

تعیین نوسان‌های گشتاور اینرسی و سیالاتی و طراحی فلاپیول برای دیسک فیلتر کارخانه هماتیت مجتمع گل گهر

مهدی آخوندی‌زاده^{۱*}، میثم آتش‌افروز^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان

*مسئول مکاتبات: m.akhondizadeh@sirjantech.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

مخلوط کن
فلاپیول
نوسان گشتاور
مقاومت دوغاب
تحلیل دینامیکی

کوپلینگ دیسکی سیستم انتقال قدرت پاروی یک مخلوطکن در کارخانه هماتیت مجتمع گل گهر سیرجان در بازه‌های زمانی کوتاه مدت دچار ترک‌خوردگی می‌شود. گزینه‌های مختلفی می‌تواند عامل ایجاد این ترک باشد. یکی از دلایل می‌تواند تغییرهای بار در اثر نوسان‌های گشتاور ناشی از نیروهای اینرسی و مقاومت دوغاب باشد. در کار حاضر، با تحلیل دینامیکی، نمودارهای تغییر موقعیت، سرعت و شتاب پارو و عضوهای مکانیزم، در یک سیکل حرکت، نحوه تغییرات استخراج می‌گردد. نیروی ناشی از مقاومت دوغاب با مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلونت تعیین می‌شود. با استفاده از رابطه کار مجازی، گشتاور مصرفی مجموعه شامل مقاومت‌های اینرسی و سیالاتی در یک سیکل حرکت استخراج می‌گردد. نوسان‌های گشتاور در یک سیکل مشاهده می‌شود. برای متعادل کردن این نوسان‌ها، اینرسی مناسب برای فلاپیول محاسبه می‌شود و گشتاور مصرفی متعادل می‌گردد. هندسه مناسب در قالب یک چرخ استاندارد در نرم‌افزار سالیدورکس طراحی و اینرسی مطلوب ایجاد می‌شود و به عنوان فلاپیول پیشنهاد می‌گردد. جهت برآورد تنش، فلاپیول در نرم‌افزار انسیس تحلیل دینامیکی می‌شود تا از استحکام آن اطمینان حاصل شود.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۳۱

۱ مقدمه

و اسرئوآستاف [۱۲] اثر پارامترهای هندسی بر عملکرد چرخ ذخیره انرژی را بررسی کردند. آنها پروفیل مناسب جهت فلاپیول را انتخاب کردند که کمترین تاثیر بار را بر شفت و تجهیزات قدرت داشته و در عین حال بیشترین ذخیره انرژی را داشته باشد. هربست و گاتوزی [۱۳] سیستم ذخیره انرژی فلاپیول را برای سیستم انتقال قدرت کشتی بهبود دادند. کایلاسان و همکاران [۱۴] به کاهش هزینه یک فلاپیول با بهبود طراحی هندسی آن پرداختند. در سیستم انتقال قدرت دیسک فیلتر کارخانه هماتیت مجتمع گل گهر به علت وجود نیروهای غیریکنواخت دوغاب و نیروهای اینرسی بزرگ، گشتاور مصرفی یکنواخت نیست. این می‌تواند عامل ترک‌خوردگی زود هنگام کوپلینگ دیسکی مجموعه انتقال قدرت باشد. در کار حاضر، پس از تحلیل سینماتیکی و سینتیکی مکانیزم، نیروهای اینرسی استخراج می‌گردند و با محاسبه نیروهای مقاومت دوغاب، نوسان‌های گشتاور تعیین شده و فلاپیول مناسب پیشنهاد می‌گردد.

نوسان‌های گشتاور مصرفی یا توان ورودی در سیستم‌های انتقال قدرت، باعث اعمال بارها و تنش‌های متغیر به اعضای مکانیکی مجموعه می‌شود. این نوسان‌های بار، یکی از عوامل مخرب در تجهیزات انتقال قدرت ماشین آلات صنعتی هستند که موجب سایش دندان‌های گیربکس، آسیب به بوش‌های کوپلینگ و سایر قسمت‌ها می‌شود. گشتاور متغیر باید به طریقی به یکنواختی سوق داده شود تا از اثرات مخرب آن کاسته شود [۱، ۲]. طراحی فلاپیول ذخیره انرژی می‌تواند یک راه حل در یکنواخت کردن گشتاور و کاهش نوسان‌های آن باشد [۳، ۴]. فلاپیول بیشتر در یکنواخت کردن قدرت موتورهای احتراق داخلی مطرح است [۵، ۶]. اما در مواردی که گشتاور متغیر [۷] یا بار ضربه‌ای [۸، ۹] در تجهیزات اتفاق می‌افتد می‌تواند در متعادل کردن گشتاور و در نتیجه کاهش آسیب به قطعات بسیار مفید عمل کند. علاوه بر این، فلاپیول می‌تواند برای ذخیره انرژی استفاده شود و از هدر رفتن آن جلوگیری کند. اینگول و ماهور [۱۰] فلاپیولی برای ذخیره انرژی در دوچرخه طراحی کردند تا هنگام ترمز گرفتن انرژی را در آن ذخیره کرده و در موقع لازم جهت عامل محرک مصرف کند. انرژی ذخیره شده در فلاپیول می‌تواند برای حرکت‌پذیری بهتر روبات مورد استفاده قرار گیرد. سای و همکاران [۱۱] برای یک سیستم سه بعدی شبه ژيروسکوپ، فلاپیول ذخیره انرژی با استفاده از روابط دینامیکی ژيروسکوپ طراحی کردند. این طراحی برای حرکت‌پذیری مناسب‌تر سیستم روبات کمک کرد. کولشراشتا

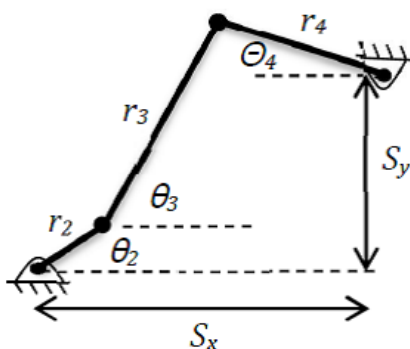
۲ بیان مسئله

کوپلینگ سیستم انتقال قدرت دیسک فیلتر کارخانه هماتیت مجتمع گل گهر در بازه‌های زمانی کوتاه آسیب می‌بیند. این آسیب بصورت ترک‌خوردگی در یکی از صفحه‌های کوپلینگ است که در شکل ۱ نشان داده شده است. از آنجا که این کوپلینگ در مسیر انتقال قدرت غیر یکنواخت به مصرف‌کننده، یعنی پاروی مخلوطکن دیسک فیلتر قرار دارد نوسان‌های گشتاور، که در هر

جدول ۱: پارامترهای عملکردی مجموعه مخلوط کن [۱۵]

سیال کاری دوغاب: ۴۰٪ ذرات جامد و ۶۰٪ آب	
توان موتور	۶/۲kW
سرعت عضو ۲	۳۰rpm
طول پارو	۹/۵m
شعاع پارو	۳/۹m
اندازه ذرات	< ۵۰۰µm
چگالی دوغاب	۲۵۸۰kg/m ^۳

جهت تحلیل دینامیکی، پارامترهای هندسی که بر حرکت تاثیرگذار است وارد محاسبات می شود. بر این اساس، نمونه واقعی با مکانیزم چهارمیله ای نشان داده شده در شکل ۳ معادل می شود.



شکل ۳: مکانیزم چهارمیله ای معادل با پاروی واقعی جهت تحلیل دینامیکی

بعضی از پارامترها در نقشه های ارائه شده توسط مرکز اسناد موجود نبوده و لذا با اندازه گیری در محل تعیین شده است. مقادیر پارامترهای هندسی مربوط به شکل ۳ در جدول ۲ داده شده است.

جدول ۲: پارامترهای هندسی مکانیزم محرک پارو (mm)

r_2	r_3	r_4	S_x	S_y
۸۰	۱۳۵۰	۱۲۵۰	۱۸۰۰	۱۲۰۰

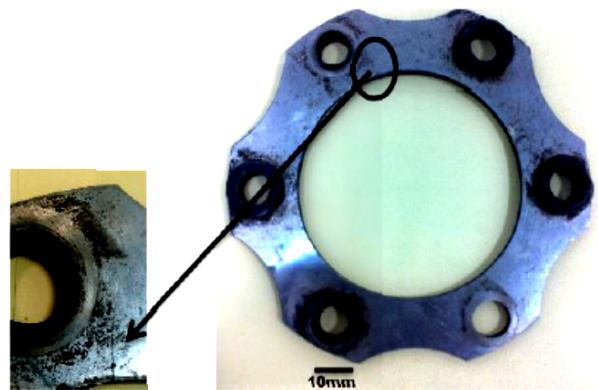
گشتاور اعمال شده به لنگ ۲ از سیستم انتقال قدرت، تامین کننده نیروهای اینرسی و همچنین مقاومت دوغاب است. هدف این است که این گشتاور بصورت تابعی از زمان در یک سیکل حرکت رفت و برگشتی پارو تعیین شود و اگر دارای نوسانات متعدد باشد، فلاپیول برای متعادل کردن گشتاور پیشنهاد گردد.

۳ روابط ریاضی حرکت

برای تعیین نیروهای مقاوم دوغاب در یک دوره حرکت پارو، دامنه حرکت به بازه های زاویه ای مشخص تقسیم می شود و در انتهای هر یک از آنها مقاومت دوغاب، به کمک مدل سازی در نرم افزار تعیین می شود. معادله کار مجازی بصورت زیر بین گشتاور ورودی و نیروهای اینرسی برقرار است.

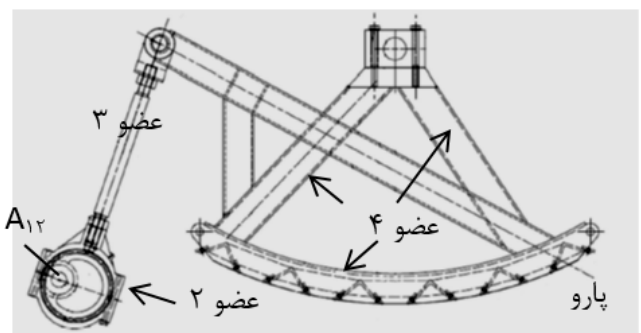
$$T_1 \delta \theta_1 - m_2 a_{G_2} \delta S_2 - I_3 \alpha_3 \delta \theta_3 - m_3 a_{G_3} \delta S_3 - I_4 \alpha_4 \delta \theta_4 - m_4 a_{G_4} \delta S_4 - T_s \delta \theta_4 = 0 \quad (1)$$

سیکل دارای بیشینه و کمینه های متعدد است، می تواند علت ترک خوردگی باشد. بعلت اینکه پارو با دوغاب در تماس است و دوغاب مورد نظر، بعلت عدم یکنواختی توزیع ذرات جامد، در نقاط مختلف، چگالی متفاوت دارد نیروهای اعمال شده به پارو یکنواخت نیستند و می توانند با شوک هایی که ایجاد می کنند موجب آسیب شوند. برای آنکه این غیر یکنواختی بار متعادل شده و گشتاور مصرفی نوسان کمتری داشته باشد، طراحی فلاپیول می تواند یک راه حل مناسب باشد.



شکل ۱: کولپینگ و بزرگنمایی ترک ایجاد شده در آن

نقشه پاروی متحرک و مکانیزم راننده آن در نمای دوبعدی در شکل ۲ نشان داده شده است. لنگ شماره ۲، یک رینگ است که مرکز دوران آن (A_{12}) بر مرکز هندسی اش منطبق نیست و حرکت این عضو، محرک کل مکانیزم می باشد. بعلت فاصله ای که مرکز هندسی این لنگ با لولای آن دارد دوران آن موجب انتقال و دوران عضو ۳ می شود. عضو شماره ۳ یک شفت است که یک انتهای آن دارای حلقه ای است که عضو ۲ را احاطه می کند و انتهای دیگر آن به عضو ۴، در نقطه A_{34} لولا شده است. عضو ۴ همان هم زن یا پاروی مسئله مورد نظر است که از چند تیر بهم جوش داده شده که به یک تیر منحنی جوش داده شده اند تشکیل شده و یک نقطه از آن لولای ثابت (A_{14}) و نقطه دیگری از آن به عضو ۳ لولا شده است. بر این اساس، دوران عضو ۲ موجب انتقال و دوران عضو ۳ شده و نهایتا موجب نوسان زاویه ای با دامنه کم عضو ۴ می شود که دوغاب را هم می زند. کولپینگ مورد بحث مساله حاضر، بین گیربکس و لنگ ۲ قرار دارد و توان را از گیربکس به عضو ۲ منتقل می کند.



شکل ۲: نقشه پارو [۱۵]

پارامترهای عملکردی مجموعه مخلوط کن در جدول ۱ داده شده است.

و یا شکل دیگر رابطه کار مجازی: [۱۶]

$$T_2 \omega_2 - m_2 a_{G_2} V_2 - I_2 \alpha_2 \omega_2 - m_3 a_{G_3} V_3 - I_3 \alpha_3 \omega_3 - m_4 a_{G_4} V_4 - T_5 \omega_4 = 0 \quad (2)$$

که در آن حروف پررنگ یک پارامتر به معنای بردار بودن آن پارامتر است. در این روابط، T_2 گشتاور ورودی از موتور به عضو ۲، m_i جرم اعضا، I_i اینرسی جرمی اعضا حول محور عمود بر صفحه، ω_i سرعت زاویه‌ای اعضا، α_i شتاب زاویه‌ای اعضا، a_{G_i} شتاب مرکز جرم اعضا، V_i سرعت مرکز جرم اعضا، δS_i دوران مجازی، δS_i جابجایی مجازی مرکز جرم اعضا و T_5 گشتاور اعمالی از دوغاب بر پارو است. جهت تعیین شتاب و سرعت اعضا رابطه مطلق بین پارامترها در این سیستم یک درجه آزادی نوشته می‌شوند.

$$r_2 \sin \theta_2 + r_3 \sin \theta_3 - r_4 \sin \theta_4 = S_y \quad (3)$$

$$r_2 \cos \theta_2 + r_3 \cos \theta_3 - r_4 \cos \theta_4 = S_x \quad (4)$$

و با مشتق‌گیری از رابطه‌های موقعیت، رابطه‌های مربوط به سرعت و شتاب نیز استخراج می‌گردند. سرعت زاویه‌ای عضو راننده ۲ ثابت بوده و شتاب زاویه‌ای آن صفر می‌باشد.

$$r_2 \omega_2 \cos \theta_2 + r_3 \omega_3 \cos \theta_3 - r_4 \omega_4 \cos \theta_4 = 0 \quad (5)$$

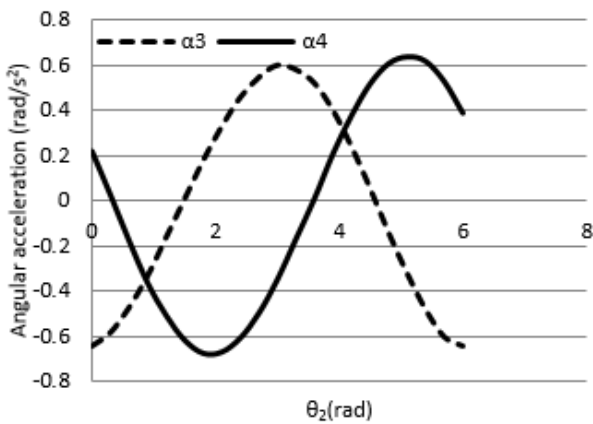
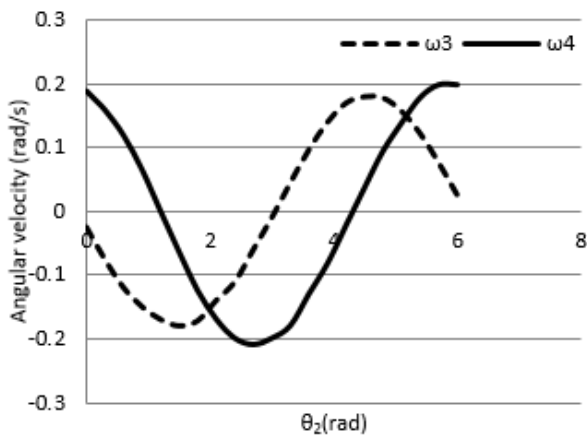
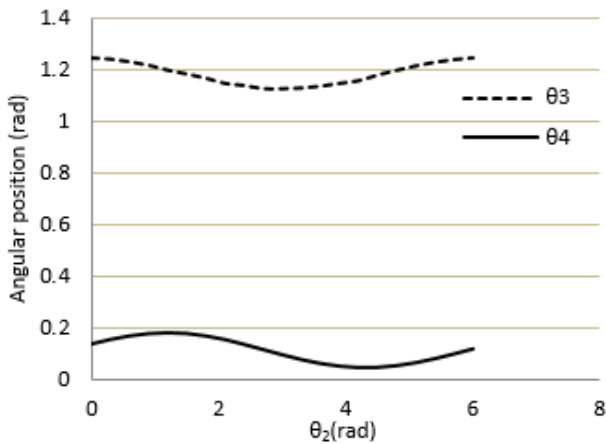
$$r_2 \omega_2 \sin \theta_2 + r_3 \omega_3 \sin \theta_3 - r_4 \omega_4 \sin \theta_4 = 0 \quad (6)$$

$$-r_2 \omega_2^2 \sin \theta_2 - r_3 \omega_3^2 \sin \theta_3 + r_3 \alpha_3 \cos \theta_3 + r_4 \omega_4^2 \sin \theta_4 - r_4 \alpha_4 \cos \theta_4 = 0 \quad (7)$$

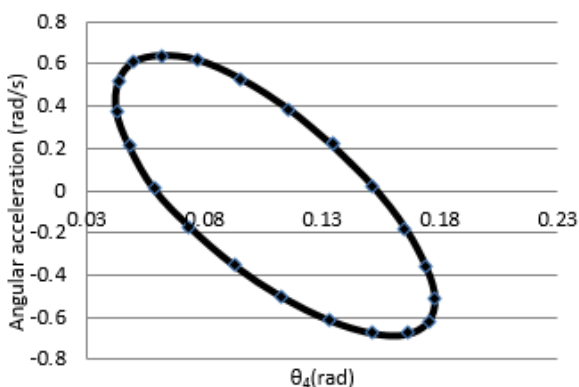
$$r_2 \omega_2^2 \cos \theta_2 + r_3 \omega_3^2 \cos \theta_3 + r_3 \alpha_3 \sin \theta_3 + r_4 \omega_4^2 \cos \theta_4 + r_4 \alpha_4 \sin \theta_4 = 0 \quad (8)$$

حل صریح بصورت روابط تابع زمان برای پارامترهای مجهول به علت وجود توابع مثلثاتی، نتایج قابل اعتمادی بدست نمی‌دهد و بویژه رابطه‌های سرعت و شتاب را پیچیده می‌کند. با در نظر گرفتن مقدارهای گسسته برای θ_2 ، سایر مجهول‌ها نیز متناظر با آن بدست می‌آید. نمودارهای مربوط به تغییر موقعیت، سرعت و شتاب زاویه‌ای اعضا ۳ و ۴، بازنه سرعت زاویه‌ای ثابت $\omega_2 = 30 \text{ rpm}$ در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

نمودار موقعیت زاویه‌ای عضو ۴ نشان می‌دهد که میزان جابجایی زاویه‌ای این عضو زیاد نیست. درواقع محدودیت‌هایی برای دامنه زیاد این عضو وجود دارد. یکی از این محدودیت‌ها این است که با توجه به جرم زیاد این عضو، دامنه زیاد با شتاب زاویه‌ای بزرگ همراه خواهد شد و نیروی زیادی در یک سیکل، برای تغییر سرعت این عضو مصرف خواهد شد. این شتاب‌های زیاد، همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است در پایان نیم‌سیکل‌های حرکت عضو ۴ ایجاد خواهند شد.

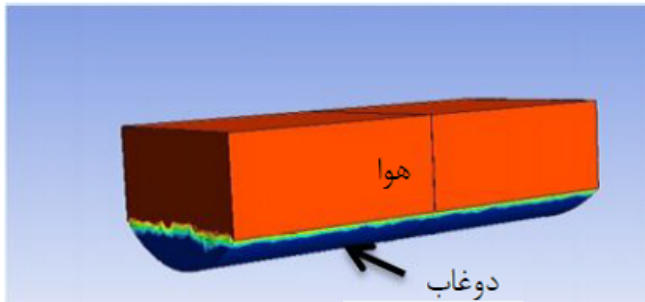


شکل ۴: تغییر موقعیت، سرعت و شتاب زاویه‌ای اعضا ۳ و ۴ در یک سیکل



شکل ۵: تغییر شتاب زاویه‌ای عضو ۴ نسبت به موقعیت زاویه‌ای این عضو

مدل سازی، حجم کنترلی مطابق شکل ۸ در نظر گرفته می شود که در قسمت بالای آن هوا و در قسمت پایین دوغاب تعریف می شود. قسمت پایین مطابق مسئله واقعی، منحنی شکل مدل شده است.



شکل ۸: حجم کنترل و فازهای مسئله

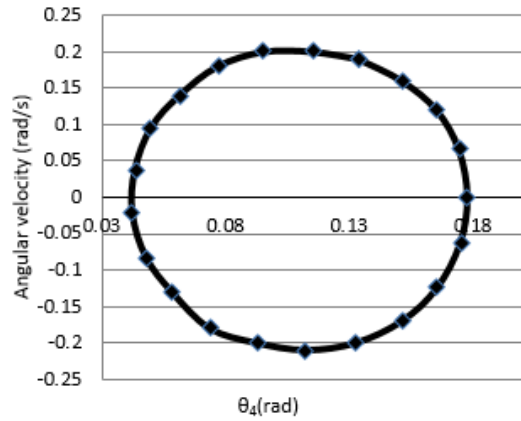
از حل جریان گذرا، مدل چند فازی اولری $\epsilon - K$ برای شبیه سازی این محیط متحرک و غیر پایا استفاده می شود. برای بیان حرکت پارو در دوغاب کد لازم در نرم افزار نوشته شده است. فشار روی سطح های عمود بر جریان پارو و همچنین تنش برشی روی صفحات مماس بر جریان استخراج می گردد و با معلوم بودن مساحت سطح ها، نیروی اعمال شده بر پارو در لحظه های مختلف حرکت و همچنین گشتاور اعمال شده حول لولای ثابت پارو (عضو ۴) محاسبه می گردد. نمونه ای از توزیع فشار روی سطح ها در لحظه ای از حرکت پارو، در شکل ۹ نشان داده شده است. منظور از τ در این شکل، مدت زمان یک سیکل و یا همان دوره تناوب حرکت است. گشتاور حاصل از نیروی دوغاب در هر لحظه از حرکت با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$T_s = \sum P_{ni} R_i dA_{ni} + P_{si} R_i dA_{si} \quad (9)$$

که در آن P_{si} و P_{ni} بترتیب فشار عمود بر صفحات عمود و فشار مماسی بر صفحات مماس بر جریان دوغاب، R_i بازوی گشتاور نسبت به مرکز دوران پارو و dA_{si} و dA_{ni} بترتیب مساحت المان سطح های عمود بر جریان و مماس بر جریان است. این جمع بندی روی کل مساحت پارو انجام می شود. گشتاور لازم برای حرکت پارو، بر حسب موقعیت زاویه ای عضو ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در یک مسیر، گشتاور نیروی وزن سازه به عنوان گشتاور موافق عمل کرده و کمک کننده است که باعث شده مقادیر منفی در نمودار ظاهر گردد. گشتاور ورودی موتور با احتساب مقاومت دوغاب با رابطه زیر قابل استخراج است.

$$T_T = T_1 + T_s \frac{\omega_4}{\omega_2} \quad (10)$$

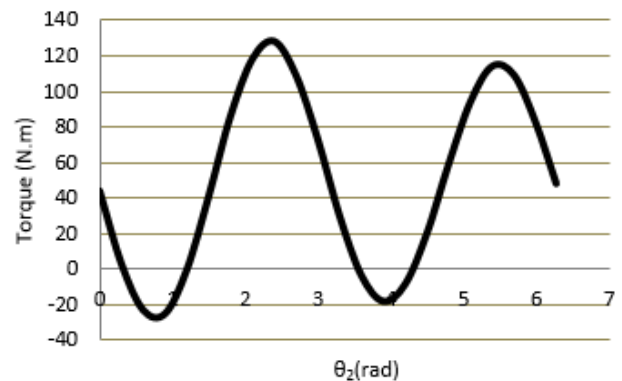
که در آن T_1 مقاومت اینرسی و T_s مقاومت دوغاب شامل تاثیر وزن پارو است. نمودار گشتاور ورودی با احتساب مقاومت دوغاب، بر حسب تغییرات موقعیت زاویه ای عضو ۲ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که پیش بینی می شد، گشتاور متغیر در یک سیکل حرکت پارو مشاهده می شود و طراحی فلاپویل می تواند این تغییرها را کاهش دهد.



شکل ۶: تغییر سرعت زاویه ای عضو ۴ نسبت به موقعیت زاویه ای این عضو

جهت محاسبه گشتاور از معادله ۲ ضرب نقطه ای بردار سرعت و شتاب خطی مرکز جرم نیاز است. برای سرعت و شتاب مرکز جرم عضوهای ۲، ۳ و ۴ با استفاده از روابط نسبی، بصورت مولفه های افقی و قائم، رابطه هایی بر حسب سرعت و شتاب زاویه ای عضوها، بصورت مولفه های افقی و قائم، استخراج می گردد. مقادیر عددی آنها در بازه های $0 \leq \theta \leq \pi$ از موقعیت عضو ۲ تعیین می شود. معادله ۲ مربوط به کار مجازی با ضرب مولفه های شتاب خطی مرکز جرم ها در سرعت زاویه ای مرکز جرم و ضرب شتاب های زاویه ای در سرعت های زاویه ای بصورت عددی محاسبه می شود.

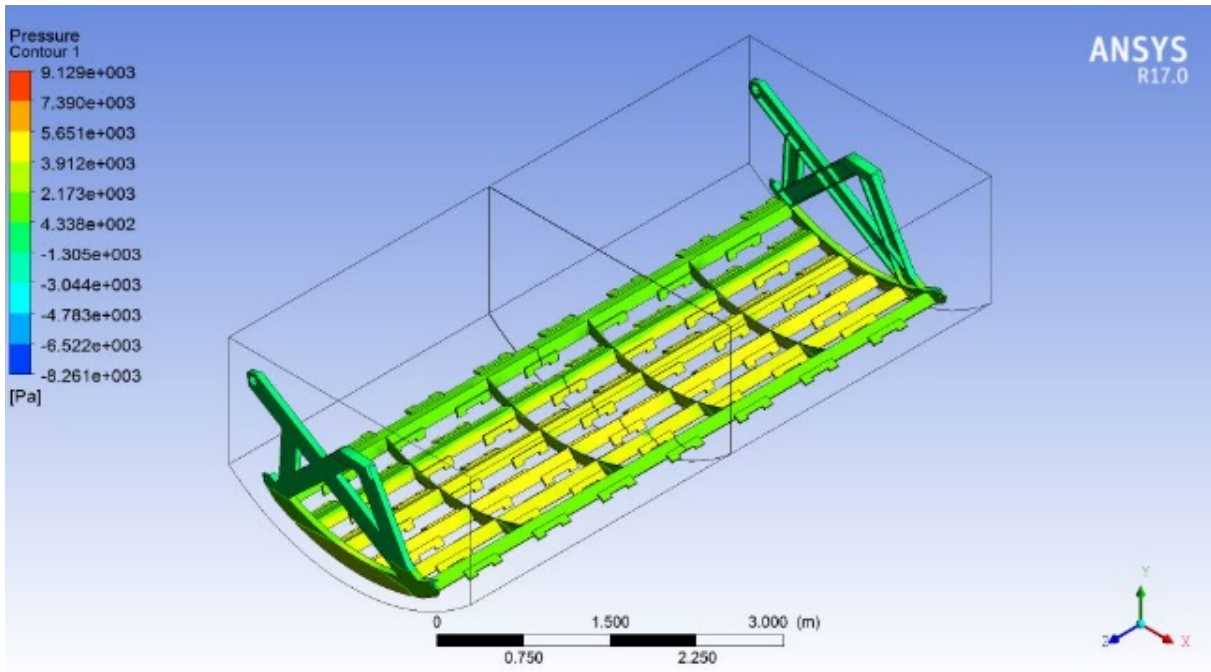
مقادیر جرم و اینرسی با مدل سازی در نرم افزار سالیدورکس، براساس اندازه برداری دقیق از جزییات در محل کارخانه استخراج می گردد. جرم عضوهای ۲ و ۳ و ۴ بترتیب 48 kg ، 91 kg و 1255 kg و اینرسی عضوهای ۲ و ۳ حول لولای ثابت خود بترتیب 2 kg.m^2 و 1855 kg.m^2 و اینرسی عضو ۴ حول مرکز جرم $4/37 \text{ kg.m}^2$ بدست می آید. مقادیر بدست آمده در رابطه کار مجازی معادله ۲ قرار می گیرد و در 20° لحظه از حرکت، که یک سیکل کامل را پوشش می دهد، گشتاور مورد نیاز محاسبه می گردد. شکل ۷ نمودار تغییرات گشتاور لازم برای تامین نیروهای اینرسی، بدون احتساب گشتاور ناشی از دوغاب، را نشان می دهد.



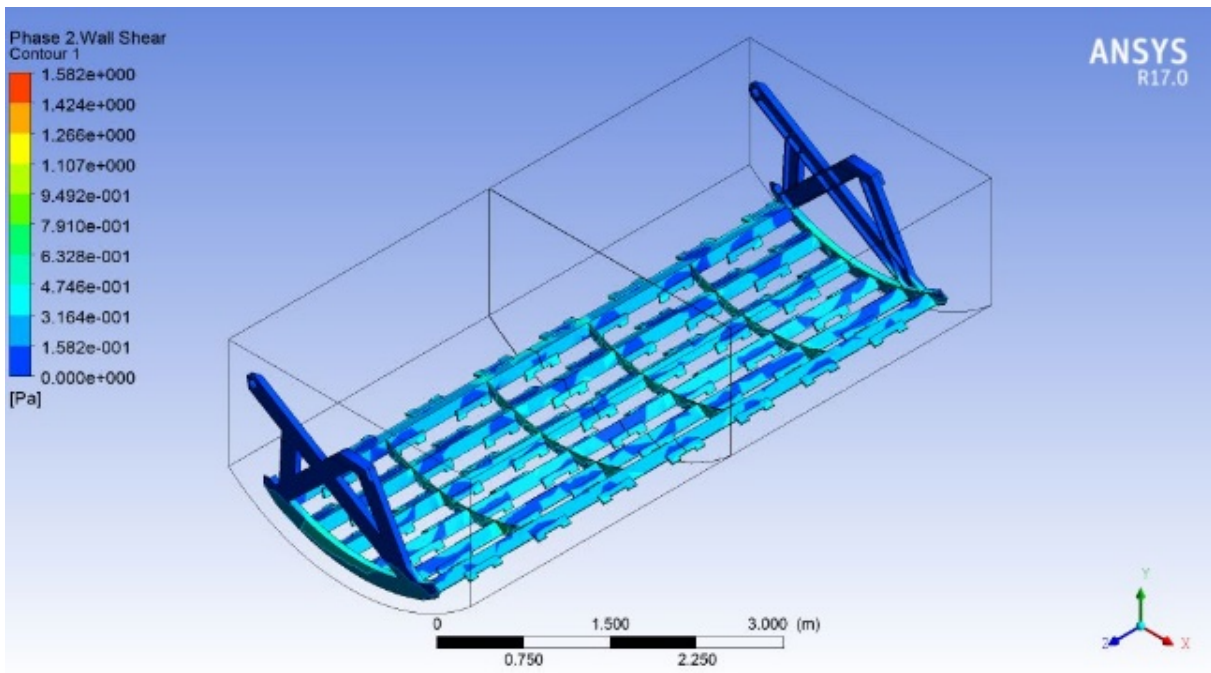
شکل ۷: تغییرات گشتاور لازم برای غلبه بر نیروهای اینرسی در یک سیکل حرکت

۴ تعیین گشتاور لازم برای مخلوط کردن دوغاب

نیروی مهم در مکانیزم، نیروی مقاوم دوغاب در برابر حرکت پاروی مخلوطکن است. برای تعیین این نیرو، پارو در نرم افزار فلونت مدل می شود. در این



شکل ۹: توزیع فشار روی پارو در $t = \tau/4$



شکل ۱۰: توزیع تنش برشی روی پارو در $t = \tau/4$

گشتاور مصرفی، با تغییر آمپر ورودی جبران می‌شود و بنابراین تغییر سرعت محسوسی در مجموعه رخ نمی‌دهد و سرعت تقریباً ثابت است. حال اگر فرض شود که گشتاور ورودی ثابت باشد در صورت تغییرات گشتاور مصرفی تغییرات سرعت در مکانیزم رخ می‌دهد. فلاپویل بر این اساس طراحی می‌گردد که اینرسی آن قرار است در بازه‌ای از یک سیکل که افزایش بار رخ می‌دهد به کمک گشتاور ورودی آمده و تغییرات آن را جبران کند و مانع تغییر سرعت محسوس شود. بر این اساس، با رابطه زیر می‌توان اینرسی مناسب فلاپویل را

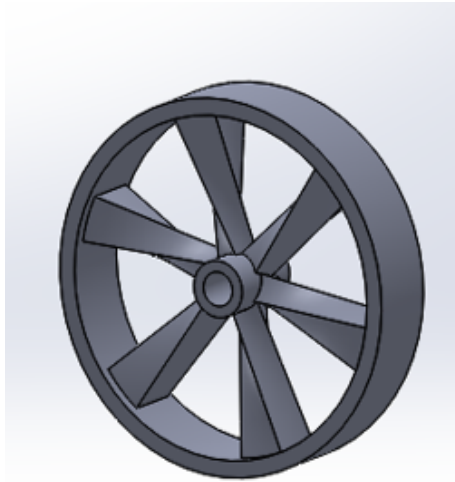
۵ تعیین اینرسی فلاپویل

جهت تعیین اینرسی مناسب فلاپویل برای یکنواخت کردن گشتاور، باید ابتدا گشتاور مصرفی میانگین محاسبه گردد. [۱۶]

$$T_{avg} = \frac{\int_0^{2\pi} T_r d\theta}{2\pi} \quad (11)$$

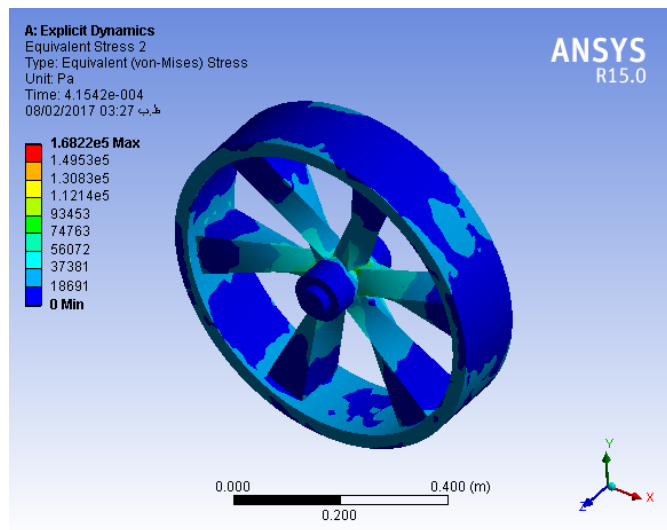
برای مکانیزم کار حاضر گشتاور میانگین حدود $42/27 \text{ Nm}$ بدست می‌آید. در سیستم انتقال قدرتی که از موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود، تغییر

برای مکانیزم حاضر حدود 10 kgm^2 بدست می‌آید که در قالب چرخ به قطر 700 mm و ضخامت 150 mm که در شکل ۱۳ نشان داده شده است طراحی می‌گردد [۷].



شکل ۱۳: فلاپویل پیشنهادی برای مکانیزم پارو

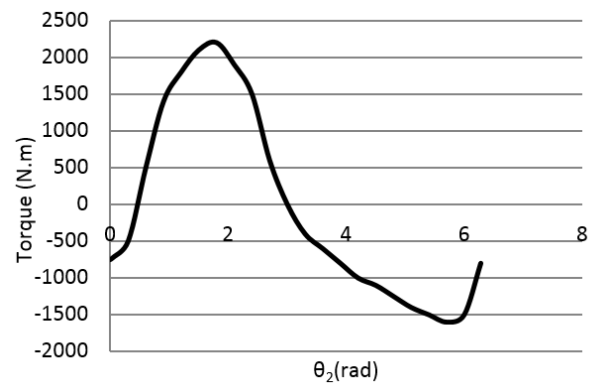
جهت اطمینان از مقاومت فلاپویل، مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس در محیط دینامیک صریح^۱ انجام شده و نتایج تحلیل تنش چرخ در شکل (۱۴) نشان داده شده است. تنش ماکزیمم حدود 16 MPa است که بسیار کمتر از حداقل مقاومت فولادهای معمولی برای ساخت فلاپویل می‌باشد.



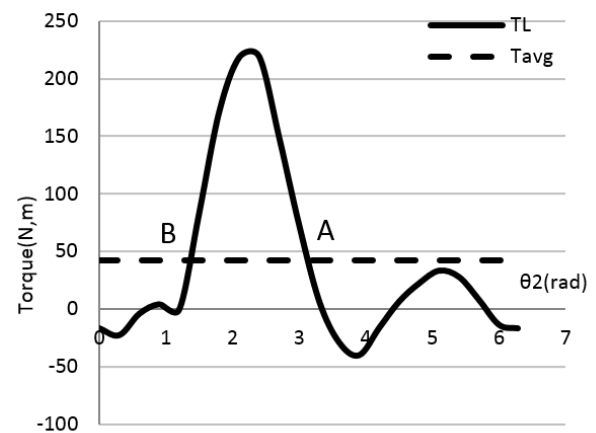
شکل ۱۴: تحلیل تنش فلاپویل پیشنهادی

۶ نتیجه‌گیری

گشتاور متغیر مصرف کننده موجب تغییر تنش در قطعات و بروز آسیب خستگی در آنها می‌شود. پاروی مخلوطکن دیسک فیلتر در کارخانه هماتیت، بعلت ماهیت سیالاتی دوغابی که مخلوط می‌شود، بعنوان مصرف کننده‌ای با گشتاور متغیر است که بارهای متغیر بر اعضاء سیستم انتقال قدرت اعمال می‌کند. با تحلیل دینامیکی، گشتاور ناشی از مقاومت اینرسی قطعات استخراج شد و تغییرات متعددی در گشتاور مشاهده شد. با مدل‌سازی در



شکل ۱۱: گشتاور ناشی از مقاومت دوغاب و وزن پارو



شکل ۱۲: گشتاور مصرفی مکانیزم پاروی مخلوطکن

محاسبه کرد [۱۶]

$$I_f = \frac{\int_{\theta_{21}}^{\theta_{22}} (T_{avg} - T_f) d\theta}{k\omega^2} \quad (12)$$

که در آن I_f اینرسی لازم برای فلاپویل، ω سرعت زاویه‌ای عضو ۲ که فلاپویل روی آن نصب می‌شود و k نسبت تغییر سرعت است. θ_{21} و θ_{22} بترتیب موقعیت‌های زاویه‌ای عضو ۲ هستند که بازاء آنها، در صورت گشتاور ورودی ثابت، چون گشتاور مصرفی متغیر است، عضو ۲ کمترین و بیشترین سرعت زاویه‌ای را خواهد داشت [۷]. نسبت تغییر سرعت k با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$k = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega} \quad (13)$$

برای مکانیزم حاضر، از نمودار تغییرات گشتاور بار شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که در موقعیت A پایان بازه زمانی است که مجموعه بیشترین گشتاور مصرفی را داشته و لذا با فرض گشتاور ورودی ثابت، در این موقعیت، عضو ۲ کمترین سرعت را دارد و بنابراین $\theta_{21} = 3/1 \text{ rad}$. در موقعیت B پایان بازه زمانی است که گشتاور مورد نیاز مجموعه کمتر از گشتاور میانگین بوده و لذا با فرض گشتاور ورودی ثابت، عضو ۲، بیشترین سرعت را در این موقعیت دارد. بنابراین $\theta_{22} = 1/3 \text{ rad}$. بر این اساس، در سرعت زاویه‌ای $\omega = 3/14 \text{ rad/s}$ برای آنکه ضریب نوسان سرعت $k = 25\%$ تامین شود اینرسی لازم فلاپویل

¹Explicit Dynamics