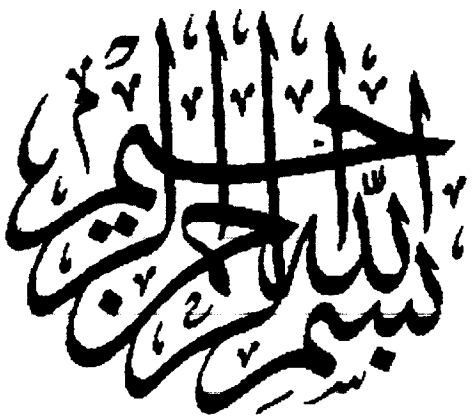

٢٤٩١

٤٠٠٨٠

۱۳۸۱ /۱۱/ ۲۰

017110

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)

تخمین عمرباقیمانده دنده رینگی آسیاب گلوله ای صنعتی براساس مکانیک شکست

حمید رضا طبخی وایقان

٤٠٠٨٠

استاد راهنما:

دکتر مجید میرزایی

پائیز ۱۳۸۰

٤٠٠٨٠

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای **حمیدرضا طبخی وایقان** پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **تخمین عمر باقیمانده دنده رینگی آسیاب گلوله‌ای صنعتی براساس مکانیک شکست** در تاریخ **۸۰/۷/۲۱** ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک با گرایش **طراحی کاربردی** پیشنهاد می‌کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر میرزایی	
۲ـ استاد مشاور :	ـــــ	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر لیاقت	
	آقای دکتر مسلمی	
۴ـ مدیر گروه :	آقای دکتر قدیری	
(یا نمایندهٔ گروه تخصصی)		

بسمه تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ مکانیک *است که در سال* ۱۳۸۰ *در دانشکدهٔ* فنی - مهندسی *دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر* میرزایی *، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»*

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب حمیدرضا طحنی واقعان دانشجوی رشته مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی: حمیدرضا طحنی

تاریخ و امضا:

تقدیم به

پدر و مادرم

بدینوسیله از استاد ارجمند «آقای دکتر میرزایی» که با مساعدتها و راهنماییهای راهگشای خود موجبات به انجام رسیدن این پایان نامه را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می نمایم.

چکیده

دنده رینگی آسیاب های گلوله ای صنعتی بیش از ۱۲ متر قطر و در حـــدود ۹۰ تـن وزن دارنـد و بالغ بر پانصد هزار دلار هزینه ساخت آنهاست.

عمر خستگی مورد انتظار برای این نوع چرخ دنده ها بیـش از ۲۰ سـال مـی باشـد، ولـی در ایـن تحقیق پس از گذشت ۲ سال از کارکرد دنده رینگی مورد بحـث، ترکـهای متعـددی در نواحـی بیـن لچکی ها و فلنج آن ایجاد گشته و سپس به سمت سوراخ های سبک کاری پیشروی نموده اند.

براساس نتایج تحلیل المان محدود سه بعـدی آسـیاب، قطـاعی ۳۶ درجـه از دنـده رینـگی بـرای مدلسازی ترک درنظرگرفته شد. ترکهای نیمه بیضوی مدل شده در یک حوزه تنشی متغـیر رشـد داده شدند و نیروهای پیشران ترک با استفاده از روشهای انتگرال J و Point Matching محاسبه گشتند.

نتایج بدست آمده نشان دادند که مد اصلی رشد ترک، مد I است. همچنین مقادیر محاسبه شـده ΔK_I براساس دو روش متفاوت بکارگرفته شده توافق بسـیار خوبـی بـا یکدیـگر داشـتند کـه آن را می توان به المان بندی نسبتاً ریز و استفاده از المانهای سینگولار در ناحیه نوک ترک مربوط دانست.

در انتها سرعتهای محاسبه شده رشد ترک برای تخمین عمر باقیمانده دنده رینـگی مـورد اسـتفاده قرار گرفتند.

کلمات کلیدی : **روش المان محدود ، فاکتور شدت تنش ، رشد ترک خستگی ، تخمین عمر باقیمانده**

فهرست

۱) مقدمه ۱

۲) آسیاب های گلوله ای ۶

۲-۱) معرفی آسیاب های گلوله ای ۷

۲-۲) اجزاء آسیاب گلوله ای ۹

۲-۳) تئوری عملیات آسیاب های گلوله ای ۱۰

۲-۴) بررسی یک دنده رینگی ترک خورده ۱۳

۲-۵) مروری بر مدل سازی و آنالیز تنش آسیاب گلوله ای ۱۴

۲-۵-۱) مدل سازی آسیاب گلوله ای ۱۴

۲-۵-۱-۱) مدل سازی و المان بندی آسیاب ۱۵

۲-۵-۱-۲) اعمال شرایط تکیه گاهی و بارگذاری ۱۹

۲-۵-۱-۲-۱) نیروی وزن سازه آسیاب ۲۰

۲-۵-۱-۲-۲) نیروی جانب مرکز سازه آسیاب ۲۱

۲-۵-۱-۲-۳) نیروی وزن گلوله ها و مواد معدنی ۲۱

۲-۵-۱-۲-۴) نیروی جانب مرکز گلوله ها و مواد ۲۲

۲-۵-۱-۲-۵) نیروی چرخ دنده ۲۳

۲-۵-۱-۲-۶) نیروی خرد کننده در اثر حرکت آبشاری گلوله ها ۲۵

۲-۵-۲) بررسی نتایج آنالیز تنش ۲۶

۳) مروری بر مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی و رشد ترک خستگی ۳۵

۳-۱) واماندگی قطعات ۳۶

۳-۲) مکانیک شکست ۳۷

۳-۲-۱) مکانیک شکست الاستیک خطی ۳۸

۳-۳) شرایط بارگذاری اجسام ترک دار ۴۱

۳-۴) خستگی ۴۲

۳-۴-۱) روشهای قدیمی تعیین عمر خستگی ۴۳

۳-۴-۲) تعیین عمر براساس مکانیک شکست ۴۴

۳-۴-۳) جوانه زنی و رشد ترک در یک پروسه خستگی ۴۴

۳-۴-۳-۱) جوانه زنی یا ایجاد ترک خستگی ۴۴

۳-۴-۳-۲) رشد ترک خستگی ۴۵
۳-۴-۴) تخمین عمر براساس تحمل وجود ترک ۴۷
۴) روشهای تعیین فاکتور شدت تنش ۴۹
۴-۱) مقدمه ۵۰
۴-۲) روشهای عددی در تعیین فاکتور شدت تنش ۵۰
۴-۳) روش المان محدود ۵۱
۴-۴) روش المان مرزی ۵۲
۴-۵) روشهای محاسبه فاکتور شدت تنش ۵۳
۴-۵-۱) روشهای Point Matching ۵۴
۴-۵-۲) روشهای انرژی ۵۵
۴-۵-۲-۱) رشد ترک المانی ۵۶
۴-۵-۲-۲) انتگرال کانتور ۵۶
۴-۵-۲-۳) رشد ترک مجازی ۵۸
۴-۵-۲-۳-۱) فرمول بندی براساس مشتق ماتریس سختی ۵۸
۴-۵-۲-۳-۲) روش مدرن ۵۹
۴-۵-۲-۴) انتگرال حوزه انرژی ۶۰
۴-۶) روش تفاضل محدود و حجم محدود ۶۴
۵) مدل سازی ترک و تعیین عمر باقیمانده دنده رینگی ۶۵
۵-۱) مقدمه ۶۶
۵-۲) معرفی نرم افزار ANSYS ۶۶
۵-۳) فرضیات مدل سازی و تحلیل ۶۸
۵-۴) ثوابت فیزیکی و خواص مکانیکی ماده ۶۹
۵-۵) المان بندی و اعمال شرایط مرزی ۶۹
۵-۶) آنالیز تنش قطاع ۷۱
۵-۷) مدل سازی ترک ۷۳
۵-۷-۱) روش مدل کردن ترک ۷۴
۵-۸) آنالیز تنش قطاع با وجود ترک ۸۲
۵-۹) تعیین عمر باقیمانده دنده رینگی ۸۴

۵-۹-۱) روشهای مورد استفاده در تعیین فاکتورهای شدت تنش ۸۵
۵-۹-۱-۱) روش Point Matching ۸۵
۵-۹-۱-۱-۱) استخراج فاکتورهای شدت تنش ۸۷
۵-۹-۱-۱-۲) مد اصلی رشد ترک ۹۰
۵-۹-۱-۲) روش J - انتگرال ۹۱
۵-۹-۲) اصلاح مقادیر K_I ۹۷
۵-۹-۳) بررسی روشهای مورد استفاده در تعیین مقادیر K و مقایسه نتایج ۹۸
۵-۹-۴) محاسبه عمر باقیمانده ۹۹
۶) بحث و نتیجه گیری ۱۰۴

ضمیمه ۱۱۰

مراجع ۱۱۵

فهرست موضوعی ۱۱۸

فصل

مقدمه

آسیاب های صنعتی نوعاً استوانه های افقی بزرگ و چرخانی هستند که برای کاهش اندازه مواد معدنی بکارگرفته میشوند. اساس کار این آسیاب ها بر برخورد مواد و گلوله ها (یا میله های) فولادیِ درون آسیاب وغلتیدن آنها بر یکدیگراستوار است؛ در اثر دوران مخزن استوانه ای آسیاب حول محورافقی مواد وگلوله ها تا ارتفاعی بالارفته و سپس سقوط می نمایند وعمل خردایش در اثر ضربه ناشی از سقوط و همچنین حرکت غلتشی مواد وگلوله ها انجام می شود.

بطور کلی آسیاب های صنعتی با محور دوران افقی به سه دسته زیر تقسیم می شوند:

۱- **آسیاب های Autogenous و Semi Autogenous (SAG)** : این آسیاب ها بعد از خردایش اولیه بوسیله سنگ شکن های بزرگ به منظور خردایش درشت یا پیش خردایش مواد معدنی مورد استفاده قرار می گیرند. اندازه مواد ورودی به این آسیاب ها به طور متوسط ۱۵۰ میلی مترو اندازه مواد خروجی درحدود یک میلی متر می باشد.

۲- **آسیاب های میله ای** : از این آسیاب ها به منظور خردایش مجدد مواد معدنی خرد شده بوسیله آسیاب های SAG استفاده می شود. اندازه مواد ورودی به این آسیاب ها بین ۱۰ تا ۲۰ میلی متر و خروجی آنها درحدود یک میلی متر می باشد.

۳- **آسیاب های گلوله ای** : این آسیاب ها معمولاً برای خردایش ریز مورد استفاده قرار میگیرند؛ اندازه مواد ورودی به این آسیاب ها از ۱۰ تا ۱۵ میلی متر تجاوز نمی کند و آنها می توانند محصولات بسیار ریز با اندازه های کوچکتر از ۰/۱ میلی متر تولید کنند.

تفاوت مهم آسیاب های گلوله ای و آسیاب های SAG در نسبت طول به قطر مخزن استوانه ای آنها می باشد؛ به طوریکه این نسبت در آسیاب های گلوله ای به مراتب بزرگتر است.

با توجه به تاریخچه طراحی و ساخت آسیاب های گلوله ای میتوان به این نکته مهم اشاره نمود که همواره در صنعت معدن جهت گیری به سمت طراحی و ساخت آسیاب های بزرگتر، با سرعت

دورانی بالاتر و استفاده بیشتراز مواد شیمیایی به منظور افزایش حجم وکیفیت بهتر مواد خروجی بوده است. اما از سوی دیگرتمامی این افزایشها اثرات مخربی را نیز به همراه خواهند داشت که دراجـزای آسیاب سبب ایجاد پدیده های خستگی وخوردگی میشوند وسرانجام موجب واماندگی خواهندگشت.

اجزاء و قطعات ماشین آلاتی که تحت تأثیر بارهای تناوبی قرار دارند بسیار مستعد وامـاندگـی از نوع خستگی می باشند؛ پدیده خستگی شـامل جوانـه زنـی، رشـدترک وشکسـت نـهایی مـی باشـد وقطعاتی که تحت شرایط خـستگی واقع می شوند باید بگونه ای طراحی شـوند کـه بتـوان صحـت و عدم واماندگی آنها را برای مدت معینی تضمیـن نمـود. درصورتیکـه قطعـه بسـیار زودتـر از مـدت پیش بینی شده دچار واماندگی شود می توان نتیجه گرفت کـه خطـایی در یکـی ازمراحـل طراحـی، ساخت و یا طرز استفاده از دستگاه صورت گرفته است.

واماندگی اجزاء آسیاب موجب آسیبهای فراوان شده وسرانجام باعث واماندگی کل آسیاب میشود که این امرخسارات مالی فراوانی به همراه خواهد داشت؛ یکی از اجزاء آسیاب کـه در سـخت تریـن شرایط کاری واقع شده و به شدت تحت تأثیر پدیده خستگی قرار دارد دنده رینگی آسیاب می باشد. این چرخ دنده های بزرگ و گرانقیمت که برخی از آنها بیش از ۱۲ متر قطر دارند معمـولاً بگونـه ای طراحی می شوند که دارای ۱۲۵ تا ۱۵۰ میلیون سیکل یا درحدود ۲۵ سال عمر خستگی باشند.

موضوع مورد بررسی در این تحقیق به یک دنده رینگی مربوط می شود که در طی ۲ سـال اولیـه کارکرد ، شاهد جوانه زنی تعداد زیادی ترک در نواحی ما بیـن تقویـت کننـده هـای مثلثـی و فلنـج چرخدنده بوده که پس از ایجاد به سمت سوراخهای سبک کاری پیشروی نموده اند.

از آنجا که آسیاب های تـرک دار مجبـور بـه ادامـه فعـالیت بـوده وخـارج کـردن کـامل آنـها از مدارخسارات مالی فراوانی به دنبال دارد ، این سوال مطرح شد که این دستگاهها تا چه موقـع قادریـه تحمل ترکها بوده ومی توانند به فعالیت خود ادامه دهند؟ و به عبارت دیگر عمرآنها چقدر است؟

بروز پدیده خستگی در دنده رینگی شامل جوانه زنی و رشد ترک می باشد. پیش بینی محل و زمان جوانه زنی مستلزم وجود اطلاعات کافی از میزان وتوزیع حوزه های تنشی می باشد، همچنین پیش بینی رشد ترک مستلزم دانستن پارامترهای آن است. تعیین پارامترهای رشد ترک در مکانیک شکست با استفاده از روشهای مختلفی صورت میگیرد که هر کدام معایب و مزایای مختص خود را دارا می باشند. این روشها عبارتند از :

۱- روشهای تجربی ۲- روشهای تحلیلی ۳- روشهای عددی

با وجود آنکه روشهای تجربی دقیق ترین و قابل اعتمادترین روشها میباشند ولی اجرای آنها اغلب مستلزم صرف هزینه بالا و دسترسی به تجهیزات خاص می باشد. روشهای تحلیلی نیز در عمل کاربرد بسیار محدودی دارند و تنها برای هندسه های ساده قابل استفاده می باشند.

روشهای عددی با هزینه پایین از دقت خوبی برخوردارند و تنها مشکل استفاده از آنها محدودیت های سخت افزاری کامپیوترها می باشد که با رفع این مشکل درسالهای اخیر وتولید نرم افزارهای قوی و مناسب استفاده از آنها درحال گسترش می باشد.

از میان روشهای عددی دامنهٔ کاربرد روش المان محدود بسیارگسترش یافته، بطوریکه امروزه در علوم مهندسی، علوم پزشکی و علوم پایه بکارگرفته می شود؛ این روش عددی از دهه شصت میلادی درحل مسائل مکانیک شکست مورد استفاده بوده است.

پیش از معرفی بخش های مختلف این تحقیق لازم به ذکر است که درتحقیق انجام شده قبل [۲] آنالیزتنش مدل کامل آسیاب با ۱۲۸۰۰ المان انجام پذیرفته است. درحالیکه در این تحقیق با توجه به اینکه مدل سازی ترکهای پدیدآمده در دنده رینگی مستلزم المان بندی ریز دنده رینگی بویژه در مناطق اطراف ترک می باشد استفاده از مدل کامل آسیاب افزایش قابل ملاحظه المانها و زمانهای بسیار طولانی برای آنالیزتنش را در پی خواهد داشت، لذا به عنوان راه حلی برای این مسأله قطاعی

۳۶ درجه از دنده رینگی شامل نقاط ماکزیمم تنش در ناحیه بین لچکی و فلنج چرخ دنده درنظرگرفته شده و با در اختیار بودن نتایج آنالیزتنش دنده رینگی تغییرمکانهای مرزی بر قطاع مورد بحث اعمال شده اند تا توزیع تنش مورد نظر در ناحیه بین لچکی و فلنج با توجه به اصل Saint -Venant حاصل شود؛ اصلی که بیان می دارد هرگاه درفواصل دوراز «نقاطی از یک جسم» بجای توزیع بارگذاری اولیه معادل آنرا قرار دهیم درمقدار و توزیع «تنش، کرنش و تغییرمکان» آن نقاط تغییری حاصل نمی شود.

با درنظرگرفتن مسیرترک که از ناحیه بین لچکی و فلنج چرخ دنده آغاز شده و به سمت سوراخهای سبک کاری پیشروی می کند اندازه المانها بویژه درامتداد مسیرترک ریز شده وترکهایی نیمه بیضوی با ابعاد مختلف ایجاد گشته و نهایتاً با مشخص شدن فاکتورهای شدت تنش عمرباقیمانده دنده رینگی با استفاده از رابطه Paris تعیین گردیده است.

با توجه به توضیحات فوق این پایان نامه به شرح زیر تدوین شده است:

درفصل دوم، آسیاب های گنوله ای و اجزاء مختلف یک آسیاب مورد بررسی قرارگرفته ودرادامه با مروری برتحقیق انجام شده قبلی نتایج آنالیزتنش دنده رینگی آسیاب بررسی شده است.

درفصل سوم، مروری شده است بر مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی و رشد ترک خستگی

درفصل چهارم، روشهای تعیین پارامتر فاکتورشدت تنش بیان شده و با توجه به اهمیت روشهای عددی در مسائل مهندسی به شرح و توضیح این روشها پرداخته شده است.

درفصل پنجم، با استفاده از نرم افزار ANSYS مدل سازی ترکهای نیمه بیضوی برروی قطاعی ۳۶ درجه از دنده رینگی و تعیین فاکتورهای شدت تنش انجام گرفته است و عمر باقیمانده برای هر طول ترک با در نظر گرفتن رابطه Paris تعیین شده است.

درفصل ششم، به بحث پیرامون نتایج حاصله پرداخته شده و پیشنهاداتی به منظور تعیین دقیق تر عمرباقیمانده ارائه شده است.