

## پیش‌بینی نیروی برش در اره‌ی الماسه‌ی دیسکی: مطالعه موردی سنگ‌های گرانیتی

مجتبی مختاریان اصل<sup>۱\*</sup>، عارف علی‌پور<sup>۲</sup> و سجاد چهره‌قانی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

۳- گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه

نویسنده مسئول: [m.mokhtarian@uut.ac.ir](mailto:m.mokhtarian@uut.ac.ir)\*

نوع مقاله: مطالعه موردی-کاربردی

پذیرش: ۹۹/۴/۳

دریافت: ۹۸/۱۰/۸

## چکیده

سیم برش الماسه و اره‌های الماسه دیسکی کاربرد وسیعی در فرآوری و برش سنگ دارند. عملکرد برش متأثر از خصوصیات سنگ، مشخصات برش و شرایط محیطی و اپراتوری است. تاکنون مدل‌های مختلفی به منظور پیش‌بینی قابلیت برش مبتنی بر این پارامترها ارائه شده‌اند. پیش‌بینی عملکرد ماشین برش نقش بسزایی در تخمین هزینه‌ها دارد. هدف از پژوهش حاضر، بسط مدلی غیرخطی برای تخمین نیروی برش اره الماسه دیسکی توسط رویکرد بهینه‌سازی الگوریتم رقابت استعماری و مقایسه نتایج حاصل با تحقیقات صورت گرفته، است. آزمایشات صورت گرفته بر روی سنگ گرانیت مبنای مطالعه موردی بوده و مدل‌های پیشنهادی بر اساس آن داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای پیش‌بینی نیروی برشی از پارامترهای مشخص ماشین‌کاری شامل سرعت دورانی محیطی، سرعت یا گام پیشروی عبوری دستگاه برش، عمق برش و نرخ جاری شدن سیال سرد کننده استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های آماری مؤید دقت بسیار مناسب مدل دوم مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری با ضریب تعیین ۰/۹۸ و میانگین درصد قدرمطلق خطای برابر ۴/۴۸ در تخمین نیروی برش اره الماسه در مقایسه با مطالعات گذشته می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فرآوری سنگ، اره الماسه دیسکی، نیروی برش، الگوریتم رقابت استعماری

## ۱- پیشگفتار

امروزه برش سنگ به‌عنوان یک عملیات مهندسی، کاربردهای وسیع و تعیین‌کننده‌ای در صنایع سنگ تزئینی پیدا کرده است. تخمین قابلیت حفاری و برش سنگ توسط دستگاه‌های حفاری، سیم برش الماسه و اره الماسه دیسکی در تخمین هزینه‌های عملیاتی نقش مهمی دارد (ارسوی و آتیچی، ۲۰۰۴).

تعیین و اندازه‌گیری قابلیت برش سنگ<sup>۱</sup> یکی از شاخه‌های مهندسی سنگ محسوب می‌شود. در این زمینه طبقه‌بندی‌های محدودی ارائه شده که در آن‌ها مشخصات فیزیکی-مکانیکی سنگ نظیر چگالی، تخلخل، درجه و نوع سیمان‌شدگی، مشخصات بافتی، پارامترهای مقاومتی سنگ، سختی، ساینده‌گی و ... در کنار مشخصات بافت-ساخت و شرایط دستگاهی و اپراتوری مورد توجه قرار گرفته است. این طبقه‌بندی‌ها از پارامترهای مؤثر مختلفی استفاده کرده‌اند و در برخی موارد پارامترهای هم اثر و هم‌پوشان نیز وجود دارند (صادق‌اسلام و همکاران،

۲۰۱۳). طبقه‌بندی‌های مطرح در این حوزه معیاری برای

تمیز قابلیت برش سنگ‌های مختلف هستند.

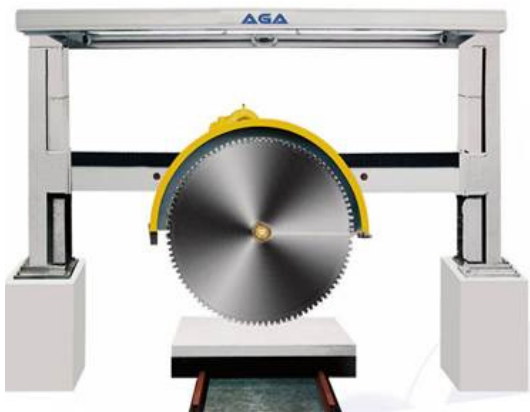
به‌منظور ارزیابی قابلیت برش سنگ، استفاده از دستگاه‌های مختلف در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی مورد توجه بوده است. بطور معمول در قابلیت برش اندرکنش بین خصوصیات مکانیکی سنگ و کارکرد دستگاه برش مورد توجه قرار می‌گیرد. شاخصه‌های مختلفی نظیر اندازه‌گیری شدت جریان مصرفی دستگاه، مقدار نیروی برش لازم، مقدار تولید دستگاه در واحد زمان و ... به‌منظور ارزیابی توان و کارکرد دستگاه برش و به‌عبارتی قابلیت برش مطرح هستند (عطایی و همکاران، ۲۰۱۲) در این حوزه آزمون‌های آزمایشگاهی برش استاندارد با دستورالعمل مشخص نظیر آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوره وجود ندارد.

دستگاه‌های مختلفی نظیر سیم برش الماسه، اره‌های برش الماسه‌ی دیسکی، تیغه‌های الماسه خطی و ... به منظور برش سنگ مطرح هستند. از این بین، اره‌های برش الماسه‌ی دیسکی با عملکرد قابل توجه و مناسب

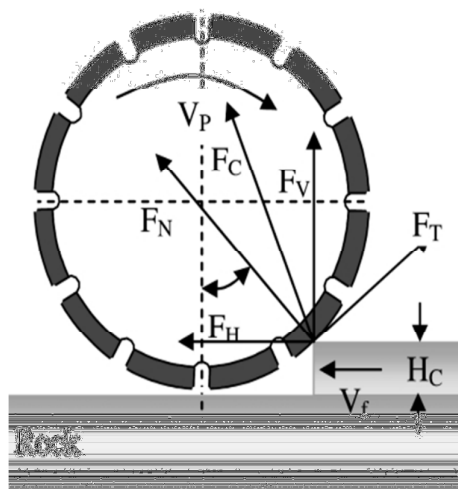
<sup>1</sup> Cutability

فارغ از ابعاد دستگاه برش اره‌ی الماسه‌ی دیسکی، مکانیزم عملکرد و نیروهای موثر در برش تا حدود زیادی یکسان بوده و از شباهت قابل توجهی برخوردار هستند. جزئیات بیشتر مربوط به این نیروها و عملکرد دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است. می‌توان از مراجع (کنستانتی، ۲۰۰۲؛ بویوکساغیز و گوکتان، ۲۰۰۵) برای اطلاعات تکمیلی در این زمینه استفاده کرد.

خود در مقایسه با سایر ابزارهای برش، در برش سنگ‌های مختلف به کار گرفته شده‌اند (ارسوی و آتیچی، ۲۰۰۴؛ کاراکوت، ۲۰۱۴). این اره‌ها در مقیاس آزمایشگاهی، متوسط کارگاهی و بزرگ‌مقیاس در حد قله‌بر سنگبری‌ها به کار گرفته می‌شوند؛ گاهی نیز از این ابزار در معادن سنگ و عملیات کوهبری استفاده می‌شود. نمایی از دستگاه اره الماسه‌ی دیسکی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. استفاده از اره‌های الماسه دیسکی به منظور برش سنگ



از طریق حسگر فشار سنچ سلولی نصب شده در زیر قطعه کار سنجیده می‌شود.	$F_H$	Horizontal Force	نیروی افقی
از طریق حسگر فشار سنچ سلولی نصب شده در زیر قطعه کار سنجیده می‌شود.	$F_V$	Vertical Force	نیروی عمودی
در شکل نشان داده شده است.	$\alpha$	The Effect Angle of Normal Force	زاویه تاثیر نیروی نرمال
	$F_N = F_V \cos \alpha + F_H \sin \alpha$	$F_N$	نیروی نرمال
	$F_T = F_V \sin \alpha + F_H \cos \alpha$	$F_T$	نیروی نرمال
	$F_C = \sqrt{F_N^2 + F_T^2}$	$F_C$	نیروی نرمال
قابل کنترل از طریق اپراتور	$H_C$	Depth of Cut	عمق برش
قابل کنترل از طریق اپراتور	$V_f$	Feed Rate	نرخ پیشروی
قابل کنترل از طریق اپراتور	$V_p$	Peripheral Speed	سرعت دورانی

شکل ۲. مکانیزم عملکرد و نیروهای موثر در برش توسط اره‌ی الماسه‌ی دیسکی (ارسوی و آتیچی، ۲۰۰۴)

به بهینه‌سازی صورت گرفته با طراحی آزمایشات و تعیین میزان بهینه‌ی متغیرهای فرآیند، مدل پیش‌بینی خطی نیز به‌منظور تخمین نیروی برشی لازم برای برش سنگ توسط اره‌ی الماسه ارائه شده است. هر چند دقت مدل خطی ارائه شده تا حدی قابل قبول می‌باشد، اما ارتقای سطح دقت مدل پیش‌بینی نیروی برش منجر به ارتقای عملیات برش خواهد شد؛ از اینرو در پژوهش حاضر مدلی غیرخطی برای تخمین نیروی برش اعمالی اره‌ی الماسه‌ی دیسکی با توجه به پارامترهای ماشین کاری دستگاه برش شامل سرعت دورانی محیطی، سرعت یا گام پیشروی عبوری دستگاه برش، عمق برش و نرخ جاری شدن سیال سرد کننده ارائه شده است. ضرایب مدل غیرخطی ارائه شده نیز با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری<sup>۱</sup> (ICA) تعیین شده است.

## ۲- معرفی مورد مطالعاتی- توصیف مراحل انجام آزمایشات

در پژوهش حاضر، از داده‌های مربوط به مطالعه صورت رفته توسط کاراکوت (۲۰۱۴) جهت پیش‌بینی نیروی برش اره‌ی الماسه‌ی دیسکی استفاده شده است. در مطالعه انجام گرفته توسط وی، برای آزمایشات برش، یک نمونه سنگ گرانیتی با ضخامت، طول و عرض ۳، ۳۰ و ۱۰ سانتی‌متری به‌عنوان نمونه آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. دیسک‌های الماسه‌ی دستگاه برش دارای قطری معادل با ۴۰ سانتی‌متر و دارای ۲۸ سگمنت الماسه با طول پیرامونی به‌طول ۴۰ میلی‌متر، عرض ۳/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. الماس‌های روی سگمنت نیز قابلیت سایش مواد سخت را دارا هستند. بازوی اره قادر به حرکت در دو جهت جلو- عقب و بالا- پایین بوده و این حرکت توسط به‌کارگیری موتور جریان متناوبی با قدرت ۰/۷۵ کیلو وات صورت می‌گیرد. به‌منظور چرخش دیسک نیز از موتوری با قدرت ۴ کیلو وات استفاده شده است. در زیر صفحه‌ای که نمونه آزمایش قرار گرفته، حس‌گرهای نیروسنج سلولی قرار گرفته‌اند. در جدول ۲ مشخصات کانی‌شناسی قطعه‌کار سنگی، به‌همراه مشخصات بافتی و توصیف دانه‌های آن و برخی خصوصیات فیزیکی- مکانیکی اندازه‌گیری شده ارائه شده است (کاراکوت، ۲۰۱۴).

ارزیابی کلی از قابلیت برش و تخمین مناسب از پارامترهای برش و بهینه‌سازی فرآیند برش منجر به افزایش توان تولید و کاهش هزینه‌های برش خواهد شد (کاراکوت، ۲۰۱۴). تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی ارزیابی کارایی برش اره‌های الماسه‌ی دیسکی در فرآوری سنگ تزئینی و سایر حوزه‌های مرتبط صورت گرفته است. در این تحقیقات از پارامترهای موثر متفاوتی برای تعیین قابلیت برش اره‌ی الماسه‌ی دیسکی استفاده شده، که به صورت جدول ۱ جمع‌بندی شده است (اوزجلیک، ۱۹۹۹). این پارامترها شامل پارامترهای عملیاتی برش، مشخصه‌های طراحی اره‌ی برش، مشخصات مدیریتی و شرایط کاری، مشخصات مکانیکی، بافتی و ساختی سنگ هستند. پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ غیرقابل کنترل و پارامترهای عملیاتی و طراحی دستگاه برش به نوعی قابل کنترل هستند. در برخی از مطالعات مشخصه‌های برش (شرایط دستگاه، تجهیزات و مهارت اپراتور) ثابت در نظر گرفته شده و نقش پارامترهای سنگ مورد توجه قرار گرفته است؛ مطالعات برخی از محققین (بایرام، ۲۰۱۳؛ دلگادو و همکاران، ۲۰۰۵؛ کاهرامان و همکاران، ۲۰۰۴؛ کاراکوت و همکاران، ۲۰۱۳؛ میکائیل و همکاران، ۲۰۱۶؛ یلماز و همکاران، ۲۰۱۱) جز این گروه قرار می‌گیرند. در برخی دیگر نیز با مینا قرار دادن سنگ مشخص و ثابت اقدام به تحلیل تغییرات پارامترهای برش شده است (بوپوکساگیز، ۲۰۰۷؛ فنر و همکاران، ۲۰۰۷؛ جین و رادور، ۲۰۰۹). به‌طور کلی تلفیق پارامترهای غیرقابل کنترل مربوط به سنگ در قالب شاخص قابلیت برش سنگ و پارامترهای قابل کنترل ماشین به‌منظور مدل‌سازی فرآیند برش و ارائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی برش مطرح هستند. مدل‌های مختلف ارائه شده تاکنون از جامعیت لازم برخوردار نبوده، و اکثر آن‌ها توان در نظر گرفتن پارامترهای دستگاه برش و سنگ به‌صورت همزمان را ندارند. در تحقیقات اخیر صورت گرفته توسط کاراکوت (۲۰۱۴) با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی اقدام به بهینه‌سازی عملیات برش با تاکید بر نیروی لازم برای برش سنگ تزئینی گرانیت و با توجه به متغیرهای تصمیم عملیاتی صورت گرفته است. مقدار نیروی برش سنگ بطور مستقیم بر میزان تولید، پوشش ابزار برش، حرارت برش، صافی و بی‌عیب بودن سطح برش در فرآیند برش با اره الماسه تاثیرگذار است. با توجه

<sup>1</sup> Imperialist competitive algorithm

جدول ۱. پارامترهای موثر بر برش اره‌ی الماسه‌ی دیسکی (بایرام، ۲۰۰۸)

پارامترهای قابل کنترل		پارامترهای غیرقابل کنترل مرتبط به خصوصیات سنگ	
مشخصات عملیاتی برش	میزان نیروی برش	مقاومت کششی، فشاری و خمشی	میزان زبری سطح
	میزان سرعت پیشروی عبوری دستگاه به‌هنگام برش		
مشخصات طراحی اره‌ی برش	میزان نرخ برداشت تراشه	مکانیکی	میزان سایش‌پذیری
	میزان سرعت محیطی		
مشخصات مدیریتی و شرایط کاری	میزان عمق برش	پارامترهای بافت سنگ	میزان آب محتوی
	میزان انرژی ویژه‌ی برش		
مشخصات مدیریتی و شرایط کاری	میزان مود برش	خصوصیات زمینه و ساخت سنگ	میزان سختی
	محتوی و میزان الماس		
مشخصات مدیریتی و شرایط کاری	مشخصات بافت و زمینه‌ی فلز مربوط	میزان و شرایط درزه و شکاف	درجه سیمان‌شدگی
	سطح لرزش ماشین		
مشخصات مدیریتی و شرایط کاری	قدرت ماشین	خصوصیات زمینه و ساخت سنگ	درجه هوازدهی
	میزان آب مصرفی		
مشخصات مدیریتی و شرایط کاری	شرایط محیطی و آب و هوایی	میزان و شرایط درزه و شکاف	کلیواژ
	مهارت اپراتور		

جدول ۲. مشخصات کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و فیزیکی- مکانیکی نمونه سنگ گرانیتی مورد مطالعه

توصیف فیزیکی- مکانیکی سنگ مورد استفاده			توصیف کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ مورد استفاده		
نوع مشخصه	واحد	مقدار	کانی‌شناسی توصیفی	ابعاد ذرات	
				مینیمم	ماکزیمم
دانسیته	$(kN/m^3)$	۲۵/۹	آلکالی فلدسپار	۰/۴۸	۴/۸۰
جذب آب	(%)	۰/۸۶	کوارتز	۰/۲۴	۲/۲۴
تخلخل	(%)	۱/۵۰	پلاژیوکلاز	۰/۵۶	۳/۶۰
سرعت امواج فراصوتی	$(m/s)$	۴۱۴۰	بیوتیت	۰/۳۲	۱/۶۰
شاخص سایش سرشار		۵/۲	اجزا دیگر	۰/۰۸	۰/۵۶
سختی چکش اشمیت		۵۶	سنگ‌شناسی توصیفی: سنگی با نام آلکالی گرانیت، با متن و زمینه‌ی هایپیدئومورفیک، آلکالی فلدسپار، کوارتز و پلاژیوکلاز کانی‌های غالب را تشکیل می‌دهند، کانی‌های غیرشفاف هم به‌صورت جانبی در جوار کانی‌های غالب حضور دارند. مقدار محدودی هم بیوتیت مشاهده شده است. آلکالی فلدسپار، میکروکلین و کوارتز موجود در آن نوعاً تمایل به آلتراسیون رسی داشته و آلتراسیون مورد اشاره گزارش شده است.		
سختی میکرو	$(HV)$	۵۳۹			
سختی لبه‌ای		۷۵/۶			
سختی موس		۴/۵			

که در رابطه‌ی (۱)،  $PS$  مبین سرعت دورانی بر حسب  $TS \text{ } m/s$  سرعت یا نرخ پیشروی عبوری دستگاه بر حسب  $CD \text{ } cm/min$  عمق برش بر حسب  $FRCF \text{ } cm$  نرخ جاری شدن سیال سرد کننده بر حسب  $ml/s$  و  $F$  نیروی برش سنگ توسط اره‌ی الماسه‌ی بر حسب  $N$  است.

در تحقیق حاضر برای پیش‌بینی دقیق‌تر نیروی برشی از مدل غیرخطی استفاده شده و از الگوریتم بهینه‌سازی فرآبته‌کاری رقابت استعماری جهت تعیین ضرایب مدل پیش‌بینی استفاده شده است.  $ICA$  توسط آتش‌پز و

### ۳- پیش‌بینی نیروی برشی اره‌ی الماسه‌ی دیسکی

در مطالعه صورت گرفته توسط کاراکوت (۲۰۱۴) از تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش‌بینی نیروی برش استفاده شده است. وی با توجه به چهار متغیر مستقل سرعت دورانی، سرعت یا گام پیشروی عبوری دستگاه برش، عمق برش و نرخ جاری شدن سیال سرد کننده معادله رگرسیونی خطی نیروی برش مطابق رابطه‌ی ۱ بیان کرده است (جدول ۳).

۲۰۱۵)، مساله فروشنده دوره‌گرد (اردلان و همکاران، ۲۰۱۵)، بهینه‌سازی، مساله زمان‌بندی تولید (بهنامیان و زندیه، ۲۰۱۱؛ لاین و همکاران ۲۰۱۲) و برنامه‌ریزی تولید معدن (مختاریان اصل و ستاروند ۲۰۱۶) اشاره کرد. به منظور پیش‌بینی نیروی برشی دو مدل غیرخطی با تابع هدفی مطابق روابط ۲ و ۳ (جدول ۳) در نظر گرفته شده است.

$k_{13}$  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 توسط الگوریتم رقابت استعماری قابل تعیین هستند.  $F_i$ ،  $PS_i$ ،  $TS_i$ ،  $CD_i$  و  $FRCF_i$  نیز مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به آزمایشات انجام گرفته هستند. ضرایب مدل‌های ارائه شده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری که با زبان برنامه‌نویسی ++C در محیط مایکروسافت ویژوال استادیو ۲۰۱۳ بسط یافته بود، مطابق با روابط ۴ و ۵ (جدول ۳) تعیین شدند.

#### ۴- مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف تخمین نیروی

##### برش سنگ

مقادیر اندازه‌گیری شده نیروی برش اراهی الماسه‌ی دیسکی به‌هنگام برش سنگ گرانیتهی مورد مطالعه به همراه پارامترهای مستقل تعیین‌کننده این نیرو در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین در جدول مذکور به‌منظور مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی نیروی برشی توسط مدل کاراکوت و مدل‌های غیرخطی پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری (نیروی برش تخمینی از روابط ۴ و ۵) نیز گزارش شده است. به منظور مقایسه ساده‌تر نتایج ارائه شده در جدول ۴، مقدار قدر مطلق خطای پیش‌بینی نیروی برشی با دو رویکرد کاراکوت (۲۰۱۴) و  $ICA_{II}$  در شکل ۴ نشان داده شده است. در ادامه این بخش از تحقیق، کارایی مدل‌های پیشنهادی با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای گرافیکی و کمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در روش گرافیکی از نمودار تخمین-مقدار واقعی به منظور بررسی دقت تخمین‌ها استفاده می‌شود. در این روش مقادیر تخمین زده شده نیروی برش توسط هر یک از مدل‌ها در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی آن ترسیم می‌شود. نتایج حاصل از این آزمون برای هر یک از مدل‌های مورد مطالعه در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده

لوکاس در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است، که الهام گرفته از فرآیندهای سیاسی- اجتماعی می‌باشد. همانند دیگر الگوریتم‌های فراآبتکاری جمعیت محور، این الگوریتم نیز کار خود را با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌کند، که هر کدام از اعضای جمعیت کشور<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. با توجه به تابع هدف مساله، تعدادی از بهترین کشورهای جمعیت اولیه به عنوان امپریالیست<sup>۲</sup> انتخاب شده و مابقی به عنوان مستعمره<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شوند. به مجموعه یک امپریالیست و مستعمراتش، امپراتوری<sup>۴</sup> 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 تشکیل‌دهنده آن یعنی امپریالیست و مستعمرات آن بستگی دارد. با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع شده و هر امپراتوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند) حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراتوری وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب و به سیطره در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراتوری‌های ضعیف‌تر حذف خواهند شد. امپراتوری‌ها 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 امپراتوری واحد در دنیا وجود داشته باشد. در این امپراتوری مستعمرات از لحاظ قدرت به کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند (آتشیز گرگری و لوکاس، ۲۰۰۷). فلوجارت روش حل مساله با الگوریتم رقابت استعماری در شکل ۳ نشان داده شده است.

تاکنون از الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسائل گوناگون بهینه‌سازی استفاده شده است، که از آن جمله می‌توان به پیش‌بینی بازار بورس (سادای و همکاران، ۲۰۱۶)، طراحی فیلتر دیجیتال (شریفی و مجللی،

<sup>1</sup> Country

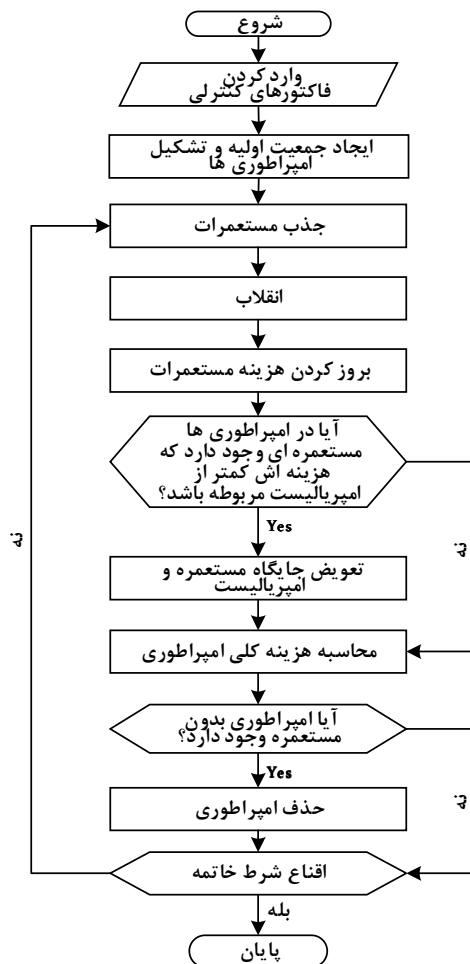
<sup>2</sup> Imperialist

<sup>3</sup> Colony

<sup>4</sup> Empire

ضریب تعیین ۰/۹۸ نزدیک‌ترین مقدار را نسبت به عدد یک دارا بوده و بهترین عمل‌کرد را در رابطه با تخمین دارد. در ادامه تحقیق جزئیات این برتری با مبنا قرار دادن برخی از مهم‌ترین شاخص‌های آماری تخمین در قالب کمی بیان خواهد شد.

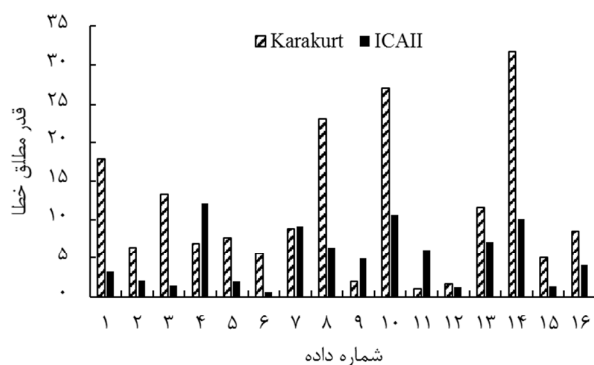
شده است. به هر مقدار که ضریب تعیین ( $R^2$ ) به عدد یک نزدیک‌تر باشند، دقت تخمین نیروی برشی توسط مدل بهتر خواهد بود. همان‌گونه که از شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، از میان مدل‌های بررسی شده، مدل غیرخطی دوم مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری با



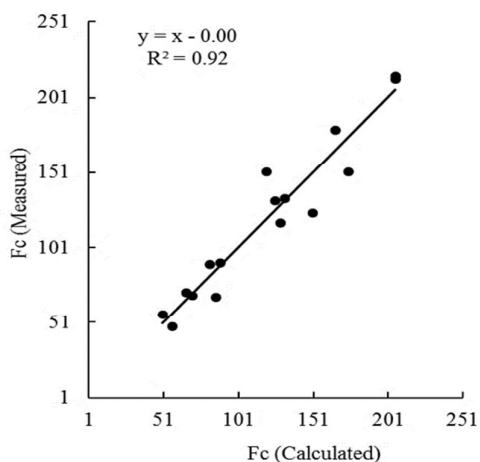
شکل ۳. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری (آنتشپز گرگری و لوکاس، ۲۰۰۷)

جدول ۳. روابط اشاره شده در متن مقاله

$F_{(N)} = 88.294 - 3.536PS_{(m/s)} + 1.530TS_{(cm/min)} + 71.46ICD_{(cm)} - 0.221FRCF_{(ml/s)}$	رابطه ۱
$Minimize \sum_{i=1}^n \left( \left  k_0 + k_1 PS_i^{k_2} TS_i^{k_3} CD_i^{k_4} FRCF_i^{k_5} \right  - F_i \right)^2$	رابطه ۲
$Minimize \sum_{i=1}^n \left( \left  k_0 + k_1 PS_i^{k_2} TS_i^{k_4} CD_i^{k_6} + k_7 FRCF_i^{k_8} \right  - F_i \right)^2$ $+ k_9 PS_i^{k_{10}} TS_i^{k_{11}} CD_i^{k_{12}} FRCF_i^{k_{13}}$	رابطه ۳
$F_{(N)} = \left  33.591 - 770.672PS_i^{-0.7305} TS_i^{0.4178} CD_i^{0.539} FRCF_i^{-0.1828} \right $	رابطه ۴
$F_{(N)} = \left  -12.496 + 22021.7PS_{(m/s)}^{-2.114} - 5486270TS_{(cm/min)}^{-3.151} + 184.792CD_{(cm)}^{0.919} \right.$ $\left. + 36630FRCF_{(ml/s)}^{-1.871} - 0.0824PS_{(m/s)}^{1.219} TS_{(cm/min)}^{0.388} CD_{(cm)}^{1.408} FRCF_{(ml/s)}^{0.186} \right $	رابطه ۵



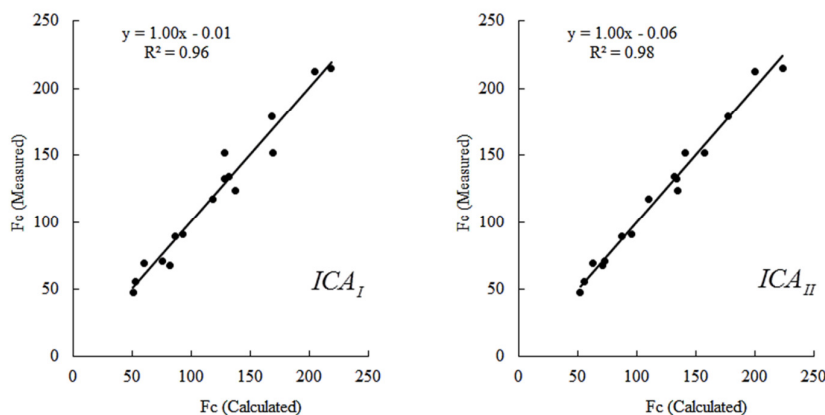
شکل ۴. مقایسه قدر مطلق خطای حاصل از تخمین نیروی برشی توسط مدل‌های *Karakurt* و *ICAII*



شکل ۵. نمودار تخمین-اندازه‌گیری شده حاصل از مدل خطی (کاراکورت)

جدول ۴. جزئیات مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی شده و پارمترهای موثر در تعیین نیروی برش اره الماسه دیسکی

شماره داده	سرعت دورانی (m/s)	سرعت یا گام پیشروی (cm/min)	عمق برش (cm)	نرخ جاری شدن سیال سرد کننده (ml/s)	نیروی برش اندازه‌گیری شده (N)	نیروی برش تخمینی (Karakurt)	نیروی برش تخمینی (ICA <sub>I</sub> )	نیروی برش تخمینی (ICA <sub>II</sub> )
۱	۲۵	۴۰	۰/۵	۵۰	۶۷/۹۵	۸۵/۸۱	۸۱/۸۰	۷۱/۱۹
۲	۲۵	۵۰	۱	۱۰۰	۱۳۲/۲	۱۲۵/۸۳	۱۲۸/۵۵	۱۳۴/۲۳
۳	۲۵	۶۰	۱/۵	۱۵۰	۱۹۷/۲	۱۶۵/۸۵	۱۶۸/۵۷	۱۷۷/۸۱
۴	۲۵	۷۰	۲	۲۰۰	۲۱۲/۸۱	۲۰۵/۸۷	۲۰۵/۲۹	۲۰۰/۶۳
۵	۳۰	۴۰	۱	۱۵۰	۸۹/۵۸	۸۱/۸۴	۸۶/۴۶	۸۷/۵۷
۶	۳۰	۵۰	۰/۵	۲۰۰	۵۵/۹۹	۵۰/۴۰	۵۲/۴۶	۵۵/۳۶
۷	۳۰	۶۰	۲	۵۰	۲۱۴/۸۲	۲۰۵/۹۲	۲۱۹/۰۰	۲۲۴/۰۳
۸	۳۰	۷۰	۱/۵	۱۰۰	۱۵۱/۳۶	۱۷۴/۴۸	۱۶۹/۶۵	۱۵۷/۷۳
۹	۳۵	۴۰	۱/۵	۲۰۰	۹۰/۸۱	۸۸/۸۸	۹۳/۰۴	۹۵/۷۸
۱۰	۳۵	۵۰	۲	۱۵۰	۱۲۳/۸۱	۱۵۰/۹۲	۱۳۷/۴۹	۱۳۴/۵۱
۱۱	۳۵	۶۰	۰/۵	۱۰۰	۶۸/۹۸	۷۰/۰۴	۶۰/۵۹	۶۲/۸۶
۱۲	۳۵	۷۰	۱	۵۰	۱۳۳/۷۷	۱۳۲/۰۸	۱۳۲/۰۷	۱۳۲/۵۱
۱۳	۴۰	۴۰	۲	۱۰۰	۱۱۷/۳۴	۱۲۸/۹۵	۱۱۸/۶۶	۱۱۰/۱۴
۱۴	۴۰	۵۰	۱/۵	۵۰	۱۵۱/۲۹	۱۱۹/۵۳	۱۲۸/۸۶	۱۴۱/۱۴
۱۵	۴۰	۶۰	۱	۲۰۰	۷۱/۱۵	۶۶/۰۷	۷۵/۷۶	۷۲/۴۶
۱۶	۴۰	۷۰	۰/۵	۱۵۰	۴۸/۱۱	۵۶/۶۵	۵۱/۰۱	۵۲/۱۷



شکل ۶. نمودار تخمین - اندازه‌گیری شده حاصل از مدل اول و دوم پیشنهادی غیرخطی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری

در متون فنی برای مقایسه میزان برازندگی تخمین‌های صورت‌گرفته تعدادی شاخص و آزمون آماری پیشنهاد شده است، که آزمون‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۵ جمع‌بندی شده‌اند. معادلات ریاضی مربوط به هر یک از این شاخص‌ها به صورت جداگانه معرفی و توضیحات لازم به منظور تفسیر راحت‌تر ذکر شده است.

در معادلات ارائه شده برای آزمون‌های آماری،  $F_{Meas}$  و  $F_{Esti}$  به ترتیب برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده‌ی نیروی برش می‌باشند. بر مبنای شاخص‌های قید شده در جدول ۵ تمامی مدل‌های تخمین نیروی برش مورد ارزیابی قرار گرفتند، که نتیجه آن در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. آزمون‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه میزان برازندگی تخمین

توضیحات	معادله	پارامتر آماری
مقدار کوچکتر بهتر است.	$MAPE = \frac{1}{n} \times \left[ \sum_{i=1}^{i=n} \left  \frac{F_{Meas}^i - F_{Esti}^i}{F_{Meas}^i} \right  \right] \times 100$	میانگین درصد قدرمطلق خطا <sup>۱</sup> (MAPE)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (F_{Meas}^i - F_{Esti}^i)^2}$	مجذور میانگین مربعات خطا <sup>۲</sup> (RMSE)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n}  F_{Meas}^i - F_{Esti}^i $	میانگین قدر مطلق خطا <sup>۳</sup> (MAE)
مقدار کوچکتر بهتر است.	$MEDAE = \text{median} \left( \left  \frac{F_{Meas} - F_{Esti}}{F_{Meas}} \right  \right)$	میانگین قدرمطلق خطای نسبی <sup>۴</sup> (MEDAE)
مقدار بزرگتر بهتر است.	$VAF = \left[ 1 - \frac{\text{var}(F_{Meas} - F_{Esti})}{\text{var}(F_{Meas})} \right] \times 100$	به حساب واریانس <sup>۵</sup> (VAF)

جدول ۶. مقایسه مدل‌های مختلف تخمین نیروی برشی بر مبنای آزمون‌های آماری

نام مدل تخمین	MAPE (%)	RMSE	MAE	MEDAE	VAF (%)
مدل خطی پیشنهادی کاراکوت	۱۰/۱۵۳	۱۴/۳۰۸	۱۱/۱۶۵	۰/۰۸۰	۹۲/۳۳۱
مدل اول غیر خطی پیشنهادی (ICA <sub>I</sub> )	۶/۹۹۰	۹/۸۳۹	۷/۶۲۷	۰/۰۶۰	۹۶/۳۲۶
مدل دوم غیر خطی پیشنهادی (ICA <sub>II</sub> )	۴/۴۸۴	۶/۳۵۵	۵/۱۷۸	۰/۰۴۵	۹۸/۴۶۸

<sup>1</sup> Mean absolute percentage error

<sup>2</sup> Route Mean Square Error

<sup>3</sup> Mean absolute error

<sup>4</sup> Median absolute error

<sup>5</sup> Variance account for



## نتیجه‌گیری

با توجه به عدم تعریف و وجود دستگاه برش استاندارد و برخورد از قالب واحد، امکان تلفیق همزمان پارامترهای غیرقابل کنترل مربوط به سنگ و پارامترهای قابل کنترل مربوط با ماشین برش سنگ به منظور ارائه مدل جامع پیش‌بینی قابلیت برش سنگ تاکنون محقق نشده است؛ از اینرو نقصان دستگاه برش آزمایشگاهی استاندارد و همه‌گیر با کارکردی نظیر دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری و سلول سه محوره هوک که قادر به تعمیم به سنگ‌های مختلف را داشته و امکان مقایسه در موردهای مختلف مطالعاتی را فراهم سازد، احساس می‌شود.

در مطالعه حاضر برای یک نوع سنگ گرانیتی دو مدل غیرخطی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری به منظور تخمین و پیش‌بینی نیروی برش اره‌ی الماسه‌ی دیسکی بر مبنای پارامترهای ماشین‌کاری دستگاه برش ارائه شده که با استناد به شاخص‌های آماری مدل‌های پیش‌بینی پیشنهادی دارای دقت بالایی می‌باشند. اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی در مقایسه با مدل ارائه شده توسط کاراکوت حکایت از برتری مطلق هر دو مدل پیشنهادی این تحقیق دارد مدل دوم غیرخطی پیشنهادی دارای ضریب تعیین  $0/98$  و میانگین قدر مطلق خطا  $5/178$  است.

مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن یک سنگ مشخص و بر مبنای پارامترهای ماشین‌کاری دستگاه برش اره الماسه دیسکی ارائه شده است. با طی فرایندی مشابه این تحقیق، امکان ارائه مدل برای هر نوع سنگ تزئینی دیگر نیز فراهم بوده و پیشنهاد می‌شود.

## تشکر و قدردانی

لازم است نویسندگان از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، تشکر و قدردانی نمایند.

## منابع

- 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.*
- Bayram, F (2008) *Sawing optimization of carbonate natural stone with circular saw, PhD Thesis, Hacettepe University.*
- Bayram, F (2013) *Prediction of sawing performance based on index properties of rocks, Arabian Journal of Geosciences, 6(11): 4357-4362 .*
- 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 .*
- Buyuksagis, I (2007) *Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade, Journal of Materials Processing Technology, 183(2): 399-406 .*
- Buyuksagis, I., & Goktan, R (2005) *Investigation of marble machining performance using an instrumented block-cutter, Journal of Materials Processing Technology, 169(2): 258-262 .*
- Delgado, N. S., Rodríguez-Rey, A., del Río, L. S., Sarriá, I. D., Calleja, L., & de Argandona, V. R (2005) *The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain), International journal of rock mechanics and mining sciences, 42(1): 161-166 .*
- 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 .*
- Fener, M., Kahraman, S., & Özder, M (2007) *Performance prediction of circular diamond saws from mechanical rock properties in cutting carbonate rocks, Rock Mechanics and Rock Engineering, 40(5): 505-517 .*
- 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 .*
- Kahraman, S., Fener, M., & Gunaydin, O (2004) *Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis, International journal of rock mechanics and mining sciences, 41(7): 1123-1131 .*
- Karakurt, I (2014) *Application of Taguchi method for cutting force optimization in rock sawing by circular diamond sawblades, Sadhana, 39(5): 1055-1070 .*
- Karakurt, I., Aydin, G., & Aydiner, K (2013) *Predictive modelling of noise level generated*
- 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., Mikaeil, R., Sereshki, F., & Ghaysari, N (2012) *Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis,*

- during sawing of rocks by circular diamond sawblades, *Sadhana*, 38(3): 491-511
- Konstanty, J (2002) Theoretical analysis of stone sawing with diamonds, *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1): 146-154 .
- 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 .
- Mikaeil, R., Haghshenas, S. S., Haghshenas, S. S., & Ataei, M (2016) Performance prediction of circular saw machine using imperialist competitive algorithm and fuzzy clustering technique, *Neural Computing and Applications*, 1-10.
- 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.
- 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 .
- Yilmaz, 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.

## ***Prediction of cutting force in circular diamond sawblades: A case study in granitic rocks***

***M. Mokhtarian Asl<sup>\*1</sup>, A. Alipour<sup>2</sup> and S. Chehrehani<sup>3</sup>***

*1, 2- Dept., of Mining and Metallurgical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia*

*3- Dept., of Mining Engineering, Urmia University, Urmia*

*\* m.mokhtarian@uut.ac.ir*

***Received: 2019/12/29 Accepted: 2020/6/23***

### ***Abstract***

*Circular diamond sawblades and diamond wire saw have extensive applications in the processing of natural stones. The cutting performance is affected by the rock properties, sawing characteristics and working conditions. So far, many researchers focused on modeling and estimating the sawing performance. Performance prediction of sawing machine have important role in the cost estimation. The aim of present study is to develop nonlinear models for estimating cutting force in circular diamond sawblades using Imperialist Competitive Algorithm (ICA) optimization techniques and compare the results obtained from literature models. For this purposes, the conducted tests on the granitic rocks were used in the case study and the proposed models based on those data have been evaluated. The peripheral speed, traverse speed, cut depth and flow rate of cooling fluid are used to predict the cutting force. According to the calculated statistical error between the forecasted and real measured values of cutting force, ICA-based model has the lowest values of MAPE, VARE, MEDAE and RMSE, while it has the highest value of VAF, in comparison to the other models. It is concluded that this AC<sub>II</sub>-based model is superior to others.*

***Keywords:*** *Natural stone processing, circular diamond sawblades, cutting force, Imperialist competitive algorithm*