شعاعهاي انحناي سطوح در حال تماس باعث جدايش سطوح و در نتيجه فشردگي فيلم روانكار مي شود. آنها روش ارائه شده را براي يک جفت بادامک و پيرو به صورت تماس خطی براي سرعت هاي پايين ميل بادامک ارائه دادند. در سال۱۹۹۲، Dowson، Taylor و Zhu كمترين ضخامت فيلم روانكار را با چهار فرض براي حل مسايل تماس خطي يک بعدي براي يک جفت بادامک و پيرو ارائه كردند[۸]. حل عددي كامل جريان گذراي مسايل الاستو هيدروديناميک يكبعدي از نوع تماس خطي براي دورهاي بالاتر بادامک و پيرو درسال ۱۹۹٦، توسط Mei و Xie انجام شد[۹].

Kushwa، Rahnejat و Gohar درسال ۲۰۰۲، حل الاستوهيدروديناميک جريان پايا را براي رولرهايي كه بصورت شيبدار هستند، از روش تفاضل محدود و الگوريتم نيوتن رافسون كه همگرايي بسيار بالايي دارد، استفاده كردند[۱۰]. آنها همچنين در سال ۲۰۰٤ نتايج كارشان را بصورت جريان گذرا بدست آوردند[۱۱].

در سال ۲۰۰۲ Kushwaha و Rahnejat براي اولين بارحل عددي جريان گذراي مسايل الاستو هيدروديناميک بصورت دوبعدي از نوع تماس خط محدود، براي تماس بين بادامک و پيرو بدست آوردند [۱۲]. بعلت پيچيدگی وتغييرات ميزان سرعت و بار در سيكل كاری بادامک ضخامت فيلم روغن به سرعت تغيير می كند و باعث فقر فيلم و سايش شديد روی سطح بادامک ها خواهد شد ازينرو مطالعه رفتار پروفيل های رايج بادامک ها روی پارامترهای روانكاری بسيار مهم است بطوريكه تاكنون موضوعی در اين رابطه انجام نشده است.

در اين مقاله با ملاحظه روانكاري جريان غير دايم بصورت خط محدود و دو بعدي، تماس بين بادامک و پيرو و رفتار فيلم و فشار الاستو هيدروديناميكي روغن را براي سه نوع پروفيل مختلف و رايج بادامک بررسي شده است و مقادير ضخامت فيلم و توزيع فشار روي سطح تماس در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقيقه ميل بادامک به ازاي شرايط هندسي و ديناميكي يكسان براي هر سه پروفيل در نيم دور از گردش بادامک بدست آمده است. حل عددي حاضر بصورت كدي در محيط برنامه نويسي فرترن انجام شده است و زمان اجراي كد براي ۳٦۰ تكرار زماني يا هر نيم درجه از چرخش بادامک و با يک PC كامپيوتر ۲/۸ گيگا هرتزي حدود ۸۵ ساعت پيوسته بطول انجاميد.

۲- تحلیل دینامیکي مجموعه بادامک و پیرو تخت

پارامترهايي ديناميكي كه در معادله رينولدز مورد نياز است، شامل سرعت ميانگين خطي سطح تماس بادامک و پيرو، شعاع انحنا و نيروی عکس العملی وارد بر بادامک و پيرو در طول سيکل کاری بادامک مي باشد. بنابراين در هر نقطه از تماس، مي بايست اين پارامتهای مهم ديناميکی محاسبه شود. شكل (۱)، تماس بين بادامک با پيرو تخت را نمايش مي دهد. سرعت ميانگين خطي سطح تماس بادامک و پيرو، شعاع انحنا و نيروی عکس العملی وارد بر بادامک و پيرو در طول سيکل کاری بادامک برای هر سه پروفيل هارمونيکی، سيکلوئيدی و چند جمله ای درجه هشتم بصورت زير تعريف مي شوند[۹].

$$U_{AV} = \omega(R + J_\theta)/2 \qquad (۱)$$

$$J_\theta = \frac{d^2 s}{d\theta^2} \qquad (۲)$$

$$R = R_0 + s + J_\theta \qquad (۳)$$

$$F_{cd} = k_{sp} \cdot s + F_P + m_{eq} \cdot \omega^2 \cdot J_\theta \qquad (٤)$$

$$m_{eq} = m_V + m_T + \frac{1}{3} m_{Sp} \qquad (٥)$$

که در آن F_{cd} نيروی وارد بر بادامک، F_p نيروی پيش بار فنر، k_{sp} سختی فنر سوپاپ، m_{eq} جرم معادل، m_v، m_T و m_{sp} بترتيب جرم سوپاپ، پيرو و فنر است. لازم است اشاره شود كه مكانيزم بادامک مورد مطالعه از نوع over head است و برای هر سه پروفيل يكسان می باشد. همچنين هريک از سه پروفيل رايج بادامک دارای تابع مربوط به خود است.

۳- مدل روانکاری الاستوهیدرودینامیک روی جفت بادامک و پیرو

شكل بابعد معادله رينولدز برای مسايل تماس خط محدود جريان غير دايم بصورت زير تعريف می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right) = U_{AV}\frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \qquad (۶)$$

با استفاده از روابط زير، شكل معادله رينولدز بدون بعد خواهد شد.

$$X = \frac{x}{b},\quad Y = \frac{y}{a},\quad Y_c = \frac{y_c}{a},\quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0},\quad \bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_0},\quad H = \frac{bR_0}{b^2},\quad P = \frac{p}{P_h},\quad \bar{U} = \frac{\eta_0 U_{AV}}{E' R_x} \qquad (۷)$$

شكل بدون بعد معادله رينولدز باتوجه به روابط (٦) و (۷) بصورت زير می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{\bar{\rho}H^3}{\bar{\eta}}\frac{\partial P}{\partial X}\right) + \frac{b^2}{a^2}\frac{\partial}{\partial Y}\left(\frac{\bar{\rho}H^3}{\bar{\eta}}\frac{\partial P}{\partial Y}\right) = 12\frac{U_{AV}\eta_0 R_0^2}{P_h b^3}\frac{\partial}{\partial X}(\bar{\rho}H) + 12\frac{\eta_0 R_0^2}{P_h b^2}\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}H) \qquad (۸)$$

٤- خواص روانکار

Roelands رابطه ای برحسب فشار برای تعيين مقدار لزجت بدون بعد بصورت زير بيان كرد[۱۳].

$$\bar{\eta} = \exp\left\{\left(\ln\eta_0 + 9.67\right)\left[-1+\left(1+5.1\times10^{-9}\,p\right)^{0.67}\right]\right\} \qquad (٩)$$

همچنين رابطه اي براى چگالى بدون بعد برحسب فشار توسط Dowson و Higginson ارائه شد[٣].

$$\bar{\rho}(p) = 1+\frac{5.83\times10^{-10}\,p}{1+1.68\times10^{-9}\,p} \qquad (١٠)$$

٥- ضخامت فيلم

معادله زير بيان گويا جهت تعريف ضخامت فيلم روانكار در روانكارى الاستوهيدروديناميک است.

$$h_{(x,y.t)} = h_0 + h_{g(x,y,t)} + \delta_{e(x,y,t)} \qquad (١١)$$

كه در آن جدايش ناشى از هندسه بادامک بصورت زير تعريف مى شود.

$$h_{g(x,y,t)} = \frac{x^2}{2R} \qquad (١٢)$$

با فرض اينكه تماس بادامک با پيرو تخت، تغييرشكل هاى الاستيكى در پى داشته باشد، مطابق اصل جمع آثار كل تغيير شكل الاستيک در هر گره (k,l) از ناحيه محاسباتى بصورت زير تعريف خواهد شد[١٤].

$$\delta_{e(k,l)} = \frac{2}{\pi E'}\sum_{j-1}^{ny}\sum_{i-1}^{nx} p_{i,j} D_{m,n} \qquad n = |l-j+1|\ ,\ m = |k-i+1| \qquad (١٣)$$

٦- معادله تعادل بار

كل نيروهاي خارجي كه روي اجسام در حال تماس اعمال مي شود توسط فيلم روان كننده تحمل مي شود. ازاينرو انتگرال گيري از فشار در كل ناحيه تماس، معادل با نيروي اعمال شده خواهد بود. در شرايطي كه تماس بصورت خط محدود باشد معادله بار به صورت زير تعريف خواهد شد.

$$W = \int_A PP_h\, dX\, b\, dY\, a \qquad (١٤)$$

رابطه بالا يک روش تحليلي براي بدست آوردن اندازه بار مي باشد. مقدار بار بدست آمده حاصل از آناليز عددى نيز توسط رابطه زير تعريف مي شود.

$$W = a.b.P_h.\overline{W} \qquad (١٥)$$

كه در آن $\overline{W}$، بار تماسي بدون بعد در شرايطي كه تماس بصورت خط محدود مي باشد، برابر است با

$$\overline{W} = \iint P\, dX\, dY = \pi \qquad (١٦)$$

٧- روش حل عددى

قدم اول براى حل عددى تفكيک كردن معادله رينولدز در هر گره از ناحيه محاسباتى است. بعد از تفكيک معادله رينولدز، آن را با استفاده از يک روش نيمه ضمنى و نيمه صريح بصورت پنج نقطه از روش نيوتن رافسون حل مى شود. شكل تفكيک شده نهايي معادله رينولدز بصورت زير مى باشد.

$$\sum_{k=2}^{nx-1}\sum_{l=2}^{ny-1}\left[\bar{J}_{(ij,kl)}\right]\Delta P_{(k,l)} = -f^{R}_{(i,j)} \qquad (۱۷)$$

در سمت چپ رابطه(۱۷)، $\bar{J}_{(ij,kl)} = \partial f^{j}_{(i,j)} / \partial P_{(k,l)}$ ماتریس ژاکوبین و سمت راست آن تابع باقیمانده است که خود صورتی از معادله رینولدز می باشد. بطوریکه شکل تفکیک شده تابع باقیمانده از نوع تفاضل مرکزی و شکل تفکیک شده ترم ژاکوبي بصورت پسرو می باشد[۱۵]. بعد از تفکیک معادله رینولدز می توان پارامترهای مهم از جمله فشار و ضخامت فیلم روانکار را در طول سیکل کاری بادامک بدست آورد. برای این کار ابتدا بایست یک ناحیه جهت انجام محاسبات تعریف کرد. ناحیه مورد مطالعه وسیع تر از سطح تماس و بصورت مستطیلي مطابق شکل (۲) است.

همچنین شرایط مرزی مهم برای حل عددی دو نوع است، یکی اینکه در روی مرزهای مستطیلی از ناحیه محاسباتی فشارهیدرودینامیکی برابر صفر است و دیگری برای اجتناب از فشارهای منفی در هنگام محاسبات مقدار گرادیان فشار برابر صفر می باشد. برای شبکه ٦٥ در١٦٤ داریم

$$P_{(i,1)} = P_{(65,j)} = P_{(i,164)} = P_{(1,j)} = 0 \qquad (۱۸)$$

$$P = \frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial P}{\partial Y} = 0 \qquad (۱۹)$$

باتوجه به اینکه مقادیر فشار هرتزین، جواب نسبتا نزدیکي برای معادله تفکیک شده است پس از آن به عنوان حدس اولیه براي حل مساله در نظر گرفته مي شود. با استفاده از فشار حدسی تغییر شکل کلي محاسبه مي گردد. در ادامه با حل همزمان معادله رینولدز تفکیکي و تغییر شکل الاستیک سطح، فشار بدست می آید، این فشار با فشار حدس زده مقایسه مي شود. محک همگرایي فشار بصورت زیر تعریف شده است.

$$\frac{\sum_{i=1}^{nx}\sum_{j=1}^{ny}\left|P^{n+1}_{i,j} - P^{n}_{i,j}\right|}{\sum_{i=1}^{nx}\sum_{j=1}^{ny}P^{n+1}_{i,j}} \le Err_P \qquad (۲۰)$$

محدوده خطا یا Err_P برابر با۰/۰۰۰۱ است. در صورت عدم همگرایي فشارجدیدی بصورت زیر تعریف خواهد شد.

$$P^{n+1}_{i,j} = P^{n}_{i,j} + \Omega\,\Delta P_{i,j} \qquad (۲۱)$$

چنانکه در آن Ω معرف ضریب میرایي جهت تغییرات فشار مي باشد. این ضریب معمولا بین ۰/۰۱ تا ۱/۰ است و به نوع مساله مورد بررسي بستگي دارد. در صورت همگرایي فشار، نیرو نیز به مانند فشار بایست همگرا شود. نیروي بدست آمده بایستی در رابطه (١٦) صدق کند. محک همگرایي نیرو بصورت زیر تعریف می شود.

$$\left|\overline{W} - \pi\right| \le Err_w \qquad (۲۲)$$

محدوده خطا Err_w براي همگرایي نیرو برابر ۰/۰۰۰۰۵ خواهد بود. وقتیکه نیروي بدست آمده جواب مساله نباشد فاصله اولیه مرکزي بین دو جسم یعني H_0 بایست تا جاییکه نیروي بدست آمده حاصل از آنالیز معادل نیروي اعمالي باشد، تغییر کند. معیار تغییر این فاصله بصورت زیر مي باشد.

$$H_0^{n+1} = H_0^n + \kappa\left(\overline{W} - \pi\right) \qquad (٢٣)$$

جاييكه در آن κ معرف ضريب ميرايي جهت تغييرات نيرو است و بين ٠/٠٠١ تا ٠/٠٥ می باشد.

٨- نتايج حل عددي

در این بخش برای صحت روش حل جهت آنالیز عددی مسایل الاستوهیدرودینامیک غیر دایم، مقایسه ای با حل عددی Kushwaha و Rahnejat انجام شده است. آنها در سال ٢٠٠٢ مساله را تنها برای یک حالت از سرعت زاویه ای میل بادامک(٣٠٠٠ دور بر دقیه)، برای بادامکی تنها با پروفیل سیکلوئیدی انجام دادند[١٢]. مقایسه بین ضخامت فیلم کمینه ناشی از این دو حل در شکل های (٣- الف) و (٣- ب) ارائه شده است. بیشترین خطا بین این دو حل ٨ درصد است. لازم بذکر است که Kushwaha و همکارانش نتایجی در رابطه با ضخامت فیلم کمینه مطلق، فشار بیشینه و فشار هرتزین در سیکل کاری بادامک ارائه نکردند.

در این قسمت جهت یافتن نتایج حل عددی مطابق شرایط یکسان ورودی جدول١، برای پروفیل های سیکلوئیدی، هارمونیکی و چند جمله ای درجه هشتم انجام شده است.

نقاطي از سيكل كه در آن سرعت ميانگين تغيير علامت داده است و يا كمترين مقدار را داشته باشد، شرايط بحراني را بوجود خواهد آورد. ازاينرو با توجه به شكل (٤) ، نقاط بحراني در نصف سيكل كاري پروفيل سيكلوئيدي در زواياي ٥٥ و ٧٨ درجه، همچنين پروفيل هارمونيكي در زاويه٧٨ درجه و پروفيل چند جمله اي درجه هشتم در زاويه ٦٧ درجه بحرانی است.

با توجه به شکل های (٥) و (٦)، مقادیر نیرو و شعاع خمیدگی پروفیل هارمونیکی در آستانه باز شدگی سوپاپ(θ=0°) بیشترین مقدار را دارد. در صورتیکه در باز شدگی کامل سوپاپ ها(θ=90°) مقادیر نیرو و شعاع خمیدگی در پروفیل سیکلوئیدی بیشتر از دو پروفیل دیگر است. از اینرو شرایط روانکاری در این ناحیه(θ=90°) برای پروفیل سیکلوئیدی بحرانی تر خواهد بود.

شکل های(٧)، (٨) و (٩) بترتیب ضخامت های فیلم مرکزی، فیلم کمینه و فیلم کمینه مطلق را برای هر سه پروفیل در طول سیکل کاری را نمایش می دهند. در آستانه باز شدگی سوپاپ(θ=0°) مقادیر ضخامت فیلم مرکزی، فیلم کمینه و فیلم کمینه مطلق در پروفیل هارمونیکی بیشترین می باشد.

در ناحیه باز شدگی کامل سوپاپ ها(θ=90°) مقادیر ضخامت های فیلم مرکزی، فیلم کمینه و فیلم کمینه مطلق برای پروفیل هارمونیکی بترتیب برابر است با ٢٥٥، ٢٢٢ و ١٩٤ نانو متر، برای پروفیل سیکلوئیدی بترتیب برابر است با ١/٣٠٩، ١/٢٨٥ و ١/١٠٨ میکرون و برای پروفیل چند جمله ای درجه هشتم بترتیب برابر ٣٠٨ ، ٢٨٠ و ٢٤٨ نانو متر مي باشند. پس در اين ناحيه(θ=90°) پروفيل هار مونيكي وضعيت بحرانی تری را دارد. همچنين مقدار ضخامت فيلم كمينه در ناحيه بحراني براي پروفيل هارمونيكي در زاويه ٧٨ درجه برابر٦٤ نانو متر، براي پروفيل سيكلوئيدي در زواياي ٥٥ و ٧٨ درجه برابر ١٣٢ و ١٤٥ نانو متر و براي پروفيل چند جمله اي درجه هشتم در زاويه ٦٧ درجه برابر ٨٢ نانو متر است.

شکل های(١٠) و (١١) بترتیب منحني هاي فشار هرتزی و فشار بیشینه پروفیل های سیکلوئیدی، هارمونیکی و چند جمله ای درجه هشتم در طول سیکل کاری بادامک را نمایش می دهند. رفتار فشار هرتزین تا زاویه ٥٤ درجه برای هرسه پروفیل تقریبا یکسان می باشند ولی در ادامه پروفیل سیکلوئیدی رفتار

متفاوتی با دو پروفیل دیگر دارد. با توجه به شکل(٦)، جاییکه پروفیل سیکلوئیدی کمترین شعاع خمیدگی‌را دارد($\theta=67°$)، بیشترین فشار هرتزین روی می دهد. همچنین مطابق شکل (۱۰) و (۱۱) پروفیل سیکلوئیدی کمترین مقدار فشار هرتزین و فشار بیشنه را در باز شدگی کامل سوپاپ ها($\theta=90°$) داراست.

با توجه به شکل۱۱، مقدار فشار بیشینه در طول سیکل کاری برای هر سه پروفیل از شروع پروفیل بادامک ها تا ناحیه کناری آنها افزایش داشته است اما در نزدیکی نوک دماغه برای پرفیل سیکلوئیدی فشار بیشینه ناگهان کمتر شده است و این بسیار مطلوب می باشد. بیشترین فشار را پروفیل هارمونیک در نوک دماغه دارد و مقدار آن برابر ۲۷۲/٤ مگا پاسکال است. شکل های (۱۲)، (۱۳) و (١٤) نمای سه بعدی و کانتورهای فشار الاستوهیدرودینامیکی و ضخامت فیلم را در نقاط بحرانی یاد شده برای هر سه پروفیل را نمایش می دهند. مقدار فشار بیشینه پروفیل سیکلوئیدی در شرایط بحرانی به لحاظ فقر فیلم ($\theta=55°$) برابر ۲٤٥/۸ مگاپاسکال، برای شرایط بحرانی پروفیل هارمونیکی($\theta=78°$) برابر ۲۳٦/٦ مگاپاسکال و برای حالت بحرانی پروفیل چندجمله ای درجه هشتم($\theta=67°$) برابر ۲۳۹/٤ مگاپاسکال می باشند. همچنین ضخامت های فیلم مرکزی، فیلم کمینه و فیلم کمینه مطلق در شرایط بحرانی از سیکل کاری بادامک برای پروفیل سیکلوئیدی($\theta=55°$) بترتیب برابر است با ١٦٢، ۱۳۲ و ١١٦ نانو متر، برای پروفیل هارمونیکی($\theta=78°$) بترتیب برابر است با ۸٤، ٦٤ و ۳۷ نانو متر و برای پروفیل چند جمله ای درجه هشتم($\theta=67°$) بترتیب برابر ١٠٦، ۸۲ و ٧٤ نانو متر مي باشند. از اینرو از لحاظ فقر فیلم پروفیل هارمونیکی بحرانی ترین شرایط در بین دو پروفیل سیکلوئیدی و چند جمله ای درجه هشتم را دارد. با توجه به کانتورهای ضخامت فیلم و فشار این شکل ها در هر سطح تماس بادامک با پیرو جاییکه کمترین ضخامت فیلم وجود دارد، بیشترین فشار در هر سطح تماس بوجود می آید ازاینرو لبه های بادامک دارای ساییدگی و فقر بیشتر فیلم نسبت به دیگر نقاط سطح بادامک است.

۹- نتیجه گیري

تمامي نتايج بدست آمده براي هر سه پروفيل در شرايط يكساني به لحاظ ديناميک، خواص مكانيكي و هندسه مجموعه بادامک مطالعه شده است. همچنين به علت تقارن پروفيل ها، بحث روي نصف سيكل كاري بادامک انجام شده است. با توجه به نتايج، با توجه به كانتورهای ضخامت فيلم و فشار، برای سطح تماس بادامک با پيرو جاييكه كمترين ضخامت فيلم وجود دارد، بيشترين فشار در هر سطح تماس بوجود می آيد ازاينرو لبه های بادامک دارای ساييدگی و فقر بيشتر فيلم روغن نسبت به ديگر نقاط سطح بادامک است.

در ناحيه دماغه بادامک وضعيت چه از لحاظ فقر فيلم و چه از لحاظ افزايش و رشد فشار بحراني تر از ناحيه كناري بادامک مي باشد. دراين بين پروفيل هارمونيكي در ناحيه دماغه بعلت كاهش سرعت و شعاع خميدگي از دو پروفيل ديگر شرايط بحراني تري را دارد. همچنين پروفيل سيكلوئيدي در طول سيكل كاري خود بعلت تغيير علامت دامنه سرعت ميانيگن، جهار نقطه بحراني به لحاظ فقر فيلم دارد.

همچنين مقدار فشار بيشينه در طول سيكل كاری برای هر سه پروفيل از شروع پروفيل بادامک ها تا ناحيه كناری آنها افزايش داشته است. فشار بيشينه در نزديكی نوک دماغه پرفيل سيكلوئيدی ناگهان كمتر شده است و اين بسيار مطلوب می باشد اما در پروفيل هارمونيک نسبت به دو پروفيل ديگر، اين مقدار رشد

بیشتری داشته است و همچنین فشار بیشینه در پروفیل چند جمله ای درجـه هشـتم نوسـان کمتـری دارد. ازاینرو پروفیل چند جمله ای درجه هشتم دارای شرایط بهتری به لحاظ روانکاری پیوسته و کـاهش سـایش، فقر فیلم، تنش و تلفات خواهد بود.

مراجع

[1] Hertz, H., "The Contact of Elastic Solids", J. Reine Angew. Math., Vol. 92, pp. 156–171, (1881).

[2] Grubin, A.N., "Fundamentals of the Hydrodynamic Theory of Lubrication of Heavily Loaded Cylindrical Surfaces. Investigation of Contact Machine Components", Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering, Book No. 30, pp. 115-166, DSIR London Translation, No. 337, (1949).

[3] Dowson, D., and Higginson, G. R., "Numerical Solution to the Elastohydrodynamic Proplem", Journal Mechanical Engneering Science,Vol. 1, pp. 6-15, (1959).

[4] Archard, J.F., and Cowking, E. W., "Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts", Proceeding Instrument Mechanical Engineering, Vol. 180, Part 3B, pp. 47-65, (1966).

[5] Cheng, H.S., "A Numerical Solution to the Elastohydrodynamic Film Thickness in an Elliptical Contact", Journal of Lubrication Technology, Vol. 92, pp. 155-162, (1970).

[6] Mostofi, M., and Gohar, R., "Elastohydrodynamic Lubrication of Finite Line Contacts", Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, pp. 598-604, (1983).

[7] Xiaolan, A., and Haiqing, Y., "A Numerical Analysis for the Transient EHL Process of a Cam-tappet Pair in I. C. Engine", Journal of Tribology, Vol. 111, pp. 413-417, (1989).

[8] Dowson, D., Taylor, C. M., and Zhu, G., "A Transient Elastohydrodynamic Lubrication Analysis of a Cam and Follower", Journal Physics, Part D, Vol. 25, pp. 313-320, (1992).

[9] Mei, X., and Xie, Y., "A Numerical Analysis of the Nonsteady EHL Process in High-speed Rotating Engine Cam/Tappet Pairs", ASME, Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 637-643, (1996).

[10] Kushwaha, M., Rahnejat, H., and Gohar, R., "Aligned and Misaligned Contacts of Rollers to Races in Elastohydrodynamic Finite Line Conjunctions", Proceeding Instrument Mechanical Engineering, Part C, Vol. 216, pp. 1051-1070, (2000).

[11] Kushwaha, M., and Rahnejat, M., "Transient Concentrated Finite Line Roller-to-Race Contact under Combined Entraining, Tilting and Squeeze Film Motions", Journal of Physics, Part D, Vol. 37, pp. 2018-2034, (2004).

[12] Kushwaha, M., and Rahnejat, H., "Transient Elastohydrodynamic Lubrication of Finite Line Conjunction of Cam to Follower Concentrated Contact", Journal of Physics, Part D, Vol. 35**,** pp. 2872-2890, (2002).

[13] Roelands, C. J. A., "Correlation Aspects of Viscosity-temperature-pressure Relationship of Lubricating Oils", PhD Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, (1966).

[14] Johnson, K. L., "*Contact Mechanics"*, Cambridge, Cambridge University Press, (1985).

[15] Jalali-Vahid, D., Rahnejat, H., Jin, Z. M., and Dowson, D., "Transient Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Circular Point Contacts", Proceeding Instrument Mechanical Engineering, Part C, Vol. 215, pp. 1159-1173, (2001).

فهرست نمادهای انگلیسي

a: نصف طول تماس هرتزین

b: نصف عرض تماس هرتزین

$D_{m,n}$: ماتریس موثر

E': مدول الاستیسیته مرکب

f^R: تابع باقیمانده

h: ضخامت فیلم

h_g: پروفیل هندسی بادامک

h_0: حدس اولیه فیلم مرکزی

H: ضخامت فیلم بدون بعد

J_θ: شتاب هندسی پیرو تخت

[J] : ماتریس ژاکوبي بدون بعد

n_x,n_y: تعداد گره ها در جهتy,x

p: فشار هیدرودینامیکي

P_h: فشار بیشینه هرتزین

R: شعاع انحنای یا خمیدگی بادامک و پیرو

R_0: شعاع دایره مبنا

R_d: شعاع پروفیل داب آف

s: جابجایي پیرو

t: زمان

U_{AV}: سرعت میانگین خطی روی سطح تماس

x,y,z: مختصات کارتزین

فهرست نمادهای یونانی

δ_e: تغییر شکل الاستیک بابعد

$\overline{\delta}_e$: تغییر شکل الاستیک بدون بعد

ΔP: اختلاف فشاربدون بعد

η: لزجت دینامیکی با بعد روانکار

$\overline{\eta}$: لزجت روانکار بدون بعد

η_0: لزجت مطلق روانکار در فشار اتمسفر

θ: زاویه چرخش بادامک

ρ: چگالی با بعد روانکار

$\overline{\rho}$: چگالي روانکار بدون بعد

ρ_0: چگالي مطلق روانکار در فشار اتمسفر

υ: نسبت پواسون

ω: سرعت زاویه ای مي بادامک

پیوست

معادله پروفیل بادامک سیکلوئیدی بصورت زیر تعریف می شود.

$$y = s_{\max}\left[\frac{\theta}{\beta} - \left(\frac{1}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)\right)\right]$$

در رابطه بالا s_{max} بیشترین بلند شدگی پیرو، θ زاویه کاری بادامک و β نصف سیکل کاری بادامک که برابـر با ۹۰ درجه می باشد. معادله پروفیل بادامک هارمونیکی بصورت زیر تعریف می شود.

$$y = \frac{s_{\max}}{2}\left(1-\cos\left(\frac{\pi\theta}{\beta}\right)\right)$$

همچنین معادله پروفیل بادامک چند جمله ای درجه هشتم نیز بصورت زیر تعریف می شود.

$$y = a_8\theta^8 + a_7\theta^7 + \ldots + a_2\theta^2 + a_1\theta + a_0$$

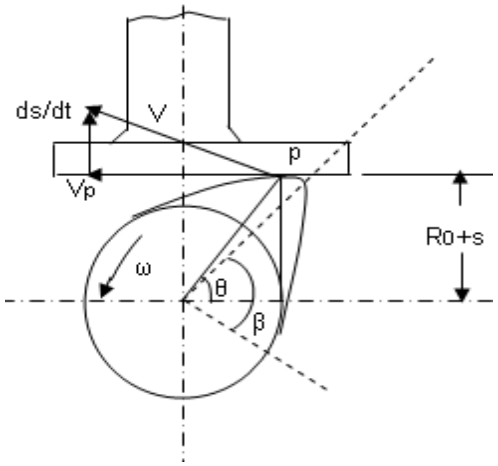
که در آن a_8 تا a_0 ضرایب چند جمله ای است و تابع شرایط جابجایي، سرعت و شتاب پیرو است.

جدولها

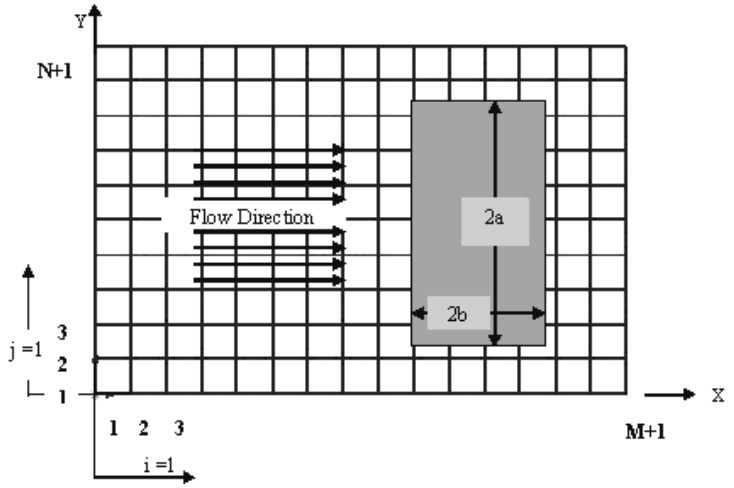
جدول ۱- مشخصات بادامک وپیرو

پريود طول زاويه كاري بادامک	۹۰ درجه
بلند شدگي بيشينه	۹/٤mm
عرض بادامک	۲۰mm
شعاع دايره مبناي بادامک	۲۵mm
مدول يانگ مركب بادامک و پيرو	۲۱۰Gpa
نسبت پواسون	۰/۳۰
لزجت ديناميكي روانكار	۰/۰۳۵Nsm^{-2}
ضريب فشاري لزجت روانكار	۲/۸*۱۰$^{-۸}N^{-1}$ m^2
سرعت زاويه اي ميل بادامک	۳۰۰۰ دور بر دقيقه

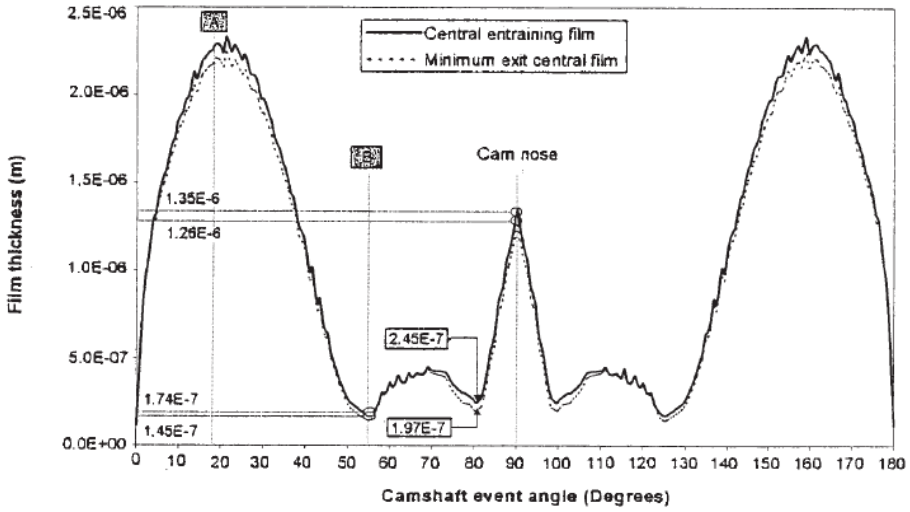
شکلها



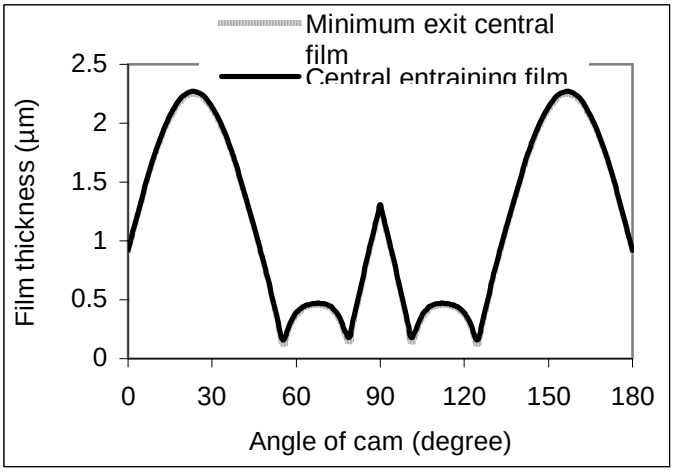
شکل۱- شماتیک تماس بادامک با پیرو



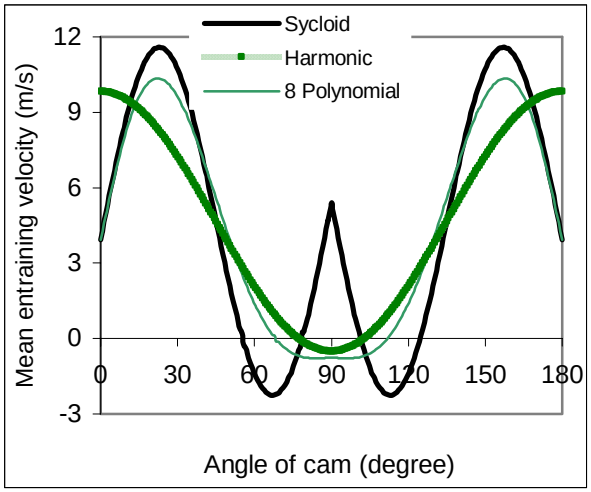
شكل٢- گره بندي ناحيه مورد مطالعه



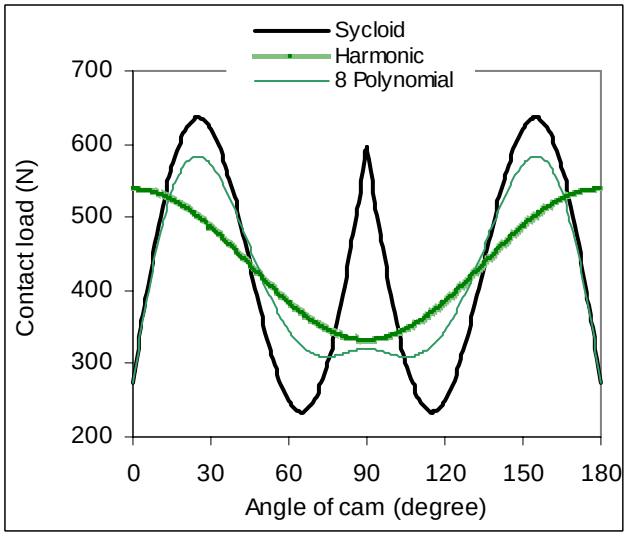
شـكل٣- الـف- تغييـرات ضـخامت فـيلم كمينـه در ٣٠٠٠ دور بـر دقيقـه (حـل عـددى Kushwaha و Rahnejat)[١٢]



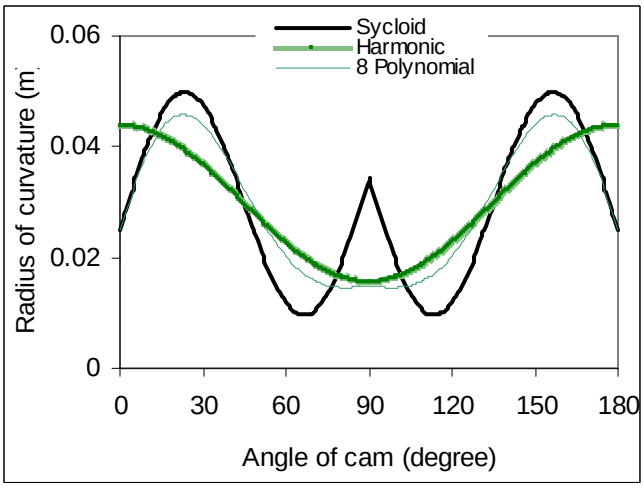
شكل٣- ب- مقايسه تغييرات ضخامت فيلم كمينه در ٣٠٠٠ دور بر دقيقه (حل عددى حاضر)



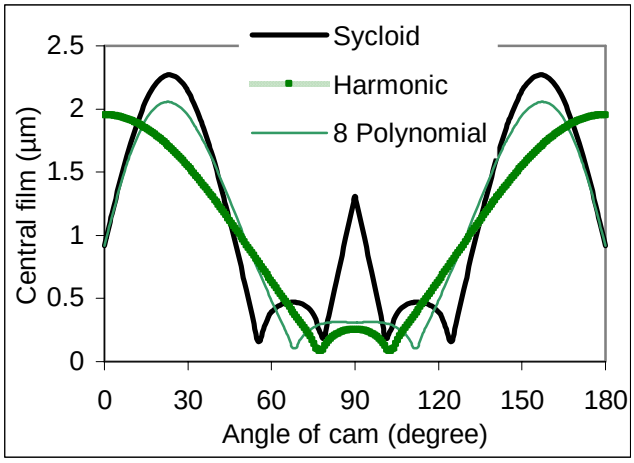
شکل٤- منحني هاي سرعت ميانگين سه پروفيل در ۳۰۰۰ دور بر دقيقه



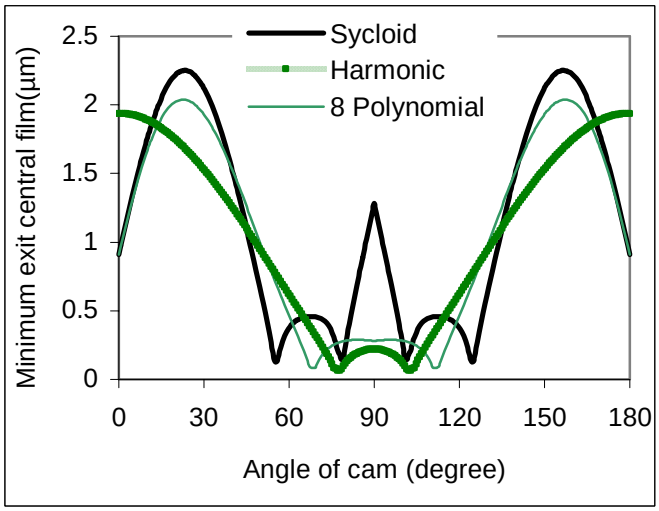
شکل٥- منحني هاي نيروی عکس العملی وارد بر بادامک در سه پروفيل در ۳۰۰۰ دور بر دقيقه



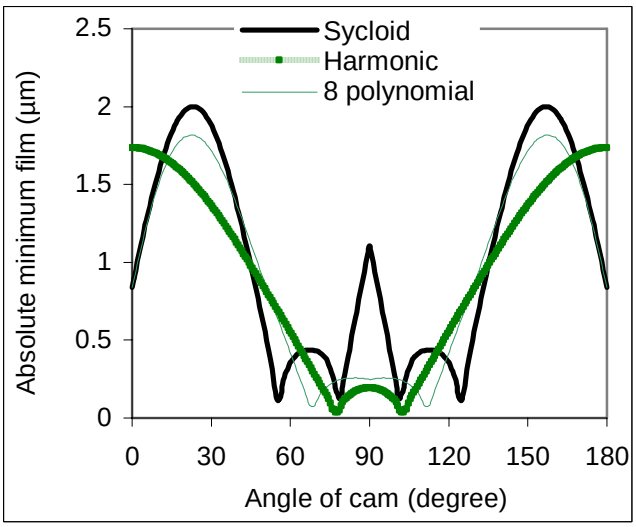
شکل٦- منحني هاي شعاع خميدگی سه پروفيل در ۳۰۰۰ دور بر دقيقه



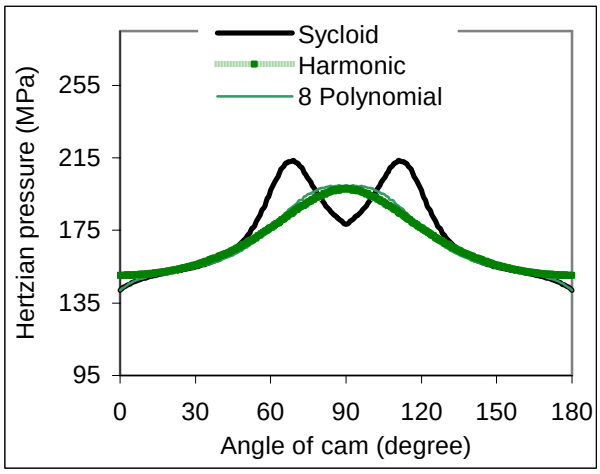
شكل٧- منحني هاي ضخامت فيلم مركزی سه پروفيل در ٣٠٠٠ دور بر دقيقه



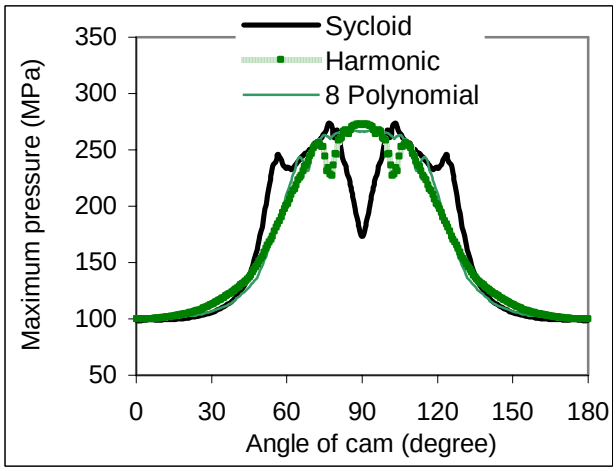
شكل٨- منحني هاي ضخامت فيلم كمينه سه پروفيل در ٣٠٠٠ دور بر دقيقه



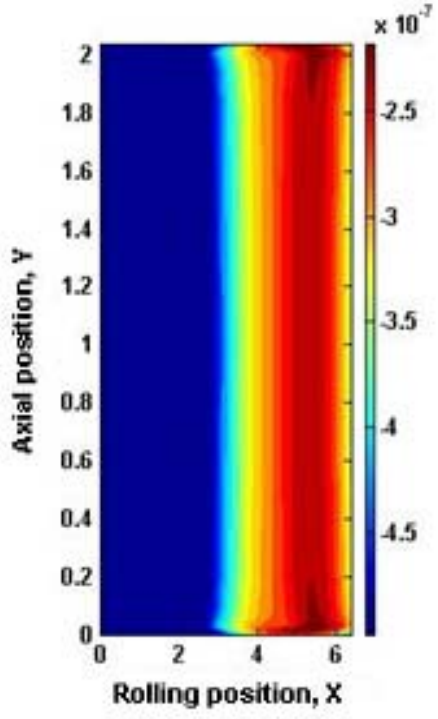
شكل٩- منحني هاي ضخامت فيلم كمينه مطلق سه پروفيل در ٣٠٠٠ دور بر دقيقه



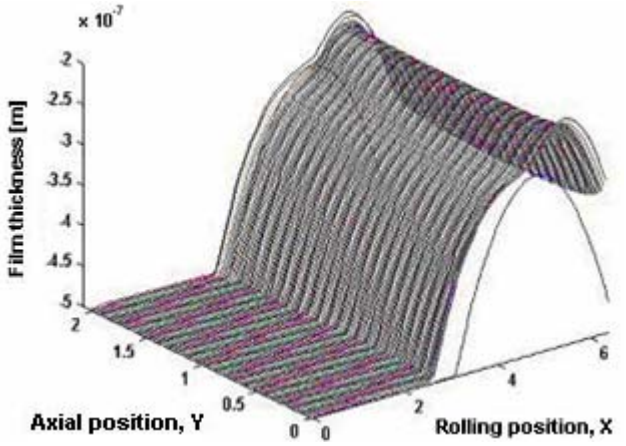
شکل۱۰- منحني هاي فشار هرتزين سه پروفيل در ۳۰۰۰ دور بر دقيقه



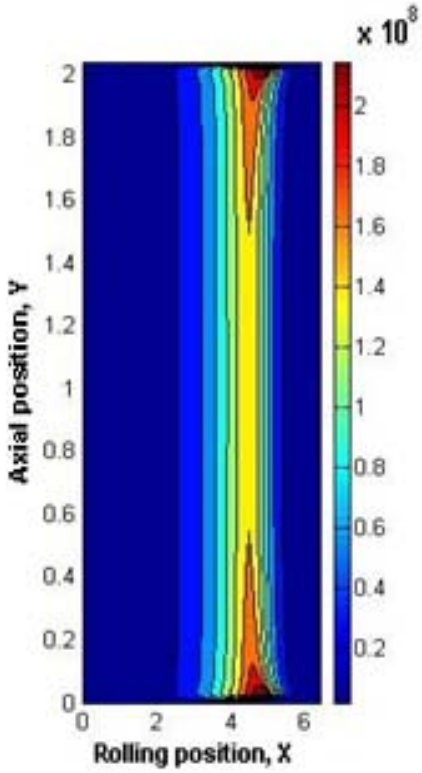
شکل۱۱- منحني هاي فشار بيشينه سه پروفيل در ۳۰۰۰ دور بر دقيقه



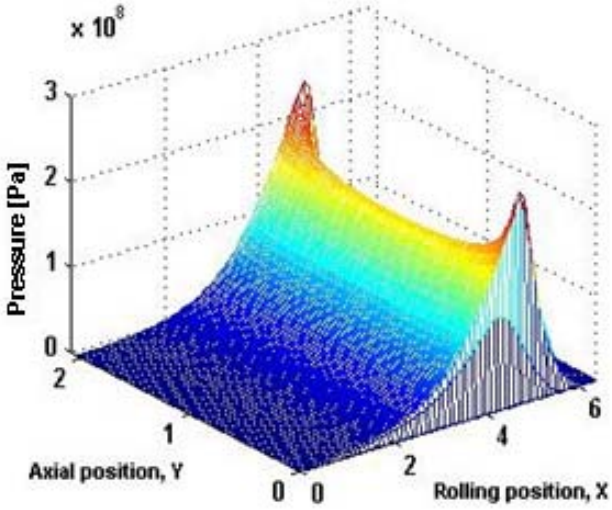
(ب)



(الف)



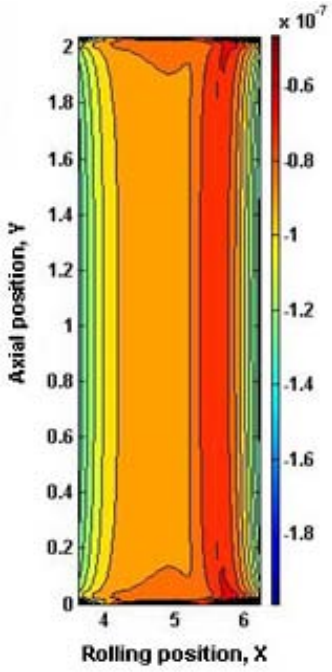
(د)



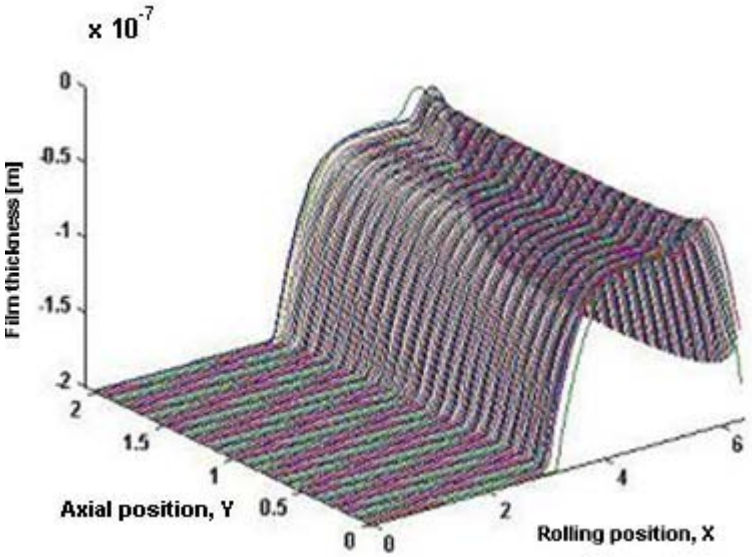
(ج)

شكل ١٢-الف و ب- نمايش سه بعدي و كانتور ضخامت فيلم در شرايط بحراني(٥٥ درجه) پروفيل سيكلوئيدى

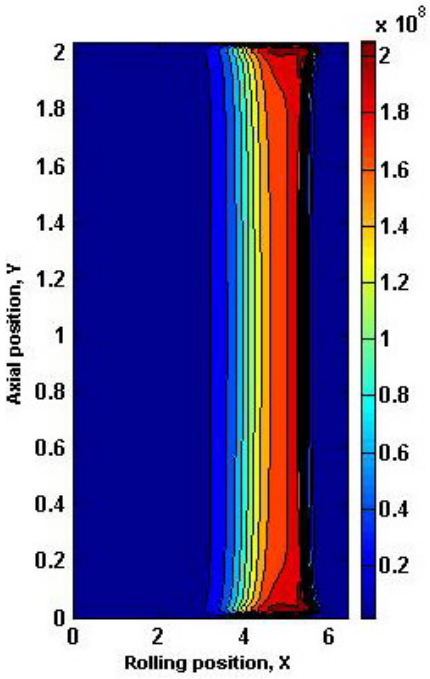
شكل ١٢-ج و د- نمايش سه بعدي و كانتور فشار در شرايط بحراني(٥٥ درجه) پروفيل سيكلوئيدى



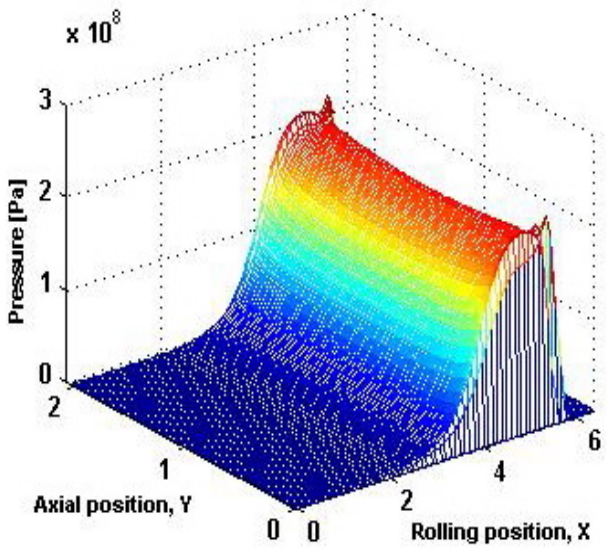
(ب)



(الف)



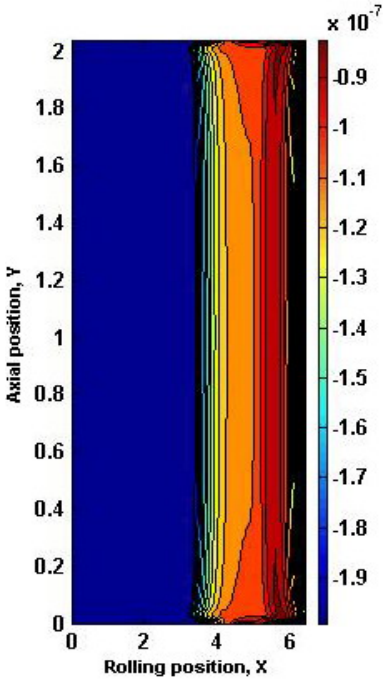
(د)



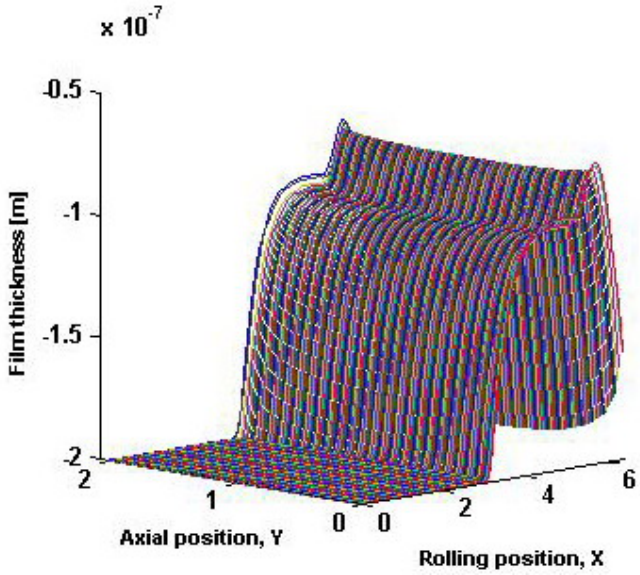
(ج)

شکل ۱۳-الف و ب- نمایش سه بعدي و کانتور ضخامت فیلم در شرایط بحراني(۷۸ درجه) پروفیل هارمونیکی

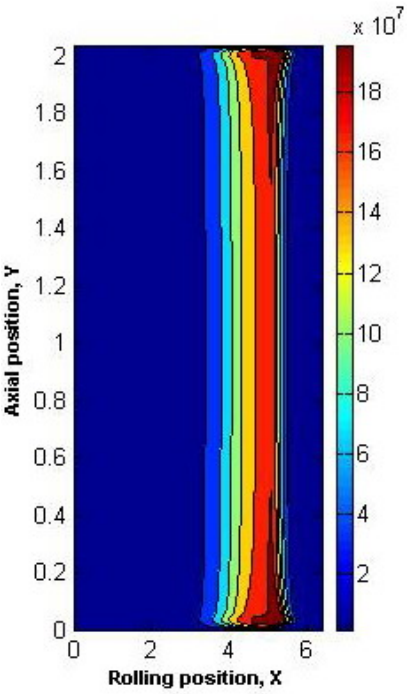
شکل ۱۳-ج و د- نمایش سه بعدي و کانتور فشار در شرایط بحراني(۷۸ درجه) پروفیل هارمونیکی



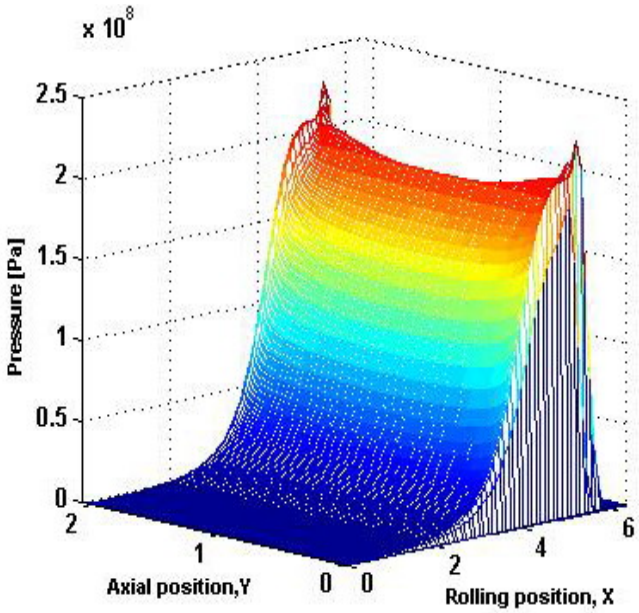
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شكل ١٤-الف و ب- نمايش سه بعدي و كانتور ضخامت فيلم در شرايط بحراني(٦٧ درجه) پروفيل درجه هشتم

شكل ١٤-ج و د- نمايش سه بعدي و كانتور فشار در شرايط بحراني (٦٧ درجه) پروفيل درجه هشتم

Abstract

In this study the process of transient isothermal finite line elastohydrodynamics lubrication was simulated for a cam with cycloid, harmonic and 8^{th}-degree polynomial geometrical profiles in the same conditions. Reynolds' and elastic equations were solved simultaneously by making use of finite difference solution with Newton-Raphson method. It was found that harmonic profile at nose area and cycloid profile at four different points in a one cycle have critical conditions because of lubricant film shortage and wear problems. Therefore for a same dynamical conditions, 8^{th}-degree polynomial profile, has proper situation for lubrication.