بنام یزدان پاک

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

برآورد نفوذپذیری سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از روش محیط جایگزین و مقایسه آن با روش اجزا مجزا

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ

سهیلا دیانی

اساتید راهنما

دکتر علیرضا باغبانان

دکتر حمید هاشم الحسینی

۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک سنگ خانم سهیلا دیانی

تحت عنوان

برآورد نفوذپذیری سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از روش محیط جایگزین و مقایسه آن با روش اجزا مجزا

در تاریخ ۸۸/۱۲/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه	دکتر علیرضا باغبانان
۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه	دکتر حمید هاشم الحسینی
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکتر لهراسب فرامرزی
۴- استاد داور خارجی	دکتر مصطفی شریف زاده
۵- استاد داور داخلی	دکتر نادر فتحیانپور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر هوشنگ اسدی هارونی

تشکر و قدردانی

پس از حمد و سپاس پروردگار، خرسندم که فرصتی هر چند کوچک برای بیان تشکر و قدردانی خود نسبت به افرادی که تاکنون مرا هدایت و راهنمایی نموده‌اند، به دست آورده‌ام.

در آغاز می‌خواهم تشکر کنم از پدر و مادر عزیزم. کسانی که با صبر و حوصله در طول سال‌ها به من آموختند، با تلاش و کوشش هیچ مرزی برای آرزوها وجود ندارد.

از اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر علیرضا باغبانان و دکتر حمید هاشم‌الحسینی که در نهایت شکیبایی و متانت در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه از راهنمایی بی‌دریغ و گسترده‌شان بهره‌مند بودم، سپاسگذارم.

همچنین از استاد مشاور ارجمندم جناب آقای دکتر لهراسب فرامرزی که همواره از رهنمودهای ارزنده شان برخوردار بودم، تشکر می‌کنم.

از جناب آقای دکتر شریف زاده و دکتر فتحیان پور که قبول زحمت فرمودند و به عنوان اساتید داور، زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در این‌جا فرصت را مغتنم می‌شمارم و صمیمانه سپاسگذاری می‌کنم از جناب آقای دکتر افشار، مهندس طبیبی و سرکار خانم محبوبه اسمعیلی که کمک های بی‌دریغ‌شان در طول انجام این پروژه همواره شامل حال من می شد.

در پایان از تمامی دوستانم که دوران تحصیلم با خاطرات آنها عجین شده تشکر کرده و موفقیت آنان را از ایزد منان خواستارم.

سهیلا دیانی

زمستان ۸۸

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

تمامی کسانی که

گفتند تا بدانیم

و

رفتند تا بمانیم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه و ضرورت تحقیق

۱-۱-مقدمه ۲

۱-۲-نگاهی به فصول بعد ۸

فصل دوم: روش‌های محاسبه نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- روش‌های عددی محاسبه نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته ۱۰

۲-۲-۱- روش‌های پیوسته ۱۱

۲-۲-۲- روش‌های ناپیوسته ۱۲

۲-۲-۳- ایجاد شبکه تصادفی و آنالیز هندسی آن با استفاده ازشبکه شکستگی ۱۶

۲-۲-٤- آنالیز جریان سیال از طریق شبکه شکستگی دو بعدی با روش عددی ۱۷

۲-۲-۵- استفاده از نرم افزارUDEC برای محاسبه جریان سیال در سنگ‌های شکسته ۲۰

۲-۳- روش محیط جایگزین برای محاسبه نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته ۲۱

۲-۳-۱- اصول روش محیط جایگزین ۲۱

۲-۳-۲- آنالیز جریان سیال و محاسبه نفوذپذیری و اندازه نمونه معرف با استفاده از روش محیط معادل ۲۵

فصل سوم: محاسبه نفوذپذیری و بر آورد اندازه نمونه معرف با روش عددی و محیط جایگزین

۳-۱-مقدمه ۲۹

۳-۲- پارامترهای هندسی مورد نیاز برای ایجاد شبکه شکستگی ۳۱

۳-۲-۱- طول شکستگی ۳۱

۳-۲-۲- جهت شکستگی ۳۱

۳-۲-۳- محل شکستگی ۳۲

۳-۲-٤- بازشدگی شکستگی ۳۲

۳-۳- رابطه بین طول و بازشدگی ۳۳

۳-٤- ایجاد شبکه شکستگی مجزا (DFN) ۳۳

۳-۵- روش محاسبه نفوذپذیری با استفاده از UDEC ۳٤

۳-٦- محاسبه نفوذپذیری با روش تئوری محیط معادل ۳٤

۳-۷- نتایج اولیه به دست آمده ۳۵

۳-۸- اصلاح فرمول و تصحیح آن ۳۸

۳-۹- طراحی آنالیز حساسیت ۳۹

۳-۱۰- تعیین درجه عدم قطعیت در نتایج حاصل از روش عددی و محیط جایگزین ٤۲

۳-۱۰-۱- مقایسه واریانس‌های دو جامعه نرمال ٤۳

۳-۱۰-۲- فاصله اطمینان برای اختلاف بین میانگین‌های دو توزیع نرمال- واریانس نامعلوم..... ٤٦
فصل چهارم: نتایج محاسبه نفوذپذیری *و REV* با استفاده از دو روش عددی و محیط جایگزین
٤-۱- ساختار کلی آنالیزها..... ٤٨
٤-۲- نتایج حاصل از آنالیز مدل‌ها با تغییر دانسیته..... ٤٩
٤-۲-۱- شبکه شکستگی *با* دانسیته پائین..... ٤٩
٤-۲-۲- شبکه شکستگی با دانسیته متوسط..... ٥٤
٤-۲-۳- شبکه شکستگی با دانسیته بالا..... ٥٨
٤-۲-٤- شبکه شکستگی با دانسیته خیلی بالا..... ٦٢
٤-۳- بحث روی نتایج حاصل از تاثیر دانسیته روی نفوذپذیری *و* اندازه نمونه معرف..... ٦٦
٤-۳-۱- نتایج حاصل از محاسبه نفوذپذیری و تعیین *REV* با استفاده از روش عددی..... ٦٦
٤-۳-۲- نتایج حاصل از محاسبه نفوذپذیری و تعیین *REV* با استفاده از روش محیط معادل..... ٦٩
٤-٤- نتایج حاصل از آنالیز مدل با تغییر ثابت فیشر جهت درزه‌ها..... ٧٢
٤-٤-۱- مدل با ثابت فیشر پائین..... ٧٢
٤-٤-۲- مدل با ثابت فیشر بالا..... ٧٦
٤-٥- *بحث بر روی نتایج حاصل از* تاثیر جهت شکستگی روی نفوذپذیری و اندازه نمونه معرف..... ٨٠
٤-٥-۱- نتایج حاصل از محاسبه نفوذپذیری و تعیین *REV* با استفاده از روش عددی..... ٨٠
٤-٥-۲- نتایج حاصل از محاسبه نفوذپذیری و تعیین *REV* با استفاده از روش *EMT*..... ٨٣
٤-٦- بحث روی نتایج حاصل از محاسبه نفوذپذیری و تعیین *REV* با استفاده روش عددی و روش *EMT*..... ٨٥
فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات
٥-۱- بحث و نتیجه‌گیری..... ٩٠
٥-۲- پیشنهادات..... ٩٢
منابع و ماخذ ٩٣
پیوست ٩٧

چکیده
نفوذپذیری یک خصوصیت فیزیکی سنگ و یکی از پارامترهای مهم و حیاتی در شاخه‌های مختلف علوم زمین است. این پارامتر معمولا با استفاده از دو روش تحلیلی و عددی محاسبه می‌شود. روش‌های تحلیلی برای شبکه‌های ساده، منظم و کوچک و برای شبکه‌های بزرگ و پیچیده روش‌های عددی به کار می‌روند. مدلسازی‌های عددی برای حل به قدرت محاسباتی بالا و منبع بزرگی برای ذخیره‌سازی اطلاعات نیاز دارند. به طور کل این روش‌ها بسیار وقت‌گیر هستند به خصوص زمانی که شبکه‌هایی با اندازه و دانسیته بالا مدل می‌شوند. استفاده از روش تئوری محیط معادل برای محاسبه نفوذپذیری شبکه شکستگی، به عنوان جانشینی برای روش‌های عددی در تعدادی از مقالات گزارش شده است. با این وجود، میزان قطعیت این روش برای آنالیز جریان سیال در مقایسه با روش‌های عددی هنوز محاسبه و گزارش نشده است. این مسئله، موضوع اصلی این کار تحقیقاتی می‌باشد.
در ابتدا بر اساس اصول کلی روش محیط جایگزین برنامه‌ایی برای محاسبه نفوذپذیری و تعیین اندازه نمونه معرف شبکه شکستگی تصادفی دو بعدی، در محیط متلب تدوین شد. یک آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای هندسی شکستگی‌ها یعنی دانسیته و جهت شکستگی و همچنین سه حالت مختلف برای بازشدگی، باز شدگی ثابت، توزیع بازشدگی وابسته و غیر وابسته به طول شکستگی، به منظور تعیین درجه عدم قطعیت بین نتایج حاصل از تعیین نفوذپذیری با استفاده از روش عددی و روش محیط معادل، در نظر گرفته شد. با استفاده از تکنیک-های شبیه‌سازی مونت‌کارلو، شبکه‌های شکستگی دو بعدی ایجاد شدند. روش عددی المان مجزا برای حل عددی بکار رفت.
نتایج نشان می‌دهد که مقدار میانگین نفوذپذیری محاسبه شده با استفاده از روش محیط معادل به نتایج حاصل از روش عددی نزدیک است. و این مقدار در مدل‌هایی با دانسیته بالا یکسان است و از دانسیته ۶/۹ به بعد مقدار میانگین نفوذپذیری حاصل از دو روش با هم برابر است. اندازه نمونه معرف برای مدل‌هایی با بازشدگی ثابت با استفاده از هر دو روش،در طول یکسانی به دست می‌آید؛ ولی در مدل‌هایی با توزیع بازشدگی این پارامتر با استفاده از روش محیط معادل در طول کمتری نسبت به روش عددی به دست می‌آید. نتایج آنالیز حساسیت نشان می دهند که تاثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها روی نفوذپذیری محاسبه شده با استفاده از هر دو روش روند یکسانی دارد. با افزایش دانسیته شکستگی شبکه، نفوذپذیری افزایش یافته و ثابت فیشر جهت شکستگی‌ها تاثیر خاصی روی نتایج ندارد.

کلمات کلیدی:نفوذپذیری، روش محیط جایگزین، مدلسازی عددی، توزیع بازشدگی شکستگی، عدم قطعیت، مونت کارلو، اندازه نمونه معرف، آنالیز حساسیت، ضریب تمرکز توزیع فیشر

فصل اول
مقدمه و ضرورت تحقیق

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر نیاز به حفریات درون سنگی و ایجاد سازه‌های سنگی افزایش یافته است. ولی سنگ‌ها معمولا اجسامی کاملا یکنواخت نیستند و حاوی خلل و فرج به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط، شکاف‌ها یا حفره‌های مجزا هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی سنگ‌ها دارد. حفره‌های درون سنگ ممکن است خالی یا حاوی آب، سیالات دیگر، گازهای مختلف و هوا باشند. به منظور بررسی خلل و فرج سنگ‌ها کمیتی به نام تخلخل[۱] تعریف می‌شود و آن عبارت است از نسبت حجم فضای حفره‌های سنگ به حجم کل سنگ. اکثر خواص هیدرولیکی و گازدینامیکی سنگ به علت داشتن تخلخل است. به همین علت نوع تخلخل و تعیین درصد آن از نخستین خواصی است که در مبحث مکانیک سنگ مورد مطالعه قرار می‌گیرد[۱]. تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی برای فهم رفتار هیدرولیکی توده سنگ اهمیت زیادی دارد. فهم رفتار هیدرولیکی سنگ شکسته در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی مانند پایداری شیب، سدسازی، حفاری‌های زیرزمینی، مخازن نفتی و محل دفن زباله‌های اتمی بسیار مهم است. رفتار هیدرولیکی مخصوصا نفوذپذیری به منظور فهم جریان سیال و انتقال در توده سنگ اهمیت حیاتی دارد[۲].

---

[۱] Porosity

توانایی عبور سیالات از فضاهای خالی سازند را نفوذپذیری[۱] می‌گویند. شکل، اندازه و نحوه ارتباط فضاهای خالی به یکدیگر در مقدار نفوذپذیری تاثیر دارد. نفوذپذیری یکی از خصوصیات فیزیکی سنگ است که به سادگی قابل تعیین نیست و می‌توان به طور تقریبی مقدار آن را محاسبه کرد[۱].

محیط‌های طبیعی معمولا انیزوتروپ[۲] می‌باشند. انیزوتروپی در مقابل ایزوتروپی که به معنی یکسانی خصوصیات در همه جهت‌ها است، می‌آید. این پدیده به عنوان یک مولفه فیزیکی (ضریب پراکندگی، جذب و دانسیته) که در جهت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است، تعریف می‌شود. نفوذپذیری انیزوتروپ یک ویژگی سنگ‌های درزه‌دار و قابل کاربرد در مهندسی سازه، جریان آب‌های زیرزمینی، تکنولوژی نفت و دیگر کارهای ژئوتکنیکی است[۳].

به منظور مدل‌سازی نفوذپذیری در محیط انیزوتروپ یک تنسور نفوذپذیری[۳] لازم است. فشار در سه جهت با مقادیر مختلف به کار رفته و برای هر جهت نفوذپذیری از طریق قانون سه بعدی دارسی[۴] اندازه‌گیری می‌شود. این تنسور مثبت و متقارن و جهت جریان موازی با افت فشار است. تنسور نفوذپذیری به صورت قطری تعریف می‌شود. بردارهای ویژه جهت اصلی جریان و مقادیر ویژه، نفوذپذیری اصلی را نشان می‌دهند[۳].

اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری یک نمونه سنگ و تعیین اندازه نمونه معرف[۵] *(REV)* یا اندازه‌ایی که پس از آن ویژگی‌های هیدرولیکی سنگ ثابت می‌ماند، در بسیاری از مسایل اجرایی از جمله مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی معدن، سدسازی، تونل‌سازی، پایداری دیواره‌های سنگی، حفاری‌های زیرزمینی، مخازن نفتی و انبار زباله‌های اتمی از اهمیت غیر قابل اجتنابی برخوردار است. در این زمینه می‌توان مواردی چون مقدار دبی آب، نفت یا گاز عبوری از سنگ، نفوذ باطله‌های مایع که در منطقه‌ای ذخیره می‌شود، نفوذ ذخیره‌های سیال که در جایی انبار می‌شود، تعیین میزان نفوذپذیری یک مخزن (مثلا دریاچه سد)، امکان زهکشی یک فضای زیرزمینی، تخمین مقدار آبی که به یک تونل سرازیر می‌شود را نام برد[۱]. تراوش آب همچنین می‌تواند به سازه‌های احداث شده در توده سنگ شکسته فشار وارد کند. نیروی بالا برنده[۶] به وسیله فشار آب می‌تواند سبب خطر جدی برای شکست هیدرولیکی شود. پدیده شکست سنگ‌ها در اثر فشار آب ممکن است موجب فعال شدن گسل‌ها و ایجاد درزه‌ها و شکستگی‌های جدید در سنگ گردد که نتیجه آن بروز زمین لرزه‌های جدید یا فعال شده کانون زلزله‌های کم عمق است[۴]. بسیاری از مکان‌هایی که به عنوان انبار زباله‌های اتمی به کار می‌روند در سنگ‌های شکسته قرار گرفته‌اند[۵]. در سال‌های اخیر ضرورت جلوگیری از انتشار مواد مضر به محیط زیست به وسیله آب‌های زیرزمینی اهمیت روزافزونی پیدا کرده است.

به همین دلیل محاسبه نفوذپذیری و تعیین قابلیت هدایت هیدرولیکی محیط از گذشته‌های دور همواره به عنوان موضوعی مهم و حیاتی مورد توجه مهندسین بوده است و روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری و محاسبه این پارامتر معرفی شده است. امروزه با گسترش تکنولوژی نیاز به تعیین مقدار دقیق‌تر این پارامتر بیشتر احساس می‌شود و همچنان یک موضوع تحقیقاتی پر کاربرد می‌باشد.

مقدار نفوذپذیری به صورت مستقیم و آزمایشگاهی با استفاده از کاربرد قانون دارسی تحت حالت پایدار و خطی یا به طور کلی با کاربرد حل‌های مختلف معادلات پخش برای شرایط جریان ناپایدار اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود[۴].

روش‌هایی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری با کاربرد معیار جریان و پخش انرژی به وسیله نیروی ویسکوز برای شرایط جریان پایدار، یکنواخت و تک‌فازی با استفاده از دو معیار ۱- قانون دارسی ۲- معادلات بقای جرم وجود دارد[۶].

---

[۱] Permeability
[۲] Anisotropic
[۳] Permeability Tensor
[۴] Darcy
[۵] Representative Elementary Volume (REV)
[۶] Uplift

این مهم به صورت ارائه دادن روش‌های ریاضی حل نفوذپذیر ی در محیط یا به صورت تست عددی جهت محاسبه نفوذپذیری انجام می‌شود. واحد معمول برای اندازه‌گیری نفوذپذیری دارسی (D) یا میلی‌دارسی (mD) و در سیستم متریک معمولا m^2 ($1darcy=10^{-12}\ m^2$) به کار می‌رود[۷].

روش‌های متعددی در تعیین نفوذپذیری سنگ چه در آزمایشگاه و چه در زمین وجود دارد که رابطه مبنایی تمامی آنها رابطه دارسی است. ضریب هدایت هیدرولیکی یک بخش نسبتا ثابت در قانون دارسی است که به نرخ جریان عبوری، ویژگی‌های فیزیکی سیال مانند ویسکوزیته وگرادیان فشار به کار رفته در محیط متخلخل وابسته است[۷].

طبق نظریه دارسی

$$Q = KA\frac{dh}{dl} \qquad (1-1)$$

این اصل که جریان عبوری در محیط متخلخل مستقیما با افت بار و به طور معکوس با طول مسافت طی شده نسبت دارد در جهان به نام قانون دارسی مشهور شده است. این قانون بیش از هر مطالعه دیگر پایه دانش فعلی جریان‌های آب زیرزمینی است. تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به جریان آب زیرزمینی و هیدرولیک چاه‌ها پس از کار دارسی شروع شد[۸].

نفوذپذیری سنگ، ناشی از دو پارامتر درزه‌های سنگ و نفوذپذیری ناشی از ماده سنگ می‌باشد. نفوذپذیری مربوط به ماده سنگ بسیار کم و بنابراین در بیشتر محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. تغییرات نفوذپذیری توده سنگ در برابر نیروهای خارجی و تغییر شرایط عمدتا روی نفوذپذیری، مربوط به درزه‌ها تاثیر می‌گذارد زیرا بازشدن یا بسته شدن درزه‌ها به ترتیب در اثر نیروهای کششی یا فشاری موجب تغییر محسوسی در نفوذپذیری می‌گردد در حالی که تاثیر نیروهای نامبرده بر حفره‌های غیر درزه‌ای چندان محسوس نیست. در تمام موارد سیستم درزه‌ها و شکاف‌های درون سنگ نقش مهمی در مقدار نفوذپذیری ناحیه‌ای سنگ دارند. ولی آنچه که در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود عمدتا مربوط به نفوذپذیری حاصل از حفره‌های غیر درزه‌ای است، چون در توده سنگ درزه‌ها وشکاف‌هایی وجود دارد که تاثیر آنها در نمونه آزمایشگاهی معلوم نیست[۱]. به علاوه سایز نمونه، معمولا تست های نفوذپذیری آزمایشگاهی را محدود می‌کند چون در این حالت نمونه‌ها تنها یک یا دو شکستگی را در بر می‌گیرند. اگرچه چنین تست‌هایی می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در باره نفوذپذیری شکستگی و تاثیرپذیری به وسیله تنش، درجه حرارت، زبری سطح و پرشدگی فراهم کنند، درباره این که چگونه جریان سیال به وسیله هندسه شبکه شکستگی در مقیاس بزرگ تاثیر می‌پذیرد هیچ اطلاعی نمی‌دهند. به این علت علاوه بر اندازه‌گیری نفوذپذیری در نمونه‌های آزمایشگاهی، لازم است نفوذپذیری سنگ در ناحیه نیز تعیین شود مقدار نفوذپذیری سنگ در برابر آب ، نفت یا گاز در سنگ‌های گوناگون و در شرایط متفاوت یکسان نیست و این تفاوت بستگی به نوع کانی‌ها و تاثیر نوع سیال و عوامل دیگر دارد. تست های نفوذپذیری صحرایی، مخصوصا آن‌هایی که در مقیاس بزرگ انجام شده‌اند می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در مورد نفوذپذیری شبکه شکستگی فراهم کنند. تکنیک‌های معمول روی طول مشخص گمانه به وسیله بعضی از سیستم‌های پکر انجام می‌شوند، آب تحت فشار پمپ می‌شود و نرخ جریان حساب می‌شود. این روش مستقیم برای تعیین نفوذپذیری توده از نرخ جریان مشاهده شده است، ولی در این حالت گرادیان هیدرولیک مورد نیاز برای جریان قابل قبول در طول یک تست، اغلب از آن که تحت شرایط طبیعی به کار می‌رود خیلی بیشتر است. نفوذپذیری تعیین شده از تست ناحیه در سنگ شکسته به وسیله تعداد ناپیوستگی‌ها در زون تست شده و در عمل از تعداد شکستگی‌های متصل بزرگ و متقاطع تاثیر می‌پذیرد. بنابراین نفوذپذیری محاسبه شده اغلب حساسیت بیشتری نسبت به جهت شکستگی‌های متقاطع نشان می‌دهد. باید دقت کرد که هیچ کدام از این نکات کاربرد تست

نفوذپذیری را برای پیش‌بینی جریان سیال در سنگ شکسته بی اعتبار نمی‌کند و در نظر گرفتن آن نه تنها به فهم بهتر تاثیر هندسه شکستگی روی نفوذپذیری بلکه به تفسیر اطلاعات به دست آمده از تست نفوذپذیری نیز کمک می کند[۹].

استفاده از تست برجا برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی ناحیه خیلی سخت، زمان‌بر و پرهزینه است. اگر بتوان با روشی نفوذپذیری محیط را محاسبه کرد محدودیت‌های موجود در روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی و تست‌های صحرایی از بین می‌رود، به نظر می‌رسد در این حالت مقدار دقیق‌تر نفوذپذیری و شرایط واقعی محیط نشان داده می‌شود. همچنین با روش‌های محاسبه امکان انجام آنالیز حساسیت و تعیین تاثیر پارامترها روی نفوذپذیری و در نتیجه بررسی درجه وابستگی مقدار نفوذپذیری به پارامترهای مختلف وجود دارد. هرچند روابط بعضی از این فرض‌ها به تازگی وارد محاسبات شده است ولی می‌توان گفت که با پیشرفت این روش‌ها می‌توان تاثیر تمام پارامترهای موثر بر مقدار نفوذپذیری را به طور کامل در نظر گرفت. چیزی که در روش‌های اندازه‌گیری امکان پذیر نمی‌باشد.

نفوذپذیری سنگ شکسته با استفاده از روش‌های تحلیلی[۱] و عددی[۲] و روش محیط جایگزین[۳] تعیین می‌شود. نفوذپذیری محیط شکسته در گذشته برای دو موردی که به ندرت در طبیعت رخ می‌دهند مدل شده بود ۱) زمانی که المان‌های صفحه‌ایی خاص مانند گسل‌ها وجود دارند، که این شکستگی‌ها در سنگ به صورت مستقل بوده و می توانند مانند کانال‌های جدا رفتار نمایند و ۲) زمانی که شکستگی‌ها در گسل برشی ایجاد شده‌اند که با وجود حفره‌های رسوبی، محیط می‌تواند پیوسته فرض شود[۱۰]. ولی با پیشرفت روش‌های مدلسازی و محاسبه مقدار نفوذپذیری، امکان مدلسازی شرایط مختلفی از شکستگی‌ها فراهم آمد.

بیشتر کارهای قبلی برای آنالیز جریان سیال از طریق سیستم شکستگی به صورت تحلیلی و بر اساس فرضیات زیر انجام شده بود:

۱- هر شکستگی در سراسر زون شکسته گسترش دارد و به طور کامل زون مورد مطالعه را قطع کرده است.

۲- شکستگی‌ها تشکیل دسته‌های موازی می‌دهند.

۳- هیچ افت فشار هیدرولیکی بین شکستگی‌های متقاطع وجود ندارد.

بر اساس این فرضیات یک روش ساده برای محاسبه نفوذپذیری ایجاد شد، به این ترتیب که می‌توان نفوذپذیری کل را با جمع جبری مقادیر نفوذپذیری هر شکستگی به دست آورد[۹].

در واقع روش‌های تحلیلی نخستین روش‌هایی بودند که برای محاسبه نفوذپذیری به کار رفتند. روش تحلیلی برای شبکه‌های درزه‌دار ساده و لزوما ایزوتروپ وجود دارد. در این روش‌ها شبکه شکستگی با یک هندسی ساده ایجاد و با یکسری فرضیات مسئله حل می‌شود. روش‌های تحلیلی شبکه‌های ساده، منظم و موازی را به صورت دقیق حل می کنند و برای شبکه‌های کوچک و دارای دسته درزه جواب صحیح و سریع می‌دهند. افراد زیادی به محاسبه نفوذپذیری با استفاده از روش‌های تحلیلی پرداختند[۱۲-۱۱-۱۰-۴]. اودا روشی برای محاسبه تنسور نفوذپذیری ارئه داد. او با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی شبکه شکستگی و وزن دادن به آنها، بدون نیاز به شبیه‌سازی جریان توانست تنسور نفوذپذیری را به دست آورد[۴] و اسنو مدل شکستگی به صورت صفحه‌های موازی را بکار برد و با قرار دادن مقدار ریاضی بازشدگی برای حالت‌های مختلف شکستگی تنسور نفوذپذیری شبکه را به شرط داشتن دسته درزه محاسبه کرد[۱۰].

---

[۱] Analytical Methods
[۲] Numerical Methods
[۳] Effective Medium Theory

به علت پیچیدگی‌های موجود در شبکه شکستگی واقعی و موجود در طبیعت، روش‌های تحلیلی کاربرد محدود و یا همراه با خطا دارند به همین دلیل از روش‌های عددی استفاده می‌شود [۱۷-۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۲].

روش‌های عددی قادر هستند تا پارامترهای نفوذپذیری، مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ شکسته را تعیین کنند. روش المان مجزا[۱] (DEM) یک روش عددی پر کاربرد است که بسیاری از ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی را مانند شبکه شکستگی مجزا[۲] (DFN) با رفتار ساده یا پیچیده سنگ شکسته و ماتریکس سنگ، مدلسازی می‌کند[۲].

برای این‌کار از روش‌های DFN که تکنیک‌های وسیعی برای مدلسازی دارند استفاده می‌شود، در این روش از مدل زمین‌شناسی اطلاعات تقریبی در دست است پس برای ویژگی‌های هندسی شبکه شکستگی مانند مکان، طول، جهت و بازشدگی توابع آماری تعیین شده، سپس با استفاده از سیستم شبیه‌سازی مونت‌کارلو[۳] شبکه‌های شکستگی ایجاد و نفوذپذیری محاسبه می‌شود. این روش‌ها برای حل به منبع محاسباتی بسیار پرقدرت و فضای بسیار زیاد برای ذخیره سازی اطلاعات نیاز دارند و به طور کلی این روش‌ها بسیار وقت‌گیر هستند.

استفاده از روش محیط معادل (EMT) به عنوان جانشینی برای روش عددی در تعدادی از مقالات گزارش شده است[۲۴-۲۳-۲۲-۲۱-۲۰-۱۹-۱۸-۵]. زیمرمن و بودوارسون با ارائه الگوریتمی موثر و جایگزینی شبکه شکستگی با یک شبکه الکتریکی توانستند نفوذپذیری ناحیه را به دست آورند[۵]. در روش جدید مسئله هیدرولیکی به یک مسئله الکتریکی تبدیل شده و پس از حل مسئله الکتریکی، مجهولات هیدرولیکی تعیین می‌شوند.

روش محیط جایگزین علاوه بر محاسبه نفوذپذیری در زمینه‌های دیگری از علوم به خصوص مسائل الکتریکی نیز بکار می‌رود [۳۰-۲۹-۲۸-۲۷-۲۶-۲۵].

با این وجود آنالیز عدم قطعیت این روش به عنوان روشی جدید برای محاسبه نفوذپذیری و تعیین اندازه نمونه معرف توده سنگ، در کارهای قبلی انجام نشده است؛ و این مسئله هدف اصلی این پایان‌نامه می‌باشد.

آنالیز عدم قطعیت در زمینه‌های مختلفی از علوم و به صورت مقایسه بین مقادیر واقعی و مقادیر به دست آمده از مدل انجام می‌شود.

در این پایان‌نامه ابتدا بر اساس اصول کلی روش EMT برنامه‌ایی با زبان متلب، برای محاسبه نفوذپذیری کلی شبکه شکستگی نوشته و برای شبکه‌های شکستگی ایجاد شده با فرض پارامترهای هندسی توزیع شده، بکار رفته است. با محاسبه مقدار نفوذپذیری برای اندازه‌های مختلف یعنی از اندازه کوچک به بزرگ، اندازه نمونه معرف توده سنگ تعیین می‌شود. به منظور تعیین درجه دقت و قابل اطمینان بودن روش جدید، نفوذپذیری کلیه مدل‌ها با استفاده از روش عددی که نتایج آن به واقعیت نزدیک‌تر است، نیز به دست آمد. برای مشخص شدن روند تغییرات و به دست آوردن مقدار نفوذپذیری تحت شرایط مختلف، آنالیز حساسیت روی پارامترهای هندسی مدل شکستگی مجزا یعنی دانسیته و جهت شکستگی، در اندازه‌های مختلف با هر دو روش عددی و محیط معادل انجام و نتایج با هم مقایسه شدند و در نهایت برای هر حالت آنالیز عدم قطعیت نیز انجام شده است.

همچنین باید اشاره شود که در انجام این پایان‌نامه بر خلاف کارهای گذشته، علاوه بر این‌که کلیه ویژگی‌های شبکه شکستگی به صورت توزیع شده در نظر گرفته شدند، تاثیر وابستگی و ارتباط داخلی بین پارامترها (طول شکستگی و مقدار بازشدگی) نیز در نظر گرفته شده و کلیه آنالیز با استفاده از هر دو روش تحت سه حالت ۱) بازشدگی ثابت ۲)

---

[۱] Discrete Element Method
[۲] Discrete Fracture Network
[۳] Monte Carlo

بازشدگی توزیع شده و وابسته به طول ۳) بازشدگی توزیع شده و مستقل از طول، انجام شده‌اند. که چنین آنالیزی با این فرض نیز برای اولین بار است که انجام می‌شود.

جدول۱-۱ تعداد و صورت کلی آنالیزهای انجام شده در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد. کلیه آنالیزها با استفاده از دو روش عددی و محیط معادل انجام شده‌اند. ۵ دسته شبکه شکستگی تصادفی دو بعدی برای محاسبه نفوذپذیری و تعیین اندازه REV با در نظر گرفتن سه حالت مختلف برای بازشدگی، بکار رفته است. در این شبکه‌ها دو پارامتر دانسیته شبکه شکستگی و جهت شکستگی‌ها با گرفتن مقادیری از کم تا زیادتغییر یافتند و در نتیجه آن، تغییرات نفوذپذیری و اندازه REV بررسی شد. به طور ۸۱۰ آنالیز با هر روش و ۱۶۲۰ آنالیز در کل انجام شده است. برای تعیین درجه عدم قطعیت روش محیط معادل، آنالیز عدم قطعیت بر حسب توابع توزیع نتایج انجام و دو روش با در نظر گرفتن دو پارامتر مقدار میانگین نفوذپذیری و اندازه REV با هم مقایسه می‌شوند.

جدول ۱-۱- تعداد و حالت آنالیزهای انجام شده برای محاسبه نفوذپذیری و تعیین REV

روش محاسبه نفوذپذیری		بررسی تاثیر دانسیته شکستگی				بررسی تاثیر جهت شکستگی		
		کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	کم	متوسط	زیاد
روش عددی	دهانه بازشدگی ثابت	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
	دهانه بازشدگی وابسته به طول	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
	دهانه بازشدگی مستقل از طول	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
روش محیط معادل	دهانه بازشدگی ثابت	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
	دهانه بازشدگی وابسته به طول	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
	دهانه بازشدگی مستقل از طول	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵

۱-۲- نگاهی به فصول بعد

هدف اصلی این پایان‌نامه تعیین دقت روش جدید محیط معادل برای محاسبه نفوذپذیری و سایز معادل توده سنگ می‌باشد. در این راستا در فصل بعدی اصول روش عددی-المان‌های مجزا و روش جدید محیط جایگزین برای محاسبه نفوذپذیری بیان می‌شود. در فصل سوم ابتدا پارامترهای هندسی لازم برای ایجاد شبکه شکستگی و توزیع‌های آماری مربوط به آنها بیان و سپس روش ایجاد شبکه شکستگی و شرایط و فرضیات لازم برای مدلسازی‌های انجام شده تحت سه حالت بازشدگی (بازشدگی ثابت، بازشدگی توزیع شده و وابسته به طول، بازشدگی توزیع شده و مستقل از طول) با تغییر پارامترهای هندسی، توضیح داده می‌شود. نتایج حاصل از تعیین نفوذپذیری و اندازه نمونه معرف، به وسیله روش عددی و روش جدید محیط جانشین، همچنین آنالیزهای مربوط به تعیین درجه دقت و میزان کارایی روش محیط موثر، در فصل چهارم آورده شده است. در نهایت فصل پنجم به بحث و نتیجه‌گیری کلی در مورد روش جدید محاسبه نفوذپذیری و تعیین اندازه نمونه معرف توده سنگ می‌پردازد و پیشنهاداتی برای ادامه کار در آینده ارائه شده است.

فصل دوم
روش‌های محاسبه نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته

۲-۱- مقدمه

بیشتر کارهای قبلی برای آنالیز جریان سیال از طریق سیستم شبکه شکستگی به صورت تحلیلی و بر اساس فرضیات زیر انجام شده بود:

۱- هر شکستگی در سراسر زون شکسته گسترش دارد و به طور کامل زون مورد مطالعه را قطع کرده است.

۲- شکستگی‌ها تشکیل دسته‌های موازی می‌دهند.

۳- هیچ کاهش فشار هیدرولیکی بین شکستگی‌های متقاطع وجود ندارد.

بر اساس این فرضیات یک روش ساده برای محاسبه نفوذپذیری ایجاد شد، به این ترتیب که می‌توان نفوذپذیری کل را با جمع مقادیر نفوذپذیری هر شکستگی به دست آورد[۹].

اگر چه اثبات شده است که جریان سیال از طریق توده شکسته، به تعداد، بازشدگی و اتصال دسته‌های ناپیوستگی وابسته است، فرض گسترش ناپیوستگی‌ها در سراسر زون مورد مطالعه، این ویژگی مهم ساختار سنگ را که ناپیوستگی‌ها می‌توانند طول محدود داشته باشند، نادیده می‌گیرد. تلاش زیادی انجام شد تا در روش‌هایی که بین ویژگی‌های ساختاری سنگ و ویژگی‌های هیدرولوژی ماکروسکوپیک آن ارتباط برقرار می‌کنند، تاثیر شکستگی هایی با طول محدود نیز در نظر گرفته شود. در این راستا آنالیزهای هندسی و هیدرولوژی بر اساس مدل صفحه‌های موازی به کار رفت و یک تنسور نفوذپذیری برای توده سنگ اثبات شد. به این ترتیب که یک المان از توده سنگ با شکستگی‌های محدود و جهت اختیاری در نظر گرفته می‌شد، اگرفرض شود شکستگی‌هایی که مرز

المان را قطع نمی‌کنند سهمی در جریان سیال ندارند، می‌توان گفت جریان در هر شکستگی تقریبا از شکستگی‌های دیگر مستقل است. بنابراین کل جریان می‌تواند به وسیله جمع ساده تعیین شود. این روش کاملا معتبر نیست و برخلاف این ساده‌سازی‌ها توجیه فیزیکی نتایج آسان نیست.
شکستگی‌هایی که طول محدود دارند در توده سنگ یک شبکه پیچیده، ایجاد می‌کنند به این ترتیب که جریان در هر شکستگی به جریان در سایر شکستگی‌ها وابسته است. به منظور تعیین این جریان لازم است یک شبکه کامل که بتواند فشار مرزی به کار رفته در شکستگی‌ها را ارضا کند، در نظر گرفته شود[۹].
برای ایجاد این شبکه و آنالیز آن به روشی بهتر و دقیق‌تر از روش تحلیلی با قابلیت‌های اجرایی بیشتر نیاز بود به همین دلیل مهندسین به روش‌های عددی و روش محیط جایگزین روی آوردند.

۲-۲- روش‌های عددی محاسبه نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته

همواره محققین بر این نکته واقف بوده‌اند که روش‌های عددی در حل مسائل مهندسی می‌توانند کاربرد نامحدودی داشته باشند. اما با توجه به هزینه و وقت زیادی که در دهه‌های گذشته صرف برنامه‌نویسی و اجرای برنامه می‌گردید، ترجیح داده می‌شد که بیشتر از روابط تحلیلی استفاده گردد. روش‌های تحلیلی با تمام راحتی کاربردی که دارند، نمی‌توانند حل مسأله را به صورت دقیق بیان نمایند. واضح است که هر چقدر مدل ساخته شده در روش‌های عددی به واقعیت نزدیکتر باشد و پارامترهای بیشتری را در نظر بگیرد، جواب دقیقتری را از روش‌های عددی انتظار خواهیم داشت. با پیشرفت فن‌آوری، چه در زمینه سخت‌افزار و چه در زمینه نرم‌افزار، کم کم محققین به سمت روش‌های عددی روی آوردند.
امروزه از مدل سازی عددی برای بررسی رفتار توده‌سنگ در یک محل مشخص استفاده می‌شود. اساس این روش تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود، در تعدادی از نقاط محیط می‌باشد.
روش‌های عددی که به طور معمول برای موضوعات مکانیک سنگی به کار می‌روند به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند :
۱) روش های پیوسته شامل :
الف) روش تفاضل محدود[۱]
ب) روش المان محدود[۲]
ج) روش المان مرزی[۳]
۲) روش‌های ناپیوسته شامل :
الف) روش المان مجزا[۴]
ب) روش شبکه ناپیوستگی مجزا[۵]
انتخاب نوع روش، بستگی به نوع مسئله دارد و با توجه به اندازه و سیستم هندسی شکستگی‌ها نوع روش تعیین می شود.

۲-۲-۱- روش‌های پیوسته

روش‌های پیوسته توانایی شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی رفتار سازه‌های خاکی و سنگی را دارند. جریان سیال از طریق یک جسم جامد به تنهایی یا به صورت ترکیب با مسائل مکانیکی آنالیز و معادلات موجود با استفاده از روش

---

[۱] Finite Difference Method (FDM)
[۲] Finite Element Method (FEM)
[۳] Boundary Element Method (BEM)
[۴] Discrete Element Method(DEM)
[۵] Discrete Fracture Network (DFN)

تفاضل محدود حل می‌شوند. روش تفاضل محدود، تقریبی مستقیم از معادلات دیفرانسیل جزئی بنیادی است که از جایگزینی مشتقات جزئی با تفاضلات نقاط گرهی تعریف شده در محدوده مساله به دست می‌آید. در اثر این فرآیند معادلات دیفراسیل جزئی اولیه به معادلات جبری بر حسب مجهولات مورد نظر در نقاط گرهی تبدیل می‌شوند. سپس با اعمال شرایط مرزی به سیستم می‌توان معادلات را حل نموده و پارامترهای مجهول را بدست آورد. بنابراین برای حل مسائل شبکه، یک دستگاه معادلات دیفرانسیل بر حسب میزان فشار و درجه اشباع برای هر نقطه شبکه[۱] تعیین می‌شود. درجه اشباع و میزان فشار به وسیله میانگین‌گیری از مقادیر گرهی محیطی به دست می‌آیند. در این معادلات دو مسئله مهم وجود دارد: ۱) معادلات سیال و شرایط مرزی بر حسب فشار تعریف می‌شوند و ۲) نفوذپذیری به صورت ضریب تحرک‌پذیری[۲] یا همان فشار حفره‌ایی در قانون دارسی،که نسبت نفوذپذیری ذاتی به ویسکوزیته دینامیکی سیال است، بیان می‌شود. در این معادلات اگر شتاب جاذبه برای گشتاور چرخشی در نظر گرفته نشود، معادلات طبق قانون دارسی برای یک محیط متخلخل و انیزوتروپ، در نظر گرفته شده و بردار سرعت در هر گره به دست می‌آید. سپس نرخ جریان حجمی با استفاده از بردارهای سرعت می‌تواند محاسبه شود. اگر تاثیر شتاب جاذبه در نظر گرفته شود، گرادیان در فرمول دارسی تغییر می‌کند و با توجه به این تغییر، فرمول اصلاح می‌شود. برای انجام آنالیز و رسیدن به پایداری عددی از گام زمانی[۳] استفاده می‌شود که بتواند تغییر شکل های داخل بلوک را ارضا نماید. زمانی که در گره مرکزی یک ناحیه، به علت افزایش جریان گرهی، فشار افزیش یابد می‌توان گام زمانی را به دست آورد. با تغییر در فشار حفره‌ایی گره‌های اشباع، جریان نامتعادل می‌شود و حجم گره در اثر تغییر شکل مکانیکی شبکه (به علت افزایش فشار) افزایش می‌یابد. در این روش‌ها می‌توان فشار حفره‌ایی را نادیده گرفت. به این ترتیب که محدودیتی برای مقاومت کششی سیال تعریف می‌شود. اگر فشار گرهی از منفی مقاومت کششی بیشتر شود، فشار صفر می‌شود و گره‌ها به عنوان محل جریان خروجی بکار می‌روند تا درجه اشباع کاهش پیدا کند. فشار صفر باقی می‌ماند تا درجه اشباع به کمتر از یک برسد.

در این روش اگر سیال ازطریق ناحیه غیر اشباع مهاجرت کند باید دو فاکتور را در نظر گرفت: ۱) برای نواحی[۴] غیر اشباع نفوذپذیری کاهش پیدا می‌کند (برای نواحی با درجه اشباع صفر، میزان نفوذپذیری صفر می‌شود.) ۲) سیال نمی‌تواند از گره‌هایی با درجه اشباع صفر خارج شود.

بنابراین جریان عبوری در ضریبی وابسته به درجه اشباع محیط ضرب می‌شود. به عنوان یک نتیجه می‌توان گفت برای یک ناحیه کاملا اشباع، نفوذپذیری ثابت و برای ناحیه‌ایی با درجه اشباع صفر، نفوذپذیری صفراست [۳۱].

روش‌های پیوسته برای حل مسائل انتقال از قانون دارسی و برای مسائل ترکیبی از قوانین ترکیب بر اساس معادله عکس‌العملی برای سیال حفره‌ایی که وابسته به درجه اشباع است، استفاده می‌کنند. در موارد کاملا اشباع، سیال می تواند کششی بالای حد نهایی تحمل کند و تراکم‌پذیری ذرات نادیده گرفته شود. برای موارد نیمه اشباع عکس العمل سیال حفره‌ایی می‌تواند به صورت معادلات اشباع، رابطه بین فشار و درجه اشباع و یا رابطه بین نفوذپذیری نسبی(نسبت بین نفوذپذیری ظاهری و نفوذپذیری اشباع)و درجه اشباع بیان شود و برای موارد با درجه اشباع صفر، جریان و معادلات جریان تنها به وسیله جاذبه، هدایت می‌شوند[۳۱].

با این حال بزرگترین محدودیت این روش ارتباط مستقیم، اندازه مدل با ابعاد محیط است، بطوریکه با افزایش ابعاد مدل حجم اطلاعات مورد نیاز و زمان لازم برای اجرای محاسبات به شدت افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به

---

[۱] Grid point
[۲] Mobility cofficient
[۳] Time step
[۴] Zone

مش بندی داخلی، روش‌های FDM و FEM نمی‌توانند محیط‌های بزرگ با ابعاد بی‌نهایت را شبیه‌سازی نمایند. بدین ترتیب کارایی این روش‌ها در شرایط مذکور کاهش پیدا می‌کند.

۲-۲-۲- روش‌های ناپیوسته

یکی از عیب‌های استفاده از روش‌های آنالیز پیوسته این است که نمی‌توانند برای محاسبات تعداد زیادی درزه به کار روند. روش عددی دیگری که بر روش پیوسته ترجیح داده می‌شود روش ناپیوسته است. روش‌های ناپیوسته این امکان را ایجاد می کنند که سیستم درزه‌ها در محاسبات وارد شود. تفاوت یک محیط پیوسته با غیرپیوسته، در وجود سطوح تماس[۱](محل‌های برخورد) و فصل مشترک[۲] بلوک‌های مجزا که سیستم راتشکیل می‌دهند، می‌باشد. روش های محیط‌های غیرپیوسته می‌توانند بسته به این که نماینده فصل مشترک‌ها و یا بلوک‌های مجزا باشند، طبقه بندی گردند.

این دسته از روش‌های عددی باید نمایشگر دو قسمت از یک سیستم باشند: ناپیوستگی‌ها و ماده سنگ.

بسیاری از برنامه‌های کامپیوتری برای محیط‌های پیوسته نوشته شده‌اند. اما با وجود ناپیوستگی‌ها درون یک سیستم، به فرمول‌بندی و نوشتن روابط برای محیط غیرپیوسته نیاز می‌باشد. برنامه‌های پیوسته‌ایی وجود دارند که المان‌های سطوح تماس یا خط‌های لغزش را تعریف کرده‌اند و ایجاد محیط ناپیوسته را تا حدی امکان‌پذیر می‌کنند. هر چند روابط نوشته شده برای این مسائل معمولا به یکی از طرق زیر محدود می‌شود:

۱) منطق استفاده شده، هنگامی که تعداد مقاطع فصل مشترک زیاد باشد، غیر معتبر خواهد بود

۲) هیچ ایده‌ای برای شناسایی فصل مشترک‌های جدید وجود ندارد

۳) روابط، محدود به تغییر شکل‌های کوچک و یا دوران‌هایی در حد کم می‌باشد

به دلایل فوق، مدل‌های پیوسته، در کاربردهای خود برای محیط‌های شکسته با محدودیت زیادی روبه‌رو می‌شوند.

یک گروه از برنامه‌های کامپیوتری که به کدهای المان گسسته مشهورند، قابلیت نمایش حرکت تعداد زیادی از ناپیوستگی‌ها را به صورت صریح فراهم می‌آورند. این روش قابلیت‌های زیر را دارد:

۱) امکان جابجایی و دوران بلوک‌های مجزا را به انضمام جدایش کامل فراهم می‌آورد.

۲) در حین پیشرفت محاسبات، به صورت اتوماتیک مرزها و سطوح تماس جدید را مشخص می‌کند.

گروه دیگری از کدهای کامپیوتری که به نام روش‌های تعادل حدی معروفند نیز می‌توانند تعداد زیادی از ناپیوستگی‌های متقاطع را مدل کنند. اما قابلیت ارضای شرایط روش المان گسسته را ندارند. این کدها از تحلیل برداری نتیجه می‌گیرند که آیا از نظر سینماتیکی امکان حرکت و یا جدایش یک بلوک در یک سیستم بلوکی وجود دارد یا خیر. این راهبرد، رفتارهای بعدی سیستم بلوکی و یا توزیع مجدد بار را مورد بازبینی قرار نمی‌دهد.

روش المال مجزا (DEM) برای سنگ‌هایی که دارای شکستگی هستند، بسیار مناسب است. این روش ابتدا برای نمایش توده سنگ درزه‌دار به وجود آمد و سپس کاربردهای این روش برای زمینه‌های زیر بسط داده شد:

- تحقیقات جریان مواد در محیط سنگی
- تحقیقات در مورد ریزمکانیسم‌ها در مواد دانه‌ای
- پیشرفت شکستگی و ترک در سنگ‌ها و بتون

---

[۱] Contact
[۲] Interface