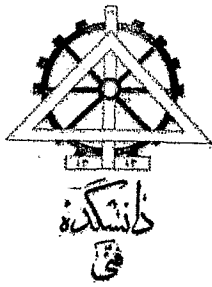


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت اطلاعات و ارتباطات  
جمهوری اسلامی ایران



دانشگاه تهران

دانشکده فنی

016997

۱۳۸۱ / ۲ / ۱۷

پایان نامه

برای دریافت دانشنامه کارشناسی ارشد  
( مهندسی معدن - گرایش مهندسی مکانیک سنگ )

**بررسی توزیع تنش ایجاد شده در محل تماس دیسک حفاری با سنگ**

**به روش تحلیل عددی**

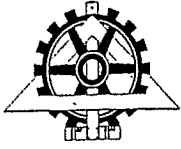
۴۰۳۴۹

استاد راهنما : دکتر جمال رستمی

استاد مشاور : دکتر پرویز معارف وند

نگارش : مهدی نصیری

مهرماه ۱۳۸۰



موضوع

بررسی توزیع تنش ایجاد شده در محل تماس دیسک حفاری با سنگ به روش  
تحلیل عددی

توسط

مهدی نصیری

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

از این پایان نامه در تاریخ ۸۰/۷/۲۹ در مقابل

هیئت داوران دفاع بعمل آمده و مورد تصویب قرار گرفت.



سرپرست کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده: آقای دکتر بنی هاشمی

مدیر گروه آموزشی: آقای دکتر احمد جعفری  
۸۰۱۲۸۱

استاد راهنما: آقای دکتر جمال رستمی

استاد مشاور: آقای دکتر پرویز معارف‌وند

داور مدعو: آقای دکتر عبدالهادی قزوینیان

تقدیم به :

پدر و مادر عزیز و فداکارم

و

همسر صبور و مهربانم

## بررسی توزیع تنش ایجاد شده در محل تماس دیسک حفاری با سنگ به روش تحلیل عددی

نام و نام خانوادگی: مهدی نصیری

رشته تحصیلی: مهندسی معدن - مکانیک سنگ

گروه مهندسی معدن

تاریخ دفاع: ۱۳۸۰/۷/۲۹

استاد راهنما: دکتر جمال رستمی

### چکیده پایان نامه :

طراحی بهینه و پیش بینی سرعت حفاری TBMها مستلزم تخمین دقیق نیروهای وارد بر دیسک حفاری می باشد . توانایی پیش بینی صحیح عملکرد و سرعت حفاری TBM یکی از نیازهای اساسی تخمین دقیق زمان و هزینه پروژه است. بنابراین پیش بینی نیروهای وارد بر دیسک از اهمیت ویژه ای برخوردار است . نیروهای برش بوسیله بار توزیع شده در داخل ناحیه تماس دیسک و سنگ ایجاد و کنترل می شود.

در سال ۱۹۹۷ رستمی بمنظور برطرف نمودن نواقص مطالعات قبلی و ارائه مدل جدید دقیقتری جهت تخمین نیروهای برش و محل توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ یکسری آزمایشهای برش در مقیاس واقعی انجام داد . وی برای اندازه گیری کرنش و تنش در محل تماس دیسک و سنگ بر روی جوانب دیسک کرنش سنجهایی نصب نمود و توانست با استفاده از اطلاعات بدست آمده از کرنش سنجها به ماهیت واقعی توزیع تنش پی ببرد .

هدف از این تحقیق مدل سازی عددی فرایند برش سنگ بوسیله دیسک حفاری و بررسی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ و کنترل نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط رستمی ۱۹۹۷ بوسیله مدلسازی عددی می باشد .

در این تحقیق ابتدا دو نرم افزار UDEC و ANSYS برای مدلسازی مد نظر بودند که مدلسازی با نرم افزار UDEC بدلیل محدودیت های آن به نتیجه مطلوب نرسید و بنابراین از نرم افزار ANSYS استفاده شد . نرم افزار اخیر بر پایه روش عددی المان محدود نوشته شده است . بمنظور بررسی نتایج مطالعات انجام شده توسط رستمی ، خصوصیات سنگهای مدل شده توسط این نرم افزار مطابق خصوصیات سنگهای مورد آزمایش در نظر گرفته شده است و در مدل‌های ساخته شده عمق نفوذ ، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون متفاوت در نظر گرفته شد .

مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج مطالعات قبلی بیانگر مطابقت نسبتاً مطلوبی می باشد.

## سپاسگزاری

سپاس خداوند مهربان را که دست یاریش همواره همراه من است و توفیق به پایان رساندن این مجموعه را به من عطا فرمود.

در به پایان رساندن این تحقیق از راهنمایی و همراهی عزیزانی بهره جستیم که لازم می دانم از صمیم قلب از ایشان سپاسگزاری و قدردانی نمایم:

- استاد گرانقدر جناب آقای دکتر جمال رستمی که با بردباری در طول تحقیق راهنما و روشنی بخش راهم بودند و بی شک بدون راهنماییهای ارزشمندشان به پایان رساندن این مجموعه میسر نبود و همچنین استاد بزرگوار جناب آقای دکتر معارف وند که در این تحقیق یاور و راهنمایم بودند.

- جناب آقای مهندس جعفری که در تهیه مدل‌های عددی این مجموعه مرا یاری نموده و متحمل زحمات فراوانی گشتند و همکاران محترم در شرکت ایمن سازان بخصوص جناب آقای مهندس شریف دینی که همواره از همکاریهای بیدریغشان برخوردار بودم و بدون یاری ایشان اتمام این مجموعه قطعاً با مشکل مواجه بود.

- خانم دکتر زهرا فخرایی و خانم مهندس نوشین فلکناز که با زحمات ارزشمندشان سهم عمده ای در تکمیل این تحقیق برعهده داشتند.

- در نهایت

پدر و مادر مهربانم و خانواده عزیز همسر که در طول تحصیل در این مقطع و بخصوص در انجام این تحقیق با محبت‌های بی کرانشان همواره مشوقم بودند و مرا صمیمانه همراهی نمودند و همچنین همسر فداکارم که در انجام این تحقیق صمیمانه و صبورانه مرا یاری نمود و در این راه از هیچ کوششی فروگذار ننمود.

## فهرست مطالب

### صفحه

### عنوان

۱

مقدمه

### فصل اول : کلیات

۴

۱-۱- مقدمه

۸

۱-۲- موضوع مورد تحقیق

۸

۱-۳- اهمیت تحقیق

۸

۱-۴- هدف از تحقیق

۹

۱-۵- روش مورد استفاده در تحقیق

### فصل دوم : مروری بر مطالعات انجام شده

۱۱

۱-۲- مقدمه

۱۲

۲-۲- اشاره ای مختصر به مدلسازی و مطالعه عملکرد دیسک حفاری

۱۵

۲-۳- مروری بر مطالعات انجام شده

۱۵

۲-۳-۱- نتایج تئوری و انجام آزمایشهای کوچک مقیاس

۲۰

۲-۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی مقیاس واقعی

۳۱

۲-۳-۳- مطالعات صحرایی

### فصل سوم : مدل رستمی (۱۹۹۷)

۳۳

۱-۳- مقدمه

۳۴

۲-۳- مدل رستمی

۳۵

۳-۲-۱- خلاصه ای از مطالعات آزمایشگاهی رستمی

۳۵

۳-۲-۱-۱- ماشین برش خطی

۳۶

۳-۲-۱-۲- نمونه سنگ ها و آماده سازی آنها

۳۸

۳-۲-۱-۳- روش آزمایش

۳۸

۳-۲-۱-۴- دیسک حفار استفاده شده

۳۸

۳-۲-۱-۵- کرنش سنجها

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۴۰	۳-۲-۲- نتایج بدست آمده از مطالعات رستمی
۴۰	۳-۲-۲-۱- نتایج حاصل از اندازه گیری نیروها
۴۴	۳-۲-۲-۲- ارائه مدل جدید
<b>فصل چهارم: روش اجزا مجزا و معرفی برنامه های UDEC و ANSYS</b>	
۴۷	۴-۱- مقدمه
۴۹	۴-۲- روش اجزا محدود
۵۴	۴-۲-۱- معرفی نرم افزار ANSYS و هدف از انتخاب آن
۵۵	۴-۲-۱-۱- توضیح محیط نرم افزار و منوهای آن
۵۷	۴-۲-۱-۲- بار گذاری در نرم افزار ANSYS
۵۹	۴-۳- روش اجزا مجزا
۶۱	۴-۳-۱- اصول روش اجزا مجزا
۶۲	۴-۳-۲- دگرشکل پذیری بلوکها
۶۲	۴-۳-۳- معرفی نرم افزار UDEC
۶۲	۴-۳-۳-۱- کلیات
۶۳	۴-۳-۳-۲- مدل های رفتاری بلوکها
۶۵	۴-۳-۳-۳- مدل های رفتاری ناپیوستگی ها
۶۵	۴-۳-۳-۴- پارامترهای مورد نیاز نرم افزار UDEC
۶۶	۴-۳-۳-۵- مراحل مدلسازی در UDEC
۶۷	۴-۳-۳-۶- خروجی و سایر قابلیت های UDEC
<b>فصل پنجم: مدلسازی و تحلیل عددی فرآیند برش سنگ بوسیله دیسک حفار</b>	
۷۰	۵-۱- مقدمه
۷۰	۵-۲- مشخصات هندسی مدلها
۷۱	۵-۳- مشخصات سنگ
۷۱	۵-۴- بارگذاری مدل



## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷۳	۵-۵- مدل سازی بوسیله UDEC
۷۸	۵-۶- مدل سازی بوسیله ANSYS
۸۴	۵-۶-۱- مدل بار نقطه ای
۸۸	۵-۶-۲- مدل برش صفحه فولادی
۹۱	۵-۶-۳- مدل برش سنگ آهک ایندیانا
۹۸	۵-۶-۴- مدل برش سنگ گرانیت کلرادو
	<b>فصل ششم : نتیجه گیری</b>
۱۰۵	۶-۱- مقدمه
۱۰۵	۶-۲- نتایج حاصل از تحقیق
۱۰۷	<b>فهرست منابع</b>

## فهرست جدولها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳۷	جدول ۳-۱ - مشخصات نمونه های سنگی استفاده شده در آزمایش
۵۹	جدول ۴-۱ - انواع نتایج در آنالیزهای مختلف
۷۱	جدول ۵-۱ - مشخصات نمونه های سنگی استفاده شده در آزمایش
۷۲	جدول ۵-۲ - میانگین نیروهای وارد بر دیسک در آزمایش برای برش سنگ آهک و گرانیت

## فهرست شکلها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۱	شکل ۱-۲ - مقطع از دیسکهای CCS و V شکل
۱۳	شکل ۲-۲ - نیروهای وارد بر دیسک حفار
۱۴	شکل ۳-۲ - پروسه برش دیسک
۲۱	شکل ۴-۲ - تغییرات نیروی قائم نسب به فاصله برنده در عمق نفوذ ۰/۲۵ سانتیمتر
۲۲	شکل ۵-۲ - تغییرات نیرو - فاصله
۲۲	شکل ۶-۲ - تغییرات انرژی مخصوص با نسبت S/P
۲۴	شکل ۷-۲ - توزیع بار در محل تماس دیسک و سنگ
۲۸	شکل ۸-۲ - شکل ساده و متغیرهای دیسک برنده
۳۶	شکل ۱-۳ - شکل ساده ماشین برش خطی
۳۷	شکل ۲-۳ - نمونه مکعبی سنگ
۳۹	شکل ۳-۳ - نحوه نصب کرنش سنجها بر روی دیسک حفار شکل
۴۱	شکل ۴-۳ - تغییرات نیروی قائم نسبت به افزایش عمق نفوذ
۴۱	شکل ۵-۳ - تغییرات نیروی غلطشی نسبت به افزایش عمق نفوذ
۴۲	شکل ۶-۳ - تغییرات ضریب غلطشی نسبت به افزایش عمق نفوذ
۴۲	شکل ۷-۳ - تغییرات انرژی مخصوص نسبت به افزایش عمق نفوذ
۴۳	شکل ۸-۳ - تغییرات توزیع بار در محل تماس دیسک و سنگ نسبت به عمق نفوذ
۴۳	شکل ۹-۳ - نحوه توزیع بار در محل تماس دیسک حفار و سنگ
۵۱	شکل ۱-۴ - شکل و موقعیت گره ها و المانها در روش اجزا محدود
۵۳	شکل ۲-۴ - وضعیت مش بندی برای تحلیل تنش در اطراف یک حفره
۵۶	شکل ۳-۴ - محیط نرم افزار ANSYS
۶۸	شکل ۴-۴ - الگوریتم عمومی حل مسائل استاتیکی در نرم افزار UDEC
۷۳	شکل ۱-۵ - مشخصات هندسی مدل و نحوه بارگذاری دیسک
۷۴	شکل ۲-۵ - ابعاد و هندسه مدل
۷۴	شکل ۳-۵ - ابعاد و شبکه بندی مدل
۷۷	شکل ۴-۵ - منحنی تغییرات نیروی نامتعادل در هنگام درهم رفتگی شبکه ها و عدم تعادل مدل

## فهرست شکلها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷۷	شکل ۵-۵- نحوه اعمال نیروهای افقی به دیسک
۷۹	شکل ۵-۶- نمونه ای از شبکه بندی مدل بوسیله نرم افزار ANSYS
۸۱	شکل ۵-۷- مشخصات المان PLANE42
۸۱	شکل ۵-۸- المانهای TARGE169 و CONTA172
۸۳	شکل ۵-۹- ایجاد ناحیه هاشور خورده جهت شبکه بندی کوچکتر
۸۴	شکل ۵-۱۰- منحنی مشخص کننده اتمام حل مسئله در نرم افزار ANSYS
۸۵	شکل ۵-۱۱- موقعیت بار نقطه ای و دیسک حفار
۸۶	شکل ۵-۱۲- توزیع تنش شعاعی در دیسک تحت بار نقطه ای
۸۶	شکل ۵-۱۳- توزیع تنش در دیسک تحت بار نقطه ای
۸۷	شکل ۵-۱۴- نمودار تنش - زاویه حاصل از تحلیل عددی به کمک ANSYS
۸۷	شکل ۵-۱۵- نمودار تنش - زاویه حاصل از حل تحلیلی
۸۹	شکل ۵-۱۶- توزیع تنش در محل تماس دیسک و صفحه فولادی (مدل تجربی)
۸۹	شکل ۵-۱۷- توزیع تنش در محل تماس دیسک و صفحه فولادی
۹۰	شکل ۵-۱۸- توزیع تنش در محل تماس دیسک و صفحه فولادی (تحلیل عددی)
۹۰	شکل ۵-۱۹- مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی
۹۱	شکل ۵-۲۰- توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ
۹۳	شکل ۵-۲۱- مدل سازی برای برطرف نمودن تمرکز تنش در قسمت جلوی دیسک حفار
۹۳	شکل ۵-۲۲- تغییرات تنش در محل تماس دیسک و سنگ ( عمق نفوذ ۲/۵ میلیمتر - سنگ آهک ایندیانا)
۹۴	شکل ۵-۲۳- منحنی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ آهک ایندیانا- عمق نفوذ ۲/۵ میلیمتر
۹۴	شکل ۵-۲۴- مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی (سنگ آهک ، عمق نفوذ : ۲/۵ میلیمتر)
۹۵	شکل ۵-۲۵- تغییرات تنش در محل تماس دیسک و سنگ ( عمق نفوذ ۵ میلیمتر - سنگ آهک ایندیانا)
۹۵	شکل ۵-۲۶- منحنی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ آهک ایندیانا- عمق نفوذ ۵ میلیمتر

## فهرست شکلها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۹۶	شکل ۵-۲۷ - مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی (سنگ آهک ، عمق نفوذ : ۵ میلیمتر)
۹۶	شکل ۵-۲۸ - تغییرات تنش در محل تماس دیسک و سنگ ( عمق نفوذ ۷/۵ میلیمتر - سنگ آهک ایندیانا)
۹۷	شکل ۵-۲۹ - منحنی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ آهک ایندیانا- عمق نفوذ ۷/۵ میلیمتر
۹۷	شکل ۵-۳۰ - مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی (سنگ آهک ، عمق نفوذ : ۷/۵ میلیمتر)
۹۸	شکل ۵-۳۱ - تغییرات تنش در محل تماس دیسک و سنگ ( عمق نفوذ ۲/۵ میلیمتر - سنگ گرانیت)
۹۹	شکل ۵-۳۲ - منحنی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ گرانیت- عمق نفوذ ۲/۵ میلیمتر
۹۹	شکل ۵-۳۳ - مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی (سنگ گرانیت ، عمق نفوذ : ۲/۵ میلیمتر)
۱۰۰	شکل ۵-۳۴ - تغییرات تنش در محل تماس دیسک و سنگ ( عمق نفوذ ۵ میلیمتر - سنگ گرانیت)
۱۰۰	شکل ۵-۳۵ - منحنی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ گرانیت- عمق نفوذ ۵ میلیمتر
۱۰۱	شکل ۵-۳۶ - مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی (سنگ گرانیت ، عمق نفوذ : ۵ میلیمتر)
۱۰۱	شکل ۵-۳۷ - تغییرات تنش در محل تماس دیسک و سنگ ( عمق نفوذ : ۷/۵ میلیمتر - سنگ گرانیت)
۱۰۲	شکل ۵-۳۸ - منحنی توزیع تنش در محل تماس دیسک و سنگ گرانیت - عمق نفوذ ۷/۵ میلیمتر
۱۰۲	شکل ۵-۳۹ - مقایسه توزیع تنش حاصل از تحلیل عددی و مدل تجربی (سنگ گرانیت ، عمق نفوذ : ۷/۵ میلیمتر)
۱۰۳	شکل ۵-۴۰ - نحوه شبکه بندی مدل سه بعدی

استفاده از دیسکهای حفار بعنوان ابزار برش بر روی کله حفاری ماشین تونل بری سنگ سخت یا TBM، تحقیق در مورد نیروهای قائم و غلطشی وارد بر دیسک حفاری برای برش سنگ معین در یک فاصله معلوم و عمق نفوذ مشخص را الزامی می نماید. نیروهای وارد بر هریک از دیسکهای حفار، تعیین کننده مقدار نیرو و گشتاور لازم جهت چرخش و پیشروی کله حفار ماشین در سنگ می باشند. عبارت دیگر مقدار نیرو و گشتاور مورد نیاز جهت چرخش و پیشروی ماشین، برآیند نیروهای وارد بر هر دیسک نصب شده بر کله حفاری می باشد.

مدلهای ارائه شده جهت برآورد نیروهای برشی در دسترسی به یک تخمین معقول از نیروها و پیش بینی عملکرد یا سرعت پیشروی ماشین بطور کامل با موفقیت روبرو نبوده اند. این عدم موفقیت بلحاظ طبیعت سنگ و تغییر در مشخصات سنگهای آزمایش شده و محدودیت در جمع آوری داده ها و همچنین عدم امکان استفاده و واضح نبودن اثر تمام پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بروی عملکرد ماشین بوده است.

روابط بدست آمده از مطالعات تجربی و تئوری، در تعیین اثر بعضی از پارامترها مفید هستند اما راه حل قابل قبولی برای بررسی و توجیه پروسه خردشدن سنگ در هنگام برش با دیسک ارائه نمی کنند. از طرفی اندازه گیریهای صحرائی شامل پیچیدگی هایی در سیستمهای مکانیکی و شرایط زمین شناسی می باشند که آنها را قادر به ارائه راه حل مستقیم در مورد تخمین نیروهای برش نمی نماید. همچنین در مطالعات صحرائی به چگونگی مکانیزم شکست و تشکیل چپس سنگ و توسعه زون خردشده در محل تماس دیسک با سنگ نمی توان دست یافت.

راه صحیح آنالیز نیروهای برش دیسک و تشخیص پارامترهای موثر در برش سنگ، استفاده از آزمایشهای در مقیاس واقعی می باشد. تحلیل نتایج این آزمایشات منجر به پی بردن به پارامترهای اصلی موثر در برش و همچنین چگونگی توسعه زون خردشده خواهد شد. از آنجا که ۸۵ درصد از انرژی صرف شده در برش سنگ بوسیله دیسک، صرف توسعه زون خرد شده می شود، لذا مطالعه این زون بسیار اهمیت خواهد داشت.

نیروهای مورد نیاز برای برش سنگ ناشی از نیروهای موجود در زون خردشده می باشند ، در نتیجه مطالعه و اندازه گیری نیروی توزیع شده در این زون در جهت دانستن پروسه خردشدن سنگ بوسیله دیسک و تخمین نیروهای برش بسیار ضروری بنظر می رسد . اندازه گیری بار توزیع شده در زون خردشده تقریباً عمل غیر ممکن می باشد . اما دکتر رستمی بوسیله نصب سنسور در جوارب دیسک حفاری و انجام آزمایش های برش موفق به اندازه گیری اولیه نیروهای بین دیسک و سنگ در ناحیه تماس ، گردید و با استفاده از تحلیل نتایج بدست آمده از سنسورها توانست وضعیت تنش ها در زون خردشده را مشخص نماید .

بلحاظ محدودیت در محل نصب سنسورها بر روی دیسک ، همچنین وجود یکسری مشکلات در انجام آزمایش و ساده سازی جهت رسیدن به نتیجه منطقی ، ممکن است نتایج بدست آمده از این روش واقعی نباشند . از اینرو مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایشگاه با نتایج حاصل از مدل سازی عددی ، ضروری بنظر می رسد .

با توجه به موارد فوق الذکر تمرکز این تحقیق بر مدل سازی فرآیند برش سنگ بوسیله دیسک حفاری قرار گرفته است .

در فصل اول این تحقیق کلیاتی در مورد ماشینهای حفار مکانیکی ، دیسک حفاری ، اهمیت تحقیق و هدف از انجام تحقیق بیان می شود .

در فصل دوم مطالعات انجام شده در زمینه مورد تحقیق مرور می شود .

در فصل سوم این تحقیق ، مدل دکتر رستمی (۱۹۹۷) توضیح داده می شود .

در فصل چهارم ، روشهای اجزا مجزا و اجزاء محدود و نرم افزارهای UDEC و ANSYS به طور کامل و جامع توضیح داده می شود .

در فصل پنجم این تحقیق ، به مدل سازی فرآیند برش سنگ بوسیله دیسک حفار با نرم افزارهای UDEC و ANSYS و ارائه نتایج اشاره می شود .

در فصل آخر نیز جمع بندی نتایج بدست آمده ، بحث و بررسی و پیشنهادات ، ارائه شده است .

## فصل اول :

کلیات