



ضریب شدت تنش در چرخ دنده ترک دار فولادی و ماده هدفمند در جعبه دنده خودرو

محمد رحیم ترشیزیان^{۱*}، مهدی ملازم^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران، torshizian@mshdiau.ac.ir
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران، molazem.mahdi@rocketmail.com
^{*}نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۵۱۱-۶۶۳۹۶۱۱

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۲ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۰ آذر ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

ضریب شدت تنش (ض.ش.ت.)

ریشه دندانه دنده

رشد ترک

در این تحقیق، شروع ترک و نفوذپذیری آن، در دندانه چرخ دنده برای جعبه دنده خودرو بررسی شده است. دندانه‌ای با ترکی در ریشه آن، در نرم افزار ABAQUS شبیه سازی شد. سپس ضریب شدت تنش (ض.ش.ت.) در نوک ترک برای حالت های مختلف بارگذاری محاسبه شد. ض.ش.ت. در نوک ترک برای چرخ دنده ساخته شده از فولاد و چرخ دنده ساخته شده از ماده هدفمند به دست آمده و باهم مقایسه شده اند. تأثیر موقعیت بار دندانه، هندسه ریشه دندانه و نفوذ توزیع بار روی پهلوی دندانه بر ض.ش.ت. بررسی شده است. نتایج عددی نشان می دهند که ترک می تواند از مکان های متفاوتی در ریشه دندانه آغاز و در امتداد مسیرهای خاص رشد نماید؛ به طوری که با در نظر گرفتن ترک به اندازه مشخص در ریشه دندانه می توان نشان داد که ض.ش.ت. حالت اول بیشترین مقدار را نسبت به ض.ش.ت. حالت های دوم و سوم به خود اختصاص می دهد، لذا بیشتر شکست ها برای چرخ دنده ها در حالت اول است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

چرخ دنده جزئی از اجزاء دستگاه است که برای انتقال حرکت و توان از محور خود به چرخ دنده‌های دیگر و در نتیجه به محور دیگر از طریق دندانه‌هایش بکار می‌رود. بر طبق تحقیق آماری لویکی^۱ [۱] در موتور احتمال خرابی چرخ دنده‌ها حدود ۶۰٪ و بعد از آن احتمال خراب شدن یاتاقانهای غلتشی و لغزشی بترتیب ۲۰٪ و ۱۰٪ می‌باشند. به همین دلیل عیوب چرخ دنده‌ها ردیابی شد و روش‌های بسیاری برای ردیابی عیوب آن‌ها ارائه گردید. این عناصر تحت بارهای ویژه‌ای قرار می‌گیرند و سطح آن‌ها دائماً به وسیله فشارهای تماسی بارگذاری می‌شوند. بنابراین باید دقیق آزمون شود و مقدار دوام آن در مقابل عوامل مختلف شکست بررسی شود.

کارهای تحلیلی بر روی چرخ دنده‌های دارای ترک به سال ۲۰۰۱ بر می‌گردد، هنگامی که لویکی [۱]، پیشگویی‌هایی مبنی بر رشد ترک در دندانه‌های تحت بار و حرکت، به روش تحلیلی بیان نمود. قبل از آن تحقیقات گسترده‌ای برای پراکندگی گسترش ترک در ریشه چرخ دنده‌های صنعتی انجام گرفته بود که از آن جمله می‌توان به فعالیت‌های کانتا^۲ و همکاران در زمینه شکست دنده‌ها اشاره نمود [۲]. جونگ^۳ و همکاران [۳] نیز به تحلیل تنش در طراحی دنده‌های انتقال قدرت با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار انسیس پرداختند و اعلام داشتند که بار دندانه‌ها به طور مداوم در حال تغییر است و در هر بار که دنده‌ها شروع بکار می‌کنند، این بارگذاری متغیر تکرار خواهد شد.

مهم‌ترین مشخصه مقدماتی از دو دنده‌ای که بار تماسی در بین آن‌ها قرار دارد این است که هر کدام در طول سطح دندانه‌ها حرکت دارند، لذا در مدتی که دندانه‌ها باهم در تماس‌اند ما بین دنده‌های در حال چرخش، ناحیه تماسی از بین بی‌نهایت نقطه در سطح دندانه‌ها از ریشه دندانه به قسمت سر آن حرکت می‌کند. ناحیه تماسی مورد نظر تحلیلی در چرخ دنده‌ها به سه طریق گسترده، مرکزی و یک طرفه در ضخامت دندانه اعمال می‌گردد، لذا مطلوب آن است که لبه‌های دندانه‌ها به دلیل خطر شکست زودرس، در تماس نباشند [۴،۵].

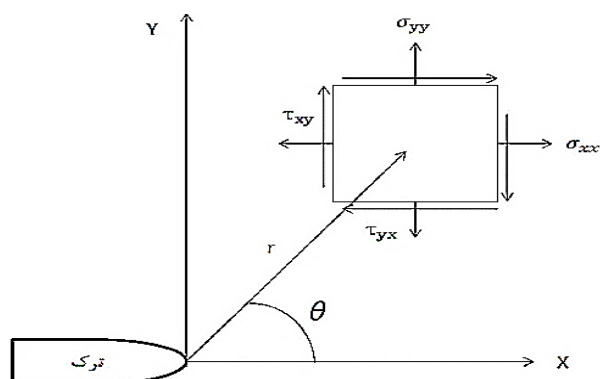
در حین تماس دنده‌ها باهم، بارهای نوسانی بزرگ و یا حتی بارهای گشتاوری که به دنده‌ها اعمال می‌شوند به صورت کاملاً پایدار خواهند بود. موقعیت بار در سطح دندانه‌ها باعث می‌شود تنش‌های اعمالی را به طور مستقیم و بر روی ریشه دندانه‌ها به طور غیرمستقیم مشاهده نمود. بنابراین تنش بیش از حد در ریشه دنده‌ها را باید به عنوان خطری جدی در دنده‌ها در نظر گرفت [۶]. دنده‌های به کاررفته در خودروها معمولاً به وسیله صفحات سخت شده فولادی ساخته می‌شوند به طوری که لایه‌های این سطوح باید در برابر بارهای تماسی و خمشی مقاوم باشند.

در دندانه‌های دو چرخ دنده که با همدیگر درگیر می‌شوند، در محل ریشه دندانه تنش خمشی بیشینه است، بنابراین بارگذاری‌های بیش از حدی که در ریشه دندانه اعمال می‌شود می‌تواند خطرناک تر از بارگذاری‌های سطح دندانه‌ها باشد. اگر به خاطر تنش‌های خستگی و یا عوامل دیگری در ریشه دندانه ترکی ایجاد شده باشد، زمانی که تنش خمشی در دو چرخ دنده‌ای که باهم درگیرند از حد معینی تجاوز کند ترک در ریشه دندانه بسرعت رشد خواهد کرد و در پی آن موجب شکست دو چرخ دنده خواهد شد [۷،۸].

در این تحقیق یک دندانه ترکدار در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است و انواع مختلف بارگذاری متداول در چرخ دنده‌ها شامل بارگذاری یک طرفه، بارگذاری مرکزی و بارگذاری گسترده بر روی این دندانه اعمال گردیده است. به توسط نرم‌افزار ضرایب شدت تنش در عرض ضخامت دندانه تعیین گردیده است، همچنین به منظور کاهش دادن ضرایب شدت تنش، حالت ماده هدفمند را علاوه بر حالت فولادی برای چرخ دنده بکار گرفته‌ایم. به عبارت دیگر، نوآوری کار در این مقاله، بررسی و تحلیل چرخ دنده ساخته شده از ماده هدفمند است و همچنین محاسبه ضرایب شدت تنش متعلق به آن، که با حالت فولادی مقایسه گردیده است.

(۲) شرح نفوذ تنش اطراف نوک ترک

اغلب دندانه‌های چرخ دنده‌های وسایل نقلیه در بیشتر مواقع عمر کاری خود تحت خمش قرار می‌گیرند. برای مثال، در خودروهای معمولی، جهت گردش میل‌لنگ موتور همیشه ثابت است به همین دلیل چرخ دنده‌هایی که در جعبه دنده قرار دارند همیشه در یک جهت بارگذاری می‌شوند. لذا میدان تنش اطراف نوک ترک را برای دو چرخ دنده‌ای که باهم درگیرند می‌توان هم تراز با میدان تنش اطراف نوک یک ترک طولی در صفحه دانست که در مسیر مستقیم رشد می‌کند [۱۱]. اولین گام در بررسی ترک، تحلیل تنش قطعه ترکدار است که با آن بررسی رشد ترک و حساسیت قطعه به ترک امکان‌پذیر می‌شود [۱۱-۱۲]. شکل ۱ مؤلفه‌های تنش روی یک جزء در نزدیکی نوک ترک را نشان می‌دهد.



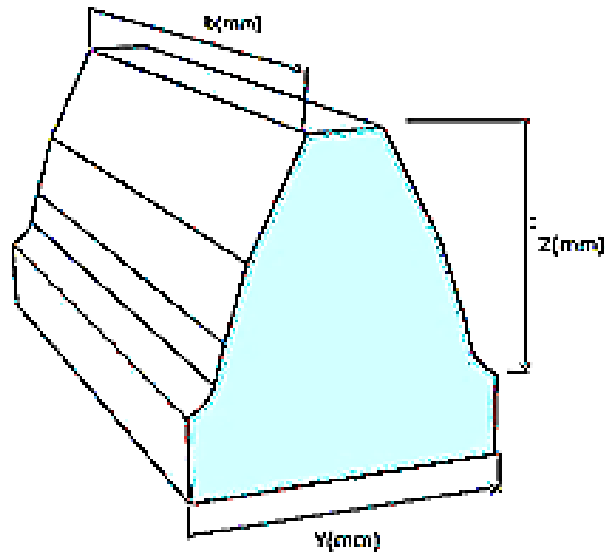
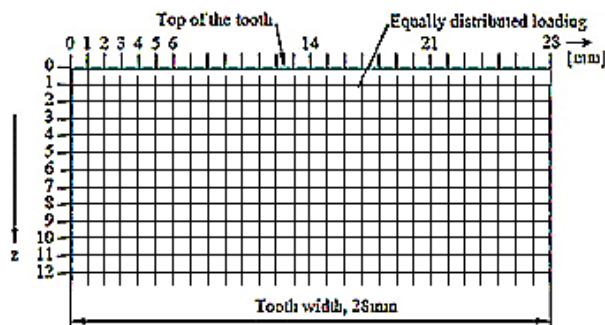
شکل ۱: مختصات محلی در نوک ترک [۱۱]

1 Lewicki

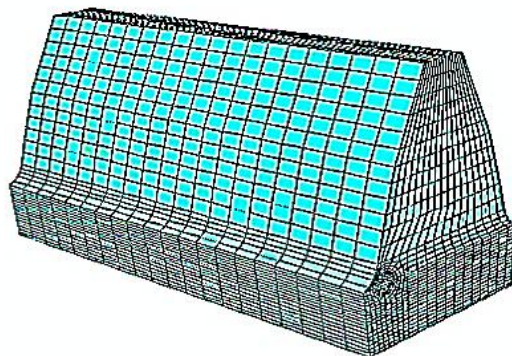
2 Kaneta

3 Jong

مطابق شکل ۲ بررسی می‌کنیم [۲۰]. به دلیل وجود تأثیرات بیشینه تنش در منطقه ریشه دندانه چرخ‌دنده مطابق شکل ۳ باید این منطقه از شبکه بندی ویژه‌ای برخوردار شود. اگر از روش اجزاء محدود برای تعیین تنش‌ها در نوک ترک استفاده شود، باید جزء خاصی که قادر به شبیه‌سازی تغییرات تنش باشد به کار گرفته شوند. در این قسمت، اجزای بیست گرهی استاندارد با فرمول‌بندی هم متغیره در اطراف نوک ترک برای چرخ‌دنده استفاده شده است و سعی می‌شود که با جابه‌جایی مناسب نقاط وسط اضلاع، جزئی تولید گردد که توانایی شبیه‌سازی حالت تنش را در نوک ترک داشته باشد.



شکل ۲: متغیرهای اولیه چرخ‌دنده [۲۰]



شکل ۳: نحوه شبکه‌بندی در ریشه دندانه

برای حالت کرنش صفحه‌ای مؤلفه‌های تنش در نزدیکی نوک ترک را می‌توان برای چرخ‌دنده به صورت آتی بیان کرد [۱۳]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I \cos \frac{\theta}{2}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} + \frac{K_{II} \sin \frac{\theta}{2}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} -\left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \\ \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cot \frac{\theta}{2} - \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که K_I و K_{II} بترتیب ض.ش.ت. در حالت اول و دوم می‌باشند. همچنین این معادله نشان می‌دهد که در نوک ترک ($r = 0$) تنش‌ها حالت ویژه دارند و غیرقابل تعریفند. معادله (۱) برای حالت کرنش صفحه‌ای (در جهت عمود بر صفحه w ، کرنش صفر است) صادق است. لازم است تأکید شود که وقتی r به سمت صفر میل می‌کند، این معادلات درست‌تر اند و هر چه r بیشتر گردد، صحت این معادلات کاهش می‌یابد [۱۴-۱۸].

۳) روش‌های عددی تحلیل شکست

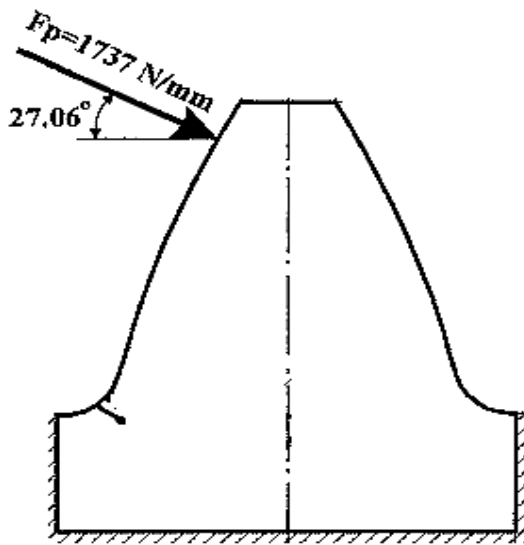
از روش‌های عددی که در مکانیک شکست استفاده می‌شوند، می‌توان به روش اجزای محدود، روش اجزاء مرزی و روش اجزای محدود توسعه‌یافته اشاره کرد. روش اجزای محدود، بر مبنای تقسیم کل محیط جسم ترک‌دار به عناصر کوچک با اشکال نسبتاً ساده، و تقریب میدان تغییر مکان در این نواحی است درحالی‌که روش اجزاء مرزی بر اساس تقسیم مرزهای جسم به اجزایی و تقریب حل در ناحیه جسم به گونه‌ای که شرایط مرزی را ارضاء نماید، بنا گردیده است. روش اجزای محدود به علت کلیت و در دسترس بودن انواع نرم‌افزارهای عمومی متداول تر است [۱۹]. نکته حائز اهمیت در بحث شکست دندانه چرخ‌دنده‌ها این است که برای سهولت کار تنش‌های باقی‌مانده روی سطح که باعث ایجاد و رشد ترک بر روی لایه‌های سطحی می‌باشند در نظر گرفته نخواهند شد، لذا ض.ش.ت. برای ترک سطح دنده عملیات حرارتی شده نسبت به حالتی که سطح دنده‌ها این عملیات را طی نکرده می‌تواند کوچک‌تر باشد [۲۰]. در تحقیق حاضر، مقدار ض.ش.ت. در یک دندانه مطابق شکل (۲) دارای ترکی در ریشه آن، محاسبه شده است. ابعاد دندانه $b = 28 \text{ mm}$ ، $z = 10 \text{ mm}$ و $y = 12 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است [۲۰].

شبیه‌سازی ریشه دندانه می‌تواند خصوصیات بارز دنده را در بارگذاری‌های مختلف بررسی نماید. در تحلیل عددی شکست دنده‌ها ضخامت دندانه‌ها نیز همواره برای تعیین عوامل مؤثر بر ض.ش.ت. مؤثر است و باید بررسی شود. با استفاده از نرم‌افزار چرخ‌دنده فولادی را با ضریب ارتجاعی 2.1×10^5 مگاپاسکال و ضریب پواسن ۰.۳

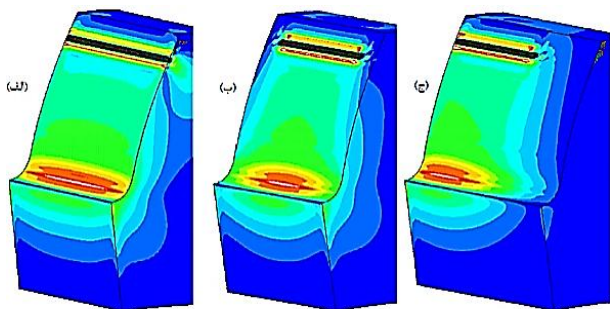
در ادامه مشاهده می‌شود که با این آزمون و ترکیب مناسب بارگذاری، گشتاور خمشی وارد بر دندانه مشخص می‌شود و بقای آن تضمین می‌گردد. موقعیت این سه نوع بارگذاری بر سطح دنده‌ها، مطابق شکل ۷ خواهد بود [۱۳].

۳-۱) توزیع تنش بارگذاری یک طرفه در دنده‌ها

مطابق این نظریه تنش توزیع شده فون میسر در ریشه دندان، باید موقعیتی موازی با موقعیت بارگذاری شکل ۸ داشته باشد. این اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که موقعیت ترک اولیه با محور طولی دنده موازی نخواهد بود، شاید این پدیده وسیله توزیع یک طرفه بار در سطح دنده‌ها باشد. بعد از اینکه ترک اولیه ظاهر گردید، مقدار سختی دنده‌ها تغییرات چشمگیری خواهد داشت که این تغییرات در نهایت به تغییرات توزیع شده بار منجر خواهد شد. این نوع بارگذاری عموماً به دلیل متوازن نبودن دنده‌ها نسبت به هم و یا محور ایجاد می‌گردد. لذا مناسب است که چرخ‌دنده‌های خودرو از نظر خستگی خمشی در یک جهت آزمون شوند.



شکل ۶: موقعیت اولیه ترک و نحوه بارگذاری [۲۲]



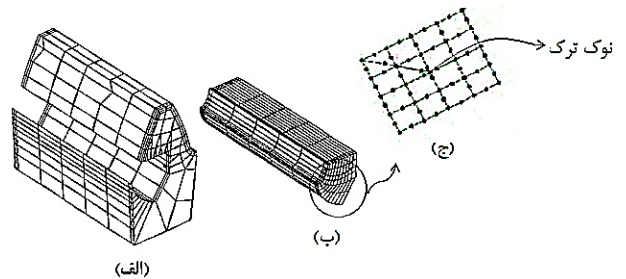
شکل ۷: نحوه بارگذاری دنده؛ (الف) گسترده، (ب) مرکزی و (ج) یک طرفه

جزء انتخابی برای شبیه‌سازی شکست ریشه دندان در نرم‌افزار ABAQUS جزء C3D20R است. مطابق شکل ۴ این جزء یک جزء سه‌بعدی با بیست گره است که از روش مجموع کاهش‌یافته برای حل استفاده می‌کند. این جزء در هر گره دارای سه درجه آزادی در جهت محورها X، Y و Z است [۲۰].

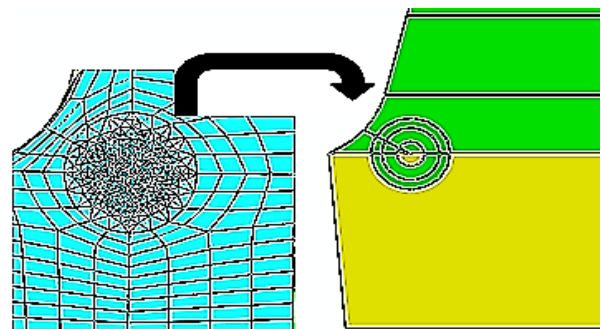
با انتخاب اجزای بیست گرهی برای چرخ‌دنده قادر به محاسبه میدان تغییر مکان در حجم مکعب هستیم و به جواب دقیق‌تری از متغیرهای شکست دست پیدا خواهیم کرد. در نرم‌افزار ABAQUS، این اجزا بهترین اجزا برای تحلیل دقیق قطعات مختلفند. همواره می‌توان صحت تحلیل اجزای محدود را با ریز نمودن جزء در نوک ترک مطابق شکل ۵ تا حدودی افزایش داد اما این امر می‌تواند مدت زمان طولانی را برای تحلیل به خود اختصاص دهد و از لحاظ اقتصادی، به صرفه نباشد [۲۱].

در طول حل عددی، طول ترک اولیه را به منظور بررسی تأثیر هندسه دنده بر متغیرهای مکانیک شکست برابر $a_0 = 1 \text{ mm}$ در نظر می‌گیریم. این مقدار بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آید [۲۲، ۲۳]. مطابق شکل ۶، بار ۱۷۳۷ نیوتن بر میلی‌متر تحت زاویه، در تحلیل چرخ‌دنده‌ها در نظر گرفته شده است که این مقدار نیز از نتایج آزمایشگاهی استخراج شده است [۲۲-۲۴].

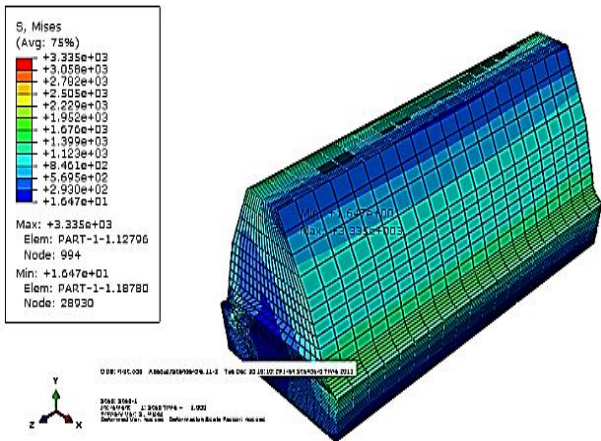
روش اساسی در آزمون خمشی چرخ‌دنده بخصوص چرخ‌دنده ساده این است که آن را مطابق شکل ۷، مقید سازیم که در آن صورت دندانه منظور به عنوان تیری یک سردرگیر محسوب شود و نزدیک نوک آن بارگذاری به سه صورت گسترده، مرکزی و یک طرفه انجام شود.



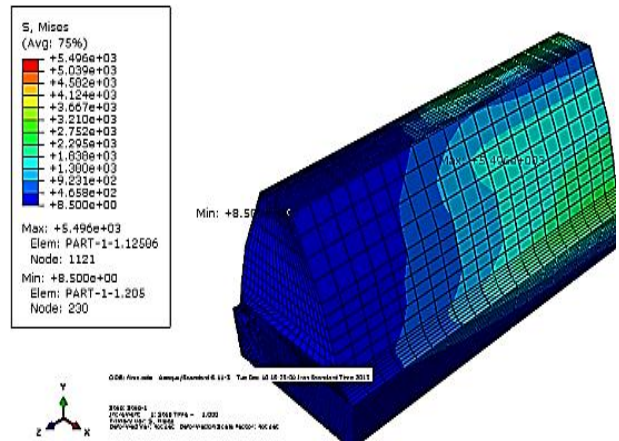
شکل ۴: ساختار ریشه دندان با نوک ترک و دانه بندی [۲۰]



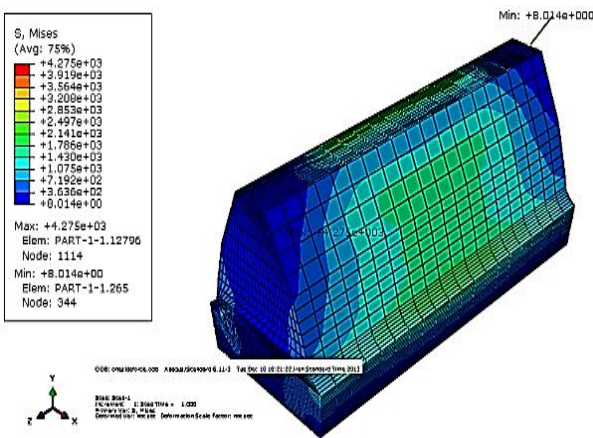
شکل ۵: نحوه تقسیم بندی و جزء بندی در ریشه دنده



شکل ۹: توزیع تنش تحت بار توزیع شده یکنواخت



شکل ۸: توزیع تنش در ریشه دندانه با بار یک طرفه



شکل ۱۰: توزیع تنش در ریشه دندانه با بارگذاری متمرکز

۳-۲) توزیع تنش بارگذاری یکنواخت

اگر بخواهیم این حالت را با حالت بارگذاری مرکزی مقایسه نماییم متوجه خواهیم شد که در این حالت چون بارگذاری به صورت گسترده است لذا شکست نیز به صورت قرینه در دو طرف ریشه چرخ دنده اتفاق خواهد افتاد. شکل ۹ توزیع تنش فون میسر دنده و همچنین مسیرهای به وجود آمدن ترک را در دو طرف سطح با این بارگذاری نشان می دهد. بعد از آنکه ترک اولیه در ریشه دندانه ایجاد شد، با افزایش تنش و شکستن سطح دنده‌ها این ترک رشد پیدا خواهد نمود و این عمل تا جایی که به نوک دنده در طرف دیگر دندانه برسد، ادامه پیدا خواهد کرد [۱۳]. در تحلیل عددی با قرار دادن قسمت سر دندانه تحت بارگذاری یکنواخت به جواب دقیق تری از نتایج شکست در مقایسه با تحلیل عددی خواهیم رسید.

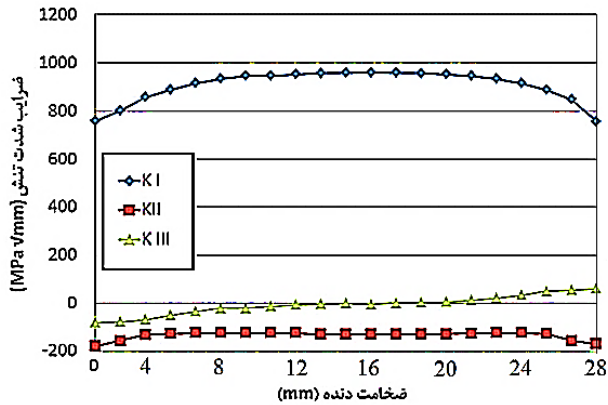
۳-۳) توزیع تنش با بارگذاری متمرکز

بیشترین نقطه مشترک دنده‌ها در حین درگیر شدن باهم، بارگذاری‌های قسمت میانی آن‌ها است که در شکل ۱۰ کاملاً مشهود است. این بارگذاری‌ها در قسمت میانی سطح دنده‌ها وارد می شود و چون در عمل به صورت نیروی متمرکز در سطح دنده در نظر گرفته می شود، لذا کمترین تنش فون میسر را در ریشه دندانه ایجاد می کند. مطابق این نظریه ترک اولیه زمانی ایجاد می شود که تنش بر روی سطح دنده‌ها از حد معمول فراتر رفته باشد، لذا در این حالت بیشینه تنش فون میسر در قسمت میانی ریشه دنده خواهد بود. در این حالت، ترک‌هایی که در قسمت ابتدایی ریشه مشاهده می شود، در جهت‌ها و سرعت‌های مختلفی رشد خواهند نمود و همواره مسیر رشد ترک به صورت خط مستقیم نخواهند بود [۱۴].

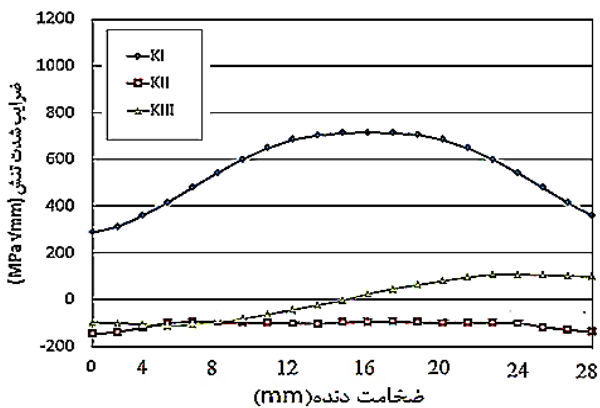
۳-۴) موقعیت ترک در ریشه دندانه

راه‌اندازی یک ترک در ریشه دندان، مهم‌ترین مرحله فرایند خستگی و شکست است. در واقع موقعیت ترک خستگی به ریزساختار مواد، بارگذاری‌های ظاهر شده و هندسه دنده وابسته است. همواره در بررسی تحلیل شکست دنده‌های خودرو فرض می شود که ترک اولیه، در منطقه‌ای که تنش‌های اصلی آن منطقه بیشینه است واقع شده است. دلیل عمده آن نیز این است که در این حالت بیشترین ضریب خطر را برای رشد ترک و شکست دنده در نظر می گیرند.

چندین روش برای محاسبه تنش‌های بیشینه در دندانه استفاده می شود و طراحان اغلب از استانداردهای DIN و AGMA استفاده می کنند [۲، ۱۵]. چون ریشه دنده‌ها معمولاً به صورت مکانیکی ساخته می شوند و حد تحمل قوی دارند، تا قبل از خستگی می توانند تنش‌ها را از خود دور نمایند [۱۶].



شکل ۱۲: توزیع ض.ش.ت. در عرض ضخامت دندانه فولادی حاوی ترک با بارگذاری گسترده



شکل ۱۳: توزیع ض.ش.ت. در عرض ضخامت دندانه فولادی با بارگذاری مرکزی

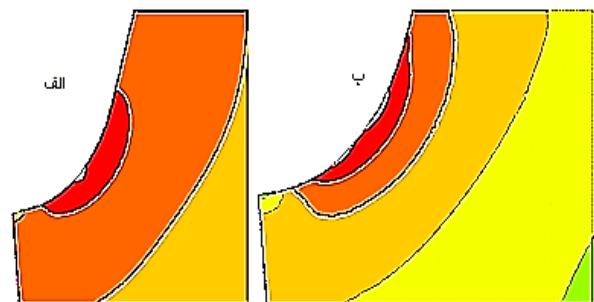
۵) مقایسه نتایج

در این تحقیق، چرخ دنده ترک دار در نرم افزار ABAQUS شبیه سازی شد. برای صحت گذاری ض.ش.ت. محاسبه شده با مقدار تجربی آن در مراجع [۱۳، ۲۳]، مقایسه می شود. در پایان تشدید تنش اطراف ترک تأیید می شود. از مقایسه ض.ش.ت. در بارگذاری گسترده مشخص است که نتایج نرم افزار ABAQUS با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان مطابقت خوبی دارد. بنابراین می توان بیان نمود که افزایش طول ترک در چرخ دنده با ترک لبه ای در ریشه باعث افزایش ض.ش.ت. خواهد شد. خطای ایجاد شده در ض.ش.ت. حالت اول وابسته به نوع شبکه بندی و حل مسئله است به طوری که اگر اندازه دانه بندی سطح چرخ دنده را ریزتر نماییم مقدار خطای ایجاد شده ناچیز می گردد. پهان^۴ [۱۳] همچنین برای بارگذاری یک طرفه و مرکزی نیز مقدار ض.ش.ت. برای حالت اول را مطابق شکل ۱۶ نشان داد. همان طور که ملاحظه می شود ض.ش.ت. نظری منطبق بر نتایج تجربی است که خود نمایانگر صحت نتایج نرم افزار است.

در شکل ۱۱- الف می توان توزیع بیشینه تنش های اصلی را برای یک شکل کامل و مطلوب از ریشه دندان نشان داد. اگر یک شکل نامطلوب ریشه دندان (شکل ۱۱- ب) در فرایند ساخت قرار گیرد منجر به موقعیت های مختلف برای تنش های اصلی می شود لذا چرخ دنده هایی که با شکل نامطلوب ساخته شده اند دارای ترک های بی شماری در قسمت ریشه دندان خواهند بود. اگر چرخ دنده به صورت مطلوب طراحی گردد تنها از یک منطقه تحت توزیع تنش قرار می گیرد و در نهایت از همان منطقه نیز ترک به وجود می آید که براحتی با عملیات سخت کاری می توان تا حدودی جلوی مسیر رشد ترک را گرفت [۱۶].

۴) تعیین ض.ش.ت. برای چرخ دنده فولادی

با در نظر گرفتن ضخامت لایه سطحی، و بارگذاری های مختلف برای چرخ دنده ای از جنس فولاد، مقدار ض.ش.ت. K_I در حالت سه بعدی سنجیده شده و با ضریب دیگر مقایسه گردیده است. این ضریب نسبت به ضریب های دیگر مقدار بیشتری دارد، لذا این عامل خطر بیشتری را برای ریشه دنده در بر خواهد داشت. از نمودارهای شکل ۱۲ می توان نتیجه گرفت که بیشتر شکست هایی که برای چرخ دنده های فولادی در بارگذاری گسترده اتفاق می افتد در اثر حالت اول خواهد بود. در حالت دوم ض.ش.ت. وابستگی نسبتاً خطی دارند و تمامی مقدارهای آن ها به صورت منفی است. در حالت سوم نیز این ضریب از قسمت ابتدایی تا قسمت های انتهایی چرخ دنده حدود صفر است که مقدار بیشینه آن در حدود $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ و در طرف انتهایی چرخ دنده است. در بارگذاری مرکزی و همچنین یک طرفه، توزیع ض.ش.ت. مطابق نمودارهای شکل ۱۳ و شکل ۱۴ خواهند بود. در این حالات ض.ش.ت. برای حالت اول برای قسمت میانی دنده ها به مراتب فراتر از قسمت های ابتدایی سطح است، لذا برای بارگذاری مرکزی، بیشینه تنش در قسمت میانی و برای بارگذاری یک طرفه در انتهای سطح دنده است.

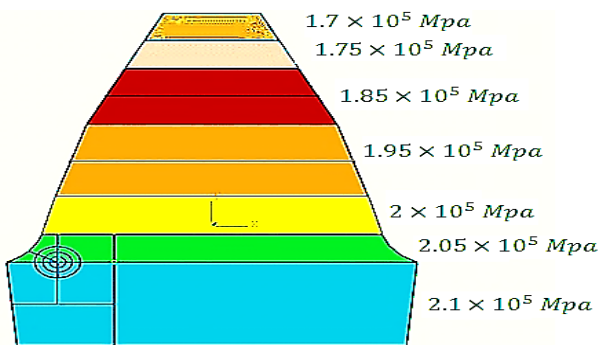


شکل ۱۱: بیشینه تنش های اصلی توزیع شده [۱۶]
(الف) هندسه ریشه دندان مطلوب و (ب) هندسه ریشه دنده نامطلوب

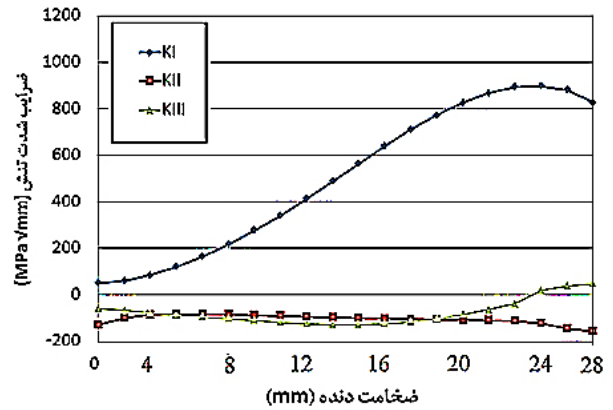
$$E_2 = E_1 e^{\beta z} \quad (2)$$

که متغیر β به صورت $\ln \frac{E_2}{E_1}$ و z ارتفاع دنده است. برای شبیه سازی این دندانه در نرم افزار ABAQUS دندانه به صورت لایه‌ای مطابق شکل ۱۷ و تعداد ۹ لایه با نسبت پواسون ۰٫۳، برای تمام لایه‌ها در نظر گرفته شده است [۲۵]. تعداد لایه‌ها در شکل ۱۷ باید طوری در نظر گرفته شوند که همگرایی در ضرایب شدت تنش مواد هدفمند و نوع فولادی دیده شود. این تعداد لایه‌ها به صورت اختیاری است و هرچه تعداد آن‌ها بیشتر در نظر گرفته شود، ض.ش.ت. حالت اول در مقایسه با فولاد مقدار کمتری دارد [۲۵]. این نکته را باید در نظر گرفت که با افزایش تعداد لایه‌ها مدت تحلیل نیز افزایش می‌یابد.

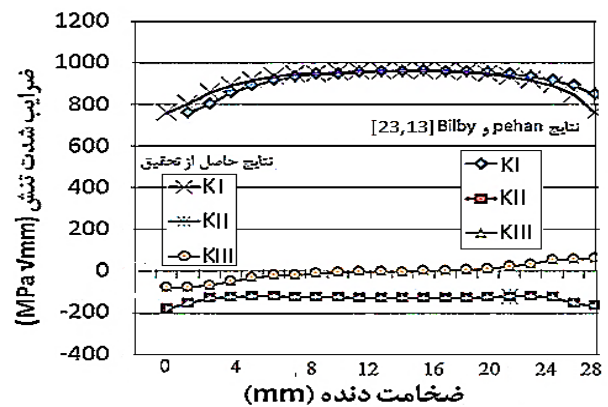
در نمودارهای بارگذاری گسترده مطابق شکل ۱۸ نشان داده شده است که بیشترین شکست در این حالت نیز وابسته به حالت اول است. اگر این حالت را با حالت قبلی مقایسه نماییم متوجه خواهیم شد که ض.ش.ت. قسمت میانی سطح دنده‌ها مقدار کمتری دارد لذا شکست به صورت ملایم‌تر در حالت اول انجام می‌گیرد. ض.ش.ت. متعلق به حالت دوم، مطابق حالت قبل در قسمت منفی قرار می‌گیرند، و ض.ش.ت. متعلق به حالت سوم نیز از قسمت منفی رشد پیدا کرده و بیشینه مقدار آن در حدود $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ خواهد بود. در بارگذاری مرکزی و همچنین یک طرفه این مقدار مطابق شکل‌های ۱۹ و ۲۰ خواهد بود. چند لایه بودن ساختار چرخ‌دنده موجب تقویت آن در بارهای مکانیکی می‌شود، لذا ترک‌ها اغلب از محل پیوند دو ماده شروع می‌شوند و به سمت قسمت‌های ضعیف‌تر ماده رشد می‌کنند. هرچه مواد انتخاب‌شده در ریشه چرخ‌دنده سختی بیشتری داشته باشد، ترک اولیه با تأخیر ایجاد خواهد شد. با انتخاب حالت ماده هدفمند برای چرخ‌دنده می‌توان ضرایب شدت تنش را برای بارگذاری گسترده، در حالتی که دو چرخ‌دنده به طور کامل و صحیح درگیر شده‌اند، نسبت به حالت فولادی پایین آورد و شکست آن را به تأخیر انداخت. برای بارگذاری مرکزی و یک طرفه مطابق شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به دلیل تماس نادرست چرخ‌دنده ض.ش.ت. برای حالت اول تغییر پیدا نخواهد کرد. برای حالت دوم و حالت سوم تغییرات ناچیزی در ضرایب شدت تنش آن‌ها دیده می‌شود که قابل صرف نظر کردن است.



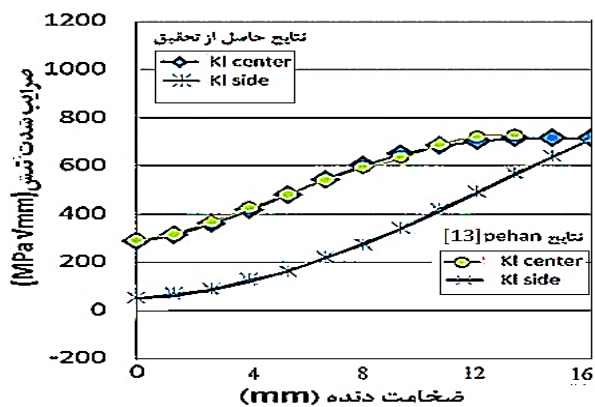
شکل ۱۷: مواد و ضریب ارتجاعی ماده هدفمند چرخ‌دنده



شکل ۱۴: توزیع ض.ش.ت. در عرض ضخامت دندانه فولادی با بارگذاری یک طرفه



شکل ۱۵: مقایسه ض.ش.ت. نظری و تجربی



شکل ۱۶: مقایسه ض.ش.ت. حالت اول برای بارگذاری یکطرفه و مرکزی فولاد

۶) تعیین ض.ش.ت. برای چرخ‌دنده ماده هدفمند

در این بخش ض.ش.ت. برای چرخ‌دنده ساخته‌شده از ماده هدفمند محاسبه شده است. مشخصات چرخ‌دنده مشابه حالت قبل است و فقط جنس آن تغییر کرده است. خواص ماده دندانه در امتداد ریشه به تاج دندانه متغیر است، به طوری که ضریب ارتجاعی در ریشه دندانه $E_1 = 210 \text{ (GPa)}$ و در تاج $E_2 = 170 \text{ (GPa)}$ است و همواره به صورت معادله آتی تغییر می‌یابد.

به توزیع بار مرکزی و توزیع یکنواخت بار در سطح دندانه‌های چرخ‌دنده، در طول انتشار ترک، ترک‌های لبه‌ای می‌توانند متقارن باشند، در صورتی که برای توزیع بار یک طرفه بر روی سطح دنده‌ها، در طول انتشار ترک، ترک‌های لبه‌ای نامتقارنند. از نتایج عددی برای شروع ترک نیز می‌توان نتیجه گرفت که توزیع تنش در ریشه دندان با جهت بارگذاری کاملاً موازی است. با انتخاب ماده هدفمند برای دنده می‌توانیم ض.ش.ت. را برای حالت اول نرم‌تر مشاهده کنیم. در چرخ‌دنده‌ها بارگذاری ترک بیشتر به صورت حالت اول است که می‌تواند منجر به شکست دندانه شود. بنابراین می‌توان مکانیک شکست خطی را برای انتشار ترک در ریشه دندانه دنده استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند.

References

[1] D.G. Lewicki, R.F. Handschuh, L.E. Spievak, P.A. Wawrzynek, A.R. Ingraffea, Consideration of moving tooth load in gear crack propagation predictions, International Power Transmission and Gearing Conference, pp. 118-123, 2001

[2] M. Kaneta, H. Yatsuzuka, Y. Murakami. Mechanism of crack growth in lubricated rolling/sliding contact, ASLE Transactions, Vol. 28, pp. 407-414, 1985

[3] J. Ooi, X. Wang, C. Tan, J. H. Ho, Y.P. Lim, Modal and stress analysis of gear train design in portal axle using finite element modeling and simulation, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, pp. 575-589, 2012

[4] M. levik, L. Nahlik, P. Huta, M. Zouhar, Modelling of fatigue failure of gears with thin rim, International Conference Engineering Mechanics, pp. 320-321, 2012

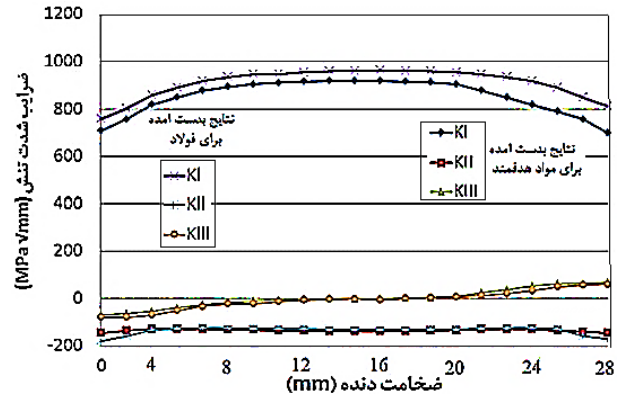
[5] D.M. Tracey, Finite elements for determination of crack tip elastic stress intensity factors, Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol. 3, pp. 255-265, 1971

[6] B. Cotterell, J. Rice, Slightly curved or kinked cracks, International Journal of Fracture, Vol. 16, pp. 155-169, 1980

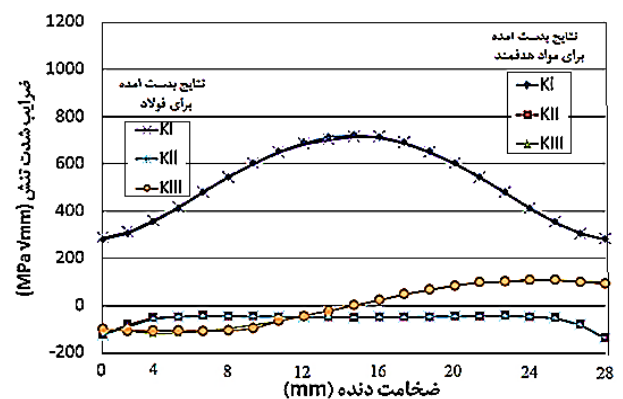
[7] H. Ewalds, R. Wanhill, Fracture mechanics, Co-Publication of Edward Arnold, England, 1989

[8] B. Zafosnik, Z. Ren, J. Flasker, G. Mishuris, Modeling of surface crack growth under lubricated rolling-sliding contact loading, International Journal of Fracture, Vol. 134, pp. 127-149, 2005

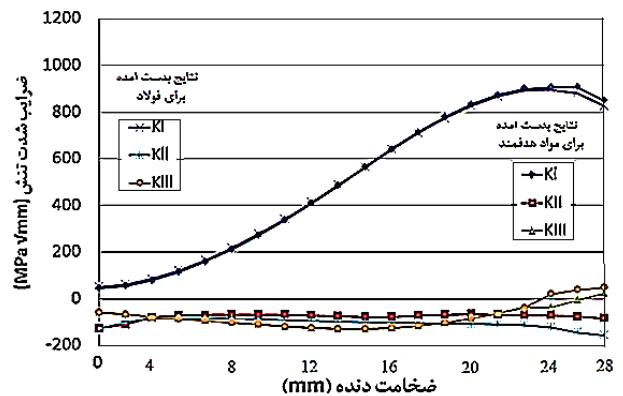
[9] R.J. Plaskittand, C.J. Musiol, Developing a durable product, in: Agricultural equipment technology conference, ASAE Publication, No. 9130202, 2002



شکل ۱۸: توزیع ض.ش.ت. در عرض ضخامت دندانه ماده هدفمند با بارگذاری گسترده و مقایسه با حالت فولادی



شکل ۱۹: توزیع ض.ش.ت. در عرض ضخامت دندانه ماده هدفمند با بارگذاری مرکزی و مقایسه با حالت فولادی



شکل ۲۰: توزیع ض.ش.ت. در عرض ضخامت دندانه ماده هدفمند با بارگذاری یک طرفه و مقایسه با حالت فولادی

۷) نتیجه گیری

در این تحقیق مشکلات ناشی از محل شروع ترک و توزیع تنش در ریشه دندانه‌های چرخ‌دنده در حالت‌های فولادی و ماده هدفمند بحث شده است. سه موقعیت بار مختلف بر روی سطح دندان انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که شروع ترک می‌تواند در صورت نامطلوب بودن فرایند ساخت در بیش از یک منطقه از ریشه دندانه واقع شود. با توجه

- [18] M. Ayatollahi, M. Pavier, D. Smith, Mode I cracks subjected to large T-stresses. *International Journal of Fracture*, Vol. 117, pp. 159-174, 2002
- [19] M. Benedetti, V. Fontanari, B.R. Hohn, P. Oster, T. Tobie, Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears, *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 1127-1136, 2002
- [20] J. Flasker, S. Glodez, S. Pehan, Influence of contact area on service life of gears with crack in tooth root, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 11, pp. 49-58, 1995
- [21] ABAQUS/Standard, User's Manual, Version 6.11-3
- [22] M.J.H. Kimand, G.H. Paulino, T-stress, mixed-mode stress intensity factors, and crack initiation angles in functionally graded materials, a unified approach using the interaction integral method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 192, pp. 1463-1494, 2003
- [23] B. Bilby, A finite element investigation of the effect of specimen geometry and the field of stress and strain at the tip of stationary crack, *Journal of Mechanical Engineering*, pp. 37-46, 1976
- [24] G. Wang, J. Chen, G. Liu, On the characteristic distance and minimum fracture toughness for cleavage fracture in a C-Mn steel, *International Journal of Fracture*, Vol. 118, pp. 57-76, 2002
- [25] J. Chen, L. Wu, S. Du, Element free Galerkin methods for fracture of functionally graded materials, *Key Engineering Materials*, pp. 183-187, 2000
- [10] M. Benedetti, V. Fontanari, B.R. Hohn, P. Oster, T. Tobie, Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case hardened gears, *International Journal Of Fatigue*, Vol. 24, pp. 1127-1136, 2002
- [11] A. Seweryn, A non-local stress and strain energy release rate mixed mode fracture initiation and propagation criteria, *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 59, pp. 737-760, 1998
- [12] M. Williams, On the stress distribution at the base of a stationary crack, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 109-114, 1957
- [13] S. Pehan, J. Kramberger, J. Flasker, B. Zafosnik, Investigation of crack propagation scatter in a gear tooth's root, *Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 1266-1283, 2008
- [14] J. Williams, P. Ewing, Fracture under complex stress-the angled crack problem, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 8, pp. 441-446, 1972
- [15] F. Erdogan, G. Sih, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 519-530, 1963
- [16] S. Pehan, T.K. Hellen, J. Flasker, S. Glodez, Numerical methods for determining stress intensity factors vs crack depth in gear tooth roots, *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, pp. 677-685, 1997
- [17] R. Ballarini, D.G. Lewicki, Effect of rim thickness on gear crack propagation path, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 119, pp. 88-95, 1996



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Stress intensity factor in single cracked gears made of steel and functionally graded materials in vehicle gearbox

M.R. Torshizian^{1*}, M. Molazem²

¹Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran, torshizian@mshdiau.ac.ir

²Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran, molaem.mahdi@rocketmail.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-511-6629611

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 October 2013

Accepted: 11 December 2013

Keywords:

Stress intensity factor

Root gear teeth

Crack growth

ABSTRACT

The fracture problem in gears with cracks on the root of the gear teeth has been considered in this article. The problem was solved by the finite element method, using the ABAQUS software. Then, the stress intensity factor at the tip of cracks was calculated for different loading conditions. The stress intensity factor at the tip of cracks for steel gears and gears made of functionally graded materials were obtained and compared. The position of the indentation load, the geometry of the tooth root and the tooth flank load distribution on the stress intensity factor was investigated. Numerical results showed that by considering the size of the crack in the tooth root, the value of the stress intensity factor, mode I, was bigger than mode II and mode III.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.