

طراحی و ساخت دستگاه "مولتی وایر نخ دندان" (Slim Wire Saw)

حنیف حکمتی

مدیر عامل پارتیا (مرجع تخصصی ماشین آلات سنگ) hanif@partia.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، صنعت سنگ با چالش‌هایی نظیر افزایش تقاضا، نیاز به کاهش ضایعات و ارتقاء بهره‌وری مواجه بوده است. تکنولوژی "مولتی وایر نخ دندان" به عنوان راه‌حلی نوین و پیشرو، با هدف برش دقیق‌تر و سریع‌تر سنگ‌های ماربل، توسعه یافته است. این فناوری با استفاده از سیم‌های الماسه بسیار نازک (حدود ۰.۵ میلی‌متر) توانسته است ضایعات برش را به حداقل برساند و تعداد اسلب‌های تولیدی از هر بلوک سنگ را افزایش دهد. طراحی پیشرفته بخش‌های مختلف دستگاه شامل سیستم برش، بالابری، ایمنی و کنترل، منجر به بهینه‌سازی عملکرد آن شده و در عین حال مصرف انرژی، آب، و فضای نصب را نیز کاهش داده است. مزایای بارز این فناوری شامل بازگشت سرمایه سریع، کاهش آلودگی صوتی و محیطی و کاهش هزینه‌های تولید است. همچنین سیم‌های برش مورد استفاده در این تکنولوژی از صنعت سیلیکون الهام گرفته شده و به عنوان یک راه حل میان‌رشته‌ای موفقیت‌آمیز شناخته می‌شود. اگرچه محدودیت‌هایی مانند سرعت پایین‌تر برش نسبت به مولتی وایرهای سنتی ایتالیایی (با سیم‌های ضخیم) وجود دارد، اما نوید توسعه بیشتر آن در آینده به‌ویژه برای برش گرانیت نیز وجود دارد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که این فناوری می‌تواند نقش مؤثری در آینده پایدار صنعت سنگ ایفا کند.

کلمات کلیدی: مولتی وایر نخ دندان، صنعت سنگ، کاهش ضایعات، افزایش بهره‌وری، ماشین آلات سنگ، سنگ ماربل، سنگ گرانیت

مقدمه

صنعت سنگ یکی از صنایع مهم و تأثیرگذار در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و معماری به شمار می‌رود که در سال‌های اخیر با رشد تقاضا و نیاز به ارتقای کیفیت مواجه شده است. همزمان با این نیازها، لزوم کاهش ضایعات، بهره‌وری بیشتر در تولید و رعایت الزامات زیست‌محیطی بیش از پیش احساس می‌شود. در همین راستا، تکنولوژی‌های نوین نقش کلیدی در پاسخ به این چالش‌ها ایفا کرده‌اند. یکی از این نوآوری‌ها، دستگاه **مولتی وایر نخ دندان** است که توانسته با استفاده از سیم‌های بسیار نازک الماسه، برشی دقیق و اقتصادی را در سنگ ماربل ممکن سازد. فناوری مذکور از تجربه موفق صنعت برش سیلیکون الهام گرفته و با ایجاد تغییراتی اساسی در ساختار دستگاه‌های سنتی، راه را برای تولیدی پایدار و کم‌هزینه هموار کرده است.

در پژوهش حاضر، ضمن بررسی ساختار و اجزای مختلف دستگاه مولتی وایر نخ دندان، به مقایسه عملکرد آن با دستگاه‌های سنتی پرداخته شده است. نوآوری این پژوهش در معرفی دقیق ویژگی‌های این فناوری و تحلیل اثرات اقتصادی و فنی آن بر صنعت سنگ است؛ چرا که دستگاه مذکور علاوه بر بهبود عملکرد، باعث کاهش مصرف منابع، افزایش بازدهی، و بازگشت سریع سرمایه می‌گردد. این پژوهش گامی است در راستای تبیین جایگاه فناوری‌های نوین در تحول صنعت سنگ کشور.

یکی از مهم‌ترین مزایای این دستگاه، افزایش تعداد اسلب‌ها در هر بلوک سنگ است. یعنی اگر یک بلوک ماربل با عرض ۲ متر با این دستگاه بریده شود، به واسطه گل کردن بسیار کمتر در مقایسه با اره‌های سنتی ماربل، ۱۴ اسلب بیشتر تولید می‌کند. این افزایش بهره‌وری به معنای بازگشت سرمایه بسیار سریع‌تر است. در واقع، اگر سنگ ماربل نسبتاً ارزشمند باشد، سرمایه‌گذاری در خرید این دستگاه تنها پس از برش ۴۰ تا ۵۰ بلوک به طور کامل بازگردانده می‌شود، یعنی حتی اگر فقط یک بلوک در روز بریده شود با احتساب ایام تعطیل در کمتر از ۲ ماه بازگشت سرمایه کامل اتفاق می‌افتد! این مزیت باعث می‌شود که به جای هدررفت سنگ، بازگشت سرمایه سریعی داشته باشیم و سودآوری به طور چشمگیری افزایش یابد.



شکل ۱ نمای کلی مولتی وایر نخ دندان

روش کار

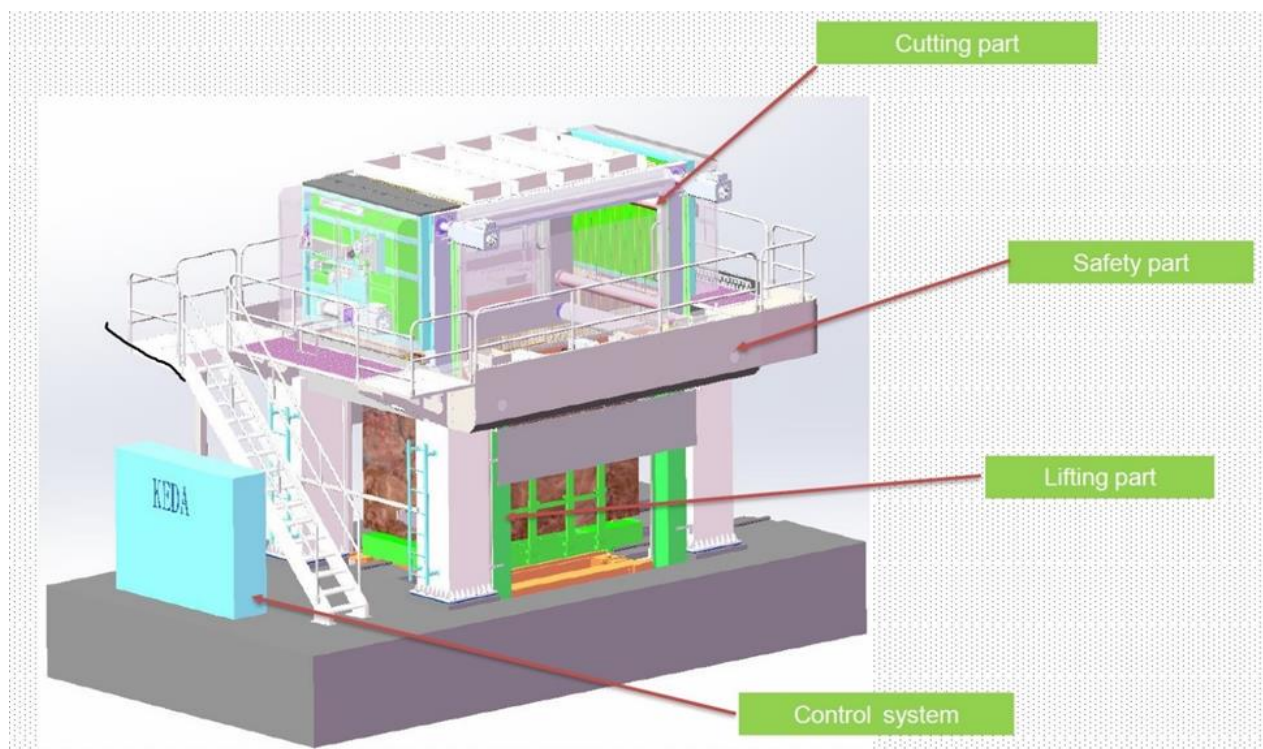
در این تحقیق، طرح مسئله از نیاز صنعت سنگ به فناوریهای دقیقتر، سریعتر و کمهزینهتر برای برش سنگهای ماربل آغاز شد. با توجه به ضایعات بالا، هزینههای مصرف انرژی و زمان بر بودن روشهای سنتی، هدف اصلی این پژوهش بررسی عملکرد و قابلیتهای دستگاه مولتی وایر نخ دنداننی است. مفهوم اصلی این فناوری استفاده از سیم الماسه بسیار نازک به قطر حدود ۰.۵ میلیمتر است که با کاهش ضخامت برش، باعث افزایش تعداد اسلبهای تولیدی از هر بلوک سنگ می شود.

ساختار دستگاه مولتی وایر نخ دنداننی:

دستگاه مولتی وایر نخ دنداننی از بخشهای مختلفی تشکیل شده است که هر کدام نقش مهمی در عملکرد کلی دستگاه ایفا می کنند. این بخشها شامل موارد ذیل می شوند:

- بخش برش (Cutting Part)
- بخش بالابری بلوک (Lifting Part)
- بخش ایمنی (Safety Part)
- سیستم کنترل (Control System)

هر یک از این بخشها به دقت طراحی شده اند تا عملکرد دستگاه را بهینه کنند و اطمینان حاصل شود که دستگاه می تواند با بالاترین دقت و کارایی کار کند.



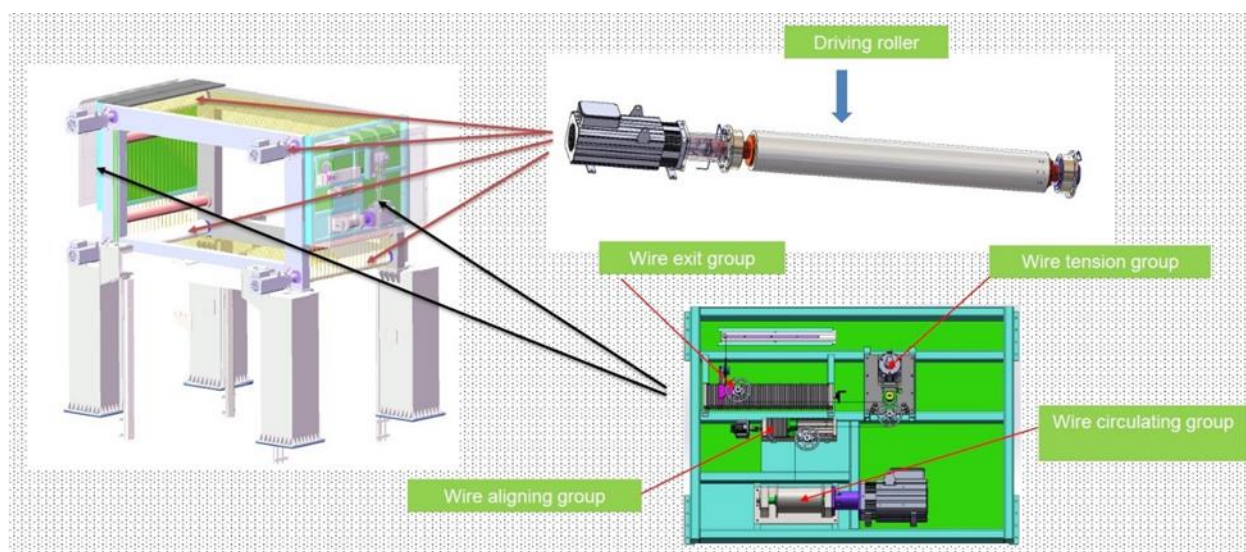
شکل ۲ ساختار دستگاه مولتی وایر نخ دنداننی

بخش برش دستگاه:

بخش برش دستگاه مولتی وایر نخ دنداننی شامل موارد ذیل است:

- درام محرک (Driving Roller)
- گروه خروج سیم (Wire Exit Group)
- گروه کشش سیم (Wire Tension Group)
- گروه گردش سیم (Wire Circulating Group)
- گروه تراز کردن سیم (Wire Aligning Group)

این بخش‌ها به طور هماهنگ کار می‌کنند تا اطمینان حاصل شود که سیم الماسه به درستی بر روی بلوک سنگ حرکت کرده و برش با دقت بالا انجام می‌شود.



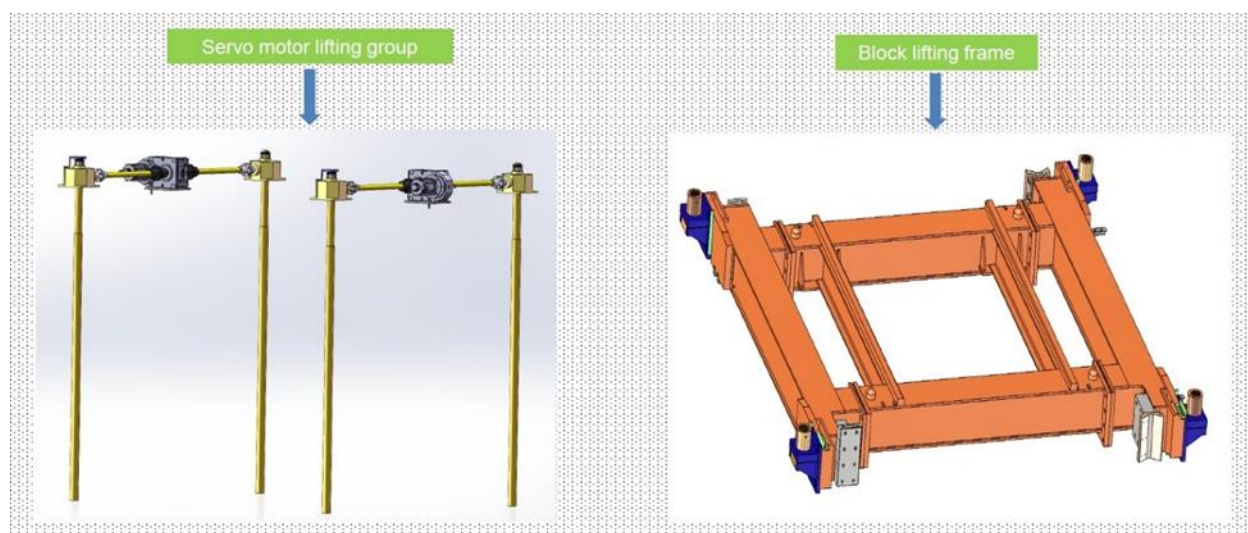
شکل ۳ بخش برش دستگاه مولتی وایر نخ دنداننی

بخش بالابری دستگاه:

بخش بالابری دستگاه شامل موارد ذیل است:

- موتور سروو بالابری (Servo Motor Lifting Group)
- قاب بالابری بلوک (Block Lifting Frame)

این بخش به دستگاه اجازه می‌دهد تا بلوک‌های سنگ را به آرامی و با دقت بالا حرکت دهد، که این امر برای دستیابی به برش‌های دقیق و یکنواخت ضروری است.



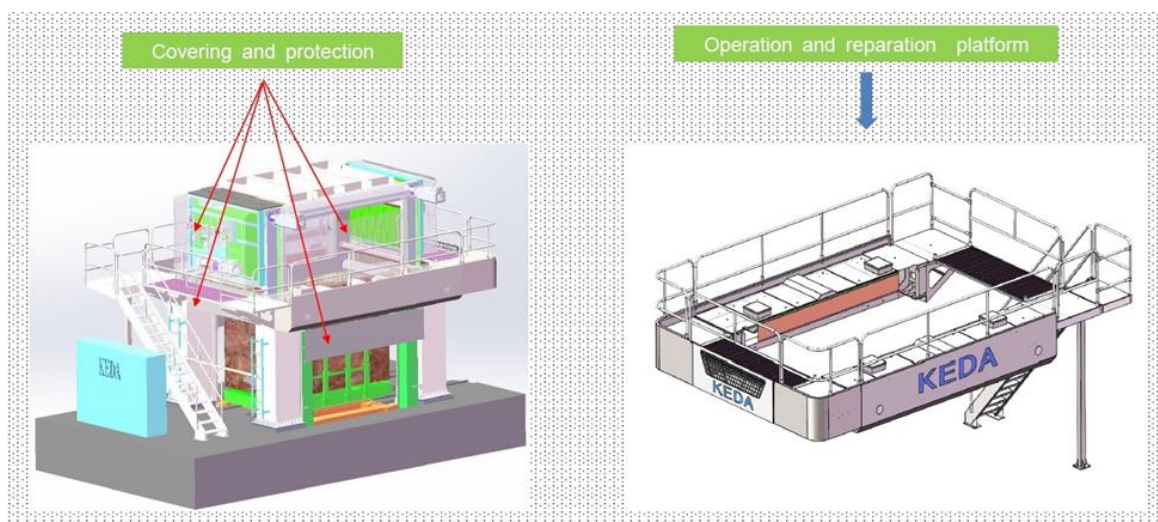
شکل ۴ بخش بالابری دستگاه مولتی وایر نخ دندان

بخش ایمنی دستگاه:

بخش ایمنی دستگاه شامل موارد ذیل است:

- پوشش و محافظ (Covering and Protection)
- پلتفرم عملیات و تعمیر (Operation and Reparation Platform)

این بخش‌ها اطمینان حاصل می‌کنند که دستگاه در حین کار ایمن بوده و تعمیر و نگهداری آن به راحتی انجام می‌شود.



شکل ۵ بخش ایمنی دستگاه مولتی وایر نخ دندان

سیستم کنترل دستگاه:

سیستم کنترل دستگاه مولتی وایر نخ دندان یکی از پیشرفته ترین بخش های این تکنولوژی است. این سیستم شامل موارد ذیل است:

- کنترل سرعت همزمان هر درام
- کنترل نیروی کشش دائمی سیم
- کنترل توقف با تاخیر پس از قطع برق
- مانیتورینگ اضطراری بر پارگی سیم، نیروی کشش، دمای یاتاقان اصلی و موتور، فشار آب، کنترل محدودیت فاصله سیم ها و مقدار عرضه سیم
- تعویض درام، روغن کاری، تعمیر پارگی سیم
- صرفه جویی چشمگیر در هزینه های تولید و ایجاد ارزش افزوده

همچنین، این سیستم از صفحه نمایش لمسی HMI و کنترل از راه دور پشتیبانی می کند که به اپراتورها اجازه می دهد تا به راحتی دستگاه را کنترل کنند.

مشخصات فنی دستگاه مولتی وایر نخ دندان:

جدول ۱ مشخصات فنی دستگاه مولتی وایر نخ دندان

پارامتر	مقدار
ابعاد دستگاه (میلی متر)	۸۵۰۰ × ۵۱۰۰ × ۵۶۵۰
اندازه بلوک (میلی متر)	۳۳۰۰ × ۲۰۰۰ × ۲۱۵۰
تعداد درام برش	۴
قطر سیم (میلی متر)	۰.۵
ضخامت اسلب ها	سفارشی
سرعت بالابری بلوک (متر در ساعت)	۰ تا ۸
سرعت حرکت سیم (متر بر ثانیه)	۲۵
روش برش	بالابری بلوک
ورود بلوک	طولی
قدرت موتور هر درام (کیلو وات)	۶۰
قدرت موتور درام سیم (کیلو وات)	۱۸
مصرف آب (لیتر در دقیقه)	۸۰۰
قدرت بالابر بلوک (کیلو وات)	۲ × ۵.۵
وزن دستگاه (تن)	۳۰
قدرت نصب شده (کیلو وات)	۲۹۰
حداکثر طول سیم ذخیره شده (متر بر ثانیه)	۳۰۰۰۰

- ✓ حداکثر اندازه بلوک (میلیمتر): $3300 \times 2000 \times 2150$ تا $3500 \times 2000 \times 2200$
- ✓ حداقل عرض بلوک (میلیمتر): ۶۰۰
- ✓ قدرت موتور کشش سیم (کیلووات): ۷۰۵
- ✓ طول یک دور سیم (دور چهار درام): $(2,3 + 4,2) \times 2 + 0,88 = 13,9$ متر
- ✓ قطر درام (میلیمتر): ۲۲۰
- ✓ ضخامت پوشش PU (میلیمتر): ۳۰
- ✓ عمق شیار (میلیمتر): ۱
- ✓ گام شیارها (میلیمتر): ۳۰۱۵ تا ۳۰۸

سیم نخ دندان یک راه حل میان رشته‌ای، الهام گرفته شده از صنعت برش سیلیکون

استفاده از سیم الماسه در دستگاه مولتی وایر نخ دندان، یک راه حل میان رشته‌ای است که از صنعت برش سیلیکون الهام گرفته شده است. در صنعت سیلیکون، از سیم‌های الماسه بسیار نازک برای برش دقیق و سریع قطعات استفاده می‌شود. این تکنولوژی با انتقال به صنعت سنگ، توانسته است دقت و سرعت برش را به طور چشمگیری افزایش دهد. این رویکرد میان رشته‌ای نه تنها به بهبود فرآیندهای تولید کمک کرده است، بلکه باعث کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری شده است.



شکل ۶ سیم نخ دندان که الهام گرفته از سیلیکون

مزایای دستگاه مولتی وایر نخ دندان ماربل در مقایسه با اره‌های سنتی ماربل

برای تکمیل بررسی عملکرد دستگاه مولتی وایر نخ دندان، یک مطالعه تجربی نیز انجام شد. در این مطالعه، سه بلوک ماربل مشابه با اندازه استاندارد $3300 \times 2000 \times 2150$ میلی‌متر انتخاب و عملیات برش با استفاده از دستگاه مولتی وایر نخ دندان انجام گردید. شاخص‌هایی مانند سرعت برش، تعداد اسلب تولیدی، مصرف آب، مصرف انرژی و میزان ضایعات سنگ در طول فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه، شرایط مشابهی برای برش همین نوع بلوک با استفاده از اره‌های سنتی ماربل نیز در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که میانگین سرعت برش برای سنگ ماربل نرم با دستگاه مولتی وایر نخ دندان حدود ۲۵ سانتی‌متر در ساعت و برای سنگ‌های سخت حدود ۱۵ سانتی‌متر در ساعت بوده است. در هر بلوک، دستگاه مولتی وایر توانست حدود ۱۴ اسلب بیشتر نسبت به اره سنتی تولید کند که این به معنای افزایش بهره‌وری تا ۲۰ درصد بود. مصرف آب در دستگاه جدید حدود ۸۰ درصد کمتر گزارش شد (۸۰۰ لیتر در دقیقه نسبت به ۴۰۰۰ لیتر در اره‌های سنتی) و سطح نویز نیز کاهش چشمگیری داشت.

مصرف انرژی واقعی در دستگاه مولتی وایر حدود ۶۰ کیلووات در ساعت بود، در حالی که اره سنتی به‌طور میانگین ۹۰ کیلووات در ساعت مصرف می‌کرد. میزان ضایعات سنگ در دستگاه جدید به دلیل عدم گل کردن و تنش پایین‌تر، حدود ۱۰ درصد کمتر از روش سنتی بود. همچنین بررسی کیفی سطح اسلب‌ها نشان داد که صاف‌تر و بدون ترک‌های مویی هستند. این تحلیل تجربی نشان داد که راه‌حل ارائه‌شده، نه تنها در تئوری بلکه در عمل نیز توانسته کارایی و صرفه‌جویی اقتصادی را به اثبات برساند.

این ارزیابی نشان می‌دهد دستگاه مولتی وایر نخ دندان می‌تواند با کاهش مصرف آب، صدا و هزینه فونداسیون، و همچنین افزایش خروجی اسلب، بهره‌وری را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. به‌علاوه، با کاهش تنش وارد بر بلوک‌های دارای ترک، درصد ضایعات به‌شدت کاهش می‌یابد. راه‌حل ارائه‌شده در این پژوهش، جایگزینی تدریجی این دستگاه با سیستم‌های سنتی در کارخانه‌های فرآوری سنگ ماربل است تا ضمن ارتقای کیفیت تولید، پایداری اقتصادی نیز حاصل شود.

- آلودگی و هدررفت آب: مصرف آب در دستگاه مولتی وایر نخ دندان حدود ۸۰ درصد کمتر از اره‌های سنتی است.
- خروجی هر متر مکعب بلوک: اگر ضخامت اسلب‌ها ۱۷.۵ میلیمتر باشد، هر متر مکعب بلوک با اره سنتی می‌تواند ۴۷ متر مربع اسلب تولید کند، در حالی که با دستگاه مولتی وایر نخ دندان این مقدار به ۵۵ متر مربع افزایش می‌یابد که به معنای ۱۵ درصد افزایش بهره‌وری است.
- سطح نویز: سطح نویز تولیدی در دستگاه مولتی وایر نخ دندان حدود ۵۰ درصد کمتر از اره‌های سنتی است.
- فضای نصب: فضای مورد نیاز برای نصب یک دستگاه مولتی وایر نخ دندان ۱۵ درصد کمتر از اره‌های سنتی است.
- هزینه فونداسیون: آماده‌سازی فونداسیون برای این دستگاه آسان‌تر بوده و هزینه آن حدود ۸۰ درصد کمتر از اره‌های سنتی است.
- حمل و نقل: حمل و نقل این دستگاه تنها به سه کانتینر HQ نیاز دارد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و مدیریت آن آسان است.
- تنش کمتر: با توجه به حرکت سیم با سرعت بالای ۲۵ متر بر ثانیه در یک جهت، تنش بسیار کمتری به سنگ، به ویژه بلوک‌هایی با ترک‌های زیاد، وارد می‌شود. در حالی که اره‌های سنتی با توجه به حرکت مداوم رفت و برگشتی، تنش بسیار زیادی به سنگ وارد کرده و باعث بروز شکستگی در بلوک‌های با ترک زیاد می‌شوند.

مزایا و معایب دستگاه مولتی وایر نخ دندان ماربل در مقایسه با مولتی وایرهای ماربل گرانیته ایتالیایی

بزرگترین مزیت مولتی وایرهای نخ دندان ماربل نسبت به مولتی وایرهای ماربل/گرانیت معمول ایتالیایی ضخامت گل کردن بسیار کمتر آن است (۰.۵ میلیمتر نسبت به ۴.۳ تا ۶.۳ میلیمتر کنونی) اما در مقابل هم فعلاً سرعت برش کمتری دارند و هم فعلاً فقط توانایی برش ماربل را دارند.

نتایج و بحث

از نظر کیفی، عملکرد دستگاه مولتی وایر نخ دندان در چندین بعد مورد ارزیابی قرار گرفته است:

- **کیفیت سطح برش:** به دلیل یکنواختی کشش سیم و طراحی دقیق سیستم درام، اسلب‌های تولیدی از نظر صاف بودن و کاهش ترک‌های سطحی، کیفیت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی دارند.
- **پایداری عملکرد:** طراحی سیستم‌های مانیتورینگ و کنترل اتوماتیک نظیر کنترل دمای یاتاقان‌ها، فشار آب و پارگی سیم، باعث افزایش اطمینان از عملکرد مداوم و بدون خطای دستگاه شده است.
- **سهولت نصب و نگهداری:** طراحی ماژولار دستگاه و پشتیبانی از کنترل لمسی و از راه دور، منجر به کاهش نیاز به اپراتور ماهر و کاهش زمان توقف برای تعمیرات شده است.

برای دستیابی به بهترین نتایج در استفاده از دستگاه مولتی وایر نخ دندان، توجه به نکات زیر ضروری است:

- **اثرات مکانیکی:** دقت موازی بودن درام‌ها، لرزش درام‌ها در جهت محوری، سختی و اینرسی درام‌ها و گردش سیم، لرزش و تعادل دینامیکی درام‌ها و گردش سیم، یکنواختی کشش سیم، سرعت حرکت سیم و نیروی کشش سیم در هنگام برش.
- **سیستم کنترل:** کنترل تفاوت سرعت درام‌ها، دقت تراز کردن سیم و سرعت پاسخ کشش سیم.
- **جزئیات مهم عملیاتی:** تمیزی سطح بلوک، پوشش سطح بلوک با رزین اپوکسی، اندازه تیغه پرکننده فاصله، تقویت بلوک، خنک‌کاری با آب، کیفیت آب بازیافتی، پشتیبانی صفحه زیرین بلوک، کنترل انحنای سیم، شروع مجدد پس از توقف طولانی، آبرسانی قبل از شروع به کار دستگاه و شل کردن نیروی کشش سیم در هنگام بازپیچیدن.
- **فرمول برش:** تنظیمات شامل نیروی کشش سیم، سرعت سیم، سرعت بالابری بلوک، طول سیم باز شده و طول سیم بازگشتی است. همچنین شرایط برش نیز به سختی و شکنندگی بلوک، اندازه بلوک و ضخامت اسلب‌ها بستگی دارد.
- **مشکلات تولید:** پارگی سیم، پرش سیم از شیار درام، اسلب‌های منحنی/موجی/پلکانی، فرسودگی شیار پوشش PU درام، سرعت برش کند.
- **طول عمر درام‌ها:** طول عمر درام‌ها به ضخامت اسلب‌ها بستگی دارد. اگر ضخامت اسلب‌ها تغییر نکند، یک درام می‌تواند حدود ۴۸ تا ۶۴ بلوک را برش دهد. اما اگر ضخامت اسلب‌ها تغییر کند، طول عمر درام‌ها کاهش می‌یابد.
- **طول سیم ذخیره شده:** طول سیم ذخیره شده بیشتر باشد، مصرف متوسط سیم کاهش می‌یابد. اما باید تعادلی بین اینرسی و تعادل دینامیکی گردش سیم برقرار شود.
- **زمان نصب سیم جدید:** زمان نصب سیم جدید به تعداد اسلب‌ها و تجربه اپراتور بستگی دارد. به طور معمول، دو اپراتور حدود ۳۰ دقیقه برای نصب سیم جدید زمان نیاز دارند.

- **نیروی کشش مناسب سیم:** نیروی کشش کافی سیم برای شکل اسلبها و کاهش خطر انحنای اسلبها ضروری است. به طور معمول، نیروی پارگی سیم به قطر سیم بستگی دارد. به عنوان مثال، برای سیم با قطر ۰.۴۵ میلیمتر، نیروی پارگی ۳۰۰ نیوتن و برای سیم با قطر ۰.۵۵ میلیمتر، نیروی پارگی ۴۰۰ نیوتن است.
- **مصرف و هزینه سیم:** مصرف و هزینه سیم به سختی بلوک بستگی دارد. اگر سیم پاره شود، هزینه به طور قابل توجهی افزایش می یابد. به طور معمول، اگر بلوک دارای سختی متوسط باشد، هزینه برش هر متر مربع حدود یک دلار است.
- **مصرف برق:** دستگاه با قدرت نصب شده ۲۹۰ کیلووات طراحی شده است، اما مصرف واقعی برق حدود ۶۰ کیلووات در ساعت است.
- **سرعت برش واقعی:** باید در نظر داشته باشیم مولتی وایر نخ دندان عملاً به عنوان جایگزینی برای اره های ماربل سنتی اختراع شده است بنابراین سرعت برش آن مشابه سرعت برش اره ماربل سنتی است و مزیت کلیدی آن در مقایسه با اره، تولید حدود ۱۴ قطعه اسلب بیشتر از هر بلوک است. امروزه، برای بلوک های نرم، سرعت برش دستگاه حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر در ساعت و برای سنگ ماربل سخت، سرعت برش واقعی حدود ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر در ساعت است، یعنی هر بلوک سخت به حدود ۱۴ ساعت زمان برش نیاز دارد.
- **احتمال پارگی سیم:** احتمال پارگی سیم ۵ سال پیش و در زمان عرضه اولیه دستگاه مولتی وایر نخ دندان بین ۵۰٪ تا ۸۰٪ بود! یعنی احتمال پاره شدن سیم در یک برش بیش از احتمال پاره نشدن آن بود! این در حالی است که با مجموع پیشرفتهایی که در تکنولوژی ساخت دستگاه و سیستمهای کنترلی آن و همچنین در تکنولوژی ساخت سیم نخ دندان انجام شده است در حال حاضر این احتمال به ۳٪ تا ۵٪ کاهش یافته است که معادل احتمال پاره شدن سیم در مولتی وایرهای سنتی ایتالیایی است و عملاً دیگر موضوع نگرانی بابت پاره شدن سیم منتفی است.

هزینه های مرتبط با دستگاه

- ❖ هزینه حمل و نقل دستگاه: هزینه حمل و نقل دستگاه به بندر عباس ایران به دو صورت محاسبه می شود:
 - اگر بخش بالایی دستگاه به صورت یک تکه حمل شود، به ۲ کانتینر ۴۰ فوتی HQ (هر کدام حدود ۴۰۰۰ دلار) و یک کانتینر ۴۰ فوتی FR (حدود ۱۲۰۰۰ دلار) نیاز است.
 - اگر بخش بالایی دستگاه به صورت چند تکه کوچک تر حمل شود، به ۳ کانتینر ۴۰ فوتی HQ (هر کدام حدود ۴۰۰۰ دلار) نیاز است. این روش ارزان تر است اما زمان نصب در محل را حدود یک هفته تا ده روز افزایش می دهد.
- ❖ هزینه سیم: برای سنگ ماربل سخت، قطر سیم ۰.۶۵ میلیمتر توصیه می شود تا میزان پارگی سیم کاهش یابد. هزینه سیم حدود ۰.۰۶ دلار به ازای هر متر است. برای هر بار استفاده، ۳۰ کیلومتر سیم نیاز است که حدود ۳ تا ۴ بلوک را می تواند برش دهد. هزینه سیم برای هر متر مربع اسلب با ضخامت ۲۰ میلیمتر حدود ۰.۸۲ دلار است.
- ❖ هزینه درام های جایگزین: درام ها با مواد PU به ضخامت ۳۰ میلیمتر پوشش داده شده اند. هزینه مواد PU برای چهار درام حدود ۶۴۰۰ دلار است. این مواد می توانند برای برش ۱۵۰ بلوک استفاده شوند. هزینه درام ها برای هر متر مربع اسلب حدود ۰.۰۶ دلار است.

چشم انداز توسعه مولتی وایرهای نخ دندان

با توجه به اینکه صنعت سنگ انتظار نازک تر شدن سیم مولتی وایرها بیش از این را ندارد، قاعدتاً تکنولوژی از این پس بر روی افزایش طول عمر و سرعت برش سیم تمرکز خواهد کرد و حتماً گام بعدی توسعه این دستگاه به سمت مولتی وایرهای نخ دندان گرانیت بر پیش می رود.

نتیجه گیری

بررسی انجام شده درباره تکنولوژی مولتی وایر نخ دندان ماربل نشان داد که این فناوری، نه فقط در بُعد فنی بلکه از نظر مدیریتی و اقتصادی نیز توانسته ساختارهای سنتی صنعت سنگ را به چالش بکشد. وجه تمایز اصلی این پژوهش، تحلیل عملکرد دستگاه در محیط واقعی کارخانه و در مواجهه با شرایط عملیاتی متنوع بود؛ شرایطی که اغلب در ارزیابی‌های نظری مغفول می‌مانند. سهم علمی این مقاله در ارائه چارچوبی کاربردی برای مقایسه کمی و کیفی میان فناوری‌های سنتی و نوین برش سنگ تعریف می‌شود، که می‌تواند به عنوان مرجعی برای تصمیم‌گیری‌های صنعتی و سرمایه‌گذاری‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، روشن‌ساختن ظرفیت بالای این تکنولوژی برای سازگاری با بلوک‌های سنگی با کیفیت‌های متفاوت، و نیز قابلیت توسعه آن برای سایر انواع سنگ‌ها نظیر گرانیت است. از این رو، ادامه تحقیق در زمینه تنظیمات خاص دستگاه برای سنگ‌های سخت‌تر، طراحی الگوریتم‌های هوشمند کنترل کشش سیم، و یا استفاده از مواد مقاوم‌تر در پوشش درام‌ها می‌تواند زمینه‌ساز ارتقای نسل آینده این دستگاه‌ها شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تأثیر این فناوری بر هزینه‌های زیست‌محیطی و بازیافت آب مصرفی در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد. تکنولوژی "مولتی وایر نخ دندان" تحول بزرگی در صنعت سنگ ایجاد کرده است. این دستگاه نه تنها به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید کمک می‌کند، بلکه با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی، به عنوان راه‌حلی پایدار برای صنعت سنگ شناخته می‌شود. با توجه به بازخورد مثبت استفاده‌کنندگان از این تکنولوژی و پیشرفت‌های مستمر در این زمینه، پیش بینی می‌شود که مولتی وایر نخ دندان انقلابی در صنعت سنگ ایجاد کند.



مراجع

- [1] Samarakoon, K.G.A.U., Chaminda, S.P., Jayawardena, C.L., Dassanayake, A.B.N., Kondage, Y.S., & Kannangara, K.A.T.T. (2023). A Review of Dimension Stone Extraction Methods. *Mining*, 3(3), 516–531.
- [2] Konstanty, J.S. (2021). The Mechanics of Sawing Granite with Diamond Wire. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 2591–2597.
- [3] Li, A., Hu, S., Zhou, Y., Wang, H., Zhang, Z., & Ming, W. (2023). Recent Advances in Precision Diamond Wire Sawing Monocrystalline Silicon. *Micromachines*, 14(8), 1512.
- [4] Wright, D.N., & Engels, J.A. (2003). The Environmental and Cost Benefits of Using Diamond Wire for Quarrying and Processing of Natural Stone. *Industrial Diamond Review*, 63(4), 16–17.
- [5] Zichella, L., Bellopede, R., Marini, P., Tori, A., & Stocco, A. (2017). Diamond Wire Cutting: A Methodology to Evaluate Stone Workability. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(9), 963–970.
- [6] Ataei, M., Mikael, R., Sereshki, F., & Ghaysari, N. (2012). Predicting the Production Rate of Diamond Wire Saw Using Statistical Analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6), 1289–1297.
- [7] Lolo Núñez, J.J. (2017). Machine for Cutting Stone in Quarry, Using Diamond Wire (Patent No. ES2575015B1, Spain).
- [8] Pedrini, G., & Baragetti, S. (2016). Multi-Wire Machine for Cutting Blocks of Stone and Wire Tensioning Device (Patent No. WO2016071936A1).
- [9] KEDA Industrial Group. (2024, July 18). Technological Innovation | KEDA Stone Machinery's First Super Slim-Line Saw Officially Starts Cutting Operations at Fujian Jiafeng. KEDA Industrial Group Website.
- [10] KEDA Industrial Group. (2024, December 3). KEDA Stone Machinery Showcases Expertise at “Super Slim-Wire Saw for Marble Technology Exchange Conference”. KEDA Industrial Group Website.
- [11] KEDA Stone Machinery. (2025, March 19). KEDA Stone Machinery Shines at Xiamen International Stone Fair 2025. KEDA Stone Machinery Website.
- [12] KEDA Stone Machinery. (2025). Technical specifications of KEDA Super Slim-Wire Saw System, Product technical datasheets and manual.
- [13] PARTIA (Stone Machinery Reference). (2020). Handbook of Stone Machinery (2nd Edition)