



مقاله

# معدن کاری پایدار؛ رویه ها، رویکردها و چالش ها

(درک یک واقعیت مهم  
برای حفظ محیط زیست)



برای رسیدن به اهداف معدن کاری سبز، اصول اساسی مانند توسعه روش های معدن کاری با اثرات محیط زیستی کمتر، استفاده از پسماندهای معدنی، استفاده از تجهیزات سازگار با زیست بوم، احیا و بازسازی سایت های معدن کاری شده و متوقف کردن معدن کاری های غیرقانونی باید به جد مورد توجه قرار گیرد.



دکتر مهدی خراسانی پور

عضو هیئت علمی گروه زمین شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

### ۱-۱- مقدمه

بشر امروز به این درک رسیده است که برای داشتن زیست‌بومی بهتر در کره زمین، باید در همه زمینه‌ها موضوع پایداری (Sustainability) را به جد موردتوجه قرار دهد. استان کرمان همواره به‌عنوان بهشت معادن ایران مطرح بوده است. وجود ذخایر ارزشمندی از معادن مانند مس، آهن، زغال‌سنگ، طلا و انواع سنگ‌های ساختمانی سبب توسعه صنایع معدنی در بخش‌های مختلف این استان شده است. به‌رغم مجموعه ذخایر زمین‌شناسی خدادادی در این استان، نگرانی‌های محیط‌زیستی متعددی در خصوص فعالیت معدن‌کاری و صنایع معدنی وجود دارد که گاهی با تنش‌های اجتماعی نیز همراه بوده است. انتظار می‌رود نهادهای متولی حوزه محیط‌زیست با رویکردی علمی و واقع‌بینانه نسبت به رفع نگرانی‌های مطرح شده اقدام نمایند. رعایت اصول معدن‌کاری پایدار در نهایت منجر به تغییر رویه‌ها و رویکردها در حوضه معدن‌کاری و سوق دادن آن به سمت معدن‌کاری سبز خواهد شد. برای رسیدن به اهداف معدن‌کاری سبز، اصول اساسی مانند توسعه روش‌های معدن‌کاری با اثرات محیط‌زیستی کمتر، استفاده از پسماندهای معدنی، استفاده از تجهیزات سازگار با زیست‌بوم، احیا و بازسازی سایت‌های معدن‌کاری شده و متوقف کردن معدن‌کاری‌های غیرقانونی باید به جد موردتوجه قرار گیرد. انتظار می‌رود معادن و صنایع معدنی کشور ما نیز به‌عنوان یکی از بازوهای مؤثر اقتصاد، رویکرد معدن‌کاری پایدار را در برنامه‌ریزی‌های خود مدنظر قرار دهند. در این رویکرد، اقتصاد پایدار، جامعه پایدار و محیط‌زیست پایدار دست در دست هم استفاده از معادن را به سمت بهره‌برداری ارزشمندتر، بهینه‌تر و سازگارتر با زیست‌بوم‌های طبیعی هدایت خواهد نمود.

### ۲- توسعه پایدار و موانع پیش روی آن

متعاقب انقلاب صنعتی در قرون ۱۷ تا ۲۰ میلادی نوعی از توسعه شایع شد که هدف

آن تنها توسعه اقتصادی بود و به اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی آن توجه نمی‌شد. این نوع توسعه که در اصطلاح توسعه یک‌جانبه اقتصادی یا توسعه سنتی هم نامیده می‌شد، باعث بروز مشکلات اجتماعی و زیست‌محیطی متعددی (بویژه در قرن بیستم) شد. لذا به‌تدریج شکلی از توسعه مطرح شد که در آن مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی بروز نکنند، یا حداقل مدیریت شده و کاهش یابند. این نوع توسعه را توسعه پایدار نامیدند.

توسعه پایدار نوعی از توسعه است که در آن بشر ضمن تأمین نیازهای خود از طبیعت، یکپارچگی و ثبات اکوسیستم‌ها و محیط‌زیست را برای استفاده نسل‌های آینده نیز حفظ می‌کند؛ به عبارت دیگر، در وضعیت پایدار، انسان بدون تأثیر منفی غیرقابل جبران بر طبیعت، از آن استفاده می‌کند.

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته مهم‌ترین موانع توسعه پایدار شامل موارد زیر هستند:

- \* تجاوز به زیستگاه‌ها،
- \* محدود بودن منابع زمین،
- \* عدم دسترسی به غذا،
- \* رشد جمعیت،
- \* شکار بی‌رویه و کاهش تنوع زیستی،
- \* تخریب لایه ازن،

- \* شهرنشینی،
- \* کشاورزی نامناسب،
- \* بهره‌برداری شدید از منابع طبیعی و معدن،
- \* فعالیتهای صنعتی و آلودگی‌های محیط‌زیستی،
- \* سیاست‌های نادرست صنعتی،
- \* اثرات مرتبط با گازهای گلخانه‌ای.

### ۳- جایگاه توسعه پایدار در معادن و صنایع معدنی

در کشورهای توسعه‌یافته زیربنای عملکرد معادن و صنایع معدنی، معدن‌کاری پایدار است. این شیوه، اشاره به الگویی از معدن‌کاری دارد که با حفظ مزایای اقتصادی و اجتماعی معادن و صنایع معدنی برای نسل فعلی و نسل‌های آینده، هم‌زمان حفاظت از محیط‌زیست را نیز به‌عنوان یکی از ارکان مهم توسعه پایدار مدنظر قرار می‌دهد. بر اساس شکل شماره (۱) مؤلفه‌های مهم در معدن‌کاری پایدار شامل اقتصاد، محیط‌زیست، جامعه، ایمنی و بهره‌وری می‌باشند.

### ۴- اصول مهم در توسعه پایدار معادن و صنایع معدنی

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، ۱۰ اصل مهم در توسعه پایدار فعالیت‌های مرتبط با معادن و صنایع معدنی به شرح زیر هستند:

(۱) پیاده‌سازی و حفظ شیوه‌های تجاری



شکل شماره (۱) جنبه‌های مهم معدن‌کاری پایدار

اخلاقی و سیستم سالم حاکمیت شرکتی،  
(۲) توجه به توسعه پایدار در فرآیند تصمیم‌گیری،  
(۳) رعایت حقوق اساسی بشر و احترام به فرهنگ‌ها، آداب‌ورسوم و ارزش‌ها در برخورد با کارکنان و سایرین که تحت تأثیر فعالیت‌های ما قرار می‌گیرند،

(۴) اجرای استراتژی‌های مدیریت ریسک بر اساس داده‌های معتبر و علمی درست،  
(۵) بهبود مستمر عملکرد سلامت و ایمنی در محیط کار،  
(۶) بهبود مستمر عملکرد محیط‌زیستی،  
(۷) کمک به حفاظت از تنوع زیستی و

رویکردهای یکپارچه در برنامه‌ریزی کاربری اراضی،  
(۸) تسهیل و تشویق طراحی محصول، استفاده، استفاده مجدد، بازیافت و دفن نهایی محصول،  
(۹) کمک به توسعه اجتماعی، اقتصادی و صنعتی جوامعی که در آن فعالیت می‌کنیم،  
(۱۰) تعامل مؤثر و شفاف، ارتباطات از طریق گزارش‌دهی مستقل با ذینفعان.

## ۵- نقش توسعه پایدار در چرخه حیات معدن کاری

موضوع پایداری بایستی در همه مراحل معدن کاری مدنظر قرار گیرد. شکل شماره (۲) اقدامات مورد نیاز در هر مرحله از چرخه حیات معدن مطابق با الگوی معدن کاری پایدار را نشان می‌دهد.

زمانی که از موضوع پایداری صحبت می‌شود، این موضوع شامل کل چرخه حیات فرایند معدن کاری، فرآوری و حتی اتمام فرایند نیز می‌شود. برای مشخص کردن برنامه‌های مناسب در معدن کاری پایدار بایستی عوارض محیط‌زیستی و اجتماعی هر یک از مراحل چرخه حیات معدن مطابق جدول شماره (۱) شناسایی و ارزیابی شوند. مطابق این جدول میزان اثرات محیط‌زیستی و اجتماعی مرحله بهره‌برداری و سپس بسته شدن در مقایسه با سایر موارد بیشتر است. از این نظر حداقل میزان تأثیر مربوط به مرحله اکتشاف است.

## ۶- روند تأثیرگذاری محیط‌زیستی و اجتماعی معدن کاری در هر مرحله

در موضوع معدن کاری پایدار انجام اقدامات در زمان مناسب از اهمیت حیاتی برخوردار می‌باشد. برای ایجاد درک بهتری از این موضوع شکل شماره (۳) طرحی شماتیک را نشان می‌دهد که در آن دو موضوع مهم شامل: (۱) امکان مدیریت پیامدها و (۲) اثرات تجمعی محیط‌زیستی و اجتماعی موردبررسی قرار گرفته است. به‌طور مشخص هر چه در طول عمر یا دوره حیات یک معدن از مرحله اکتشاف به

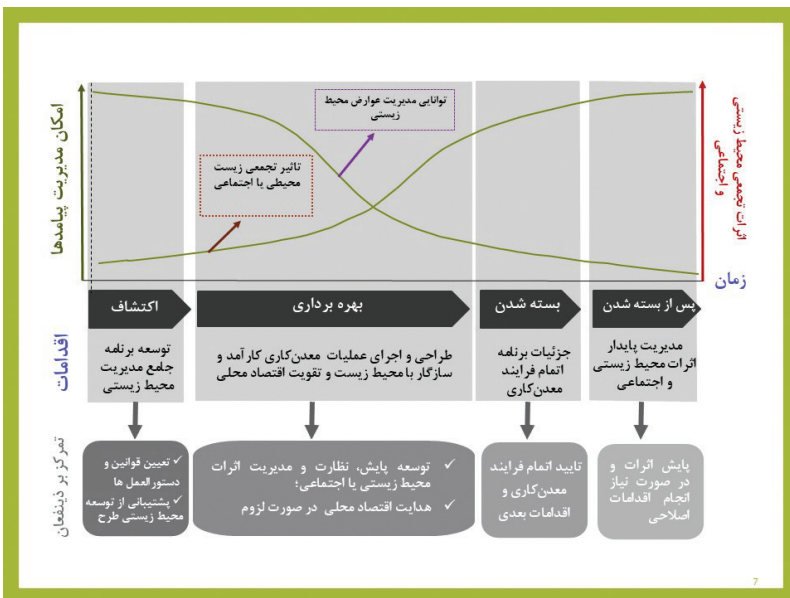


شکل شماره (۲) مهم‌ترین اقدامات در هر یک از مراحل چرخه حیات معدن کاری و فرآوری مواد معدنی (Tajvidi Asr, ۲۰۱۹)

جدول شماره (۱) میزان اثرات محیط‌زیستی و اجتماعی در طول چرخه حیات فرایند معدن کاری و فرآوری مواد معدنی



انتظار می‌رود معادن و صنایع معدنی کشور ما نیز به عنوان یکی از بازوهای مؤثر اقتصاد، رویکرد معدنی پایدار را در برنامه‌ریزی‌های خود مدنظر قرار دهند. در این رویکرد، اقتصاد پایدار، جامعه پایدار و محیط‌زیست پایدار دست در دست هم استفاده از معادن را به سمت بهره‌برداری ارزشمندتر، بهینه‌تر و سازگارتر با زیست‌بوم‌های طبیعی هدایت خواهد نمود.



شکل شماره (۳) روند تأثیرگذاری محیط‌زیستی و اجتماعی معدنی‌کاری در هر مرحله و اقدامات مورد نیاز

مرحله بسته شدن حرکت می‌کنیم، امکان مدیریت پایداری، کاهش و شدت اثرات اجتماعی محیط‌زیستی و اجتماعی افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر زمانی معدنی‌کاری پایدار موفق عمل خواهد نمود که پیش‌بینی درستی از اقدامات مورد نیاز در زمان درست انجام شود. گاهی فرصت مدیریت اصولی یک فرایند به دلیل پیش‌بینی نامناسب به‌راحتی از دست می‌رود. در این رویکرد توسعه برنامه جامع مدیریت محیط‌زیستی در ابتدا کار و همزمان با مرحله اکتشاف از طریق تعیین قوانین و دستورالعمل‌ها و همچنین پشتیبانی از توسعه محیط‌زیستی طرح آغاز می‌گردد.

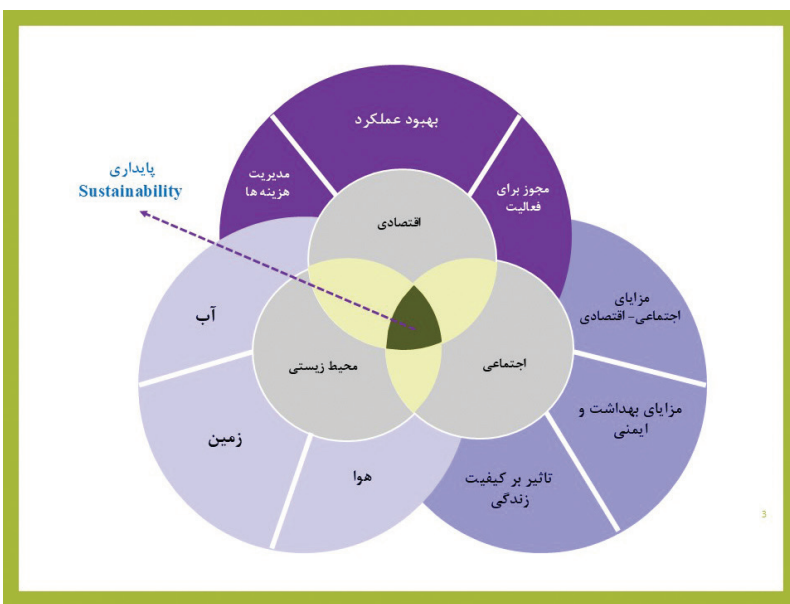
## ۷- مزایای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی معدنی‌کاری پایدار

شکل شماره (۴) مزایایی مهم اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی موضوع پایداری در فرایند معدنی‌کاری و فرآوری مواد معدنی را نشان می‌دهد. این مزایا در بخش اقتصادی شامل کسب مجوز برای فعالیت، بهبود عملکرد و مدیریت هزینه‌ها می‌باشد. حال آنکه در بخش اجتماعی مزایایی اجتماعی-اقتصادی، مزایایی مرتبط با بهداشت و ایمنی و تأثیر پایداری بر زندگی جامعه را شامل می‌شود. در بخش محیط‌زیست حفاظت بهتر از آب، زمین و خاک مدنظر قرار می‌گیرد.

## ۸- سناریوهای مهم پایداری در معادن فعال

هرگونه سناریو و راه‌حل در حوضه معدنی‌کاری پایدار باید سه شرط مهم زیر را دارا باشد:

- \* سازگار با محیط‌زیست،
- \* امکان‌پذیر از نظر اقتصادی،
- \* مطلوب از نظر اجتماعی.



شکل شماره (۴) مزایای اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی موضوع پایداری در عملیات معدنی‌کاری

در کشورهای توسعه یافته زیربنای عملکرد معادن و صنایع معدنی، معدن کاری پایدار است. این شیوه، اشاره به الگویی از معدن کاری دارد که با حفظ مزایای اقتصادی و اجتماعی معادن و صنایع معدنی برای نسل فعلی و نسل های آینده، هم زمان حفاظت از محیط زیست را نیز به عنوان یکی از ارکان مهم توسعه پایدار مدنظر قرار می دهد.

بر اساس موارد صفحه قبل راحل های معدن کاری پایدار در حوزه محیط زیست باید منجر به بازیابی زیست بوم ها و حفظ کارکرد طبیعی آنها گردد (شکل شماره ۵)). این راحل ها در موضوع اقتصاد باید با فراهم کردن سود و منفعت زمینه استفاده کارآمد از منابع و درنظر گرفتن هزینه های زیست محیطی و اجتماعی را در پی داشته باشد. راحل های معدن کاری پایدار از بعد اجتماعی باید زمینه ساز موارد زیر باشند:

- \* منجر به تعامل بیشتر با همسایگان و سایر ذینفعان گردد،
- \* به اموال، فرهنگ و ایمنی احترام گذاشته شود،
- \* قانون در عمل رعایت شود،
- \* به جوامع پیرامون کمک کند و به نسبت سهم خود در توسعه آنها مشارکت داشته باشد.

#### ۹- چهارچوب زمانی و زنجیره مسئولیت پذیری

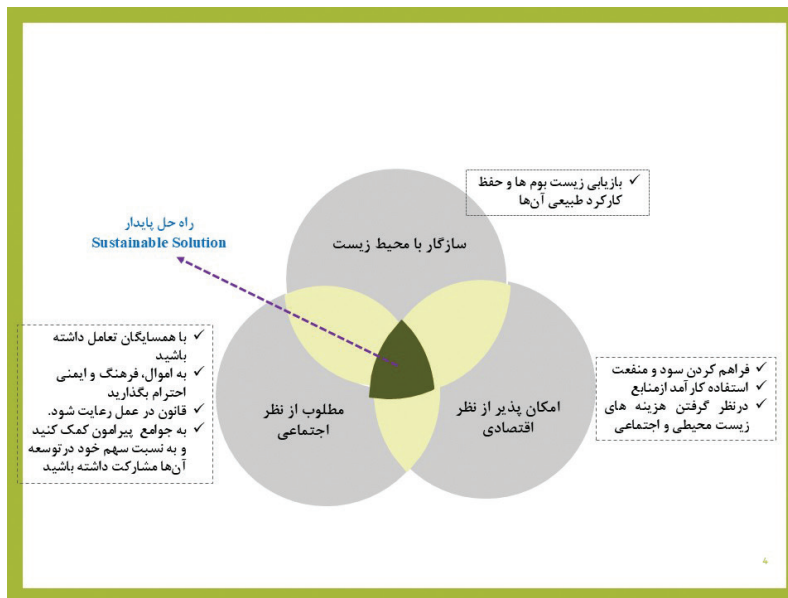
##### در معدن کاری پایدار

یکی از موارد مهم در بحث پایداری مربوط به برنامه زمانی اجرای آن و زنجیره مسئولیت پذیری در این بخش می باشد. در این بخش در واقع بایستی پاسخ های مناسب به مواردی مانند چه؟، چه کسی؟، چه زمانی؟ و چگونه؟ داده شود، شکل شماره (۶). پاسخ به این چراها در واقع مرتبط با چهار فاز زیر می باشد که باید به ترتیب بررسی شوند:

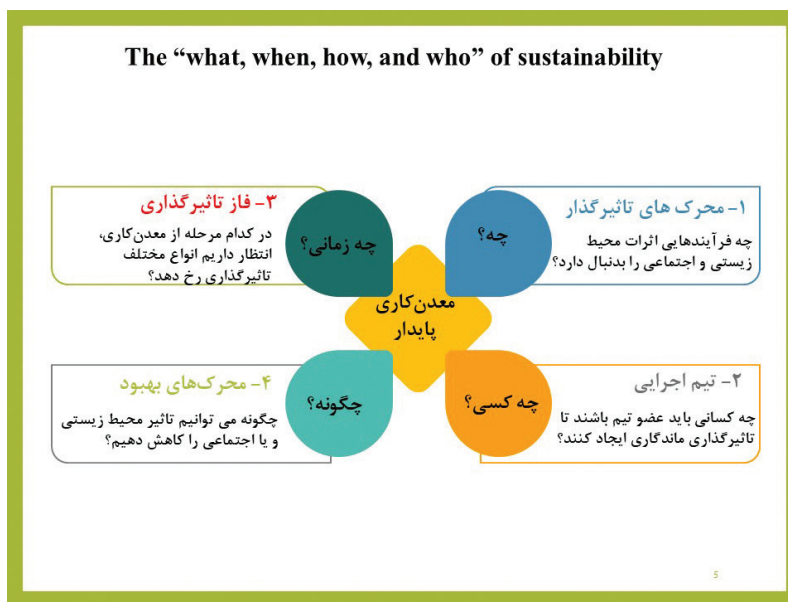
- ۱- شناسایی محرک های تأثیرگذار،
- ۲- شناسایی تیم اجرایی،
- ۳- ارزیابی فاز تأثیرگذاری،
- ۴- شناسایی محرک های بهبود فرایند.

#### ۱۰- تکمیل برنامه معدن کاری پایدار

به منظور تکمیل برنامه معدن کاری پایدار ۵ مرحله زیر باید مدنظر قرار گیرد:



شکل شماره (۵) سناریوها و ملاحظات مهم در راحل های دیده شده در معدن کاری پایدار



شکل شماره (۶) جنبه های مهم در چهارچوب زمانی و زنجیره مسئولیت پذیری در معدن کاری پایدار

با اثرات محیط‌زیستی کمتر، استفاده از پسماندهای معدنی، استفاده از تجهیزات سازگار با زیست‌بوم، احیا و بازسازی سایت‌های معدن کاری شده و متوقف کردن معدن‌کاری‌های غیرقانونی باید مدنظر قرار گیرد.

منجر به معدن کاری سبز خواهد شد. در واقع معدن کاری سبز روشی پایدار برای استخراج، فرآوری و توزیع مواد معدنی، فلزات و سوخت‌های فسیلی می‌باشد. برای رسیدن به اهداف معدن کاری سبز اصول اساسی مانند توسعه روش‌های معدن کاری

۱. تدوین استراتژی پایداری،
۲. اجرای برنامه گزارش دهی،
۳. ارزیابی اثرات محیط زیستی و اولویت‌بندی اقدامات،
۴. اجرای فعالیتهای بهینه‌سازی،
۵. بررسی ارتباط نتایج و عملکرد.

شکل شماره (۷) اقدامات مورد نیاز در هر یک از مراحل فوق را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که اقدامات مورد نیاز در برنامه معدن کاری پایدار باید از نظر زمانی موردتوجه قرار گیرند، شکل شماره (۸). بر این اساس فرایند برنامه‌ریزی برای فرایند معدن کاری قبل از شروع فرایند با انجام گزارش جامع ارزیابی اثرات محیط‌زیستی انجام می‌شود. این اقدامات در حین فرایند معدن کاری با حفاظت از محیط‌زیست ادامه و در نهایت برنامه احیاء و بازسازی بعد از اتمام فرایند معدن کاری خاتمه می‌یابد.

برای رسیدن به اقدامات مؤثر در معدن کاری پایدار توجه به هرم استراتژی جامع توسعه پایدار باید مدنظر قرار گیرد، شکل شماره (۹). در این هرم ابتدا اهداف به‌طور مشخص تعریف می‌شوند و سپس با تعریف شاخص‌ها و معیارها، پایش، نظارت و گزارش‌دهی، اجرای سیستم مدیریت محیط‌زیستی ادامه می‌یابد. این فرایند با رهبری و زنجیره مسئولیت‌پذیری، رعایت استراتژی‌ها و استانداردها و همچنین سیاست‌ها معدن کاری پایدار در نهایت منجر به کاهش ریسک‌ها و مخاطرات و ایجاد عملکردی مؤثر و پیشرو خواهد شد.

## ۱۱- معدن کاری سبز

با توجه به جایگاه ویژه مسائل مرتبط با محیط‌زیست، آینده صنایع معدن کاری به سمت معدن کاری سبز (Green Mining) سوق پیدا خواهد نمود. در واقع معدن کاری سبز رویکردی برای بهبود فرایند معدن کاری پایدار محسوب می‌گردد. رعایت اصول و چهارچوب‌های معدن کاری پایدار در نهایت



شکل شماره (۷) اقدامات لازم بمنظور تکمیل برنامه معدن کاری پایدار



شکل شماره (۸) اقدامات مرتبط با معدن کاری پایدار از نظر توالی زمانی

### ۱۲- نقش فناوری در معدن‌کاری سبز

برای رسیدن به توسعه پایدار و معدن‌کاری سبز شرکت‌های معدن کاری و صنایع معدنی بایستی توجه ویژه‌ای به استفاده از فناوری‌های سبز در فعالیت‌های معدن‌کاری و فرآوری خود داشته باشند، شکل شماره (۱۰). مهم‌ترین این فناوری‌های شامل: برقی سازی کارخانه‌ها، برقی سازی حمل‌ونقل، استفاده از اتوماسیون و کنترل از راه دور، دیجیتالی سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، استفاده از فناوری‌های هیدروژنی، استفاده از فناوری‌های قابل احیاء و زیست‌تخریب‌پذیر، توجه به شاخص‌های پایداری در حمل‌ونقل مواد، استفاده از مواد پیشرفته، استفاده از هوش مصنوعی، استفاده از سنسورهای هوشمند و ادغام آن با اینترنت اشیا و استفاده از فناوری‌های حفاری با کارایی انرژی مناسب می‌باشند. ادغام فناوری در فرایند معدن‌کاری سبز بر اساس رویکردهای ذکر شده می‌تواند در نهایت به نهاده شدن معدن‌کاری پایدار منجر گردد.

### ۱۳- مشکلات پیش روی معادن و صنایع معدنی جهت رسیدن به معدن‌کاری پایدار و سبز

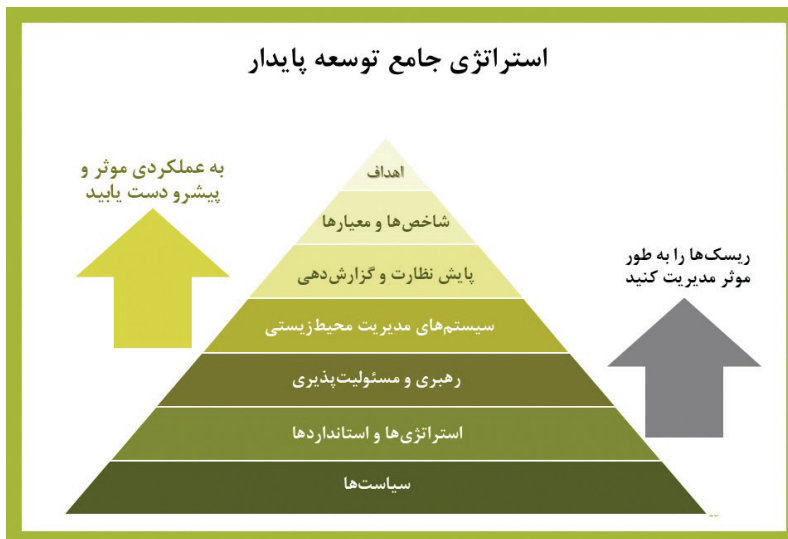
معادن و صنایع معدنی جهت رسیدن به الگوی معدن‌کاری پایدار و سبز ابتدا باید ابعاد مختلف محیط‌زیستی و اجتماعی فعالیت‌های خود را درک نمایند. شکل شماره (۱۱) مهم‌ترین ابعاد اجتماعی و محیط‌زیستی مرتبط با فعالیت‌های معدن‌کاری را نشان می‌دهد.

### ۱۴- اقدامات مورد نیاز معادن و صنایع معدنی

به منظور داشتن آینده‌ای پایدارتر مطابق الگوی

#### معدن‌کاری سبز

معادن و صنایع معدنی برای داشتن آینده‌ای بهتر در معدن‌کاری پایدار مطابق با الگوی معدن‌کاری سبز ملاحظات زیر را باید مدنظر قرار دهند:



شکل شماره (۹) هرم استراتژی جامع در توسعه پایدار فرایند معدن‌کاری

برای رسیدن به توسعه پایدار و معدن‌کاری سبز شرکت‌های معدن‌کاری و صنایع معدنی بایستی توجه ویژه‌ای به استفاده از فناوری‌های سبز در فعالیت‌های معدن‌کاری و فرآوری خود داشته باشند. مهم‌ترین این فناوری‌ها به شرح زیر می‌باشند:



شکل شماره (۱۰) عوامل مهم تأثیرگذار بر نقش فناوری در معدن‌کاری سبز (Onifade et al, ۲۰۲۴)

برای رسیدن به توسعه پایدار و معدن‌کاری سبز شرکت‌های معدن‌کاری و صنایع معدنی بایستی توجه ویژه‌ای به استفاده از فناوری‌های سبز در فعالیت‌های معدن‌کاری و فرآوری خود داشته باشند. مهم‌ترین این فناوری‌ها شامل: برقی سازی کارخانه‌ها، برقی سازی سیستم حمل‌ونقل، استفاده از اتوماسیون و کنترل از راه دور، دیجیتالی سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها، استفاده از فناوری‌های هیدروژنی، استفاده از فناوری‌های قابل احیاء و زیست تخریب پذیر، توجه به شاخص‌های پایداری در حمل‌ونقل مواد، استفاده از مواد پیشرفته، استفاده از هوش مصنوعی و... می باشند.



شکل شماره (۱۱) موانع اجتماعی و محیط‌زیستی مرتبط با معدن‌کاری پایدار و سبز

- نظارت بر محیط‌زیست،
- اقتصادی بادوام و پایدار،
- مشارکت جوامع محلی، شفافیت و پاسخگویی،
- مسئولیت‌های اجتماعی و حمایت از اقتصادهای محلی،
- استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر،
- مدیریت منابع آب،
- کاهش پسماند و بازیافت،
- احیاء و بازسازی محدوده معدن‌کاری شده،
- حفظ تنوع زیستی،
- کاهش گازهای گلخانه‌ای،
- مدیریت زنجیره تأمین پایدار،
- مشارکت و توسعه جامعه،
- ارزیابی اثرات محیط‌زیستی (EIA)،
- توجه به نوآوری و فناوری.

شکل شماره (۱۲) طرحی شماتیک از اقدامات فوق را نشان می‌دهد. III



شکل شماره (۱۳) اقدامات مهم و مؤثر مرتبط با معادن و صنایع معدنی برای رسیدن به الگوی معدن‌کاری پایدار

#### منابع

- Onifade, M., Zvarivadza, T., Adebi, J.A., Said, K.O., Olupona, O.D., Lawal, A.I., Khan-delwal, M., 2024. Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices. Green and Smart Mining Engineering. Volume 1, Issue 2, Pages 157-174.
- Tajvidi Asr, E., Kakaie, R., Ataei, M., Tavakoli Mohammadi, M.R., 2019. A review of studies on sustainable development in mining life cycle. Journal of Cleaner Production, Volume 229, Pages 213-231.
- <https://www.de.kearney.com/social-impact/article/?/a/mining-takes-on-the-sustainability-challenge>