به نام خدایی که در این نزدیکی است

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای میلاد شعبانیان پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان تحلیل خستگی کم سیکل مستهلك کننده های آکاردونی** در تاریخ ۱۳۸۹/۲/۱۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی زلزله پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	
استاد مشاور	دکتر علی اکبر آقا کوچك	استاد	
استاد ناظر	دکتر ناصر خاجی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر شاهرخ مالك	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر حمید محرمی از طرف	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

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

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی عمران- مهندسی زلزله است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر شریف شاه‌بیک و مشاوره جناب آقای دکتر علی اکبر آقاکوچک از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده 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 ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب میلاد شعبانیان دانشجوی رشته مهندسی عمران- مهندسی زلزله مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: میلاد شعبانیان

تاریخ و امضا: ۱۳۸۹/۸/۱۷

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب میلاد شعبانیان دانشجوی رشته مهندسی عمران ورودی سال تحصیلی۸۷-۸۶ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....

تاریخ: 1389/8/17

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران-زلزله

تحلیل خستگی کم سیکل مستهلک‌کننده‌های آکاردئونی

میلاد شعبانیان

استاد راهنما

دکتر شریف شاه‌بیک

استاد مشاور

دکتر علی اکبر آقاکوچک

اردیبهشت ۱۳۸۹

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی شان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند...

این اثر را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می نمایم

و

به روح زنده خفتگان به زیر آوارهای ناشی از زلزله های ایران زمین

سپاسگزاری و قدردانی

اکنون که با استعانت از درگاه ملکوتی ایزد یکتا این پایان‌نامه را با موفقیت به انجام رسانیده‌ام بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که مرا در این راه یاری نموده‌اند تشکر و قدردانی نمایم؛ از استاد راهنمای گرامیم جناب آقای دکتر شاه‌بیک که گذر از مسیر دشوار این تحقیق بدون راهنمایی‌های دلسوزانه و عالمانه ایشان میسر نبود قدردانی و تشکر می‌نمایم. همچنین از استاد مشاور ارجمندم جناب آقای دکتر آقاکوچک که با اعمال نظرهای ارزشمند خود نقش بسزایی در پربارتر نمودن این تحقیق بر عهده داشتند سپاسگزارم. دوستان و همکلاسی‌های عزیزم به ویژه مهندسین هومن فیاضی، مسعود شفیعی و امین عمادی که در طول این دوره تحصیلی همواره یاری‌گر و مشوق اینجانب بوده‌اند قدردانی می‌نمایم. و در نهایت از همه عزیزانی که به هر نحو نقشی در پیش‌برد مراحل مختلف این تحقیق بر عهده داشتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

با تشکر

میلاد شعبانیان

اردیبهشت ۱۳۸۹

چکیده

امروزه به منظور اتلاف انرژی زلزله مستهلک‌کننده و میراگرهای متنوعی ساخته شده که از انواع این میراگرها می‌توان به مستهلک‌کنندهای DAS و ADAS که با استفاده از تغییر شکل‌های خمیری انرژی زلزله را اتلاف می‌کنند و یا مستهلک‌کننده‌های لزج که با تکیه بر خواص سیالات به استهلاک انرژی می‌پردازند، اشاره نمود. مستلک‌کننده مورد نظر ما (مستهلک‌کننده آکاردئونی) نیز بر اساس تغییر شکل‌های خمیری به استهلاک انرژی خواهد پرداخت. به منظور بررسی رفتار این مستهلک‌کننده تحت بارگذاری چرخه‌ای در ابتدا ملزم به تعیین یک الگوی شکست نرم مناسب برای ماده مورد استفاده می‌باشیم. یکی از الگوهای رایج و ساده برای مشخص کردن شکست نرم معیار شروع شکست بر اساس کرنش خمیری بحرانی است. پس از تحقیقات انجام شده در این زمینه مشخص شد که این معیار به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر تنش سه محوری در رشد حفره‌ها و ایجاد ترک معیار مناسبی نیست. لذا در این تحقیق سعی بر آن بوده تا با استفاده از معیار خستگی کم سیکل ارائه شده توسط کانوینده مستهلک‌کننده‌ای آکاردئونی طراحی گردد و تاثیر متغیرهای گوناگون بر زمان شکست و انرژی خمیری اتلافی در آن دیده شود. برای این منظور فولاد ساختمانی ایران به عنوان ماده سازنده نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه متغیرهای مورد نیاز در روابط برای این فولاد کالیبره گردیده‌اند. در ادامه با استفاده از معیار خستگی کانوینده و زبان برنامه نویسی زمان شکست نمونه‌ها، محدوده بحرانی و مکان شروع شکست تعیین می‌گردد. در نهایت با تغییر مشخصات هندسی مستهلک‌کننده به بررسی نقش نقش هر یک از این متغیرها در زمان شکست و انرژی اتلافی پرداخته شده است، که این امر می‌تواند ما را به نحو مطلوب در ساخت یک مستهلک‌کننده آکاردئونی بهینه راهنمایی نماید.

کلید واژه: مدل رشد حفره‌ای سیکلی، خستگی کم دامنه، کالیبراسیون فولاد ساختمانی ایران، مستهلک‌کننده آکاردئونی.

فهرست مطالب

پیشگفتار ۱

فصل ۱ ۳

۱-۱- مقدمه ۴

۱-۲- معیار SMCS برای پیش‌بینی شکست نرم ۵
۱-۲-۱- معرفی مبانی معیار **SMCS** ۵
۱-۲-۲- آزمایش‌های شکست نرم به منظور محاسبه متغیرهای معیار **SMCS** ۶

۱-۳- الگوی شکست نرم بر مبنای رشد حفره (VGM) ۹
۱-۳-۱- معرفی مبانی معیار **VGM** ۹
۱-۳-۲- کالیبراسیون متغیرهای مدل **VGM** ۱۰

۱-۴- الگوی شکست نرم بر مبنای رشد حفره در بارگذاری چرخه‌ای (CVGM) ۱۱
۱-۴-۱- معرفی مبانی معیار **CVGM** ۱۱
۱-۴-۲- الگوی پیشنهادی برای خستگی بسیار کم چرخه در فولادهای ساختمانی ۱۲
۱-۴-۳- رشد حفره تحت تاثیر بارگذاری یکنوا ۱۴
۱-۴-۴- رشد حفرات تحت تاثیر بارگذاری چرخه‌ای ۱۵
۱-۴-۵- میزان بحرانی رشد حفره تحت بارگذاری چرخه‌ای ۱۵
۱-۴-۶- کالیبراسیون متغیرهای **CVGM** ۱۷

فصل ۲ ۱۹

۲-۱- مقدمه ۲۰

۲-۲- آزمایش تک محوری کششی ۲۰
۲-۲-۱- منحنی تنش - کرنش مهندسی ۲۱
۲-۲-۲- منحنی تنش - کرنش حقیقی ۲۳

۲-۳- سخت‌شوندگی در مواد ۲۴
۲-۳-۱- مقدمه ۲۴
۲-۳-۲- سخت‌شوندگی همسانگرد ۲۴
۲-۳-۳- سخت‌شوندگی کینماتیک ۲۵

۲-۳-۳- سخت‌شوندگی ترکیبی ۲۶

۲-۴- مدل خمیری لمایتره و چابوچی و روش‌های کالیبراسیون آن ۲۷
۲-۴-۱- مقدمه ۲۷
۲-۳-۲- مدل خمیری با سخت‌شوندگی مرکب همسانگرد و کینماتیک ۲۷
۲-۳-۲-۱- روش کالیبراسیون پیشنهادی دانشگاه اوزاکا ۲۸
۲-۳-۲-۲- روش کالیبراسیون پیشنهادی دیگر ۲۹

۲-۵- کالیبراسیون مدل های شکست نرم برای فولاد ساختمانی ایران ۳۲
۲-۵-۱- مقدمه ۳۲
۲-۵-۲- کالیبراسیون مدل‌های **SMCS** و **VGM** ۳۲
۲-۵-۲- کالیبراسیون مدل **CVGM** ۳۵

فصل ۳ ۳۷

۳-۱- مقدمه ۳۸

۳-۲- مشخصات هندسی مستهلک‌کننده آکاردئونی ۳۸

۳-۳- مراحل شبیه‌سازی مستهلک‌کننده آکاردئونی در برنامه Abaqus\Cae ۳۹

۳-۴- مروری بر نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود ۴۸
۳- ۴- ۱- نتایج بیان شده در قالب نمودار ۴۸
۳- ۴- ۲- نتایج نیرو – جابه‌جایی گرفته شده از تحلیل اجزای محدود مستهلک‌کننده‌های آکاردئونی ۸۱

فصل ۴ ۹۴

۴-۱- مقدمه ۹۵

۴- ۲- بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود ۹۵

۴-۳- پیشنهادات ۹۷

فهرست مراجع ۹۸

پیوست ۱

مشخصات ماده مورد استفاده در نرم‌افزار Abaqus\Cae

پیوست ۲

برنامه Matlab مورد استفاده برای بدست آوردن آدرس نقطه شکست و زمان آن

Abstract

پیشگفتار

با توجه به قرارگیری ایران در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا و آگاهی از صدمات جبران ناپذیر زلزله‌های اتفاق افتاده در کشور همواره مهندسان عمران در تلاش برای کاهش اثرات مخرب زلزله‌های احتمالی آینده بوده‌اند. آمار زلزله‌های ۲۰ سال گذشته در ایران نشان می‌دهد که علاوه بر خرابی‌های رخ داده در اثر زلزله ۹۲۹۹۴ نفر از هموطنان در شهرهای منجیل، رشت، قزوین، آوج، اردبیل، زنجان، بیرجند و بم جان خود را از دست داده‌اند که این تعداد زیاد تلفات خود به تنهایی می‌بایست شوک عظیمی بر پیکره مهندسی کشور وارد می‌نمود تا از این پس شاهد چنین حوادث دلخراشی نباشیم.

امروزه استفاده از میراگرها و مستهلک‌کننده‌های لرزه‌ای یکی از روشهای مناسب و رایج برای از بین بردن اثرات مخرب زلزله‌ها می‌باشد. اگر چه در گذشته دور ایرانیان در ساخت سازه‌هایی مقاوم در برابر زلزله تبحر داشته‌اند و نمونه این میراگرها در پی‌های تخت جمشید و یا در ستون‌های کاروان سرای سعدالسلطنه قابل مشاهده است اما امروزه به دلیل وارداتی بودن این تکنولوژی هزینه استفاده از آن در کشورمان بسیار بالاست. لذا صرف زمان و هزینه بیشتر به منظور کاهش هزینه‌های جانی و مالی الزامی به نظر می‌رسد.

در این پایان نامه سعی شده تا مستهلک‌کننده‌ای ساده به نام مستهلک‌کننده آکاردئونی طراحی و تاثیر پارامترهای مختلف را در زمان شکست و انرژی اتلافی آن بررسی نماییم. برای محاسبه زمان شکست از معیاری به نام مدل رشد حفره تحت بارگذاری چرخه‌ای که بوسیله کانوینده ارائه شده استفاده گردیده و شبیه‌سازی و تحلیل اجزای محدود در برنامه Abaqus\Cae انجام گرفته است. در نهایت امید است این تحقیق سر آغازی برای نگاهی دوباره در صنعت ساختمان سازی و مرهمی بر گوشه‌ای از اندوه بازماندگان حوادث ناشی از زلزله گردد.

فصل ۱

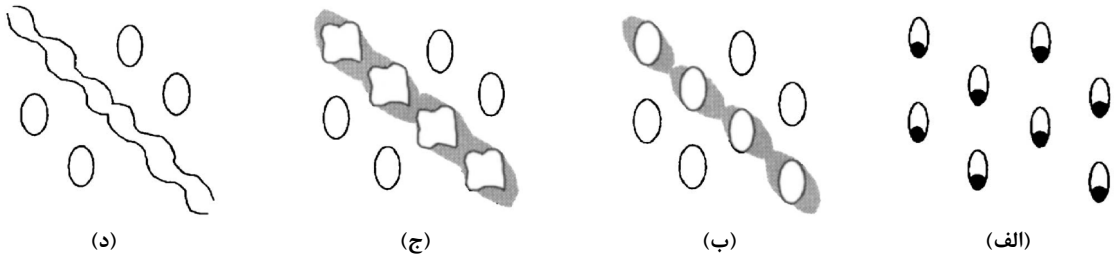
مدل‌ها وسازوکارهای شکست نرم

- معیار SMCS برای پیش‌بینی شکست نرم
- الگوی شکست نرم بر مبنای رشد حفره (VGM)
- الگوی شکست نرم بر مبنای رشد حفره در بارگذاری چرخه‌ای (CVGM)

۱-۱- مقدمه

یکی از نکات مهمی که در تعیین الگوی‌های ترک مطرح می‌شود، استفاده از یک معیار شکست مناسب برای ماده است. یکی از ابتدایی‌ترین معیارهای رایج، بر اساس کرنش خمیری محوری شکست بیان می‌گردد. در این روش میزان کرنش اصلی بیشینه در هر نقطه با مقدار کرنش خمیری محوری بحرانی مقایسه می‌شود. برای حالت سه محوری، توسعه آشکار این مدل بر اساس کرنش خمیری معادل بنا شده است. اگرچه مدل‌های مبتنی بر کرنش بحرانی یک تقریب مرتبه اول مناسب محسوب می‌شوند اما در اغلب موارد قادر به در نظر گرفتن متغیرهای موثر در آغاز شکست نرم نمی‌باشند.

در تحقیقات گذشته [۱ و ۲] مشخص شده است که کرنش خمیری به تنهایی شاخص مناسبی برای پیش‌بینی شکست نرم نمی‌باشد، زیرا آغاز شکست به صورت کامل به وضعیت تنش وابسته است. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی رایس و تریسی [۳] و هنکوک و مکنزی [۴] نشان می‌دهد که تنش هیدروستاتیکی کششی باعث تسهیل در افزایش حجم ماده گردیده، و بنابراین به شدت بر مراحل رشد حفرات و اتصال آن‌ها که باعث آغاز شکست نرم می‌شوند اثر گذار است. این امر در تقابل با تئوری خمیری می‌باشد که بر طبق آن تنش‌های سه محوری هیدروستاتیکی تاثیری در تسلیم ماده ندارند. تحقیقات بر روی تاثیر تنش‌های سه محوره بر کرنش‌های ناشی از شکست نرم منجر به توسعه و ایجاد معیارهای SMCS [۱] و VGM [۲] گردیده که در آن‌ها شروع ترک نرم بر اساس تابعی از نسبت تنش‌های سه محوری به تنش هیدروستاتیکی و کرنش‌های خمیری پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۱-۱- الگوی تشکیل ترک نرم در فولاد نرمه. الف) ایجاد حفرات، ب) رشد حفرات و تمرکز تنش ، ج) گلویی شدن بین حفرات، د) اتصال حفرات و تشکیل ترک [۵].

فولاد نرمه یکی از انواع فولادهای رایج در سازه‌ها است که شکست آن در اغلب موارد به صورت نرم همراه با تغییر شکل‌های خمیری زیاد صورت می‌پذیرد. مراحل شکل‌گیری ریز ترک در چنین ماده‌ای که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است شامل مراحل ایجاد حفرات، رشد، گلویی شدن و اتصال آن‌ها به یکدیگر است [۶].

[1] Stress modified critical strain
[2] Void growth model

حفرات در اطراف ناخالصی‌های موجود در فولاد و در زمانی که تنش کافی برای غلبه بر نیروی چسبندگی بین مرز این مواد و فولاد وجود دارد پدیدار می‌شوند. پس از شکل‌گیری اولیه حفرات، تنش هیدروستاتیکی و کرنش خمیری، موجب رشد حفرات می‌گردد. در مرحله بعدی با ایجاد پدیده گلویی‌شدن در مرز بین حفرات، پدیده ناپایداری خمیری آغاز و موجب می‌شود تا در نهایت دو حفره رشد یافته به هم متصل شوند و ایجاد یک سطح شکست جدید نمایند.

۱-۲- معیار SMCS برای پیش‌بینی شکست نرم

۱-۲-۱- معرفی مبانی معیار SMCS

مک کلینتاچ [۷] و رایس و تریسی [۳] به صورت تحلیلی روابطی را برای تعیین رشد حفرات استوانه‌ای یا کروی در محیط تنش سه بعدی ارائه نموده‌اند که نشان می‌دهد میزان رشد حفرات متناسب با تابعی نمایی از تنش سه محوری (اندیس سه محوری[3]) است. تنش سه محوری در هر نقطه از ماده به صورت زیر تعریف می‌شود

$$T = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \qquad (۱-۲-۱)$$

که σ_m تنش هیدروستاتیکی (تنش متوسط) و σ_e تنش موثر یا فون میسز است. طبق تئوری خمیری کلاسیک تنش میانگین تاثیری بر تسلیم ماده در مقیاس بزرگ ندارد، این در حالی است که این تنش میانگین در تسلیم محلی اطراف حفرات و رشد آن‌ها بسیار موثر می‌باشد.

اگرچه مک کلینتاچ [۷] و رایس و تریسی [۳] روابط تحلیلی خود را برای رشد حفرات استوانه‌ای و کروی ارائه داده‌اند، اما آغاز ترک نرم تحت تاثیر بسیاری از عوامل دیگر نظیر نحوه توزیع حفرات اولیه، تغییر شکل این حفرات، اندرکنش آن‌ها و ایجاد و رشد حفرات بعدی پیش از ایجاد اتصال بین حفرات موجود می‌باشد. مدل‌های بسیاری سعی نموده‌اند تا این پدیده‌ها را نیز در نظر بگیرند [۸ و ۹] اما پیچیدگی آن‌ها موجب عدم استفاده کاربردی شده است. در مدل SMCS که به بررسی آن خواهیم پرداخت فرض بر این است که رشد حفرات عامل اصلی در ایجاد شکست نرم می‌باشد.

بر اساس مدل ارائه شده توسط رایس و تریسی [۳] برای رشد حفرات، هنکوک و مکنزی [۴] فرض نموده‌اند که شروع ترک نرم وابسته به اندرکنش تنش سه‌محوری و کرنش خمیری معادل می‌باشد. به ویژه در حضور تنش سه‌محوری بالا آغاز شکست به شدت تسریع می‌شود. بنابراین شکست بر اساس تجاوز کرنش معادل از مقدار کرنش بحرانی که تابعی کاهشی از تنش سه محوری است، بیان می‌شود یعنی

[3] Triaxial index

$$\epsilon_p \geq \epsilon_p\big|_{\text{Critical}} = function\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) = function(T) \qquad (۱-۲-۲)$$

بر اساس رابطه ارائه شده توسط رایس و تریسی [۳] که در آن میزان رشد حفرات به صورت تابع نمایی از تنش سه محوری فرض شده است، هنکوک و مکنزی [۴] رابطه کرنش خمیری بحرانی را به صورت زیر بیان نموده‌اند

$$\epsilon_p\big|_{\text{Critical}} = \alpha \exp\left(-1.5\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) \qquad (۱-۲-۳)$$

α ثابت وابسته به نوع ماده است. یک روش کالیبره کردن ضریب α توسط پانونتین [۲] ارائه شده است. در ادامه به تفضیل در مورد محاسبه α بحث خواهد شد. ضریب ۱/۵ در رابطه بالا بر اساس روابط تئوری رایس و تریسی به دست آمده است [۳]. مارینی و همکارانش [۱۰] نشان دادند که ضریب ۱/۵ مخصوص مدل کردن مراحل رشد حفرات است و مقادیر دیگری برای محاسبه دقیق‌تر اتصال حفرات به یکدیگر مورد نیاز می‌باشد. برای مثال جانسون و کوک ضریب ۲/۱۲ را برای مدل‌سازی در فولاد ۴۳۴۰ پیشنهاد می‌کنند [۱۱].

معیار SMCS در واقع تفاوت بین کرنش خمیری تجمعی (ϵ_p) و کرنش خمیری محاسبه شده از رابطه (۱-۲-۳) است، بنابراین شکست زمانی آغاز می‌شود که معیار SMCS کمتر از صفر شود، یعنی

$$\text{SMCS} = \epsilon_p - \alpha \exp\left(-1.5\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) > 0 \qquad for \quad r > l^* \qquad (۱-۲-۴)$$

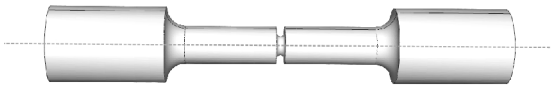
یادآوری این نکته حائز اهمیت است که معیار SMCS از طریق تحلیل اجزای محدود بر پایه مکانیک محیط پیوسته محاسبه می‌شود که در آن رشد حفرات به صورت صریح لحاظ نمی‌گردد. بنابراین علاوه بر مقدار کرنش خمیری داده شده در روابط (۱-۲-۳) و (۱-۲-۴)، معیار شکست باید حاوی یک مقیاس طول باشد تا بر اساس آن بتوان ایجاد ریز ترک‌ها را پیش‌بینی نمود. در نتیجه وجود متغیر دیگری به عنوان طول مشخصه ماده[۴] (l^*) الزامی به نظر می‌آید. بر اساس رابطه (۱-۲-۴) در صورتی که مقدار SMCS در طول l^* از صفر تجاوز کند به منزله ایجاد ریز ترک خواهد بود، پس در مدل SMCS دو متغیر α و l^* وجود دارد که برای هر ماده باید به وسیله انجام آزمایش‌های مناسب تعیین گردد.

۱-۲-۲- آزمایش‌های شکست نرم به منظور محاسبه متغیرهای معیار SMCS

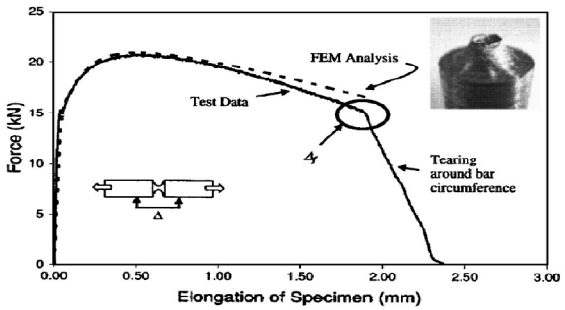
متغیرهای وابسته به معیار SMCS (l^* و α) از طریق انجام آزمایش، تحلیل اجزای محدود و مطالعه ریز ساختاری نمونه‌های استوانه‌ای گلویی شده تحت کشش محوری (SNTT[۵]) به دست می‌آیند (شکل ۱-۲). در آزمایش SNTT به منظور محاسبه متغیرهای معیار SMCS از نمونه‌هایی مانند شکل (۱-۲) استفاده می‌شود [۱۳]. در این آزمایش دو نوع نمونه با شعاع گلویی متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد، که این دو شعاع به منظور بررسی تاثیر تنش سه محوری در منطقه گلویی شده در زمان ایجاد ترک و بررسی صحت رابطه (۱-۲-۴)

[4] Characteristic length
[5] Smooth-notched tensile test

در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از اینکه مقادیر محاسبه شده برای متغیرهای l^* و α مقادیر صحیح می‌باشند، می‌توان آزمایش SNTT را بر روی نمونه‌های دیگر که شعاع گلویی متفاوتی دارند انجام و نتایج شبیه‌سازی را با آزمایش مقایسه نمود. بر روی هر نمونه با شعاع مشخص r^* پنج آزمایش انجام می‌شود. در شکل (۱-۳) نمونه‌ای از منحنی‌های بار- تغییر طول ناحیه گلویی نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل (۱-۳) دیده می‌شود کاهش اولیه مقاومت ارتجاعی به علت تسلیم موضعی و کاهش سطح مقطع نمونه بوده در حالیکه افت سریع شیب منحنی به دلیل ایجاد ریز ترک‌ها و گسترش آن‌ها در نمونه است. در واقع افت سریع شیب منحنی متناظر با پدیده شکست نرم در نمونه می‌باشد. بررسی نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که ترک از قسمت میانی گلویی ایجاد شده و به سمت خارج منتشر می‌شود. همانطور که در شکل (۱-۴) نشان داده شده است سطح مسطح شکل به وسیله گودی‌های موجود غیر یکنواخت شده که دلیل این گودی‌ها رشد حفرات و اتصال آن‌ها به یکدیگر و پارگی ماده می‌باشد.



شکل ۱-۲- نمونه SNTT.



شکل ۱-۳- منحنی نیرو - تغییر طول در نمونه SNTT [۲۲].

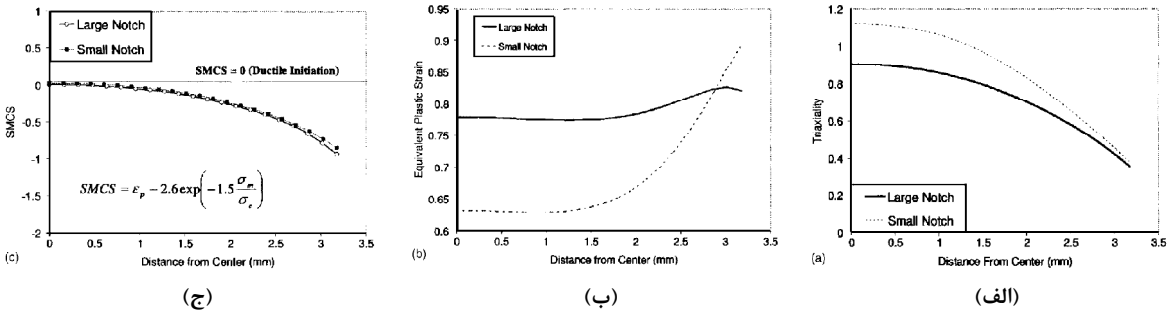
(ب) (الف)

شکل ۱-۴- نمونه‌های SNTT شکسته. الف) نمونه با شعاع بزرگ، ب) نمونه با شعاع کوچک [۲۲].

متغیر α معرف کرنش خمیری بحرانی در معادله (۱-۲-۳) می‌باشد که برای محاسبه آن داده‌های نمونه SNTT به وسیله شبیه‌سازی اجزای محدود تحلیل شده است. همانطور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده

نمودار نیرو - تغییر مکان به دست آمده از تحلیل‌های اجزای محدود تطابق خوبی با نمودارهای رسم شده در آزمایشگاه دارند.

نمودارهای تنش سه‌محوره، کرنش خمیری معادل و تغییرات SMCS در نقطه بارگذاری متناظر با شروع ریزترک‌ها بر روی نمونه‌های با شعاع گلویی کوچک و بزرگ در شکل (۱-۵) به نمایش در آمده‌اند. تنش سه محوری (شکل ۱-۵-الف) در مرکز سطح مقطع گلویی در مقایسه با سطح پیرامونی نمونه بیشتر است که این امر حاکی از درگیری و فشار بیشتر ماده در مرکز سطح مقطع است. برخلاف آن، مقدار کرنش خمیری معادل در سطح بیرونی نمونه بیشتر بوده و هرچه به سمت مرکز حرکت کنیم از این میزان کاسته می‌شود (شکل ۱-۵-ب). این افت در نمونه با شعاع کوچک، سریعتر از نمونه با شعاع گلویی بزرگ است. کرنش خمیری موثر بحرانی در مرکز نمونه با شعاع بزرگتر نسبت به نمونه با شعاع کوچکتر، بیشتر است و این در حالی است که تنش سه‌محوری نمونه با شعاع بزرگتر کمتر از نمونه با شعاع کوچکتر است.



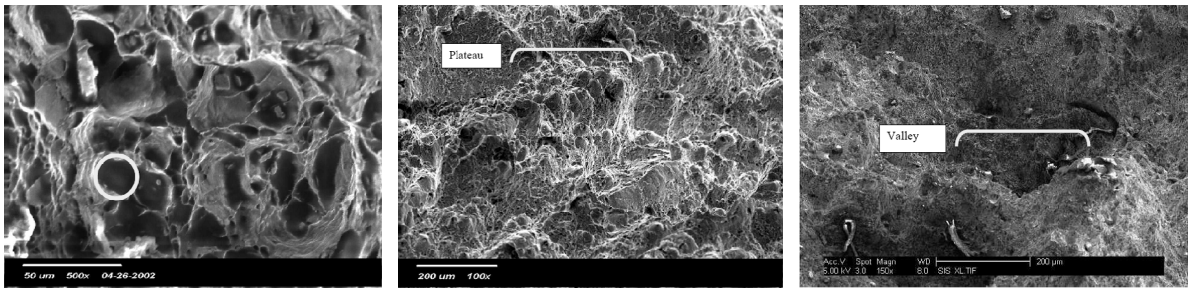
(ج) (ب) (الف)

شکل ۱-۵- منحنی‌های تغییر: الف) تنش سه محوری، ب) کرنش خمیری ، ج) مقدار SMCS در برابر فاصله از مرکز گلویی[۲۲].

این نتیجه نشان می‌دهد که کرنش خمیری موثر به تنهایی شاخص مناسبی برای شکست نیست، زیرا بیشینه کرنش خمیری موثر در سطح بیرونی نمونه‌ها رخ می‌دهد درحالیکه شکست از مرکز آغاز می‌گردد. جواب‌های به دست آمده دارای تطابق مناسبی با نتایج حاصل از معیار کرنش خمیری شکست ارائه شده توسط هنکوک و مکنزی [۴] بوده که دلالت بر کاهش کرنش خمیری موثر بحرانی با افزایش تنش سه‌محوری دارد. متغیر دوم طول مشخصه ماده است که روش‌های مختلفی برای محاسبه آن وجود دارد. یکی از روش‌های رایج محاسبه l^* از طریق اندازه‌گیری قطر گودی ایجاد شده در سطح شکست نمونهSNTT می‌باشد. این قطر معرف فضای بین حفره‌ای در ماده بوده و از طریق بررسی و اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی میکروگراف‌های الکترونی سطح شکست محاسبه می‌شود (شکل ۱-۶). بر مبنای مطالعات انجام شده بر روی مواد [۲، ۴ و ۱۴] کانوینده سه مقدار برای l^* در نظر گرفته است. یکی از این مقادیر حد پایین طول مشخصه بوده که مقدار آن از

محاسبه قطر فرورفتگی[6] تشکیل شده از اتصال دو حفره کنار هم در سطح شکست به دست می‌آید (l_{LB}^*). دو مقدار دیگر بر مبنای بررسی فرورفتگی‌ها و قسمت‌های مسطح[7] سطح شکست بوده که معمولا زمانی که سطح شکست را از زاویه ۴۵ درجه نگاه کنیم مشخص می‌شوند [۴]. این دو مقدار عبارتند از میانگین یا امید طول مشخصه (l_E^*)، که از طریق محاسبه میانگین ۱۵ طول فرورفتگی و برآمدگی از دو میکروگراف الکترونی به دست می‌آیند و حد بالای (l_{UB}^*) که بر اساس بزرگترین طول فرورفتگی و سطوح صاف سطح شکست حاصل می‌شوند [۱۵].

اگرچه هر دو متغیر در ایجاد ترک نرم موثر هستند ولی همانطور که در شکل (۱-۴) مشخص است معیار SMCS در نزدیک مرکز نمونه (محل شروع ترک نرم) دارای مقدار تقریبا ثابت است که نشان دهنده ایجاد حفره به صورت ناگهانی است. در نتیجه شروع شکست نرم در این نوع از نمونه‌ها بر اساس متغیر α کنترل می‌شود و متغیر l^* از اهمیت بسیار کمتری برخوردار می‌باشد.



شکل ۱-۶- محاسبه l^* با استفاده از میکروگراف‌های الکترونی گرفته شده از سطح شکست [۵].

۱-۳- الگوی شکست نرم بر مبنای رشد حفره (VGM)

۱-۳-۱- معرفی مبانی معیار VGM

همانطور که مشخص است در مسایلی که میزان تنش سه محوری در طول بارگذاری تغییر می‌یابد معیار SMCS به دلیل فرض ثابت بودن تنش سه محوری دارای دقت کمی می‌باشد. به منظور اصلاح این نقص در مدل SMCS، مدل دیگری به نام مدل VGM ارائه گردیده است. توسعه این مدل بر مبنای روابط ارائه شده توسط رایس و تریسی [۳] می‌باشد و در آن زمانی شکست رخ می‌دهد که مقدار شاخص رشد حفره (VGI)[8] به یک مقدار بحرانی ($\mathrm{VGI_{Critical}}$) برسد. مقدار شاخص رشد حفره متناظر با مقدار رشد حفره تا زمانی است که بین

[6] Dimple diameter
[7] Dimple Plateaus and Valleys
[8] Void growth index