

ارائه رابطه غیرخطی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری به منظور پیش‌بینی قابلیت برش - نرخ تولید سنگ تزئینی با استفاده از دستگاه سیم برش الماسه

عارف علیپور*^۱، مجتبی مختاریان اصل^۲، رضا میکائیل^۲

دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۳۰ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۱۸

چکیده

ارائه مدل به منظور پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های تزئینی با توجه به ملاحظات برنامه‌ریزی تولید حائز اهمیت است. محققین مختلف با مرتبط کردن پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و ماشین برش با نرخ تولید، اقدام به ارائه روابط تخمینی نموده‌اند. به‌طور عمده این مدل‌ها مبتنی بر رگرسیون چندمتغیره هستند. در تحقیق حاضر قابلیت برش سنگ تزئینی با اقتباس از نتایج یکی از تحقیقات مرتبط و با اندازه‌گیری نرخ تولید دستگاه سیم‌برش الماسه در عملیات برش ۱۴ نوع سنگ کربناته نرم از معادن مختلف ایران تعیین شده است. پارامترهای ژئومکانیکی این سنگ‌ها شامل: مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، مقاومت کشش برزیلی، عدد چکش اشمیت و نتیجه آزمایش سایش لس آنجلس به منظور مدل‌سازی نرخ تولید مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های موجود اقدام به ارائه مدل غیرخطی جدید و مبتنی بر یک الگوریتم فراابتکاری شده است. الگوریتم رقابت استعماری به‌منظور تخمین ضرایب مدل پیشنهادی به کار گرفته شده و تابع خطای تخمین با به‌کارگیری این الگوریتم کمینه شده است. ارزیابی مدل‌های تخمین بررسی شده بر مبنای آزمون‌های آماری استاندارد، مؤید برتری مدل پیشنهادی است؛ از این رو فرآیند مدل‌سازی طی شده به منظور کاربرد در مطالعات مرتبط آتی پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه‌ها: سیم برش، قابلیت برش، مدل پیش‌بینی نرخ تولید، سنگ تزئینی، الگوریتم رقابت استعماری.

۱- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه a.alipour@mie.uut.ac.ir

۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تولید و فرآوری سنگ تزئینی نقش مهمی را در صنعت ساختمان ایفا می‌کند. نیاز به تولید بیشتر و کیفیت عالی، تکنولوژی و ابزار پیشرفته‌ای را طلب می‌کند، برای رقابت موثر در بازار امروزی باید از تکنولوژی‌های جدید در برش، فرم‌دهی و پرداخت محصولات سنگی استفاده نمود. وسایل برش الماسه، نمونه‌ای از این تکنولوژی پیشرفته‌اند که در تمام مراحل تهیه سنگ تزئینی به کار می‌روند. سیستم سیم برش الماسه در استخراج سنگ، تیغه‌های برش در تهیه پلاک از قواره‌ها، اره‌های مدور دیسکی در آراستن محصولات و تیغه‌های صیقل‌دهی در پرداخت نهایی این محصولات به کار می‌روند. به کارگیری صحیح این وسایل به نحو چشمگیری در بالابردن بازدهی فرآیند و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده مؤثر است (Jain & Rathore, 2009 & 2011). تاکنون تحقیقات مختلفی در مورد سیم‌برش شامل: بررسی پوشش مهره‌های الماسه، قدرت موتور و سرعت سیم‌برش، ساختار سیم و هندسه برش، ابعاد بلوک سنگ، ساختار مهره‌ها و سیم الماسه، شبیه‌سازی کامپیوتری برش با سیم‌برش، و بررسی نرخ تولید یا نرخ برش توسط محققین مختلف صورت گرفته است (Ataei et al, 2012).

ایران به لحاظ کیفیت و میزان ذخایر سنگ‌های تزئینی و نما، جزء ۱۰ کشور دارنده معادن مرغوب سنگ در جهان است. در این خصوص میزان ذخایر شناخته شده در حدود ۳/۷ میلیارد تن است که ۳/۳ میلیارد تن آن به‌عنوان ذخیره قطعی و بقیه به‌عنوان ذخیره احتمالی تلقی می‌گردد (Kasiani, 2004). با توجه به کیفیت و میزان ذخایر سنگ‌های تزئینی و همچنین تولید سالانه سنگ‌های تزئینی در ایران، لزوم توجه بیشتر در مورد مطالعات مربوط به حوزه سنگ تزئینی از اهمیت زیادی برخوردار است.

برش سنگ، به‌عنوان یک عملیات مهندسی، کاربرد وسیع و تعیین‌کننده‌ای در صنعت سنگ تزئینی پیدا کرده است. تخمین قابلیت حفاری و برش سنگ توسط دستگاه‌های حفاری، سیم برش الماسه، اره‌ی الماسه دیسکی مدور در تخمین هزینه‌های عملیات نقش مهمی دارد (Ersoy & Atici, 2004).

تعیین و اندازه‌گیری قابلیت برش سنگ یکی از شاخه‌های مهندسی سنگ محسوب می‌شود. در طبقه‌بندی‌های محدود ارائه شده، مشخصات فیزیک-مکانیکی سنگ نظیر: چگالی، تخلخل، درجه و نوع سیمان‌شدگی، مشخصات بافتی، پارامترهای مقاومتی سنگ، سختی، ساینده‌گی در کنار مشخصات بافت-ساخت و شرایط دستگاهی و اپراتوری مورد توجه قرار گرفته است (Yilmaz et al, 2011). این طبقه‌بندی‌ها متفاوت از هم بوده و از پارامترهای موثر مختلفی استفاده کرده‌اند. بعضاً در این طبقه‌بندی‌ها شاهد پارامترهایی هم‌اثر و هم‌پوشان نیز هستیم (Sadegheslam et al, 2013).

به‌منظور ارزیابی قابلیت برش سنگ استفاده از دستگاه‌های مختلف در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی مورد توجه بوده است. اساساً در قابلیت برش اندرکنش بین خصوصیات مکانیکی سنگ و کارکرد دستگاه برش مورد توجه قرار می‌گیرد. شاخصه‌های مختلفی نظیر: اندازه‌گیری شدت جریان مصرفی دستگاه، مقدار نیروی برش لازم، مقدار تولید دستگاه در واحد زمان به منظور ارزیابی توان و کارکرد دستگاه برش و به‌عبارتی قابلیت برش مطرح هستند (Ataei et al., 2012). با این حال دستگاه برش آزمایشگاهی استاندارد با قابلیت‌های استاندارد نظیر دستگاه مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره در این حوزه مطرح نیست. هر یک از طبقه‌بندی‌های مختلف ارزیابی قابلیت برش نظیر طبقه‌بندی قابلیت حفاری دستگاه تمام مقطع تونل، از آزمون‌ها و دستگاه‌های مختلف با استاندارد غیر مشخص به منظور تبیین طبقه‌بندی خود استفاده کرده‌اند. اساساً طبقه‌بندی‌های مطرح در این حوزه معیاری به‌منظور تمیز قابلیت برش سنگ‌های مختلف عمل می‌کنند. دستگاه‌های مختلفی نظیر سیم برش الماسه، اره‌های برش الماسه‌ی دیسکی، تیغه‌های الماسه خطی و ... به منظور برش سنگ مطرح هستند.

در این مقاله با استفاده از داده‌های موثر ژئومکانیکی انواع مختلفی از سنگ‌های تزئینی کربناته، یک مدل غیرخطی جدید و مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm) به‌منظور تخمین نرخ تولید با استفاده از سیم برش الماسه ارائه خواهد شد.

۲. فرآیند برش سیم برش الماسه

به‌طور کلی ساینده‌گی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها در قابلیت حفاری سنگ محسوب می‌شود، که سرعت حفاری در سنگ را به‌شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به‌بیان دیگر سختی و سایش از عوامل اصلی کنترل‌کننده‌ی مقاومت سنگ در برابر حفاری و برش هستند (Hamzaban et al, 2014).

سایش سنگ را می‌توان با فرسایش یا کنده‌شدن ذرات سطحی وسایل و ابزارهای حفاری در اثر تماس و اصطکاک با آن تعریف نمود. ساینده‌گی هر سنگ، به‌دلیل توانایی آن در فرسایش تجهیزات معدنی، نقش مهمی در برآورد هزینه‌های مربوطه دارد (Ersoy et al, 2005). در ایران، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، میزان کوارتز سنگ را به‌عنوان معیاری جهت تخمین ساینده‌گی سنگ، در فهرست بهای خدمات ژئوتکنیکی، منظور نموده است. قابلیت برش سنگ نیز حالت خاصی از قابلیت حفاری سنگ می‌شود که منحصر به برش سنگ تزئینی است. با توجه به موضوع تحقیق فرآیند برش با سیم‌برش الماسه با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرآیند برش، فرآیندی سایشی است که با استفاده از مهره‌های الماس و در اثر عبور دانه‌های الماس روی مهره از روی قطعه سنگ صورت می‌گیرد. در مرحله‌ی نخست در اثر نفوذ دانه‌های الماس در سنگ، تراشه‌های سنگ ایجاد می‌شود. دانه الماس با خراش سنگ و شکافتن سطح برش موجب تراشه، و ایجاد سطح جدید و جدیدتر می‌شود. هنگامی که سنگ توسط ابزار الماسه تحت برش قرار می‌گیرد اندرکنش مکانیکی میان ابزار و سنگ نیروی فرآیندی ایجاد می‌کند که به‌طور عمده ناشی از تغییر شکل الاستیک و پلاستیک سنگ، اصطکاک میان مهره‌ی الماس و ماتریکس با تراشه‌های ناشی از برش سنگ است. در واقع تغییرات نیرو به همراه پستی و بلندی‌های موجود در سطح قطعه سنگ کاری، بی‌نظمی ضخامت تراشه‌ها، لایه لایه شدن

تراشه‌ها و اصطکاک سطوح باعث تغییر در شرایط برشی سنگ می‌شود (Ozcelik, 1999).

اجزای اصلی سیستم برش از این‌قرارند: قسمت‌های محرک دستگاه که از یک الکتروموتور برای چرخش فرقره‌ی اصلی و تعدادی موتور برای سایر امور استفاده می‌کند. بازوی برش دستگاه که از یک تیغه فولادی ویژه‌ای تشکیل یافته که بر آن تسمه مخصوص حرکت می‌کند، در داخل تسمه چند رشته کابل فولادی با تعدادی مهره الماسه و سایر ملحقات که در کل به آن سیم‌برش اطلاق می‌شود، قرار گرفته‌اند (شکل ۱). جزئیات بیشتر در مورد فرآیند برش با سیم برش الماسه، در شکل ۲ نشان داده شده است.

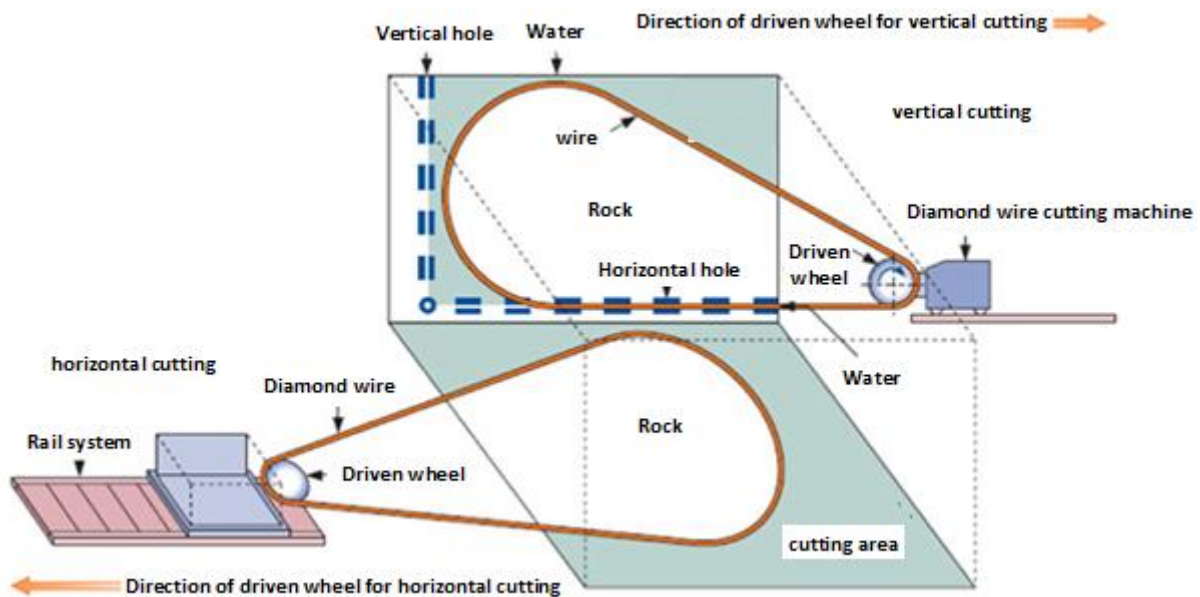
از منظر قابلیت تولید سیم برش الماسه، دو تعریف ساده تحت عناوین "بازدهی" و "مصرف ویژه" ارائه شده است. تعریف بازدهی میزان سطحی از سنگ است که به‌واسطه سیم‌برش در یک ساعت بریده می‌شود و مصرف ویژه سیم‌برش که به کیفیت سنگ، کیفیت سیم و مهارت اپراتور بستگی دارد و آن عبارت است از مقدار متوسط طولی از سیم که به ازاء هر متر مربع از سنگ مستهلک می‌شود (Sadegheslam et al., 2013). با افزایش سایش سیم‌برش، نرخ برش و کارایی سیم کاهش می‌یابد و هزینه عملیات افزایش خواهد یافت. مهمترین موضوع در کار با سیم‌برش الماسه، تعیین شرایط عملیات به‌طوری است که سایش به حداقل و کارایی به حداکثر برسد (Mikael et al, 2008).

۳. پارمترهای موثر در برش سنگ با سیم‌برش الماسه

یکی از مهمترین عوامل تعیین‌کننده در بازدهی اقتصادی سنگ-های تزئینی، روش‌ها و تکنولوژی استخراج و فرآوری است. روش استخراج و فرآوری با توجه به خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و بافت شناسی سنگ، ساختار زمین شناسی سنگ، قابلیت استخراج بلوک، مقدار تولید و غیره تعیین می‌شود.



شکل ۱. یک واحد سیم برش یا سگمنت به همراه جزئیات (Ozcelik, 1999)



شکل ۲. جزئیات عملیات برش کوپ با سیستم سیم برش الماسه

۴. رابطه‌ی غیرخطی پیشنهادی عطایی، میکائیل و سرشکی

به‌منظور پیش‌بینی نرخ تولید سیم‌برش الماسه قابلیت برش سنگ تزئینی در قالب نرخ تولید دستگاه سیم‌برش الماسه در عملیات برش ۱۴ نوع سنگ کربناته نرم از معادن مختلف ایران توسط عطایی، میکائیل و سرشکی مورد مطالعه قرار گرفته است (Ataei et al., 2012). بر مبنای نتایج آزمایشگاهی این ۱۴ نمونه و مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ تولید این ۱۴ نمونه در معادن مختلف اقدام به ارائه مدل غیرخطی تخمین نرخ تولید صورت گرفته است. در جدول ۱ پارامترهای عملیاتی دستگاه‌های سیم‌برش مورد استفاده در معادن مختلف ارائه شده است. لازم به ذکر است که به‌دلیل تشابه ساختاری و

پارامترهای موثر در استخراج و فرآوری با سیم‌برش الماسه به دو دسته پارامترهای غیرقابل کنترل شامل خواص فیزیکی، پتروگرافی و مکانیکی سنگ و پارامترهای نسبتاً قابل کنترل نظیر ویژگی‌های ابزار برش، ویژگی‌های عملیاتی و خواص مدیریت عملیات تقسیم‌بندی می‌شود؛ از پارامترهای غیرقابل کنترل می‌توان به چگالی، هدایت گرمایی، تخلخل و جذب آب، درجه دگرسانی، ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ، خواص ساختاری، اندازه و شکل دانه‌ها، نوع و میزان سیمان‌شدگی، سختی، سایش‌پذیری، خواص الاستیک و تردی سنگ، خواص مقاومتی و سرعت امواج طولی در سنگ اشاره کرد. (Ozcelik, 1999 & Hamzaban et al., 2014).

جدول ۲. نتایج مطالعات آزمایشگاهی سنگ و مقدار کارایی

ماشین سیم برش					
Rock sample	UCS (MPa)	BTS (MPa)	LA (%)	SHv (n)	Ph (m ² /h)
1	98.9	6.6	20.5	56.2	6
2	124	8.7	21.5	57.1	5.5
3	139.5	12.4	24.6	58.3	3.5
4	132.6	11.6	21.4	57.2	3.7
5	188.5	13	25.4	58.6	2.2
6	116	7.61	20.47	56.1	5
7	84.6	4.5	29.23	50.6	10
8	84.6	5	33	53.6	10
9	95	6.7	34.31	57.8	6.2
10	63	4.5	32.11	56.3	6.7
11	59	4.6	45	55.8	6.5
12	67	5.5	30.28	53.7	10.6
13	75	6	25.06	55.6	9.2
14	80	7	36.9	54.5	9

۵. رابطه غیرخطی پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم رقابت

استعماری به منظور پیش‌بینی نرخ تولید سیم برش الماسه

در این بخش از تحقیق مدلی غیرخطی به منظور تخمین نرخ تولید پیشنهاد شده و ضرایب آن با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) تعیین شده است. امروزه استفاده از روش‌های فراابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی گسترش یافته است.

ICA توسط آتش‌پز و لوکاس در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است، که الهام گرفته از فرآیندهای سیاسی - اجتماعی می‌باشد (Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007). همانند دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری جمعیت محور، این الگوریتم نیز کار خود را با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌کند، که هر کدام از اعضای جمعیت کشور (Country) نامیده می‌شود. با توجه به تابع هدف مساله، تعدادی از بهترین کشورهای جمعیت اولیه به عنوان امپریالیست (Imperialist) انتخاب شده و مابقی به عنوان مستعمره (Colony) در نظر گرفته می‌شوند. به مجموعه یک امپریالیست و مستعمراتش، امپراتوری (Empire) گفته می‌شود. امپریالیست با توجه قدرتش، مستعمرات را با یک روند خاصی به سمت خود جذب می‌کند. قدرت کل هر امپراتوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی امپریالیست و مستعمرات آن بستگی دارد. با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع شده و هر امپراتوری که نتواند در

عملکردی، پارامترهای مربوط به این دستگاه‌ها به صورت ثابت در نظر گرفته شده و در مدل‌سازی لحاظ نشده است.

جدول ۱. پارامترهای عملیاتی ماشین سیم برش (Ataei et al., 2012).

Parameter	Description	unit
Main motor power	45	kW
Length of wire	65-80	m
Linear speed	30-35	m/s
Rotator diameter	60	cm
Beads per meter	33-36	
Beads type	Special for soft rocks	

در تحقیق مذکور پارامترهای ژئومکانیکی این سنگ‌ها شامل:

مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، مقاومت کشش برزیلی، عدد اشمیت و نتیجه آزمایش سایش لس آنجلس به منظور مدل‌سازی نرخ تولید مورد توجه قرار گرفته است. این پارامترها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

بر مبنای مستندات جدول ۲، عطایی و همکاران معادله رگرسیونی رابطه‌ی ۱ را به منظور تخمین نرخ تولید ارائه نموده‌اند.

$$P_h = \sqrt{\frac{10^{17.431} \times LA^{0.418}}{UCS^{0.503} \times BTS^{0.642} \times SHv^{8.596}}}$$
 (۱)

که عبارات موجود در رابطه‌ی ۱ و جدول ۲ به شرح زیر است.

LA: آزمون سایش لس آنجلس (Los Angeles abrasion value) بر حسب درصد

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره (Uniaxial Compressive Strength) بر حسب مگاپاسکال

BTS: مقاومت کششی برزیلی (Brazilian Tensile Strength) بر حسب مگاپاسکال،

SHv: عدد اشمیت (Schmidt hammer)

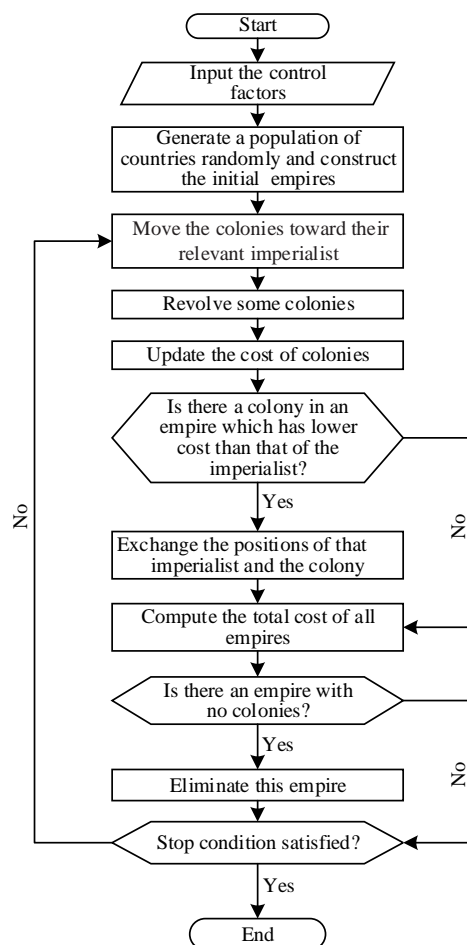
Ph: نرخ برش سیم برش الماسه بر حسب متر مربع بر ساعت.

در ادامه تحقیق مدل ارتقا یافته و غیرخطی جدیدی برای تخمین نرخ تولید سیم برش ارائه شده و با به‌کارگیری یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری اقدام به تعیین ضرایب این مدل ارتقا یافته شده است. جزئیات مربوط به برتری این مدل جدید نسبت به مدل قبلی در بخش‌های بعدی با استفاده از شاخص‌های کمی نشان داده خواهد شد.

k_{13} و k_{12} ، k_{11} ، k_{10} ، k_9 ، k_8 ، k_7 ، k_6 ، k_5 ، k_4 ، k_3 ، k_2 ، k_1 ، k_0 ضرایب ثابتی هستند که بر مبنای رگرسیون غیرخطی مبتنی بر الگوریتم ICA قابل تعیین هستند. SHv_i ، LA_i ، BTS_i ، UCS_i و Ph_i نیز مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به آزمایشات و مقادیر ثبت شده سر معدن می‌باشند.

ضرایب مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری که با زبان برنامه‌نویسی ++C در محیط مایکروسافت ویژوال استادیو ۲۰۱۳ بسط یافته است، مطابق با رابطه ۳ تعیین شدند.

$$Ph = \begin{pmatrix} -29.815 - 38.518 \times UCS_i^{-3.839} \\ +62.295 \times BTS_i^{-1.349} \\ -45.479 \times LA_i^{-0.0686} \\ +570.811 \times SHv_i^{-0.526} \\ -1.929 \times UCS_i^{1.648} \times BTS_i^{-14.566} \\ \times LA_i^{1.905} \times SHv_i^{2.309} \end{pmatrix} \quad (3)$$



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری (Atashpaz-

Gargari & Lucas, 2007)

رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند) حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب و به سيطرة در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به-تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپریالیست نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی در جواب‌های مساله خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا وجود داشته باشد. در این امپراطوری مستعمرات از لحاظ قدرت به کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند (Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007).

تاکنون از ICA برای حل مسایل گوناگون بهینه‌سازی استفاده شده است، که از آن جمله می‌توان به پیش‌بینی بازار بورس (Sharifi & Sadaei et al, 2016)، طراحی فیلتر دیجیتال (Mojallali, 2015)، مساله فروشنده دوره‌گرد (Ardalan et al, 2015)، بهینه‌سازی و مساله زمان‌بندی تولید (Behnamian & Zandieh, 2011; Lian et al, 2012) و برنامه‌ریزی تولید معدن (Mokhtarian Asl & Sattarvand, 2016) اشاره کرد. فلوجارت روش حل مساله در شکل نشان داده شده است. جزئیات مدل پیشنهادی و تابع هدف بسط داده شده به منظور تعیین ضرایب این مدل توسط الگوریتم رقابت استعماری مطابق رابطه ۲ می‌باشد.

$$Min \sum_{i=1}^n \left(\begin{pmatrix} k_0 + k_1 \times UCS_i^{k_2} \\ +k_3 \times BTS_i^{k_4} \\ +k_5 \times LA_i^{k_6} \\ +k_7 \times SHv_i^{k_8} \\ +k_9 \times UCS_i^{k_{10}} \\ \times BTS_i^{k_{11}} \times LA_i^{k_{12}} \\ \times SHv_i^{k_{13}} \end{pmatrix} - Ph_i \right)^2 \quad (2)$$

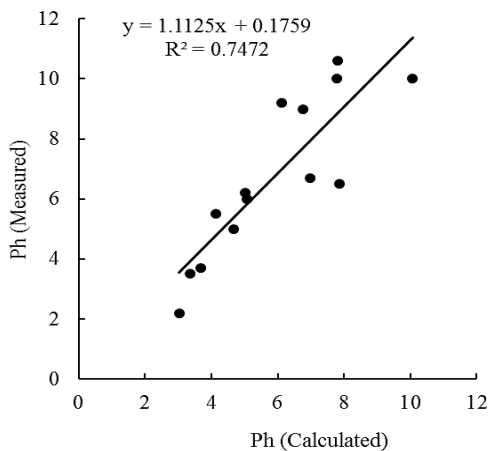
۶. مقایسه عملکرد مدل‌های تخمین نرخ تولید

در بخش‌های قبلی، مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ تولید دستگاه سیم‌برش الماسه مرتبط با برش ۱۴ نوع سنگ نرم کربناته و پارامترهای مستقل تعیین‌کننده آن به منظور ارائه مدل تخمین نرخ تولید دستگاه مورد استفاده قرار گرفته است. مدل غیرخطی رابطه (۱) توسط عطایی و همکاران پیشنهاد شده و مدل غیرخطی مطابق رابطه (۳) در تحقیق حاضر بسط یافته است. در ادامه این بخش از تحقیق، کارایی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای گرافیکی و کمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای منظور استناد به نتایج نمودار تخمین-مقدار واقعی و آزمون‌های آماری کمی مد نظر است.

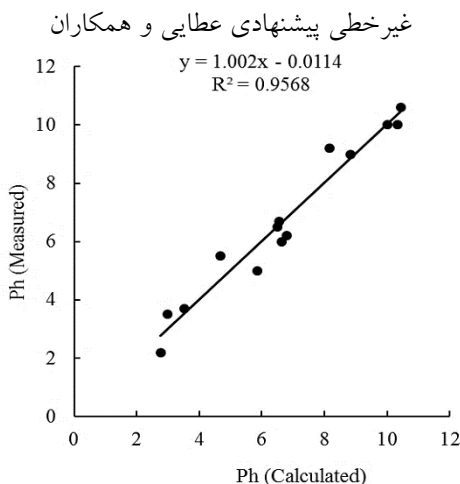
۱-۶. نمودار تخمین - مقدار واقعی

در این نمودار گرافیکی مقادیر تخمین زده شده نرخ برش توسط دو مدل پیشنهادی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آن‌ها ترسیم می‌شود. نتایج حاصل از این آزمون برای هر یک از مدل‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. در شکل ۴ نمودار تخمین-اندازه‌گیری شده حاصل از مدل پیشنهادی عطایی و همکاران با ضریب تعیین برابر با ۰/۷۴ نشانگر دقت نچندان مناسب این مدل است؛ در شکل ۵ نمودار تخمین-اندازه‌گیری شده حاصل از مدل پیشنهادی غیرخطی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است، مدل پیشنهادی این تحقیق از ضریب تعیین (۰/۹۵) بالاتری نسبت به رابطه قبلی برخوردار است.

تفاوت پراکندگی نقاط مربوط به ۱۴ مطالعه موردی در اطراف خط شیب، در هر دو شکل ۴ و ۵ محسوس است. در شکل ۵ از میزان پراکندگی نقاط مربوط به آزمایش در نمودار کاسته شده است. برای مقایسه بهتر دو مدل بررسی شده، نتایج حاصل از هر دو مدل در شکل ۶ و در مقابل مقادیر واقعی ثبت شده نمایش داده شده‌اند.

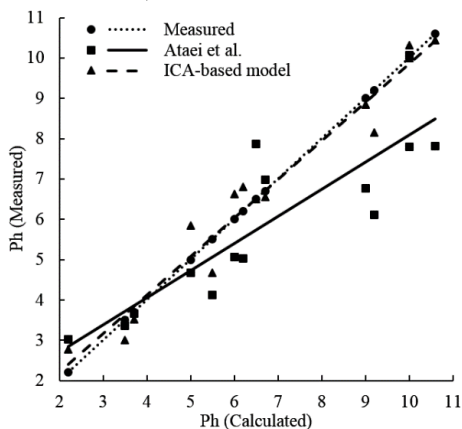


شکل ۴. نمودار تخمین - اندازه‌گیری شده حاصل از مدل



شکل ۵. نمودار تخمین - اندازه‌گیری شده حاصل از مدل

پیشنهادی غیرخطی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۶. نمودار تخمین - اندازه‌گیری شده هر دو مدل بررسی

شده

راحت تر ذکر شده است. در معادلات ارائه شده برای آزمون‌های آماری، Ph_{Meas} و Ph_{Esti} به ترتیب برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده نرخ برش دستگاه سیم برش الماسه می‌باشند. بر مبنای شاخص‌های قید شده در جدول ۳ هر دو مدل تخمین نرخ برش مورد ارزیابی قرار گرفتند، که نتیجه آن در جدول **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. با

توجه مقادیر جدول ۴ مدل تخمین مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری (رابطه ۳) در تمامی ارزیابی‌ها بهترین مقدار را دارا بوده و لذا عمل کرد مناسب و کامل تر آن در مقایسه با مدل دیگر تأیید می‌شود. البته باید دقت نمود که در صورت تغییر پارامترهای مربوط به دستگاه برش ضرایب مدل نیز بروزرسانی گردد.

همان‌گونه که از شکل ۶ مشخص است، مقایسه‌ی گرافیکی این دو مدل حکایت از دقت مناسب‌تر مدل غیرخطی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری دارد. در بخش بعدی جزئیات این برتری با مبنا قرار دادن برخی از مهمترین شاخص‌های آماری تخمین در قالب کمی بیان می‌شود.

۲-۶. آزمون‌های آماری کمی

در متون فنی برای مقایسه میزان برازندگی تخمین‌های صورت-گرفته تعدادی شاخص و آزمون آماری پیشنهاد شده است، که آزمون‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ جمع‌بندی شده‌اند. معادلات ریاضی مربوط به هر یک از این شاخص‌ها به صورت جداگانه معرفی و توضیحات لازم به منظور تفسیر

جدول ۳. آزمون‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه میزان برازندگی تخمین

Statistical criteria	Formulation
Correlation Coefficient, CC	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(Ph_{Meas}^i - \overline{Ph_{Meas}^i})(Ph_{Esti}^i - \overline{Ph_{Esti}^i})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (Ph_{Meas}^i - \overline{Ph_{Meas}^i})^2 \times \sum_{i=1}^{i=n} (Ph_{Esti}^i - \overline{Ph_{Esti}^i})^2}}$
Mean absolute percentage error, MAPE	$MAPE = \frac{1}{n} \times \left[\sum_{i=1}^{i=n} \left \frac{Ph_{Meas}^i - Ph_{Esti}^i}{Ph_{Meas}^i} \right \right] \times 100$
Route Mean Square Error, RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (Ph_{Meas}^i - Ph_{Esti}^i)^2}$
Mean Absolute Error, MAE	$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} Ph_{Meas}^i - Ph_{Esti}^i $
Median Absolute Error, MEDAE	$MEDAE = median \left(\left \frac{Ph_{Meas} - Ph_{Esti}}{Ph_{Meas}} \right \right)$
Variance Absolute Relative Error, VARE	$VARE = var \left(\left \frac{Ph_{Meas} - Ph_{Esti}}{Ph_{Meas}} \right \right) \times 100$
Variance Account for, VAF	$VAF = \left[1 - \frac{var(Ph_{Meas} - Ph_{Esti})}{var(Ph_{Meas})} \right] \times 100$

جدول ۴. مقایسه مدل‌های مختلف تخمین نرخ برش بر مبنای آزمون‌های آماری

Model	CC	MAPE (%)	RMSE	MAE	MEDAE	VARE	VAF (%)
Ataei et al.'s model	0.878	17.209	1.560	1.203	0.2	1.378	73.955
ICA-based multivariate non-linear model	0.980	8.376	0.536	0.428	0.072	0.559	95.677

۶. نتیجه‌گیری

نظیر پارامترهای دستگاه سیم‌برش به دلیل مقادیر نسبتاً ثابت در موردهای مطالعاتی مختلف در مدل پیشنهادی لحاظ نشده است. در رابطه‌ی غیرخطی پیشنهادی از الگوریتم رقابت استعماری به منظور تعیین ضرایب مدل استفاده شده است. تجربه‌ی موفق استفاده از این الگوریتم در تعیین ضرایب روابط غیرخطی این تحقیق، قابل تعمیم به موارد مشابه است؛ از این رو توسعه بانک داده و اعمال سایر پارامترهای دخیل در برش انواع سنگ‌های تزئینی نظیر خصوصیات ساختی و بافتی مربوط به معادن مختلف در مطالعات آتی توصیه می‌شود. البته باید توجه نمود برای استفاده از این مدل در حل مسایل مشابه کلیه عوامل نظیر نوع دستگاه و سیستم برش و نوع عملیات برش در آن دیده شده باشد.

با توجه به عدم تعریف و وجود دستگاه برش استاندارد و برخوردار از قالب واحد، امکان تلفیق همزمان پارامترهای غیرقابل کنترل مربوط به سنگ و پارامترهای قابل کنترل مربوط با دستگاه به منظور ارائه مدل جامع پیش‌بینی قابلیت برش سنگ تاکنون محقق نشده است؛ تفاوت‌های موجود در دستگاه‌های مختلف و جزئیات آن‌ها یکی از دلایل قابل تأمل در این خصوص می‌باشد. در مطالعه حاضر برای ۱۴ نوع سنگ نرم کربناته، رابطه پیشنهادی تخمین و پیش‌بینی نرخ تولید سیم الماسه بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها، ارائه شده که با استناد به شاخص‌های آماری، مدل غیرخطی پیشنهادی دارای بالاترین دقت می‌باشد. همانگونه که مطرح شد سایر پارامترها

منابع

- Ardalan, Z., Karimi, S., Poursabzi, O., & Naderi, B., 2015. A novel imperialist competitive algorithm for generalized traveling salesman problems, *Applied Soft Computing*, 26: 546-555 .
- Ataei, M., Mikaiel, R., Sereshki, F., & Ghaysari, N., 2012. Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis, *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6): 1289-1295 .
- Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C., 2007. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, Paper presented at the Evolutionary computation, IEEE Congress on.
- Behnamian, J., & Zandieh, M., 2011. A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties. *Expert Systems with Applications*, 38(12): 14490-14498 .
- Ersoy, A., & Atıcı, U., 2004. Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks, *Diamond and Related Materials*, 13(1): 22-37 .
- Ersoy, A., Buyuksagic, S., & Atıcı, U., 2005. Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks, *Wear*, 258(9): 1422-1436 .
- Hamzaban, M.-T., Memarian, H., & Rostami, J., 2014. Continuous Monitoring of Pin Tip Wear and Penetration into Rock Surface Using a New Cerchar Abrasivity Testing Device, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(2): 689-701. doi:10.1007/s00603-013-0397-4
- Jain, S., & Rathore, S., 2009. Role of cut size area on the performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(2): 79-91 .
- Jain, S., & Rathore, S., 2011. Prediction of cutting performance of diamond wire saw machine in quarrying of marble: a neural network approach, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(3): 367-371.
- Kasiani, A., 2004. *Dimension Stones Atlas of Iran*, Nashr Gostar: Tehran.
- Lian, K., Zhang, C., Gao, L., & Li, X., 2012. Integrated process planning and scheduling using an imperialist competitive algorithm, *International Journal of Production Research*, 50(15):4326-4343 .
- Mikaiel, R., Ataei, M. A., & Hoseinie, H., 2008. Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rock cutting. *IDR, Industrial Diamond Review*, 68(3):28-34 .

-
- Mokhtarian Asl, M., & Sattarvand, J. (2016). An imperialist competitive algorithm for solving the production scheduling problem in open pit mine. *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*, 50(1), 131-143 .
- Ozcelik, Y., 1999. Investigation of the working conditions of diamond wire cutting machines in marble industry, PhD Thesis, Hacettepe University, Ankara (in Turkish).
- Sadaei, H. J., Enayatifar, R., Lee, M. H., & Mahmud, M., 2016. A hybrid model based on differential fuzzy logic relationships and imperialist competitive algorithm for stock market forecasting, *Applied Soft Computing*, 40:132-149 .
- Sadegheslam, G., Mikaeil, R., Rooki, R., Ghadernejad, S., & Ataei, M., 2013. Predicting the production rate of diamond wire saws using multiple nonlinear regression analysis, *Geosystem Engineering*, 16(4):275-285.
- Sharifi, M. A., & Mojallali, H., 2015. A modified imperialist competitive algorithm for digital IIR filter design, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(21):2979-2984 .
- Yılmaz, N. G., Goktan, R., & Kibici ,Y., 2011. An investigation of the petrographic and physico-mechanical properties of true granites influencing diamond tool wear performance, and development of a new wear index. *Wear*, 271(5):960-969.