ششمین همایش بین‌المللی افق های نویـن در
مهندسی برق، کامپیوتـر و مکانیک
6th International Conference on the New Horizons in
Electrical Engineering, Computer and Mechanical
www.mhconf.ir

# آنالیز خرابی یاتاقان ها و تاثیر آن بر روی تنش های وارده بر غلتک های رینگ کوره دوار به روش المان محدود (نرم افزار آباکوس)

مهندس داود بیگدلی ، مهندس سعید عبدی

شرکت طراحی صنعتی فیدار، زنجان bigdeli.d@gmail.com

شرکت طراحی صنعتی فیدار، زنجان saeed_abdi91@yahoo.com

## چکیده

کوره های دوار در بسیاری از فرآیندها که شامل فرآوری مواد جامد هستند مورد استفاده قرار می گیرند. از قبیل : خشک کردن، سوزاندن، مخلوط کردن، گرم کردن، خنک کردن، رطوبت دهی ، کاهش، بستن و سفت شدن و واکنشهای گاز- جامد .معمول ترین و مهمترین کاربرد صنعتی کوره های دوار در تولید سیمان است. تمام تولیدکنندگان عمده از کوره دوار به عنوان تجهیزات مورد نظر استفاده می کنند. کوره های دوار از اصلی ترین واحدهای عملیاتی در صنعت پخت و فرآوری هستند. از آنها می توان برای سه منظور استفاده کرد: گرم کردن، واکنش دادن و خشک کردن مواد جامد، و در بسیاری از موارد، برای دستیابی به ترکیبی از این اهداف مورد استفاده قرار می گیرند. در طراحی کوره ها، چهار جنبه مهم وجود دارد که باید از نظر مهندسی فرآیند، آنها را در نظر گرفت که عبارتند از انتقال گرما، جریان مواد از طریق کوره دوار، انتقال و واکنش جرم جامد-گاز . اما آماده به کار نگه داشتن تجهیز مهمی همچون کوره در کارخانجاتی که با این نوع دستگاه سروکار دارند نیز بسیار مهم است. یکی از نقاط مهم کوره های دوار غلتک های کوره هستند که متاسفانه کمتر به این موضوع توجه شده است. در تحقیق پیش رو تنشهای تماسی بین رینگ کوره و غلتک ها به روش کامپیوتری و با نرم افزار آباکوس انجام شده است. نتایج تحقیق نشان میدهد روش های نرم افزاری برای تشخیص خرابی های بالقوه در سیستم غلتک و رینگ کوره و بهینه سازی آنها در طراحی های آتی بسیار کاربردی خواهند بود.

## واژه‌های کلیدی

آنالیز تنش، شافت ، غلتک ، کوره های دوار سیمان، نرم افزار آباکوس

**۱. متن مقاله**

## بیان مسئله

تولید سیمان یک فرآیند به شدت انرژی بر می باشد و از کوره دوار به عنوان مهمترین بخش فرآیند و قلب آن یاد می شود. در بیشتر کاربردهای صنعتی، هدف از کوره دوار کمک به انجام واکنشهایی خاص در بستر کوره است که به دلایل سنتیکی و یا ترمودینامیکی غالبا به دماهای بالا در بستر نیاز دارند. کوره دوار به عنوان یک راکتور و با توجه به ماهیت پیچیده ی واکنشهای فیزیکی و شیمیایی در آن و نیز پارامترهای متعدد مربوط به کیفیت، معادلات دینامیکی پیچیده ای دارد که درک آنها نیاز به شناخت دقیق پدیده های انتقال، به ویژه انتقال اندازه حرکت و انتقال حرارت دارد. عملکرد بهینه ی کوره امکان نگهداشت بخشی از انرژی حرارتی را که به طورعادی در فرآیند تلف می گردد را فراهم می سازد. به عبارتی با در دست داشتن یک مدل جامع از فرآیند می توان عملکرد بهتری از کوره در راستای کاهش هزینه های تولید ایجاد نمود.

شکل ۱- نمای کلی دپارتمان پخت کارخانه سیمان زنجان

صنعت سیمان به عنوان یک صنعت انرژی بر محسوب می شود. یکی از راهکارهای تعیین گلوگاه های هدرده مصرف انرژی در صنعت سیمان انجام موازنه انرژی می باشد و یکی از مهم ترین بخش هایی که در موازنه انرژی به عنوان انرژی خروجی از فرایند لحاظ شده و به نوعی تلف می گردد، حرارتی است که از بدنه کوره دوار سیمان به صورت انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی خارج می شود.

استفاده از کوره های دوار دارای سابقه طولانی در صنایع کلاسیک هستند. با توجه به مواد مختلف می توان به کوره سیمانی، کوره شیمیایی متالورژی و کوره آهک تقسیم کرد. عملکرد کوره های دوار با توجه به پارامترهای مختلف مورد مطالعه گسترده و طبقه بندی

قرار گرفته است. با توجه به ظرفیت و انتقال حرارت بالا در کوره دوار[1]، از این کوره ها در صنعت سیمان بسیار استفاده می شود. به طور کلی کوره های دوار سیمان با توجه به نوع مواد ورودی (و درصد رطوبت درون مواد) به سه نوع کوره دوار تر، کوره دوار کوتاه، خشک و کوره دوار طولانی خشک دسته بندی می شود. به طور گسترده در صنعت سیمان برای تبدیل خوراک خام به کلینکر سیمان به کار می روند. امروزه بهینه سازی کوره ها در زمره ی اولویت های مهندسی قرار گرفته است که می تواند تاثیرات مهمی در این صنعت بگذارد. این امر زمانی میسر است که شناختی دقیق از پدیده های که درون کوره رخ می دهد وجود داشته باشد و بتوان ارتباط بین متغیرهای سیستم را بیان نمود، بهبود این روند نیاز به درک بهتری از تعامل میان فرآیند های مهم درون کوره های دوار دارد. با این حال به علت شرایط خاص محیطی کوره، مانع از مشاهده مستقیم یا اندازه گیری است.

کوره های دوار توسط مجموعه ای به نام شافت و غلتک، تجهیزات پینیون، گیربکس و موتور کمکی در شرایط کاری سنگین در معرض فشارهای زیاد قرار دارد. سیستم چرخاننده کوره کمی به موقعیت افقی متمایل است، متشکل از یک دنده بزرگ دو تکه که دور کوره سوار شده و یک عدد پینیون می باشند. دنده بزرگ به وسیله پینیون چرخانده می شود که از طریق سیستم گوپلینگ، به گیربکس های اصلی و موتور کوره متصل می گردند. همچنین برای مواقع اضطراری گرم کردن و یا سرد کردن کوره که نیاز به چرخاندن کوره با دور کم است، امکان اتصال این پینیون به گیربکس و موتور کمکی وجود دارد. ماده از یک سر وارد کوره می شود و به انتهای پایین هدایت می شود. با مخلوط کردن مداوم و تأمین هوای گرم، واکنش شیمیایی مورد نظر در انتهای پایین تکمیل می شود. کوره دارای روکش آجری برای محافظت از پوسته آهنی بیرونی در برابر درجه حرارت های بالا است. رینگ یک حلقه استوانه ای است که از پوسته کوره پشتیبانی می کند.

معیوب شدن مجموعه غلتک باعث ایجاد مشکلات فراوانی از جمله نوسانات فشاری و حرارتی که باعث عدم پایداری حرارت درون کوره و در نتیجه منجر به پایین رفتن تناژ تولیدی و در بسیاری موارد باعث گرفتگی و توقف کلی خط می گردد. با توجه به اینکه غلتک پشتیبان در معرض دوران و تنش خستگی و حرارتی است در بسیاری از موارد دچار دفورمگی می شود و عملکرد خود را از دست می دهد. عملکرد فنی تا حد زیادی کیفیت، خروجی و هزینه محصول را تعیین می کند.

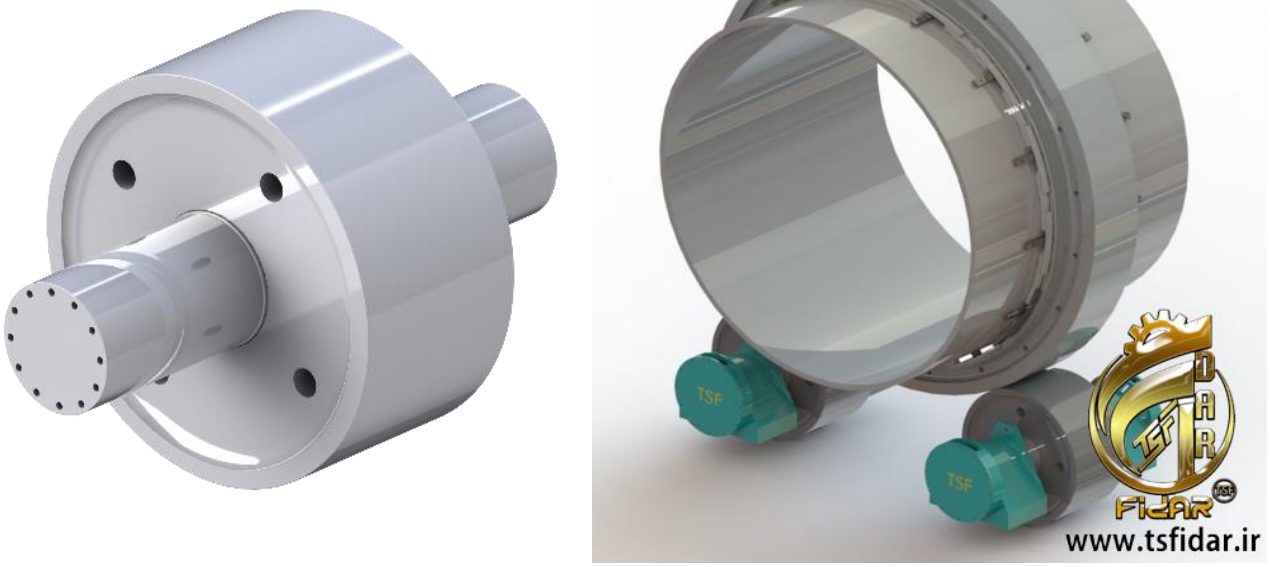
در این پروژه سعی بر این است کـه پـس از ارائـه شـناخت کلـی از خـط تولیـد سـیمان دو فـاکتور بسـیار مهـم یعنـی عوامـل مـوثر بـر بهبـود چـرخش کـوره دوار و شـافت غلتـک پشـتیبان ارزیـابی شـده؛ کـه در شـرایط سـنگین کـاری در معـرض فشـارهای زیـاد قـرار دارد. پـس از شـناخت موضـوعات و مسـائل مطـرح شـده بـه بررسـی مشـکلات موجـود پرداختـه و در آخـر بـا آنـالیز تـنش کـوره بـا استفاده از المان محدود راه حل هایی صـحیح جهـت برخـورد بـا ایـن گونـه مسـائل ارائـه شـود تـا بـدین وسـیله هـدف اصـلی از ارائـه این پروژه محقق شود.

با توجه به اهمیت یاتاقان های غلتشی به عنوان یکی از اجزاء پرمصرف در ماشین آلات صنعتی, لازم است یک فرآیند وضعیت سنجی و تشخیص عیب مناسب برای جلوگیری از کارکرد بد و خرابی این اجزا در هنگام کار ارائه شود. با توجه به اهمیت ماشین های دوار در صنایع مختلف، توسعه روش هایی که پیشبینی عمر قطعات موجود در این تجهیزات را با قابلیت اطمینان بالایی انجام دهند، از اهمیت خاصی برخوردار است. در کوره ی دوار، تنش بر روی شافت یکی از دلایل عمده عدم کارکرد آن ها به شمار می رود. عیب یابی در اجزای مختلف غلتک موجب افزایش بهره وری و قابلیت اطمینان ماشین آلات صنعتی می شود. از اینرو مطالعات بیشتری جهت بررسی تحلیل تنش و آنالیز شافت و غلتک حائز اهمیت است.

---

[1] - Rotary Kiln

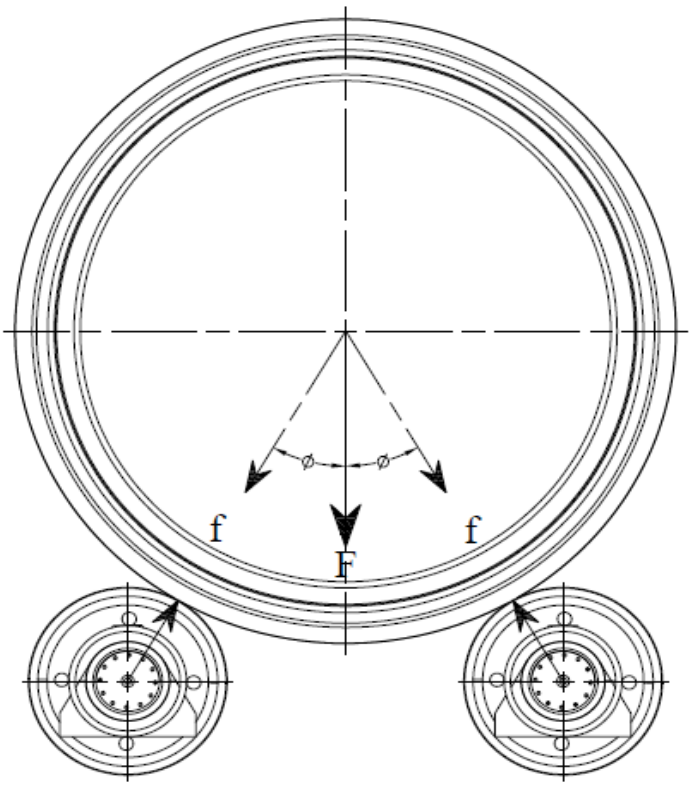
طی جستجوهای انجام شده و بررسی‌های صورت گرفته در مقالات مجلات علمی-پژوهشی و کنفرانس‌های داخلی و پایان نامه‌های کارشناسی ارشد و دکترا در حوزه علم مهندسی مکانیک ، نشان می‌دهد که موضوع " آنالیز تنش شافت و غلتک کوره های دوار سیمان " علی رغم سپری نمودن سالهای نسبتا طولانی از مطرح شدن آن در سطح جهان، نزد محققین و پژوهشگران کشور ما مغفول و مهجور مانده است و چندان به آن پرداخته نشده است. در حقیقت " آنالیز تنش شافت و غلتک کوره های دوار سیمان " موضوعی نسبتاً جدید در حوزه علم مهندسی مکانیک در کشورمان است که در کشورهای دیگر پژوهش‌های قوی‌تر و کارآمدتری در این حوزه انجام شده است.




شکل ۲- شل و غلتک کوره سیمان زنجان

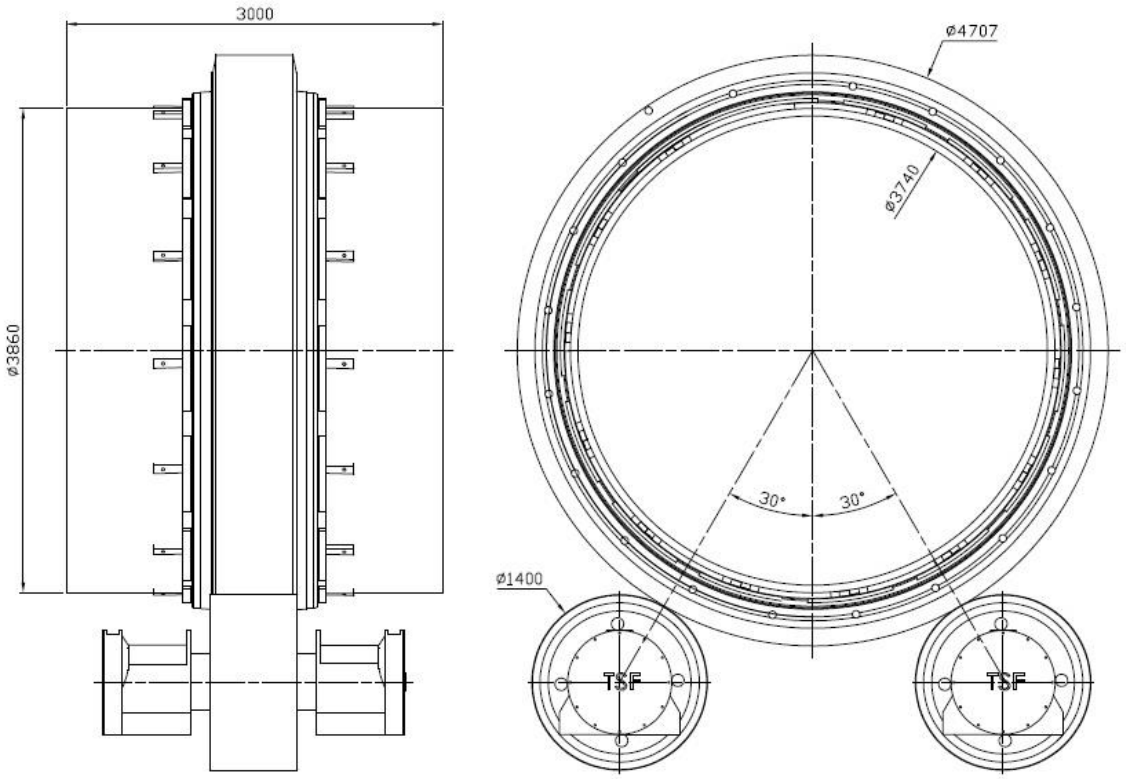
## روش تحقیق

در این مقاله سعی شده است با تحلیل تنش های تماسی بین رینگ کوره و غلتک ها، گزارش دقیقی در مورد خرابی های بالقوه در غلتک ها ارایه گردد. به این منظور بخشی از کوره سیمان زنجان مورد بررسی قرار گرفته است. جهت ساده سازی معادلات فرضیاتی در نظر گرفته شد که در زیر بیان می شود.




شکل ۳ - شمای کلی قرارگیری رینگ کوره و غلتک ها و نمایش نیروها

*نیروی وارد به غلتک ها از جانب شل و رینگ در طول نشان داده شده در تصویر شماره شکل ۴ به اندازه 3000mm ( وزن شل ، رینگ ، آجر نسوز و مواد داخل کوره ) در یک ایستگاه به مقدار ۵۵ تن محاسبه شده است.




شکل4 - شمای کلی قرارگیری رینگ کوره و غلتک ها و نمایش نیروها

* سطح تماس بین رینگ کوره و غلتک به ابعاد ۱۱ میلیمتر در ۶۰۰ میلیمتر فرض شده است.

با توجه به شکل بالا، معادلات مربوطه، فشار وارده به غلتک به ترتیب زیر میباشد.

$$F = f\cos\emptyset + f\cos\emptyset = 2f\cos\emptyset$$

$$F = m \times g$$

$$m \times g = 2f\cos\emptyset$$

$$f = \frac{m \times g}{2\cos\emptyset}$$

$$m = 55\,Ton = 55000\,kg$$

$$g = 9.8\,m/s^2$$

$$\emptyset = 30^\circ$$

$$f = \frac{55000 \times 9.8}{2 \times \cos 30^\circ} = 311191.8\,N$$

$$\omega = \frac{f}{A}$$

$$A = t \times h$$

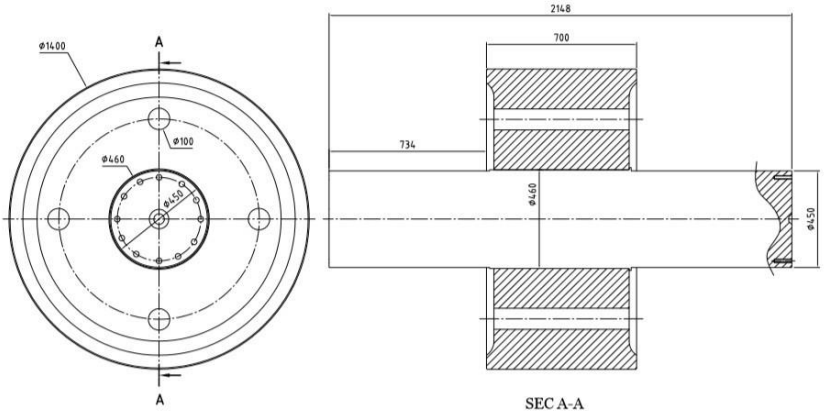
$$t = 11\,mm = 0.11\,m$$

$$h = 600\,mm = 0.6\,m$$

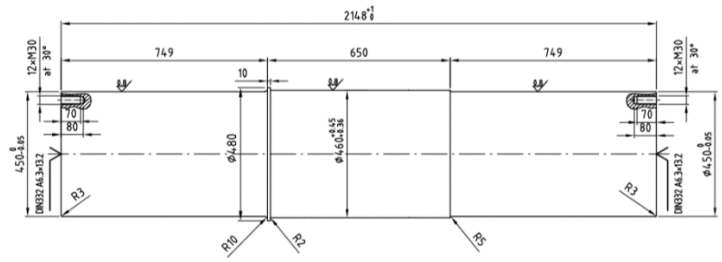
$$A = 0.011 \times 0.6 = 0.0066\,m^2$$

$$\omega = \frac{311191.8}{0.0066} = 45860\ kN/m^2 = 45.86\,Mpa$$

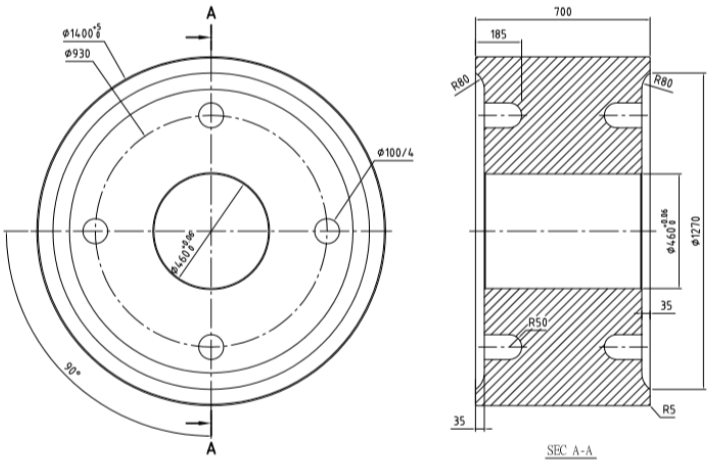
جهت تحلیل در نرم افزار آباکوس ابتدا مدل هندسی شافت و غلتک طبق نقشه های ذیل در نرم افزار سالیدورک طراحی گردیده و سپس به نرم افزار آباکوس انتقال داده شده است.




شکل ۵- نمای مونتاژی غلتک و شافت غتطک

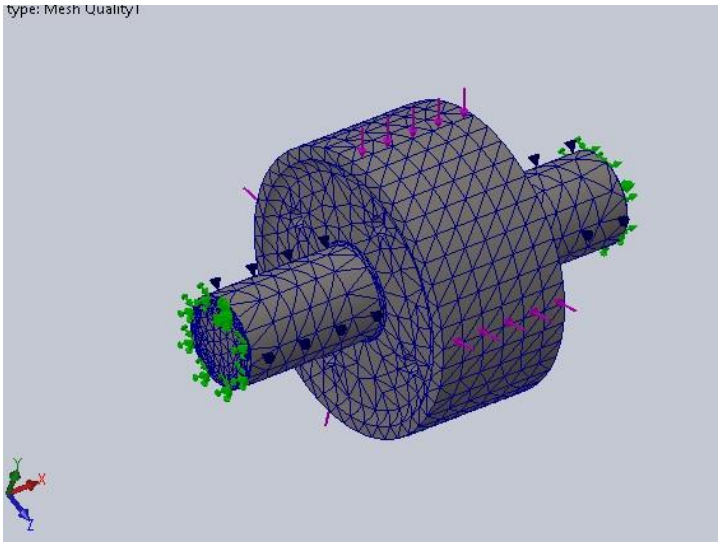



شکل ۶- ابعاد شافت غلطک کوره سیمان زنجان

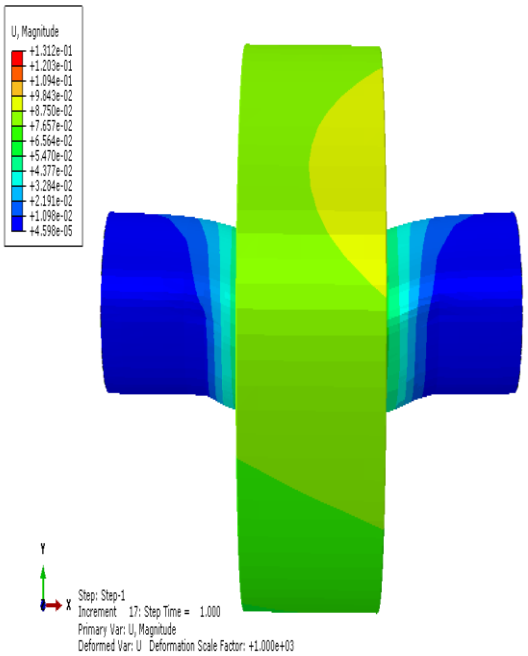


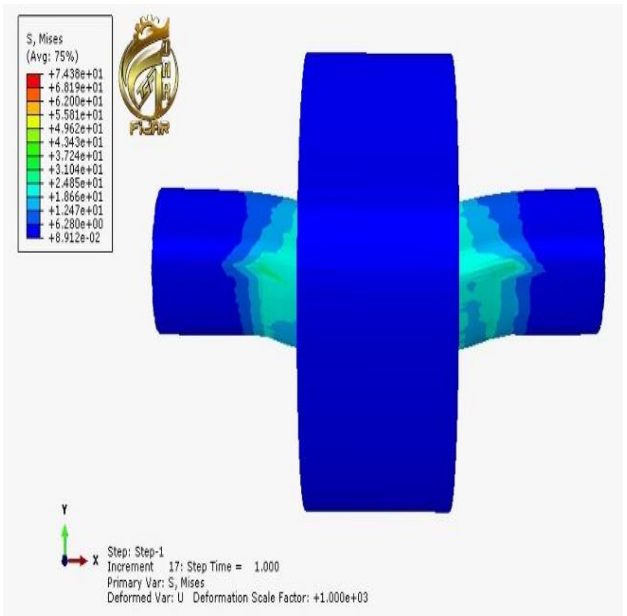

شکل ۷- ابعاد غلطک کوره سیمان زنجان

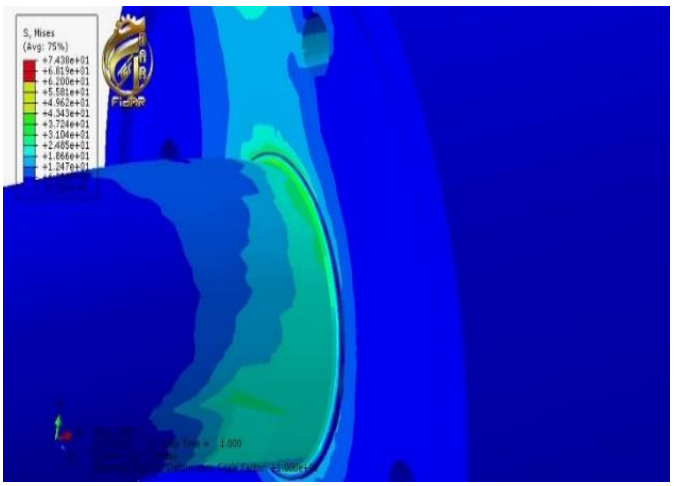
در نرم افزار آباکوش مش بندی مجموعه غلطک و شفت با فرض اینکه این دو قطعه نسبت به هم حرکتی نخواهند داشت، انجام شد. نوع مش انتخاب شده جهت تحلیل شفت و غلطک ، مش تتراهدرال آزاد در نظر گرفته شده است تا نرم افزار با دقت بیشتری در نقاط پله دار و فرورفتگی تحلیل را انجام دهد. نتایج حاصل از نرم افزار در شکل های زیر نشان داده شده است.



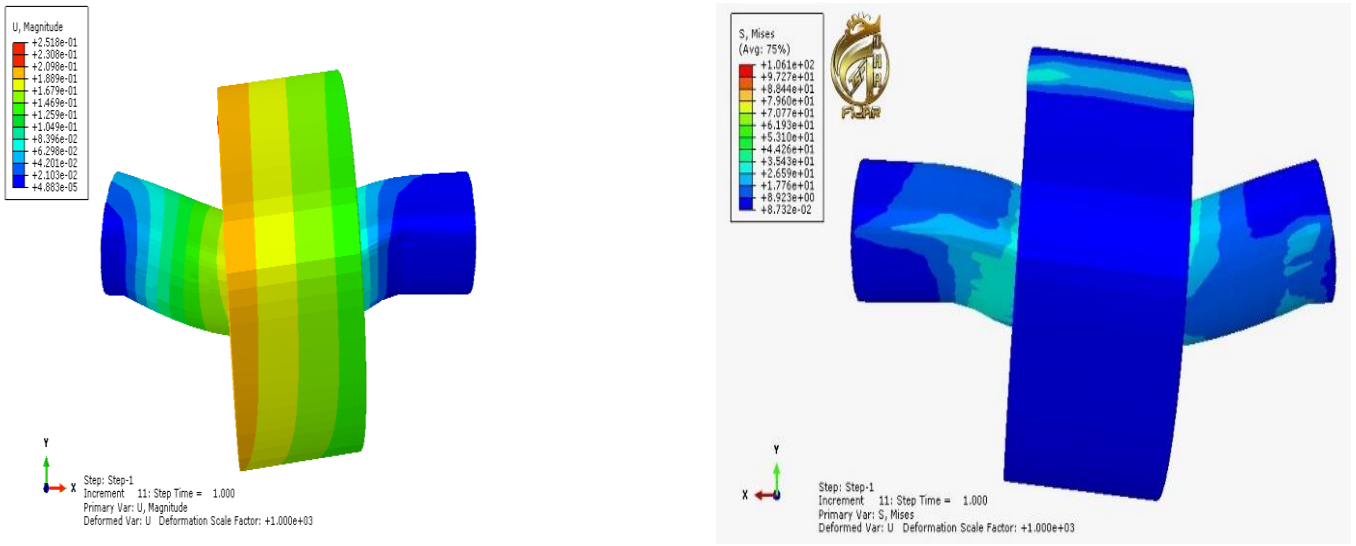

شکل ۸- اعمال مش بندی بر روی شافت و غلتک

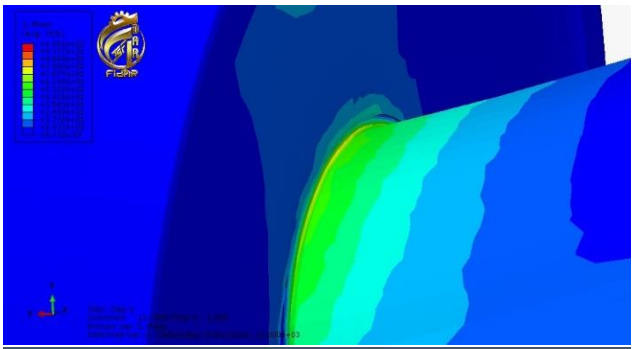


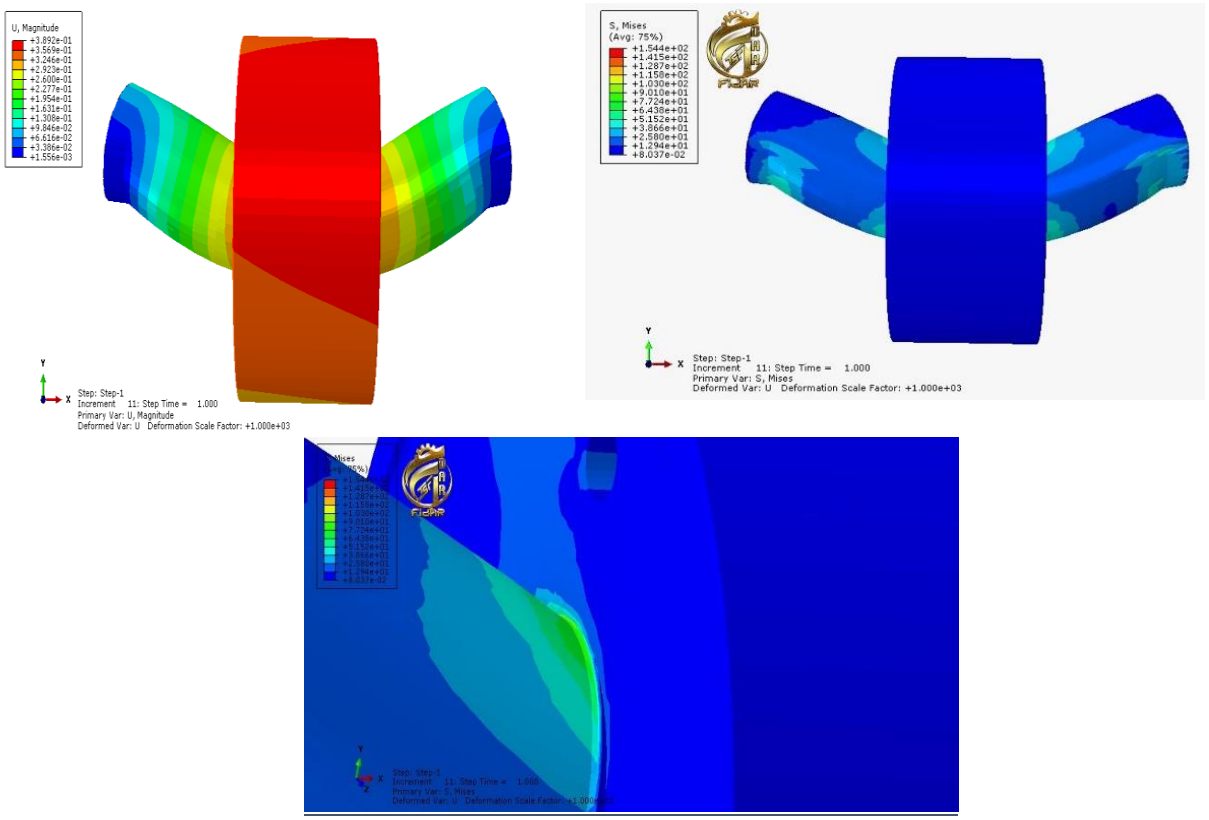



شکل ۹- تنش های وارده به شافت و غلطک با یاتاقان های بدون عیب



شکل ۱۰- تنش های وارده به شافت و غلطک با یاتاقان سمت راست معیوب




شکل ۱۱- تنش های وارده به شافت و غلطک هنگامی که هر دو یاتاقان معیوب هستند

## نتایج و پیشنهادات

در این مقاله تنش ها و نیروهای تماسی حول غلتک و شافت غلتک و آنالیز المان محدود توسط نرم افزار آباکوس در مطالعه موردی کوره سیمان زنجان انجام شد. در شکل های ۷ ،۸ و۹ تصاویر استخراج شده از نرم افزار آباکوس نشان داده شده است. همچنین در جدول شماره ۱ مقدار عددی تغییر شکل های مربوط به شفت در سه حالت بررسی شده آورده شده است.

جدول ۱- نتایج عددی حاصل از آنالیز المان محدود توسط نرم افزار آباکوس

| | حالت خرابی | تنش وارد شده به شافت (مگاپاسکال) | تغییر شکل (میلیمتر) |
|---|---|---|---|
| **حالت اول** | هر دو یاتاقان سالم | ۷۳ | ۰,۱۳ |
| **حالت دوم** | یاتاقان سمت راست معیوب | ۱۰۳ | ۰,۲۳ |
| **حالت سوم** | هر دو یاتاقان معیوب | ۱۵۴ | ۰,۳۹ |

طبق تصاویر و جدول فوق این نتیجه کاملا مشهود است که با گسترش خرابی ها، تنشهای وارده و در نتیجه تغییر شکل های قوی تر ایجاد میشود. نکته حائز اهمیت دیگر این است که به دلیل حرکت دورانی غلتک و کوره این تنشها به صورت پریودیک به مجموعه شفت و غلتک وارد میشوند که پدیده خستگی را به دنبال خواهد داشت. در صنعت و نمونه های بسیار، مشاهده شده است که ترک روی شفت غلتک از نقاط دارای تمرکز تنش بیشتر شروع شده و در اثر پدیده خستگی گسترش یافته و نهایتا شکست اتفاق می افتد. از این رو شناخت انواع خرابی ها حول کوره های دوار و اثرات آنها روی عملکرد کوره بسیار مهم است. با توجه به توضیحات آورده شده در این مقاله پیشنهادات ذیل ارائه میگردد:

*استفاده از نرم افزارهای تحلیل المان محدود همچون آباکوس در مرحله طراحی کوره های دوار جهت شناخت نقاط ضعف تجهیز بسیار ضروری است.

*نرم افزارهای المان محدود گزینه مناسبی جهت بهینه سازی طراحی کوره های دوار هستند.

*بازدید های دوره ای و انجام آنالیزهای دما، ارتعاش و نویز توسط واحدهای نگهداری و تعمیرات به منظور شناخت به موقع خرابی ها و اقدام جهت جلوگیری از گسترش آنها قویا پیشنهاد میگردد.

## مراجع


۱. آسترکی, ایمان و بهرامی بیان، مینا ، ۱۳۹۱، پایدارسازی کوره دوارسیمان با منطق فازی، پانزدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، کاشان، سازمان علمی دانشجویی مهندسی برق کشور

۲. بهفر، رضوان؛ حسین زاده ، محمدرضا و بهفر، رضا ، ۱۳۹۱، اثرات تغییر دور کوره دوار سیمان با استفاده ازCFD ، دومین همایش مشعل و کوره های صنعتی، تهران، هم اندیشان انرژی کیمیا

۳. پرورتبار، ژیلا؛ امیری ، رضا و رسولی، حسین ، ۱۳۹۳، کنترل و عملکرد پدیده های انتقال در کوره های دوار، اولین همایش منطقه ای فناوری اطلاعات برق پالایش، گچساران، مرکز علمی کاربردی گچساران

۴. رستمیان،علیرضا . (۱۳۹۲) . آنالیز پوسته خروجی کوره دوار پخت سیمان و بررسی علل بروز ترک در آن، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان

۵. عمیدی پارسا, مهدی؛ یاسی، یوسف و علائی، رضا ، ۱۳۹۴، تحلیل و طراحی کوره های دوار سیمان در جهت بهبود کیفیت تولید، *اولین کنفرانس پیشرفتهای نوین در حوزه انرژی*، ساوه، موسسه آموزش عالی انرژی

۶. عین آبادی, امیر و گشایشی ،حمید رضا ، ۱۳۹۴، مدل سازی اتلاف حرارت از کوره دوار سیمان، *سومین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی*، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دوستداران محیط زیست

۷. فاتح نوبندگانی, حبیب اله, مظاهری, کیومرث. (۱۳۹۴). مدل سازی کوره دوار سیمان بر اساس مدل اِسپنگ به منظور بررسی تولید $2CO$ در فرآیند تولید سیمان. مکانیک سازه ها و شاره ها, ۵(۲), ۲۰۵-۲۱۶

۸. بیگدلی،داود،شانه چی, امیرحسین و قربانی ، حمیدرضا ، ۱۳۹۳، آنالیز تحلیلی و عددی تنش در رینگ کورهای دوار، سومین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران

9. Boateng A. A., Rotary kilns: transport phenomena and transport processes: Butterworth-Heinemann,2015
10. Elatta H.r, Specht E., Fouda, A. S. Bin-Mahfouz, CFD modeling using PDF approach for investigating the flame length in rotary kilns, Heat and Mass Transfer,Vol. 52, No. 12, pp. 2635-2648, 2016
11. Elattar H., Stanev R., Specht E., Fouda A., CFD simulation of confined non-premixed jet flames in rotary kilns for gaseous fuels, Computers & Fluids, Vol. 102, pp. 62-73, 2014.
12. E. Mastorakos , A. Massias 1, C.D. Tsakiroglou, D.A. Goussis, V.N. Burganos, A.C. Payatakes. CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry. Applied Mathematical Modelling 23 (1999) 55±76
13. F.C. Lockwood, B. Shen, T. Lowes, Numerical study of petroleum coke red cement kiln flames, Presented at the Third International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment, Lisbon, 1995
14. Frassoldati A, Cuoci A, Faravelli T, Ranzi E, Candusso C, Tolazzi D (2009) Simplified kinetic schemes for oxy-fuel combustion. 1st International confrence on sustainable fossil fuels for future energy, Italy.

Jenkins B., Mullinger P., Industrial and process furnaces: principles, design and operation: Butterworth-Heinemann, 2011.