بسم الله الرحمن الرحيم

٤٥٤٨٩

دانشگاه تهران
گروه عمران دانشکده فنی

تحلیل برخورد و نفوذ پرتابه های پرسرعت در اجسام ترد و بررسی عوامل مؤثربر تحلیل

۱۳۸۲ /۴/ ۲۰

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

۱۳۸۲ /۴/ ۲۰

نگارش:
آرش ماهوتچیان

استاد راهنما:
دکتر سهیل محمدی

استاد مشاور:
دکتر ایرج محمودزاده کنی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در
مهندسی عمران ـ سازه

زمستان ۱۳۸۱

٤٥٤٨٩

فرم ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده فنی

گروه مهندسی عمران

در چارچوب ارزیابی مرحله تحقیقاتی مقطع کارشناسی ارشد دانشجویان دانشکده فنی دانشگاه تهران

آقای: آرش ماهوتچیان به شماره دانشجویی: ۸۱۰۲۷۹۰۳۵ در رشته مهندسی: عمران

گرایش: سازه پایان‌نامه خود به ارزش: ۶ واحد را که در نیمسال اول سال تحصیلی: ۸۲-۸۱

اخذ و ثبت‌نام نموده بود، تحت عنوان: **تحلیل برخورد و نفوذ پرتابه های پر سرعت در اجسام ترد و بررسی عوامل موثر بر تحلیل**

به سرپرستی استاد راهنما: دکتر سهیل محمدی استاد مشاور: دکتر ایرج محمودزاده

در تاریخ: ۸۱/۱۲/۶ در مقابل هیات داوران به شرح ذیل با (موفقیت / عدم موفقیت / اصلاحاتی) دفاع نمود.

اسامی هیات داوران (حداقل ۴ نفر) امضاء

۱- دکتر سهیل محمدی

۲- دکتر ایرج محمودزاده

۳- دکتر محمد رحیمیان

۴- دکتر امیررضا خویی

۵- دکتر رضا عطارنژاد

نمره نهایی هیات داوران :

به عدد	به حروف
۱۹٫۰	نوزده و نیم

ملاحظات :

تذکر : نیازی به درج نمره جداگانه هریک از داوران نبوده و فقط نمره مورد توافق هیات داوران (متوسط) اعلام می‌شود.

معاونت محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی

با سلام، نظر به اعلام نمره نهایی فوق‌الذکر از جانب هیات داوران خواهشمند است نسبت به انجام امور فراغت از تحصیل دانشجوی یاد شده برابر ضوابط و مقررات اقدام مقتضی مبذول فرمائید.

نام و نام خانوادگی مدیر گروه: دکتر عباس قلندرزاده امضاء وتاریخ : ۸۱/۱۲/۱۰

توجه مهم:

کلیه نوشته‌ها به استثناء نمره هیات داوران و مطالب بند ملاحظات قبل از دفاع باید با ماشین تایپ گردد .درصورت لزوم تایپ مطالب این برگ در دفتر تحصیلات تکمیلی امکان‌پذیر خواهد بود.

تذکر : اصل این فرم به دفتر تحصیلات تکمیلی دانشکده ارسال و تصویر آن در گروه مربوطه نگهداری می‌شود.

به یاد مـــادر مهربانم که به من عشق را آموخت،

تقدیم به پـــــدر عزیزم که به من زندگی را یاد داد.

شکر خدا که هرچه طلب کردم از خدا

برمنتهای همت خود کامران شدم

تشکر و قدردانی

اکنون که با یاری خداوند متعال این پایان نامه به اتمام رسیده است ، لازم می دانم از کلیه کسانی که مرا در انجام آن یاری داده اند سپاسگزاری نمایم ، بویژه از استاد عزیز جناب آقای دکتر سهیل محمدی که در زمینه های گوناگون ، در تمام مراحل انجام این پایان نامه مرا راهنمایی کردند.
همچنین راهنمایی های ارزنده استاد گرامی جناب آقای دکتر ایرج محمودزاده در مقاطع مختلف، گره گشا بوده است که بدین وسیله مراتب تشکر خود را از ایشان ابراز می دارم .

چکیـــــــده

بررسی اثر بارهای دینامیکی ناشی از برخورد پرتابه ها بروی سازه های پناهگاهی، بخصوص سازه های حساس نیروگاهی در مقابل برخورد پرتابه های پرسرعت ازجمله موضوعاتی است که امروزه مورد توجه دانشمندان علوم هوافضا و سازه می باشد.

با استفاده از روشهای عددی کارا و قابل اطمینان می توان با درصد اطمینان بسیار بالایی نسبت به انتخاب عوامل موثر بر رفتار سازه و میزان نفوذ پرتابه اقدام نمود.

این تحقیق بخشی از یک پروژه جامع تحلیل سازه های پناهگاهی تحت اثر بارگذاری دینامیکی و بررسی میزان نفوذ پرتابه در سازه بوده، هدف از آن دستیابی به یک روش عددی مناسب برای مدلسازی وبررسی پدیده مخرب ترک خوردگی، با بهره گیری از مبانی نظریه مومسانی، مکانیک تماس محاسباتی و مکانیک شکست می باشد. بطور کلی با پیدایش اولین ترکها در سازه از کارآیی سیستم کاسته خواهد شد؛ از اینرو نقش مهم این پدیده در کاهش باربری و عملکرد سازه، تحلیلی دقیق را از شرایط پیدایی و گسترش ترکها و بررسی رفتار سازه پس از ترک خوردگی ایجاب می کند؛ از اینرو مدلسازی رفتار سازه بروش اجزای جدا ازهم با بکارگیری الگوریتم های مکانیک تماس بهمراه روشهای نرم شدگی برگرفته از اصول مکانیک شکست انجام می پذیرد.

مدلسازی مسأله بروش المانهای گسسته با بهره گیری از الگوریتم های مکانیک تماس محاسباتی و مکانیک شکست در تحلیل گسیختگی و ترک خوردگی سازه ناشی از اثر بارهای ضربه ای روشی نو بوده، پیش بینی می شود تحلیلی واقع بینانه تر و دقیق تری از این رفتار پیچیده در اختیار مهندسان محاسب قرار دهد.

فهرست

عنـــــــــــــــوان : صفحه:

۱) پیشگفتار ۱

۱-۱) کلیات ۲

۱-۲) سازو کار خرابی ۲

۱-۳) مروری بر مدلسازی ترک خوردگی ۲

۱-۴) چشم انداز طرح ۶

۲) معادلات رفتاری کشسان- مومسان ۸

۲-۱) مقدمه ۹

۲-۲) معادلات رفتاری کشسان خطی ۹

۲-۳) مروری بر نظریه مومسانی **(A Review on Theory of Plasticity)** ۱۱

۲-۳-۱) مدلسازی رفتار تک محوری در تئوری مومسانی ۱۱

۲-۳-۲) ضرایب کشسانی، مماسی و مومسانی ۱۲

۲-۳-۳) قوانین سخت شدگی کرنش ۱۳

۲-۳-۴) نرم شدگی کرنش ۱۴

۲-۴) مروری بر معیارهای تسلیم مواد همسانگرد ۱۶

۲-۴-۱) فضای تنش های - وسترگارد ۱۶

۲-۴-۲) معیارهای تسلیم در مواد همسانگرد ۱۷

- معیار تنش کششی بیشنیه (رانکین) ۱۹

۲-۵) روابط تنش-کرنش کشسان- مومسان ۲۰

۲-۶) الگوریتم روند بازگشتی اویلر **(Euler backward method)** ۲۱

۳) مروری بر نظریه مکانیک شکست ۲۴

۳-۱) مقدمه ۲۵

۳-۲) مدلسازی نرم شدگی مصالح ۲۵

۳-۳) انواع مدلهای ترک ۲۶

- مدل ترک پیوسته **(Smeared Crack)** ۲۶

- مدل ترک مجزا **(Discrete Crack)** ۲۷

- مدل مکانیک شکست **(Fracture Mechanics model)** ۲۸

۳-۴) مکانیک شکست ۳۰

عنـــــــــــــــــوان :

صفحه:

۳-۴-۱) مدل ترک هیلربرگ ۳۲
۳-۴-۲) مدل ترک بازانت و اوه ۳۲
۳-۵) معیارهای رشد ترک ۳۳
۳-۵-۱) مقدمه ۳۳
۳-۵-۲) معیار MTS ۳۵
۳-۵-۳) معیار M ۳۵
۳-۵-۴) معیار S ۳۵
۳-۵-۵) معیار T ۳۶
۳-۶) ضرایب شدت تنش ۳۶
۳-۶) الگوریتم مش بندی مجدد ۳۷

۴) روشهای عددی تحلیل ۳۸
۴-۱) مقدمه ۳۹
۴-۲) مروری بر نظریه تغییر شکلهای بزرگ**(Large Deformation Theory)** ۳۹
۴-۳) روش اجزای محدود برای تحلیل ترک خوردگی ۴۱
۴-۳-۱) فرمول بندی روش اجزای محدود بروش کار مجازی ۴۱
۴-۳-۲) روش عددی تحلیل دینامیک **(Explicit transient dynamic analysis)**
۴۲ .....

۵) روش المانهای مجزا (Discrete element Method) ۴۶
۵-۱) مقدمه..... ۴۷
۵-۲) مروری بر روشهای مکانیک تماس محاسباتی..... ۴۷
۵-۲-۱) مقدمه ۴۷
۵-۲-۲) محاسبه جابجایی های نسبی قائم و مماسی ۴۸
۵-۲-۲-۱) محاسبه جابجایی های نسبی درحالت دو بعدی ۵۰
۵-۲-۲-۲) محاسیه جابجایی های نسبی در حالت سه بعدی ۵۱
۵-۲-۳) اندرکنش تماس **(Contact Interaction)** ۵۵
۵-۲-۴) روشهای اعمال قید تماس **(Constration Enforcement)** ۵۵
۵-۲-۴-۱) روش پنالتی **(Penalty Method)** ۵۶
۵-۲-۴-۲) روش ضرایب لاگرانژ**(Lagrange Multiplier Method)** ۵۷
۵-۲-۴-۳) روش ضرایب لاگرانژ تعمیم یافته **(Perturbed Lagrangian Method)** ۵۸

عنـــــــــــــــــوان :

صفحه:

۵-۲-۴-۴) تلفیق روش ضرایب لاگرانژ و پنالتی (Augmented Lagrangian Method) ۵۸

۶) بررسیهای عددی ۵۹
۶-۱) مقدمه ۶۰
۶-۲) مدلسازی عددی ۶۰
۶-۲-۱) مدل شماره یک ۶۰
۶-۲-۲) مدل شماره دو ۷۲
۶-۲-۳) مدل شماره سه ۷۴
۶-۲-۴) مدل شماره چهار ۹۱
۶-۲-۵) مدل شماره پنج ۱۱۰
۶-۲-۶) مدل شماره شش ۱۱۵
۶-۲-۷) مدل شماره هفت ۱۱۹
۶-۲-۸) مدل شماره هشت ۱۲۳
۷) دستاوردهای جستار ۱۳۸
مـــــــــــــــراجع ۱۴۱

نخست

پیشگفتار

INTRODUCTION

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

۱-۱) کلیات

یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر عملکرد یک پرتابه در لحظه برخورد به یک هدف، میزان نفوذ آن پرتابه در هدف، قبل از انفجار آن می باشد. لذا محاسبه ترک خوردگی پیش رونده انواع سازه ها نظیر سازه های پناهگاهی در اثر بارگذاری خارجی اعم از استاتیکی و دینامیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. این مسأله بویژه در مورد اثر تخریبی موشکهای ضد زره اهمیت ویژه ای دارد. در این میان توسعه یک مدل عددی مناسب که امکان مدلسازی برخورد پرتابه به سازه را فراهم کرده، ضمن پیش بینی بروز و گسترش پیش رونده ترکها در سازه، وضعیت نفوذ پرتابه را نیز مورد بررسی قرار دهد بیش از پیش مفید می نماید. کاربرد روش المانهای مجزا در تحلیل مسایل برخورد از اواسط دهه ۸۰ میلادی آغاز شد، در سال ۱۹۸۷ میلادی Johnson و Stryk ضمن ارایه یک مدل دوبعدی برخورد، موفق به تحلیل و مدلسازی رفتار پوسته های استوانه ای (Axisymmetric) در برخورد با مانع صلب شدند[۱۳]. پس از آن در اواخر دهه ۸۰ میلادی Lin و Belytschko با ارایه المانهای فرسایشی (Eroding Element) و الگوریتمی جدید برای بررسی اثر برخورد دو جسم بروی یکدیگر توانستند برخورد پرتابه به هدف را بصورت سه بعدی مدلسازی کنند(شکل ۱-۱) [۳]. از آن پس مطالعات گسترده ای در این راستا انجام شد؛ در این مسیر مهمترین فاکتور محدود کننده در آنالیز، تعیین مدل رفتاری مواد تشکیل دهنده سازه می باشد. لذا بیشترین تلاشهای انجام شده در سالهای گذشته برای بهینه کردن روابط بنیادی رفتار مصالح بوده است. امروزه با استفاده از کامپیوترهای پر قدرت، تحلیل و طراحی انواع مواد با فرض مدلهای رفتاری کشسان- مومسان* قابل انجام می باشد.

۱-۲) سازوکار خرابی

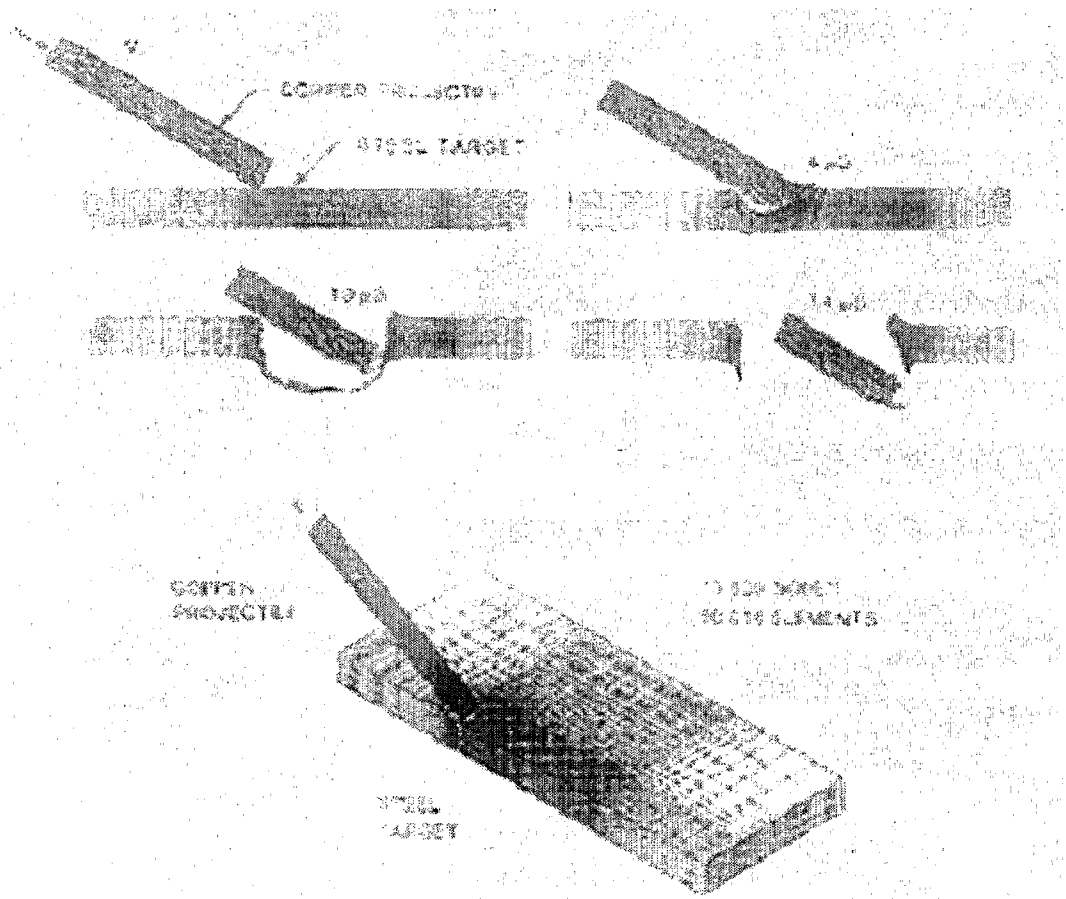
یکی از اصلیترین مسایل قابل توجه در طراحی سازه های پناهگاهی، آسیب پذیری آنها در برابر بارگذاری ضربه ای جانبی می باشد. در ضربه های با سرعت بالا (انرژی زیاد) تکه تکه شدن پوسته بدلیل نفوذ پرتابه به درون آن نخستین مود خرابی سازه است. شکل ۱-۲ مراحل نفوذ یک گلوله را در یک صفحه سرامیکی که به متلاشی شدن آن می انجامد نشان می دهد [۱۶].

۱-۳) مروری بر مدلسازی ترک خوردگی

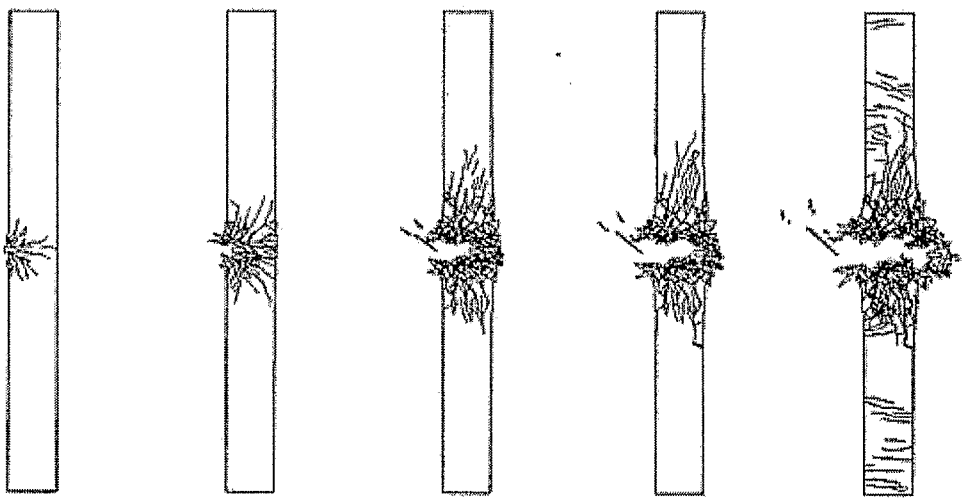
با توجه به اهمیت مسأله آسیب پذیری جداره های پناهگاهی در برابر بارگذاری دینامیکی جانبی، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بیشماری برای بررسی خرابی ناشی از اینگونه بارگذاری تا به امروز انجام پذیرفته است[۲]،[۳]و[۱۳]. نخستین شبیه سازیهای ترک خوردگی در سازه ها بر اساس مکانیک محیطهای پیوسته و نظریه مومسانی انجام می پذیرفت. از آنجاییکه در گوشه هر ترک یک ناحیه مومسان بوجود می آید؛ بر این اساس روشهای مختلفی بمنظور تحلیل ترک خوردگی و شکست مصالح بوجود آمده است. شکل ۱-۳ منطقه مومسان گوشه ترک را برای حالات مختلف شکست

---

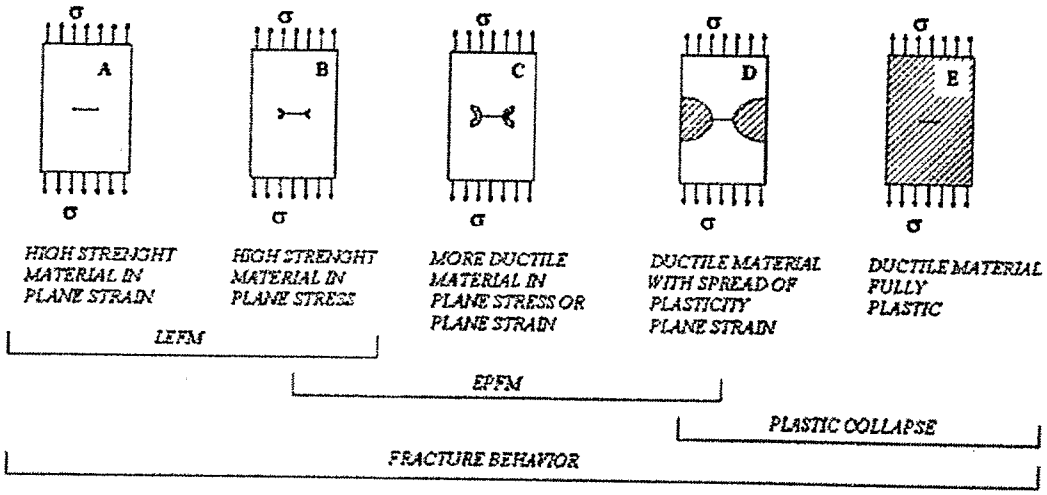
* Elastoplastic



شکل 1-1: نمونه ای از مدلسازی سه بعدی[3]



شکل 1-2: نفوذ گلوله در یک صفحه سرامیکی



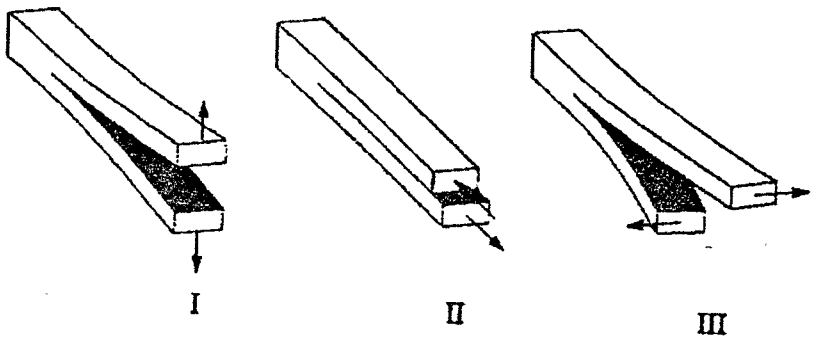
شکل ۱-۳: محدوده قابل قبول معیارهای مختلف شکست

نشان می دهد[۱]. یکی از روشهای معمول تحلیل ترک خوردگی، در نظرگرفتن روند تحلیل ترک خوردگی بصورت مکانیزم رشد پایدار ترک و بکارگیری مفاهیم مکانیک شکست کشسان خطی(Linear Elastic Fracture Mechanics یا LEFM) می باشد؛ ایده آل سازیهایی که براساس نادیده گرفتن منطقه مومسان گوشه ترک انجام می شود، مکانیک شکست کشسان خطی نامیده می شود. در این روش، میدان تنش در نزدیکی گوشه ترک به سه مود اصلی بر اساس جابجایی نسبی سطوح ترک خورده بخش می گردد[۲۶]:

مود نخست، باز شدگی ناشی از کشش (opening mode)، مود دوم، لغزش ناشی از برش درون صفحه (shearing mode) و مود سوم، پارگی ناشی از برش پاد صفحه (tearing mode) (شکل ۱-۴).

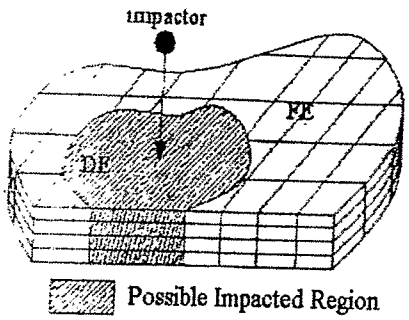
در سازه های فلزی، می توان تنها مود نخست را بعنوان مود مؤثر شکست، در تحلیل منظور نمود؛ ولی در سازه های بتن مسلح مودهای دوم و سوم نیز درگیر می باشند [۱۴]. بر اساس LEFM، نرخ رهایی انرژی کرنشی، G (Strain energy release rate) که برابر است با مشتق میزان انرژی کرنشی آزاد شده ناشی از گسترش ترک، نسبت به اندازه ترک اولیه، برای هر یک از مودها و یا بصورت ترکیبی بر حسب تغییر مکانها و نیروهای گرهی بدست آمده، با یک مقدار بحرانی G_c مقایسه می گردد. هر گاه در گوشه یک ترک به اندازه a، $G=G_c$ بوده، $\frac{dG}{da}\rangle 0$ گردد، گسترش ترک پایدار و در غیر این صورت ناپایدار است[۱۴]. در مورد دسته ای از مصالح با رفتار ناهمگن و ناهمسانگرد نظیر مواد کامپوزیت، رابطه $G=G_c$ به نتایج مناسبی نمی انجامد؛ از اینرو، برای در نظر گرفتن اندرکنش مودهای مختلف شکست در این مصالح تا کنون تلاشهای چشمگیری صورت پذیرفته است [۶]. با وجود این، بکارگیری اصول مکانیک شکست کشسان خطی (LEFM) به تنهایی هنوز کاستیهای دیگری نیز دارد، بدین ترتیب که:

- برای تحلیل ترک خوردگی با این روش، حتماً یک ترک اولیه باید وجود داشته باشد.
- این روش برای تحلیل تعداد بسیار محدودی ترک در محیط یک جسم، مناسب است.
- تحلیل گسترش ترک بطور معمول تنها در راستای ترک امکان پذیر است.



شکل ۱-۴: شکست مودهای اصلی

با ارایه معیارهای پیدایش ترک خوردگی بر اساس مفاهیم نظیر، در تئوری مومسانی محاسباتی و بکارگیری روش اجزای محدود، گامی نوین در راستای تحلیل ترک خوردگی سازه ها برداشته شد. با این همه، روش اجزای محدود که بر اساس مکانیک محیطهای پیوسته پایه ریزی شده است به تنهایی پاسخگوی حالتهای کلی ترک خوردگی و مود های خرابی نیست. گام بعدی بسوی مدلسازی منطقی تر و دقیق تر ترک خوردگی با پیشرفت روش اجزای جدا از هم (DEM یا Discrete Element Method) برداشته شد؛ که بویژه برای تحلیل ناپیوستگی های چشمگیر در رفتار هندسی و ویژگیهای مصالح بوجود آمده بود. شکل ۱-۵ نمایشی از روش مرکب المانهای محدود و مجزا را نشان می دهد. در این روش کل محیط به ترکیبی از چند جزء جدا از هم (Discrete Element) تقسیم می گردد، هر یک از این اجزا بازتاب تغییر شکل ویژه خود را داشته، همزمان با اجزای هم مرز خود (با بکارگیری الگوریتمهای مکانیک تماس) اندرکنش دارد [۱۶].



شکل۱-۵: نمایشی از روش مرکب المانهای محدود و مجزا

محمدی و همکاران در سال ۱۹۹۸ میلادی روشهای بکارگیری DEM را بصورت سه بعدی در تحلیل ترک خوردگی پوسته های کامپوزیت ارایه نمودند [۱۵]و[۱۶]. این پایان نامه بر پایه روشهای پیشنهادی ایشان بهمراه الگوریتم های مناسب مکانیک تماس و مکانیک شکست بمنظور بررسی اثر تخریبی بر خورد و نفوذ پرتابه ها درسازه های پناهگاهی انجام می پذیرد. بدین ترتیب نتایج این جستار برای تحلیل کامل اثر برخورد و نفوذ پرتابه ها بروی سازه های پناهگاهی و همچنین بررسی مودهای مختلف گسیختگی سازه قابل گسترش خواهد بود.