مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیم کتابخانه

۱۳۷۸ /۷/ ۱۲

دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل خستگی و شکست در چرخدنده ها به کمک روش اجزاء محدود

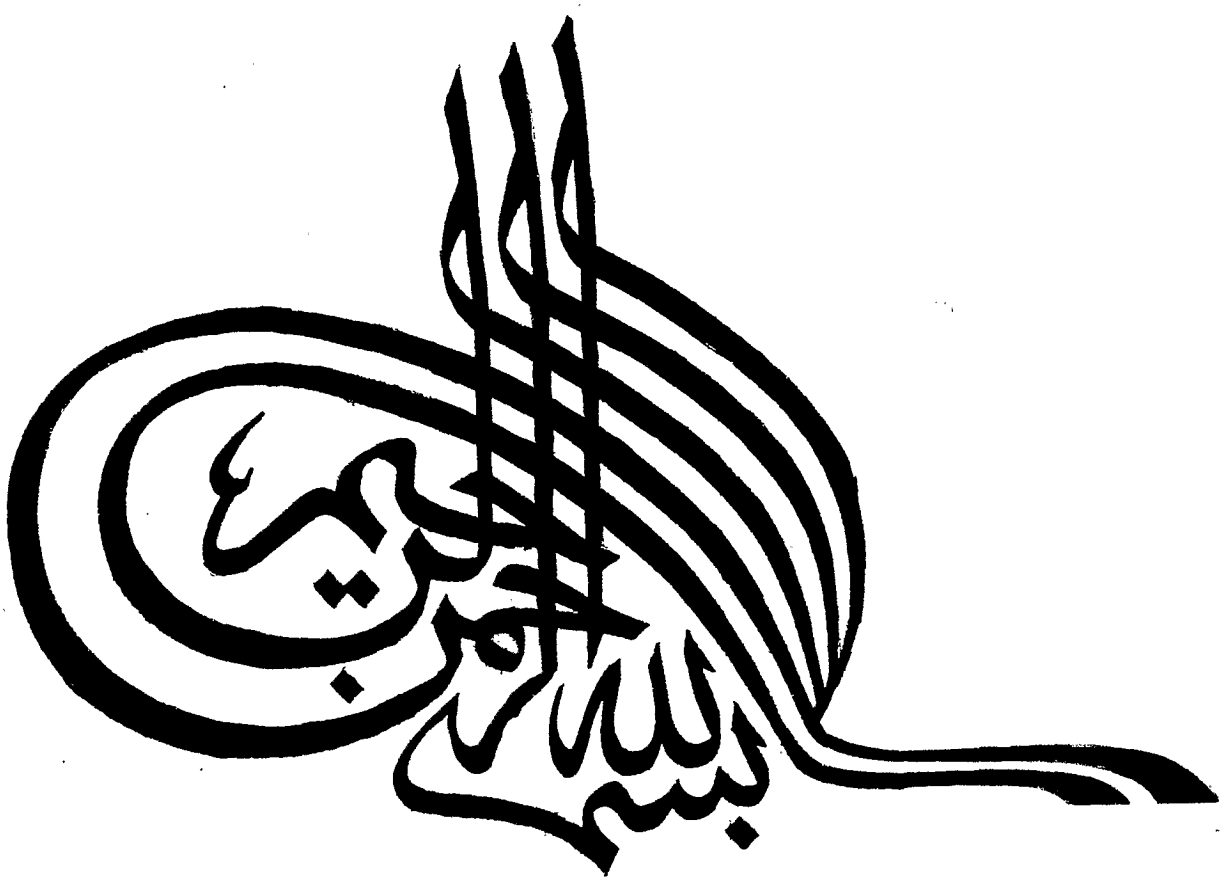
رضا افتخاری وکیلی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک

استاد راهنما: دکتر علیرضا گوهری انارکی

3993/1

آبان ۱۳۷۷


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

پدر و مادرم،

به پاس تشویق و حمایت‌های بی‌دریغشان.

چکیده

در این پروژه رفتار الاستیک - پلاستیک فیلتهای چرخدنده تحت بارهای نوسانی و یکنواخت و به کمک تحلیل اجزاء محدود بررسی شده است و تغییرات تنش‌ها و کرنش‌ها در مسیرهای مختلف روی دندانه در ناحیه الاستیک و پلاستیک به صورت نمودارهای متعدد ارائه شده است. در تحلیل برای ارتباط دادن تنش با نمو کرنش‌های پلاستیک از قانون جریان Prandtle - Reuss همراه با معیار تسلیم Von - Mises استفاده شده است. برای مدل کردن رفتار تنش -کرنش الاستیک - پلاستیک یکنواخت و نوسانی از سه مدل ساده الاستیک - کاملاً پلاستیک (EPP)، الاستیک با سختی ایزوتروپیک (EIH) و الاستیک با سختی سینماتیک (EKH) استفاده شده است و نتایج بدست آمده با مقادیر برآورده شده توسط قوانین تنش -کرنش ناچ (NSSC Rules) مورد مقایسه قرار گرفتند و رابطه عددی مناسب از روی نتایج حاصل ارائه گردیده است. در ادامه نتایج تحلیل در منطقه الاستیک با نتایج آزمایشگاهی فتوالاستیسیته مقایسه شده است.

در این پروژه کلیه نتایج بر حسب خواص ماده نمالایز شده‌اند بطوریکه می‌توان از آنها برای دیگر موا دی که دارای رفتار تنش -کرنش و ابعاد هندسی مشابه باشند استفاده نمود.

تقدیر و تشکر

ضمن سپاس بیکران خداوند، بر خود لازم می‌دانم، از استاد ارجمند آقای دکتر گوهری انارکی که با راهنمائیهای خود نظارت بر این پایان‌نامه را عهده داشته‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از مسئولین آزمایشگاه CAD/CAM و آزمایشگاه مواد مرکب، اساتید محترم هیئت داوری و کلیه دوستانی که اینجانب را در انجام این پروژه یاری داده‌اند سپاسگزارم.

آبان. ۱۳۷۷

فهرست عناوین

فصل‌اول: ۱ - ۱) مقدمه ۲

۲ - ۱) مروری بر کارهای انجام شده ۴

۱ - ۲ - ۱) مجموعه مقالات مربوط به ناچها ۴

۲ - ۲ - ۱) مجموعه مقالات مربوط به چرخندهها ۷

فصل‌دوم: ۱ - ۲) مروری بر کلیات چرخندههای ساده ۹

۲ - ۲) رفتار غیر خطی ماده الاستوپلاستیک ۱۱

۳ - ۲) معیارهای تسلیم ماده (Yeild Creterion) ۱۲

۱ - ۳ - ۲) معیار تسلیم فون میزر (Von Mises) ۱۳

۲ - ۳ - ۲) معیار تسلیم ترسکا (tresca) ۱۴

۳ - ۳ - ۲) معیار تسلیم مور کولمب (Mohr - Coulomb) ۱۵

۴ - ۳ - ۲) معیار تسلیم دراکر - پراگر (Drucker - Prager) ۱۵

۴ - ۲) معیارهای سختشوندگی (معیار کار سختی یا کرنش سختی) ۱۷

۱ - ۴ - ۲) مدل پلاستیک کامل Perfectly Plastic ۱۸

۲ - ۴ - ۲) مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک (Isotropic Hardening) ۱۸

۳ - ۴ - ۲) مدل سختشوندگی سینماتیک (Kinematic Hardening) ۲۰

۴ - ۴ - ۲) مدل سختشوندگی مرکب (Mixed Hardening) ۲۱

۵ - ۲) روابط تنش - کرنش، الاستیک - پلاستیک ۲۱

۶ - ۲) سخت شوندگی الاستیک-پلاستیک ماده ۲۳

تحتبارگذاری تک محوری ۲۳

۷ - ۲ - روشهای تخمین عمر بروز ترک مهندسی در قطعات ناچدار ۲۵

۱ - ۷ - ۲) مدل الاستیک با سخت گردانی سینماتیک (EKH) ۲۷

۲ - ۷ - ۲) مدل الاستیک با سخت گردانی ایزوتروپیک (EIH) ۲۸

فصل‌سوم: ۱ - ۳) کاربرد روشهای عددی در حل تقریبی مسائل مهندسی ۳۱

۱ - ۱ - ۳) روش تفاضل محدود (FDM) ۳۱

۲ - ۱ - ۳) روش المان محدود (FEM) ۳۲

۳ - ۱ - ۳) روش المان مرزی (BEM) ۳۲
۲ - ۳) مقایسه روشهای عددی ۳۳
۳ - ۳) روش اجزاء محدود (المان محدود) ۳۴
۴ - ۳) اصل می‌نیمم انرژی پتانسیل و کاربرد آن ۳۶
در روش اجزاء محدود ۳۶
۵ - ۳) حل معادلات غیر خطی در روش اجزاء محدود ۴۰
۱ - ۵ - ۳) روش تکرار مستقیم ۴۱
۲ - ۵ - ۳) روش نیوتن رافسون (روش سختی مماسی) ۴۴
۳ - ۵ - ۳) روش نیوتن - رافسون بهبود یافته (روش سختی اولیه) ۴۶
۶ - ۳) معیار همگرائی ۴۷
۱ - معیار جابجائی: ۴۷
۲ - معیار نیرو: ۴۷
۳ - معیار انرژی: ۴۸
۷ - ۴) محاسبه جابجائی، کرنش و تنش در مسائل ۴۹
الاستیک - پلاستیک ۴۹
فصل چهارم: ۱ - ۴) مقدمه ۵۷
۲ - ۴) مشخصات هندسی دندانه ۵۷
۳ - ۴) مدلسازی چرخدنده در اجزاء محدود ۵۸
۴ - ۴) تحلیل اجزاء محدود ۶۰
۵ - ۴) نحوه بارگذاری ۶۱
۶ - ۴) شرائط مرزی ۶۲
۷ - ۴) معیارهای همگرائی ۶۳
۸ - ۴) تحلیل الاستیک - پلاستیک ۶۴
۱ - ۸ - ۴) محاسبه تنش و کرنش اسمی ۶۴
۲ - ۸ - ۴) نتایج تحلیل الاستیک - پلاستیک روی دندانه ۶۵
۳ - ۸ - ۴) اثر ضخامت دندانه در رفتار تنش - کرنش ناچ ۶۹
۴ - ۸ - ۴) اثر نوع بارگذاری (استاتیکی و نوسانی) و مدل رفتار تنش - کرنش ساده ۷۰
۹ - ۴) مقایسه نتایج آنالیز اجزاء محدود با روابط عددی ۸۰
۱۰ - ۴) مقایسه نتایج آنالیز اجزاء محدود با آزمایش فتوالاستیسیته ۸۲
۱ - ۱۰ - ۴) آشنائی با فتوالاستیسیته ۸۲

۲ - ۱۰ - ۴) آزمایش فتوالاستیسیته ۸۳
۳ - ۱۰ - ۴) نتیجه آزمایش ۸۳
فصل پنجم: ۱ - ۵) نتیجه‌گیری ۸۷
۲ - ۵) پیشنهادهائی جهت تحقیقات آینده ۸۷
مراجع ۹۸

فهرست تصاویر

فصل دوم.....
شکل (۱ - ۲) نمایش مشخصات چرخدنده.....۱۰
شکل (۲ - ۲) نمایش دوبعدی معیارهای تسلیم ترسکا و فون میزر.....۱۴
a) نمایش در صفحه p b) نمایش مهندسی.....۱۴
شکل (۳ - ۲) نمایش دایره مور معیار تسلیم مور کولمب.....۱۵
شکل (۴ - ۲) نمایش هندسی سطوح.....۱۶
شکل (۵ - ۲) نمایش دو بعدی معیارهای تسلیم.....۱۷
مور - کولمب و دراکر - پراگر در صفحه p.....۱۷
شکل (۶ - ۲) مدلهای ریاضی برای نمایش رفتارهای مختلف.....۲۰
سخت‌شوندگی کرنشی.....۲۰
شکل (۷ - ۲) نمایش هندسی شرط تعامد طبق نظریه قانون جریان مربوطه.....۲۲
شکل (۸ - ۲) رفتار سخت‌گردانی کرنش الاستوپلاستیک.....۲۵
برای حالت تک محوری.....۲۵
شکل (۹ - ۲) پروسه برآورد عمر بروز ترک در قطعات ناچدار.....۲۶
شکل (۱۰ - ۲) تئوریهای ارائه شده برای اثر باوشینگر.....۲۸
شکل (۱۱ - ۲) مدلهای مختلف رفتار تنش - کرنش سیکلی ماده.....۲۹
فصل سوم.....
شکل (۱ - ۳) منحنی تنش - کرنش و روش تکرار مستقیم.....۴۳
شکل (۲ - ۳) الگوریتم حل به روش نیوتن رافسون برای مسئله یک متغیره.....۴۵
شکل (۳ - ۳) الگوریتم حل مسئله به روش.....۴۶
شکل (۴ - ۳) تغییرات نمو تنش در حالتی که قبلاً تسلیم به وقوع پیوسته است.....۵۱
شکل (۵ - ۳) تغییرات تنش در حالتی که برای اولین بار تسلیم اتفاق می‌افتد.....۵۲
شکل (۶ - ۳) فرآیند اصلاح (کاهش) تنش برای رسیدن به سطح تسلیم.....۵۴
فصل چهارم.....

شکل (۱ - ۴) نمایش مش ریز و درشت در مدل ۵۹
شکل (۲ - ۴) مقایسه تنشهای معادل در فیلت‌ها برای مش‌بندی ریز و درشت ۵۹
شکل (۳ - ۴) مدل دندانه با پهنای $b = 1$ ۶۰
شکل (۴ - ۴) نمایش مدل دندانه با اعمال شرائط مرزی ۶۳
شکل (۵ - ۴) نمایش مسیرهای مختلف روی دندانه ۶۴
شکل (۸ - ۴) تغییرات تنش‌های معادل نرمالایز شده در ۶۷
الف) سمت راست دندانه ب) سمت چپ دندانه ۶۷
شکل (۹ - ۴) تغییرات تنش‌های طولی نرمالایز شده در ۶۸
الف) سمت راست دندانه ب) سمت چپ دندانه ۶۸
شکل (۱۰ - ۴) تغییرات تنش‌های معادل و طولی در ریشه دندانه ۶۸
شکل (۱۱ - ۴) تغییرات کرنشی پلاستیک نرمالایز شده ۶۹
در فیلت‌های فشاری و کششی و منطقه زیربار ۶۹
شکل (۱۲ - ۴) تغییرات کرنش معادل کل نرمالایز شده در ۶۹
الف) فیلت راست ب) فیلت چپ ۶۹
شکل (۱۳ - ۴) تغییرات تنش معادل و کرنش ۷۰
معادل فیلت فشاری در امتداد ضخامت دندانه ۷۰
شکل (۱۴ - ۴) تغییرات ضرائب K_σ و K_ε برحسب γ برای فیلت فشاری ۷۱
تحت بارگذاری استاتیکی براساس ماکزیمم تنش و کرنش معادل ۷۱
شکل (۱۵ - ۴) تغییرات ضرائب K_σ و K_ε برحسب γ برای فیلت فشاری ۷۲
تحت بارگذاری استاتیکی براساس ماکزیمم تنش و کرنش طولی ۷۲
شکل (۱۶ - ۴) تغییرات ضرائب K_σ و K_ε برحسب γ برای فیلت کششی ۷۲
تحت بارگذاری استاتیکی براساس ماکزیمم تنش و کرنش معادل ۷۲
شکل (۱۷ - ۴) تغییرات ضرائب K_σ و K_ε برحسب γ برای فیلت کششی ۷۳
تحت بارگذاری استاتیکی براساس ماکزیمم تنش و کرنش طولی ۷۳
شکل (۱۸ - ۴) تغییرات ضرائب K_σ و K_ε برحسب γ برای فیلت فشاری ۷۳
تحت بارگذاری استاتیکی ۷۳
شکل (۱۹ - ۴) تغییرات ضرائب K_σ و K_ε برحسب γ برای فیلت کششی ۷۴
تحت بارگذاری استاتیکی ۷۴
شکل (۲۰ - ۴) رفتار تنش معادل - کرنش پلاستیک معادل نوسانی ۷۵
شکل (۲۲ - ۴) تغییرات تنش معادل و کرنش معادل کل ۷۷

در حین بارگذاری و باربرداری در تنش‌های اسمی مختلف. ۷۷
شکل (۲۳ - ۴) تغییرات K_σ و K_ε بر حسب γ برای فیلت فشاری. ۷۸
تحت بارگذاری نوسانی براساس ماکزیمم تنش - کرنش معادل. ۷۸
شکل (۲۴ - ۴) تغییرات K_σ و K_ε بر حسب γ برای فیلت فشاری. ۷۸
تحت بارگذاری نوسانی براساس ماکزیمم تنش - کرنش طولی ۷۸
شکل (۲۵ - ۴) تغییرات K_σ و K_ε بر حسب γ برای فیلت کششی ۷۹
تحت بارگذاری نوسانی براساس ماکزیمم تنش - کرنش معادل. ۷۹
شکل (۲۶ - ۴) تغییرات K_σ و K_ε بر حسب γ برای فیلت کششی. ۷۹
تحت بارگذاری نوسانی براساس ماکزیمم تنش - کرنش طولی ۷۹
شکل (۲۷ - ۴) مقایسه کرنش پیش‌بینی شده توسط روش ۸۱
اجزاء محدود و قوانین عددی با سختی‌های کرنشی متفاوت ۸۱
شکل (۳۱ - ۴) مقایسه تنش پیش‌بینی شده توسط روش ۸۵
اجزاء محدود و آزمایش فتوالاستیته در فیلت فشاری. ۸۵
شکل (۳۲ - ۴) مقایسه تنش پیش‌بینی شده توسط روش ۸۵
اجزاء مجدود و آزمایش فتوالاستیته در فیلت کششی. ۸۵

فهرست علائم

مدل الاستیسیته ..... E

مدول الاستیسیته مؤثر ..... E_{eff}

مدل پلاستیسیته ..... E_p ,E_T

مدول سکانت ..... E_s

مدول برشی ..... G

نامتغیرهای تنش ..... I_1 ,I_2 ,I_3

نامتغیرهای تنش‌انحرافی ... I'_1 ,I'_2 ,I'_3

ضریب تمرکز تنش هندسی ..... K_t

ضریب تمرکز تنش پلاستیک ..... K_σ

ضریب تمرکزکرنش‌الاستیک ـ پلاستیک K_ε

گام دایره‌ای ..... p

گام قطری ..... P

اندازه سردنده ..... a

اندازه پای دنده ..... b

تعداد دندانه ..... N

تابع پتانسیل پلاستیک ..... Q

تاج سخت شوندگی ..... H'

انرژی پتانسیل کل ..... π

انرژی کرنشی ..... U

کار ..... W

نمای قانون intermediai ..... m

تنش‌های محوری ..... σ_x ,σ_y ,σ_z

تنش‌های برشی ..... τ_{xy},τ_{yz} ,τ_{zx}

کرنش‌های محوری ..... ε_x ,ε_y ,ε_z

کرنش‌های برشی ..... γ_{xy} ,γ_{yz} ,γ_{zx}

تنش تسلیم ..... σ_m

تنش اسمی ..... σ_a

تنش معادل ..... σ_{eq}

نسبت تنش اسمی به تنش تسلیم ..... γ

میزان سختی کرنشی ..... β

ضریب پواسون ..... υ

مولفه‌های تنش ..... σ_{ij}

مولفه‌های کرنش ..... ε_{ij}

تنش هیدروستاتیکی ..... σ_m

مولفه‌های کرنش الاستیک ..... ε^e_{ij}

مولفه‌های کرنش پلاستیک ..... ε^p_{ij}

تانسور تنش ..... $\{\sigma\}$

تانسور کرنش ..... $\{\varepsilon\}$

زاویه فشار ..... φ

مدل الاستیک کاملاً پلاستیک ..... EPP

مدل الاستیک با سختی سینماتیک .. EKH

مدل الاستیک با سختی ایزوتروپیک . EIH

روش المانهای محدود ..... FEM

فصل اول :

مقدمه ومروری بر کارهای انجام شده

۱ - ۱) مقدمه

در اکثر قطعات مکانیکی، ناپیوستگیهای هندسی (از قبیل شیار، جاخار، رزوه و ...) وجود دارند که اصطلاحاً ناچ (notch) نامیده می‌شوند. ناچها عامل ایجاد تمرکز تنش هندسی بسیار بالائی در ریشه خود می‌باشند به طوری که ابتدا باعث ایجاد بروز ترکهای ریز و سپس پیشروی ترکها می‌گردند. در محدودهٔ الاستیک، میزان افزایش تنش در ناچ را نسبت به تنش اسمی با ضریبی به نام ضریب تمرکز تنش هندسی K_t بیان می‌کنند اصولاً ضریب تمرکز تنش هندس برای اجسام نرم در مقابل بارهای استاتیکی از اهمیت خاصی برخوردار نمی‌باشد. زیرا به علت ایجاد منطقهٔ خمیری (پلاستیک) در اطراف ناچ، توزیع تنش نسبت به حالت الاستیک کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر وجود منطقهٔ پلاستیک در محل ناچ موجب رها شدن تمرکز تنش به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌گردد و لذا در طراحی معضلی ایجاد نمی‌کند. اما در مورد اجسام نرم تحت بارهای دینامیکی تمرکز تنش از اهمیت بالائی برخوردار است. همچنین در اجسام شکننده تحت بارهای استاتیکی، ضریب تمرکز تنش هندسی حائز اهمیت می‌باشد. در هر حال برای تخمین زمان بروز ترکهای ریز مهندسی، به شدت به میزان محدودیت منطقه پلاستیک در اطراف ناچ بستگی دارد.

چرخدنده‌ها در معرض مدهای شکست زیادی هستند که سه تا از آنها به خستگی فلزات بستگی دارد [۱۰]:

۱ - خستگی ناشی از پوسته شدن نزدیک خط دایره گام Spalling Fatigue

۲ - خستگی ناشی از حفره شدن نزدیک خط دایره گام Pitting Fatigue

۳ - خستگی خمشی در ریشه دندانه.

که در این پایان نامه به دلیل اهمیت خستگی خمشی در ریشه دندانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

امروزه تخمین زمان بروز ترک در محل ناچ از روش آزمایش قطعات اصلی (Prototype Testing) بسیار گران است. همچنین تخمین عمر با استفاده از روشهای

عددی نظیر روش المانهای محدود نیز بسیار وقت‌گیر و گران قیمت می‌باشد. از این رو محققین بسیاری سعی به ارائه تئوریها و روشهای ساده‌تری نموده‌اند. این روشها بر مبنای استفاده از روابط تنش - کرنش بحرانی بر اساس تنش - کرنش اسمی می‌باشند. این روشها بسیار مفید بوده و طراحی سریع و ارزان قیمتی را به همراه دارد.

در این پروژه صحت یا عدم صحت این تئوریها برای چرخدنده‌ها با ضخامتهای مختلف تحت بارهای استاتیکی و نوسانی و برای سختی کرنشی صفر تا یک $\beta = (0, 0.05, 0.1, 0.2, ..., 1)$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تحقیق از طریق روش المانهای محدود و با استفاده از کد غیر خطی نرم‌افزار NISAII انجام می‌شود. تحلیل الاستیک (خطی) براساس معادلات هوک می‌باشد و تحلیل الاستیک، پلاستیک (غیر خطی) با استفاده از قانون جریان Parendtl - Rauss آمیخته با معیار تسلیم Von Mises انجام می‌گیرد. رفتار استاتیکی ماده توسعه سه مدل کاملاً الاستیک ($\beta = 1$) و الاستیک کاملاً پلاستیک ($\beta = 0$) و الاستیک با سختی کرنشی ($0 < \beta < 1$) بیان شده و برای رفتار سیکلی ماده، سه مدل Epp، EKH، EIH در نظر گرفته شده است. مدلهای مورد استفاده به گونه‌ای هستند که رفتار تنش - کرنش طیف وسیعی از مواد مهندسی را در برمی‌گیرد.

به طور کلی پایان‌نامه مطالب زیر را در برمی‌گیرد:

فصل اول، به مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده توسعه محققین مختلف در مورد موضوع مرتبط با پایان‌نامه اختصاص دارد: نتایج تعدادی از این کارها، برای مقایسه و بحث و نتیجه‌گیری نهائی در فصل آخر مورد استفاده قرار گرفته است.

در فصل دوم، علاوه بر مروری بر کلیات چرخدنده‌ها، تئوریها و معادلات حاکم بر رفتار الاستیک و الاستیک پلاستیک مورد تشریح شده‌اند. همچنین تئوریهای ارائه شده برای فرموله کردن چگونگی تغییرات تنش - کرنش بحرانی در محل ناچ به طور خلاصه مطرح گردیده‌اند.

فصل سوم به تشریح چگونگی حل معادلات الاستیک (خطی) و الاستیک - پلاستیک (غیرحطی) از روش المانهای محدود پرداخته شده است.

فصل چهارم به بررسی رفتار الاستیک - پلاستیک دندانه مورد مطالعه تحت بارگذاری