واکاوی اثرگذاری هندسه مدل در اعتبار روش های عددی

فرشاد نژادشاه‌محمد*[1]، محمدباقر فتحی[2]

[1]*استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، f.shahmohammadi@urmia.ac.ir

[2]استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، mb.fathi@urmia.ac.ir

چکیده

استفاده از روش های عددی در زمینه تحلیل های مرتبط با سازه های سنگی روز به روز در حال توسعه می باشد. نکته اساسی در استفاده از این روش ها، تاثیر پذیری بیش از حد این روش ها از پارامتر ها و اطلاعات ورودی در مدلسازی می باشد. انتخاب محدوده مناسبی از توده‌سنگ یا خاک و ایجاد هندسه مدل اولین و مهمترین گام از مراحل مدلسازی است. این مقاله نتایج تحقیقات انجام شده بر روی روش های عددی دو بعدی در ایجاد هندسه مدل بمنظور بررسی نتایج حفاری تونل ها در محیط های تکتونیزه می باشد. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از برنامه های ساختاری در محیط المان مجزا، مدل هایی با فواصل مرزی مختلف ایجاد گردد. این مدل ها در شرایط سنگی با ویژگی های مکانیکی و هندسه مدل مختلف ایجاد شده و اعتبارسنجی می شوند. جهت دقیق چنین اثرگذاری، تونل ها بصورت بخشی حفاری خواهند شد. با توجه به اینکه مسائل مرتبط با تمرکز تنش در دیواره تونل ها و پایه میان تونل ها حساسیت بالایی نسبت به مرز های انتخاب شده دارد بنابراین سعی شده است با انجام تحلیل حساسیت، مرزهای مختلف را مورد آنالیز قرارداده و معیار های مناسبی جهت انتخاب مرز صحیح مدل ها در انواع سازه های سنگی ارائه نمود.

واژه های کلیدی

هندسه مدل، روش های عددی، کرنش سنجی، تمرکز تنش

مقدمه

روش های عددی علیرغم استفاده بسیار مطلوب و روز افزون در پروژه های طراحی سازه های سنگی، تاثیر پذیری شدید از پارامترها ورودی، ساختار مدل، همخوانی محیط مورد بررسی با ویژگی های بنیادی روش عددی و تعریف دقیق از هندسه، گام های پیشروی در مدل و حتی شیوه های مختلف اجرا شده در حفاری تونل ها هستند. با افزایش نیاز به این سازه، تمایل به حفر تونل هایی با مقطع بزرگ دیده می شود. می توان قبل از حفاری تونل های بزرگ مقطع با ایجاد مدل هایی با مقیاس کوچک روش های مختلف حفاری را با استفاده از این مدل ها اجرا و بررسی نمود[۱]. پارامتر هایی چون نشست در سطح زمین و یا بوجود آمدن شکست در قسمت های در حال حفر و یا نگهداری شده را بررسی نمود.

به طور کلی تونل های بزرگ مقطعی را که نمی توان به صورت یک واحد حفاری اجرا کرد و یا خصوصیات ژئومکانیکی سنگ این امکان را نمی دهد باید از روش های دو مرحله ای استفاده کرد در روش دو مرحله ای پلکانی، مقطع تونل به دو بخش بالایی و پائینی (پله)، به نحوی تقسیم می شود که ابتدا بخش بالایی و سپس بخش پایینی حفر می شود[۲]. در این مقاله به بررسی تاثیر پارامتر های ورودی و همچنین ایجاد هندسه مناسب برای مدل پرداخته می شود. ایجاد هندسه مدل در سازه هایی که بصورت چندبخشی حفاری می شوند از اهمیت بالاتری برخورداراست. به منظور بررسی این جابجایی ها یک سری تحلیل دو بعدی با روش المان مجزا بر روی تونل های دو گلنه انحراف آب سدبختیاری که با روش حفاری پلکانی حفر می شوند، انجام شده است.

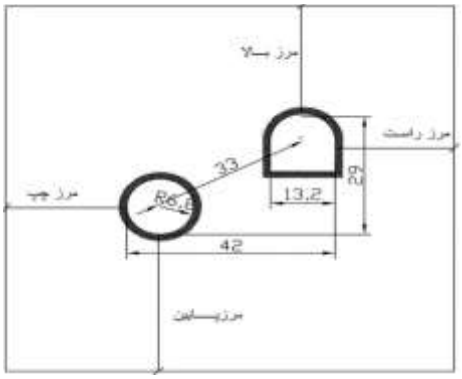
روش های عددی پیشرفته به جهت اعمال شبیه سازی در اکثر مراحل ساخت و ساز امکان ایجاد مدلهایی با ساختار و شرایط مرزی پیچیده را فراهم کرده است. با توجه به توسعه روز افزون سازه های زیر زمینی و هزینه های فراوانی که برای ساخت هر یک از این سازه ها صرف می گردد و همچنین جلوگیری از هر نوع آسیب به سازه منجر به استفاده از روش های عددی شده است [۳]. براساس اطلاعات بدست‌آمده توسط ژائو و همکاران[۴] با استفاده از انواع روش‌های پایش مشخص شده که تغییرات جابجایی در موقعیت‌های مختلف در منطقه حفاری تونل ها عموما حالت تحدبی در رفتار کرنش دارد. تغییرات تنش شناسایی‌شده توسط حسگرهای تنش برای هر موقعیت در تونل متفاوت است. همچنی مقایسه نتایج اجرای واقعی حفاری با فرایند شبیه‌سازی عددی، اعتبار و صحت نتایج در ارزیابی مدل های عددی را تایید می کند علاوه بر این، اثرات پارامترهای نسبی منطقه استخراج‌شده بر مکانیسم شکست از نظر طول، مکان و فاصله تا تونل در شبیه‌سازی‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته و هندسه مدل بعنوان یک پارامتر اساسی در مدلسازی مطرح شد است. در تحقیقی که توسط یانگ و همکاران[۵] انجام شد ارزیابی یک تونل دوقلو به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر شرایط موج‌های مختلف و عمق بر ویژگی‌های هندسه ساختار تونل بررسی شود. در این اعتبارسنجی مدل عددی، آزمون استاتیک اولیه، شبه استاتیک، واپاشی و آزمون موج منظم استفاده شد. نتایج این تحقیقات اثرپذیری وضعیت ساختارهای تکتونیکی زمین و ابعاد مدل را بعنوان پارامترهای بحرانی معرفی کردند.

ژائو و همکاران [۶] آنالیز لرزه ای تونلی را در مدل‌سازی عددی مطالع کرده لند. در این مدلسازی تاریخچه های زمانی شتاب، عوامل تقویت حرکات ورودی، لرزش های القایی و ساختار هندسه مدل در ارزیابی مدل‌های عددی حفاری تونل مورد استفاده قرار گرفت. تونل در یک محیط خاکی واقع شده بود. برمبنای بخشی از نتایج مطالعات آنها در ساخت هندسه مدل با فاصله مرزی نامناسب امواج لرزه ای به خوبی در اعتبار سنجی نتایج موفق نشده اند.

اطلاعات ورودی در ساخت مدل ها

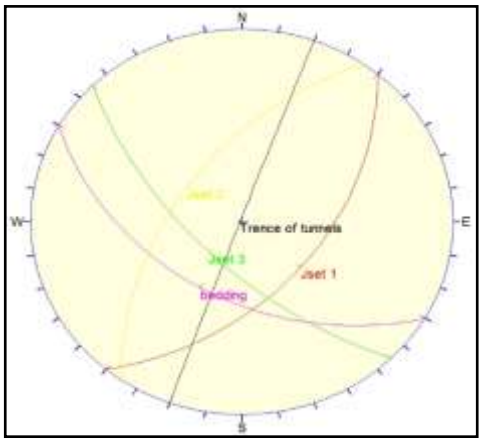
تونل های مورد ارزیابی بصورت مجاور می باشند که تحت عنوان تونل های بالایی و پایینی نام گرفته لند. تونل پایینی بصورت دایروی با قطر ۱۳/۷ متر و طول ۱۱۸۱ می باشد. تونل بالایی بصورتD شکل با عرض

۱۳/۲ متر و ارتفاع ۱۳/۷ متر و طول ۱۱۵۱ متر می باشد شکل ۱ مقطع عرضی تونل ها را نشان می دهد.



شکل(۱): مقطع عرضی تونل های انحراف آب سد بختیاری

این تونل ها در یک الگوی مورب نسبت به هم قرار گرفته اند. جهت بررسی دقیق تونل ها در هفت واحد سنگی مختلف بررسی شده اند. ارتفاع روباره تونل ها از ۵۰ متر تا ۶۰۰ متر در تغییر می باشد. چهار سری ناپیوستگی اصلی نیز در مسیر تونل ها بصورت لایه بندی، سیستم درزه J1، سیستم درزه J2، سیستم درزه J3 لحاظ شده است در شکل ۲ مشخصات سیستم درزه ها آمده است.



شکل (۲): مشخصات سیستم درزه داری در مدلسازی

در اجرای برنامه های عددی انتخاب مدل رفتاری به جنس سنگهای منطقه بستگی دارد. مدل رفتاری که برای توده‌سنگ در نظر گرفته شده است، مدل الاستو – پلاستیک با تئوری شکست موهر – کلمب می‌باشد. این مدل رفتار سنگ در بخش الاستیک را نفی نمی‌کند بلکه در حالتی که رفتار آنها از حالت الاستیک خارج شود و به منطقه پلاستیک برسد، این بخش را شامل می‌شود. در این مدل نیاز به دانستن پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و درزه ها می باشد.

از نکات مهم در مورد خواص درزه داری تعیین مقادیر سختی نرمال(Kn) وسختی برشی درزه ها(Ks) می باشد. روابط مختلفی بدین منظور ارائه شده لند. در این تحقیق از معادلات ارائه شده در آخرین راهنمای این نرم افزار استفاده شده است، که این پارامتر ها بر مبنای مدول برشی، بالک و تغییر شکل سنگ تعیین می شوند. S فاصله داری متوسط درزه ها است (جدول ۲).

$$k_n = \frac{E_m.E_r}{S(E_r - E_m)} \quad (۱)$$

$$k_S = \frac{G_m.G_r}{S(G_r - G_m)} \quad (۲)$$

$$K_n and K_s \le 10.0\left[\max\left(\frac{K+\frac{4}{3}G}{Z\min}\right)\right] \quad (۳)$$

در این رابطه K مدول بالک توده سنگ بوده و Z_{min} فاصله داری متوسط درزه ها میباشد. روابط ۱ و۲ در محاسبه مقادیر سختی نرمال(Kn) وسختی برشی درزه ها(Ks) بکارگرفته شده اند. ازرابطه ی ۳ در ساختن مدل اولیه با فرض ایده آل بودن پارامتر ها استفاده می شود[۴].

مقدار زاویه اصطکاک در تمامی واحد های سنگی برای لایه بندی برابر با ۴۰°، برای دسته درزه J1 برابر با ۳۰° ، دسته درزهJ2 برابر با ۲۸° و برای دسته درزه J3 برابر با ۲۵° محاسبه شده است.

آنالیز المان مجزا

در این مقاله از یک کد تحلیلی بر مبنای روش المان‌های مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیط‌های ناپیوسته می باشد استفاده شده است. این برنامه واکنش یک محیط ناپیوسته را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند کد بکارگرفته شده UDEC می باشد. این برنامه با پیش رفتن به صورت پله‌های زمانی و حل معادلات تعادل نیرو و گشتاور به تحلیل سازه می پردازد در این برنامه در هر مرحله قبل از شروع مرحله بعدی نیروهای نامتعادل وارد بر سازه را محاسبه کرده و حل مسئله را با اعمال این نیروها ادامه می‌دهد[۵].

۳-۱- مدل المان مجزا

هندسه مدل با ایجاد مرز های آن همراه است، این مرزها بایستی به گونه ای باشد که تاثیر تنش ها در اطراف فضای حفاری شده را نسبت به مرزهای آن به حداقل برساند ضمن آنکه مدل در کمترین زمان و با بالاترین سرعت اجرا شود. مدل هایی با فواصل مرزی ۳D، ۴D،۵D ، ۶D ، ۷D و ۸ D ساخته شد(D معادل با ۱۳/۷ متر می باشد). با ایجاد این چند مدل ومقایسه آنها در نهایت بلوکی با ابعاد مناسب ساخته می شود که بتواند آنالیز های مناسب و صحیحی از سازه اجرا نماید. اجرای هر مدل با توجه به سیستم کامپیوتر در دسترس زمانی بالغ بر ۵ ساعت خواهد بود. افزایش ابعاد مدل ها این زمان را تا ۱۰ ساعت برای هر مدل می تولند افزایش دهد. پارامتر های ژئو مکانیکی توده سنگ ورودی در برنامه عددی در جدول ۱ آمده است. این پارامترها بر اساس مقادیر اندازه گیری شده در ساختگاه سد بختیاری[7]، تعیین و در مدل‌سازی استفاده شده است.

جدول(۱): پارامتر های ژئو مکانیکی توده سنگ ورودی در برنامه عددی

پارامتر		Q3(dis)	Q4	Q5	Q6	Q7
وزن مخصوص (**Kg/m^3**)		۲۵۷۰	۲۵۸۰	۲۵۷۰	۲۶۰۰	۲۵۹۰
Em مدول تغییر شکل (**Gpa**)		۵/۸	۸/۳	۱۵/۱	۸/۳	۴/۴
Er مدول بکر(**Gpa**)		۶۷	۷۱	۵۷	۶۶	۵۹
Gm مدول برشی توده سنگ(**GPa**)		۲/۴	۳/۵	۶/۳	۳/۵	۱/۸
Gr مدول برشی سنگ بکر(**GPa**)		۲۷/۹	۲۹/۶	۲۳/۷	۲۷/۵	۲۴/۶
نسبت پواسون		۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۳
زاویه اصطکاک داخلی(**Deg**)		۰/۵۵	۱/۲	۱/۷	۰/۸	۰/۴
مقاومت چسبندگی (**Mpa**)		۲۴/۴	۳۴/۷	۳۸/۲	۴۰/۴	۵۰/۷
حداکثر ارتفاع روباره تونل (**m**)	بالا	۱۲۳	۴۲۸	۴۷۳	۲۱	۷۰
	پایین	۱۳۰	۴۴۰	۴۷۰	۱۸۴	۵۰
(**kn**)سختی نرمال(**e10**) (**Gpa/m**)	لایه	۶/۴	۱	۲	۴/۷	۴/۷
	J1	۲/۱	۱/۹	۴/۱	۱/۶	۱/۶
	J2	۳/۲	۲/۳	۵/۱	۲/۴	۲/۴
	J3	۲/۱	–	–	–	۱/۶
(**ks**)سختی برشی(**e10**) (**Gpa/m**)	لایه	۲/۶	۰/۴	۰/۹	۲	۱/۹
	J1	۰/۹	۰/۸	۱/۷	۰/۷	۰/۶
	J2	۱/۳	۱	۲/۱	۱	۱
	J3	۰/۹	–	–	–	۰/۶
مقاومت چسبندگی (**Mpa**)		۰/۱۹	۰/۲	۰/۱۲	۰/۲	۰/۲

دستیابی به اطلاعات جامع و کامل در مورد مقادیر مربوط به پارامتر های دخیل در طراحی یک سازه سنگی از ملزومات اساسی در اجرای یک فعالیت مهندسی می باشد. . روش های متعددی در رابطه با ایراد الگویی در جهت تعیین مشخصه های توده های سنگی وجود دارد که از آن جمله می توان به سیستم های طبقه بندی سنگ اشاره نمود. استفاده از یک یا چند نوع از سیستم های طبقه بندی بصورت همزمان و تلفیقی با در نظر گرفتن این نکته که بعضی از سیستم ها نسبت به دیگری در محاسبه برخی از پارامتر ها ارجحیت دارد، می تواند کمک شایانی را در تعیین بهینه و مناسب پارامتر های توده سنگ، نماید. در جدول ۲ مقادیر مربوطه به سیستم RMR و Q آمده است. امتیازات مربوط به این سیستم ها با انجام آزمایش های مختلف مکانیک سنگی و برداشت های گوناکون زمین شناسی صورت گرفته است.

جدول(۲): امتیازات توده سنگ مسیر تونل ها

پارامتر		Q3(dis)	Q4	Q5	Q6	Q7
RMR	امتیاز	۴۸–۵۲	۵۶–۵۷	۶۸–۷۱	۵۵–۵۸	۴۶–۵۱
	توصیف	متوسط	متوسط	خوب	متوسط	متوسط
Q	امتیاز	۱/۲–۳	۴/۴–۹۵/۳	۱۵–۱۸	۵/۴–۶/۳	۱/۱–۷۶/۱
	توصیف	ضعیف	متوسط	خوب	متوسط	ضعیف

شکل۳ مدل های مختلف از مرز های ایجاد شده را نشان می دهد با توجه به اختلاف ارتفاع روباره در تونل ها مرزهایی بالایی با فواصل گوناگون اجرا شد. برای شبکه‌بندی اجزا تفاضل محدود از المان‌های مثلثی استفاده شده است.

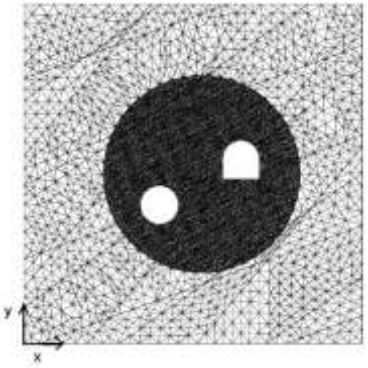
بمنظور دقیق تر بودن نتایج حاصل از این بررسی ها و برقراری برهمکنش مناسب در مرز بین بلوک ها المان های ایجاد شده در محدوده اطراف تونل ها دارای فاصله کمتری از مابقی بلوک ها می باشند.

برای هر کدام از مدل ها مرزهای مختلف ازD۳ تاD۸ اجرا شد. در هر مدل

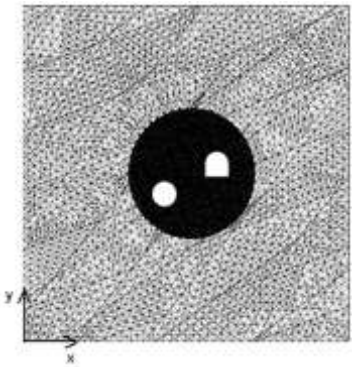
پارامتر				تمرکز تنش(**MPa**)				
	فاصله مرزی(**D**)		ابعاد بلوک $(x\times y)_{m\times m}$	Q3 (dis)	Q4	Q5	Q6	Q7
مدل نهایی	بالا	۴	Q6 - Q2 ۱۵۳×۱۲۴ Q7 ۱۲۴×۸۴	۲/۸	۱۰/۱	۱۱	۴/۱	۰/۸
	پایین	۵		۲/۱	۹/۹	۱۰/۶	۳/۶	/۲۵ ۰
	راست	۳		۱/۸	۵/۵	۶/۱	۲/۶	۱
	چپ	۳		۱/۹	۵/۶	۶/۱۵	۲/۷	۱/۳

میزان تمرکز تنش در دیواره ها محاسبه گردید. تا بدین ترتیب مناسبترین شکل و فاصله مرزی برای تونل ها در هر واحد سنگی محاسبه شود. در مرزهای چپ و راست تنش های افقی و در مرزهای بالا و پایین تنش های قائم بررسی گردید. با توجه به حجم زیاد محاسبات، در جدول ۳ فقط نتایج مربوط به مدل نهایی ارائه شده است.

جدول(۳): مقادیر تمرکز تنش در دیواره تونل های حفاری شده



الف- (مدل با مرز D ۶)



ب- (مدل با مرز D ۳)

شکل(۳): مدل المان مجزا

افزایش و کاهش مرزها مقادیر مربوط به تمرکز تنش در دیواره تونل ها را تحت تاثیر قرار مر دهد. محاسبات نشان می دهد که با انتخاب مقادیر نامناسب بزای مرزها، نتایج حاصله از آنالیز متفاوت از واقعیت خواهد بود به نحوی که هرچه قدر مرزها کمتر از حللت واقعی باشند مقادیر تمرکز تنش بزرگتر خواهند بود. با انتخاب مرزهای ارائه شده در جدول ۴ و با افزایش این مرزها تا مقدار واقعی تغییر قابل مشاهده ای در نتایج رخ نخواهد داد. مرز

پایینی نسبت به سایر مرزها حساسیت بالاتری را نشان می دهد. با توجه به عمق کم روباره در واحد Q7 بنابراین مرز بالایی در این واحد با محدودیت همرا بوده و برابر با D ۲ خواهد بود که منجر به کاهش ابعد بلوک در این واحد در جهت y به ۱۲۵m می شود.

در واحد Q7 بدلیل عمق کم روباره مقادیر تنش های افقی از قائم بیشتر است.

نتایج

این مقاله با هدف بررسی تاثیر هندسه و ابعاد مدل و همچنین شیوه های مختلف حفر تونل ها در دقت و صحت پردازش روش های عددی اراوه شده است. مدل‌سازی های مختلف در این تحقیق بر مبنای روش المان مجزا و با درنظرگرفتن ۴ سیستم شکستگی و جدایش، مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی ها ارائه شده است:

۱- کاهش ابعاد بلوک ها که با اختصاص مقادیر کم برای مرز ها همراه است سبب افزایش تمرکز تنش در دیوارها نسبت به واقعیت خواهد شد.

۲- تمرکز تنش در مرز پایینی واحد Q3 از مرز بالایی بیشتر است که این حالت از روباره کمتر تونل پایینی نسبت به تونل بالایی ناشی می شود. در بقیه واحد ها روباره تونل بالایی بیشتر است بنابراین تمرکز تنش در مرز بالایی بیشتر است.

۳- زمان اجرای برنامه و میزان خطاهای ناشی از اجرا در گیر در ابعاد مدل می باشد به نحوی که این زمان می تواند با انتخاب نادرست به ۲ تا ۳ برابر برسد

٤- نسبت تنش قائم به افقی در تمامی واخد ها به جز در Q7 بیشتر از یک می باشد. در واحد Q7 بدلیل نزدیکی تونل ها به سطح زمین مقدار تنش افقی از قائم بیشتر می باشد.

٥- مقادیر تنش های افقی در مرز چپ از مرز راست در تمامی واحد ها به جز Q3 بیشتر است. دلیل انرا می توان به تاثیر پایه میانی بین تونل ها در افزایش تتش ها و انتقال این تنش ها به سمت تونل پایینی بدلیل روباره کمتر آن دانست.

منابع

[1] Li.Zhang, (2005), *Engineering Properties Of Rock*, ICF Consulting, Lexington, Massachusetts, USA.

[2] B.H.G.Brady,E.T.Brown,(2005),*Rock Mechanics For underground mining*, Third edition, published by Springer

[3] Xie, Tand Kaihang Han, K., *Two-Dimensional Numerical Model for Stability Analysis of Tunnel Face Based on Particle Flow Code*, symmetryjournal, 2019, 4(3):45-56.

[4] Yu Zhou, Shiwen Feng, Jianwang Li, *Study on the failure mechanism of rock mass around a mined-out area above a highway tunnel – Similarity model test and numerical analysis*, Tunnelling and Underground Space Technology, (2020),118:p44-58.

[5] Yu Zhou, Shiwen Feng, Jianwang Li, *Study on the failure mechanism of rock mass around a mined-out area above a highway tunnel – Similarity model test and numerical analysis*, Tunnelling and Underground Space Technology,Ocean Engineering, 2021, 118(1):p 89-121

[6] Zhou, H., et.al. *Centrifuge and numerical modelling of the seismic response of tunnels in two-layered soils*, Tunnelling and Underground Space Technology,2019, 113(2): p1-14

[5] Iran Water and Power resourced Development co, *Final Report of Rock Mechanics of Bakhtiyari Dam*, 2007.

[6] ITASCA Inc. *UDEC (universal Distinct Element Code)*, Ver. 4.0, User's manual,2004.

[7] J.n. Panve, E.Beer, J.r.vilanse, *Numerical Method in Rock Mechanic*, 1990.