جمهوری اسلامی ایران

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

راهنمای کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن

ضابطه شماره ۶۵۶

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

امور نظام فنی و اجرایی

nezamfanni.ir

وزارت صنعت، معدن و تجارت

معاونت امور معادن و صنایع معدنی

دفتر نظارت و بهره‌برداری

www.mimt.gov.ir

۱۳۹۵

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

باسمه‌تعالی

ریاست جمهوری
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
رییس سازمان

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره:**	**۹۵/۶۰۲۴۷۳**
	تاریخ:	**۱۳۹۵/۰۴/۱۵**

موضوع: راهنمای کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن

به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و مواد (۶) و (۷) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست ضابطه شماره ۶۵۶ امور نظام فنی و اجرایی، با عنوان «راهنمای کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

رعایت مفاد این ضابطه در صورت نداشتن ضوابط بهتر، از تاریخ ۱۳۹۵/۱۰/۰۱ الزامی است.

امور نظام فنی و اجرایی این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.

محمد باقر نوبخت

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- ***شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.***

۲- ***ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.***

۳- ***در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.***

۴- ***نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.***

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علیشاه، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، امور نظام فنی و اجرایی، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

Email:info@nezamfanni.ir **nezamfanni.ir**

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

باسمه تعالی

پیشگفتار

نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره۴۲۳۳۹/ ت ۳۳۴۹۷ ه، مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات وزیران) به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تاکید جدی قرار داده است و این امور به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرحهای توسعه‌ای کشور را به عهده دارد. پیشرفت و توسعه چشمگیر در عرصه علوم کامپیوتر موجب شده است که روش‌های عددی در تمامی علوم مهندسی کاربرد گسترده‌ای پیدا کند. در طراحی مسایل و پروژه‌های مهندسی معدن به ویژه در طراحی‌های ژئومکانیکی معادن با توجه به افزایش عمق، شیب و ارتفاع در سازه‌های معدنی روباز و زیرزمینی نیاز به کاربرد ابزار تحلیل و طراحی پیشرفته‌تری احساس می‌شود. در همین راستا استفاده از مدلسازی‌های عددی در تحلیل و طراحی ژئومکانیکی معادن دنیا نسبت به گذشته گسترش و مقبولیت زیادی بین مهندسان پیدا کرده است. مدلسازی‌های عددی به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی مسایل مختلف در معادن مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر داده‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی مناسبی از مناطق مورد مطالعه در اختیار باشد، با استفاده از مدلسازی‌های عددی می‌توان پیش‌بینی‌های جامعی از مکانیزم‌های ناپایداری محتمل و میزان تغییر شکل‌های حاصل از عملیات معدنکاری کرده و میزان پایداری و ضرایب ایمنی و عملکرد سیستم نگهداری را ارزیابی کرد. اگر داده‌های کافی وجود نداشته باشد، مدلسازی‌های عددی را می‌توان برای انجام تحلیل‌های پارامتری برای درک هر چه بهتر رفتارهای ممکن یک حفریه معدنی در شرایط مختلف بارگذاری و خواص ژئومکانیکی به کار گرفت. درک جامع از رفتارهای ممکن و پارامترهای تاثیرگذار اصلی در یک سازه معدنی کمک زیادی برای ادامه روند اجرا و حتی هدایت مسیر مطالعات مورد نیاز برای آن حفریه می‌کند.

در ضابطه **"راهنمای کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن"** مدلسازی عددی و موارد کاربردی آن از نقطه نظر عملی و اجرایی در مسایل ژئومکانیکی معادن بررسی شده و پارامترهای مورد نیاز و روند کلی برای انجام یک مدلسازی عددی قابل قبول در تحلیل و طراحی مسایل ژئومکانیکی معدنی تشریح شده است.

با همه‌ی تلاش انجام شده قطعا هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که إن‌شاءا... کاربرد عملی و در سطح وسیع این ضابطه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آن‌ها را فراهم خواهد نمود. در پایان، از تلاش‌ها و جدیت جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان امور نظام فنی و اجرایی همچنین جناب آقای دکتر جعفر سرقینی مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی بخش معدن کشور در وزارت صنایع و معادن، کارشناسان دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این ضابطه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

غلامرضا شافعی

معاون فنی و توسعه امور زیربنایی

تیر ۱۳۹۵

omoorepeyman.ir

مجری طرح

آقای جعفر سرقینی	معاون امور معادن و صنایع معدنی – وزارت صنایع و معادن

اعضای شورای عالی به ترتیب حروف الفبا

فرزانه آقا رمضانعلی	سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
سیف ا... امیری	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
بهروز برنا	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
محمد پریزادی	سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
عبدالعلی حقیقی	سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
جعفر سرقینی	وزارت صنعت، معدن و تجارت	دکتری مهندسی فرآوری مواد معدنی
علیرضا غیاثوند	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی
حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن

اعضای کارگروه استخراج به ترتیب حروف الفبا

محمد فاروق حسینی	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی مکانیک سنگ
مصطفی شریف‌زاده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس مهندسی معدن
کورش شهریار	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی استخراج معدن
حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن
علی مرتضوی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی انفجار، مکانیک سنگ

اعضای کارگروه تنظیم و تدوین به ترتیب حروف الفبا

آقای مهدی ایران‌نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
بهرام رضایی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
علیرضا غیاثوند	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی
حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
بهزاد مهرابی	دانشگاه خوارزمی	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی

اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه

خانم فرزانه آقارمضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی و اجرایی
آقای علیرضا غیاثوند	رئیس گروه ضوابط و معیارهای معاونت امور معادن و صنایع معدنی
آقای اسحق صفرزاده	کارشناس معدن امور نظام فنی و اجرایی

پیش‌نویس این گزارش توسط آقای **دکتر پرویز معارف‌وند** و **مهندس محمد عفیفی‌پور** تهیه شده و توسط کارگروه استخراج بررسی و تایید شده است و پس از آن به تصویب شورای عالی برنامه رسیده است

omoorepeyman.ir

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- معرفی روش‌های طراحی ژئومکانیکی معادن..... ۱

۱-۱- آشنایی..... ۳

۱-۲- روش‌های تجربی..... ۳

۱-۳- روش‌های تحلیلی و حل بسته..... ۳

۱-۴- روش‌های مشاهده‌ای..... ۳

۱-۵- روش‌های عددی..... ۳

۱-۶- ویژگی مسایل ژئومکانیکی در طراحی معدن..... ۴

فصل دوم- مزایا، محدودیت‌ها و جنبه‌های کاربردی روش‌های عددی..... ۵

۲-۱- آشنایی..... ۷

۲-۲- روش اجزای محدود..... ۷

۲-۲-۱- مزایا..... ۸

۲-۲-۲- محدودیت‌ها..... ۸

۲-۳- روش تفاضل محدود..... ۸

۲-۳-۱- مزایا..... ۹

۲-۳-۲- محدودیت‌ها..... ۹

۲-۴- روش اجزای مرزی..... ۱۰

۲-۴-۱- مزایا..... ۱۰

۲-۴-۲- محدودیت‌ها..... ۱۰

۲-۵- روش اجزای مجزا..... ۱۰

۲-۵-۱- مزایا..... ۱۱

۲-۵-۲- محدودیت‌ها..... ۱۱

۲-۶- روش‌های ترکیبی..... ۱۱

۲-۷- مقایسه روش‌های عددی در توانایی‌ها و قابلیت‌های تحلیل..... ۱۲

فصل سوم- مراحل مدلسازی به منظور طراحی با روش‌های عددی..... ۱۵

۳-۱- آشنایی..... ۱۷

۳-۲- تعریف هندسه مدل..... ۱۷

۳-۳- انتخاب خصوصیات فیزیکی و پارامترهای مکانیکی واحدهای لیتولوژیکی..... ۱۷

۳-۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی..... ۱۹

۳-۳-۲- ویژگی‌های مکانیکی..... ۱۹

omoorepeyman.ir

۳-۴- تعیین شرایط مرزی حاکم بر مساله ۱۹
۳-۵- انتخاب مدل رفتاری و معیار شکست مناسب ۲۰
۳-۵-۱- مدل‌های رفتاری مصالح ژئومکانیکی ۲۰
۳-۵-۲- نحوه انتخاب مدل رفتاری مناسب ۲۱
۳-۵-۳- معیارهای تجربی شکست ۲۲
فصل چهارم- معیارهای انتخاب روش‌های عددی در مسایل ژئومکانیکی معادن ۲۳
۴-۱- آشنایی ۲۵
۴-۲- الگوریتم اجرای مدل‌های عددی ۲۵
۴-۳- انتخاب روش عددی و نرم‌افزار مربوطه ۲۷
۴-۳-۱- مدل دو بعدی یا سه بعدی ۲۷
۴-۳-۲- مدل پیوسته یا ناپیوسته ۲۸
فصل پنجم- کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن روباز ۳۱
۵-۱- آشنایی ۳۳
۵-۲- شناخت خصوصیات ژئومکانیکی ۳۳
۵-۳- تحلیل پایداری و طراحی دیواره‌های معادن روباز ۳۳
۵-۳-۱- تحلیل دو بعدی و سه بعدی دیواره ۳۳
۵-۳-۲- تحلیل پیوسته و ناپیوسته دیواره ۳۴
۵-۴- تحلیل پایداری و طراحی شیب دیواره‌های بلند ۳۴
۵-۵- تحلیل پایداری انباشتگاه‌های (دپوهای) معدنی ۳۵
۵-۶- تحلیل پایداری سدهای باطله ۳۵
۵-۷- تحلیل و محاسبات جریان آب در معدن ۳۶
۵-۸- تحلیل تاثیر آب بر پایداری دیواره‌ها ۳۶
۵-۹- تحلیل تاثیر بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار بر پایداری دیواره‌ها ۳۶
۵-۹-۱- روند تحلیل شبه‌استاتیکی ۳۷
۵-۹-۲- تحلیل دینامیکی ۳۷
فصل ششم- کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن زیرزمینی ۳۹
۶-۱- آشنایی ۴۱
۶-۲- بررسی شرایط حاکم بر سازه‌های معدنی زیرزمینی ۴۱
۶-۲-۱- شرایط بارگذاری ۴۱
۶-۲-۲- پیوسته و ناپیوسته بودن محیط ۴۱
۶-۳- روش‌های تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج ۴۱
۶-۴- روش‌های تحلیل پایداری پایه‌های معدنی ۴۲

omoorepeyman.ir

۶-۵- روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها، چاه‌ها و تقاطع‌های اصلی معادن ۴۲
۶-۵-۱- تونل‌ها ۴۲
۶-۵-۲- تقاطع‌ها ۴۲
۶-۵-۳- چاه ۴۳
۶-۶- تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی معدنی ۴۳
۶-۷- روش‌های تحلیل و بررسی نشست در مقیاس کل محدوده معدن ۴۴

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۱

معرفی روش‌های طراحی ژئومکانیکی معادن

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۱-۱- آشنایی

برای طراحی‌های مهندسی از دیدگاه ژئومکانیکی ابزار یا سیستم‌های طراحی متعددی وجود دارد که آن‌ها را می‌توان به چهار دسته کلی شامل روش‌های تجربی و طبقه‌بندی‌های مهندسی، روش‌های تحلیلی و حل دقیق، روش‌های مشاهده‌ای و قضاوت مهندسی و روش‌های عددی تقسیم‌بندی کرد.

۱-۲- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی و طبقه‌بندی‌های مهندسی بر اساس تجربه‌های متعدد حاصل از اجرای پروژه‌های مختلف و تعیین پارامترهای موثر پایه‌گذاری شده‌اند. علت استفاده گسترده از این روش‌ها نیز به دلیل راحتی انجام ارزیابی با آن‌ها و نیاز به اندازه‌گیری‌های محدود و ساده برای تعیین پارامترهای شاخص در آن‌ها است. طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ در پروژه‌های عملی و همچنین ویژگی‌سنجی توده سنگ و برآورد خواص ژئومکانیکی به کار می‌رود و بعضی دیگر مستقیما در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۳- روش‌های تحلیلی و حل بسته

روش‌های حل تحلیلی بر اساس اصول پایه‌ای ریاضی و رفتار مکانیکی پایه‌گذاری شده‌اند که حاصل آن یک رابطه ریاضی بر اساس عوامل محدود تاثیرگذار در مساله است. مزیت این روش‌ها حل دقیق و ارایه نتیجه بر حسب اعداد و ارقام برای مساله مورد نظر است. این روابط بیشتر برای حالت‌های ساده و مسایل با هندسه ساده و شرایط مرزی محدود قابل اجرا است و معمولا در آن‌ها پارامترهای تاثیرگذار کمتری برای ساده بودن روابط در نظر گرفته می‌شود.

۱-۴- روش‌های مشاهده‌ای

روش‌های مشاهده‌ای بیشتر در مورد طراحی یا اصلاح طراحی در طول اجرای پروژه به کار می‌رود که با استفاده از داده‌های به دست آمده در حین اجرا، روند تعیین شده طراحی روزآمد و در صورت نیاز اصلاح می‌شود. قضاوت‌های مهندسی باید در تمامی مسایل مهندسی به عنوان یک بررسی اعتبارسنجی و صحت مساله مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۵- روش‌های عددی

در مسایل ژئومکانیک، به تمام انواع محاسباتی که بر اساس حل عددی معادلات دیفرانسیلی پیچیده در مکانیک سنگ به کار می‌رود، روش عددی اطلاق می‌شود. در خیلی از روش‌های عددی با تقسیم توده سنگ به تعداد زیادی المان کوچک و بررسی رفتاری آن‌ها، رفتار کل توده برآورد می‌شود. این روش‌ها اغلب برای تحلیل تنش و جابه‌جایی به کار می‌روند. پیش‌نیاز اصلی برای تحلیل‌های عددی، تقسیم توده در برگیرنده حفریه به بخش‌های متعدد با خواص مشابه و عوارض شاخص بر اساس نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و رده‌بندی‌های مهندسی است. از قابلیت‌های منحصر به فرد این روش، ساخت مدل‌های پیوسته یا ناپیوسته متشکل از عوارض ساختاری و بلوک‌های سنگی است که امکان تحلیل دقیق‌تر را فراهم می‌آورد. تحلیل عددی یک ابزار قوی است که می‌توان

omoorepeyman.ir

از آن در فرآیند طراحی به ویژه برای تحلیل پارامتری و حساسیت استفاده کرد. این ابزار تصویر مناسب‌تری از مکانیزم حاکم بر مساله با در نظر گرفتن حداکثر پارامترهای تاثیرگذار ارایه می‌کند، که البته باید توسط دیگر روش‌ها و نتایج روش مشاهده‌ای، اعتبارسنجی شوند.

۱-۶- ویژگی مسایل ژئومکانیکی در طراحی معدن

مسایل مهندسی بر اساس میزان اطلاعات و داده‌های موجود پیرامون آن‌ها و همچنین درک از فیزیک مساله به چهار دسته کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱-۱):

الف- میزان داده‌های زیاد- فهم و درک کم (ناحیه ۱)

ب- میزان داده‌های کم- فهم و درک زیاد (ناحیه ۲)

پ- میزان داده زیاد- فهم و درک زیاد (ناحیه ۳)

ت- میزان داده کم- فهم و درک کم (ناحیه ۴)

تحلیل مسایل ژئومکانیکی معادن با توجه به عدم قطعیت‌ها در داده‌های ورودی و به طور کلی قرار داشتن در گروه مسایل داده محدود، جزو نواحی دوم و چهارم تقسیم‌بندی می‌شوند. با افزایش عمق معادن روباز، افزایش سطح تنش، پیچیدگی هندسه دیواره‌ها و اندرکنش آن با عوارض زمین‌شناسی، میزان درک فیزیکی از مسایل ژئومکانیکی معادن کم می‌شود. در مورد حفریات زیرزمینی با افزایش عمق، عدم قطعیت‌های موجود در تعیین جهت تنش‌ها و توزیع تنش‌های القایی، هندسه پیچیده و اندرکنش‌های متعدد، میزان درک از مکانیزم رفتاری مسایل ژئومکانیکی معادن زیرزمینی نیز کم می‌شود. با این تفاسیر بسته به پیچیدگی مساله بعضی از مسایل ژئومکانیکی معدن در ناحیه چهارم قرار می‌گیرند. در مورد حل مسایل ژئومکانیکی معدنی با استفاده از روش‌های طراحی مهندسی با توجه به کمبود داده‌ها و در بعضی مسایل با درک فیزیکی کم، نمی‌توان چندان به روش‌های حل دقیق اطمینان کرد. روش‌های تجربی و مهندسی در مسایل ساده و تکرار شده‌ای قابل اجرا هستند که شرایط مرزی ساده داشته باشند. در نقطه مقابل، با استفاده از روش ابزار عددی، در صورتی که درک مناسبی از مساله وجود داشته باشد می‌توان با تحلیل‌های پارامتری و تغییر داده‌ها و تحلیل نتایج، ضعف کمبود داده این مسایل را به نوعی حل و تصویر فیزیکی (کیفی و کمی) بهتری از مساله ارایه کرد.

شکل ۱-۱- تقسیم‌بندی مسایل مهندسی بر اساس میزان اطلاعات پیرامون آن‌ها و درک و فهم از مساله

omoorepeyman.ir

فصل ۲

مزایا، محدودیت‌ها و جنبه‌های کاربردی روش‌های عددی

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

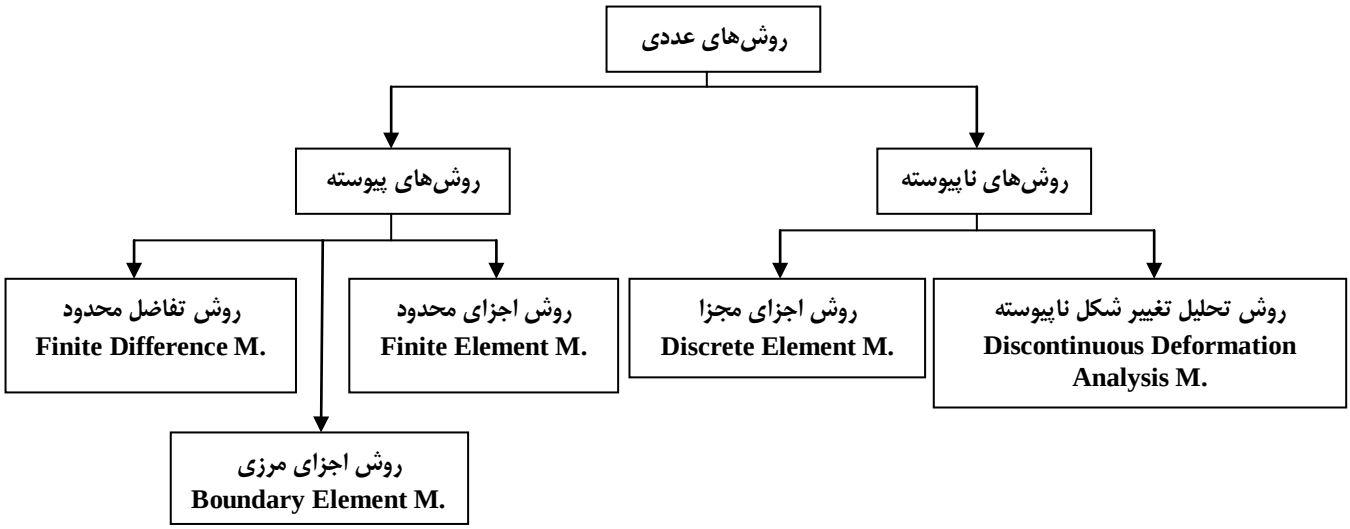
۲-۱- آشنایی

روش‌های عددی در علوم به ویژه علوم مهندسی رشد چشم‌گیری داشته است. در مسایل ژئومکانیکی معدن نیز روش‌های عددی متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فصل روش‌های عددی پرکاربرد در عرصه معدنکاری و ژئومکانیک معرفی شده و مختصری در رابطه با هر روش، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها بیان شده است. به طور کلی اهداف اصلی مدلسازی عددی در مهندسی سنگ و معدنکاری را می‌توان به دو دسته کلی تحلیل‌های کمی و کیفی تقسیم‌بندی کرد.

در تحلیل‌های کیفی نتایج به صورت اعداد، ارقام و مقدار مطلق بیان نمی‌شود و تنها تغییرات کمیت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عنوان مثال تحلیل‌های پارامتری حساسیت از این نوع تحلیل‌ها هستند.

در تحلیل‌های کمی نتایج به صورت اعداد، ارقام و مقدار مطلق بیان می‌شود به عنوان مثال روش‌های تحلیل طراحی و تحلیل برگشتی از این نوع هستند. در تحلیل برگشتی از داده‌های اندازه‌گیری شده در حین اجرا استفاده شده و بر اساس تغییرات پارامترها مانند جابه‌جایی و تنش، خواص مکانیکی محیط برآورد می‌شود.

روش‌های عددی پرکاربرد در طراحی‌های مهندسی سنگ را به دو دسته کلی روش‌های پیوسته و ناپیوسته تقسیم‌بندی می‌کنند. جزییات این تقسیم‌بندی در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. علاوه بر موارد گفته شده، روش‌های ترکیبی نیز وجود دارد که ترکیبی از دو یا چند روش عددی است که با هدف رفع نقایص روش مربوطه و تکمیل آن با روش دیگر ارایه شده است.



شکل ۲-۱- روش‌های عددی متداول در طراحی‌های ژئومکانیکی و مهندسی سنگ

۲-۲- روش اجزای محدود

در روش اجزای محدود، مدل به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود و در صورت لزوم ناپیوستگی‌ها به صورت مجزا و به تعداد محدود با المان‌های خاص به نام المان فصل مشترک شبیه‌سازی می‌شوند. محدوده مدل، یعنی زمین در برگیرنده، به تعداد محدودی المان تقسیم می‌شود که از طریق نقاط گرهی در گوشه‌های المان‌ها به هم متصل هستند (شکل۲-۲). در روش اجزای محدود، ارتباط هندسی و فیزیکی بین تمام المان‌های یک مدل به صورت یک مساله ریاضی با معادلات ماتریسی انجام می‌شود. فرم کلی معادلات ماتریسی به صورت رابطه ۲-۱ است:

omoorepeyman.ir

$$[K][D]=[F] \qquad (۱-۲)$$

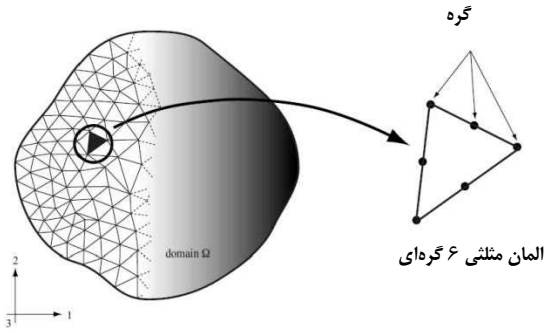
که در آن:

K ماتریس سختی

D ماتریس جابه‌جایی (مجهول مساله)

F ماتریس بارهای وارده

این ماتریس برای تک تک المان‌ها تشکیل و در نهایت ماتریس کلی مدل تشکیل می‌شود و حل کل محاسبات به صورت هم‌زمان انجام می‌شود.



شکل ۲-۲- مدل پیوسته، تقسیم‌بندی مدل به المان‌های محدود

۲-۲-۱- مزایا

الف- قابلیت شبیه‌سازی شرایط پیچیده هندسی و رفتاری در سازه‌های سطحی و زیرزمینی

ب- قابلیت شبیه‌سازی مدل‌های رفتاری پیشرفته و تابع زمان در اجرای پروژه‌های معدنی و عمرانی

۲-۲-۲- محدودیت‌ها

الف- حل مسایل با هندسه و شرایط مرزی پیچیده به دلیل بزرگ شدن ماتریس سختی مدل، نیاز به استفاده از ابرکامپیوترها دارد.

ب- اکثر برنامه‌های اجزای محدود نیاز به داشتن تجربه و دانش کافی در مورد کامپیوتر و مبانی روش عددی متناظر دارد.

پ- مرزهای مدل ساخته شده در این روش‌ها باید به اندازه کافی دور از محدوده تغییرات انتخاب شود تا کمترین تاثیر را بر روی تحلیل بگذارد. همین امر باعث می‌شود که ماتریس سختی و حافظه مورد نیاز برای تحلیل مساله زیاد شود که زمان اجرای برنامه را بالا می‌برد.

۲-۳- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود شبیه به روش اجزای محدود است، از این جهت که کل مدل مورد تحلیل به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده و مدل به تعدادی المان تقسیم می‌شود که از طریق گره‌ها به هم متصل هستند (شکل ۲-۳). یکی از تفاوت‌های این

omoorepeyman.ir

روش با روش المان محدود در شکل المان‌های مورد استفاده است که در روش تفاضل محدود المان‌های چهارگوش منظم استفاده می‌شود ولی در روش اجزای محدود المان با شکل‌های متنوع‌تری قابل استفاده است. در روش اجزای محدود ماتریس سختی تشکیل می‌شود بنابراین برای تحلیل مسایل پیچیده به دلیل افزایش ابعاد ماتریس سختی تحلیل مشکل است. در روش تفاضل محدود ماتریس سختی تشکیل نمی‌شود بنابراین برای حل مسایل پیچیده قابل استفاده است.

۲-۳-۱- مزایا

الف- حل صریح تابع زمان و عدم نیاز به تشکیل ماتریس سختی، ارزیابی رفتار محیط در برگیرنده را تسریع می‌کند. این ویژگی یک تحلیل گام به گام برای دستیابی به مکانیزم شکست را ممکن می‌کند.

ب- چون ماتریسی برای حل تشکیل نمی‌شود از کامپیوترهای متداول می‌توان استفاده کرد.

پ- امکان تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ بدون محاسبات اضافی در حل غیرماتریسی وجود دارد.

ت- به دلیل استفاده از یک الگوریتم تابع زمان برای تحلیل‌های دینامیکی این روش بسیار مناسب و کارآمد است.

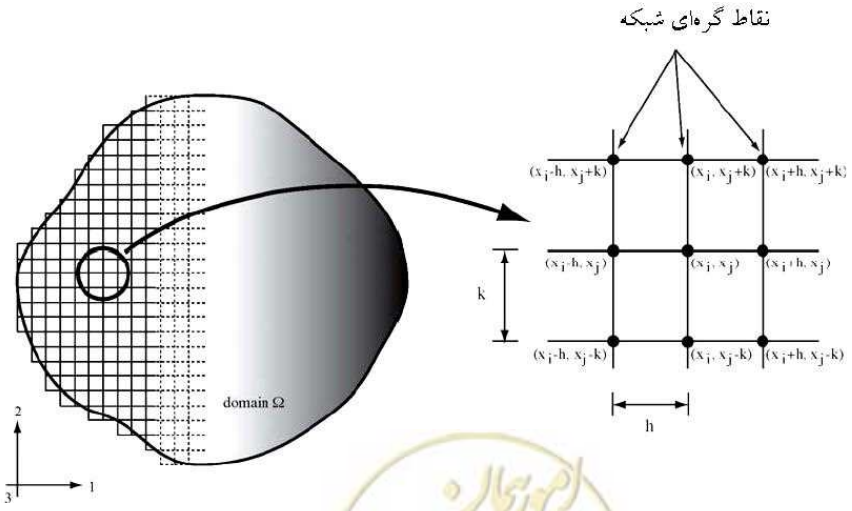
۲-۳-۲- محدودیت‌ها

الف- اگر برای مسایل استاتیکی مورد استفاده قرار گیرد در بیشتر موارد زمان محاسبات بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برای حل نیاز دارد.

ب- در این روش برای المان‌بندی تنها از المان‌های با شکل منظم چهارگوش می‌توان استفاده کرد، به همین دلیل در حل مسایل با هندسه منحنی شکل، دقت المان‌بندی و یکنواختی آن کاهش می‌یابد.

پ- دقت محاسبات به گام زمانی در اجرای برنامه بستگی دارد.

ت- در شبیه‌سازی مدل با مصالح مختلف به ویژه مصالح با اختلاف ویژگی‌های مکانیکی زیاد در پارامترهای ورودی ضعیف است.

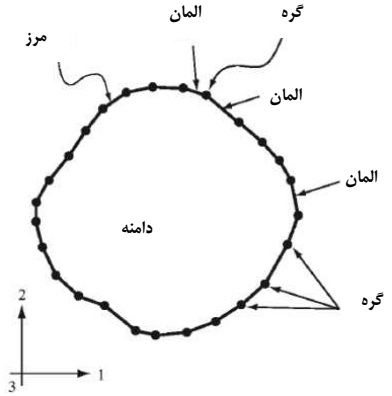


شکل ۲-۳- شبکه تفاضل محدود به صورت دو بعدی

omoorepeyman.ir

۲-۴- روش اجزای مرزی

روش اجزای مرزی نیز مانند روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود جزو دسته روش‌های پیوسته هستند، با این تفاوت که در دو روش بیان شده قبلی محدوده داخلی مدل المان‌بندی می‌شود، ولی در روش اجزای مرزی تنها مرزهای مدل المان‌بندی می‌شود (شکل ۲-۴). در اصل در روش اجزای مرزی محاسبات عددی، محدود به مرزهای مدل است و برخلاف روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود مساله با انتگرال‌گیری معادلات دیفرانسیل جزیی حل می‌شود. به همین دلیل به روش انتگرالی نیز معروف است.



شکل ۲-۴- مثالی از المان‌بندی در مدل دو بعدی اجزای مرزی

۲-۴-۱- مزایا

الف- سیستم معادلات مساله در این روش در مقایسه با روش اجزای محدود و تفاضل محدود کوچکتر و ساده‌تر است و نیاز به حافظه کامپیوتری در این روش کمتر است.

ب- داده‌های ورودی و خروجی در مقایسه با دیگر روش‌ها ساده‌تر و حل آن‌ها سریع‌تر انجام می‌شود. این روش، به دلیل حل دقیق خود در مسایل دو بعدی و سه بعدی که شرایط مرزی ساده‌ای دارند بسیار کارآمد است.

پ- برای مسایل دینامیکی روش مناسبی است.

۲-۴-۲- محدودیت‌ها

الف- برای شبیه‌سازی محیط‌ها با مدل‌های رفتاری غیرخطی، هندسه نامنظم و شرایط مرزی پیچیده چندان کارآیی ندارد.

ب- تئوری روش پیچیده و مشکل است.

۲-۵- روش اجزای مجزا

در مقایسه با روش‌های پیوسته یاد شده، در روش اجزای مجزا محیط به صورت یک مدل پیوسته در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا که به وسیله ناپیوستگی‌ها از هم جدا شده‌اند، مشخص می‌شود. روش اجزای مجزا در مقایسه با روش‌های یاد شده جدیدتر است و اغلب در تحلیل مسایل محیط‌های دارای شکستگی و بلوکی به کار می‌رود. نکته اساسی در روش اجزای مجزا این است که دامنه مدل مورد بررسی به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌ها و دیسک‌های صلب یا شکل‌پذیر (شکل ۲-۵)

omoorepeyman.ir

رفتار می‌کنند که تماس بین آن‌ها باید در حین تغییرات در مدل و حرکت بلوک‌ها/دیسک‌ها تشخیص و به صورت مداوم به روز شود.

۲-۵-۱- مزایا

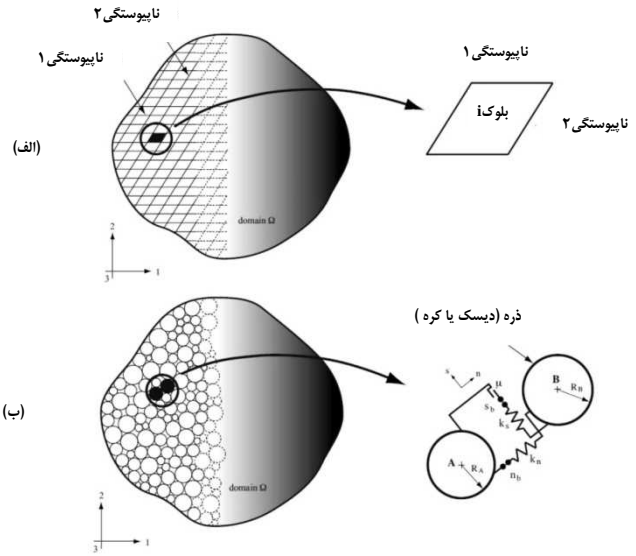
الف- این روش برای مطالعات سینماتیکی سیستم بلوکی بزرگ مناسب است، به بیان دیگر در یک توده درزه‌دار و بلوکی لغزش و حرکت در امتداد ناپیوستگی‌ها امکان‌پذیر است.

ب- حرکت بلوک‌های قابل شبیه‌سازی در این روش در مقایسه با روش‌های پیوسته بسیار بزرگتر است و همچنین در این روش امکان مدلسازی حرکت چرخشی و جدایش بلوک‌ها نیز وجود دارد.

۲-۵-۲- محدودیت‌ها

الف- برای انجام محاسبات، داده‌های ورودی زیادی از جمله ویژگی‌های مقاومتی و هندسی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها مورد نیاز است. عدم قطعیت در محاسبه این ویژگی‌ها دقت خروجی‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

ب- در مسایل با هندسه بزرگ که تعداد ناپیوستگی‌ها زیاد و فاصله‌داری کم است، تعداد بلوک‌های متعددی با ابعاد متفاوت ایجاد می‌شود. در این قبیل مسایل اجرای برنامه کند است و اغلب زمان تحلیل نامحدود می‌شود. به همین دلیل توصیه می‌شود که دسته‌درزه‌های اصلی و ناپیوستگی‌های تاثیرگذار در مکانیزم ناپایداری مدلسازی شود.



شکل ۲-۵- المان‌بندی در یک دامنه فرضی در روش (الف) اجزای مجزا و (ب) روش ذرات به هم متصل

۲-۶- روش‌های ترکیبی

هر یک از روش‌های عددی ذکر شده محدودیت‌هایی دارند. بنابراین برای بالا بردن میزان کارآیی و بازدهی هر روش، می‌توان آن را با روش دیگری ترکیب کرد. ترکیب روش‌های عددی با دو هدف انجام می‌شود. اول اینکه در عین حالیکه محدودیت‌های آن‌ها با روش دیگر پوشش داده می‌شود توانایی هر روش محفوظ می‌ماند. دوم اینکه، ترکیب دو روش و مدل‌های متناظر آن‌ها در نهایت مدلی را ایجاد می‌کند که توانایی شبیه‌سازی نزدیک‌تر به وضعیت واقعی را دارد. ترکیب‌های مهم و کاربردی روش‌های عددی

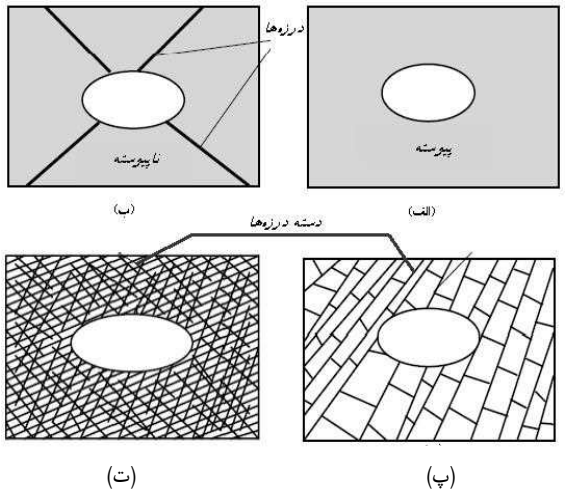
omoorepeyman.ir

عبارتند از اجزای مرزی–اجزای محدود (BEM/FEM)، اجزای مجزا–اجزای محدود (DEM/FEM) و اجزای مجزا–اجزای مرزی (DEM/BEM). مدل‌های ترکیبی اغلب در مهندسی برای تحلیل جریان سیال و تنش–تغییر شکل در محیط‌های درزه‌دار به کار می‌روند.

۲-۷- مقایسه روش‌های عددی در توانایی‌ها و قابلیت‌های تحلیل

عمده‌ترین تفاوت بین روش‌ها، پیوسته و ناپیوسته بودن مدل و روش حل معادلات است. یکی دیگر از تفاوت‌های مهم در بین روش‌های عددی پرکاربرد، نحوه تقسیم محیط در برگیرنده به اجزا یا المان‌های کوچکتر است. انتخاب روش پیوسته یا ناپیوسته به بسیاری از فاکتورهای خاص مساله وابسته است، اما معمولا بر اساس مقیاس مساله و هندسه سیستم درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری آن‌ها تعیین می‌شود. در شکل ۲-۶ شرایط مناسب بودن روش‌های پیوسته و ناپیوسته بر اساس شدت درزه‌داری محیط سنگی در مسایل مهندسی نشان داده شده است. روش پیوسته برای توده سنگ بدون درزه و شکستگی یا با تعداد درزه‌های بسیار زیاد (در نظر گرفتن محیط و خواص معادل) به کار می‌رود. روش‌های ناپیوسته برای توده سنگ‌های درزه‌دار قابل استفاده است.

در جدول ۲-۱ مقایسه کلی بین روش‌های عددی، مزایا و محدودیت‌های هر روش، زمینه‌های کاربردی و نرم‌افزارهای مورد استفاده آن‌ها ارایه شده است.



شکل۲-۶- مناسب بودن روش‌های عددی مختلف برای یک حفریه در توده سنگ: (الف) روش پیوسته، (ب)روش پیوسته با المان‌های درزه و فصل مشترک یا روش اجزای مجزا (ناپیوسته)، (پ) روش ناپیوسته اجزای مجزا و (ت) روش پیوسته با خواص محیط معادل

omoorepeyman.ir

جدول ۲-۱- مقایسه روش‌ها در توانایی و قابلیت‌های تحلیل

نام روش	زمینه‌های کاربردی	مزایا	محدودیت‌ها	نرم‌افزارهای پرکاربرد
اجزای محدود FEM	– در محیطهای پیوسته و ناپیوسته (با تعداد کم ناپیوستگی) – تحلیل مسایل دینامیکی، هیدرولیکی و هیدرومکانیکی محیطهای پیوسته	– کارآیی مناسب در تحلیل مسایل با محیطهای پیوسته همگن یا ناهمگن با رفتار غیرخطی – قابلیت تحلیل محیطهای با هندسه پیچیده با مدل‌های رفتاری پیشرفته	– نیاز به کامپیوتر با قابلیت پردازش بالا برای مسایل پیچیده – نیاز به داشتن تجربه و دانش کافی از روش عددی متناظر در هنگام مدلسازی (نسبت به دیگر روش‌ها)	PLAXIS 2D PLAXSI 3D (Tunnel/Foundation) ABAQUS PHASE2
تفاضل محدود FDM	– در محیطهای پیوسته کارآیی بالایی دارند و در محیطهای ناپیوسته با تعداد کم ناپیوستگی‌ها و عدم تقاطع، نتیجه مناسبی به دست می‌آید.	– مناسب برای تحلیل محیطهای با رفتار غیرخطی – کارآیی مناسب در مدلسازی مسایل تابع زمان	– مش‌بندی فقط با المان‌های منظم چهارگوش انجام می‌گیرد، در هندسه‌های مورب دچار مشکل می‌شود. – وابستگی زیاد به انتخاب گام زمانی – زمان‌بر بودن در تحلیل‌های ساده استاتیکی نسبت به دیگر روش‌های عددی	WAVE FLAC 2D FLAC 3D
اجزای مرزی BEM	– در محیطهای ناپیوسته با پدیده‌های ساختاری کم، مثلا عبور تونل از یک گسل – محیطهای الاستیکی با هندسه ساده	– سادگی ساخت هندسه و مش‌بندی – نیاز به پارامترهای ورودی کم – حل دقیق‌تر در محیطهای با هندسه و شرایط مرزی ساده	– بازدهی نامناسب در تحلیل مدل‌ها با هندسه پیچیده و رفتار غیرخطی – در محیطهای ناهمگن و با مصالح مختلف کارآیی خوبی ندارد.	EXAMINE 2D EXAMINE 3D BEFE MAP 3D
اجزای مجزا DEM	– مدلسازی حفریات زیرزمینی و سازه‌های سطحی محیطهای درزه‌دار – مدلسازی محیطهای دینامیکی و هیدرومکانیکی در محیطهای ناپیوسته	– توانایی شبیه‌سازی دقیق محیطهای درزه‌دار و جدایش بلوک‌ها – درجه آزادی بیشتر بلوک‌ها و قابلیت مدلسازی چرخش و جدایش بلوک‌ها	– تعداد زیاد پارامترهای ورودی و عدم قطعیت در نتایج خروجی – پیچیدگی حل و امکان همگرا نشدن در مدل‌های بزرگ با تعداد ناپیوستگی‌ها و بلوک‌های بسیار زیاد	UDEC 3DEC PFC 2D/3D
تحلیل تغییر شکل ناپیوسته DDA	– دقت بیشتر تحلیل در مدلسازی محیطهای ناپیوسته و درزه‌دار – قابلیت تحلیل تغییر شکل درهندسه پیچیده ناپیوسته و با تماس‌های خاص – تحلیل محیطهای دینامیکی	– توانایی شبیه‌سازی دقیق‌تر محیطهای درزه‌دار در مقایسه با DEM – الگوریتم مناسب در تشخیص سطح تماس در بین بلوک‌ها	– عدم توسعه مناسب نرم‌افزارهای این روش	DDA 2D DDA 3D DDA-MANIFOLD DDA-BLAST

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۳

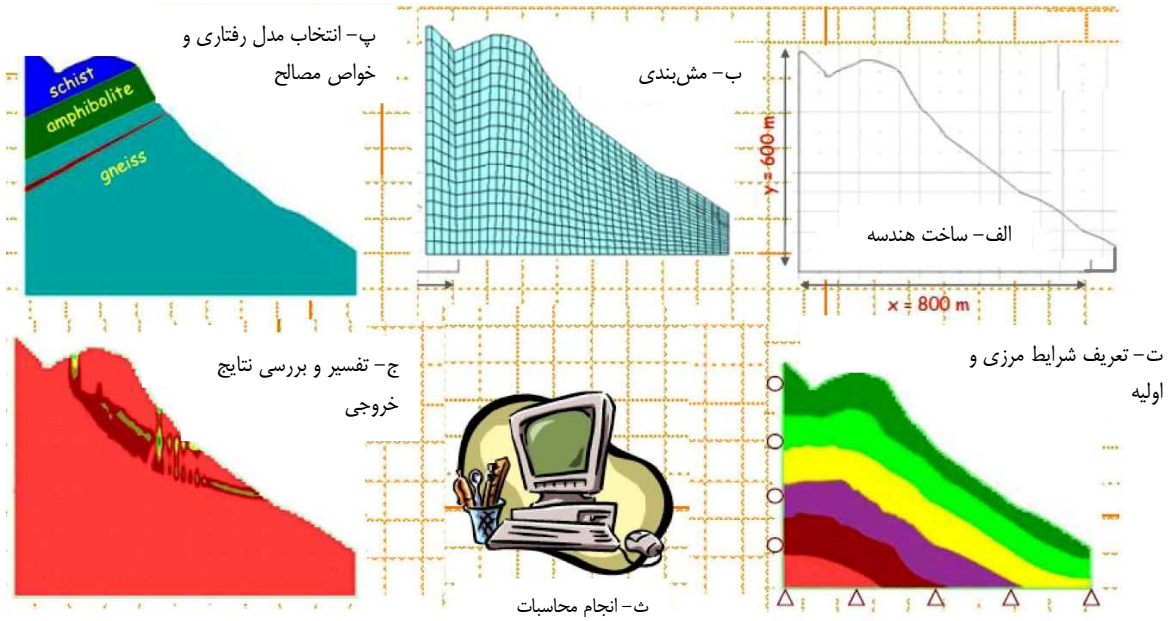
مراحل مدلسازی به منظور طراحی با روش‌های عددی

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۳-۱- آشنایی

در مورد هر مساله ژئومکانیکی، بر اساس روش‌های تحلیل و طراحی، یک سری قواعد و روند حل ویژه وجود دارد که باید متناسب با روش تحلیل به صورت گام به گام و منظم طی شود. در شکل ۳-۱ روند کلی حل یک مساله پایداری شیب به تفکیک مراحل انجام در یک نرم‌افزار عددی نشان داده شده است.



شکل۳-۱- روند حل عددی یک مساله نمونه ژئومکانیکی

۳-۲- تعریف هندسه مدل

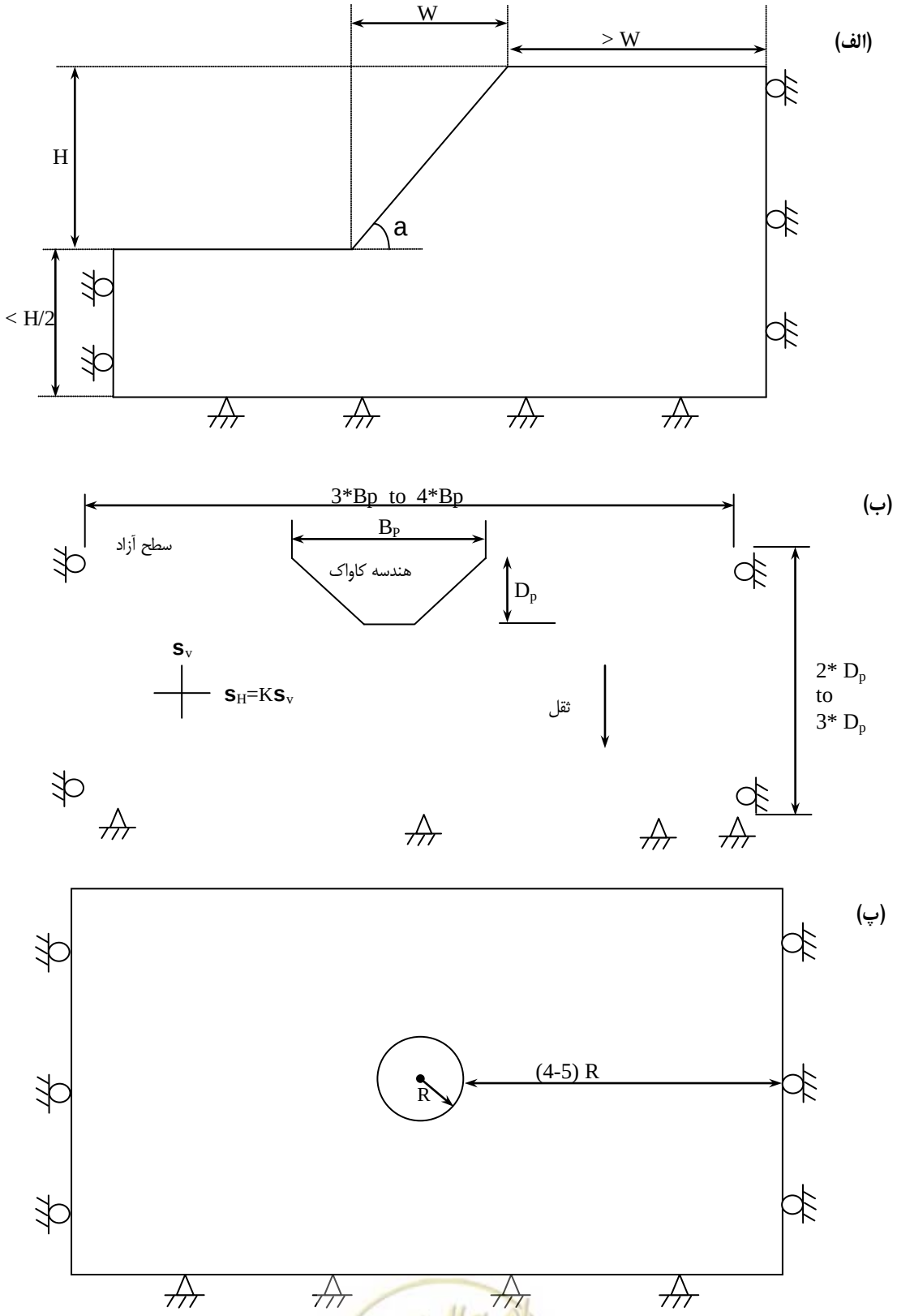
در حل یک مساله، اولین قدم انتخاب هندسه مساله است که باید در برگیرنده محدوده مورد مطالعه و عوامل هندسی تاثیرگذار در رفتار محیط باشد. هندسه مدل باید بیانگر فیزیک مساله بوده و به اندازه کافی گسترده باشد تا بتوان به کمک آن مکانیزم حاکم بر رفتار مساله و همچنین گسترش ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه مورد بررسی را پوشش داد. مدل باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که مرزهای آن خارج از محدوده تاثیر فعالیت‌های مهندسی قرار گیرد.

فاصله قرارگیری مرزهای مدل نسبت به منطقه ایجاد تغییرات، مثلا حفریه، شیروانی و نظایر آن نقش بسزایی در نتایج خروجی ایفا می‌کند. به عنوان یک برآورد کلی در شکل ۳-۲-الف، ابعاد مدل برای پایداری یک شیروانی، ۳-۲-ب، ابعاد مدل برای بررسی تحلیل یک کاواک و در شکل ۳-۲-پ، ابعاد پیشنهادی مدل برای تحلیل یک حفریه زیرزمینی پیشنهاد شده است.

۳-۳- انتخاب خصوصیات فیزیکی و پارامترهای مکانیکی واحدهای لیتولوژیکی

در مسایل ژئومکانیکی، شناخت ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی توده در برگیرنده که سازه روی یا درون آن ساخته می‌شود، بسیار حایز اهمیت است. در هر روش تحلیل پس از اینکه با بررسی نیروها و بارهای وارد بر محیط سنگی یا خاکی وضعیت تنش، کرنش و یا انرژی ذخیره شده پیش‌بینی شد، با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌توان رفتار سنگ و توده‌های سنگی، وضعیت پایداری، شکست و جابه‌جایی آن‌ها را برآورد کرد.

omoorepeyman.ir



شکل۳-۲- ابعاد پیشنهادی برای مدل‌های عددی در مسایل ژئومکانیکی، الف- ابعاد مینیمم و شرایط مرزی برای مدل تحلیل شیروانی، ب- ابعاد مدل، شرایط مرزی و تنش‌های برجا برای شبیه‌سازی یک کاواک، پ- ابعاد مدل برای تحلیل تونل زیرزمینی

omoorepeyman.ir

۳-۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی

ویژگی‌های فیزیکی مهم توده سنگ که اغلب در پروژه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند عبارت از تخلخل، چگالی، میزان رطوبت و شاخص‌های آماس، دوام و شکفتگی (پایداری در مقابل تر و خشک شدن)، نفوذپذیری و سرعت انتشار امواج در سنگ است. در اکثر روش‌های عددی از بین این خواص و ویژگی‌ها، مقادیر چگالی، نفوذپذیری و سرعت امواج در سنگ استفاده می‌شود.

۳-۳-۲- ویژگی‌های مکانیکی

ویژگی‌های مکانیکی سنگ شامل ویژگی‌های مقاومتی و شکل‌پذیری است که با توجه به ماهیت ناپیوسته و درزه‌دار بودن توده سنگ می‌توان دو رویکرد مختلف برای برآورد این خواص در نظر گرفت. اگر توده سنگ به عنوان یک محیط پیوسته مدلسازی می‌شود باید خواص معادل محیط شامل ماده سنگ و درزه‌ها برآورد شود. اگر توده سنگ به صورت ناپیوسته مدلسازی می‌شود، باید خواص ناپیوستگی‌ها در کنار خواص ماده سنگ معرفی شود. خواص مقاومتی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و خواص تغییر شکل‌پذیری شامل مدول دگرشکلی، ضریب پواسون، مدول حجمی و برشی برای توده سنگ و ماده سنگ و سختی‌های نرمال و برشی برای درزه سنگی است. در جدول ۳-۱ مشخصات یاد شده در مورد چند نمونه سنگ ارایه شده است.

جدول ۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی(در مقیاس آزمایشگاهی) برای چند سنگ نمونه

	چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	چسبندگی(MPa)	زاویه اصطکاک
ماسه سنگ	۲۰۰۰-۲۳۰۰	۱۹	۰/۳۸	۲۷	۲۸
سیلتستون	۱۹۵۰-۲۳۰۰	۲۶	۰/۲۲	۳۵	۳۲
آهک	۲۴۰۰-۲۷۰۰	۲۹	۰/۲۹	۳۹	۴۲
شیل	۲۲۱۰-۲۵۷۰	۱۱	۰/۲۹	۳۸	۱۴
مارن	۲۶۰۰-۲۷۰۰	۵۶	۰/۲۵	-	۲۰-۲۷
گرانیت	۲۶۵۰-۲۷۵۰	۷۴	۰/۲۲	۵۵	۵۱

۳-۴- تعیین شرایط مرزی حاکم بر مساله

در تحلیل‌های عددی مسایل ژئومکانیکی بخش کوچکی از زمین شامل محدوده مورد مطالعه و تغییرات حین اجرا در آن محدوده در نظر گرفته می‌شود. به منظور شبیه‌سازی محیط بینهایت و فیزیک واقعی مساله باید در مرزهای مدل شرایطی را فراهم کرد که نزدیک‌ترین حالت را با واقعیت طبیعی مساله داشته باشد. در روش‌های مختلف، مرزهای مدل عددی به یکی از سه روش کنترل با تنش، کنترل با جابه‌جایی و سرعت ثابت تعریف می‌شود. در روش‌های عددی، روش تنش ثابت (یا تعریف شده) و جابه‌جایی معین کاربرد بیشتری دارند. برای مدل‌های نزدیک سطح که تغییرات تنش کم است، در صورت استفاده از مرزهای تنش تعریف شده، باید گرادیان تنش نیز در نظر گرفته شود.

قبل از حل یک مدل عددی باید شرایط اولیه حاکم بر مساله تعریف شود. یکی از ورودی‌های مهم این بخش معرفی تنش‌های برجا در مدل است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا در توده سنگ وجود دارد که به دو دسته آزمون‌های مخرب و غیرمخرب تقسیم می‌شود. در آزمون‌های مخرب شرایط توده به هم می‌خورد که شامل ایجاد کرنش، تغییر شکل، ایجاد ترک و افزایش بازشدگی است. روش‌های مخرب متداول شامل شکافت هیدرولیکی، مغزه‌گیری دوباره و جک تخت است. آزمون‌های غیرمخرب شامل روش‌هایی هستند که بر اساس مشاهدات رفتار سنگ و بدون دستکاری زیاد و تخریب توده سنگ، تنش اندازه‌گیری

omoorepeyman.ir

می‌شود. روش‌های غیرمخرب متداول شامل شکافت گمانه‌ای، شکست گمانه‌ای، روش‌های آکوستیک، تحلیل برگشتی، روابط تجربی و نظایر آن است.

۳-۵- انتخاب مدل رفتاری و معیار شکست مناسب

۳-۵-۱- مدل‌های رفتاری مصالح ژئومکانیکی

مدل‌های رفتاری بر اساس قوانین تئوری الاستیسیته، پلاستیسیته و تسلیم، به فرم رابطه‌ای بین مولفه‌های تنش و کرنش در یک جسم تعریف می‌شوند که گویای رفتار آن در حین بارگذاری و تغییر شکل است. تابع ریاضی عمومی مدل رفتاری به صورت رابطه ۳-۱ است.

$$f(\sigma, \in, \sigma', \in') = 0 \qquad (۱-۳)$$

که در آن:

σ مولفه تنش

σ' میزان تغییرات تابع زمان

$\in$ مولفه کرنش

$\in'$ تغییرات تابع زمان کرنش

در هنگام انتخاب مدل رفتاری برای تحلیل یک مساله ژئومکانیکی، باید به دو نکته زیر توجه داشت:

- چه ویژگی‌ها و خواصی از مواد در برگیرنده سازه مورد بررسی، معلوم و مشخص است؟
- هدف کاربردی از تحلیل چیست؟

بر اساس هدف تحلیل و همچنین پارامترهای موجود از توده در برگیرنده، می‌توان مدل رفتاری مناسب را انتخاب کرد. به طور کلی مدل‌های رفتاری پرکاربرد در زمینه ژئومکانیک را می‌توان به شش دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف- مدل‌های رفتاری الاستیک

مدل رفتاری الاستیک ساده‌ترین مدل رفتاری است که بیانگر رابطه خطی بین تنش-کرنش است. معروف‌ترین مدل الاستیک مدل هوک است. بارزترین مشخصه این مدل، نداشتن کرنش ماندگار (پلاستیک) و انرژی تلف شده، نیاز به ورودی کم و عدم توانایی در مدل کردن شکست در مصالح است. کاربرد عمده مدل‌های الاستیک در تحلیل‌های ساده و برآوردهای اولیه از هندسه مناسب مدل و شرایط مرزی است. در مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی مصالح پیوسته، ایزوتروپ و همسانگرد مانند سازه‌های صلب و بتنی نیز از این مدل رفتاری استفاده می‌شود.

ب- مدل‌های رفتاری الاستو-پلاستیک

مدل‌های رفتاری الاستو-پلاستیک دو بخشی هستند، یعنی در بخش قبل از نقطه ماکزیمم مقاومت به صورت الاستیک و بعد از آن به صورت پلاستیک کامل هستند. تفاوت این مدل‌ها با مدل‌های الاستیک قابلیت مدلسازی شکست مواد است. در این مدل‌ها تا قبل از نقطه شکست، رفتار کاملا الاستیک است و بلافاصله بعد از نقطه شکست تنش در یک سطح ثابت می‌ماند و پیوسته کرنش افزایش می‌یابد. معروف‌ترین مدل رفتاری الاستو-پلاستیک، مدل موهر-کولمب است که در بیشتر تحلیل‌های عددی از آن استفاده

omoorepeyman.ir

می‌شود. این مدل رفتاری بر اساس معیار شکست موهر-کولمب ($\tau = C + \sigma_n \tan\varphi$) توسعه یافته است. پارامترهای ورودی آن، مدول دگرشکلی (E)، ضریب پواسون (υ)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (φ) و زاویه اتساع (y) است که با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند.

پ- مدل‌های رفتاری کرنش-نرم‌شوندگی[1]

در بین مدل‌های رفتاری این مدل شباهت بیشتری به رفتار تنش-کرنش واقعی سنگ دارد، یعنی بعد از نقطه ماکزیمم مقاومت، افت تنش را نشان می‌دهد و میزان تحمل تنش نمونه با افزایش کرنش‌های پلاستیک کمتر می‌شود. از زمینه‌های کاربردی این مدل رفتاری می‌توان به مطالعه رفتار بعد از شکست سنگ در پروژه‌های شامل ریزش و شکست پیشرونده، تسلیم شدن لنگه‌های معدنی و تخریب سقف اشاره کرد که در آن‌ها در عین حالی که توده به شکست رسیده است ممکن است پایداری نسبی داشته باشد.

ت- مدل‌های رفتاری کرنش-سخت‌شوندگی[2]

در این مدل رفتاری بعد از نقطه اوج، با افزایش کرنش پلاستیک، ظرفیت بارپذیری جسم افزایش می‌یابد. در این مدل‌ها نکته مهم تعریف تابع (قانون) سخت‌شوندگی است که تغییرات تنش را با افزایش سطح کرنش پلاستیک نشان می‌دهد. این مدل رفتاری بیشتر در محیط‌های خاکی و سازندهای نمکی و همچنین در شرایطی که فشار محصورکننده زیادی بر محیط حاکم باشد، قابل استفاده است. در محیط‌های سنگی سخت و ترد چندان قابل استفاده نیست.

ث- مدل‌های رفتاری تابع زمان (ویسکوپلاستیک)

بعضی مواد مهندسی، رفتاری تابع زمان دارند یعنی با گذشت زمان تغییرات تنش، کرنش و جابه‌جایی در مواد ایجاد می‌شود. در توده‌سنگ‌های لهیده و تورمی این رفتار زیاد مشاهده می‌شود. سنگ‌های رسوبی تبخیری و نمک‌ها نیز رفتاری تابع زمان دارند که برای شبیه‌سازی آن‌ها باید از مدل‌های رفتاری تابع زمان استفاده کرد.

ج- مدل‌های رفتاری درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها

برای شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها و دیگر عوارض ساختاری زمین‌شناسی، در روش‌های عددی پیوسته از المان فصل مشترک استفاده می‌شود. در نرم‌افزارهای ناپیوسته به دلیل وجود الگوریتم مکانیک تماس قوی و سیستم بلوکی، نیاز است که مدل رفتاری مجزایی برای درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها تعریف شود. پایه و فرمول‌بندی اولیه بیشتر این مدل‌ها بر اساس مدل رفتاری موهرکولمب است. از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به مدل لغزش کولمب و مدل بارتن- بندیس اشاره کرد که در مقایسه با دیگر مدل‌ها کارآیی بیشتری دارند.

۳-۵-۲- نحوه انتخاب مدل رفتاری مناسب

هر مساله باید در ابتدا با ساده‌ترین مدل‌های رفتاری مورد تحلیل قرار گیرد. در بیشتر حالت‌ها مدل رفتاری الاستیک یا در موارد پیچیده‌تر استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب توصیه می‌شود.

یکی از نکات مهم در انتخاب مدل رفتاری، میزان سطح تنش وارده در مواد مورد بررسی است. در پروژه‌هایی که سطح تنش وارده خیلی کمتر از مقاومت توده سنگ است، مثلا در شیب‌های کوتاه و تونل‌های کم عمق در محیط‌های سنگی، تفاوت چندانی بین

1- Strain-softening
2- Strain-hardening

omoorepeyman.ir

پیش‌بینی مدل‌های رفتاری مختلف نخواهد بود، بنابراین استفاده از مدل‌های ساده الاستیک و الاستوپلاستیک دقت مناسبی خواهند داشت.

در حفریات زیرزمینی به دلیل افزایش سطح تنش وارده به ویژه در مناطق با تمرکز تنش بالا مانند محل تقاطع‌ها، لنگه‌های معدنی و کارگاه‌های جبهه‌کار بلند ممکن است به توده سنگ تنشی بیش از مقاومت حداکثر وارد شود، بنابراین استفاده از مدل‌های رفتاری کرنش نرم‌شوندگی توصیه می‌شود. اما در حفریات متداول مانند تونل‌ها و چاه‌ها استفاده از مدل رفتاری موهر–کولمب نیز جواب‌های نسبتا مناسبی ارایه می‌کند.

با توجه به جنس توده در برگیرنده و رفتار آن در پایداری دراز مدت سازه‌های زیرزمینی و روباز معدنی، به ویژه در سازندهای نمکی و سنگ‌های رسی، تحلیل تابع زمان مساله با مدل‌های رفتاری مرتبط با آن توصیه می‌شود.

۳-۵-۳- معیارهای تجربی شکست

وضعیت تنش در هر نقطه از یک جسم را می‌توان بر حسب سه تنش اصلی σ_1، σ_2 و σ_3 مشخص کرد که در آن رابطه $\sigma_1 \prec \sigma_2 \prec \sigma_3$ برقرار است. مجموعه مقادیری از σ_1، σ_2 و σ_3 که به ازای آن شکست در یک جز از جسم رخ می‌دهد به وسیله یک نقطه در فضای مختصاتی σ_1، σ_2 و σ_3 مشخص می‌شود. مجموعه چنین نقاطی رویه شکست را تعیین می‌کنند. یعنی:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \qquad (۲-۳)$$

چنین رابطه‌ای را یک معیار شکست می‌نامند. در مهندسی مکانیک سنگ معیارهای تجربی و تحلیلی متعددی ارایه شده است که پرکاربردترین آن‌ها معیار شکست هوک–براون و موهر–کولمب است که هم برای ماده سنگ و هم برای توده سنگ ارایه شده است. یکی از زمینه‌های کاربردی معیار هوک–براون و موهر–کولمب در برآورد ویژگی‌های توده سنگ در اختیار داشتن رده‌بندی GSI توده سنگ و چند پارامتر ساده دیگر است که بر اساس آن می‌توان پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ را تخمین زد.

omoorepeyman.ir

فصل ۴

معیارهای انتخاب روش‌های عددی در مسایل ژئومکانیکی معادن

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۴-۱- آشنایی

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در تحلیل و طراحی مسایل ژئومکانیکی در سال‌های گذشته پایه‌گذاری و توسعه نرم‌افزارهای متعدد بر پایه روش‌های عددی مختلف بوده است که قابلیت شبیه‌سازی جنبه‌های مختلف تغییر شکل و شکست در پروژه‌های اجرا شده در محیط‌های مختلف را دارند. نکته مهم در نظر گرفتن معیارهایی برای انتخاب مناسب آن‌ها در مسایل ژئومکانیکی معدن است.

در این فصل دستورالعمل انتخاب و انجام یک مدلسازی عددی مناسب ارایه شده است. مدل عددی نباید تنها به عنوان یک "پردازنده منفعل" در نظر گرفته شود به طوری که تنها یک سری داده ورودی گرفته و از طرف دیگر خروجی‌هایی از رفتار سیستم ارایه کند. مدل عددی هر مساله ژئومکانیکی باید به دقت و با علم کامل به الگوریتم نرم‌افزار و روش عددی متناظر آن ساخته شود و همچنین برای درک کلی مکانیزم حاکم بر رفتار مساله مدل‌های متعددی اجرا شود.

۴-۲- الگوریتم اجرای مدل‌های عددی

روند کلی انجام یک تحلیل عددی در مسایل ژئومکانیکی معادن مطابق روندنمای نشان داده شده در شکل ۴-۱ است. در مرحله اول باید مساله پیش رو به خوبی شناخته شده و انتظارات از تحلیل با جزییات کامل تعیین شود. بر اساس زمین‌شناسی منطقه، هندسه مساله و اهمیت تحلیل (پیوسته، ناپیوسته یا دو بعدی و سه بعدی) تعیین می‌شود.

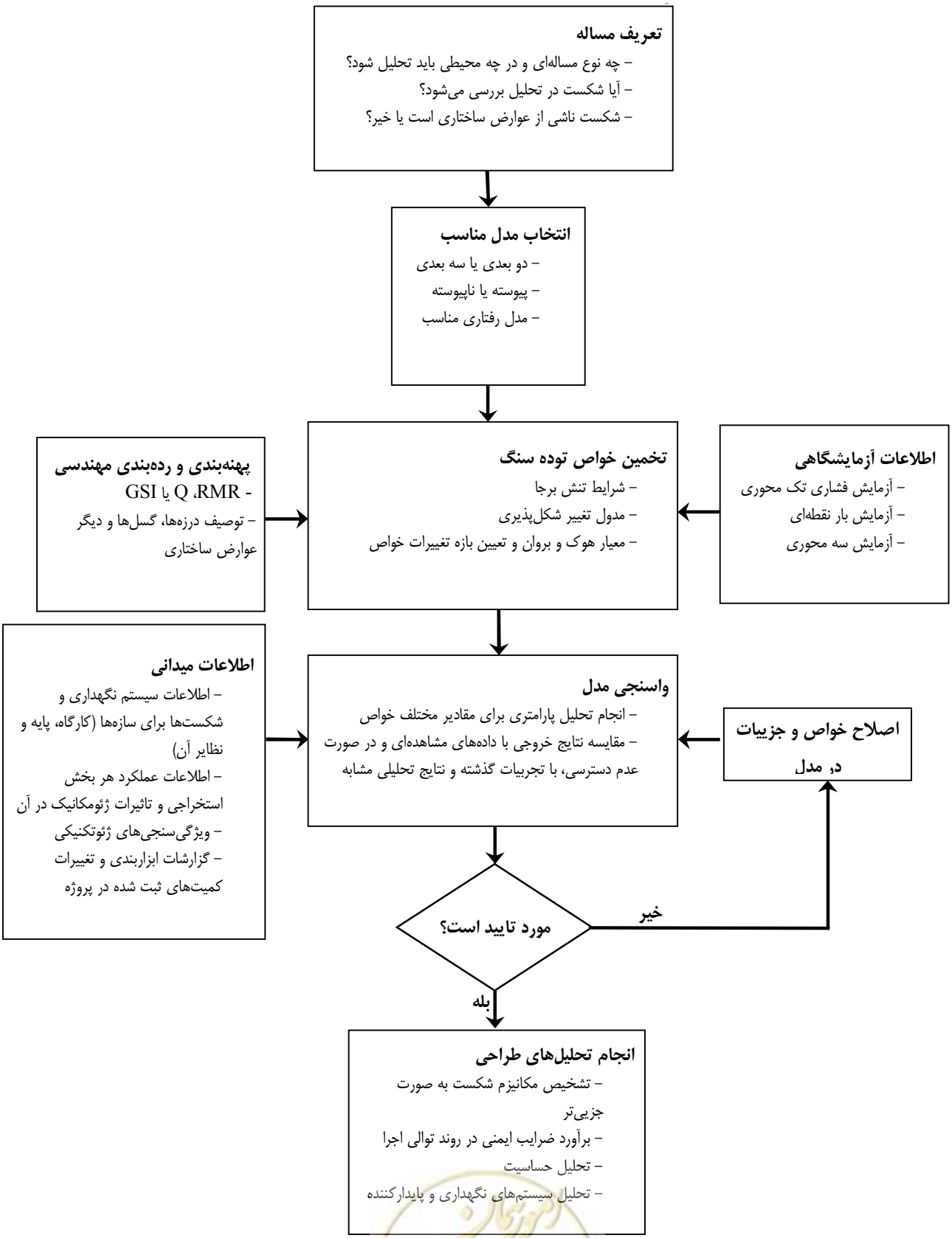
برای تعیین پارامترهای ورودی مدل، یک ارزیابی میدانی ژئومکانیکی دقیق از توده سنگ در برگیرنده محدوده مورد مطالعه لازم است. در صورت لزوم باید منطقه از نظر خواص ژئومکانیکی پهنه‌بندی شود.

برای واسنجی (کالیبره کردن) و اعتبارسنجی مدل می‌توان نتایج را با داده‌های مشاهده شده (مناطق ناپایدار، حجم ریزش و سطح شکست) و ابزاربندی‌ها (در صورت وجود) مقایسه کرد. مدل باید قابلیت پیش‌بینی مکانیزم کلی و عمومی ناپایداری در مساله را داشته باشد و مناطق با پتانسیل خطر بالا و مناطق ایمن را با ارایه ضریب اطمینان مناسب مشخص کند. در جدول ۴-۱ راهنمای کلی مدلسازی به صورت گام به گام ارایه شده است.

جدول ۴-۱- گام‌های اجرای یک مدل عددی در ژئومکانیک

گام	شرح
گام ۱	تعریف اهداف مورد نظر از تحلیل مدل عددی
گام ۲	ایجاد یک تصویر کلی و مفهومی از فیزیک مساله مورد مطالعه
گام ۳	ساخت و اجرای مدل‌های ایده‌ال و ساده شده از مساله مورد مطالعه
گام ۴	گردآوری اطلاعات و داده‌های مرتبط با مساله مورد مطالعه
گام ۵	تهیه مدل‌های متعدد با اطلاعات جزیی‌تر از مساله مورد مطالعه
گام ۶	اجرای مدل‌های متعدد و ثبت خروجی‌ها
گام ۷	بررسی نتایج خروجی، تفسیر آن‌ها و ارایه نتیجه نهایی

omoorepeyman.ir



شکل ۴-۱- الگوریتم کلی برای استفاده از مدل عددی در مسایل ژئومکانیکی معدن

omoorepeyman.ir

۴-۳- انتخاب روش عددی و نرم‌افزار مربوطه

در بسیاری از مسایل چندین روش و نرم‌افزار متناظر ممکن است برای تحلیل، مناسب تشخیص داده شود. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب بین آن‌ها معمولا بر اساس میزان تجربه و آشنایی طراح با روش‌های عددی و نرم‌افزار است. به عنوان مثال در طراحی یک تونل در محیط سنگی بدون ناپیوستگی‌های شاخص که فرض پیوسته بودن منطقی است، روش‌های پیوسته و نرم‌افزارهای متناظر آن‌ها مانند FLAC، Plaxis، Phase 2 و Abaqus قابل استفاده است که بسته به آشنایی طراح با هر یک از این نرم‌افزارها طراحی انجام می‌شود.

مدلسازی شرایط واقعی زمین بسیار مشکل است زیرا در مورد شرایط زیرسطحی توده در برگیرنده شامل خواص مواد و توزیع عوارض ساختاری عدم قطعیت‌های فراوانی وجود دارد. در مدلسازی مسایل به ویژه مسایل ژئومکانیکی معادن با داده‌های محدود، نیاز به ساده‌سازی‌هایی در روند مدلسازی است. ساده‌سازی‌ها در مدل واقعی، حالت‌های مختلفی دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- مدلسازی شرایط سه بعدی مساله با فرضیات دو بعدی (کرنش صفحه‌ای، تقارن محوری و تنش صفحه‌ای)
- مدلسازی محیط ناپیوسته به صورت محیط معادل پیوسته و یا محیط پیوسته با عوارض ساختاری اصلی
- استفاده از شرایط تقارن در مدل و یا مدلسازی در مقاطع دو بعدی مختلف برای تفسیر شرایط سه بعدی
- ساده‌سازی در روند مدلسازی اجرای پروژه و شرایط زمین

۴-۳-۱- مدل دو بعدی یا سه بعدی

توزیع میدان تنش و جابه‌جایی در مسایل فیزیکی عموما حالت سه بعدی دارد. بنابراین برای بررسی دقیق‌تر میدان تنش-تغییر شکل تحلیل‌های سه بعدی کارآیی بیشتری دارند و معمولا نتایج نزدیک به واقعیت ارایه می‌کنند. در مسایل ژئومکانیکی معادن عواملی وجود دارند که الزاما باید به صورت سه بعدی مدلسازی شوند و فرضیات دو بعدی برای آن‌ها صادق نیست. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

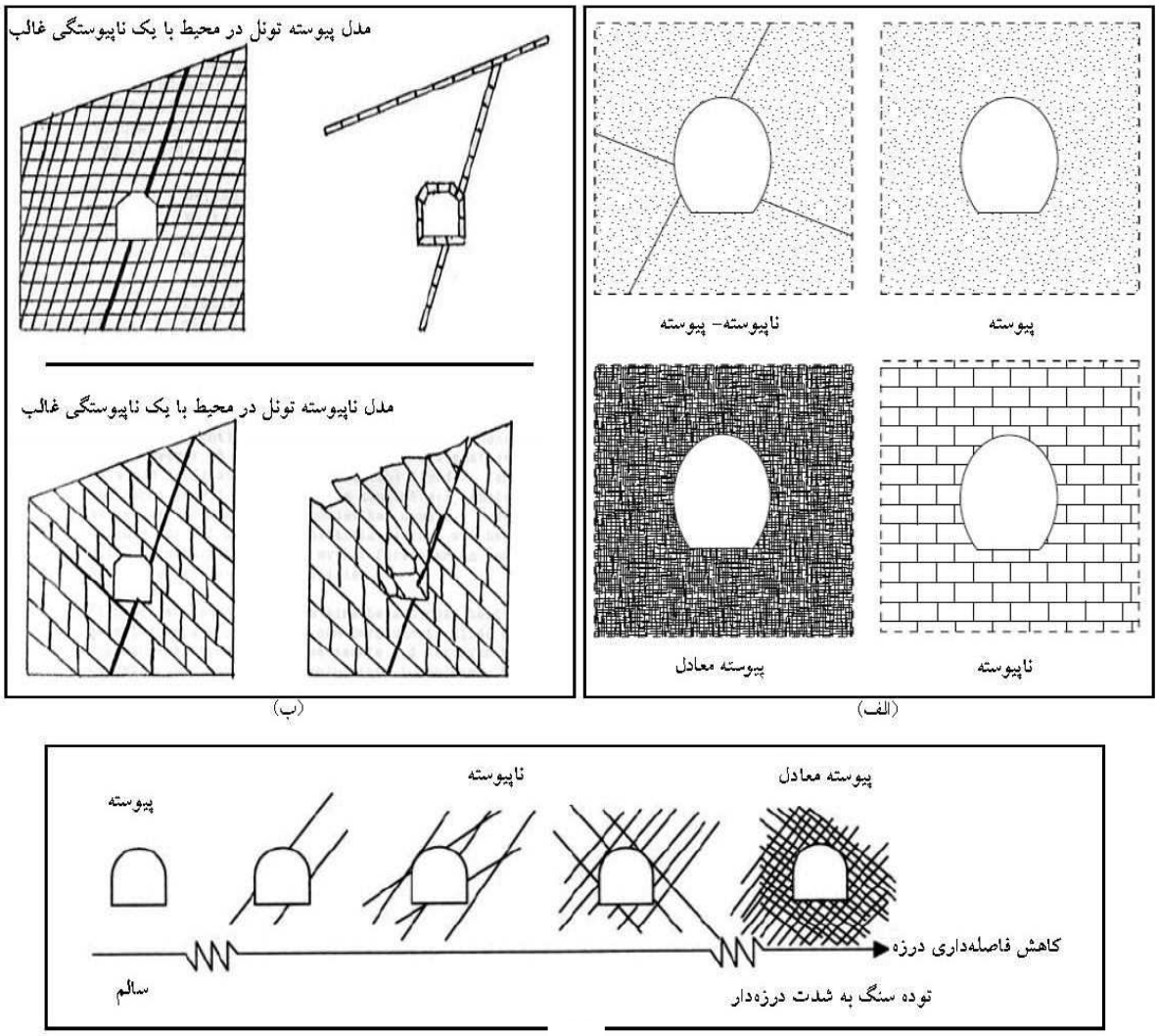
- مناطق نزدیک دهانه‌های تونل و ورودی کارگاه‌ها
- کاواک با هندسه نامنظم و انحنای متغیر
- لنگه‌های معدنی به ویژه در حالت شکل نامنظم
- انتهای دیواره‌ها و کارگاه‌ها
- جبهه‌کار تونل و کارگاه‌های استخراجی

در بعضی مسایل، تحلیل سه بعدی چندان لزومی ندارد. این مسایل شامل مواردی است که بتوان فرضیات ساده‌سازی دو بعدی (کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری) را در آن‌ها در نظر گرفت. از مهم‌ترین این مسایل می‌توان به پایداری شیب دیواره‌های بلند با تغییرات انحنا کم، تحلیل پایداری تونل در مقاطع با فاصله از جبهه‌کار، کارگاه‌های جبهه‌کار بلند، مقطع عرضی چاه‌ها و موارد مشابه اشاره کرد.

omoorepeyman.ir

۴-۳-۲- مدل پیوسته یا ناپیوسته

معیار انتخاب بین مدل پیوسته و ناپیوسته شدت درزه‌داری و ابعاد مساله مورد مطالعه است. به صورت کیفی محدوده بین مدل پیوسته و ناپیوسته برای مساله تحلیل تونل در شرایط توده سنگ مختلف پیشنهاد شده است (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲- بیان کیفی حد بین مدل پیوسته و ناپیوسته، الف-تقسیم‌بندی مدل پیوسته، ناپیوسته و انتخابی برای تحلیل تونل در محیط‌های مختلف، ب- مدل پیوسته و ناپیوسته تونل در محیط با یک ناپیوستگی غالب، پ- بیان کیفی تغییر محیط پیوسته، ناپیوسته و پیوسته معادل بر اساس کاهش فاصله‌داری درزه‌ها نسبت به ابعاد تونل

یکی دیگر از معیارهای مهمی که در این مورد وجود دارد فاکتور پیوستگی[1] است. این فاکتور (CF) به صورت نسبت قطر تونل (D_t) به قطر بلوک‌ها (D_b) تعریف می‌شود که نشان دهنده تعداد بلوک‌های موجود در سقف تونل است:

$$CF= D_t/D_b \qquad (۱-۴)$$

بر اساس فاکتور پیوستگی، تقسیم‌بندی زیر برای تعیین مرز محیط پیوسته و ناپیوسته ارایه شده است:

1- Contiuity factor (CF)

omoorepeyman.ir

– پیوسته–سالم: تعداد درزه کم یا فاصله‌داری بسیار زیاد، در حدود کمتر از ۶ بلوک (CF<6) در امتداد سقف یا دیواره حفریه

– ناپیوسته (بلوکی): توده سنگ با درزه‌داری کم تا زیاد که بلوک‌هایی با ابعاد گسترده با حجمی در حدود چند ده متر مکعب تا چند صد متر مکعب، بین حدودا ۳ تا ۳۰ بلوک در سقف یا دیواره حفریه (معادل با CF=3-30)

– پیوسته معادل: قطعات سنگی و ذرات ریز با پیوندهای ضعیف و سست، توده سنگ‌های به شدت درزه‌دار خرد شده، سنگ‌های رسوبی با سیمان‌شدگی کم. در این حالت محیط را می‌توان پیوسته در نظر گرفت. در این وضعیت بیش از ۱۵ بلوک در سقف حفریه وجود خواهد داشت (معادل با CF>15).

ابعاد بلوک برای بازه‌های متنوع پیوستگی و سه اندازه تونل در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲- محدوده تغییرات ابعاد بلوک در زمین به ازای فاکتورهای پیوستگی مختلف

فاکتور پیوستگی (CF)	مقدار(CF)	تغییرات در حجم بلوک (V_b)		
		D_t=2m	D_t=10m	D_t=50m
پیوسته (معادل)	> ۳۰	<۰٫۰۰۰۳ m^3 (<۰/۳dm^3)	<۰٫۰۴m^3	< ۵ m^3
ناپیوسته– پیوسته (بلوکی– معادل)	۱۵ –۳۰	۰٫۰۰۳ –۰٫۰۰۰۳ m^3 (۳–۰/۳dm^3)	۰٫۰۴ –۰٫۳ m^3	۵ –۴۰ m^3
ناپیوسته(بلوکی)	۶ –۱۵	۰٫۰۰۳ –۰٫۰۴ m^3 (۳–۴۰ dm^3)	۰٫۳ –۵ m^3	۴۰ –۶۰۰ m^3
پیوسته– ناپیوسته(سالم– بلوکی)	۳ –۶	۰٫۰۴ –۰٫۳ m^3	۵ –۴۰ m^3	۶۰۰ –۵۰۰۰ m^3
پیوسته (سالم)	< ۳	>۰٫۳ m^3	>۴۰ m^3	> ۵۰۰۰ m^3

با استفاده از رده‌بندی‌های RMR و GSI نیز می‌توان تا حدودی به پیوسته یا ناپیوسته بودن محیط پی برد (جدول ۴-۳).

جدول ۴-۳- رده‌بندی‌های RMR و GSI برای تعیین پیوسته یا ناپیوسته بودن محیط

پیوستگی	GSI or RMR
پیوسته	GSI or RMR >70
ناپیوسته	30<GSI or RMR<70
پیوسته معادل	GSI or RMR <30

در بحث انتخاب تحلیل پیوسته و ناپیوسته، طراح باید بر اساس هندسه مدل، شرایط زمین‌شناسی و ساختاری در مساله و پیش‌بینی اولیه در مورد مکانیزم حاکم در مساله (ناپایداری ساختار–کنترل‌کننده یا تنش–کنترل‌کننده) نوع تحلیل پیوسته یا ناپیوسته را انتخاب کند. مقایسه بین نتایج تحلیل‌های عددی پیوسته و ناپیوسته در یک مساله اهمیت هر روش را در مدلسازی و همچنین مکانیزم ناپایداری حاکم را مشخص می‌کند و در تحلیل‌های بعدی مساله به عنوان معیاری برای انتخاب بین مدل پیوسته یا ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود.

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

فصل ۵

کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن روباز

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۵-۱- آشنایی

در سال‌های گذشته با استخراج معادن نزدیک سطح بیشتر معادن روباز برای رسیدن به اعماق بیش از ۱۰۰۰ متر طراحی می‌شوند. انباشتگاه‌های حاصل از سنگ‌های باطله به ارتفاعی بیش از ۶۰۰ متر می‌رسند، سدهای باطله به ارتفاع بیش از ۲۰۰ متر توسعه می‌یابند و توده فروشویی به بیش از ۱۵۰ متر ارتفاع می‌رسند. این حرکت و جهش به سمت بلندتر، عمیق‌تر و پرشیب شدن سازه‌ها در کنار تجهیزات پیشرفته و بزرگ استخراج و تولید، نیاز به استفاده از روش‌های تحلیل و طراحی پیشرفته‌تر دارد. با پیشرفت علم کامپیوتر و روش‌های عددی، استفاده از این روش‌ها و نرم‌افزارهای مرتبط در تحلیل و طراحی ژئومکانیکی معادن روباز گسترش و مقبولیت زیادی بین مهندسان پیدا کرده است.

۵-۲- شناخت خصوصیات ژئومکانیکی

تخمین قابل قبولی از ویژگی‌های تغییر شکل‌پذیری و مقاومتی توده سنگ برای هر نوع روش تحلیلی که در طراحی معادن مورد استفاده قرار می‌گیرد باید انجام گیرد. استفاده از رده‌بندی‌های شاخص مانند GSI در مقایسه با دیگر معیارهای رده‌بندی مهندسی، به دلیل الگوی ساختاری مناسب و پارامترهای اندازه‌گیری صحرایی ساده، برای تخمین خواص توده سنگ کاربرد بیشتری دارد. به عنوان مثال نرم‌افزار Roclab برای محاسبه خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ بر اساس معیار هوک و براون و رده‌بندی GSI پایه‌گذاری شده است. یکی از نکات مهم دیگر در برآورد خواص، در نظر گرفتن تاثیر مقیاس و شرایط زمین‌شناسی است. ناپایداری‌ها به طور کلی ممکن است در خود توده سنگ یا در امتداد ناپیوستگی‌ها رخ دهند. در شکل ۵-۱ مفهوم کلی رده‌های مقاومت توده سنگ بر اساس مقیاس ناپایداری ارایه شده است. در تحلیل پایداری شیب‌ها باید مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها یا توده سنگ استفاده کرد.

۵-۳- تحلیل پایداری و طراحی دیواره‌های معادن روباز

طراحی زاویه شیب معادن روباز به دلیل افزایش عمق معدنکاری بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تغییرات اندک در زاویه شیب نهایی معادن نتایج قابل ملاحظه‌ای در اقتصاد کلی معدن و پایداری آن دارد. فاکتورهای مهم تاثیرگذار در طراحی دیواره عبارت از ارتفاع شیب، زمین‌شناسی، مقاومت توده سنگ، فشار آب زیرزمینی و روش آتشباری است. روش‌های طراحی شیب به چهار دسته کلی روش‌های تجربی، روش‌های تعادل حدی، روش‌های احتمالاتی و روش‌های عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدلسازی عددی به عنوان کارآمدترین روش، ویژگی‌های خاصی برای انجام تحلیل دارد که در ادامه شرح داده شده است.

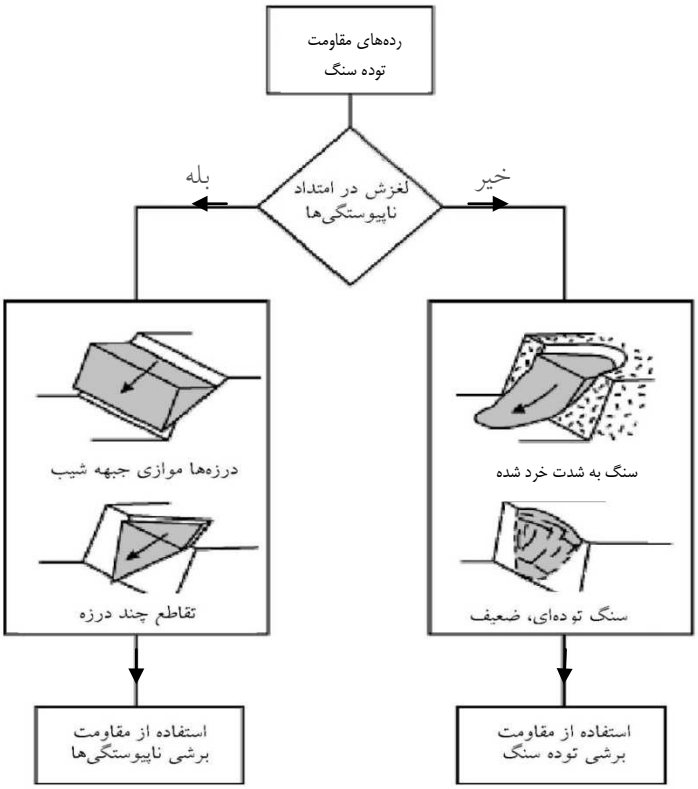
۵-۳-۱- تحلیل دو بعدی و سه بعدی دیواره

در ابتدای تحلیل مسایل شیب برای درک مکانیزم کلی ناپایداری، مدلسازی به صورت دو بعدی انجام می‌شود. به طور کلی در شرایط زیر تحلیل‌های سه بعدی توصیه می‌شوند:

- امتداد ساختارهای زمین‌شناسی اصلی که بیش از ۲۰ تا۳۰ درجه با امتداد دیواره اختلاف داشته باشد.
- زاویه محور ناهمسانگردی مواد با حالتی که با امتداد دیواره بیش از ۲۰ تا۳۰ درجه باشد.

omoorepeyman.ir

- جهت تنش‌های اصلی موازی یا عمود بر دیواره نباشند.
- توزیع واحدهای ژئومکانیکی در امتداد دیواره متغیر باشند.
- هندسه دیواره در نقشه به کمک تحلیل‌های دو بعدی و فرضیات کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری، قابل تحلیل نباشد.



شکل ۵-۱- رابطه بین ساختارهای زمین‌شناسی و رده‌های مقاومتی توده سنگ

۵-۳-۲- تحلیل پیوسته و ناپیوسته دیواره

گام بعدی در مدلسازی، تعیین روش پیوسته یا ناپیوسته برای تحلیل است. تمام مسایل تحلیل پایداری دیواره به نوعی شامل ناپیوستگی‌ها در مقیاس‌های مختلف هستند. زمانی که توده سنگ یکپارچه باشد و عوارض غالبی در توده سنگ نباشد فرض محیط معادل و تحلیل پیوسته، منطقی است. در صورت وجود عوارض ساختاری تاثیرگذار مانند گسل‌های متعدد و درزه‌های اصلی با تداوم طولی زیاد، تحلیل باید با روش‌های ناپیوسته انجام شود.

مدلسازی‌های پیوسته برای تحلیل پایداری در محیط‌های شامل توده سنگ یکپارچه و سالم، سنگ‌های ضعیف یکپارچه و توده سنگ‌های به شدت درزه‌دار با رفتار شبیه خاک به کار برده می‌شود. مدلسازی ناپیوسته برای تحلیل دیواره‌ها که رفتار آن‌ها با ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود کارآیی بهتری دارند.

۵-۴- تحلیل پایداری و طراحی شیب دیواره‌های بلند

با افزایش عمق معدنکاری در معادن روباز، ارتفاع دیواره‌ها زیاد می‌شود که در آن‌ها بحث پایداری و کنترل ایمنی معدن اهمیت خاصی دارد. در تحلیل پایداری دیواره‌های بلند نسبت به دیواره‌های کوتاه، فاکتورهای خاص دیگری مانند شرایط تنش در کاواک،

omoorepeyman.ir

تاثیرات فشار آب زیرزمینی و تنش موثر، شرایط زمین‌شناسی به ویژه وجود ساختارهای بزرگ‌مقیاس، هندسه کاواک و انحنای آن موثرند.

برای طراحی دیواره‌های بزرگ، به دلیل تنوع مواد با رفتارهای مختلف و عوارض ساختاری متعدد، داده‌های اندک و پیچیدگی‌های هندسی، عموما روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش تعادل حدی به دلیل الگوریتم محاسباتی ساده‌تر برای تحلیل‌های سریع و برآورد اولیه از پایداری دیواره‌های کوتاه بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. روند کلی حل در این روش‌ها بررسی نسبت نیروهای محرک به مقاوم در دیواره و برآورد ضریب ایمنی است. استفاده از این روش در محیط‌های پیوسته و بدون عوارض ساختاری و همچنین در دیواره‌های کم ارتفاع کاربرد گسترده‌ای دارد. از نقاط ضعف روش‌های تعادل حدی فرض صلب بودن المان‌ها، عدم در نظر گرفتن بحث تنش-کرنش و همچنین از پیش تعریف شدن سطح شکست است. از نرم‌افزارهای پرکاربرد دو بعدی بر پایه این روش می‌توان به نرم‌افزار Slide، Geo-Slope و از نرم‌افزارهای سه بعدی به نرم‌افزار CLARA و 3D-slope اشاره کرد.

استفاده از روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تعادل حدی در طراحی دیواره‌های بلند به دلیل اهمیت تنش‌های برجای بزرگ در محیط، ضرورت بیشتری دارد.

۵-۵- تحلیل پایداری انباشتگاه‌های (دپوهای) معدنی

انباشتگاه‌های معدنی به دلیل ماهیت نسبتا یکسان، به صورت محیط پیوسته فرض می‌شوند. برای تحلیل پایداری دیواره در این سازه‌ها، روش‌های طراحی دیواره‌ها که در بخش‌های قبل گفته شد (به ویژه روش‌های عددی و تعادل حدی) قابل استفاده است. با توجه به ماهیت این سازه‌ها مدلسازی عددی در این مواد عموما به صورت پیوسته انجام می‌شود. تحلیل مسایل پایداری دیواره در آن‌ها شباهت زیادی به تحلیل مسایل پایداری شیب در مکانیک خاک دارد. معمولا به دلیل ارتفاع نسبتا کم در خاکریز انباشتگاه‌های معدنی، نتایج روش‌های تعادل حدی و روش‌های عددی تفاوت چندانی با هم ندارند ولی با افزایش ارتفاع انباشتگاه‌ها بهتر است از مدلسازی‌های عددی استفاده شود.

بررسی تغییر شکل پی و ظرفیت باربری در پی انباشتگاه‌ها نیز اهمیت بالایی در طراحی آن‌ها دارد که بر اساس نوع شرایط زمین‌شناسی پی به صورت پیوسته یا ناپیوسته تحلیل می‌شود.

۵-۶- تحلیل پایداری سدهای باطله

پایداری شیب یکی از ملاحظات مهم در طراحی و اجرای تاسیسات ذخیره‌ای باطله و توده‌های فروشویی در معادن است. شباهت سدهای باطله به سدهای خاکی و سنگریزه‌ای (از نظر هندسه)، راهنمای مناسبی در روند مدلسازی و بررسی پایداری آن‌ها فراهم می‌کند. تفاوت بارز در تحلیل این سدها در خواص مواد درون سد است که در مورد سدهای باطله شامل مواد دانه‌ای باطله به صورت اشباع است. تحلیل‌ها عموما به صورت دو بعدی و پیوسته (مشابه سدهای خاکی و سنگریزه‌ای) و در مقاطع بحرانی، سد باطله با شیب و ارتفاع بیشتر انجام می‌شود.

در استفاده از ابزار عددی برای انجام تحلیل این سازه‌ها، انتخاب داده‌های ورودی مناسب اهمیت زیادی دارد. تعیین خصوصیات مقاومتی برای مواد باطله و گرفتن نمونه‌های دست نخورده از توده باطله بسیار پیچیده و مشکل است. انجام آزمون‌های برجا اعتبار

omoorepeyman.ir

بیشتری در این محیط‌ها دارند. آزمون‌های نفوذ مخروط (CPT) و برش پره از کاربردی‌ترین آزمون‌ها برای تخمین خواص مقاومتی در باطله‌ها به حساب می‌آید.

۵-۷- تحلیل و محاسبات جریان آب در معدن

بررسی شرایط آب زیرزمینی نقش مهمی در طراحی پایداری دیواره‌های معدنی دارد. در مناطق با آب و هوای بارانی که تغییر در سطح آب زیاد است، باید همیشه در طراحی‌ها، تغییرات سطح ایستابی لحاظ شود. بررسی میزان فشار آب باید در حالت‌های بحرانی، یعنی در زمان‌های اوج بارش و سطح آب زیرزمینی انجام شود.

در معادن روباز نصب پیزومترها برای تعیین سطح ایستابی و تغییرات آن استفاده بسیار زیادی دارد و می‌توان از نتایج آن‌ها برای تحلیل‌های پایداری دقیق‌تر استفاده کرد. در معادن روباز، گام اول در تحلیل هیدرولیکی و بررسی شدت جریان ورودی به کاواک، جمع‌آوری داده‌های آب‌زمین‌شناسی است که باید با پیشروی معدن، بخشی از این داده‌ها به روز شوند. بعد از جمع‌آوری داده‌ها، گام بعدی توسعه یک مدل آب‌زمین‌شناسی است که با پیشرفت علوم کامپیوتر و روش‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف می‌توان میدان جریان آب زیرزمینی در محدوده معدن را به صورت گرافیکی و واضح‌تر مشخص کرد. از نرم‌افزارهای مهم می‌توان به Seep W، Seep 2D and 3D، Fluent و Flow و نظایر آن‌ها اشاره کرد.

۵-۸- تحلیل تاثیر آب بر پایداری دیواره‌ها

تاثیر فشار آب در کاهش تنش موثر و مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها و نهایتا کاهش پایداری دیواره به خوبی شناخته شده است. برای بررسی تاثیر آب بر پایداری دیواره‌ها روش دقیق انجام تحلیل جریان هیدرولیکی کامل (به کمک معادلات هیدرولیکی) بر اساس توزیع فشارهای منفذی به همراه توزیع تنش‌های برجا است که به عنوان تحلیل‌های توامان هیدرومکانیکی مطرح می‌شود. انجام یک تحلیل هیدرومکانیکی در نرم‌افزارهای عددی متعدد، قابل اجرا است. در بحث تحلیل هیدرومکانیکی دو مفهوم نفوذپذیری معادل (در تحلیل پیوسته) و نفوذپذیری ناپیوستگی‌ها (در تحلیل ناپیوسته) مطرح است. در مورد مفهوم دوم، فقط درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها به عنوان مسیرهای جریان هیدرولیکی فرض می‌شوند.

نرم‌افزارهای عددی برای مدلسازی محیط‌های ناپیوسته با قابلیت انجام تحلیل‌های هیدرومکانیکی UDEC و 3DEC است و در محیط‌های پیوسته می‌توان از نرم‌افزارهایی نظیر FLAC 2D and 3D، ABAQUS و Plaxis استفاده کرد.

۵-۹- تحلیل تاثیر بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار بر پایداری دیواره‌ها

انفجار و لرزش‌های حاصل از آن در مقایسه با ساختارهای زمین‌شناسی و آب زیرزمینی، به دلیل قابلیت کنترل بهتر آن، تاثیر کمتری در ناپایداری دیواره‌های معادن دارند. عدم اجرای اصولی فرآیند انفجار، ممکن است منجر به آسیب‌های جدی شود. اصلی‌ترین آسیب ناشی از انفجار به دلیل ارتعاش و لرزه‌های آن است. تحلیل پایداری دیواره برای در نظر گرفتن لرزش‌های طبیعی یا مصنوعی با دو رویکرد تحلیل شبه‌استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود.

omoorepeyman.ir

۵-۹-۱- روند تحلیل شبه‌استاتیکی

در تحلیل شبه‌استاتیکی پایداری دیواره در مقابل بارهای دینامیکی زلزله، روش‌های تعادل حدی و عددی با در نظر گرفتن ضریب‌های شتاب افقی و قائم مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور افزایش ضریب اطمینان از ضریب شتاب قائم صرف نظر می‌شود و برای شتاب افقی ضرایبی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ شتاب جاذبه در جهت افقی در تحلیل‌ها انتخاب می‌شود. در مورد بارهای ناشی از انفجار، روند تحلیل شامل محاسبه حد لرزش مجاز بر اساس وزن خرج مورد استفاده در هر تاخیر است. محدوده مجاز ارتعاش در دیواره‌ها بر اساس سرعت ذره‌ای ماکزیمم بحرانی[1] (CPPV) بیان می‌شود. برای اطلاعات بیشتر به نشریه "راهنمای ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن سطحی" مراجعه شود.

۵-۹-۲- تحلیل دینامیکی

در تحلیل‌های دینامیکی روند مدلسازی مشابه تحلیل‌های شبه‌استاتیکی است ولی چند تغییر مهم باید لحاظ شود. صرف نظر از نوع روش عددی و نرم‌افزار مربوطه، تعریف ضرایب میرایی مواد (به عنوان خواص ورودی)، تعریف مرزهای جاذب در اطراف مدل به منظور جلوگیری از انعکاس و برگشت موج‌های منتشر شده و اعمال بار دینامیکی به صورت تاریخچه تنش، سرعت و شتاب به مدل، اصلی‌ترین تفاوت‌ها نسبت به تحلیل شبه‌استاتیکی هستند.

در بیشتر نرم‌افزارهای عددی از روش میرایی رایلی برای شبیه‌سازی پدیده میرایی موج در محیط استفاده می‌شود. در این روش دو پارامتر a و b به عنوان دو ثابت، به ترتیب متناسب با جرم و سختی مواد تعریف می‌شود.

اعمال مرزهای جاذب در طرفین مدل، به نوعی مشکل انعکاس امواج را حل می‌کند. برای ایجاد مرزهای جاذب روش‌های متعددی در نرم‌افزارها وجود دارد. استفاده از مرزهای ویسکوز، در نظر گرفتن مواد با خواص سختی بسیار کم و گرانروی بالا در مرز و همچنین تعریف میدان آزاد، نمونه‌هایی از این روش‌ها هستند. در حالت میدان آزاد، تمامی گره‌های روی مرزهای جانبی مدل با میراگرهایی به یک محیط با خواص مشابه محیط بینهایت (میدان آزاد) متصل می‌شوند.

بار دینامیکی و اعمال آن به مدل، به عنوان سومین پارامتر، ممکن است به صورت تاریخچه تنش، سرعت و شتاب به مدل اعمال شود. در بحث پایداری معادن و فرآیند انفجار، بار دینامیکی حاصل از آن اغلب به صورت یک پالس مثلثی ساده شده به مدل اعمال می‌شود.

با وارد کردن بار دینامیکی و در نظر گرفتن سایر تغییرات یاد شده نسبت به تحلیل شبه‌استاتیکی، می‌توان پاسخ دینامیکی یک دیواره را تحت بار لرزشی انفجار و یا زلزله پیش‌بینی کرد و تغییرات میزان جابه‌جایی و پتانسیل ناپایداری به ازای الگوهای مختلف بارگذاری دینامیکی را ارزیابی کرد.

omoorepeyman.ir

1- Critical peak particle velocity

omoorepeyman.ir

فصل ۶

کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن زیرزمینی

omoorepeyman.ir

omoorepeyman.ir

۶-۱- آشنایی

به منظور ارزیابی مکانیزم شکست و پیش‌بینی ریسک‌های ژئومکانیکی، مدلسازی عددی در مطالعات امکان‌سنجی و طراحی حفریات زیرزمینی معدنی استفاده می‌شود.

۶-۲- بررسی شرایط حاکم بر سازه‌های معدنی زیرزمینی

۶-۲-۱- شرایط بارگذاری

طراحی سازه‌های زیرزمینی در سنگ با طراحی دیگر سازه‌ها به دلیل شرایط بارگذاری متفاوت است. در سازه‌های متداول سطحی، هندسه سازه و کاربری آن بارهای وارد بر سیستم را تعیین می‌کند. سازه‌های زیرزمینی به دلیل افزایش عمق محیط، تحت تنش‌های اولیه‌ای قبل از حفاری و استخراج قرار دارند. وضعیت تنش نهایی بعد از حفاری در سازه در نتیجه وضعیت تنش اولیه و تنش‌های القایی ناشی از حفاری است. بنابراین تخمین وضعیت تنش اولیه قبل از معدنکاری زیرزمینی یکی از پارامترهای طراحی است که باید مورد بررسی قرار گیرد.

۶-۲-۲- پیوسته و ناپیوسته بودن محیط

از دیگر ویژگی‌های معدنکاری زیرزمینی جنس محیط است که اغلب رفتار ناپیوسته دارند. در این محیط‌ها، دو مکانیزم ناپایداری شامل ناپایداری با کنترل ساختاری و ناپایداری تحت تنش متمرکز در نظر گرفته می‌شود. عموما به دلیل عمق زیاد معادن زیرزمینی و مکانیزم عملکرد تنش‌های محصورکننده، سهم ناپایداری‌های با کنترل ساختاری کمتر از سازه‌های سطحی است. مکانیزم‌های غالب ناپایداری در این محیط‌ها ناشی از تمرکز تنش است.

۶-۳- روش‌های تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج

در پایداری کارگاه‌ها، بررسی پایداری سقف، کف و دیواره‌ها مطرح است. بررسی پایداری سقف و دیواره کارگاه مشابه تحلیل مسایل تونل است که با شبیه‌سازی‌های عددی به صورت دو بعدی (در مقاطع با فاصله از جبهه‌کار) قابل تحلیل است.

در مورد کارگاه‌های جبهه‌کار بلند، بررسی توزیع تنش در محدوده جبهه‌کار و ناحیه سیستم نگهداری اهمیت بیشتری دارد. بنابراین، به دلیل ماهیت سه بعدی در محدوده نزدیک به جبهه‌کار، عموما تحلیل‌ها به صورت سه بعدی انجام می‌شود. در روش استخراج جبهه‌کار بلند، به دلیل بزرگ بودن طول کارگاه، می‌توان از ساده‌سازی‌های دو بعدی مانند استفاده از تحلیل کرنش صفحه‌ای برای فواصل دور از جبهه‌کار استفاده کرد. در روش استخراج اتاق و پایه، به دلیل ماهیت سه بعدی و تقاطع راهروها، مدلسازی عموما به صورت سه بعدی در نظر گرفته می‌شود.

در مورد دیگر روش‌های استخراجی اگر کرنش صفحه‌ای صادق باشد (طولانی بودن یک بعد نسبت به دو بعد دیگر) نظیر ذخایر لایه‌ای به ویژه زغال‌سنگ، می‌توان از شرایط دو بعدی کرنش صفحه‌ای و متعاقب آن، مدلسازی‌های دو بعدی استفاده کرد.

omoorepeyman.ir

۶-۴- روش‌های تحلیل پایداری پایه‌های معدنی

در بررسی پایداری پایه‌ها باید سیستمی متشکل از سقف، پایه و کف پایه را در نظر داشت زیرا وضعیت توده سنگ در کف و سقف پایه و نیروهای بین فصل مشترک‌ها در بحث پایداری لنگه‌ها بسیار حایز اهمیت است.

به دلیل ماهیت سه بعدی در محدوده لنگه‌ها و راهروها، عموما تحلیل‌های عددی به صورت سه بعدی انجام می‌شود. همچنین به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه، معمولا محدوده لنگه‌ها به صورت جداگانه و سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود. اگر عوارض زمین‌شناسی بارزی در محدوده لنگه‌ها مشاهده شود و در ناپایداری آن نقش داشته باشد، بهتر است تحلیل به صورت سه بعدی ناپیوسته انجام شود. روش دو بعدی تقارن محوری نیز تا حدودی در تحلیل پایه‌های دایره‌ای شکل قابل استفاده است.

۶-۵- روش‌های تحلیل پایداری تونل‌ها، چاه‌ها و تقاطع‌های اصلی معادن

تونل‌ها و چاه‌ها بخش بزرگی از مسیرهای دسترسی و خدماتی در معادن زیرزمینی را تشکیل می‌دهند. تحلیل پایداری این سازه‌ها نیز یکی دیگر از کاربردهای دیگر مکانیک سنگ در طراحی ژئومکانیکی معادن زیرزمینی است.

۶-۵-۱- تونل‌ها

عوامل مهم در طراحی تونل‌ها بررسی توزیع تنش القایی، مناطق با تمرکز تنش بالا، ناحیه با رفتار پلاستیک اطراف تونل و الگوی جابه‌جایی و همگرایی تونل است. ابزار عددی برای تحلیل مسایل تونل به دلیل توانایی در تحلیل رفتار غیرخطی مواد، هندسه‌های پیچیده سازه‌های زیرزمینی، اندرکنش تونل–سازه و همچنین توانایی شبیه‌سازی روش‌های اجرای مختلف تونل، کارآیی زیادی دارند. برای تحلیل مسایل اندرکنش بین تونل‌های در حال اجرا و سازه‌های قدیمی‌تر، شبیه‌سازی عددی ابزار مناسبی است.

مسایل تونل اغلب به صورت دو بعدی تحلیل می‌شوند. با توجه به اینکه این مسایل ماهیت سه بعدی دارند در مسایل دو بعدی باید مقطع مورد نظر به اندازه کافی از جبهه‌کار تونل دور باشد. در تحلیل‌های دو بعدی تونل، باید مفهوم رهاسازی تنش و زمان نصب سیستم نگهداری بر اساس منحنی پاسخ زمین در نظر گرفته شود. زمانی که بررسی پایداری محدوده جبهه‌کار تونل مد نظر باشد، باید شبیه‌سازی به صورت سه بعدی انجام شود.

اگر عوارض زمین‌شناسی در الگوی جابه‌جایی و مکانیزم ناپایداری تونل نقش داشته باشد، باید مدلسازی به صورت ناپیوسته و با وارد کردن هندسه و خواص عوارض ساختاری انجام شود و در نقطه مقابل به دلیل یکپارچگی محیط سنگی و عدم تاثیر ناپیوستگی‌ها در مکانیزم ناپایداری، شبیه‌سازی تونل به صورت پیوسته انجام می‌شود. در چنین مواردی باید خواص معادل توده سنگ به عنوان خواص ژئومکانیکی محیط در نظر گرفته شود.

۶-۵-۲- تقاطع‌ها

با توجه به وسعت زیاد کارهای اجرایی در معادن زیرزمینی، گاه ممکن است تونل‌های جدید در کنار تونل‌های قدیمی با امتدادهای مختلف یا تقاطع تونل‌ها اجرا شود. تقاطع‌ها نقش مهمی در تامین پیوستگی بین عملیات مهم معدنکاری مانند تهویه، حمل و نقل پرسنل و انتقال مواد معدنی دارند. بنابراین پایداری آن‌ها اهمیت بالایی در معادن زیرزمینی دارد.

omoorepeyman.ir

این مسایل باید به صورت سه بعدی دسته‌بندی شوند، زیرا در مورد آن‌ها نمی‌توان فرضیات ساده‌کننده دو بعدی کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری را در نظر گرفت. توزیع تنش و تغییرات کرنش نیز به صورت سه بعدی است و تغییرات این کمیت‌ها در سه جهت رخ می‌دهد. بنابراین تحلیل‌های عددی در این سازه‌ها به صورت سه بعدی انجام می‌شود.

۶-۵-۳- چاه

چاه‌ها، حفریات با امتداد قائم یا نزدیک به قائم هستند که در صنعت معدنکاری کارآیی زیادی دارند. طراحی چاه‌ها شباهت زیادی به طراحی تونل‌ها دارد، یعنی باید نگهداری اولیه و ثانویه برای این سازه در نظر گرفته شود. مدلسازی عددی چاه‌ها همانند تونل‌ها به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام می‌گیرد.

در تحلیل‌های دوبعدی چاه‌ها، هر دو فرض کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری قابل اجرا است. در صورتی که هدف، بررسی مقطع عرضی (افقی) از چاه باشد، می‌توان از تحلیل کرنش صفحه‌ای مدلسازی را انجام داد. در حالتی که شرایط هندسی، بارگذاری و جنس زمین‌شناسی نسبت به محور چاه متقارن باشد، می‌توان با مدل کردن مقطع طولی از چاه، تحلیل دو بعدی تقارن محور را انجام داد.

در مورد طراحی چاه‌ها در نواحی نزدیک به ورودی و انتهای چاه که فرضیات دو بعدی صادق نیست، شبیه‌سازی باید به صورت سه بعدی انجام شود.

۶-۶- تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی معدنی

تمام فرآیندهای استخراج و حفاری در سنگ، ارتعاش و لرزش‌هایی را به زمین و سازه‌های مجاور وارد می‌کنند. لرزش‌های عمده ناشی از چالزنی و انفجار است، در صورتی که در اثر حرکت ماشین‌آلات و حفاری آن‌ها لرزش‌های با بزرگای کمتر رخ می‌دهد. بررسی عملکرد این لرزش‌ها بر محیط اطراف و سازه‌های مجاور اهمیت بالایی دارد. به منظور ارزیابی تاثیرات بارهای دینامیکی در معادن زیرزمینی، عموما پارامترهای زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

- جابه‌جایی و تغییر شکل ایجاد شده در حفریات در اثر بار دینامیکی
- اندازه‌گیری واکنش محیط در برگیرنده و سازه‌های مجاور و سیستم‌های نگهداری موجود در اثر لرزش‌ها
- تعریف مقادیر مجاز ارتعاش برای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی

برای مدلسازی دینامیکی سازه‌ها همانند تحلیل شبه‌استاتیکی عمل می‌شود که چند تغییر اساسی در روند مدلسازی مورد نیاز است که در بخش ۵-۹ به آن‌ها اشاره شد. این تغییرات شامل شرایط مرزی، بارگذاری دینامیکی و پارامترهای میرایی هستند.

در تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی، برخلاف سازه‌های سطحی، تمام مرزهای مدل به صورت جاذب تعریف می‌شوند تا از انعکاس امواج به درون مدل جلوگیری شود.

خواص مواد مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی شامل خواص میرایی محیط در برگیرنده و خواص دینامیکی (پارامترهای فیزیکی، مقاومتی و شکل‌پذیری مواد در حالت دینامیکی) است.

در انجام یک تحلیل دینامیکی ابتدا باید مدل در حالت شبه‌استاتیکی به تعادل برسد. بعد از تعریف شرایط مرزی جاذب، بارهای دینامیکی بر اساس مدت زمان تعریف و به مدل وارد می‌شود. از نتایج مهم تحلیل دینامیکی، بررسی تغییرات جابه‌جایی یا سرعت در

omoorepeyman.ir

نقاط حساس مدل (نقاط با احتمال بیشترین تغییرات و آشفتگی) در طول زمان اعمال بار دینامیکی است.

در تحلیل دینامیکی حفریات زیرزمینی معدنی از نرم‌افزارهایی نظیر UDEC و FLAC در تحلیل دو بعدی و از نرم‌افزارهای 3DEC و FLAC 3D در تحلیل‌های سه بعدی استفاده می‌شود.

۶-۷- روش‌های تحلیل و بررسی نشست در مقیاس کل محدوده معدن

نشست سطح زمین به عنوان یکی از مسایل مهم با تعداد رخداد فراوان در معادن زیرزمینی است. میزان نشست به خواص ژئومکانیکی سنگ و عوارض زمین‌شناسی موجود در منطقه، شرایط هندسی کانسار، ضخامت منطقه استخراج شده، عمق ذخیره، روش استخراج و معدنکاری و دیگر فاکتورها بستگی دارد.

واکنش‌های تنش-تغییر شکل توده سنگ را می‌توان به صورت مستقیم در معدن و در حین اجرای سازه‌های زیرزمینی بررسی کرد و یا اینکه به منظور طراحی‌ها از قبل بر اساس تحلیل‌های تجربی، محاسباتی، آزمایشگاهی و مدلسازی عددی پیش‌بینی کرد.

مدلسازی عددی استخراج ماده معدنی و بررسی تاثیرات آن این امکان را فراهم می‌کند که بتوان مکانیزم رفتاری پدیده‌های ژئومکانیکی را تشخیص داد و تغییرات تنش و جابه‌جایی و همچنین اندرکنش آن‌ها طی اجرای مرحله‌ای سازه‌های مختلف را پیش‌بینی کرد.

به دلیل وسعت زیاد محدوده معدنکاری زیرزمینی و زون تاثیر نشست آن، محدوده مورد بررسی از نظر زمین‌شناسی متجانس نیست. بنابراین استفاده از مدلسازی‌های عددی با قابلیت مدلسازی مواد مختلف در یک مدل و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مواد، ابزار مناسبی برای پیش‌بینی نشست است.

به منظور برآورد میزان نشست حاصل از استخراج معادن زیرزمینی، مدل شامل سطح زمین و معدن زیرزمینی در عمق است و معمولا از تحلیل‌های دو بعدی پیوسته و یا ناپیوسته با در نظر گرفتن گسل‌های اصلی و درزه‌ها با تداوم طولی زیاد استفاده می‌شود.

در بررسی نشست سطح زمین حاصل از استخراج، به دلیل بزرگی مدل‌ها، حجم بالای محاسبات و مدت زمان زیاد اجرای برنامه، مدلسازی‌های سه بعدی استفاده کمتری دارند. مدلسازی‌های دوبعدی با نرم‌افزارهای مختلف پیوسته و ناپیوسته نظیر FLAC، UDEC، PLASE2 قابل اجرا است.

استفاده از مدلسازی‌های عددی درک مساله نشست سطح و پیش‌بینی میزان آن، ناشی از استخراج معادن زیرزمینی را بهبود می‌بخشد و می‌توان بر اساس نتایج آن روش‌های بهینه‌ای برای کنترل نشست انتخاب کرد.

omoorepeyman.ir

خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر ششصد عنوان ضابطه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی، نشریه و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست ضوابط منتشر شده در پایگاه اطلاع‌رسانی**nezamfanni.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

امور نظام فنی و اجرایی

Islamic Republic of Iran
Management and Planning Organization

Guideline for Numerical Methods in Mining Geomechanical Design

No. 656

Office of Deputy for Strategic Supervision
Department of Technical and Executive Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Industry, Mine and Trade
Deputy of Mine Affairs and Mineral Industries
Office for Mining Supervision and Exploitation
http://mimt.gov.ir

2016

omoorepeyman.ir

این نشریه

کاربرد روش‌های مدلسازی عددی را در بررسی مسایل ژئومکانیکی معادن مورد بررسی قرار می‌دهد. مدلسازی عددی یک ابزار کارآمد در تحلیل و طراحی مسایل ژئومکانیکی معادن است که به کمک آن مکانیزم‌های ناپایداری، میزان تغییر شکل‌پذیری، ضرایب ایمنی و عملکرد سیستم‌های نگهداری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

omoorepeyman.ir