

تحلیل تنش محور جعبه دنده هدایت شمش کارخانه فولاد سازی در شرکت گروه ملی صنعتی ایران

محمد رضا عیسوند زبائی*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اندیمشک، اندیمشک، ایران،
esvandzebaei@yahoo.com

احسان یوسفی
کارشناس ارشد، شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران، اهواز، ایران، e_yosefi60@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش شکست محور جعبه دنده هدایت شمش کارخانه فولاد سازی در شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران مورد مطالعه قرار گرفت. این محور توان را از الکترو موتور دریافت کرده و خود درون یک محور توخالی دیگری قرار دارد. محور توان را جهت به چرخش درآوردن غلتک انتقال شمش به وسیله چرخنده ماریج به محور دیگری که به غلتک متصل میباشد، منتقل می کند. غلتک باعث می گردد که این سیستم از قسمت‌های مهم خط تولید شمش به شمار آید. این محور به دفعات زیاد دچار خرابی و شکست می گردد و هر بار زمان تلف شده جهت تعویض این محور ضرر هنگفتی به کارخانه وارد می گرداند. به دلیل نبود اطلاعات اولیه از جنس و نقشه محور پس از شکست، اقدام به اندازه گیری و کوانتو متری جهت تشخیص نوع الیازم محور و ساخت قطعه می گردد که این قطعات دارای عمر کاری کوتاهی بوده و پس از تحت بار قرار گرفتن، دچار شکستگی می شوند. برای یافتن علل شکست، محور در نرم افزار سالید ورکز مدل سازی گردید و جهت تحلیل تنش، به نرم افزار انسیس انتقال گردید. پس از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، نقاطی که مستعد شکست بودند شناسایی شدند. همچنین شرایط و عیوبی که ممکن بود منجر به شکست شوند مورد تحلیل قرار گرفتند. در انتها جهت تخمین عمر خستگی این محور از مدل های خستگی استفاده شد و جهت بهبود عمر قطعه پیشنهادات و راه کارهایی نیز ارائه گردید.

واژه های کلیدی: محور، جعبه دنده؛ شکست؛ عمر خستگی، چرخ دنده، انسیس.

Analysis of the Gearbox Shaft Stress of the Steel Mill's Iron Ingots in the Iranian National Industrial Group

M. R. Isvandzibaei
E. Yousefi

Department of Mechanical Engineering, Andimeshk Branch, Islamic Azad University, Andimeshk, Iran
Master of Science, Iran National Steel Industrial Group (I. N. S. I. G), Ahvaz, Iran

Abstract

In this article, the failure of gearbox transfer of steel mill ingot in the company of Iran National Steel Group is studied. This shaft receives power from the electromotor and it's inside another hollow axis. The shaft, power to rotate the ingot transfer roller by a spiral gear transmits to another axis. The roller make this system an important part of the ingot production line. This shaft many times will failure and replace it is a huge loss to the factory. Due to lack of the fundamental information about the map and kind of shafts after failure, measurement quantum were performed to determine the type of alloy-axis and to make the piece which these pieces have a short working life span and after undergoing loading, they were fractured. To find the causes of failure, the shaft was modeled in the Solid works software and it was inserted into the Ansys Workbench software for stress analysis. After using boundary conditions and loading, the Points that were susceptible to failure were identified. Also the conditions and defects that could lead to failure were analyzed. Finally to estimate shaft fatigue life, fatigue models were used and to improve the life of the piece suggestions and solutions were presented.

Keywords: Shaft, Gearbox, Fracture, Fatigue life, Gear, Ansys.

۱- مقدمه

با توجه به شرایط کاری در معرض بار گذارهای مختلفی قرار می گیرند که طراحی اجزای دوار آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بنابر این طراحی صحیح درایو شافت ها تأثیری مستقیم بر تولید واحد های صنعتی خواهد داشت.

با پیشرفت فناوری در عصر حاضر، پدیده شکست در اجسام از اهمیت بیشتری نسبت به گذشته برخوردار شد، متلاشی شدن بسیاری از هواپیما ها و فضا پیما ها در طی دهه های گذشته لزوم درک دقیق تری از مکانیک شکست در اجسام را در علوم جدید ایجاب می کند. در واقع گسیختگی ناگهانی بسیاری از تجهیزات در سازه های صنعتی نه تنها عواقب جانی ناگواری در پی دارد بلکه ضررهای چشمگیر اقتصادی را نیز سبب می شود. در طی سالهای پس از جنگ جهانی دوم پیشرفتهای زیادی در مکانیک شکست حاصل شد ولی

یکی از مهمترین واماندگی های مکانیکی در شافت های صنعتی، پدیده شکست است. تا به حال شکست های پیشبینی شده زیادی در ماشین آلات صنعتی بوجود آمده است که محققان همواره درصدد یافتن عوامل ایجاد کننده آن بوده اند. تحقیقات برخی از محققان نشان می دهد که بخش عمده ای از شکستها، به علت طراحی ضعیف شافت ها بوجود آمده اند. از مهم ترین نقاط ضعف در شافت ها میتوان به وجود شیارها و تغییر قطرها با طراحی نا مناسب و همچنین وجود مناطقی با ضریب تمرکز تنش بالا و انتخاب نا مناسب جنس شافت اشاره نمود. یک شافت با طراحی نا مناسب محلی را برای ایجاد و رشد ترک ایجاد می نماید که در نهایت به شکست شافت منجر می گردد. محورهای محرک از قطعات پر کاربرد در صنعت محسوب می شوند و

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: esvandzebaei@yahoo.com

دانسته های زیادی همچنان باقی است و زمینه برای تحقیقات بیشتر فراهم می باشد.

باهری [۱] در خصوص تجزیه و تحلیل شکست در محور های سنگین خط نورد گرم میلگرد به تحقیق و بررسی پرداخته است. در این مقاله نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل شکست در طول دوره زمانی حدود ۱۵۰۰۰ ساعت کارکرد مطالعه گردید. نتایج بررسی نشان میدهد سطح شکست محور در اثر ترک خستگی به وجود آمده است. مرادی [۲] در خصوص مطالعه و آنالیز شکست خستگی محور ۱۳۰ واگن های باری به تحقیق و بررسی پرداخته است. در این مقاله مسئله شکست محور واگن های باری، که مشکلات متعددی را در سالهای اخیر به وجود آورده، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا از دیدگاه آماری موقعیت ایجاد ترک و دلایل این مسئله بررسی شده، سپس به علت پیچیدگی های هندسی از مدل المان محدود محور برای استخراج نقاط مستعد ایجاد و رشد ترک، استفاده شده است و در نهایت با استفاده از معادله پاریس تجربی بدست آمده توسط اتحادیه بین المللی راه آهن ها و ترکیب آن با نتایج تحلیلی در نرم افزار، طول ترک بحرانی، نرخ رشد ترک و عمر محور با وجود ترک اولیه بزرگتر از ترک آستانه استخراج شد و با نتایج تحلیلی موجود مقایسه گردید.

ابراهیمی [۳] علت شکست میل لنگ پمپ جابجایی مثبت شرکت ایرانول را مورد بررسی و تحقیق قرار داد. در این تحقیق با کمک مدل المان محدود، توزیع تنش در این میل لنگ به دست آمده است و سطح مقطع شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تنش نشان داد که شکست به وجود آمده در اثر عدم کارکرد در شرایط مورد نظر طراح بوده است و در اثر بالا بودن ارتعاشات در میل لنگ و یا وجود عیوبی در شاتون، یاتاقان ها و یا سلیندر بوده که فشار موضعی و متناوبی را به میل لنگ وارد آورده و باعث ایجاد لهیدگی در آن شده است. لهیدگی به وجود آمده منشأ شروع ترک گردیده و در بارگذاری های متناوب رشد کرده و منجر به شکست میل لنگ شده است.

لی و همکاران [۴] به بررسی ریشه اصلی خرابی محور محرک یک وسیله نقلیه پرداختند. آنها مورفولوژی ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطح شکستگی، ترکیب شیمیایی، آنالیز متالوگرافی و خصوصیات مکانیکی مواد را بررسی کردند. نتایج نشان می دهد که خستگی، مکانیسم اصلی شکست محور محرک بود.

لیو و همکاران [۵] به بررسی ریز ساختارها و خصوصیات مکانیکی یک محور محرک پرداختند. ناحیه شکستگی با بازرسی بصری، آنالیز متالوگرافی، میکروسکوپ الکترونی روبشی و تست های کششی و ضربه ای مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می دهد که تنش روی سطح استوانه ای خارجی در نزدیکی شانه به تدریج زیاد می شود و خطر گسیختگی با افزایش گشتاور افزایش می یابد.

وکیلچ و همکاران [۶] به بررسی شکست دندانه محور دنده ای که به عنوان بخشی از جرتقیل کشتی سازی بود پرداختند. تقریباً همه دندانه های این چرخ دنده مارپیچی در حین کارکرد طبیعی جرتقیل شکسته شدند. از تجزیه و تحلیل شکست ترکیبی آزمایشی برای تعیین محل شکست و مسیرهای انتشار ترک استفاده شد. برای درک بهتر از فرایند شکست، یک مدل سه بعدی از محور دنده ساخته و از

روش اجزا محدود برای تجزیه و تحلیل تنش استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که چگونه انتشار اسپل عملکرد دنده را تحت تأثیر قرار می دهد تا منجر به شکست شود.

سانتوش و همکاران [۷] به بررسی تجزیه و تحلیل شکست محور غلنتی فولاد کربن دستگاه بخار پد مداوم مورد استفاده در صنعت نساجی پرداختند. برای تجزیه و تحلیل خرابی از بازرسی بصری، آنالیز شیمیایی، سختی و اندازه گیری استحکام کششی، خصوصیات ریزساختاری، آنالیز فراکتوگرافی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و تحلیل عناصر محدود استفاده شد. برای بررسی توزیع تنش در سطح شکستگی، روش اجزاء محدود استفاده شد و بر اساس اندازه شافت، یک مدل هندسی دقیق تهیه شد. با توجه به تجزیه و تحلیل خرابی می توان نتیجه گرفت که به دلیل تمرکز تنش، میکرو ترک در امتداد رابط ضعیف ایجاد شده و بیشتر آن را به نقص عمده خستگی تبدیل می کند.

بامیک و همکاران [۸] عمر خستگی محور توخالی انتقال قدرت به بررسی شفت پرداختند و متوجه شدند که شکست خستگی از یکی از لبه های خار شروع شده و پیشرفت کرده است. شروع ترک خستگی به علت تمرکز تنش در جای خار بوده که به دلیل شعاع ناکافی در لبه جای خار بوجود آمده است.

غلنتک های نورد، به ویژه غلنتک های کاری نورد گرم شمش یکی از قطعات بسیار مهم خط نورد بوده که توسط جعبه دنده هایی به چرخش درآمده و بطور مستقیم بر روی پارامترهای کلیدی تولید چون بهره وری خط تولید و کیفیت محصول تولیدی اثر می گذارند. از طرفی هر نوع حادثه در شکست قطعات به خصوص محور گیربکس غلنتک نورد، می تواند زبان های هنگفتی را به شرکت تحمیل نماید. لذا طراحی محور، کنترل متریال و فرآیند ریخته گری و ساخت این نوع محور بسیار مهم و حائز اهمیت می باشد. شکل ۱ غلنتک های انتقال شمش در کارخانه گروه ملی صنعتی ایران را نشان می دهد.



شکل ۱- غلنتک های انتقال شمش در کارخانه فولاد سازی گروه ملی

مشخصات موتور گیربکس غلنتک نورد در کارخانه گروه ملی صنعتی ایران مطابق جدول شماره ۱ داده شده است.

جدول ۱- مشخصات موتور گیربکس

دور موتور (rpm)	توان موتور (kw)	حداکثر جریان (A)
۱۴۴۵	۷/۵	۲۶/۵

محور گیربکس غلنتک نورد به وسیله یک خار در قسمت ابتدایی خود، توان را از طریق محور الکتروموتور دریافت کرده و به وسیله چرخ دنده های مارپیچ واقع در روی محور، به محور دیگری انتقال می دهد و در نهایت باعث به چرخش درآمدن غلنتک های جابجایی

متالورژیکی مانند ناخالصی، رخ می‌دهد. سه عامل عمده برای وقوع شکست خستگی ضروری هستند. این عوامل عبارتند از:

- ۱- استحکام کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد
- ۲- تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده به قطعه
- ۳- زیاد بودن چرخه های تنش وارده به قطعه

۲-۱- نظریه کرنش - عمر و مدل های تخمین عمر خستگی

پارامترهای کرنش- پایه اصولا با خستگی کم چرخه که در آن امکان بروز پلاستیسیته قابل توجه وجود دارد، هماهنگ می باشد. خستگی کم چرخه یا کرنش بالا معمولا به مکانیزمی اطلاق می شود که شکست قبل از ۱۰^۴ چرخه بارگذاری اتفاق افتاده و پلاستیسیته چرخه ای حائز اهمیت باشد. نمودارهای S-N مبتنی بر آزمون های خستگی کم چرخه انجام شده در شرایط کرنش ثابت انطباق مناسبی با داده های آزمون خستگی پرچرخه نشان می دهند.

روش های صفحه بحرانی بر اساس مشاهدات تجربی جوانه زنی و رشد ترک هادرتی بارگذاری استنتاج شده اند. در اثر شرایطی مثل جنس ماده، حالت تنش، محیط و دامنه کرنش، عمر خستگی تحت تسلط رشد ترک در صفحه برشی یا کششی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که مدل های موفق بایستی قادر باشند عمر خستگی و صفحه واماندگی غالب را به طور هم زمان پیش بینی نمایند.

اسمیت، واتسون و تاپر [۹] رابطه مناسبی را که شامل هر دو بازه کرنش چرخه ای و تنش حداکثر بود، پیشنهاد نمودند. این مدل که پارامتر اسمیت- واتسون- تاپر نامیده می شود، ابتدا به عنوان تصحیح برای تنش متوسط در حالت بارگذاری تک محوره به کار گرفته شد. همچنین این پارامتر را می توان در تحلیل هر دو نوع بارگذاری متناسب و نامتناسب قطعاتی که تحت ترک خوردن کششی مود (I) گسیخته می شوند به کار برد. پارامتر اسمیت- واتسون- تاپر در بارگذاری چند محوره بر اساس بازه کرنش اصلی و تنش حداکثر روی صفحه بازه کرنش اصلی استوار است. رابطه ۱ مدل SWT را بیان می نماید [۹].

$$\sigma_{n,max} \frac{\Delta \epsilon_{tot}}{2} = \frac{(\sigma_f')}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (1)$$

در مدل مورو کار کلاسیک که با ترک های خستگی رابطه دارد یک روش انرژی می باشد. بر اساس نظریه مورو در تنش های چرخه بالا، کرنش پلاستیک تکراری عامل اصلی اتلاف انرژی در فلزات می باشد [۱۰].

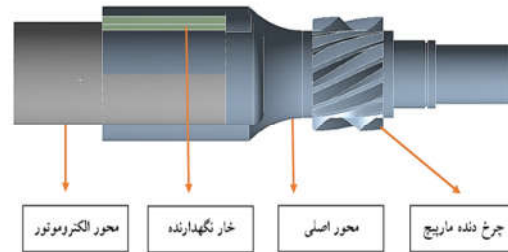
$$\frac{\Delta \epsilon^e}{2} + \frac{\Delta \epsilon^p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

معیار پیشنهادی توسط فاطمی و سوشی معیاری بر پایه کرنش می باشد که صفحه بیشینه تنش برشی را به عنوان صفحه بحرانی در نظر می گیرد. ماهیت فیزیکی این معیار را نشان می دهد [۱۱].

$$\frac{\Delta \gamma}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_y} \right) = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^b + \gamma_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

مدل انرژی کرنشی مجازی لیو از گسترش، تکمیل و عمومیت دادن مدل پیش بینی عمر خستگی انرژی- پایه تک محوره می باشد. این مدل شامل دو بخش الاستیک و پلاستیک می باشد تا بر بعضی از محدودیت های مدل های پیشین در عمرها، فائق آید [۱۲].

شمش های فولاد می شوند، به همین دلیل نقش مهمی را در خط تولید فولاد ایفا می کنند. این محورها درون یک محور توخالی دیگری قرار دارند تا توان مورد نیاز غلتک ها را بوسیله چرخ دنده های ماریج، توان الکتروموتور را به محور دیگری انتقال دهند که در شکل شماره ۲ اجزای این سیستم نشان داده شده است.

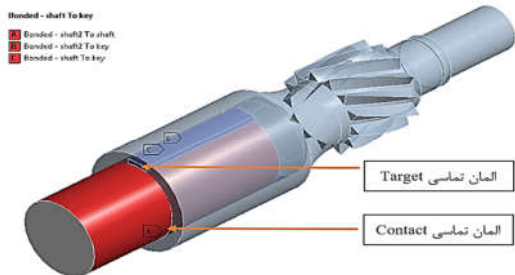


شکل ۲- نمای برش خورده محور جعبه دنده

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بیشترین دفعات شکست اتفاق افتاده در حین کار، در پله محور بوده است که به دلیل شکست قطعه و توقف خط تولید کارخانه با تولید ظرفیت بالا، بررسی شکست این محور از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. این ناحیه به دلیل ضرایب تمرکز تنش، می تواند محل مستعدی جهت شکست باشد.

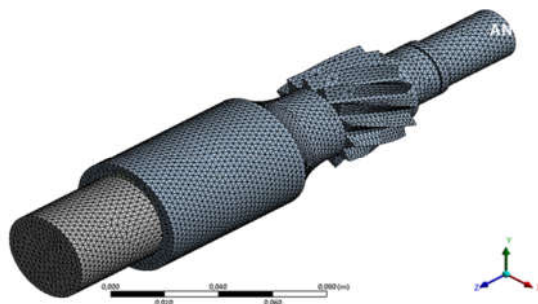
۲- مکانیزم های شکست

بررسی مکانیزم های ایجاد ترک از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد، بررسی فعل و انفعالات فیزیکی که به هنگام شکست روی می دهد، چندان ساده نیست، زیرا چگونگی ایجاد ترک و رشد آن و بلاخره نوع شکست در مواد کریستالی به جنس، ساختار شبکه کریستالی، ریز ساختارها بستگی دارد. به طور کلی شکست در فلزات و قطعات مکانیکی با در نظر گرفتن همه شرایط در سه حالت امکان وقوع دارد، شکست نرم، شکست ترد و شکست خستگی. گسیختگی های مکانیکی، زیان های جانی و مالی بیشماری را در طول تاریخ برجای گذاشته است. گسیختگی های ناشی از بارگذاری تکراری که همان خستگی می باشد، حداقل نیمی از این گسیختگی های مکانیکی را موجب گردیده است. اهمیت این گسیختگی های ناشی از خستگی قطعات، موجب می گردد تا یک مهندس طراح در تشخیص پارامترهای وابسته به مسئله خستگی بیشتر دقت کند. دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می دهد. خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد و بدون هیچ گونه تغییر شکل نا خالص در شکست نتیجه می شود. معمولا سطح شکست در مقیاس میکروسکوپی بر جهت تنش کششی اصلی عمود است و سطح شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده می شود که از یک ناحیه هموار حاصل از عمل سایش با اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه نا هموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع در قطعه به صورت نرم شکسته شده است، تشکیل می شود. غالبا پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می شود که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می کند. مشخصه دیگر شکست خستگی این است که معمولا شکست در نقطه وجود تمرکز تنش، مانند یک گوشه تیز یا شیار، یا در یک تمرکز تنش



شکل ۳- معرفی تماس ها

برای شبکه بندی از تعداد تقسیمات مناسب برای همگرایی نتایج تحلیل تنش استفاده گردیده است که پس از شبکه بندی در اندازه های مختلف محور و به دست آمدن مقادیر تنش، در این مرحله از تعداد ۱۴۶۲۹۱ المان بهره گرفته شده است. در شکل ۴ نمای شبکه بندی شده مجموعه محور نشان داده شده است.



شکل ۴- شبکه بندی مجموعه جعبه دنده

از مهمترین مراحل تحلیل تنش و بارگذاری قطعات، یافتن مقدار صحیح بارهای وارد شده به قطعه در حین کارکرد می باشد. زیرا این امر باعث تحلیل درست و نزدیکی نتایج تحلیل تنش از روش اجزا محدود و روابط تحلیلی می گردد. بارهایی که به محور جعبه دنده در حین کارکرد وارد می گردد را می توان به چند دسته کلی تقسیم بندی نمود.

۱- گشتاور پیچشی

۲- نیروی شعاعی و محوری چرخ دنده مارپیچ

۳- نیروی وزن

۴- نیروی گریز از مرکز

در محورهای انتقال قدرت، مهمترین باری که به محور وارد می گردد، گشتاور پیچشی الکتروموتور می باشد که مقدار این گشتاور برابر با ۵۰NM می باشد. چرخ دنده مورد استفاده در این جعبه دنده از نوع مارپیچ بوده و مقدار نیروهای مماسی، شعاعی و محوری وارد بر محور بر اساس زاویه های مماسی و مارپیچ ۳۰ درجه به ترتیب برابر ۲۰۰۰ N، ۱۱۵۴ N و ۱۱۵۴ N می باشند. سایر نیروهایی که به محور در حال چرخش وارد می شوند نیروهای وزن و نیروی گریز از مرکز می باشد. پس از اعمال بارگذاری، حال می بایست جهت تحلیل اجزا محدود محور، شرایط مرزی را برای این محور در نظر گرفت. از شرایط مرزی و تکیه گاهی در نظر گرفته شده برای این محور در حال چرخش، تکیه گاه استوانه ای می باشد که درجات آزادی آن در

$$\Delta\sigma\Delta\varepsilon = 4\sigma_f^c \varepsilon_f^b (2N_f)^{b+c} + \frac{4\sigma_f^2}{E} (2N_f)^{2b} \quad (4)$$

که در روابط (۱) الی (۴) $\Delta\sigma$ تغییرات تنش، $\Delta\varepsilon$ تغییرات کرنش، σ_f^c ضریب مقاومت خستگی، ε_f^b ضریب شکل پذیری خستگی، b نمای مقاومت خستگی، c نمای شکل پذیری خستگی، N_f تعداد سیکل، E مدول الاستیسیته، G مدول برشی، τ_f^c ضریب مقاومت برشی خستگی، γ_f^b ضریب شکل پذیری برشی خستگی می باشند.

۳- مدل سازی و شرایط مرزی

در این بخش ابتدا به شبکه بندی مدل تولید شده، همگرایی تنش محور مورد نظر و معرفی المان های مورد استفاده در این تحلیل بیان می شود سپس به بررسی شرایط مرزی و محاسبه و بارهای وارده به محور این جعبه دنده در حالت های مختلف پرداخته می شود. پس از انجام آزمایش کوانتومتری روی نمونه محور در آزمایشگاه و به دست آوردن ترکیب شیمیایی آلیاژ و همچنین با توجه به جداول استانداردهای خواص شیمیایی فولادها، نزدیکترین فولاد به این مشخصات AISI 4140 می باشد. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4140 مطابق جداول ۲ و ۳ می باشد.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد

42CRMO4 (AISI 4140)

S_{u} (Mpa)	S_y (Mpa)	E(Gpa)	G(Gpa)	ν
۶۵۵	۴۱۵	۲۰۰	۸۰	۰/۲۹

جدول ۳- ترکیب شیمیایی عناصر فولاد

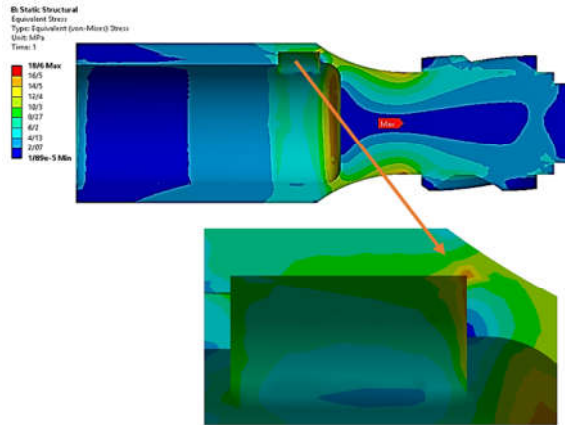
42CRMO4 (AISI 4140)

عنصر	c	Mo	Mn	Cr	Si	S	Cu	Ni	P
درصد وزنی (%)	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۸۲	۱	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۳۳

در جدول شماره ۲ کمیت های، E مدول الاستیسیته، G مدول برشی، ν نسبت پواسون و S استحکام می باشند.

برای ایجاد مدل المان محدود، از المان Solid ۱۸۵ استفاده گردید. این المان دارای هشت گره بوده و هر گره نیز دارای سه درجه آزادی می باشد و در حالت پیش فرض به صورت مکعبی بوده ولی قابلیت نمایش در شکل های منشوری و چهار وجهی را نیز دارا می باشد.

همچنین برای مدل سازی نحوه تماس در سطوح اتصال قطعات، از المان های Contal174 و Target170 استفاده شد. از المان Contal174 برای تماس و یا لغزش بین سطوحی از جسم مبدا (که تغییر شکل در سطوح آن رخ می دهد) و سطوح جسم ثانویه استفاده گردید. در واقع این المان، تغییر شکل های المان های جسم مبدا را به المان Target170 منتقل می نماید تا از آن طریق به جسم ثانویه منتقل گردد. این المان می تواند بر روی سطوحی از جسم صلب و یا پوسته دارای گره میانی قرار می گیرد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۷- نمای برش خورده و فضای خالی درون محور

۴-۱- صحنه گذاری نتایج تحلیل تنش

در این بخش سعی بر این است که صحت نتایج روش تحلیل اجزا محدود نسبت به روابط تحلیلی سنجیده شود. برای محاسبه تنش فان ماییز در نقاط بحرانی محور مورد تحلیل در این تحقیق، نیازمند ساده سازی هایی می باشیم. می بایست محور را همانند یک تیر دو سر تکیه گاه فرض نمود تا مقدار گشتاور خمشی ناشی از بار شعاعی را در نقطه پله محور محاسبه نمود. جهت محاسبه تنش فان ماییز در یک نقطه از محور، نیازمند محاسبه سه تنش که شامل تنش برشی ناشی از گشتاور پیچشی، تنش نرمال ناشی از بار محوری و تنش تنش نرمال ناشی از گشتاور خمشی می‌باشیم.

$$\sigma_p = k_t \frac{P}{A} \quad (5)$$

$$\sigma_M = k_t \frac{32 M}{\pi d^3} \quad (6)$$

$$\tau = k_{ts} \frac{16 T}{\pi d^3} \quad (7)$$

در این رابطه σ_p تنش محوری، σ_M تنش خمشی و τ تنش برشی و k ضریب تمرکز تنش می‌باشد.

مجموع تنش عمودی وارد بر یک المان برابر مجموع تنش محوری و تنش خمشی می‌باشد که در رابطه (۸) بیان شده است.

$$\sigma_n = \sigma_p + \sigma_M \quad (8)$$

σ_n تنش عمودی کل می‌باشد. برای یافتن بیشینه تنش در شافت از معیار فان ماییز، از رابطه (۹) استفاده می‌شود.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_n^2 + 3\tau^2} \quad (9)$$

با استفاده از روابط تحلیلی مقدار تنش در پله محور محاسبه گردید که در جدول ۴ این مقایسه نشان داده شده است.

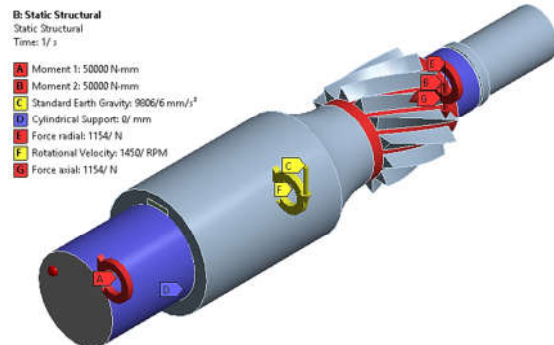
جدول ۴- اختلاف بین نتایج تحلیل تنش اجزا محدود و روابط تحلیلی

درصد اختلاف (%)	تنش (روابط تحلیلی) MPa	تنش (اجزا محدود) MPa
۱	۱۸/۴	۱۸/۶

۴-۲- بررسی علل شکست

پس از مدل سازی و بارگذاری قطعات، در حالتی که مجموعه دارای نقص نمی‌باشد، مقدار تنش از مقدار تنش تسلیم کمتر گردید که این نشان دهنده این موضوع است که در حالت کارکرد عادی و بدون نقص سیستم، محور دچار شکستگی نمی‌شود و حال می بایست به بررسی

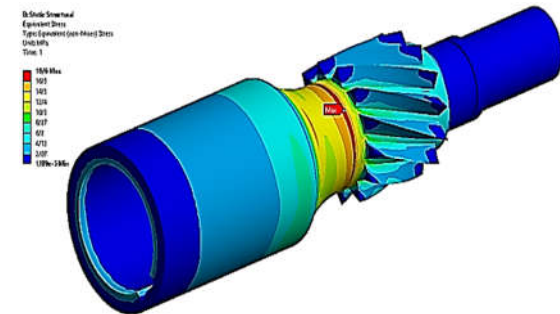
جهت شعاعی و محوری گرفته شده و تنها در جهت مماسی به دلیل چرخش محور، آزاد می باشد، تکیه‌گاه محور در سمت چرخ دنده از نوع بال بیرینگ و از سمت الکتروموتور اتصال مستقیم می باشد، شکل ۵ شرایط مرزی تکیه گاهی و بارگذاری کلی محور را نشان می دهد.



شکل ۵- بارگذاری و شرایط مرزی نهایی

۴-۲- نتایج تحلیل تنش و بررسی علل شکست

پس از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری محور در نرم افزار اجزا محدود، نتایج حاصل از توزیع تنش فان ماییز در شکل ۶ نشان داده شده است که بیشترین تنش در حالت عادی در ناحیه پله و جایی که محور کمترین قطر را دارا می باشد.



شکل ۶- تحلیل تنش فان ماییز محور جعبه دنده

در عمل بیشترین تعداد دفعات شکست در ناحیه پله محور رخ داده است. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده است، این قسمت از محور نیز دارای فضای خالی درون خود است که ناشی از ایجاد جای خارکلید محور می باشد که توسط دستگاه تراشکاری ایجاد شده و محل مستعدی جهت تمرکز تنش و شکست می باشد.

جدول ۵- تنش در پله محور در شعاع های مختلف

شعاع (mm)	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹
تنش (MPa)	۳۷/۵	۲۸	۲۳	۲۱/۷	۲۰/۳

از دیگر عیوب ساختی که می توان به بررسی آن پرداخت، فضای خالی درون محور می باشد که اگر هنگام تراشکاری، این فضا بیشتر از اندازه معمول تراشیده شده باعث ضعیف شدن محور و ایجاد تمرکز تنش می گردد. در شکل شماره ۱۰ نمونه ای از محور شکسته شده نشان داده است.



شکل ۱۰- شکست محور از ناحیه پله

هنگام تراشیدن چرخ دنده مارپیچ روی محور، اثر قلم تراش روی پله محور به جا می ماند. این شیارها به عمق حدود ۲ تا ۳ میلیمتر می توانند باعث ضعیف شدن محور شوند. از جهتی چون فضای خالی درون محور به پله نزدیک است، این شیارها می توانند باعث تمرکز تنش و در نهایت شکست شوند. شکل ۱۱ شکست محور از ناحیه پله در محل وجود شیارها را نشان می دهد.



شکل ۱۱- شکست محور از ناحیه پله در محل وجود شیارها

برای رفع این عیب می توان از مدول های دیگر یا دستگاه تراش دیگری که این شیارها را ایجاد نکرده یا اثرات کمتری برجای گذارد، استفاده نمود.

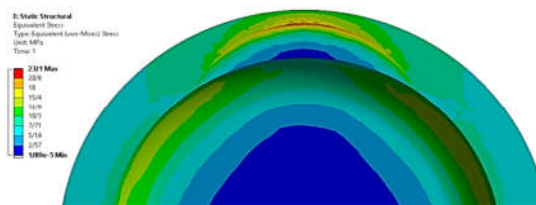
شکل ۱۲ شکست محور از ناحیه خار را نشان می دهد. خار کلید تعبیه شده در این سیستم انتقال نیرو جهت اتصال محور الکتروموتور و محور استفاده شده است. موارد متعددی از شکست از ناحیه خار کلید روی محور گزارش شده است. در صورتی که این جای خار بیش از حد تراشیده شده باشد، باعث ضعیف شدن محور از این ناحیه و تمرکز تنش و سپس شکست می گردد.



شکل ۱۲- شکست محور از ناحیه خار

حالاتی پرداخت که مجموعه دارای نقص می باشد. یکی از شایع ترین علل شکست قطعات مکانیکی، ضعف در طراحی می باشد. به دلیل این که صنعت فولاد ایران پس از گذشت سال های زیادی از ورود خود به ایران، هم چنان ساختار اولیه خود که طراحی اولیه خود در شرکت های سازنده می باشد را حفظ کرده است. شکست های اولیه پس از سال های متمادی از کارکرد قطعه رخ داده است که ناشی از به اتمام رسیدن عمر مفید قطعه بوده است. پس از شکست قطعه با توجه به نقشه های شرکت سازنده یا در بسیاری از موارد نقشه قطعه وجود نداشته است و پس از شکست با اندازه گیری قطعه اولیه، اقدام به ساخت قطعه جدید نموده اند. از آن جایی که طراحی اولیه دارای پشتوانه محاسباتی فراوانی بوده و رعایت تolerانس ها و اندازه ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده است و اکنون در ساخت قطعات جدید این دقت ساخت مانند ساخت قطعه اولیه رعایت نمی شود و مراحل تولید از جمله تراشکاری قطعه دارای عیوب فراوانی می باشد که بسیاری از این عیوب به دلیل قدیمی بودن دستگاه های تراشکاری و عدم تجربه تراشکار در ساخت قطعاتی این چنینی است.

یکی از محل های مستعد شکست محور، پله محور می باشد که در صورت رعایت نکردن در شعاع گردی آن، باعث ایجاد تمرکز تنش در آن می گردد. شعاع گردی در محور در حالت استاندارد ۴۰ mm می باشد که ممکن است در حین ساخت این شعاع رعایت نشده باشد. شکل ۸ تنش در پله شافت در شعاع گردی ۳۷ mm را نشان می دهد و شکل ۹ نمای جانبی تنش در پله شافت در شعاع گردی ۳۵ mm را مشخص می کند.



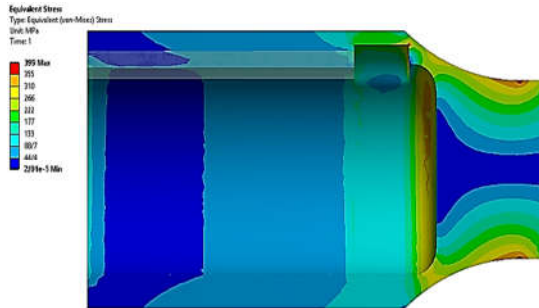
شکل ۸- تنش در پله شافت در شعاع گردی ۳۷ mm



شکل ۹- نمای جانبی تنش در پله شافت در شعاع گردی ۳۵ mm

همان طور که در جدول ۵ مشاهده می گردد، هیچ یک از تنش ها در شعاع های گردی در پله محور باعث شکست در محور نمی گردد. البته شعاع های کمتر از این مقدار، باعث جداشدگی قطعه می گردد. بنابراین از محاسبه تنش آن ها صرف نظر گردید. در شعاع های گردی کمتر از ۳۵ mm فضای خالی به سطح رسیده و قطعه بریده می شود. بنابراین کمترین شعاعی گردی قابل محاسبه می باشد، مقدار تنش ایجاد شده در جدول ۵ نشان داده شده است.

ضریب گشتاور نامی که باعث شکست محور میگردد، در حل اجزا محدود، با توجه به تنش تسلیم ۴۱۵ MPa، مقدار گشتاوری که منجر به شکست می گردد، ۱۲۰۰ Nm می باشد که ۲۴ برابر گشتاور در حالت کاری بدون بار ۵۰ Nm می باشد. در شکل ۱۵ تنش محور در گشتاور ۱۲۰۰ Nm نشان داده شده است.



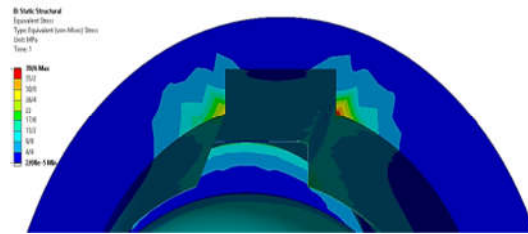
شکل ۱۵- تنش محور در گشتاور ۱۲۰۰ Nm

طبق گزارشات ثبت شده توسط اپراتورهای رولینگ شمش‌های فولادی تولید شده در گروه ملی، بیشترین شکست در هنگام استارت الکترو موتور و قرار داشتن شمش‌های سنگین بر روی غلتکها بوده است. تا کنون عیوب متعددی مورد بررسی قرار گرفته اند و در شرایط عادی، هیچکدام به تنهایی باعث شکست محور نبوده اند. عیوب ناشی از ساخت قطعه یا وجود نقص در ساختار متالورژیکی محور، زمینه مناسبی را برای شکست دارا هستند و گشتاور اولیه استارت که چندین برابر گشتاور نامی سیستم می باشد در این بسترهای مناسب شکست، باعث به وجود آمدن خرابی میگردد. در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به قطعاتی است که دارای سطحی سخت بوده و در عین حال از چقرمگی یا مقاومت به ضربه خوبی نیز برخوردار باشند. از جمله مواردی که میتواند به آن اشاره کرد عبارتند از: میل لنگ، میل بادامک، چرخ دنده و قطعات مشابه.

این قطعات باید سطحی بسیار سخت و مقاوم در برابر سایش داشته و همچنین بسیار چقرمه و مقاوم در برابر ضربه های وارده در حین کار باشند. سخت کاری سطحی آخرین عملیاتی است که باید در مرحله پایانی ساخت قطعه و پس از انجام تمام مراحل مربوط به شکل دهی نظیر ماشینکاری و غیره انجام شود. روشهای مختلف عملیات حرارتی که به کمک آن میتوان سطح قطعات را سخت کرد، عمدتاً به دو دسته تقسیم میشوند:

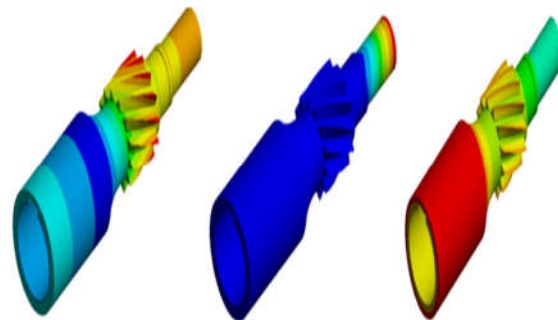
دسته اول عملیاتی که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد میشوند و به عملیات حرارتی- شیمیایی یا عملیات ترمو شیمی موسوم اند، نظیر کربن دهی، نیتروژن دهی و کربن نیتروژن دهی. دسته دوم روشهایی هستند که بدون تغییر ترکیب شیمیایی سطح و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه سطحی متمرکز شده و باعث سخت شدن سطح میشوند و به عملیات حرارتی موضعی موسوم اند. مانند سخت کردن شعله ای و سخت کردن القایی. در روش سخت کردن سطحی به کمک عملیات حرارتی موضعی مغز و سطح قطعه دارای ترکیب شیمیایی یکسان بوده و تنها عملیات حرارتی سخت کردن، بر روی سطح قطعه متمرکز میشود. از آنجایی که سطح باید کربن کافی جهت سخت شدن داشته باشد، این عملیات معمولاً بر روی فولادهای کربنی که شامل ۰/۵ تا ۰/۳۵ درصد کربن داشته باشند اعمال میشود.

همچنین وجود بارهای اضافی در انتقال نیرو نیز باعث شکست محور از ناحیه خار شده زیرا این ناحیه به دلیل وجود جای خار ضعیف تر از نواحی هم جوار خود می باشد. در شکل ۱۳ نتایج تحلیل تنش خار در حالت رعایت نشدن تolerانس نشان داده شده است.



شکل ۱۳- نتایج تحلیل تنش خار در حالت رعایت نشدن تolerانس

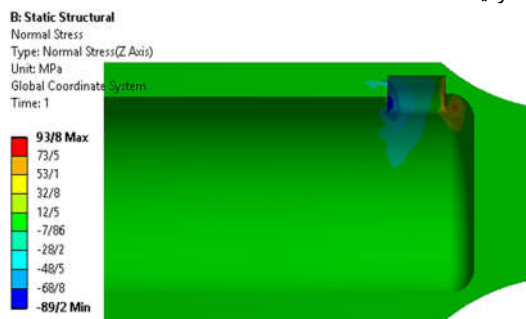
اجزای مکانیکی، بخصوص اجزا دوار نسبت به پدیده تشدید، هنگام چرخش با فرکانس طبیعی بسیار حساس هستند. زیرا در این هنگام سیستم به شدت دچار ارتعاش شده و نیروهای زیادی به اجزا وارد می شود. فرکانس طبیعی محور جعبه دنده برابر ۲۴ HZ می باشد و به همین منظور از روش اجزا محدود سه مود اول فرکانس طبیعی محور را مطابق شکل ۱۴ به دست آورده می شود.



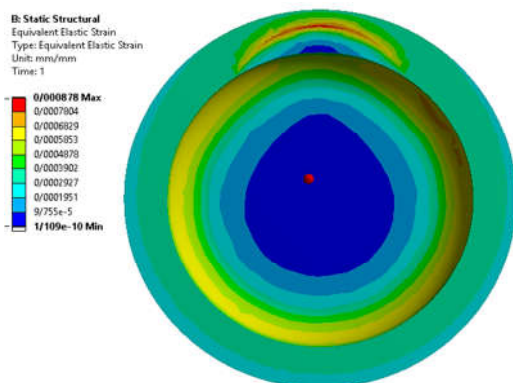
شکل ۱۴- سه مود اول فرکانس های طبیعی محور

از دیگر عیوبی که میتواند منجر به شکست محور گردد، خروج از مرکزیت محور از مرکز دوران میباشد. از مواردی که ممکن است باعث این خروج از مرکزیت شود که هنگام ساخت محور، تolerانسها رعایت نشده و مقدار لقی محور، بیشتر از حد مجاز باشد و باعث خروج از مرکزیت میشود. برای تحلیل اجزا محدود این عیب، مقدار لقی ۱ mm در نظر گرفته شد و پس از اعمال بار و شرایط مرزی، در مقدار تنش به وجود آمده تغییر ناچیزی مشاهده گردید که میتوان نتیجه گرفت این عامل باعث شکست نمی گردد. طبق گزارشات، بیشترین دفعات شکست محور هنگامی رخ میدهد که شمش بر روی ۱۸ ردیف غلتک قرار دارد و در حین حرکت رو به جلو، اپراتور به جهت روال کاری حرکت غلتک ها را متوقف و این شمش ها رو به عقب برگردانده میشوند. لازمه این اتفاق آن است که گردش متوقف و دوباره از حالت سکون شروع به چرخش نماید. با وجود شمش روی غلتکها، گشتاور اولیه جهت به چرخش درآوردن از حال سکون چندین برابر گشتاور نامی میباشد که این اندازه از گشتاور باعث رسیدن تنش محور به تنش تسلیم و شکست محور میگردد. با شکستن یک یا چند محور، بار اضافه جهت غلتک بین سایر غلتکها تقسیم شده و باعث اضافه بار روی آنها میگردد و باعث شکست زودرس آنها میشود. برای یافتن

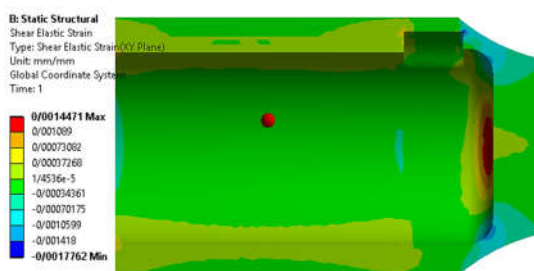
برابر گشتاور در حالت کاری بدون بار ۵۰ Nm می‌باشد. عمر خستگی محور در اشکال محاسبه گردید. در این اشکال پس از محاسبه تنش نرمال و کرنش‌ها در نقطه بحرانی، برای تخمین عمر خستگی از معیار اسمیت-واتسون-تایپر، مقدار این عمر برابر $۱۰^۲ \times ۹۵$ سیکل محاسبه گردید.



شکل ۱۶- تنش نرمال در حالت گشتاور اولیه ۲۰ برابر گشتاور نامی



شکل ۱۷- کرنش در حالت گشتاور اولیه ۲۰ برابر گشتاور نامی



شکل ۱۸- کرنش برشی در حالت گشتاور اولیه ۲۰ برابر گشتاور نامی

در ادامه به جهت اعتبار سنجی و مقایسه نتایج عمر خستگی با استفاده از سایر روش‌های تخمین عمر و روش اجزا محدود، عمر محاسبه شده از تحلیل اجزا محدود مطابق شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌گردد.

در این روش تنش‌های فشاری استحکام خستگی قطعه را افزایش میدهد. برای بدست آوردن ساختار و خواص مکانیکی مناسب (چقرمگی خوب) در مغز قطعاتی که به روش عملیات حرارتی موضعی سخت میشوند، آنها را باز پخت و یا نرماله میکنند، سپس با حرارت دادن موضعی، سطح قطعات را آستنیته کرده و بلافاصله سریع سرد میکنند. سطح و مغز در این قطعات معمولاً توسط یک لایه از یکدیگر جدا شده و به این ترتیب احتمال پوسته شدن به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش مییابد. عملیات سخت کردن سطحی به کمک حرارت دادن موضعی به دو روش امکان پذیر است:

- ۱- سخت کردن شعله‌ای
- ۲- سخت کردن القایی

در کارخانه گروه ملی فولاد ایران، جهت سخت کاری چرخ دنده‌های محور، کل قطعه را سخت کاری سطحی کرده که این امر باعث سختی و شکنندگی تمام قسمت‌های آن میشود. در حالی که تنها چرخ دنده‌ها نیاز به سخت کاری دارند و همین امر باعث میشود این تردی و شکنندگی در حین بار اضافه، موجبات شکست محور را فراهم گرداند. به همین جهت یکی از راه‌کارهای که در این زمینه پیشنهاد میشود این است که به وسیله سختی سطحی القایی فقط قسمت چرخ دنده حرارت داده شده و سایر قسمت‌ها بدون تغییر باقی بمانند.

۴-۳- عمر خستگی

پس از انجام تحلیل‌های تنش در حالات مختلف بارگذاری و بررسی عیوب ممکن، میبایست تخمین عمر خستگی شافت پس از تحلیل تنش با استفاده از مدل خستگی اسمیت-واتسون-تایپر، مور و، فاطمی-سوشی و لیو انجام میشود. به همین منظور مشخصات خستگی فولاد AISI 4140 مطابق جدول ۶ آورده شده است.

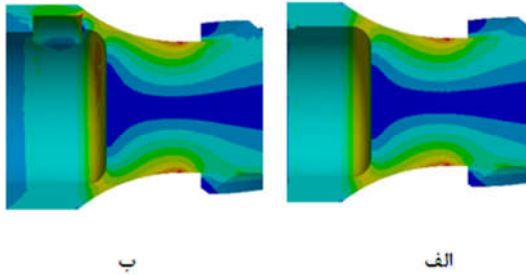
جدول ۶- ضرایب خستگی فولاد AISI 4140

σ_f' (MPa)	b	ϵ_f'	c
ضریب مقاومت خستگی	نمای مقاومت خستگی	ضریب شکل پذیری خستگی	نمای شکل پذیری خستگی
۱۸۲۵	-۰/۰۸	۱/۲	-۰/۵۹

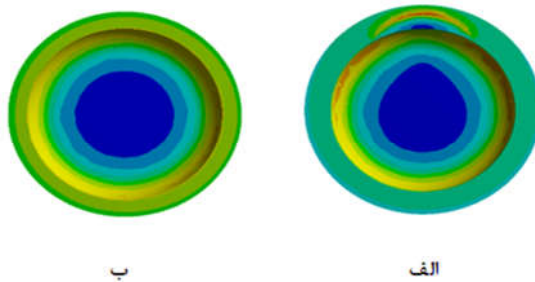
برای تخمین عمر خستگی از معیار اسمیت-واتسون-تایپر، مور و، فاطمی سوشی و لیو مقادیر تنش نرمال و کرنش را از تحلیل تنش اجزا محدود به دست آورده میشود. پس از حل عمر به دست آمده از نتایج روابط تحلیلی و اجزا محدود، عمر نامتناهی بوده و این نشان دهنده این امر است که محور جعبه دنده در شرایط عادی کارکرد خود، دچار شکست خستگی نمیشود و شکست‌ها زمانی رخ می‌دهند که به دلیل خستگی‌های کم چرخه ناشی از گشتاور اولیه به چرخش در آوردن غلتک‌ها در حالتی که شمش روی آن قرار دارد و یا بر اثر ضعف ساخت و آلیاژ محور باشد. پس از محاسبه عمر خستگی در حالتی که محور بدون مشکل و در حالت عادی، عمر نامحدود به دست آمد. حال درحالتی که با فرض گشتاور اولیه ۲۰ برابر گشتاور نامی باشد، عمر خستگی محور در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ محاسبه میگردد. با فرض اینکه گشتاور اولیه ۲۰ برابر گشتاور نامی باشد، انتخاب این عدد به عنوان فرض اولیه به دلیل اینکه شکست در ۲۴

بارگذاری مجدد و شرایط مرزی مقادیر توزیع تنش در حالت عادی کار کرد در شکل های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است.

همان گونه در شکل ۲۱ و ۲۲ مشاهده می گردد با حذف فضای خالی درون محور، تمرکز تنش قابل ملاحظه ای که در صورت وجود این فضا به وجود آمده بود و اغلب شکست ها رو موجب گردیده بود، از بین رفته و توزیع تنش یکنواخت در محور به دست می آید.



شکل ۲۱- نمای جانبی توزیع تنش در محور، (الف) حالت با فضای خالی، (ب) حالت بدون فضای خالی



شکل ۲۲- نمای روبرو توزیع تنش در محور، (الف) حالت با فضای خالی، (ب) حالت بدون فضای خالی

۵- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق بررسی علل شکست محور جعبه دنده هدایت شمش کارخانه فولاد سازی در شرکت گروه ملی صنعتی ایران با استفاده از روابط تحلیلی و اجزا محدود مورد مطالعه و بحث قرار گرفت. در ابتدا به دلیل نبود نقشه شرکت سازنده این محور، محور مورد نظر اندازه گیری شده و در نرم افزار سالیدورکز مدل سازی و سپس جهت تحلیل تنش و تخمین عمر خستگی به محیط Ansys وارد گردید و در نهایت از سطح شکست محور عکسبرداری الکترونیک صورت پذیرفت. طی سوالاتی که از اپراتورهای این قسمت صورت گرفت، سناریوهای احتمالی که منجر به شکست می شود را مورد بحث و بررسی قرار گرفت. به این منظور با داشتن مشخصات الکترو موتور و دور کاری آن، مقدار بارهای وارده به محور محاسبه گردید. سپس با اعمال بارها و شرایط مرزی در محیط اجزا محدود، توزیع تنش در محور مشخص گردید که با توجه به تنش تسلیم فولاد مورد نظر، این محور دچار شکست و یا خستگی ناشی از آن نمیشود. در مرحله بعد به بررسی عیوب ناشی از ساخت و طراحی پرداخته شد که هر کدام از این عیوب به تنهایی دلیل شکست نبوده ولی محل مستعدتری را برای ایجاد



شکل ۱۹- عمر خستگی از روش اجزا محدود بر اساس معیار SWT



شکل ۲۰- عمر خستگی از روش اجزا محدود بر اساس معیار مورو

عمر به دست آمده از حل اجزا محدود محدود به روش SWT و مورو برابر $10^2 \times 55$ سیکل و $10^2 \times 78$ سیکل می باشد که در جدول ۷ مقایسه ای بین روش های انجام شده نسبت به روش SWT، صورت پذیرفت.

جدول ۷- مقایسه عمر بین روش های اجزا محدود و معیارهای عمر خستگی در گشتاور اولیه ۲۰ برابر گشتاور نامی

معیار	تحلیلی (سیکل)	SWT (کل)	مورو (کل)	مورو تحلیلی (سیکل)	مورو اجزا محدود (کل)	فاطمی - سوشی (کل)	لیو (سیکل)
عمر	$10^2 \times$	$10^2 \times 95$	$10^2 \times 78$	$10^2 \times 46$	$10^2 \times 127$	$10^2 \times 112$	$10^2 \times$
اختلاف (%)		۸۱	۴۲	۱۶	۱۳۰		۱۰۳

۴-۴- حذف فضای خالی خار کلید در محور

مهم ترین عیب ساختی که در محور جعبه دنده باعث ایجاد ناحیه ای مناسب جهت تمرکز تنش میگردد، فضای خالی درون محور که ناشی از ایجاد کلید در آن بود به وجود می آمد. وجود چنین منطقه تنش زایی در نزدیکی پله محور، باعث ایجاد فضایی مناسب جهت شکست میباید که در مواقع به وجود آمدن بیش بار، این تمرکز تنش به آسانی باعث شکست محور میگردد. پس یکی از بهترین راهکارهای مقابله با شکست، حذف کردن این فضای خالی میباید. در ادامه توزیع تنش محور را در حالت عادی و بیش بار از حل اجزا محدود مورد بررسی قرار میگیرد. برای این منظور می توان از دستگاه تراش کاری دیگری که این فضای خالی را بسیار کوچکتر از حالت اولیه، ایجاد میکند، استفاده کرد و تا حد امکان این فضا خالی را از پله محور دور نمود. به همین منظور به جهت تحلیل اجزا محدود، پس از

۶- مراجع

- [۱] باهري عليرضا، خدري عيسي، تجزيه و تحليل شكست در شافت گيربكس هاي سنگين خط نورد گرم ميلگرد، دومين كنفرانس سراسري توسعه محوري مهندسي عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، ۱۳۹۴.
- [۲] مرادی مجتبی، صبور محمد حسین، خسروجردي محسن، مطالعه و آنالیز شكست خستگی محور ۱۳۰ واگن های باری، ششمین كنفرانس سالانه دانشجویی مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.
- [۳] ابراهیمی علیرضا، محبوبی بهرنگ، شعراي نجاني حسين، بررسی علت شكست میل لنگ پمپ جابجایی مثبت P-1401 شرکت ایرانول، دومین كنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.
- [4] Hui Zhao L., Xing Q., Wang J., Li S., Zheng S., Failure and root cause analysis of vehicle drive shaft, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 99, No. 3, pp. 225-234, 2019.
- [5] Liu Y., Lian Z., Xia C., Qian L., Liu S., Fracture failure analysis and research on drive shaft of positive displacement motor, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 106, No. 13, pp. 104-145, 2019.
- [6] Vukelic G., Pastorcic D., Vizentin G., Failure analysis of a crane gear shaft, *25th International Conference on Fracture and Structural Integrity*, Procedia Structural Integrity 18, 406-412. 2019.
- [7] Santosh D., Hariom D., Chandrababu S., Failure analysis of a carbon steel roller shaft of continuous pad steam machine, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 3, pp. 118-128, 2019.
- [8] Bhaumik S K, Rangaraju R, Parameswara M A, Venkataswamy, M A, Fatigue Failure of a Hollow Power Transmission Shaft, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, No. 4, pp. 457-467, 2002.
- [9] Smith K. N, Watson P, Topper, T. H, A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, *Journal of Materials*, Vol. 5, pp. 767-778, 1970.
- [10] Socie, D. F. and Morrow, J. D. Review of contemporary approaches to fatigue damage analysis. In: Risk and Failure Analysis for Improved Performance and Reliability (Edited by J. J. Burke & V. Weiss), Plenum Publication Corp., New York, NY, pp. 141-194. 1980.
- [11] Fatemi, A, Socie, D. F, A Critical Plane to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-Of-phase Loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 149-165, 1988.
- [12] Liu K.C., A Method Based on Virtual Strain-Energy Parameters for Multiaxial Fatigue, *Advances in Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 1191, D. L. McDowell and R. Ellis Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 67-84. 1993.

خرابی به وجود می آورند و در نهایت، بیشترین شکست در شروع استارت و هنگامی که شمش روی غلتک قرار دارد اتفاق می افتد. برخی از نتایج این تحقیق به صورت زیر ارائه می گردد:

۱- صحه گذاری بین نتایج تحلیل تنش از روش اجزا محدود و روابط تحلیل صورت گرفت که درصد اختلاف ناچیزی با یکدیگر داشته و قابل قبول میباشد.

۲- شعاع گردی پله محور در حالت های کمتر از حد طراحی شده باعث ضعیف شدن محور در ناحیه پله و همچنین در مورد گشتاور اولیه به چرخش در آمدن غلتک ها با وجود شمش روی آنها، می تواند منجر به شکست محور از ناحیه پله گردد.

۳- وجود شیارهای ناشی از تراش چرخ دنده مار پیچ روی پله محور به تنهایی عامل شکست نمی باشد ولی باعث ضعیف شدن محور در این ناحیه شده و همین امر باعث می گردد در هنگام وارد شدن بارهای ناگهانی همچون گشتاور اولیه شروع به چرخش هنگامی که شمش بر روی غلتک ها قرار دارد، محل مستعدی جهت خستگی و نهایتا شکست را داشته باشد.

۴- وجود فضای خالی درون محور در حالت عادی و در حالاتی که اندازه ابعاد آن بیشتر از حد معمول باشد می تواند محل مستعدی جهت خستگی و شکست در حالت گشتاور اولیه باشد.

۵- عمر خستگی محور با دو معیار اسمیت واتسون تاپر و مورو و همچنین روش اجزا محدود، در حالت بدون عیب و کارکرد عادی، بسیار طولانی است و به تنهایی عامل شکست نمی باشد.

۶- خروج از مرکزیت محور در حین دوران باعث افزایش تنش ناشی از این عیب باعث شکست نمی شود.

۷- جای خار محور جعبه دنده در حالت بدون عیب، دچار تمرکز تنش و شکست نمی گردد. اما در صورتی که اندازه این جای خار بیش از حد طراحی شده باشد، می تواند محل مستعدی جهت خستگی و شکست باشد.

۸- تیرانس بین محور الکترو موتور و محور جعبه دنده در حالت استاندارد، موجب تمرکز تنش نمی گردد ولی در حالتی که این تیرانس کمتر از اندازه استاندارد باشد، میتواند موجب تمرکز تنش و شکست گردد.

۹- فرکانس های طبیعی محور حین کارکرد محاسبه و با فرکانس کاری مقایسه گردید و فاصله آنها زیاد و قابل قبول بوده و عامل تشدید باعث شکست نمی باشد.

۱۰- عمرهای محاسبه شده از روش های اجزا محدود و تحلیلی درصد اختلاف کمی با یکدیگر داشته و قابل قبول می باشد.

۱۱- حذف فضای خالی درون محور، باعث کاهش قابل ملاحظه تمرکز تنش در محور و در نتیجه شکست کمتر گردید.

۱۲- جهت سخت سازی سطحی چرخ دنده محور، استفاده از روش القا، تنها قسمت های چرخ دنده دما داده شده و سخت می گردد و از سخت سازی کل قطعه جلوگیری به عمل می آید.