

بررسی و مدل سازی تأثیر شیب داری درزه ها بر سرعت چالزنی در معادن روباز

نوشته: سید هادی حسینی*، حمید آقابابایی** و یاشار پوررحیمیان**

* دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران؛ ** دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

Investigation and Modeling of Joints Dipping Effects on Drilling Rate in Open Pit Mines

By: S.M.Hoseinie *H.Aghababaei **& Y. Pourrahimian**

*Faculty of Mining Engineering & Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

**Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

تاریخ پذیرش: ۸۵/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۸۴/۰۸/۰۲

چکیده

چالزنی به عنوان یکی از پرهزینه ترین مراحل معدن کاری روباز، از پیچیدگی بسیار زیادی برخوردار است. پارامترهای فراوانی به طور همزمان بر فرایند چالزنی تأثیر می گذارند که مطالعه هر پارامتر نیازمند شناخت تأثیر ویژگیهای ماده سنگ و توده سنگ است. در مقاله حاضر، از میان پارامترهای ساختاری توده سنگ، شیب داری سامانه درزه ها مورد مطالعه قرار گرفته است. طی مطالعات ابتدا با تحلیل هندسی شرایط نفوذ و عبور مته از سطح درزه و شرایط مختلف شیب داری به صورت ریاضی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه با انجام مدل سازی فیزیکی هر یک از شرایط هندسی، آهنگ نفوذ مته چهار پره صلیبی با استفاده از روش دورانی اندازه گیری شده است. در پایان با توجه به نتایج عددی حاصل از آزمایشها، رابطه ریاضی بین زاویه شیب درزه نسبت به امتداد چالزنی و آهنگ نفوذ ارائه شده است. بر اساس رابطه ارائه شده، با کاهش زاویه بین سطح درزه و امتداد چالزنی، آهنگ نفوذ مته در توده سنگهای درزه دار به صورت خطی کاهش می یابد.

کلید واژه ها: چالزنی، توده سنگ، درزه، شیب داری، آهنگ نفوذ مته

Abstract

Drilling is one of the most expensive stages of open pit mining and has more complexity. In drilling process many parameters influence simultaneously, where studying each parameter requires recognition of the effects of the characteristics of the rock mass and its material.

In this paper, the main aim was directed to investigate the joints dipping among the structural parameters of the rock mass. In the course of study, geometrical condition of penetration and transition of drill bit from joint surface were analyzed and different conditions of dips considered mathematically. This was followed by physical modeling of each of the geometrical conditions and penetration rate of cross bit measured by using rotary drilling system. Based on the numerical results obtained from experiments, mathematical equation between angles of joint dip with respect to drilling prolongation and penetration rates was presented. Furthermore, in conformity with the presented equation, by decreasing relative angle of joints dip, penetration rate of drill bit in jointed rock masses decreases linearly.

Key words: Drilling, Rock mass, Joints, Dipping, Penetration rate of drill bit

مقدمه

جهت بهینه سازی آن، شرایط را برای استخراج بهینه فراهم می سازد. چالزنی اصولی در نهایت منجر به انفجار مناسب، خردشدگی مطلوب و کاهش مؤثر هزینه ها می شود.

در معدن کاری روباز، چالزنی به عنوان اولین مرحله عملیات استخراج نقش بسیار تعیین کننده ای بر دیگر مراحل استخراج دارد. با توجه به هزینه بالا و ماشین آلات گران، شناخت تمامی پارامترهای دخیل در چالزنی و تلاش

از این نقاط ضعف می توان در بعضی موارد شکستن سنگ را راحت تر صورت داد. چالزنی در سنگهای درز و شکاف دار به مراتب مشکل تر از سنگهای بدون درز و شکاف است (استوار، ۱۳۸۰).

در شرایطی که سامانه درزه ها چال را قطع می کند، شرایط بسیار بحرانی برای چالزنی رخ می دهد. شیب داری درزه ها باعث افت بار مؤثر پشت مته و نیز ریزش مواد پرکننده درزه ها در چال و باعث کاهش آهنگ نفوذ و گاهی قفل شدگی مته می شود. همچنین وجود درزه های شیب دار بویژه با شیب زیاد باعث انحراف چال و افزایش حفاری ویژه می شود.

اثر درزه های شیب دار در کاهش بار پشت مته

بار پشت مته یکی از مهم ترین عوامل تأثیر گذار بر سرعت حفاری روشهای دورانی و دورانی - ضربه ای است. از جمله پارامترهای مهم در میزان بار پشت مته می توان به الف) نوع سیستم حفاری ب) اندازه قطر مته ج) میزان تیزی تیغه مته و د) ساخت و مقاومت سنگ اشاره کرد (اصانلو، ۱۳۷۵). وجود درزه های شیب دار به عنوان یک عامل ساختاری (عامل د) میزان بار پشت مته و در نهایت سرعت چالزنی را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد.

در مقاله حاضر برای بررسی تأثیر شیب داری بر آهنگ نفوذ حفاری، زاویه میان سطح درزه و محور حفاری ملاک مطالعه قرار گرفته است. چنانچه در شکل ۱ نشان داده شده، در سطح درزه های شیب دار بار پشت مته F به صورت تابعی از زاویه (α) به دو مؤلفه موازی سطح درزه (F_x) و عمود بر سطح درزه (F_y) تجزیه می شود. مؤلفه F_x مهم ترین دلیل انحراف چال و کاهش بار پشت مته است. با کاهش زاویه (α) مقدار $F_x = F \cos(\alpha)$ افزایش یافته و عامل انحراف چال و کاهش نفوذ مته تقویت می شود.

بررسی حجم بحرانی در زون سطحی درزه ها

در این مقاله برای بررسی شرایط نفوذ پذیری سطح درزه های شیب دار، به منظور انتخاب یک کمیت عملی برای مقایسه شرایط مختلف، حجم درگیر با نوک مته پیش از نفوذ کامل آن در بلوک زیرین سطح درزه به عنوان حجم بحرانی معرفی می شود. در هنگام رسیدن مته به سطح درزه، اعم از تخت یا شیب دار، شرایط نفوذ مته در سنگ دقیقاً شبیه حالت شروع اولیه چالزنی می گردد. در این حالت، مدت زمان مکان یابی و جانمایی مته در سطح درزه یکی از عوامل تأخیر نفوذ سیستم حفاری در سنگ و سطح درزه است. هر چه شیب نسبی سطح درزه (α) کمتر شود، حجم بحرانی افزایش یافته و به نسبت همین حجم، زمان حفاری زیادتر گردیده و آهنگ نفوذ مته در درزه کاهش می یابد. در شکل ۲ شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه ها با شیبهای مختلف و در شکل ۳ حجم بحرانی تقریبی در شیبهای مختلف برای قطر چالزنی سه اینچ نشان داده شده است. در این شکل به منظور تعیین

چالزنی همانند دیگر مراحل استخراج به طور مستقیم با توده سنگ در ارتباط تنگاتنگ بوده و از خصوصیات ژئومکانیکی ماده سنگ و عوارض ساختاری توده سنگ اثر می پذیرد. لذا شناخت محیط حفاری و ویژگیهای توده سنگ بر جاکمک بسیار زیادی به انتخاب نوع روش چالزنی، تعداد ماشین آلات و توان تولید معدن خواهد کرد. در بحث از توده سنگ، ناپیوستگیها به عنوان مهم ترین عوارض ساختاری نقش بسیار تعیین کننده ای بر رفتار کلی توده سنگ بویژه از نظر چالزنی دارند. در کنار پارامترهای مربوط به ماده سنگ همچون بافت، دانه بندی، چگالی، سختی، مقاومت فشاری، پارامترهایی همچون فاصله داری، نوع و میزان پرکننده، شیب داری، پایایی (تداوم) و زبری از جمله ویژگیهای سامانه درزه ها هستند که رفتار توده سنگ را از نظر چالزنی تحت تأثیر قرار می دهند. با این حال در مطالعات جهانی پیرامون حفاری به ویژگیها و اثرات چشمگیر درزه ها در چالزنی کمتر پرداخته شده است.

تاکنون در جهان متخصصان زیادی به روشهای مختلف، پارامترهای دخیل در چالزنی را مطالعه و طبقه بندی کرده اند از جمله: Singh, 1990 ; Zhu, 1988 ; Wilbur & Lyman, 1982) Kaiser & McCreath, 1994 ; Wijk, 1991; Drake, 2004 ; Ersoy & Waller , 1995 ; Jung et al. , 1994 ; Jimeno & Carcedo, 1995; Kahraman et al., 2000 ; Kahraman, 1999; Singh et al., 1998).

در کلیه کتابها و مقالات چاپ شده پارامترها عموماً به دو بخش مربوط به ویژگیهای ماده سنگ و مشخصات ساختاری توده سنگ تقسیم شده اند. Wilbur & Lyman (1982) در روش طبقه بندی خویش، به ساخت توده سنگ اشاره کیفی کرده اند. در این روش از عبارات توده ای، ورقه ای، رگه ای و بلوکی برای توصیف توده سنگها استفاده شده و هیچ اشاره ای به ویژگی سامانه درزه ها نشده است. Jimeno & Carcedo (1995) ضمن اشاره به پارامترهای ذاتی سنگ از اثرات ناپیوستگی از جمله درزه ها، شکافها، گسلها و لایه های ضعیف به اختصار بحث کرده اند و به رغم اینکه تا حدودی به اثر فاصله داری درزه ها اشاره شده اما بحثی از اثر شیب داری درزه ها بر فرایند چالزنی به چشم نمی خورد. Singh et al. (1998) در بررسی عوامل دخیل در میزان انحراف چالهای آتشفکری، عملکرد پارامترهای مختلفی از توده سنگ از جمله مقاومت سنگ، ناهمسانگردی، لایه بندی و مشخصات درزه ها بویژه شیب داری درزه ها را مورد تأکید قرار داده اند. Kahraman et al. (2000) با اشاره به پارامترهای ذاتی متعدد سنگها و اثر ویژگیهای ماده سنگ هیچ گونه بحثی از اثرات سامانه درزه ها بویژه شیب داری انجام نداده اند.

اثرات درزه داری بر چالزنی معادن روباز

سطح مشترک بین لایه ها، وجود درزه های متعدد در توده سنگ و وجود گسلها نقاط ضعفی هستند که به شکستن سنگ کمک می کنند و با استفاده

و ویژگیهای طراحی شده قبلی، نمونه ها از نظر مقاومت فشاری، چگالی و سختی آزمایش شدند که نتایج بیانگر تطابقت بسیار خوب مدلها با ترکیب طراحی شده بود.

مراحل چالزنی و مطالعات زمان سنجی مدلها

تمامی پنج بلوک بتنی مدل سازی شده پس از طی مراحل قالب ریزی و عمل آوری در آزمایشگاه، توسط دستگاه حفاری (Atlas Copco 512HC) (شکل ۵) و با استفاده از مته تیغه ای چهار پر (Cross type Bit با علامت (+)) مورد حفاری قرار گرفتند. برای این کار پنج زاویه نسبی بین سطح درزه و امتداد چال با مقادیر ۹۰، ۷۰، ۵۵، ۳۵ و ۲۰ درجه انتخاب شد و سپس مدل های فیزیکی تهیه شده بر مبنای ورود لبه تیغه به اندازه ۵ میلی متر در سطح درزه مورد زمان سنجی حفاری قرار گرفتند (زمان ثبت شده برای هر حالت برابر بود با زمان شروع حفاری تا ورود ۵ میلی متر کامل از مته در سطح درزه شیب دار) (شکل ۶).

نمودار ستونی شکل ۷ زمان نفوذ مته در سطح شیب دار درزه های مدل سازی شده را با توجه به پنج حالت نشان داده شده در شکل ۴ نشان می دهد. چنانچه از نمودار ستونی بر می آید با افزایش α ، حجم بحرانی سطح درزه کاهش یافته و زمان نفوذ مته در سطح شیب دار درزه نیز همگام با آن کاهش می یابد. با توجه به منحنی ایجاد شده بر روی نتایج عددی مدل سازیهای فیزیکی انجام شده در شکل ۸ و با عنایت به $R^2 = 0.99$ ، بر اساس رابطه به دست آمده به وضوح آشکار می شود که با افزایش زاویه α (زاویه بین سطح درزه و امتداد چالزنی) زمان عبور مته از سطح درزه به طور خطی کاهش یافته و آهنگ نفوذ نیز به شکل خطی افزایش می یابد. میزان R^2 بسیار بالای به دست آمده از رگرسیون داده ها، حاکی از کنترل مناسب پارامترهای فیزیکی بنتهای ساخته شده در آزمایشگاه و نیز کنترل دقیق رفتار دستگاه چالزنی از جمله سرعت دوران، فشار پشت مته، فشار روغن و وضعیت هیدرولیکی آن در طی انجام پروژه است. کنترل دقیق عوامل فوق باعث کمینه شدن دخالت و تأثیر متغیرها و پارامترهای دیگر در نتایج تحقیق می شود.

نتیجه گیری

چنانچه در بخشهای قبل نیز گفته شد، شیب داری درزه های توده سنگ یکی از مهم ترین ویژگیهای سامانه درزه ها است که فرایند چالزنی را به طور بارز تحت تأثیر قرار می دهد. وجود درزه های شیب دار در مسیر چالزنی باعث تجزیه بار پشت مته شده و در نتیجه سرعت و توان پیشروی سیستم حفاری را به طور بارزی کاهش می دهد.

در این مقاله، کمیت معرفی شده به نام حجم بحرانی، شاخص بسیار مناسبی در تحلیل هندسی و ریاضی آهنگ نفوذ مته در سطح درزه ارائه می کند.

احجام بحرانی تقریبی، فضای حفر شده توسط مته به صورت یک منشور با قاعده دوزنقه و ارتفاع سه اینچ در نظر گرفته شده و محاسبات انجام پذیرفته است.

شایان ذکر است در حین کاهش زاویه α ، افزایش حجم بحرانی و کاهش بار پشت مته مهم ترین عوامل کاهش آهنگ نفوذ مته در سطح درزه های شیب دار هستند.

پس از معرفی و کاربرد حجم بحرانی در تحلیل حفاری درزه های شیب دار، به منظور بررسی کمی و برداشت نتایج عددی مربوط به هریک از شرایط هندسی شکل ۲، تمامی وضعیتهای ذکر شده توسط بتن مدل سازی فیزیکی شدند.

مدل سازی فیزیکی (انتخاب مصالح و طراحی بتن برای مدل سازی)

با توجه به تأثیر همزمان پارامترهای متعدد مربوط به ماده و توده سنگ در فرایند چالزنی، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر یک پارامتر بر روی کیفیت چالخوری نمونه های سنگی و معدنی با خطاهای زیادی همراه خواهد بود. لذا بهترین راهکار برای مطالعه یک پارامتر بدون تأثیر دیگر پارامترها، مدل سازی فیزیکی توده سنگها با مواد مصنوعی همچون بتن است. از آنجا که در مدل سازی فیزیکی توده سنگها هم ماده سنگ و هم ساختار توده های آن مهم هستند، لذا برای مطالعه تأثیر ویژگیهای درزه ها بر آهنگ نفوذ مدل های ساخته شده، ثابت نگه داشتن ویژگیهای فیزیکی ماده سنگ (مدل) الزامی است. با توجه به ویژگیهای بتن، به آسانی می توان در آزمایشگاه با تغییر نسبت اختلاط مصالح سنگی، آب، سیمان و ابعاد ذرات، به بتنهایی با ویژگیهای از پیش طراحی شده دست یافت. بنابراین با ذکر همه شرایط و با توجه به خاصیت قالب گیری و شکل پذیری، بتن بهترین ماده برای مدل سازی فیزیکی توده سنگهای درزه دار خواهد بود.

در این پروژه، چنانچه ذکر شد با توجه به شرایط و امکانات آزمایشگاهی، به منظور مطالعه و مدل سازی شیب داری درزه ها ضروری بود که پارامترهای عمده مربوط به ماده بتن آماده شده جهت مدلها ثابت نگه داشته شوند. با توجه به پارامترهای مربوط به ماده سنگ دخیل در چالزنی، در مدل سازی فیزیکی با بتن، چگالی، بافت (ابعاد دانه ها)، مقاومت فشاری تک محوری و سختی به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. جدول ۲ ویژگیهای فیزیکی بتن به کار برده شده در مدل سازی فیزیکی را نشان می دهد.

در مجموع در پروژه حاضر پنج بلوک بتنی با ابعاد $10 \times 50 \times 50$ سانتی متر مدل سازی شدند (شکل ۴). مجموع وزن قالبهای مدل سازی شده به بیش از ۳۲۰ کیلوگرم می رسد. تمامی پنج نمونه بتنی ساخته شده ۲۴ ساعت پس از قالب گیری در اتاق بخار به مدت ۷۲ ساعت و رطوبت خالص ۴٪ مورد عمل آوری قرار گرفتند. پس از عمل آوری، به منظور تطبیق بنتهای مدل شده

چالزنی (افزایش شیب درزه)، آهنگ نفوذ مته به طور خطی کاهش و زمان عبور از درزه به طور خطی افزایش می یابد.

سیاسگزاری

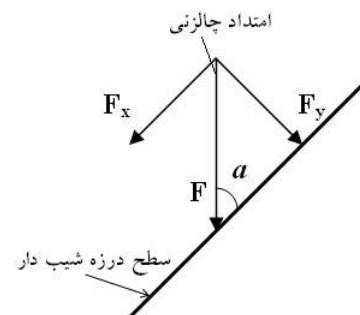
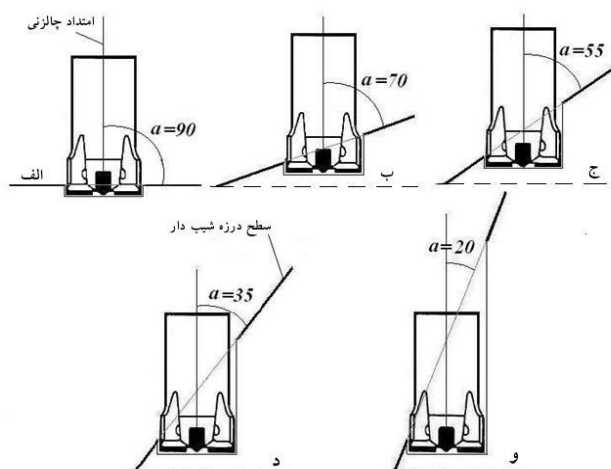
تحقیق حاضر با همکاری همه جانبه دانشکده مهندسی عمران (آزمایشگاه بتن و ژئوتکنیک) و کارخانجات سیمان صوفیان انجام شده است، لذا بر خود وظیفه می دانیم از زحمات کلیه این عزیزان کمال تشکر را داشته باشیم.

همچنین از راهنمایی و مساعدت آقایان دکتر حسن افشین (استادیار دانشکده مهندسی عمران)، مهندس نوری (مدیریت محترم امور معادن سیمان صوفیان)، مهندس محرم پور (ریاست محترم عملیات معادن سیمان صوفیان) و به ویژه همکاری صمیمانه و زحمات آقایان جعفر کرباسی، حمید محمد زاده و مهندس سهراب غیبی کمال قدردانی و امتنان را داریم.

حجم بحرانی به حجمی از سنگ گفته می شود که مته پیش از ورود کامل به بلوک زیرین درزه از سطح درزه می تراشد.

اطلاعات حاصل از چالزنی مدل های فیزیکی ساخته شده نشان می دهد که هر چه زاویه بین سطح درزه و امتداد چالزنی به ۹۰ درجه نزدیک تر باشد، سرعت چالزنی بیشتر شده و شرایط حفاری بهبود می یابد. لذا در معادن روباز که عملیات چالزنی بیشتر به صورت قائم انجام می شود، باید شیب داری درزه ها و جهت آنها نسبت به امتداد چالزنی به منظور انتخاب و تعیین شیب چالها و محل چالزنی تا جایی که امکانات و قابلیت های دستگاه چالزنی اجازه می دهد، مد نظر و ارزیابی خاص قرار گیرد. در مناطق درزه دار بهترین حالت و بالاترین سرعت چالزنی زمانی اتفاق می افتد که درزه ها عمده تا افقی یا بسیار کم شیب باشند.

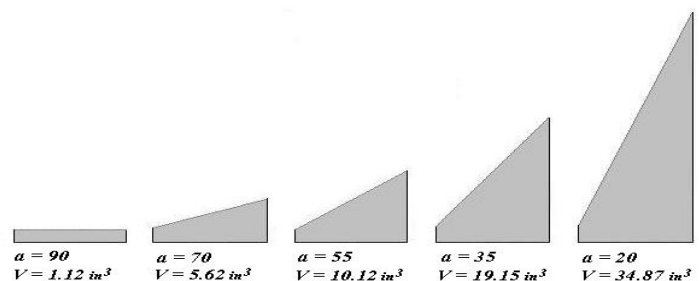
نتایج حاصل از مدل سازی فیزیکی درزه های شیب دار گویای این واقعیت است که در چالزنی دورانی، با کاهش زاویه نسبی میان سطح درزه و امتداد



شکل ۱- توزیع بار پشت مته در سطح درزه های شیب دار

شکل ۲- شرایط هندسی نفوذ مته در سطح درزه با شیب های مختلف مورد آزمایش

- الف) امتداد چالزنی عمود بر سطح درزه (بهترین حالت) $F_x = 0$
 ب) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۷۰ درجه $(F_x = 0.34F)$
 ج) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۵۵ درجه $(F_x = 0.57F)$
 د) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۳۵ درجه $(F_x = 0.81F)$
 و) زاویه بین سطح درزه و امتداد چال ۲۰ درجه $(F_x = 0.93F)$



شکل ۳- حجم های بحرانی در شیب های مورد آزمایش برای چالزنی با قطر سه اینچ



شکل ۵- دستگاه چالزنی مورد استفاده در آزمایشهای زمان سنجی



شکل ۴- نمونه ای از بلوکهای مدل سازی شده در آزمایشگاه



الف

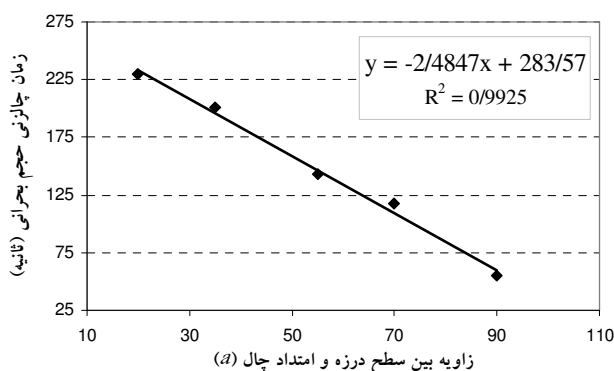


ب

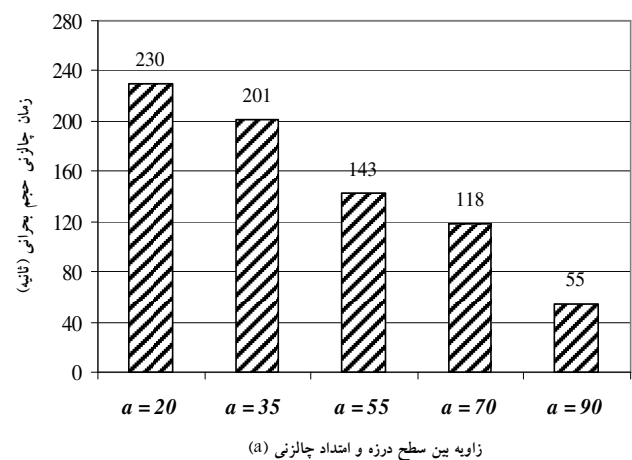


ج

شکل ۶- مراحل مختلف نفوذ سر مته در سطح درزه های شیب دار مدل سازی شده
(الف) لحظات اولیه ورود مته به سطح بلوکهای مدل سازی شده (ب) مته در حال حفر سنگ
(ج) اتمام حفاری و ثبت زمان مربوطه در مطالعات زمان سنجی (ورود ۵ میلی متر از مته در مدل)



۸- رابطه بین شیب داری درزه و زمان نفوذ مته



شکل ۷- زمان نفوذ مته در سطح شیب دار درزه های مدل سازی شده با شیبهای مختلف

جدول ۱- مقادیر F_x به ازای (a) های مختلف

0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	a
1F	0.98F	0.93F	0.86F	0.7F	0.64F	0.5F	0.34F	0.17F	0F	F_x

جدول ۲- ویژگیهای فیزیکی بتن برای مدل سازی فیزیکی

پورفیری	بافت
۴/۷۶ میلی متر (الک ۴)	بیشینه ابعاد دانه ها
۲/۶	چگالی
۷۵ - ۸۰ مگاپاسکال	مقاومت فشاری
۴	سختی

کتابنگاری

استوار، ر.، ۱۳۸۰- آتشکاری در معادن، جلد ۱، صفحات ۲۹۵ - ۲۹۰
اصانلو، م.، ۱۳۷۵- روشهای حفاری، مرکز نشر صدرا، صفحات ۱۹-۴۱ و ۵۸-۶۵

References

- Ersoy, A. & Waller., M.D., 1995 - Textural characterization of rocks. Engineering Geology, Volume 39, Issues 3-4, June, Pages 123-136
- Jimeno, C. L., Jimeno, E.L. & Carcedo, F.J.A., 1995- Drilling and blasting of rocks, Balkema. Pages 1-14
- Kaiser, P.K. & McCreath, D.R., 1994- Rock mechanics considerations for drilled or bored excavations in hard rock. Tunneling and Underground Space Technology, Volume 9, Issue 4, October, Pages 425-437
- Singh, S.P., 1990- Rock drillability comparison by different methods, Proc 2nd International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, 7-9 November, A.A Balkema, Publ Rotterdam, Pages 489-494
- Singh, S.P., Ladouceur, M. & Rouhi, F., 1998- Sources, implication and control of blasthole deviation, International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, A.A Balkema, Publ Rotterdam, Pages 391-397
- Jung, S.J., Prisbrey, K. & Wu, G., 1994- Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Volume 31, Issue 5, October, Pages 561-567
- Kahraman, S., Balci, C., Yazici, S. & Bilgin, N., 2000- Prediction of the penetration rate of rotary blasthole drilling using a new drillability index, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37, Pages 729-743
- Kahraman, S., 1999- Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, Pages 981-989.
- Drake, R., 2004- Bench drilling techniques and equipment selection manual, Pages 1-40.
- Wijk, G., 1991- Rotary drilling prediction, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Volume 28, Issue 1, January, Pages 35-42
- Wilbur, Lyman, D., 1982- Rock Tunnel Engineering Handbook, Edited by Bickel and Kuesel, A publication of van Norstrand Reinhold company, Pages 123-207
- Zhu, S.T., 1988- Experimental study of drillability for rotary rock bits, Proc International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, calgary, 3-4 November 1988, A A Balkema, Publ Rotterdam, Pages 375-381.