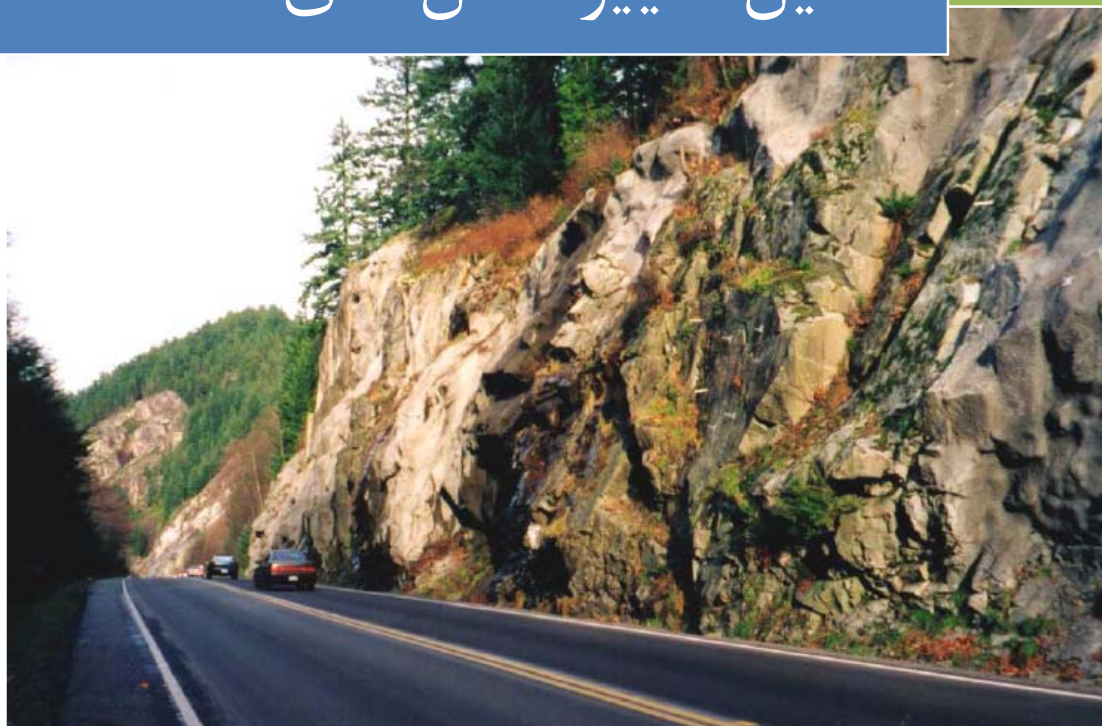


۱۳۸۷

تحلیل تغییر شکل های گسسته



محمد علی رمضان پور

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

1387

به نام خدا



دانشگاه اسلامی ایران
دانشکده عمران

گرایش ژئو تکنیک

مدل سازی عددی توده سنگ های درزه دار به روش تحلیل تغییر شکل های گسسته

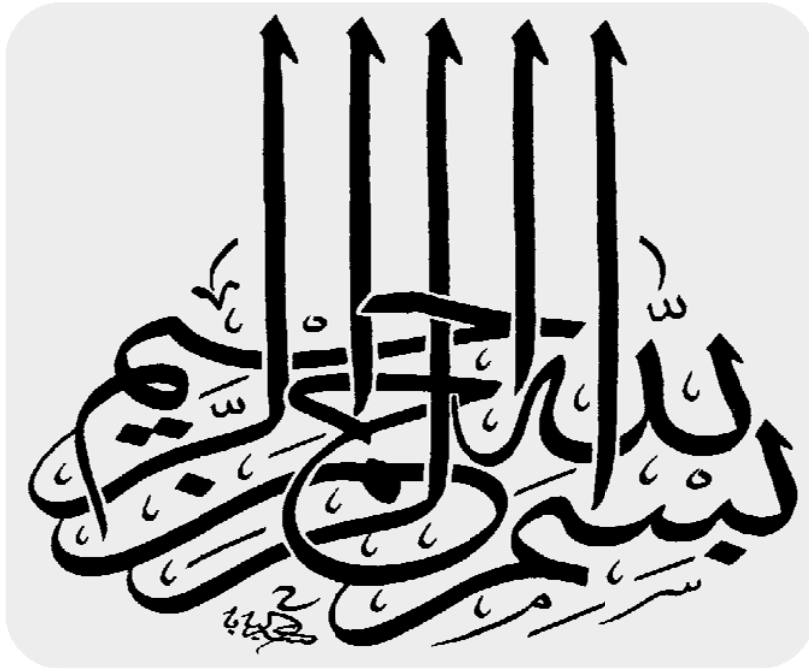
زیر نظر استاد دکتر حسن قاسم زاده

به کوشش

محمد علی رمضان پور

خاک و پی ۸۵

۱۳۸۷/۶/۳۱



بنام آنکه

خواص مواد را بدون هیچ احتلالی به آنها نسبت داد

و قدرتمندانه جهانی آفرید

که هوش بشری در ساده ترین پدیده های آن

انگشت حیرت به دهان گرفته است.

تقدیم به کسی که هوشمندانه مرادیت می کند

و محطه ای از من غافل نیست

نمی دانم مرابه کجا فرامی خواند

هر کجا که باشد من نیر به آن مقصد بسیار مشتاقم

تقدیم به پدر عزیز و مادرم مهربانم

شمارا بسیار دوست دارم

لیکن چند روزی است که از شما دورم اما همیشه قلمم با شما بوده و هست.

تقدیم به خواهران و برادران کرامیم

امیدوارم همیشه شاد و پر امید زندگی کنید.

تقدیم به مردم صبور، دانا و آزاده ایران زمین

شما که در طول تاریخ ستم‌بار دیده‌اید و این مشکلات شما را دانا و آب‌دیده کرده است. امید است این

دانایی به عرصه آید و همگان را به مسیری خوش و آباد هدایت کند.

تقدیم به اساتید عزیزم

دکتر صدرنژاد، دکتر قاسم زاده، دکتر تفرشی، دکتر رهنما، دکتر قضاوی، و همه اساتیدی که در راه شکوفایی
دانشجویان مہین ساز تلاش و کوشش می کنند.

تقدیم به دانشجویان و محققان کرامی

بر شما امید بسیار است.

همه آرزوهای این ملت در شما جمع شده است.

پس ارزش خود را بدانید و هیچ گاه ناامید و خسته نشوید.

باقدر دانی فراوان از استاد عزیز

دکتر حسن قاسم زاده

که نیکو یاری است و با صبر و دلسوزی من را هدایت کردند و با تفکر تقدیر کریمانه و جسجوج خود مرا یاری نمودند.

تقدیرا بود آيا که عیاری گیرند

تا همه صومعه داران پی کاری گیرند

مصلحت دید من آن است که یاران همه کار

بگذارند و خم طره یاری گیرند

رقص بر شعر تر و ناله فی خوش باشد

خاصه رقصی که در آن دست نخاری گیرند

حافظ ابنای زمان را غم مسکینان نیست

زین میان کر بتوان به که کناری گیرند

فهرست

۱- مقدمه ای بر مدل سازی سنگ و ویژگیهای آن	۱
۱-۱- خصوصیات طبیعی توده سنگ	۱
۲-۱- مدل سازی مکانیک سنگ برای طراحی و ساخت در مهندسی سنگ	۳
۳-۱- روش های عددی	۵
۴-۱- مدل سازی پیوسته و گسسته توده سنگ	۶
۵-۱- روش های عددی در مکانیک سنگ	۱۰
۱-۵-۱- روش تفاوت محدود FDM	۱۰
۲-۵-۱- روش اجزاء محدود FEM	۱۱
۳-۵-۱- روش اجزاء مرزی BEM	۱۴
۴-۵-۱- روش اجزاء مجزا DEM	۱۸
۵-۵-۱- مدل های پیوندی	۲۱
۶-۵-۱- روش چند شاخه ای MM	۲۳
۲- روش تحلیل تغییر شکل های گسسته DDA	۲۷
۱-۲- تغییر شکل و تغییر مکان یک بلوک	۲۸
۲-۲- معادلات تعادل	۳۲
۲-۲-۱- انرژی پتانسیل کرنش الاستیک	۳۳
۲-۲-۲- ماتریس مقاوم در برابر حرکت	۳۵
۲-۲-۳- انرژی پتانسیل تنش اولیه	۳۵
۲-۲-۴- انرژی پتانسیل اینرسی $\pi_{inertia}$	۳۷
۲-۲-۵- انرژی پتانسیل بار نقطه ای $\pi_{Pointload}$	۴۶
۲-۲-۶- انرژی پتانسیل بار وابسته به زمان $\pi_{time depend}$	۴۷
۲-۲-۷- انرژی پتانسیل نقاط ثابت $\pi_{fixpoint}$	۵۰
۲-۲-۸- انرژی پتانسیل تماس بین بلوک ها، $\pi_{contact}$	۵۱
۲-۲-۹- میراگر	۶۹
۳- نحوه برنامه نویسی	۷۳
۱-۳- انتخاب زبان برنامه نویسی	۷۳
۲-۳- مقایسه سرعت محاسبات با زبان Visual C# 2008.net	۷۴

۷۵.....	۳-۳- مشخصات برنامه نوشته شده.....
۷۶.....	۳-۴- الگوریتم‌های برنامه.....
۷۷.....	1-4-3 الگوریتم کلی برنامه.....
۷۸.....	۳-۴-۲ الگوریتم کشف تماس.....
۷۹.....	۳-۴-۳ الگوریتم تشخیص تماسهای لغزشی و ثابت.....
۸۰.....	۳-۴-۴ الگوریتم افزایش گام زمانی.....
۸۲.....	۴- صحت سنجی و حل مثال‌های کاربردی.....
۸۲.....	۴-۱- صحت سنجی.....
۸۲.....	۴-۱-۱- صحت سنجی حرکت سقوط آزاد تحت اثر نیروی گرانش.....
۸۳.....	۴-۱-۲- صحت سنجی اثر نیروهای خارجی بر روی حرکت بلوک.....
۸۶.....	۴-۱-۳- صحت سنجی دوران بلوک تحت اثر لنگر متمرکز.....
۸۸.....	۴-۱-۴- صحت سنجی دوران بلوک تحت اثر کوپل نیرو.....
۹۰.....	۴-۱-۵- صحت سنجی دوران بلوک حول یک تکیهگاه مفصلی (حرکت پاندولی).....
۹۳.....	۴-۱-۶- صحت سنجی برخورد کاملاً الاستیک.....
۹۶.....	۴-۱-۷- صحت سنجی برخورد غیر الاستیک.....
۹۸.....	۴-۱-۸- صحت سنجی حرکت لغزشی.....
۱۰۳.....	۴-۱-۹- صحت سنجی اعمال نیروی زلزله.....
۱۰۷.....	۴-۲- حل مثالهای کاربردی.....
۱۰۸.....	۴-۲-۱- پایداری ستون سنگی.....
۱۱۲.....	۴-۲-۲- پایداری بام تونل.....
۱۱۴.....	۴-۲-۳- غلتیدن بلوکهای سنگی روی سطوح شیبدار.....
۱۱۷.....	۵- نتیجه گیری و پیشنهاد.....
۱۲۰.....	۶- مراجع.....
۱۲۳.....	۷- پیوست.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ : درزه‌های توده سنگی ۲
- شکل ۱-۲ : هشت راه متفاوت برای مدلسازی مکانیک سنگ [۱] ۳
- شکل ۱-۳ : تغییرات حالت تنش سه بعدی در امتداد خط بام تونل ۶
- شکل ۱-۵ : مناسب بودن روشهای عددی متفاوت برای حفاری در یک توده سنگی ۹
- شکل ۱-۶ : مدل پیوندی برای یک توده سنگ که شامل یک حفره است ۹
- شکل ۱-۸ : جزء شکست در روش اجزاء محدود ۱۳
- شکل ۱-۹ : مثال شبکه‌همش برای تحلیل با روش اجزاء مرزی ۱۷
- شکل ۱-۱۰ : دو شبکه‌همش ریاضیاتی و فیزیکی استفاده شده در روش چند شاخه ۲۴
- شکل ۱-۱۱ : شبکه مش های چند شاخه در نشان دادن ناپیوستگی های نا معین ۲۵
- شکل ۲-۱ : جابجایی و تغییر شکل بلوک ۲۹
- شکل ۲-۲ : نمودار سرعت برحسب زمان ۴۰
- شکل ۲-۳ : تغییرات متوسط سرعت ۴۰
- شکل ۲-۴ : محاسبه انتگرال روی مساحت زیربلوک ۴۶
- شکل ۲-۵ : تماس عمودی و تماس برشی ۵۱
- شکل ۲-۶ : فاصله بین بلوک i و j ۵۲
- شکل ۲-۸ : اجزاء یک تماس ۵۴
- شکل ۲-۷ : انواع مختلف تماس ۵۴
- شکل ۲-۹ : تماس زاویه به خط ۵۵
- شکل ۲-۱۰ : تماس نیم زاویه به خط ۵۵
- شکل ۲-۱۱ : تماس زاویه درون بلوک ۵۵
- شکل ۲-۱۲ : یک بلوک نفوذ کننده و دیگری نفوذ شونده ۵۶
- شکل ۲-۱۳ : هر دو بلوک نفوذ کننده و نفوذ شونده ۵۶
- شکل ۲-۱۴ : خط مجازی و محل تقاطع بلوکها ۵۷
- شکل ۲-۱۵ : یک تماس از نوع زاویه به خط ۵۷
- شکل ۲-۱۶ : تماس از نوع نیم زاویه به خط ۵۷
- شکل ۲-۱۷ : بیش از دو تماس وجود دارد ۵۸
- شکل ۲-۱۸ : تماس گره به گره ۵۸
- شکل ۲-۱۹ : تماس زاویه به خط مجازی ۵۹
- شکل ۲-۲۰ : تماس نیم زاویه به خط مجازی ۵۹
- شکل ۲-۲۱ : تماس زاویه درون بلوک به خط مجازی ۵۹

- شکل ۲- ۲۱ : تماس زاویه خارج بلوک به خط ۵۹
- شکل ۲- ۲۲ : نقطه تماس ۶۰
- شکل ۲- ۲۳ : یک تماس ساده ۶۰
- شکل ۲- ۲۴ : تماس ثابت ۶۸
- شکل ۴- ۱ : سقوط آزاد بلوک تحت اثر وزن خود ۸۲
- شکل ۴- ۲ : سقوط آزاد بلوک تحت وزن خود ۸۳
- شکل ۴- ۳ : اثر نیروی خارجی روی بلوک ۸۴
- شکل ۴- ۴ : نحوه حرکت دو بلوک تحت نیرو ۸۵
- شکل ۴- ۵ : دوران بلوک تحت اثر ممان متمرکز ۸۶
- شکل ۴- ۶ : نحوه دوران بلوک تحت لنگر متمرکز ۸۷
- شکل ۴- ۷ : دوران بلوک تحت اثر کوپل نیروی مماسی ۸۸
- شکل ۴- ۸ : نحوه دوران بلوک تحت اثر کوپل نیرو ۸۹
- شکل ۴- ۹ : دوران بلوک حول یک رأس ۹۰
- شکل ۴- ۱۰ : حرکت پاندولی بلوک تحت وزن خود ۹۱
- شکل ۴- ۱۱ : دیاگرام نیروهای وارد شده به بلوک ۹۱
- شکل ۴- ۱۲ : حرکت پاندولی بلوک تحت وزن خود ۹۲
- شکل ۴- ۱۳ : برخورد دو بلوک بدون کاهش انرژی ۹۴
- شکل ۴- ۱۴ : نحوه حرکت در برخورد دو بلوک ۹۵
- شکل ۴- ۱۵ : برخورد دو بلوک با کاهش انرژی ۹۶
- شکل ۴- ۱۶ : نحوه حرکت بلوک هنگام کاهش انرژی ۹۷
- شکل ۴- ۱۷ : لغزش بلوک روی سطح شیبدار ۹۹
- شکل ۴- ۱۸ : دیاگرام آزاد نیروها ۹۹
- شکل ۴- ۱۹ : دیاگرام جابجایی بلوک ۱۰۰
- شکل ۴- ۲۰ : لغزش بلوک روی سطح شیبدار ۱۰۱
- شکل ۴- ۲۱ : بلوک تحت اثر تاریخچه شتاب افقی ۱۰۳
- شکل ۴- ۲۲ : نحوه حرکت بلوک تحت اثر تاریخچه شتاب افقی ۱۰۴
- شکل ۴- ۲۳ : بلوک تحت اثر تاریخچه سرعت ۱۰۵
- شکل ۴- ۲۴ : نحوه حرکت بلوک تحت اثر تاریخچه سرعت قائم ۱۰۵
- شکل ۴- ۲۵ : بلوک تحت اثر تاریخچه جابجایی ۱۰۶
- شکل ۴- ۲۶ : نحوه حرکت بلوک تحت اثر تاریخچه جابجایی ۱۰۷
- شکل ۴- ۲۷ : ستون سنگی با دو دسته درزه ۱۰۸
- شکل ۴- ۲۸ : نامگذاری بلوک‌ها- پایداری ستون سنگی ۱۰۹

شکل ۴- ۲۹: نحوه حرکت سیستم بلوکی- پایداری ستون سنگی	۱۰۹
شکل ۴- ۳۰: سه قسمت اصلی سیستم بلوکی - پایداری ستون سنگی	۱۱۱
شکل ۴- ۳۱: پنج قسمت اصلی سیستم بلوکی- پایداری ستون سنگی	۱۱۱
شکل ۴- ۳۲: هندسه سیستم بلوکی- پایداری بام تونل	۱۱۲
شکل ۴- ۳۳: نامگذاری بلوک‌ها- پایداری بام تونل	۱۱۳
شکل ۴- ۳۴: نحوه حرکت سیستم بلوکی- پایداری بام تونل	۱۱۳
شکل ۴- ۳۵: هندسه سیستم بلوکی- غلتیدن بلوک‌های سنگی	۱۱۴
شکل ۴- ۳۶: نامگذاری بلوک‌ها- غلتیدن بلوک‌های سنگی	۱۱۴
شکل ۴- ۳۷: نحوه حرکت سیستم بلوکی- غلتیدن بلوک‌های سنگی	۱۱۵

فهرست نمودارها

نمودار ۴- ۱: جابجایی قائم بلوک تحت اثر وزن خود	۸۳
نمودار ۴- ۲: جابجایی قائم بلوک تحت نیروی خارجی	۸۶
نمودار ۴- ۳: دوران بلوک تحت لنگر ثابت	۸۸
نمودار ۴- ۴: دوران بلوک تحت اثر کوپل نیروی	۹۰
نمودار ۴- ۵: حرکت پاندولی بلوک ، دوران بلوک	۹۲
نمودار ۴- ۶: حرکت پاندولی بلوک ، جابجایی افقی	۹۳
نمودار ۴- ۷: جابجایی قائم بلوک در برخورد	۹۵
نمودار ۴- ۸: جابجایی قائم بلوک همراه با کاهش انرژی	۹۸
نمودار ۴- ۹: جابجایی قائم بلوک در حرکت لغزشی	۱۰۱
نمودار ۴- ۱۰: جابجایی افقی بلوک در حرکت لغزشی	۱۰۲
نمودار ۴- ۱۱: اعمال تاریخچه شتاب افقی، جابجایی افقی بلوک	۱۰۴
نمودار ۴- ۱۲: اعمال تاریخچه سرعت قائم، جابجایی قائم بلوک	۱۰۶
نمودار ۴- ۱۳: جابجایی افقی بلوک تحت اثر تاریخچه جابجایی	۱۰۷

چکیده :

در میان روش‌های متفاوتی که برای مدل‌سازی توده سنگ ارائه شده روش تحلیل تغییر شکل‌های گسسته جایگاه ویژه و منحصر به فردی دارد که اولین بار توسط شی^۱ ارائه شد. در تحقیق حاضر از این روش استفاده شده است. در این روش توده سنگی بصورت یک سیستم بلوکی که در کنار هم چیده شده‌اند در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از خواص فیزیکی سنگ بکر و هندسه درزه‌های موجود معادلات تعادل نوشته شده و یک دستگاه معادلات ایجاد می‌گردد با حل این دستگاه معادلات کرنش، جابجایی و دوران بلوک‌ها محاسبه و در نتیجه رفتار توده سنگی مشخص می‌شود. در ادبیات این روش محدودیت‌هایی ذکر شده که از آن جمله به عدم دقت کافی در محاسبه حرکت آزاد بلوک، محدودیت الگوریتم کشف تماس و پدیده افزایش حجم می‌توان اشاره کرد.

در این پایان نامه ابتدا به مطالعه آخرین دستاوردها در روش تحلیل تغییر شکل‌های گسسته پرداخته شده و سپس مشکلات موجود استخراج گردیده است و در ادامه با کشف منشاء هر کدام از این مشکلات به باز نویسی رابطه مربوطه، پرداخته شده است. این روش در برنامه‌ای به زبان C# بکار گرفته شده است. برنامه توسط چندین مثال صحت سنجی شده است و چندین مثال کاربردی توسط آن حل شده و نتایج مناسبی بدست آمده است از جمله مشکل حرکت آزاد بلوک تصحیح شد، الگوریتم کشف تماس بصورتی دقیق و جامع باز طراحی شد و افزایش حجم بلوک بکلی رفع شد. همچنین در این برنامه نیروی زلزله به سیستم بلوکی اعمال گردیده است که نتایج مطلوبی را نشان می‌دهد.

¹ Shi

فصل اول

مقدمه ای بر مدل سازی سنگ و ویژگیهای آن

سنگ یک ماده زمین ساختمانی است که نحوه تولید آن با موادی که در
کارخانجات تولید می شوند، کاملاً متفاوت است. سنگ یک توده
ناپوسته، غیر ایزوتروپیک و غیر همگن است که طی سالیان زیاد تحت
تشنش های متفاوت قرار گرفته است.

۱- مقدمه ای بر مدل سازی سنگ و ویژگیهای آن

۱-۱- خصوصیات طبیعی توده سنگ

در بسیاری از کارهای عمرانی با توده های سنگی مواجه هستیم. برای مثال بسیاری از راه ها از میان کوه های سنگی عبور می کنند. بسیاری از تونل ها در سنگ زده می شود. خیلی از پی ها بر روی سنگ بنا نهاده می شوند. همه سدهای بتنی به سنگ متکی هستند. انتهای بسیاری از شمع ها به سنگ منتهی می شود و همه این ها حکایت از آن دارد که توده های سنگی سهم زیادی در کارهای عمرانی دارند و اهمیت مدل سازی و پیش بینی رفتار توده های سنگی را آشکار می کند.

سنگ یک ماده زمین ساختی می باشد که نحوه تولید آن با موادی که در کارخانجات تولید می شوند، کاملاً متفاوت است. سنگ یک توده ناپیوسته، غیر ایزوتروپیک و غیر همگن است و به همین دلیل مدل سازی سنگ به روشهای عددی کار مشکلی است. توده سنگ تحت تنش و بارگذاری پیوسته می باشد. این تنش ها بخاطر حرکات دینامیکی لایه های زمین مانند حرکات تکتونیکی، زلزله، نشست یا بالا آمدن زمین، سیکل های یخبندان و جزرومد بوجود می آید از طرفی سنگ یک محیط متخلخل و دارای شکستگی است، شکل ۱-۱. این توده در محیط تحت شرایط پیچیده ای از تنش، دما و فشار سیال قرار دارد. مواد متشکله سنگ دارای ترکیبات پیچیده ای می باشد و فرآیند تولید آن مدت زمان زیادی طول می کشد. این عوامل سبب شده که ارائه یک رابطه ریاضی مناسب برای مدل سازی عددی آن مشکل باشد. یکی از وظایف اصلی مدل سازی عددی مکانیک سنگ توصیف کمی و کیفی مکانیک ناپیوستگی ها می باشد.

یک مدل سازی عددی توده سنگ باید موارد زیر را در نظر بگیرد:

- ارتباط فرآیندهای فیزیکی و روابط ریاضی با معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر محیط به خصوص زمانی که فرآیند های گرمایی، هیدرولیکی و مکانیکی بطور همزمان باید مورد توجه قرار گیرند.

- ارتباط فرآیند و قوانین پیوستگی با متغیرها و پارامترهای مربوطه.

- تنش های درجای توده سنگ.
- درزه و شکستگی های طبیعی
- تغییر مشخصات سنگ در مکانهای متفاوت (نا همگن بودن)
- تغییر مشخصات سنگ در جهات متفاوت (غیر ایزوتروپ بودن)
- رفتار وابسته به زمان (خزش یا کرنش پلاستیک)
- تغییر مشخصات در مقیاس متفاوت (وابستگی به مقیاس)
- آشفستگی های ایجاد شده در محیط (تغییرات ایجاد شده در محیط)



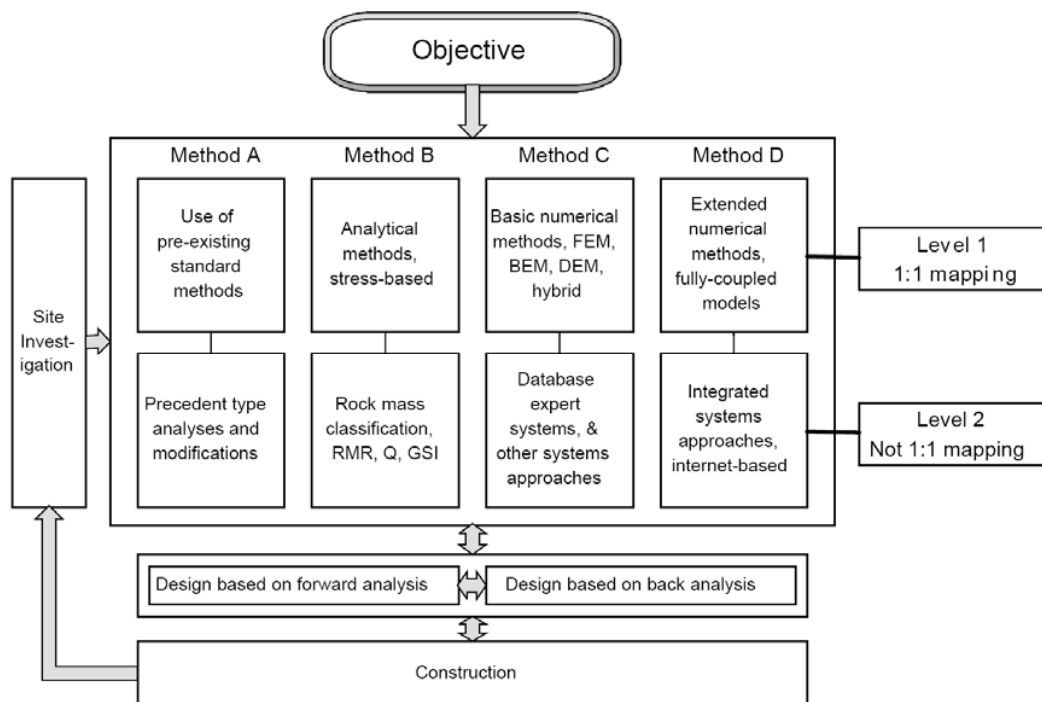
شکل ۱-۱ سطح منفجر شده یک توده سنگ را نشان می دهد. که تحت تنش های قبلی قرار دارد. این شکستگی ها توده را به بلوک های مجزایی تقسیم کرده است. یک مهندس برای اهداف طراحی نیاز به پیش بینی مقاومت توده دارد و این کار با مدل سازی اندر کنش بین توده سنگ و عملیات های مهندسی انجام می شود. توجه کنید که نیم گمانه های انفجاری هنوز مشخص هستند.

شکل ۱-۱: درزه های توده سنگی

۲-۱- مدل سازی مکانیک سنگ برای طراحی و ساخت در مهندسی سنگ

برای طراحی سازه های مهندسی نیاز به اطلاعات اولیه طراحی داریم. برای مثال سازه درون توده سنگ ساخته می شود یا روی سطح آن و این که عملیات مربوط به کارهای عمرانی است یا در محدوده مهندسی معدن، نفت یا محیط قرار می گیرد.

از آنجا که مدل سازی های مکانیک سنگ برای طراحی و ساخت در مهندسی سنگ و با منظوره های مختلف توسعه یافته است و همچنین به خاطر وجود روش های مدل سازی متفاوت نیاز به یک بررسی گسترده در روشهای مدل سازی احساس می شود. این کار را به صورت های مختلفی می توان انجام داد که یکی از آنها شکل ۲-۱ می باشد. در این شکل هشت شیوه مدل سازی بر پایه چهار روش و در دو سطح تقسیم بندی شده است هادسون [۱]. مدل سازی و طراحی با در نظر گرفتن هدف و از جعبه بالایی در شکل ۲-۱ آغاز می شود. چهار ستون نشان دهنده چهار روش اصلی مدل سازی می باشد.



شکل ۲-۱: هشت راه متفاوت برای مدل سازی مکانیک سنگ [۲]

روش A : طراحی بر اساس تجربیات گذشته

روش B : طراحی بر اساس مدل های ساده شده

روش C : طراحی بر اساس مدل هایی که تلاش می کنند به فرآیندهای مناسب دست پیدا کنند.

روش D : طراحی بر اساس مدل سازی کاملاً توأم

نداشتن اطلاعات کافی در فرآیندهای مهندسی سنگ به جای این که یک مشکل لحظه‌ای باشد یک

مشکل همیشه موجود است و سبب گسترش روشهای تجربی شده است و به همین دلیل نیز هنوز

روش های تجربی مورد نیاز هستند.