

اصلاح محیط معادل سیتارام و مقایسه‌ی تحلیل آن با نتایج حاصل

از تحلیل محیط ناپیوسته

عبدالهادی قزوینیان (استادیار)
مهدی باقری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

سیتارام^۱ در سال ۲۰۰۰ به منظور برآورد مدول و مقاومت توده‌سنگ روابطی را معرفی کرد. مدول توده سنگ در رابطه‌ی پیشنهادی وی وابسته به ضریب a است. وی ضریب مذکور را تا فشار محصورکننده‌ی ۷ مگاپاسکال معرفی کرد. در نوشتار حاضر علاوه بر تصحیح رابطه‌ی سیتارام، ضریب a تا تنش محصورکننده‌ی ۶۰ مگاپاسکال پیشنهاد و تا تنش محصورکننده‌ی ۲۰ مگاپاسکال مورد مقایسه و تأیید قرار گرفته است. به منظور بررسی کارایی رابطه‌ی اصلاح شده‌ی سیتارام به همراه ضرایب پیشنهادی در تنش بیش از ۷ مگاپاسکال، مدل‌های عددی فرضی ساخته شد. این مدل‌ها در دو محیط «معادل» و «ناپیوسته» مورد تحلیل قرار گرفتند. برای تحلیل محیط معادل از نرم‌افزار Flac و برای تحلیل محیط ناپیوسته از نرم‌افزار Udec استفاده شده است. مدل‌های مذکور در شرایط مختلف فاصله‌داری درزه‌ها، شیب‌های مختلف درزه و نهایتاً در بحرانی‌ترین حالات مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بیانگر این است که رابطه‌ی مذکور به همراه ضرایب معرفی شده در بازه‌ی تنش محصورکننده‌ی مورد بررسی از کارایی مناسبی برخوردارند. در قسمت دیگری از تحقیقات انجام گرفته، رابطه‌ی پیشنهادی سیتارام در تخمین مقاومت معادل توده سنگ، با روابط هوک^۲ و براون^۳، رامامورتی^۴، کالامارس^۵ و بارتن^۶، مقایسه شده‌اند. نتایج بیانگر این است که رابطه‌ی سیتارام مقاومت توده‌سنگ را بیش از سایر روابط تخمین می‌زند. همچنین رابطه‌ی بارتن مقاومت توده‌سنگ را کم‌تر از سایر روابط تخمین می‌زند. روابط کالامارس و رامامورتی مقاومت یکسانی را برای توده‌سنگ پیشنهاد می‌کنند.

مقدمه

درزه، و r پارامتر مقاومت برشی درزه است. در ضمن، r برابر $\frac{T}{\sigma_n}$ است که در آن T مقاومت برشی درزه و σ_n تنش قائم بر درزه است. رامامورتی برای پارامترهای r و n جدول‌هایی پیشنهاد کرد.^[۷] سیتارام برخی از مقادیر را اصلاح کرد.^[۱] برای تعیین پارامترهای r و n می‌توان از جدول‌های ۱ تا ۳ استفاده کرد.

$$J_f = \frac{J_n}{n \cdot r} \quad (1)$$

جدول ۱. پارامتر r برای درزه‌های پر نشده.^[۱]

مقاومت تک محوره‌ی ماده‌سنگ (Mpa)	پارامتر مقاومت درزه r
۲٫۵	۰٫۳
۵	۰٫۴۵
۱۵	۰٫۶
۲۵	۰٫۷
۴۵	۰٫۸
۶۵	۰٫۹
۱۰۰	۱

شبیه‌سازی عددی حفره‌های زیرزمینی در محیط‌های ناپیوسته مشکل و پیچیده است. از میان مشکلات موجود در تحلیل محیط ناپیوسته می‌توان به عدم دسترسی به خصوصیات دقیق هندسی و مکانیکی درزه‌ها اشاره کرد. از این رو استفاده از محیط‌های معادل در شبیه‌سازی عددی متداول شده است. سیتارام در سال ۲۰۰۰ با استفاده از تحلیل آماری بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی نمونه‌های درزه‌دار، روابطی را به منظور برآورد مدول و مقاومت توده‌سنگ ارائه کرد.^[۶-۱] در نوشتار حاضر ضمن اصلاح مدول معادل پیشنهادی سیتارام، به بررسی کارایی محیط معادل اصلاح شده‌ی سیتارام در شبیه‌سازی عددی حفره‌های زیرزمینی می‌پردازد. همچنین به منظور بررسی رابطه‌ی پیشنهادی سیتارام برای تخمین مقاومت توده‌سنگ، این رابطه با روابط پیشنهادی هوک و براون، رامامورتی، بارتن و کالامارس مقایسه می‌شود.

ضریب درزه (J_f)

رامامورتی^[۷] در سال ۱۹۹۳ ضریب درزه را به صورت معادله‌ی ۱ معرفی کرد. که در آن J_n تعداد درزه در متر، پارامتر n ، مرتبط با شیب

جدول ۲. پارامتر r برای درزهای پر شده [۷]

مواد پرکننده	زاویه‌ی اصطکاک (درجه) φ_j	مقاومت درزه $r = \tan(\varphi_j)$
ماسه‌سنگ گراول	۴۵	۱
ماسه‌سنگ درشت‌دانه	۴۰	۰٫۸۴
ماسه‌سنگ ریز	۳۵	۰٫۷
ماسه‌سنگ سیلتی	۳۲	۰٫۶۲
ماسه‌سنگ رسی سیلت رسی	۳۰	۰٫۵۸
۲۰٪ رس	۲۵	۰٫۴۷
۵۰٪ رس	۱۵	۰٫۲۷
۷۵٪ رس	۱۰	۰٫۱۸

جدول ۳. پارامتر n برای زوایای مختلف β (زاویه‌ی درزه با تنش حداکثر) [۲]

زاویه β	پارامتر n
۰	۰٫۸۲
۱۰	۰٫۴۶
۲۰	۰٫۱۱
۳۰	۰٫۰۵
۴۰	۰٫۰۷
۵۰	۰٫۳۱
۶۰	۰٫۴۶
۷۰	۰٫۶۳
۸۰	۰٫۸۲
۹۰	۱

محیط معادل رامامورتی

رامامورتی رابطه‌ی بین ضریب درزه و مقاومت توده‌سنگ را مطابق رابطه‌ی ۲ و رابطه‌ی بین مدول توده‌سنگ و ضریب درزه را مطابق روابط ۳ و ۴ پیشنهاد کرده است: [۷]

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \exp(-0.008 J_f) \quad (2)$$

$$E_r = \frac{E_j(\sigma_r=0)}{E_i(\sigma_r=0)} = \exp(-1/15 \times 10^{-2} J_f) \quad (3)$$

$$\frac{E_j(\sigma_r=0)}{E_j(\sigma_r \neq 0)} = 1 - \exp\left[-0.1 \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_r}\right)\right] \quad (4)$$

که در این روابط J_f : ضریب درزه، σ_{cr} : نسبت مقاومتی، σ_{cj} : مقاومت توده‌سنگ، σ_{ci} : مقاومت ماده‌سنگ، E_r : نسبت مدولی، E_j : مدول توده‌سنگ، E_i : مدول ماده‌سنگ، σ_r : تنش محصورکننده‌ی حداقل است.

رامامورتی در سال ۲۰۰۴ ارتباط بین J_f ، RMR و Q را به صورت روابط ۵ و ۶ معرفی کرده است. [۸]

$$J_f = 500 - 5RMR \quad (5)$$

$$J_f = 250(1 - 0.3 \log Q) \quad (6)$$

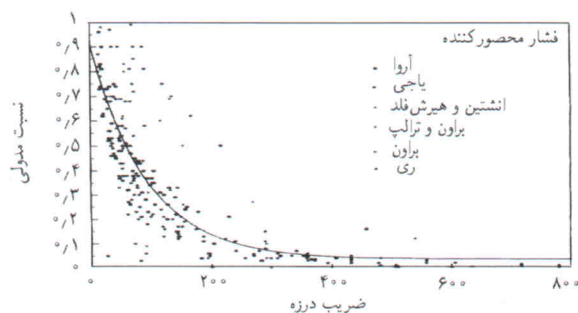
محیط معادل سیتارام

سیتارام و سریدوی ۷ در سال ۲۰۰۰ برای تخمین مقاومت و مدول توده‌سنگ روابطی ارائه کردند. [۱]

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \exp(-0.0065 J_f) \quad (7)$$

$$E_r = \frac{E_j}{E_i} = \exp(-a \times J_f) \quad (8)$$

ضریب a در جدول ۴ برحسب تنش حداقل تعیین می‌شود. این جدول براساس نمودار شکل ۱ به دست آمده است. نمودار شکل ۱، نمودار نسبت مدولی برحسب ضریب درزه است که از تحلیل آماری بر روی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های درزه‌دار به دست آمده است. سیتارام نمودارهای مشابه را در مقادیر مختلف σ_r به دست آورده است و از آنجا جدول ۴ را پیشنهاد کرده است.

شکل ۱. نمودار نسبت مدولی برحسب ضریب درزه برای حالت $\sigma_r = 0$

چنان که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، هنگامی که درزها پر نشده باشند، پارامتر مقاومت برشی متناسب با مقاومت ماده‌سنگ است. در حالی که ممکن است درزها هوازده ولی پر نشده باشند و لذا نمی‌توان مقاومت برشی درزه را متناسب با مقاومت فشاری سنگ بکر دانست، بلکه بهتر است مقدار هوازده‌گی هم در نظر گرفته شود. مقدار هوازده‌گی را می‌توان متناسب با $\frac{J_{CS}}{\sigma_c}$ برآورد کرد. از مزایای ضریب درزه تأثیر همزمان پارامترهای تعداد درزه، شیب درزه و مقاومت برشی درزه است.

محیط‌های معادل براساس ضریب درزه

سیتارام با استفاده از ضریب درزه روابطی را به منظور تعیین محیط معادل توده‌سنگ ارائه کرد. [۳] برای بررسی محیط معادل سیتارام لازم است ابتدا به محیط معادل رامامورتی بپردازیم.

از ۷ مگاپاسکال با استفاده از روابط پیشنهادی رامامورتی و دانکن و چانگ قابل محاسبه‌اند.

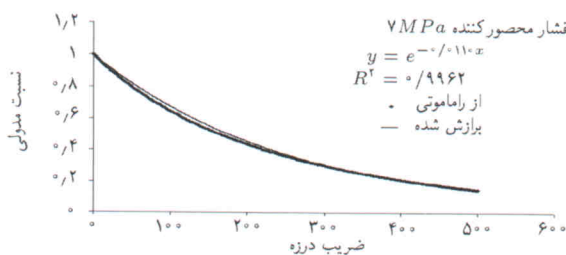
نسبت مدولی در رابطه‌ی سیتارام عبارت است از نسبت مدول توده‌سنگ در تنش محصورکننده‌ی مورد نظر به مدول ماده‌سنگ در همان تنش محصورکننده. روابط ۲ تا ۴ مدول توده‌سنگ را در تنش مورد نظر تخمین می‌زنند. جهت تعیین مدول ماده‌سنگ در تنش محصورکننده‌ی مورد نظر از روابط دانکن و چانگ استفاده شده است. دانکن و چانگ در سال ۱۹۷۰ روابط ۱۰ تا ۱۲ را پیشنهاد کرده‌اند. [۹]

$$E_i = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d(\epsilon_a)} = \frac{\sqrt{E_{ti}}}{[\sqrt{E_{ti}} + \epsilon_a R_f] / (\sigma_1 - \sigma_3)_f} = \left(1 - R_f \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right)\right)^2 E_{ti} \quad (10)$$

$$E_{ti} = kPa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n \quad (11)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (12)$$

که در آن E_i : مدول مماسی ماده‌سنگ در 5° درصد تنش گسیختگی، E_{ti} : مدول اولیه‌ی مماسی، σ_1 : تنش اصلی حداکثر، ϵ_a : کرنش محوری، σ_3 : فشار محصورکننده، R_f : نسبت گسیختگی، $\sigma_1 - \sigma_3$: تنش گسیختگی، $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: تنش تسلیم و Pa فشار اتمسفر است. k و n از رسم منحنی مدول برحسب تنش محصورکننده به دست می‌آیند. k عرض از مبدأ و n شیب منحنی مدول برحسب تنش محصورکننده‌اند. از تقسیم مدول توده‌سنگ بر مدول ماده‌سنگ در تنش مورد نظر، می‌توان منحنی نسبت مدولی برحسب ضریب درزه در تنش محصورکننده‌ی مورد نظر را به دست آورد. شکل ۳ نشان دهنده‌ی منحنی نسبت مدولی برحسب ضریب درزه در تنش ۷ مگاپاسکال است. ضریب a با استفاده از روش مذکور و روش حداقل مربعات 11×10^{-6} به دست می‌آید. در روابط رامامورتی $(E_j)_{\sigma_3 \neq 0}$ با توجه به E_i و σ_{ci} به دست می‌آید، لذا باید بین E_i و σ_{ci} ارتباط واقعی وجود داشته باشد. جهت تأمین این شرط از نتایج، آزمایش‌های تک‌محوره‌ی انجام گرفته



شکل ۳. منحنی نسبت مدولی برحسب ضریب درزه در تنش محصورکننده‌ی ۷ مگاپاسکال.

جدول ۴. پارامتر a برای فشارهای محصورکننده‌ی مختلف. [۹]

ضریب a	فشار محصورکننده Mpa
-۰٫۰۱۱۳	۰
-۰٫۰۰۶۴	۱
-۰٫۰۰۸۲	۵
-۰٫۰۱۰۳	۷

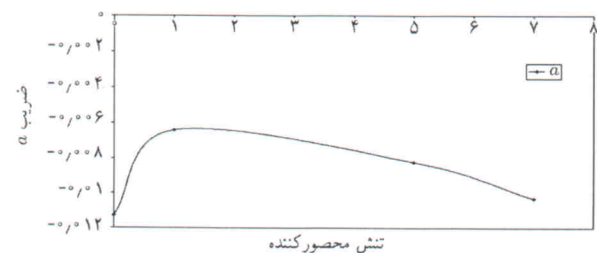
بررسی روابط پیشنهادی سیتارام

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعداد جدول ۴ منفی‌اند. با جای‌گذاری هر یک از این اعداد در رابطه‌ی ۸، نسبت مدولی بیش از ۱ می‌شود و در نتیجه مدول توده‌سنگ بیش از مدول ماده‌سنگ می‌شود. لذا لازم است که علامت منفی در داخل پرانتز رابطه‌ی ۸ حذف شود. پس رابطه‌ی ۸ به صورت رابطه‌ی ۹ اصلاح می‌شود. محدودیت دیگر رابطه‌ی مذکور تعیین ضریب a است، سیتارام پیشنهاد کرد برای تعیین ضریب a در مقادیر تنش محصورکننده‌ی بیش از ۷ مگاپاسکال برون‌یابی انجام شود. برای انجام برون‌یابی لازم است رفتار تابع در تنش‌های محصورکننده‌ی بیش از ۷ مگاپاسکال قابل پیش‌بینی باشد. چنانچه ضریب a برحسب تنش محصورکننده، مطابق شکل ۲ رسم شود، رفتار تابع در تنش بیش از ۷ مگاپاسکال مشخص نیست و لذا امکان برون‌یابی ضریب a در تنش‌های بیش از ۷ مگاپاسکال میسر نیست. با توجه به نارسایی‌های فرمول سیتارام، ضریب a در این نوشتار در تنش‌های بیش از ۷ مگاپاسکال معرفی می‌شود.

$$E_r = \frac{E_j}{E_i} = \exp(a \times J_f) \quad (9)$$

معرفی ضریب a در تنش بیش از ۷ مگاپاسکال

اگرچه ضریب a از روی نمودار نسبت مدولی برحسب ضریب درزه در تنش مورد نظر به دست آمده است، این نمودارها در تنش‌های بیش



شکل ۲. ضرایب پیشنهادی سیتارام برحسب تنش محصورکننده‌ی ۷ مگاپاسکال.

مقایسه‌ی مدل‌های عددی محیط معادل و محیط ناپیوسته

به منظور بررسی محیط معادل اصلاح شده‌ی سیتارام مدل‌های عددی، در دو محیط معادل و درزه‌دار مورد تحلیل قرار گرفتند. ابتدا محیطی با یک دسته درزه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل دارای یک دسته درزه، خود شامل مدل‌هایی با فاصله‌داری درزه‌ها از ۱ تا ۱۴ متر و شیب درزه‌ها از صفر تا ۹۰ درجه است. سپس محیط معادل در بحرانی‌ترین حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. اندازه‌ی مدل‌ها ۱۰۰ متر × ۱۰۰ متر هستند.

مبانی مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی عددی پیش فرض این است که ماده سنگ همسانگرد و همگن است. ناهمسانگردی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها به محیط تحمیل می‌شود. در جدول ۶ خواص درزه‌ها، و در جدول ۷ خواص مکانیکی ماده سنگ ارائه شده است. رفتار مشخصه‌ی حاکم بر مدل‌های پیوسته، «همسانگردی متقاطع»^۹ است. مدل همسانگردی متقاطع شامل خواص زیر است:

E_x : مدول در صفحه‌ی همسانگردی،

E_y : مدول در صفحه‌ی ناهمسانگردی،

ν_x : ضریب پواسون در صفحه‌ی همسانگردی،

ν_y : ضریب پواسون در صفحه‌ی ناهمسانگردی،

G_{xy} : مدول برشی بین صفحه‌ی همسانگردی و صفحه‌ی ناهمسانگردی.

مدول برشی بین صفحه‌ی همسانگردی و صفحه‌ی ناهمسانگردی از رابطه‌ی

لیخنسنکی^{۱۰} (رابطه‌ی ۱۳) تعیین می‌شود.^[۱۰]

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x(1 + \nu_{xy}) + E_y} \quad (13)$$

ν_y با توجه به روابط فوسوم، محاسبه می‌شود. روابط فوسوم به صورت معادلات ۱۴ و ۱۵ هستند.^[۱۱] از روی مقادیر \bar{K} و \bar{G}

جدول ۶. خواص درزه‌های مورد تحلیل.

φ	C	امتداد یافتگی	Ks	Kn
(درجه)	(Mpa)	(متر)	(Gpa/m)	(Gpa/m)
۳۸	۲	۱۵۰	۸٫۹۳	۱۵٫۱۴

جدول ۷. خواص مکانیکی ماده سنگ.

n	K	R _f	ν	φ	C	σ_c	E
				(درجه)	(Mpa)	(Mpa)	(Gpa)
۲٫۸۲	۲۸	۰٫۹۲	۰٫۱۷	۵۲	۵	۸۳٫۵	۲۸

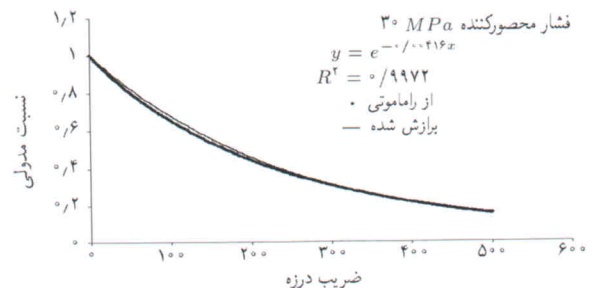
در آزمایشگاه استفاده شده است. لذا E_i ، σ_{ci} ، n و k_i ‌های به‌کاررفته با هم ارتباط واقعی دارند. نتایج بیانگر این موضوع است که ضریب a وابسته به نوع سنگ نیست. از مقایسه‌ی ضریب پیشنهادی در ۷ مگاپاسکال (۱۱/۰٪) با ضریب پیشنهادی سیتارام در ۷ مگاپاسکال درمی‌یابیم که بین آنها فقط ۰٫۶٪ اختلاف وجود دارد.

شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی منحنی نسبت مدولی برحسب ضریب درزه در تنش ۳۰ مگاپاسکال است. نتایج حاصل از نمودارهای مشابه در جدول ۵ خلاصه شده است.

برای بررسی کارایی رابطی ۹ و ضرایب معرفی شده در جدول ۵، نتیجه‌ی تحلیل مدل‌های عددی در محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تحلیل و سپس با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اثر ناهمسانگردی در نسبت σ_c/σ_3 بیشتر از ۵ به‌طور کامل و در نسبت‌های کم‌تر از ۵ به تدریج کاهش می‌یابد. به‌طور مثال در نسبت σ_c/σ_3 مساوی ۱، ناهمسانگردی برابر ۱۰ درصد است.^[۷] شایان ذکر است که با توجه به شبیه‌سازی‌هایی که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند، حداکثر σ_3 اعمال شده ۲۰ مگاپاسکال بوده است. بنابراین، مقادیر پیشنهادی ضریب a که در جدول ۵ ارائه شده‌اند تا حداکثر σ_3 اعمال شده مورد بررسی و تدقیق قرار گرفته است.

جدول ۵. مقادیر پیشنهادی ضریب a در تنش‌های بزرگ‌تر از ۷ مگاپاسکال.

مقدار a	تنش محصورکننده (Mpa)
-۰٫۰۱۱۰	۷
-۰٫۰۰۵۳۵	۱۰
-۰٫۰۰۴۴۷	۲۰
-۰٫۰۰۴۲۹	۲۵
-۰٫۰۰۴۱۶	۳۰
-۰٫۰۰۴۰	۴۰
-۰٫۰۰۳۹	۵۰
-۰٫۰۰۳۸۴	۶۰



شکل ۴. منحنی نسبت مدولی برحسب ضریب درزه در تنش محصورکننده‌ی ۳۰ مگاپاسکال.

ν_y را محاسبه کرد. چنان که در شکل ۵ شرایط مرزی نشان داده شده است. سمت راست و چپ مدل در جهت x و قسمت تحتانی مدل در جهت y ثابت شده‌اند.

در مدل‌سازی محیط پیوسته از روابط اصلاح شده سیتارام برای دستیابی به مدول توده‌سنگ، استفاده شده است. در اولین گام مطابق مشخصات داده شده، تنش حداقل که برابر کوچک‌ترین مقدار

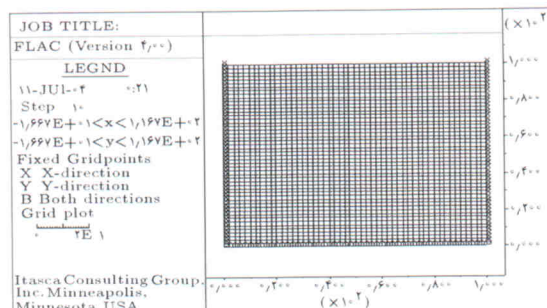
مطابق مشخصات داده شده، تنش حداقل که برابر کوچک‌ترین مقدار $\sigma_{zz} + \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2 xy}$ است به دست می‌آید. [۱۰] با توجه به تنش حداقل، ضریب مربوطه و سپس با توجه به روابط اصلاح شده سیتارام، مدول توده‌سنگ محاسبه می‌شود. می‌توان مراحل حل مدل را طبق شکل ۶ ترسیم کرد.

خواص درزه و ماده‌سنگ از روی آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی سنگ کنگلومرا به دست آمده است.

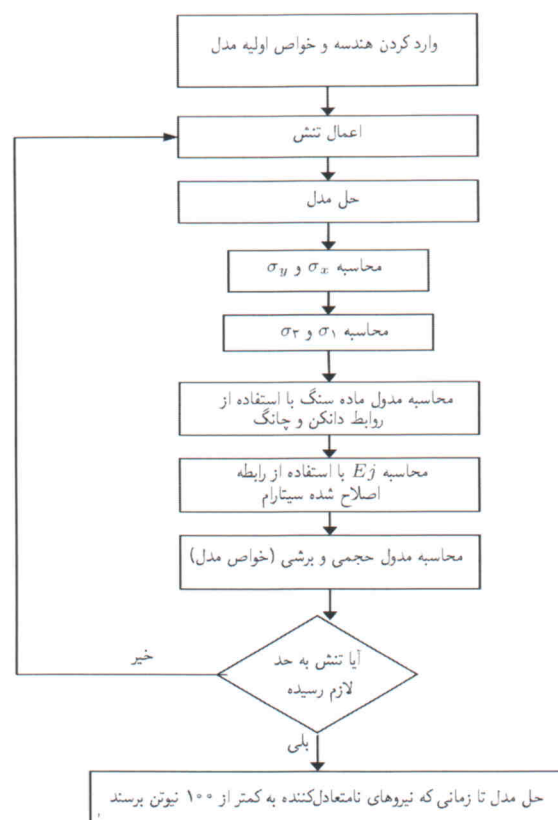
مدل‌هایی حاوی یک دسته درزه با فاصله داری متفاوت به‌منظور بررسی اثر فاصله‌داری درزه‌ها بر پاسخ مدول معادل اصلاح‌شده سیتارام مدل‌هایی با دو نرم‌افزار Flac و Udec در دو محیط معادل و ناپیوسته ساخته شد. مدل‌های مورد تحلیل، حاوی یک دسته درزه با شیب صفر درجه‌اند. هر مدل از نظر فاصله‌داری درزه‌ها متفاوت از سایر مدل‌ها است. برنامه‌ی Fish در هر دو نرم‌افزار کاربرد دارد. توسط این زبان برنامه‌نویسی می‌توان پارامترهای توده‌سنگ را با توجه به تنش‌ها به دست آورد.

در این مدل‌ها تنش‌های برجا به‌صورت $\sigma_x = \sigma_z = 4/6 \text{ Mpa}$ و در هر مرحله بارگذاری در جهت قائم بر بالای مدل در ده مرحله و در هر مرحله 0.525 مگاپاسکال اعمال می‌شود. از آنجا که حفاری فضاهای زیرزمینی، نوعی بارگذاری بر توده‌سنگ در برگیرنده‌ی فضا به حساب می‌آید، پس از تعادل مدل، در ده مرحله و در هر مرحله 2 مگاپاسکال در بالای مدل محیط معادل و ناپیوسته بارگذاری می‌شود. بارگذاری بر روی محور تقارن مدل در $y = 100$ و $40 < x < 60$ صورت گرفته است. در نهایت مدل به تعادل می‌رسد و جابه‌جایی‌ها و توزیع تنش‌ها مقایسه می‌شوند.

محیط معادل پیوسته با استفاده از رابطه‌ی ۹ و ضرایب جداول ۴ و ۵ به دست می‌آید. برای نیل به این هدف، ابتدا ضریب درزه محاسبه می‌شود. پارامتر J_n در ضریب درزه با توجه به فاصله‌داری درزه‌ها در هر مدل تعیین می‌شود. پارامتر n وابسته به زاویه‌ی بین درزه‌ها و محور قائم است که با توجه به جدول ۳، مقدار n برابر ۱ است. پارامتر r با توجه به مقاومت فشاری ماده‌سنگ، از جدول ۱ برابر 0.967 به دست می‌آید. ضریب a در رابطه‌ی ۹ در تنش‌های محصورکننده‌ی کم‌تر از 7 مگاپاسکال از جدول ۴ و در تنش‌های بیشتر از 7 مگاپاسکال از جدول ۵ به دست می‌آید. برنامه‌ی نوشته‌شده در Fish مقدار a را با توجه به تنش محصورکننده،



شکل ۵. شرط مرزی مدل‌های تفاضل محدود و المان مجزا.



شکل ۶. مراحل حل مسئله محیط معادل.

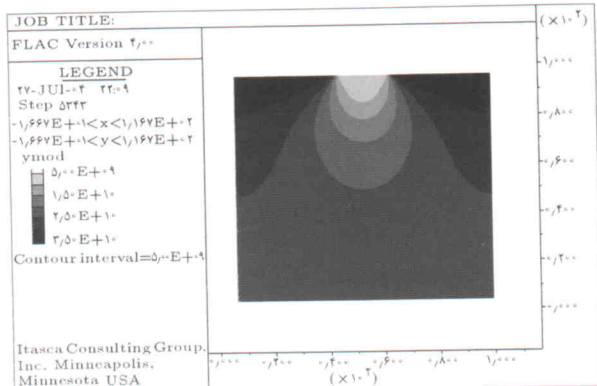
می‌توان مقدار ν_y را به دست آورد.

$$\bar{K} = \frac{1}{9} E \left[\frac{3(1+\nu)SK_n + 2E}{(1+\nu)(1-2\nu)SK_n + (1-\nu)E} \right] \quad (14)$$

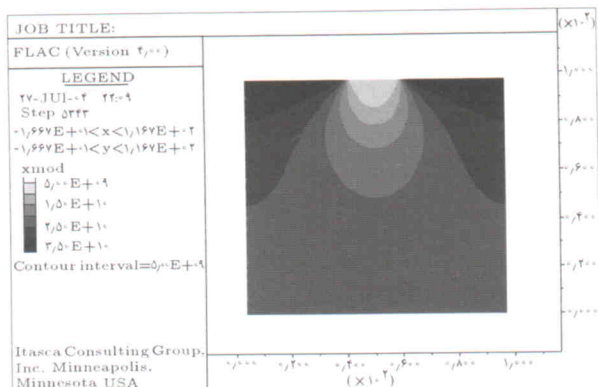
$$\bar{G} = \frac{1}{30} \left[\frac{E}{(1+\nu)} \frac{9(1+\nu)(1-2\nu)SK_n + (7-5\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)SK_n + (1-\nu)E} \right] + \frac{2}{5} \frac{ESK_s}{2(1+\nu)SK_s + E} \quad (15)$$

که در آن‌ها \bar{K} مدول حجمی توده‌سنگ، \bar{G} مدول برشی توده‌سنگ، ν ضریب پواسون ماده‌سنگ، K_n و K_s سختی قائم و برشی درزه و S فاصله‌داری درزه‌ها هستند. با در اختیار داشتن \bar{K} و \bar{G} می‌توان

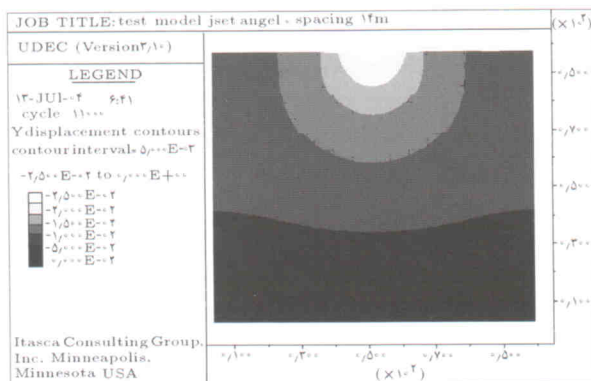
حداقل σ_z و τ_{xy} و $\sqrt{(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{F})^2 + \tau^2}$ از جدول ۵، در هر گام ۱۱ محاسبه می‌کند. سپس با توجه به مقدار تنش محصورکننده و با جای‌گذاری $J_f = 0$ در روابط ۲ تا ۴، می‌توان مدول ماده سنگ را در تنش محصورکننده‌ی مورد نظر به دست آورد. این مقدار در رابطه‌ی ۹ جای‌گذاری می‌شود تا مدول توده سنگ در تنش محصورکننده‌ی مورد نظر به دست آید. تمام این محاسبات در زیر برنامه‌ی Fish صورت می‌گیرد. به‌عنوان نمونه از تحلیل محیط معادل و ناپیوسته، محیطی با فاصله‌داری درزه‌های ۱۴ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضریب درزه در این مدل ۰.۷۴ است. مقدار ν_{ij} با توجه به روابط فوسوم برابر ۰.۱۶۶ به دست آمده است.



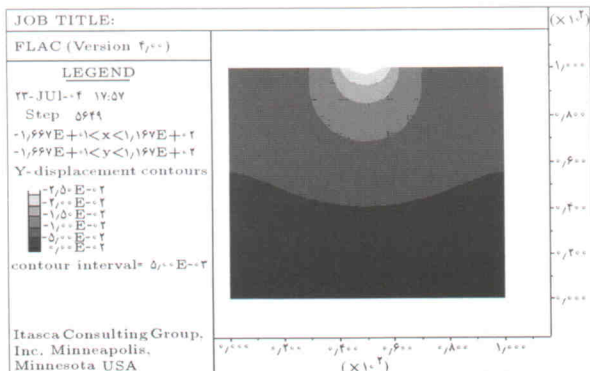
شکل ۹. مدول در جهت y.



شکل ۱۰. مدول در جهت x.



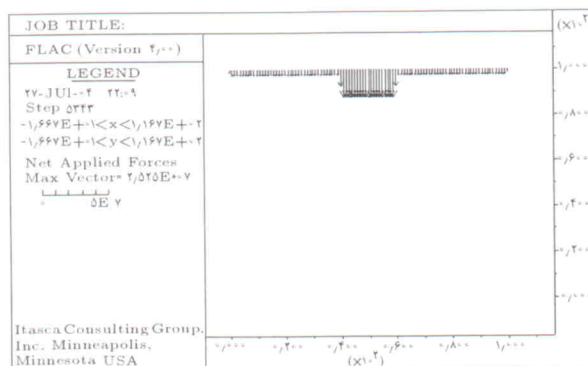
شکل ۱۱. جابه‌جایی قائم - تحلیل محیط ناپیوسته.



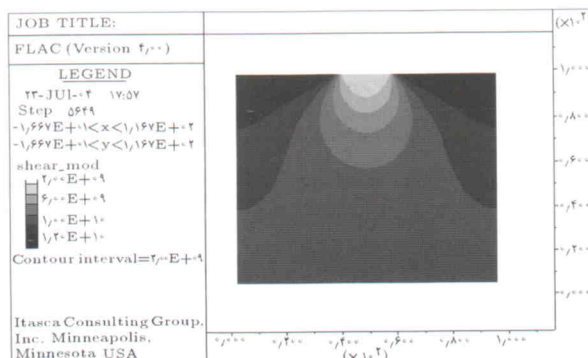
شکل ۱۲. جابه‌جایی قائم - تحلیل محیط معادل.

شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی نحوه بارگذاری بر مدل و شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی توزیع مدول برشی در مدل پس از تعادل نهایی می‌باشند. همان‌طور که انتظار می‌رود مدول برشی نیز متناسب با تنش تغییر می‌کند. زیرا که مدول‌ها در جهت x و y متناسب با تنش تغییر پیدا کرده‌اند. شکل‌های ۹ و ۱۰ مؤید تغییر مدول در جهت x و y متناسب با تنش هستند. جابه‌جایی قائم حاصل از تحلیل محیط ناپیوسته و پیوسته در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو تحلیل دارای جواب‌های نزدیک به هم هستند.

چنانچه توزیع تنش قائم در دو مدل رسم شود (شکل‌های ۱۳ و



شکل ۷. نحوه بارگذاری بر روی مدل.



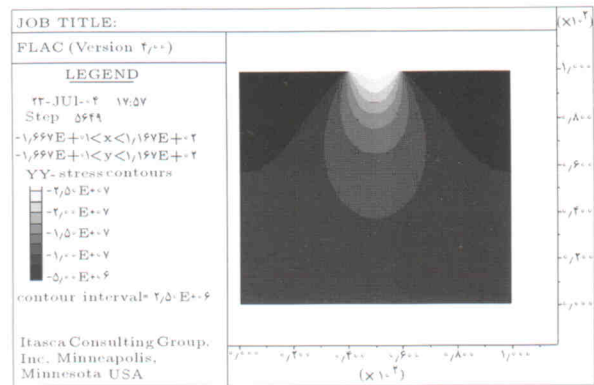
شکل ۸. مدول برشی حاصل از تحلیل معادل.

مدل‌های حاوی یک دسته درزه با شیب‌های مختلف در این مدل‌ها شیب درزه‌ها از صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند و فاصله‌داری درزه‌ها ۴ متر است. در این حالت نیز مدل رفتاری، همسانگرد متقاطع است. به‌عنوان نمونه، تحلیل محیطی شامل درزه‌هایی با شیب ۳۰ درجه در دو محیط ناپیوسته و پیوسته نشان داده می‌شود. در این مدل ضریب درزه ۵/۱۷ است. از روابط فوسوم ۱۶۴/۰ به دست آمده است. شکل ۱۵ نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی‌های قائم در مدل المان مجزا است. شکل ۱۶ نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی‌های قائم در مدل معادل است. نتایج حاصل از دو تحلیل معادل و المان مجزا در جدول ۹ مشهود است.

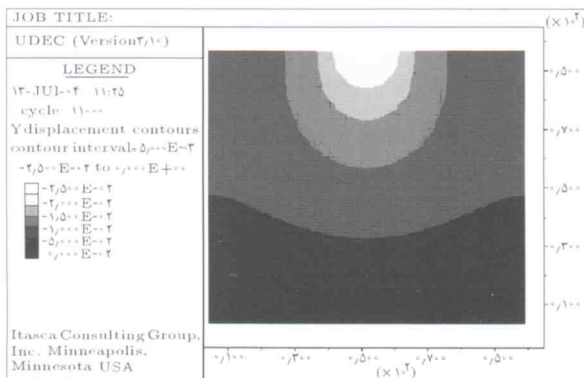
جدول ۹ مؤید این مطلب است که درزه‌هایی با شیب ۶۰ درجه، بیشترین جابه‌جایی را سبب می‌شوند. ضعف توده‌سنگ در اثر درزه با شیب ۶۰ درجه توسط محققینی چون رامامورتی و جیگر ۱۲ مورد تأیید قرار گرفته است. [۱۲]

مدل حاوی دو دسته درزه (بحرانی‌ترین حالت) پس از بررسی پاسخ محیط معادل اصلاح شده‌ی سیتارام نسبت به فاصله‌داری درزه‌ها و شیب درزه‌ها، رابطه‌ی ۹ به‌همراه ضرایب معرفی شده در بحرانی‌ترین حالت مورد بررسی قرار می‌گیرند. بحرانی‌ترین

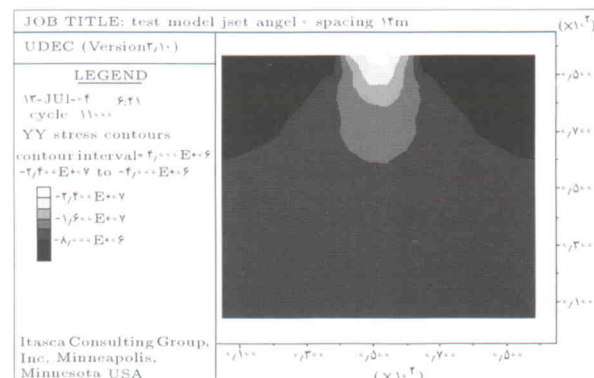
(۱۴)، مشاهده می‌شود که حباب فشار ایجاد شده در محیط معادل، به‌صورت پیوسته و در محیط درزه‌دار به‌صورت ناپیوسته است. جدول ۸ بیشترین جابه‌جایی قائم متناسب با فاصله‌داری درزه‌ها را در دو مدل معادل و ناپیوسته را نشان می‌دهد. بیشترین جابه‌جایی قائم در نقطه‌ی (۱۰۰ و ۵۰) رخ می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش فاصله‌داری درزه‌ها، جابه‌جایی نیز بیشتر می‌شود. مطابق جدول مذکور در می‌بایم محیط معادل اصلاح شده‌ی سیتارام به‌همراه ضرایب معرفی شده در جدول ۵ توانایی پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ را دارد.



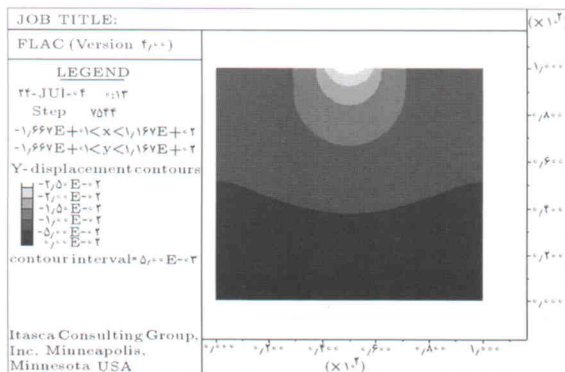
شکل ۱۳. تنش قائم حاصل از تحلیل محیط معادل.



شکل ۱۵. جابه‌جایی قائم در مدل المان مجزا.



شکل ۱۴. تنش قائم حاصل از تحلیل محیط ناپیوسته.



شکل ۱۶. جابه‌جایی قائم در مدل معادل.

جدول ۸. بیشترین جابه‌جایی قائم در نقطه‌ی (۱۰۰ و ۵۰).

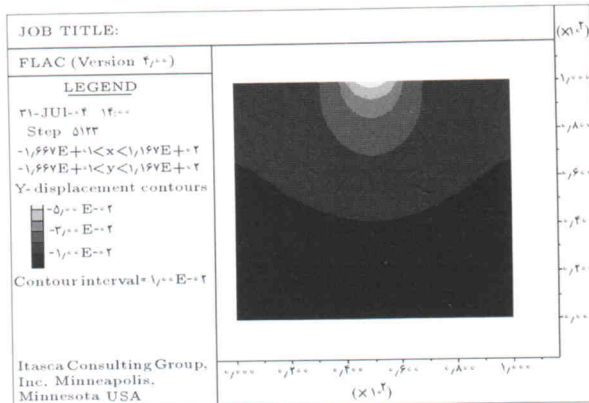
فاصله داری درزه‌ها (متر)	بیشترین جابه‌جایی قائم در مدل معادل (سانتی‌متر)	بیشترین جابه‌جایی قائم در مدل ناپیوسته (سانتی‌متر)
۱۴	۲,۶۴۳	۲,۷۴۵
۱۰	۲,۷۵۳۷	۲,۷۹۲
۸	۲,۸۲۳	۲,۹۵۷
۶	۲,۹۴۲	۳,۱۲۰
۲	۴,۲۱	۴,۵۱۸
۱	۵,۹۳	۶,۸

جدول ۹. بیشترین جابه‌جایی در مدل‌های مختلف.

شیب درزه (درجه)	جابه‌جایی حاصل از تحلیل مدل معادل (سانتی‌متر)	جابه‌جایی حاصل از تحلیل المان (سانتی‌متر)
۰	۲٫۶	۲٫۳۷
۲۰	۲٫۷۲	۲٫۴۳
۳۰	۲٫۸۴	۲٫۵۸
۴۰	۲٫۹۶	۲٫۶۵
۵۰	۳٫۲۴	۲٫۹۷
۶۰	۳٫۳۴	۳٫۱۹
۷۰	۳٫۳۵۸	۳٫۱۲
۹۰	۳٫۰۴۷	۲٫۸۵

جدول ۱۰. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل محیط درزه‌دار و معادل.

بیشترین جابه‌جایی در درزه‌ها (درجه)	بیشترین جابه‌جایی در تحلیل معادل (سانتی‌متر)	بیشترین جابه‌جایی در تحلیل المان مجزا (سانتی‌متر)
۹۰	۵٫۹۵	۶٫۳۲
۴۵	۳٫۱۴	۳٫۴۷



شکل ۱۸. جابه‌جایی در جهت قائم تحلیل معادل.

در جدول ۱۰ آورده شده است.

با مشاهده‌ی جدول ۱۰ می‌توان دریافت که در بحرانی‌ترین حالت نیز رابطه‌ی اصلاح شده سیتارام به همراه ضرایب معرفی شده، توانایی پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ را دارد. جابه‌جایی در حالتی که زاویه‌ی بین درزه‌ها ۹۰ درجه است بیش از حالت ۴۵ درجه است.

بررسی مقاومت معادل پیشنهادی سیتارام

برای بررسی رابطه‌ی مدول اصلاح‌شده سیتارام، از مدل‌سازی عددی استفاده شد. به منظور بررسی عملکرد رابطه‌ی تخمین مقاومت پیشنهادی سیتارام، مقادیر حاصل از رابطه‌ی مذکور با مقاومت تخمینی حاصل از روابط رامامورتی، هوک و براون، کالامارس و بارتن مقایسه می‌شود. در ادامه، به شرح مختصری از روابط یاد شده می‌پردازیم.

کالامارس و بنیاوسکی^{۱۳} رابطه‌ی ۱۶ را به منظور برآورد مقاومت توده‌سنگ از روی مقاومت ماده‌سنگ و طبقه‌بندی RMR، پیشنهاد کرده‌اند.^[۸] که در آن زیرنویس i معرف ماده‌سنگ و j معرف توده‌سنگ است. همچنین نشانه‌ی مقاومت توده‌سنگ است.^[۱۶ و ۸]

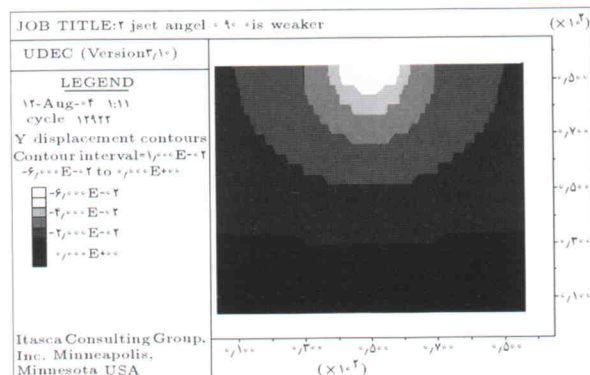
$$\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \text{Exp} \left[\frac{(RMR - 100)}{24} \right] \quad (16)$$

بارتن^[۱۷] اثر مقاومت فشاری ماده‌سنگ را به صورت زیر در طبقه‌بندی Q وارد کرده است:

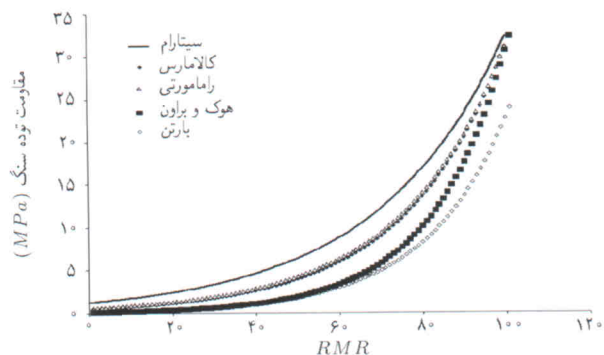
$$Q_c = \frac{Q \sigma_{ci}}{100} \quad (17)$$

حالت، حالتی است که در محیط دو دسته درزه عمود بر هم، یک دسته درزه با خواص مکانیکی ضعیف‌تر حضور داشته باشد.^[۱۴ و ۱۳] در این بخش مدل‌هایی شامل دو دسته درزه با اختلاف زاویه‌ی ۹۰ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خواص یکی از دسته درزه‌ها همان خواص جدول ۶، خواص دسته درزه دیگر، با فاصله‌داری ۴ متر، K_s و به ترتیب K_n برابر ۲٫۱۲ و ۳٫۷۵ Gpa در نظر گرفته شده است. و خواص ماده‌سنگ مطابق جدول ۷ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دسته درزه دوم ضعیف‌تر از دسته درزه اول است؛ لذا در این حالت نیز مدل همسانگرد متقاطع مورد استفاده قرار می‌گیرد.^[۱۵] در این مدل‌ها، درزه‌ها دارای فاصله‌داری ۴ متر هستند. بحرانی‌ترین حالت، حالتی است که در آن اختلاف شیب دو دسته درزه ۹۰ درجه است. در این قسمت به عنوان نمونه، تحلیل مدل با اختلاف ۹۰ درجه نشان داده می‌شود. γ روابط فوسوم ۰٫۱۶۴ به دست آمده است. و ضریب درزه ۰٫۳۱۵ است.

در این قسمت نیز بارگذاری و محاسبه‌ی مدول‌ها همانند قسمت قبل است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نتایج مدل‌سازی عددی در دو حالت ناپیوسته و معادل با هم مقایسه شده‌اند. نتایج بقیه‌ی تحلیل‌ها



شکل ۱۷. جابه‌جایی در جهت قائم، تحلیل المان مجزا.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی تخمین مقاومت توده‌سنگ ژئیس.

۱۹ مشهود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی پیشنهادی سیتارام بیشترین مقاومت، و رابطه‌ی بارتن کم‌ترین مقدار مقاومت را برای توده‌سنگ برآورد می‌کنند. روابط کالامارس و رامامورتی مقاومت یکسانی را برای توده‌سنگ یاد شده برآورد می‌کنند. بررسی‌ها بر روی سنگ‌های دیگر نیز مؤید همین نتایج است. لذا رابطه‌ی سیتارام بزرگ‌ترین تخمین، و رابطه‌ی بارتن کم‌ترین تخمین را برای مقاومت توده‌سنگ برآورد می‌کنند. چنانچه رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۲ قرار گیرد، خواهیم داشت:

$$\sigma_{cj} = \sigma_{ci} \exp\left(\frac{RMR - 100}{25}\right) \quad (26)$$

با مقایسه‌ی رابطه‌ی ۱۶ در می‌یابیم که این روابط بسیار به هم نزدیک‌اند.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار محیط معادل پیشنهادی سیتارام مورد بررسی قرار گرفت. مدل پیشنهادی وی، مدل توده‌سنگ را بیش از مدل ماده‌سنگ برآورد می‌کرد؛ لذا مدل وی به صورت رابطه‌ی ۹ تصحیح شد. سیتارام ضریب a را تا ۷ Mpa پیشنهاد کرده است. در مقادیر بیش از ۷ Mpa امکان انجام برون‌یابی وجود ندارد، لذا با توجه به روابط رامامورتی ضریب a در تنش‌های بیش از ۷ Mpa پیشنهاد شد. ضریب a در تنش ۷ Mpa با مقدار پیشنهادی سیتارام حدود ۶٪ اختلاف دارد. مدل‌های عددی فرضی در دو محیط درزه‌دار و معادل اصلاح‌شده مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج بیانگر این موضوع است که محیط معادل اصلاح‌شده‌ی سیتارام به همراه ضرایب معرفی شده در جدول ۵ توانایی پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ در اثر حفر فضای زیرزمینی را دارد.

بررسی‌ها در مورد رابطه‌ی سیتارام برای برآورد مقاومت توده‌سنگ بیانگر این موضوع است که رابطه‌ی پیشنهادی سیتارام بیشترین مقاومت را برای توده‌سنگ پیش‌بینی می‌کند. کم‌ترین مقدار مقاومت توسط رابطه‌ی پیشنهادی بارتن تخمین زده می‌شود. روابط کالامارس و رامامورتی مقاومت یکسانی را برای توده‌سنگ یاد شده برآورد می‌کنند.

همچنین وی رابطه‌ی ۱۸ را به منظور برآورد مقاومت فشاری توده‌سنگ پیشنهاد کرده است: [۱۷]

$$\sigma_{cj} = 57Q_c^{\frac{1}{3}} \quad Mpa \quad (18)$$

که در روابط فوق γ وزن مخصوص توده‌سنگ برحسب $\frac{gr}{cm^3}$ است. همچنین بارتن رابطه‌ی بین RMR و Q را نیز به صورت زیر تصحیح کرده است.

$$RMR = 15 \times \log Q + 5 \quad (19)$$

هوک و براون ارتباط طبقه‌بندی GSI و RMR را مطابق روابط ۲۰ و ۲۱ بیان کرده‌اند: [۱۸]

$$GSI = RMR_{\gamma 6} \quad (20)$$

$$GSI = RMR_{\lambda 9} - 5 \quad (21)$$

و هنگامی که RMR کوچک‌تر از ۲۳ باشد، باید از روابط زیر استفاده کرد:

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \quad (22)$$

$$GSI = 9 \log Q' + 44 \quad (23)$$

در توده‌سنگ‌های دست‌نخورده، می‌توان مقاومت توده‌سنگ را از رابطه‌ی ۲۴ و ۲۵ تخمین زد.

$$s_j = \exp\left[\frac{(GSI - 100)}{9}\right] \quad (24)$$

$$\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \sqrt{s_j} \quad (25)$$

همان‌طور که در رابطه‌ی ۲۵ مشهود است، در برآورد مقاومت فشاری توده‌سنگ، دوبار مقاومت فشاری ماده‌سنگ لحاظ شده است. یک بار مقاومت فشاری ماده‌سنگ در برآورد مقدار GSI و بار دیگر مقاومت فشاری ماده‌سنگ در رابطه‌ی ۲۵ استفاده شده است. در سیستم GSI اثر جریان آب در نظر گرفته نشده است. سنگ ژئیس با مدل ۵/۹۴ Gpa، دانسیته $\frac{gr}{cm^3}$ ۲/۳۲ و مقاومت تراکمی تک محوره ۳۲/۲۱ Mpa در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، مقاومت توده‌سنگ با توجه به مقاومت ماده‌سنگ و شرایط درزه تعیین می‌شود؛ لذا با در اختیار داشتن مقاومت ماده‌سنگ می‌توان مقاومت توده‌سنگ را در ازای RMRهای مختلف رسم کرد. به دلیل ارتباطش با سایر طبقه‌بندی‌ها و ضریب درزه انتخاب شده است. تخمین مقاومت توده‌سنگ ژئیس حاصل از روابط هوک و براون، رامامورتی، کالامارس و بارتن در شکل

پانوشت

1. Sitharam
2. Hoek
3. Brown
4. Ramamurthy
5. Kalamaras
6. Barton
7. Sridevi
8. failure ratio
9. tranverse isotropic
10. lekhnicki
11. step
12. Jeager
13. Bieniawski

منابع

1. Sridevi, J., Sitharam, T.G., "Analysis of strength and moduli of jointed rocks", *Geotechnical and Geological Engineering*, **18**, PP. 3-21 (2000).
2. Sridevi, J., Sitharam, T.G., Shimizu, N., "Practical equivalent continuum characterization of jointed rock masses", *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **38**, PP. 437-448 (2001).
3. Sitharam, T.G., Madhavi, Latha, "Simulation of excavations in jointed rock masses using a practical equivalent continuum approach", *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **39**, PP. 517-525 (2002).
4. Sridevi, J., Sitharam, T.G., "Characterization of strength and deformation of jointed rock mass based on statistical analysis", *Int. Journal of Geomechanics, ASCE*, **3**,(1), PP. 1-12 (2003).
5. Sridevi, J., Sitharam, T.G., Chandrashekar, H.M., "Simulation of jointed rock behavior using finite element method", *J. Rock Mech Tunneling Technol India*, **6**(2), PP. 113-132, (2000).
6. Sridevi, J., Sitharam, T.G., "Non-Linear analysis of jointed rock using equivalent continuum approach", *J. Rock Mech Tunneling Technol India*, **3**(2), PP. 109-126 (2000).
7. Ramamurthy, T., "Strength and modulus responses of anisotropic rocks", *Comprehensive Rock Engineering*, **1**, Ch.13, Pergamon press, PP. 313-329 (1993).
8. Ramamurthy, T., "A Geo-Engineerin classification for rocks and rock masses", *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **41** PP. 89-101 (2004).
9. Duncan JM., Chang CY., "Non-linear analysis of stress and strain in soils", *J Soil Mech Found Eng , ASCE*, **5**, PP. 1629-52 (1970).
10. Itasca consulting Group, Inc., "FLAC, fast lagrangian analysis of continua", version 4, User's Manual.
11. Fosum A.F., "Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass.", *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.*, **22**, PP. 467-70 (1985).
12. Ramamurthy, T., Arora, V.K., "Strength prediction for jointed rocks in confined and unconfined states", *Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **31**, PP. 9-22 (1994).
13. Singh, B., "Continuum characterization of jointed rock masses Part I The constitutive equations." *Int. J. Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr.*, **10** pp.311-335, (1973).
14. Singh. B., " Continuum characterization of jointed rock masses part II significance of low shear modulus." , *Int. J. Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr.*, **10**, pp. 337-349, (1973).
15. Itasca Consulting Group, Inc., "UDEC, Universal Distinct Element Code", Version 3/1, User's Manual.
16. Bieniawski, Z.T., "Engineering classification of jointed rock masses" *Trans. S. Afr. Inst. Civil Eng;* 15 (12) pp.335-344, (1973).
17. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 39 (2) pp. 185-216 (2002).
18. Hoek, E., Brown, ET. "Practical estimates of rock mass strength" *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*; **34** pp.1165-86, (1997).