

## استخراج زیرزمینی در معادن سنگ‌های ساختمانی و تزئینی

علی معصومی



دانش آموخته مهندسی استخراج معدن از دانشگاه صنعتی شاهرود، عضو ارشد و مدرس دوره‌های ارتقاء پایه پروانه اشتغال نظام

مهندسی معدن، بهره‌بردار، مولف و مشاور در معادن سنگ‌های ساختمانی و تزئینی

### چکیده

ذخایر سنگ‌های تزئینی، شامل گروه وسیعی از سازندهای سنگی است که در دوران‌های زمین‌شناسی گوناگون و در سازندهای متعددی شکل گرفته‌اند.

گسترده‌گی این ذخایر معدنی موجب شده است که ساختار هندسی و ویژگی‌های مدل توصیفی متفاوتی نسبت به سایر ذخایر معدنی داشته باشند. بر این اساس و از منظر بهره‌وری، اولویت‌های مربوط به درجه‌بندی، ارزش‌گذاری و برنامه‌ریزی و اجرای طرح بهره‌برداری از سایر ذخایر معدنی متفاوت‌اند.

اگر چه یکپارچگی، طرح و نقش، ابعاد و شکل هندسی قطعات تولید شده در این قبیل معادن مهم هستند اما معیار و مشخصات هر کدام از آنها بر اساس نوع و جنس ذخیره در گروه‌های مشخص تعریف و اولویت‌بندی می‌شود. امروزه برای بهره‌برداری هر گروه از ذخایر سنگ تزئینی، متناسب با شکل هندسی ذخیره قابل استخراج (بقچه‌ای، توده‌ای، رگه‌ای، لایه‌ای یا منشوری) روش خاصی به کار می‌رود که در قالب طراحی ویژه هر ذخیره شکل می‌گیرد.

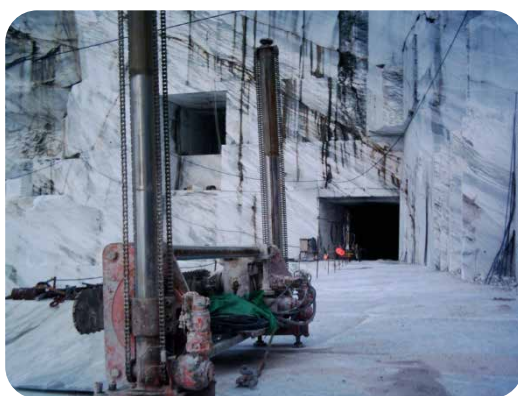
ذخایری با عمق اقتصادی متفاوت در این گروه جای دارند که نیاز به روش‌های علمی و محاسباتی را برای استخراج بهینه و افزایش بهره‌وری ناگزیر می‌سازند. این خود مستلزم به کارگیری ابزار و ماشین‌آلات منحصر به فردی است که در ابعاد کارگاهی مورد نظر کارایی داشته باشند.

**واژه‌های کلیدی:** طراحی استخراج، زیرزمینی، سنگ‌های تزئینی، اره زنجیری

## ۱- مقدمه

هوازدهگی و دیگر عوامل فرساینده بر ذخیره است [۲].

کاربرد روش‌های استخراج زیرزمینی موجب می‌شود که ضمن کوتاه‌تر شدن زمان دسترسی به عمق ذخیره، قیمت تمام شده تولیدات کمتر و از عوارض ناشی از استخراج روباز کاسته شود. علاوه بر این موارد، گاه نسبت باطله به ذخیره مورد نظر آن‌قدر زیاد است که امکان اجرای روش استخراج روباز به‌طور کل توجیه‌پذیر نیست و برای بهره‌برداری از آن باید روش زیرزمینی را به‌کار برد (شکل ۱)



شکل ۱- ورودی معدنی در کارا را

گذشته از اینکه کاربرد روش استخراج زیرزمینی شرایط خاص و ماشین‌آلات ویژه‌ای را می‌طلبد، شناخت مدل‌های توصیفی، شکل هندسی، ویژگی‌های مکانیک سنگی و مشخصات سازند در بر گیرنده ذخیره اهمیت بسیاری دارد تا ضمن امکان پیاده‌سازی طرح، ایمنی لازم را بتوان تأمین کرد. ذخایر سنگ‌های تزئینی و نما از نظر هندسی گروه‌های زیر را شامل می‌شود:

### ۱-۲- بقچه‌ای

این ذخایر مانند معادن گرانیات بزمان در جنوب استان کرمان و گرانیات‌های تایباد در شرق استان خراسان رضوی است که به صورت توده‌های کوچک و متوسط در یک محدوده معدنی مستقر شده‌اند که باتوجه به ابعاد کوچک این ذخایر جدا از هم اجرای روش استخراج زیرزمینی، بسیار نامحتمل و چنانچه توده‌های بزرگ در بین آنها وجود داشته باشد باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

### ۲-۲- توده‌ای

این گروه از ذخایر گستردگی زیادی داشته‌اند، مانند

امروزه برای استخراج مواد معدنی ساختمانی، ماشین‌آلات ویژه و مناسب با شرایط و وسعت کارگاه به راحتی طراحی می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر این ماده معدنی جزء ذخایر نایاب و ارزشمندی باشد که در دنیا نمونه‌های مشابه زیادی نداشته باشد، ارزش آن ماده معدنی دوچندان است و برای استحصال آن از راهکارهای علمی، نوین و با طراحی‌های ویژه بهره‌گیری می‌شود. روش استخراج زیرزمینی در معادن سنگ‌های تزئینی و نما بر اساس شکل هندسی ذخیره، وضعیت استقرار، ژئومکانیکی مقدار روباره و جنس سنگ‌های در بر گیرنده مورد بررسی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرد.

در این مقاله معادنی که ظرفیت و ارزش کاربرد استخراج زیرزمینی دارند تشریح شده و برای بهره‌برداری از سنگ‌های ارزشمند مرمر و آراگونیت، به‌طور ویژه بحث شده است تا دسترسی و امکان توجیه اقتصادی در اعماق بیشتری از این ذخایر ارزشمند میسر شود.

## ۲- استخراج معادن سنگ تزئینی بر اساس طراحی زیرزمینی

همراه با گسترش علوم و تجربیات در زمینه طراحی و استخراج معادن، نوآوری در ساخت ماشین‌آلات و ابزارهای معدنکاری و هم چنین سرمایه‌گذاری‌های ویژه در شناخت خصوصیات منحصر به فرد هر کدام از ذخایر معدنی، امکان دسترسی به عمق اقتصادی بیشتر را امکان‌پذیر ساخته است. اگرچه برای ذخایر سنگ تزئینی و نما مفهومی از عیار حد تعریف نشده است، اما ویژگی‌های مدل توصیفی این قبیل مواد معدنی را می‌توان بر اساس درصد سنگ‌دهی و درجه‌بندی هر گروه از قطعات تولید شده (کوپ یا سنگ قواره، قله و گلدانی، لاشه سنگ) بیان کرد که متناسب با ساختار هندسی، سن و سازند، سنگ‌شناسی، تکتونیک و نظایر آن قابل برآورد و محاسبه است [۱].

تجربیات به‌دست آمده از استخراج سنگ تزئینی و نما، نشانگر این واقعیت است که در بیشتر حفاریات و کارگاه‌های بزرگ و کوچک، سنگ‌دهی و کیفیت تولیدات در اعماق ذخایر بهبود می‌یابد که ناشی از کمرنگ‌تر شدن تاثیر محدوده

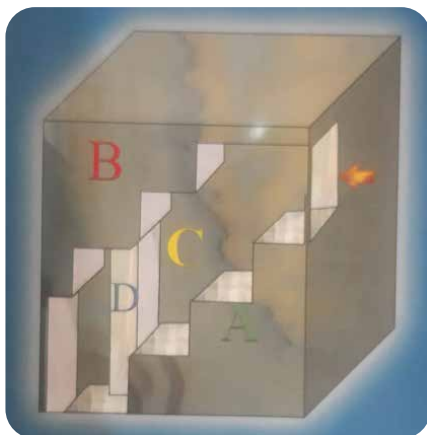
را در بر می گیرند که برای استخراج زیر زمینی شرایط مساعدی ندارند.

### ۳- روش استخراج در معادن توده‌ای

متداول ترین روش زیرزمینی در این معادن، روش‌های اطاق پایه و پلکانی است که با مقیاس‌های کوچک، متوسط و بزرگ اجرا می شود و با توجه به مقاومت فشاری و خصوصیات مکانیک سنگی، ابعاد ستون‌های نگهداری و ارتفاع سقف کارگاه طراحی و برآورد می شود. پس از برآورد و بررسی‌های لازم برای انتخاب بهترین محل دستیابی به ذخیره، در مرحله اول با هدف احداث بخش ورودی کارگاه زیرزمینی، از حفاری با راسول و برش با سیم برش الماسه استفاده می کند تا دیواره‌ای تقریباً قائم ایجاد شود. این محل همانند ورودی تونل‌های زیرزمینی باید دارای شرایط ایمن بوده و قابلیت ترابری مناسب را داشته باشد.

#### ۳-۱- استخراج زیر زمینی پلکانی

در شکل (۲) نمونه‌ای از کارگاه زیر زمینی پلکانی به صورت شماتیک نشان داده شده که پس از ایجاد کارگاه، ذخیره مربوط به ناحیه A را برای استخراج آماده ساخته است. در این حالت با گشودن دالانی از پایین ترین پله به سمت سطح آزاد هم‌پراز، اقدام به استخراج و حمل سنگ به بیرون از کارگاه می شود که دقیقاً همانند سیستم استخراج برش کواری [۳] در معادن روباز است با این تفاوت که عملیات استخراج در زیر انبوهی از سنگ‌های بر جا مانده در سقف کارگاه انجام می گیرد.



شکل ۲ - شکل شماتیک یک معدن زیرزمینی پلکانی سنگ تزئینی

انواع گرانیته‌ها، مرمیت‌ها و مرمیت‌های کریستالین در استان‌های فارس، خراسان‌های رضوی و شمالی و جنوبی، آذربایجان غربی، اصفهان، یزد و کرمان که بهترین گروه ذخایر سنگ‌های تزئینی و نما برای پیاده‌سازی روش استخراج زیر زمینی هستند. مجتمع‌های معدن زیرزمینی منطقه کارارا در کشور ایتالیا در این گروه قرار دارند.

#### ۳-۲- رگه‌ای

ذخایر رگه‌ای شامل انواع مختلف آراگونیت و مرمر به ندرت سنگ‌های از نوع آذرین هستند که در استان‌های اصفهان، خراسان (رضوی، جنوبی و شمالی)، کردستان، کرمان، یزد گسترش بیشتری دارند. ارزش بالا و نادر بودن این ذخایر موجب شده است که عمق استخراج در آنها نسبتاً زیاد و نسبت باطله به ماده معدنی در این گروه بیشتر از سایر گروه‌ها باشد.

ذخایر رگه‌ای متناسب با ضخامت، شیب و امتداد در رتبه‌های متفاوتی از نظر عمق دستیابی قرار می گیرند که به صورت‌های شیب‌دار (شیب‌های حدود ۷۰ تا ۲۰ درجه)، نرخاب (با شیب بیشتر از ۷۰ درجه)، کف خواب با شیب کمتر از ۲۰ درجه) دیده می شوند و طراحی‌های ویژه و منحصر به فرد خود را دارند. پیاده‌سازی روش استخراج زیرزمینی در معادن نرخابی که سایر شرایط استخراج زیر زمینی را داشته باشد بسیار مناسب و اقتصادی است. در صورتی که ذخایر رگه‌ای کف خواب در زیر انبوهی از باطله واقع و سایر شرایط استخراج زیرزمینی را داشته باشند، نیز قابل بررسی است.

#### ۴-۲- لایه‌ای

ذخایر لایه‌ای مانند بیشتر تراورتن‌ها، ترانیکس‌ها و برخی سنگ آهک‌ها هستند که بیشتر در استان‌های مرکزی، یزد، آذربایجان و اصفهان قرار دارند. این ذخایر اکثراً به صورت افقی و با ضخامت‌های متفاوت‌اند از نظر ارزش اقتصادی اختلاف قیمت‌های زیادی دارند. در صورتی که باطله‌ای زیاد در روی این ذخایر قرار گیرد و سایر شرایط را داشته باشند، برای استخراج زیرزمینی مناسب‌اند.

#### ۵-۲- منشوری

ذخایری همچون بازالت‌های بایگ تربت حیدریه و بیرجند، حاوی قطعات منشوری و ستونی شکل با سطح مقاطع متفاوت





شکل ۴- کارگاه استخراج زیر زمینی معدن سنگ مرمریت منطقه معدنی کارارا ایتالیا

در شکل (۴) تونل‌های پیشرو با سطح مقطع حدود ۷۰ سانتی‌متر نشان داده شده که قبل از احداث کارگاه و به هدف آگاهی از کیفیت طرح و نقش سنگ و خصوصیات مقاومتی آن حفر شده است. در منطقه کارارا و در بیشتر معادن زیر زمینی، به دلیل سالم بودن سنگ مورد استخراج، کوپه‌ای تولیدی مستقیماً از کارگاه استخراج شده و تقریباً نیازی به خوابانیدن بلوک‌های بزرگ و قواره مجدد آنها نیست و به همین دلیل فضای لازم برای فعالیت استخراج با محدودیت رو به رو نخواهد شد. به همین دلیل برخی پله‌های ایجاد شده حدود ۲ متر ارتفاع دارند.



شکل ۵- نمایش کوپه‌ای تولید شده و پله‌های ایجاد شده در کارگاه زیرزمینی

شکل (۵) نمایش‌دهنده پله‌هایی با ارتفاع ۲ متر در بخشی از معدن است و نیاز به قواره مجدد ندارد اما در بخش دیگر معدن (انتهای معدن) دیواره ۶ متر بوده و بلوک‌ها قواره مجدد می‌شوند.

در این روش، طول پله‌ها گاه تا پنجاه متر هم می‌رسد که با توجه به مشخصات فنی پایه‌های نگهداری که از برجای گذاشتن سنگ ذخیره ایجاد می‌شود، ارتفاع سقف و عرض پله‌ها را محاسبه می‌کنند. برآوردهای دقیق پله‌های برجا مانده برای نگهداری سقف و تامین شرایط ایمن در این روش اهمیت بسیاری دارد. برای مشخص شدن برخی خصوصیات ذخیره از قبیل مقاومت‌های مکانیکی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، سنگ‌دهی، طرح و نقش، شبکه گسلی، تأثیرات عوامل فرساینده و سایر آنها از روش‌های مغزه‌گیری و حفر تونل‌های پیش‌رونده استفاده می‌شود که این آثار در معادن مرمریت زیر زمینی منطقه کارارا در کشور ایتالیا مشهود است. در اغلب معادنی که به‌صورت زیرزمینی استخراج می‌شوند، مقاومت فشاری متوسط سنگ بیشتر از ۱۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برآورد می‌شود تا بار ناشی از سنگ‌های برجا مانده سقف را تحمل کند. شیب نهایی کارگاه برآیندی از عرض و طول هر کدام از پله‌های احداث شده است. که موجب بروز دو مولفه از تنش‌های فشاری و برشی در سطح مقطع پایه‌های برجامانده می‌شود. لذا برای محاسبه مقدار بار وارده بر هر ستون و همچنین نیروی برشی ناشی از شیب‌دار بودن کارگاه، باید به تعداد پله، ارتفاع و عرض هر کدام از پله‌ها توجه کافی داشت.



شکل ۳- ستون به جای مانده از یک معدن زیرزمینی مرمریت کارارا ایتالیا

شکل (۳) طرز ایجاد ستون نگهداری سقف را نمایش می‌دهد که ابعادی حدود ۷ متر در ۶ متر و ارتفاعی حدود ۱۲ متر دارد. در سالم‌ترین بخش سنگ ایجاد می‌شود.

- افزایش وزن ناشی از جذب رطوبت  $W_o$

- نیروی فشاری ناشی از وزن وارده بر هر متر مربع از سطح مقطع ستون:

$$F1 = W1 / Wp$$

- مقاومت فشاری و برشی  $[5]$  سنگ معدن برحسب نیروی قابل تحمل بر واحد سطح: به ترتیب  $Wp$  و  $Wt$  که با آزمایشات کاربردی مشخص می‌شود.

- نیروی برشی ناشی از وزن که بر ستون وارد می‌شود.

$$W2 = [(At \times h \times \rho) + W_o] \sin \alpha$$

- نیروی برشی ناشی از وزن وارده بر هر متر مربع از سطح

$$F2 = W1 / Wp$$

مقطع ستون:

مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف از حدود  $500 \text{ kg/cm}^2$  تا  $2200 \text{ kg/cm}^2$  تغییر می‌کند که اغلب سنگ‌هایی که مقاومت فشاری آنها از  $750 \text{ kg/cm}^2$  مربع کمتر است، برای فرآوری نیاز به افزایش استحکام دارند که از رزین‌ها و توری‌ها در خط فرآوری این قبیل سنگ‌ها استفاده می‌شود.

مقاومت برشی سنگ نیز متناسب با سطوح شکستگی و انفصال صفحات متغیر است که با آزمایشات کاربردی مشخص می‌شود.

- ضریب ایمنی مقاومت فشاری:  $Sfp = F1/Wp$

- ضریب ایمنی مقاومت برشی:  $Sft = F1/Wt$

مغزه‌گیری و آزمایش بر روی این مغزه‌ها کمک زیادی در بررسی‌های مختلف سنگ از قبیل: جذب رطوبت، مقاومت‌های مکانیکی، تخلخل و نظایر آنها می‌کند.

با توجه به نتایج حاصل از مقاومت‌های سنگ در حالت خشک و تر، ضریب ایمنی کارگاه محاسبه شده و با توجه به استانداردهای لازم ابعاد لازم برای سطح مقطع ستون طراحی می‌شود. طراحی معدن باید به گونه‌ای باشد که شرایط لازم برای جبران ضریب ایمنی بر اساس استانداردهای رایج را داشته باشد.

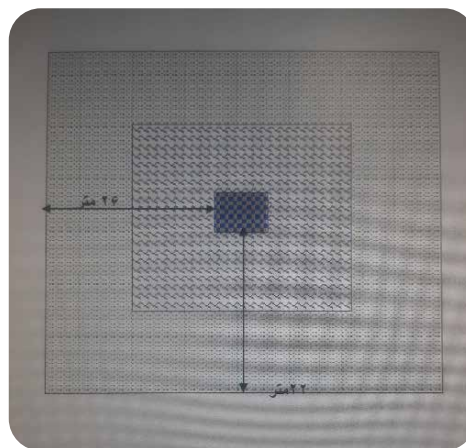
در طراحی پلکانی به جهت شکل هندسی کارگاه، تنش وارد بر ستون‌ها فقط به مؤلفه قائم که موجب نیروی فشاری می‌شود اکتفا نمی‌کنند زیرا تنش‌های دیگر بر آن وارد می‌شود

با توجه به شکل (۵) برای هر کدام از پله‌های با ارتفاع حدود ۲ متر عرض نهایی ۲ متری باقی‌مانده است که در این صورت شیب کارگاه حدود ۴۵ درجه خواهد شد. (رابطه ۱):

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{h}{d} \right) = 1$$

$$\alpha = 45^\circ$$

اگر ابعاد ستون ۸ متر در ۶ متر و عرض کارگاه حدود ۵۰ متر و طول آن حدود ۶۰ متر باشد، سطح مقطع بریده شده و ستون به جای مانده به صورت ذیر است:



شکل ۶- سطوح مقطع کارگاه، بار وارده و ستون به صورت شماتیک

$A_p$ : سطح مقطع ستون متر مربع  
 $8 \times 8 = 64$

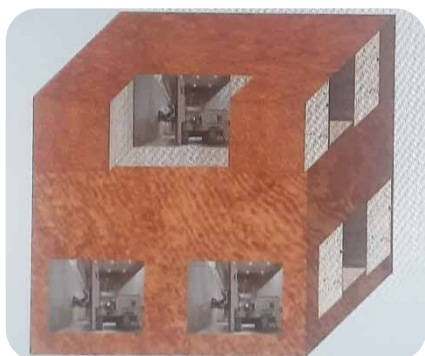
$A_t$ : سطح مقطع بار وارده بر ستون  
متر مربع  $22 \times 26 = 572$

$A_f$ : سطح مقطع سقف و ستون کارگاه  
متر مربع  $60 \times 50 = 3000$

اگر چگالی سنگ مورد نظر را  $\rho$  در نظر بگیریم و وزن سنگ رها شده یا وزن شکست را  $h$  فرض کنیم، موارد زیر مد نظر قرار می‌گیرد:

- نیروی فشاری  $[4]$  ناشی از وزن که بر ستون وارد می‌شود:

$$W1 = [(At \times h \times \rho) + W_o] \cos \alpha$$



شکل ۷- کارگاه استخراج زیر زمین به روش اطاق پایه

### نتیجه گیری

برای بهره‌برداری از ذخایری که امکان استخراج به روش روباز را ندارند و همچنین دستیابی به عمق اقتصادی بیشتر، کاهش هزینه‌ها، جلوگیری از اتلاف وقت، کوتاه کردن زمان بازگشت سرمایه و کاستن از تخریب عرصه‌های طبیعی باید از پیاده‌سازی روش‌های استخراج زیر زمینی در طراحی‌های آینده بهره گرفت.

پس از ارزیابی و بررسی مدل توصیفی کانسار برای هر یک از انواع ذخایر سنگ‌های تزئینی که قابلیت‌های اقتصادی و مکانیک سنگی لازم را داشته باشند، شیوه‌ای خاص وجود دارد که در مقیاس‌های مختلف قابل اجرا است.

با اجرای روش‌های زیرزمینی و افزایش عمق اقتصادی، بسیاری از معادن متروکه ذخایر ارزشمند مرمز قابلیت بازیابی بیشتر را دارند و با هزینه‌ای کمتر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

که با مؤلفه افقی به سطح مقطع ستون، موجب نیروی برشی نیز می‌شود.

در بررسی ضریب ایمنی لازم برای طراحی ستون‌ها باید به این نکته توجه شود که مقاومت سنگ در مقابل نیروهای فشاری از مقاومت آن در مقابل نیروهای برشی بیشتر است و مقاومت سنگ در مقابل نیروی برشی از مقاومت آن در مقابل نیروهای کششی بسیار بیشتر است. در معادنی که رطوبت و آب به ستون‌ها شرایط می‌کند، محاسبات مربوطه باید برای آن حالت در نظر گرفته شود تا ضریب ایمنی لازم در طول دوره بهره‌برداری رعایت شده باشد.

ضریب انبساط، خاصیت الاستیکی، درصد تورم، میل ترکیبی و میزان عناصر قابل تجزیه سنگ، تغییرات دما و نظایر آنها که در رفتار مکانیکی سنگ در مقابل تنش‌های وارده مؤثرند، باید مورد مطالعه قرار گیرند.

### ۲-۳- روش اطاق پایه

استخراج زیر زمینی اطاق پایه برای معادنی کاربرد دارد که ماده معدنی در امتداد افقی و زیر انبوهی از باطله‌ای قرار گرفته باشد و خصوصیات مکانیک سنگی مناسب این کار را داشته باشند. به دلیل اینکه این روش در مقیاس بزرگ، متوسط و کوچک قابلیت طراحی دارد، علاوه بر معادن لایه‌ای، معادن توده‌ای و رگه‌ای را نیز می‌توان با این روش استخراج کرد.

### منابع

- [۱] معصومی، ع. (۱۳۹۵) اصول طراحی معادن سنگ‌های تزئینی و ساختمانی، چاپ اول، ارسس، مشهد.
- [۲] معصومی، ع. (۱۳۹۵) اصول اکتشاف معادن سنگ‌های تزئینی و ساختمانی، چاپ اول، ارسس، مشهد.
- [۳] معصومی، ع. (۱۳۹۶) کاربرد روش‌های برشی و مغزه‌گیری در استخراج فیروزه همایش یکم فیروزه، صنعت و فرهنگ ۱۲ الی ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۶ دانشگاه نیشابور
- [4] Parker, J. (1996) Everybody goes underground eventually. Aggregate Manager- 35.
- [5] Barton, N.R. and Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mech..
- Careddu, N., Siotto, G., (2010). Geo-mechanical characterization for the underground marble mine "Su Cuccumiau" (Sardinia). Proc. 7th International Marble and Natural Stones Congress of Turkey (Mersem VII), 14-15 October (2010), Afyonkarahisar, Turkey. Pag. 25-32. Ed. M. Ersoy, M.Y. «elik, L. Yeşilkaya. ISBN: 978-605-01-0023-5.
- Careddu, N., Siotto, G., Tuveri, A., (2010). Evolution of a marble quarry: from open cast to underground exploitation. Proc. Global Stone Congress (2010), Alicante, Spain. S1-01. Ed. AIDICO (Instituto de la Construcción), València. ISBN: 978-84-614-1147-4.
- Ferrero, A. M., (2002). Rock mechanics studies applied to ornamental stone design. Part of the project "Development of an integrated computed aided design and planning methodology for underground marble quarries", Contract No. BE-5005, 2002.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., (2006), Open pit mine planning & design, 2\_ ed., Taylor & Francis plc., ISBN 90-5410-184-9, pag. 30.
- Primavori, P., (2004). Planet Stone. Giorgio Zusi Ed., Verona, Italy. ISBN 88-900067-9-X.