



ارزیابی خطرات زلزله و تأثیر آن بر زیرساخت‌های معدنی افغانستان

پوهنمل صالح محمد صالحی عضو کادر علمی پوهنځی انجیری پوهنتون بغلان

Email: s.salehy123@gmail.com

Assessing Earthquake Risks and Their Impact on Afghanistan's Mining Infrastructure

Abstract

Afghanistan, due to its geographical location along the seismically active Alpine-Himalayan belt, is considered one of the most earthquake-prone countries. The country possesses a complex and active geological structure, and many of its surface and underground mines are located in seismically hazardous regions. Earthquakes can pose a serious threat to the safety of mines, extraction infrastructure, machinery, and workers' health. This study aims to identify earthquake-prone areas in Afghanistan and examine the impacts of seismic activity on surface and underground mines. The article first introduces the geological structure of the country and its major fault lines, followed by an analysis of both the direct and indirect effects of earthquakes on mining operations. These include tunnel collapses, slope instability, damage to ventilation systems, and the release of toxic gases. The findings indicate that mines located in Badakhshan, Paktika, Herat, and the Hindu Kush regions are the most vulnerable.

Keywords: *Afghanistan, Earthquake, Risks, Surface Mines, Underground Mines*

چکیده

افغانستان به دلیل موقعیت جغرافیایی اش در امتداد کمربند زلزله‌خیز آلپ-هیمالیا، یکی از کشورهای آسیب‌پذیر در برابر زلزله محسوب می‌شود. این کشور دارای ساختار زمین‌شناسی پیچیده و فعال بوده و تعداد زیادی از معادن سطحی و زیرزمینی آن در مناطق زلزله‌خیز واقع شده‌اند. زلزله‌ها می‌توانند تهدیدی جدی برای ایمنی معادن، زیرساخت‌های استخراجی، ماشین‌آلات، و سلامت کارگران باشند. این پژوهش با هدف شناسایی مناطق زلزله‌خیز افغانستان و بررسی تأثیر زلزله بر معادن سطحی و زیرزمینی انجام شده است. در این مقاله ابتدا ساختار زمین‌شناسی کشور و شکستگی‌های اصلی آن معرفی شده، سپس اثرات مستقیم و غیرمستقیم زلزله بر معادن، از جمله ریزش تونل‌ها، ناپایداری شیب‌ها، تخریب سیستم‌های تهویه، و تصاعد گازات سمی تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که معادن واقع در نواحی بدخشان، پکتیکا، هرات و مناطق هندوکش بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

کلید واژه ها: افغانستان، زلزله، خطرات، معادن سطحی، معادن زیرزمینی



۱. مقدمه

افغانستان در یکی از نواحی فعال تکتونیکی واقع شده و به دلیل قرارگیری بر روی مرز تصادم پلیت هند و اوراسیا، از جمله کشورهای زلزله‌خیز در منطقه به‌شمار می‌آید. فعالیت شکستگی‌های اصلی مانند شکستگی پغمان، شکستگی هندوکش و دیگر شکستگی‌های فعال باعث شده‌اند که این کشور در معرض خطر دائمی زلزله‌های شدید باشد (Ambraseys & Bilham, 2003). رخداد زلزله‌های شدید در سال‌های اخیر، مانند زلزله سال ۲۰۲۲ در ولایت پکتیکا، خسارات سنگین جانی و مالی به دنبال داشته‌اند.

در کنار مخاطرات طبیعی، افغانستان دارای ظرفیت معدنی غنی است و معادن زیادی به‌صورت سطحی و زیرزمینی در سراسر کشور فعال می‌باشد (British Geological Survey, 2008). بسیاری از این معادن در نواحی کوهستانی و زلزله‌خیز قرار دارند، جایی که زلزله‌ها می‌توانند پایداری شیب‌ها، تونل‌ها، تحکیمات تونل‌ها، تهویه و حتی ایمنی کارگران را تهدید کنند (Shroder F, 2015). به‌ویژه در معادن زیرزمینی، زلزله می‌تواند باعث فروپاشی تونل‌ها، شکست نگهدارنده‌ها و ایجاد خطراتی چون محبوس شدن کارگران یا انفجار گازات شود (Shnizai, 2020).

با توجه به موقعیت جیودینامیکی خاص افغانستان و فعالیت گسترده معدنکاری در این کشور، تحلیل تأثیر زلزله بر معادن از اهمیت بالایی برخوردار است. وقوع زلزله در مناطق معدنی می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیر انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی شود. از این‌رو، شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و ارائه راهکارهای کاهش خطر، نه‌تنها برای حفظ جان کارگران و پایداری تولید معدنی، بلکه برای توسعه پایدار اقتصادی کشور حیاتی می‌باشد.

تحقیقات محدودی درباره تأثیر زلزله بر زیرساخت‌های معدنی در افغانستان انجام شده است، اما مطالعات بین‌المللی متعددی به ارزیابی خطر زلزله در بخش‌های مشابه پرداخته‌اند. برای نمونه می‌توان از مطالعات (Ambraseys & Bilham, 2003) و (Shroder, 2015) به تحلیل فعالیت تکتونیکی و تأثیر آن بر زیرساخت‌ها نام برد، اما بررسی تخصصی مخاطرات زلزله بالای معادن افغانستان هنوز در مراحل ابتدایی است که این پژوهش، ضرورت انجام مطالعه‌ای جامع در این زمینه را برجسته می‌سازد.

با توجه به نبود زیرساخت‌های مقاوم، کمبود داده‌های زلزله‌نگاری دقیق و ضعف در سیستم‌های مدیریت بحران، ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله‌ای معادن در افغانستان یک ضرورت علمی و اقتصادی



است. این مقاله با هدف شناسایی مناطق زلزله خیز افغانستان، بررسی تأثیرات زلزله بر معادن سطحی و زیرزمینی و ارائه راهکارهای کاهش خطرپذیری در حوزه معدنکاری تهیه شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

۲-۱. ساختار زمین شناسی افغانستان

افغانستان در منطقه‌ای پیچیده تکتونیکی قرار دارد که نتیجه برخورد پلیت هند، اوراسیا و عرب است (Trifonov et al., 2012). این کشور بخشی از کمربند کوهستانی آلپ-همالیا است که از برخورد این صفحات تکتونیکی ایجاد شده و دارای ساختار زمین شناسی متنوع و پیچیده‌ای است (Wheeler & Rukstales, 2007).

سنگ‌های تشکیل دهنده ساختار زمین شناسی افغانستان از دوره‌های زمین شناسی مختلفی مانند پرکامبرین، پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک تشکیل شده‌اند. بخش‌های وسیعی از سنگ‌های پرکامبرین در شرق و شمال شرق کشور یافت می‌شوند، در حالی که سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی سنوزوئیک در کوه‌های هندوکش و پامیر گسترش وسیع دارد (Shroder et al., 2022).

کمربند هندوکش شامل رشته کوه‌های مرتفع و سنگ‌های میتامورفیکی و آتشفشانی است که تحت تأثیر فشارهای زیاد پلیت هند قرار دارد (Faryad et al., 2013). فلات پامیر در شمال شرق افغانستان واقع شده و دارای سنگ‌های میتامورفیکی پیچیده و شکستگی‌های فعال است (Duan et al., 2025). ناحیه شمالی بیشتر شامل سنگ‌های رسوبی جوان تر و کمربندهای تکتونیکی است که نشان دهنده فعالیت‌های تکتونیکی مداوم می باشد (Brookfield & Hashmat, 2001).

۲-۱. شکستگی‌های اصلی

افغانستان دارای چندین شکستگی فعال بوده که در شکل گیری زلزله‌های شدید نقش مهم داشته و قرار ذیل می باشد:

شکستگی هندوکش (Hindu Kush Fault Zone): یکی از فعال ترین و عمیق ترین شکستگی‌های منطقه بوده که باعث زلزله‌های بزرگ در عمق زیاد می شود. این شکستگی در مرکز افغانستان واقع شده و مسئول زلزله‌های عمیق با بزرگی بالا است (Kufner et al., 2021).



شکستگی بدخشان (Badakhshan Fault): این شکستگی در شمال شرق افغانستان قرار داشته و بخشی از کمربند کوهستانی پامیر می باشد. این شکستگی نیز بسیار فعال بوده و باعث رخداد زلزله های متعدد شده است (Schurr et al., 2014).

شکستگی سوخان (Sukhan Fault): در شمال افغانستان واقع شده و یکی از شکستگی های فعال در این ناحیه است که می تواند زلزله های متوسط تا قوی را ایجاد کند (Shnizai et al., 2024).

شکستگی های فرعی دیگر: مانند شکستگی های دره پنجشیر، کوه های مرکزی و دره کابل که هر کدام نقش مهمی در زلزله خیزی منطقه دارند (Shnizai Z, n.d. 2006).

شناخت دقیق موقعیت و ویژگی های این شکستگی ها برای ارزیابی خطر زلزله و مدیریت ریسک در بخش های ساختمانی و معدنی حیاتی است. فعالیت این شکستگی ها می تواند منجر به آسیب شدید در معادن سطحی و زیرزمینی شود، به خصوص در مناطقی که عملیات استخراج با تجهیزات سنگین انجام می شود (Zhao et al., 2025).

۲-۲. زلزله

زلزله لرزش ناگهانی و سریع زمین است که به دلیل آزاد شدن انرژی انباشته شده در داخل پوسته ی زمین رخ می دهد. این انرژی معمولاً در اثر شکستگی یا لغزش ناگهانی صفحات تکتونیکی در امتداد شکستگی ها آزاد شده و به صورت امواج لرزه ای در همه جهات منتشر می شود (Schubert, 2001). پیش بینی دقیق زمان و مکان زلزله هنوز امکان پذیر نیست، اما دانشمندان می توانند با مطالعه ی ویژگی های زمین، خطر زلزله را در مناطق مختلف ارزیابی کنند (Thomas H. et al., 2011). روش های ارزیابی و هشدار:

- a. **مطالعه شکستگی ها:** بررسی شکستگی های فعال، سابقه ی زلزله ها و انرژی انباشته.
- b. **مدل سازی تکتونیکی:** استفاده از داده های GPS برای مشاهده ی حرکت صفحات زمین.
- c. **پیش نشانگرها (سیگنال های احتمالی):**
 - تغییرات سطح آب چاه ها
 - خروج گاز رادون
 - تغییر در میدان مغناطیسی یا الکتریکی زمین
- d. **سیستم هشدار سریع (Early Warning Systems):**



- در کشورهایی مانند ژاپن، وقتی امواج اولیه (P) شناسایی می‌شود، چند ثانیه قبل از رسیدن امواج مخرب‌تر هشدار صادر می‌شود (برای توقف قطارها، باز کردن در آسانسورها و...).

۲-۳-۱. دلایل اصلی وقوع زلزله

- a. حرکت پلیت‌های تکتونیکی: اصلی‌ترین علت زلزله‌ها برخورد، فاصله گرفتن یا لغزش پلیت‌های تکتونیکی است.
- b. فعالیت‌های آتشفشانی: فوران‌های آتشفشانی می‌توانند زلزله‌های محلی ایجاد کنند.
- c. فرونشست زمین: در برخی مناطق، کاهش ناگهانی حجم زمین (مثلاً به دلیل استخراج مواد معدنی یا آب زیرزمینی) موجب زلزله می‌شود.

فعالیت‌های انسانی: مانند انفجارهای معدنی یا آزمایش‌های هسته‌ای نیز می‌توانند زلزله‌های مصنوعی ایجاد کنند (Achtziger-Zupančič et al., 2024)

۲-۳-۲. امواج زلزله

زلزله‌ها سه نوع موج اصلی تولید می‌کنند:

- موج اولیه (P-wave): سریع‌ترین نوع موج لرزه‌ای که از درون زمین عبور می‌کند.
- موج ثانوی (S-wave): کندتر از موج P و فقط در مواد جامد حرکت می‌کند.
- امواج سطحی (Surface Waves): کندترین ولی مخرب‌ترین نوع امواج که در سطح زمین حرکت می‌کنند و باعث لرزش شدید می‌شوند (Shearer, 2009)

۲-۳-۳. مقیاس اندازه‌گیری زلزله

- مقیاس ریشتر: برای اندازه‌گیری انرژی آزاد شده استفاده می‌شود.
- مقیاس مرکالی: شدت خسارت زلزله را از دید مردم و سازه‌ها بررسی می‌کند.

۲-۳-۴. مناطق آسیب‌پذیر از زلزله در افغانستان

مناطق شمال‌شرق و شرق افغانستان، به‌ویژه ولایت‌های بدخشان، تخار، کنر و نورستان، به دلیل نزدیکی به شکستگی‌های فعال، بیشترین خطر زلزله را دارند. در سال ۲۰۲۳ در ولایت هرات زلزله‌ای به بزرگی ۶.۳ ریشتر در این منطقه رخ داد که منجر به تلفات بیش از ۲۰۴۰۰ نفر شد و خسارات گسترده‌ای به بار آورد. پایتخت افغانستان نیز در معرض خطر زلزله قرار دارد. به‌عنوان مثال، وقوع زلزله‌ای با بزرگی ۶ ریشتر در منطقه پغمان می‌تواند خسارات جدی به کابل وارد کند. از سال ۱۹۵۰ تاکنون، حدود ۱۵۰۲۰۰ نفر در اثر زلزله‌ها در افغانستان جان خود را از دست داده‌اند (Hauksson et al., 2012).



۲-۳-۵. زلزله‌های مهم و خسارات آنها

در تاریخ ۷ اکتبر ۲۰۲۳، زلزله‌ای به بزرگی ۶٫۳ ریشتر در ۴۰ کیلومتری غرب شهر هرات رخ داد. بر اساس گزارش‌ها، بیش از ۲۱۴۰۰ نفر کشته و ۹۱۴۲۰ نفر زخمی شدند. حدود ۴۸۱۰۰۰ خانه تخریب یا آسیب دیدند و ۲۱۳۰۰ ساختمان عمومی از جمله مراکز بهداشتی و مدارس آسیب دیدند. بیش از ۱۱۴۰۰۰ نفر به کمک‌های بشردوستانه نیاز پیدا کردند. در تاریخ ۲۲ ژوئن ۲۰۲۲، زلزله‌ای به بزرگی ۵٫۹ ریشتر در استان‌های پکتیکا و خوست رخ داد. بیش از ۱۰۰۰ نفر کشته و بیش از ۱۹۵۰۰ نفر زخمی شدند. بسیاری از خانه‌ها و زیرساخت‌ها در این مناطق تخریب شدند (Turner, 2023).

۲-۳-۶. عوامل افزایش خسارات زلزله در افغانستان

ساختمان‌های غیرمقاوم: بسیاری از خانه‌ها با مصالح سنتی مانند خشت و گل ساخته شده‌اند که در برابر زلزله مقاوم نیستند.
تراکم جمعیتی در مناطق آسیب‌پذیر: مناطق پرجمعیت با زیرساخت‌های ضعیف بیشتر در معرض خطر هستند.

فقدان آمادگی و پاسخ‌دهی سریع: نبود تجهیزات و آموزش‌های لازم برای مواجهه با زلزله باعث افزایش تلفات می‌شود (Sharafi & Saito, 2024).

۲-۳-۷. تأثیرات زلزله بالای معادن

زلزله‌ها می‌توانند تأثیرات بسیار جدی و چندجانبه بر معادن داشته باشند، به‌ویژه در کشورهایی مانند افغانستان که هم دارای فعالیت‌های معدنی گسترده و هم از نظر تکنیکی فعال هستند.

۲-۳-۸. تأثیرات زلزله بر عملکرد معادن سطحی

زلزله‌ها می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر معادن سطحی نیز داشته باشند، هرچند که این تأثیرات نسبت به معادن زیرزمینی ممکن است متفاوت باشد. در اینجا به برخی از مهم‌ترین تأثیرات زلزله بر معادن سطحی اشاره می‌کنم (Lenhardt, 2009):

۱. **شکستگی و ریزش زمین:** زلزله‌ها می‌توانند موجب شکست و ترک خوردگی در زمین‌های سطحی شوند که در اطراف معدن وجود دارند. این شکست‌ها می‌توانند به ریزش خاک و سنگ‌ها از دیواره‌های معدن، به‌ویژه در معادن روباز، منجر شوند. ریزش سنگ‌ها و خاک‌ها می‌تواند تهدیدی جدی برای ایمنی کارگران و تجهیزات باشد (Sharafi & Saito, 2024).

۲. **تأثیر بر شیب‌ها و دامنه‌ها:** معادن سطحی معمولاً در مناطقی با شیب‌های مختلف قرار دارند. زلزله‌ها می‌توانند تغییرات در شیب‌ها ایجاد کرده و به ایجاد زمین‌لغزش‌ها و ریزش دامنه‌ها منجر



شوند. این امر می تواند موجب خسارات جدی به زیرساخت های معدن، ماشین آلات و حتی آسیب به کارکنان شود (Kolapo et al., 2022).

۳. **تأثیر بر سیستم های فلتريشن زمین:** زلزله ها می توانند باعث تغییرات در مسیرهای آب های سطحی و زیرزمینی شوند. این تغییرات می تواند منجر به بروز سیلاب های ناگهانی یا تغییر جریان آب های زیرزمینی در مناطق مختلف معدن شود. ورود آب های اضافی به معدن سطحی می تواند باعث سیلاب های خطرناک و آسیب به زیرساخت ها گردد (Liao et al., 2015).

۴. **آسیب به تجهیزات و ماشین آلات:** زلزله ها می توانند به تجهیزات و ماشین آلات موجود در معدن سطحی آسیب وارد کنند. این تجهیزات معمولاً برای حفاری، حمل مواد معدنی و سایر عملیات معدن کاری طراحی شده اند. لرزش های ناشی از زلزله ممکن است موجب شکستن قطعات یا خراب شدن سیستم های برقی و مکانیکی این تجهیزات شود (Estrada & Weir, 2023).

۵. **رشد ترک ها و شکاف های جدید:** زلزله ها می توانند باعث ایجاد ترک ها و شکاف های جدید در سنگ های معدنی شوند. این ترک ها می توانند به تغییر در نحوه استخراج مواد معدنی منجر شوند یا خطرات اضافی برای کارگران ایجاد کنند، به ویژه اگر به مرور زمان این ترک ها بزرگ تر شوند (Wu et al., 2023).

۶. **آسیب به سازه ها و زیرساخت ها:** معادن سطحی معمولاً شامل ساختمان ها، انبارها، جاده ها و دیگر زیرساخت ها هستند. زلزله ها می توانند این سازه ها را آسیب پذیر کرده و به تخریب یا عدم کارایی آنها منجر شوند. این امر می تواند عملیات معدن کاری را مختل کرده و نیاز به تعمیرات و بازسازی های گسترده داشته باشد (Estrada & Weir, 2023).

۷. **خطرات مربوط به گازهای سمی و مواد کیمیای:** در برخی معادن سطحی، از مواد کیمیای برای فراوری مواد معدنی استفاده می شود. زلزله ها ممکن است به لوله ها و مخازن حاوی این مواد کیمیای آسیب رسانده و منجر به نشت گازهای سمی یا مواد خطرناک شود. این نشت ها می تواند خطرات محیط زیست و صحتی جدی ایجاد کند (Zanoletti & Bontempi, 2024).

در نهایت، برای کاهش این خطرات در معادن سطحی، نیاز به ارزیابی دقیق مخاطرات زلزله، تقویت زیرساخت ها و استفاده از تکنیک های مناسب برای پایش و پیشگیری از خسارات احتمالی است.



۲-۳-۹. تاثیرات زلزله بر عملکرد معادن زیرزمینی

زلزله‌ها می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد معادن زیرزمینی داشته باشند که می‌تواند به‌طور مستقیم بر ایمنی، کارایی و بهره‌وری معدن تأثیر بگذارد. در زیر به برخی از مهم‌ترین تأثیرات زلزله بر عملکرد معادن زیرزمینی اشاره می‌کنم (Sırrı Sargin & Şensöğüt, 2024)

۱. آسیب به ساختارهای زمین‌شناسی و دیواره‌های معدن: زلزله‌ها می‌توانند باعث تغییرات عمده در ساختار زمین‌شناسی زیر سطح معدن شوند. این تغییرات می‌توانند موجب شکست و ترک خوردگی در دیواره‌ها و سقف تونل‌ها شوند. این ترک‌ها و شکست‌ها می‌توانند خطر ریزش سنگ‌ها و آسیب به کارگران و تجهیزات را افزایش دهند. دیواره‌های ناپایدار می‌توانند نیاز به اقدامات تعمیراتی و بازسازی داشته باشند که عملکرد معدن را مختل می‌کند (Karahan et al., 2025).

۲. افزایش خطر ریزش و فروریختگی تونل‌ها: یکی از بزرگ‌ترین خطرات ناشی از زلزله در معادن زیرزمینی، احتمال ریزش تونل‌ها و فروریختگی سقف‌های معدن است. زلزله می‌تواند فشارهای اضافی بر سنگ‌های اطراف وارد کرده و به‌ویژه در مناطقی که شرایط زمین‌شناسی ضعیفی دارند، باعث ریزش سنگ‌ها شود. این خطر می‌تواند برای کارگران تهدید بزرگی باشد و عملیات معدن‌کاری را متوقف کند (Aydan et al., 2024).

۳. اختلال در سیستم تهویه: سیستم تهویه معادن زیرزمینی برای تأمین هوای تازه و ایمن برای کارگران و تخلیه گازهای خطرناک بسیار حیاتی است. زلزله‌ها می‌توانند به سیستم‌های تهویه آسیب وارد کرده و جریان هوای معدن را مختل کنند. این اختلال می‌تواند منجر به تجمع گازهای خطرناک، کاهش اکسیژن یا افزایش خطر انفجار در داخل معدن شود (Saleem, 2025).

۴. آسیب به تجهیزات و ماشین‌آلات: زلزله‌ها می‌توانند تجهیزات و ماشین‌آلات معدن‌کاری، مانند دستگاه‌های حفاری، دستگاه‌های حمل مواد و تجهیزات الکتریکی را آسیب‌دیده کنند. این آسیب‌ها می‌توانند نیاز به تعمیرات گسترده و هزینه‌بر داشته باشند و به‌طور موقت عملیات معدن را متوقف کنند (Lenhardt, 2009).

۵. اختلال در شبکه‌های ارتباطی: معادن زیرزمینی معمولاً به شبکه‌های ارتباطی برای هماهنگی عملیات و ایمنی کارگران نیاز دارند. زلزله‌ها می‌توانند این شبکه‌های ارتباطی را مختل کرده و ارتباط میان بخش‌های مختلف معدن را قطع کنند. این اختلالات می‌توانند مشکلات جدی در مدیریت بحران ایجاد کرده و سرعت واکنش به وضعیت اضطراری را کاهش دهند (Bazargur et al., 2023).



۶. **تغییر در شرایط آب و هوایی زیرزمینی:** زلزله‌ها می‌توانند باعث تغییر در جریان آب‌های زیرزمینی یا ایجاد نشت آب در داخل معدن شوند. این تغییرات ممکن است منجر به سیلاب‌های ناگهانی یا تجمع آب در بخش‌هایی از معدن شود که خطرات بیشتری را برای کارگران و تجهیزات ایجاد می‌کند (Gorbunova et al., 2023).
۷. **آزادسازی گازهای سمی:** در برخی معادن زیرزمینی، گازهای سمی مانند میتان ممکن است در لایه‌های زیرزمینی جمع شوند. زلزله‌ها می‌توانند باعث آزادسازی ناگهانی این گازها شده و خطر انفجار یا اختلال در سیستم‌های تهویه را به همراه داشته باشند. این گازها می‌توانند تهدیدات جدی برای ایمنی کارکنان ایجاد کنند (Mendecki et al., 2019).
۸. **افزایش خطرات انفجاری:** در معادن زیرزمینی که برای استخراج مواد معدنی از مواد منفجره استفاده می‌شود، زلزله می‌تواند باعث تغییرات در وضعیت ذخایر مواد منفجره و ایجاد شرایط خطرناک برای انفجارهای ناگهانی شود. این انفجارها می‌توانند آسیب‌های زیادی به کارکنان و تجهیزات وارد کنند (Qi et al., 2024).
۹. **مشکلات در حمل و نقل مواد:** سیستم‌های حمل و نقل در معادن زیرزمینی، از جمله کنویرها و خط آهن معدن، ممکن است در اثر زلزله آسیب ببینند. این آسیب‌ها می‌توانند موجب توقف جریان مواد معدنی از معادن به سطح شوند، که بر عملکرد کلی معدن تأثیر می‌گذارد و موجب کاهش بهره‌وری می‌شود (Stachowiak et al., 2021).
۱۰. **آسیب به نقاط کنترل و زیرساخت‌های ذخیره‌سازی:** زلزله‌ها می‌توانند باعث آسیب به نقاط کنترل مرکزی و زیرساخت‌های ذخیره‌سازی در معادن زیرزمینی شوند. این آسیب‌ها می‌توانند موجب از دست دادن داده‌ها، اختلال در مدیریت معدن و مشکلات در تصمیم‌گیری و اجرای عملیات روزانه شوند (Sun et al., 2024).
- برای مقابله با تأثیرات منفی زلزله‌ها بر معادن زیرزمینی، نظارت دقیق و پیش‌بینی‌پذیری ضروری است. استفاده از سیستم‌های پایش لرزه‌ای، تقویت ساختارهای تونل‌ها و دیواره‌ها، به‌روزرسانی تجهیزات و ماشین‌آلات و تقویت سیستم‌های ایمنی و تهویه می‌تواند به کاهش خطرات و افزایش ایمنی در هنگام وقوع زلزله‌ها کمک کند.



۲-۳-۱۰. تاثیر زلزله بر تصاعد گازات در معادن

زلزله‌ها می‌توانند تأثیرات زیادی بر محیط‌های معدنی داشته باشند، از جمله بر تصاعد گازهای مختلف. این تأثیرات می‌توانند از نظر ایمنی و سلامت کارکنان معدن بسیار مهم باشند. در زیر به چند مورد از تأثیرات زلزله بر تصاعد گازها در معادن اشاره می‌کنم (Aktas Potur et al., 2025):

آزادسازی گازهای موجود در معادن: زلزله‌ها ممکن است موجب شکستگی و تغییرات در ساختار سنگ‌ها و دیواره‌های معدنی شوند. این تغییرات می‌توانند باعث آزاد شدن گازهای محبوس در معادن مانند گاز میتان، گازهای سمی مانند کاربن دای اکساید و گازهای دیگر شوند. این گازها ممکن است به صورت ناگهانی و در مقادیر زیاد به سطح معدن برسند که می‌تواند خطرات جدی به‌ویژه در معادن زغال‌سنگ ایجاد کند (Batugin et al., 2023)

گسترش ترک‌ها و شکاف‌ها: وقوع زلزله می‌تواند موجب ایجاد یا گسترش ترک‌ها و شکاف‌هایی در لایه‌های زمین و سنگ‌های معدنی شود که باعث ورود یا خروج گازهای مختلف به یا از معدن می‌شود. این ترک‌ها ممکن است به‌ویژه در مناطقی که گازهای سمی در آن‌ها محبوس هستند، خطرات جدی ایجاد کنند.

تأثیر بر سیستم تهویه معدن: زلزله‌ها ممکن است به سیستم تهویه معدن آسیب وارد کرده و جریان هوا را مختل کنند. این اختلال می‌تواند موجب تجمع گازهای سمی یا انفجارهای گازی در داخل معدن شود. تهویه مناسب در معادن برای حفظ ایمنی کارکنان و جلوگیری از تصاعد گازهای خطرناک ضروری است.

خطر انفجار گازهای میتان: یکی از خطرات جدی که زلزله‌ها می‌توانند ایجاد کنند، خطر انفجار گازهای میتان است که معمولاً در معادن زغال‌سنگ یافت می‌شود. در صورت آزادسازی ناگهانی میتان و ترکیب آن با هوای اطراف، ممکن است یک انفجار ایجاد شود که می‌تواند خطرات جدی برای کارکنان و تجهیزات معدن به دنبال داشته باشد.

آسیب به زیرساخت‌ها و تجهیزات: زلزله‌ها می‌توانند به سیستم‌های مختلف زیرساختی معدن مانند خطوط لوله، مخازن گاز و تجهیزات تهویه آسیب وارد کنند، که این خود می‌تواند باعث نشت گازهای خطرناک به محیط معدن و ایجاد شرایط خطرناک شود.



برای کاهش خطرات ناشی از زلزله‌ها در معادن، نظارت دقیق بر ساختارهای زمین‌شناسی، استفاده از سیستم‌های پیشرفته تهویه و کنترل گازها، و همچنین آمادگی برای مدیریت اضطراری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۳. یافته‌های تحقیق

مناطق شرق و جنوب افغانستان از نظر زلزله‌خیزی در بالاترین سطح آسیب‌پذیری قرار دارند. این مناطق بیشتر به دلیل موقعیت جغرافیایی و ساختار زمین‌شناسی حساس به فعالیت‌های لرزه‌ای هستند. مناطق در مجاورت شکستگی‌های بزرگ مانند شکستگی هندوکش و شکستگی‌های منطقه‌ای دیگر از بیشترین خطر لرزه‌ای برخوردارند.

معادن در مناطقی که در معرض خطر زلزله قرار دارند، به‌ویژه معادن زیرزمینی، بیشتر دچار آسیب‌های جدی شده‌اند. وقوع زلزله می‌تواند منجر به ریزش تونل‌ها، خرابی تجهیزات و حتی تلفات انسانی در معادن شود. در مناطقی با شکستگی‌های فعال، احتمال آسیب‌دیدگی معادن روباز به دلیل لرزش‌های زمین و جابجایی مواد معدنی نیز افزایش می‌یابد.

زلزله‌ها موجب توقف فعالیت‌های معدنی به مدت طولانی می‌شوند، که این امر باعث تأخیر در تولید و کاهش بهره‌وری معادن می‌گردد. علاوه بر خسارات فیزیکی، وقوع زلزله ممکن است تأثیرات منفی بر تصمیمات اقتصادی و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی داشته باشد.

نیاز به طراحی و اجرای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله در معادن وجود دارد. ارتقای سیستم‌های هشدار زود هنگام و آموزش کارکنان در مقابله با شرایط اضطراری زلزله از راهکارهای مؤثر برای کاهش خسارات احتمالی است. این یافته‌ها می‌توانند به شناسایی بهتر نقاط آسیب‌پذیر در افغانستان و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت اثرات زلزله در صنعت معادن کمک کنند.

۴. نتیجه‌گیری

افغانستان به دلیل قرارگیری در کمربند زلزله‌خیز آلپ-هیمالیا و وجود شکستگی‌های فعال متعدد، یکی از مناطق بسیار آسیب‌پذیر در برابر زلزله است. معادن سطحی و زیرزمینی این کشور که در نواحی زلزله‌خیز واقع شده‌اند، در معرض تهدیدات جدی ناشی از زلزله قرار دارند که می‌تواند موجب خسارات مالی و جانی قابل توجهی شود. بررسی‌ها نشان داد که زلزله‌ها تأثیرات متعددی بر معادن دارند؛ از جمله ریزش تونل‌ها، ناپایداری شیب‌ها، آسیب به تجهیزات و سیستم‌های تهویه، و افزایش



خطرات ناشی از آزادسازی گازهای سمی و انفجاری. به ویژه معادن در مناطق بدخشان، پکتیکا، هرات و هندوکش آسیب پذیری بیشتری دارند. برای کاهش این خطرات، تقویت ساختارهای معدنی، بهبود سیستم های ایمنی و تهویه، آموزش مستمر کارکنان و به کارگیری فناوری های نوین پایش لرزه ای ضروری است. همچنین، تدوین برنامه های مدیریت بحران و آمادگی در برابر زلزله می تواند به کاهش خسارات و حفظ امنیت در معادن افغانستان کمک کند. در نهایت، این پژوهش اهمیت توجه ویژه به موضوع مدیریت ریسک زلزله در بخش معدن را به عنوان یکی از اولویتهای توسعه پایدار کشور برجسته می سازد.

۵. پیشنهادات

۱. نصب و توسعه شبکه های زلزله نگاری در مناطق معدنی و اطراف آنها برای شناسایی زودهنگام رویدادهای زلزله ای و اطلاع رسانی سریع به مدیران معادن.
۲. طراحی و اجرای استانداردهای مقاوم سازی تونل ها و ساختمان های معدنی در برابر زلزله با استفاده از فناوری های نوین انجیری.
۳. برگزاری دوره های آموزشی منظم برای کارکنان معادن درباره رفتار صحیح در زمان زلزله، نحوه استفاده از تجهیزات ایمنی و اقدامات اضطراری.
۴. تدوین و اجرای برنامه های جامع مدیریت بحران و آمادگی در برابر زلزله در معادن، شامل تمرین های منظم و سناریوهای واکنش سریع.
۵. بهره گیری از سیستم های تهویه هوشمند، حسگرهای مداوم پایداری تونل و روش های نوین حفاری برای کاهش آسیب پذیری معادن.
۶. انجام تحقیقات بیشتر در زمینه شناخت دقیق تر خطرات زلزله و تاثیرات آن بر معادن مختلف کشور برای ارائه راهکارهای تخصصی تر.
۷. استفاده از تجربیات کشورهای دارای سابقه موفق در مدیریت ریسک زلزله و انتقال فناوری های پیشرفته به بخش معدن افغانستان.
۸. تصویب و اجرای مقررات ایمنی ویژه معادن در مناطق زلزله خیز با هدف کاهش آسیب های ناشی از زلزله.



۶. فهرست منابع

1. Achtziger-Zupančič, P., Ceccato, A., Zappone, A. S., Pozzi, G., Shakas, A., Amann, F., Behr, W. M., Escallon Botero, D., Giardini, D., Hertrich, M., Jalali, M., Ma, X., Meier, M.-A., Osten, J., Wiemer, S., & Cocco, M. (2024). Selection and characterization of the target fault for fluid-induced activation and earthquake rupture experiments. *Solid Earth*, 15(8), 1087–1112. <https://doi.org/10.5194/se-15-1087-2024>
2. Aktas Potur, E., Aktas, A., & Kabak, M. (2025). A Bibliometric Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Techniques in Disaster Management and Transportation in Emergencies: Towards Sustainable Solutions. *Sustainability*, 17(6), 2644. <https://doi.org/10.3390/su17062644>
3. Aydan, Ö., Malistani, N., Ulusay, R., & Kumsar, H. (2024). The damage and response of some underground structures by the 2023 February 6 Great Turkish Earthquakes and some considerations. *Engineering Geology*, 336, 107549. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107549>
4. Batugin, A., Kobylkin, A., Kolikov, K., Ivannikov, A., Musina, V., Khotchenkov, E., Zunduijamts, B., Ertuganova, E., & Krasnoshtanov, D. (2023). Study of the Migrating Mine Gas Piston Effect during Reactivation of Tectonic Faults. *Applied Sciences*, 13(21), 12041. <https://doi.org/10.3390/app132112041>
5. Bazargur, B., Bataa, O., & Budjav, U. (2023). Reliability Study for Communication System: A Case Study of an Underground Mine. *Applied Sciences*, 13(2), 821. <https://doi.org/10.3390/app13020821>
6. *British Geological Survey*. (2008). <https://www.bgs.ac.uk>
7. Brookfield, M. E., & Hashmat, A. (2001). The geology and petroleum potential of the North Afghan platform and adjacent areas (northern Afghanistan, with parts of southern Turkmenistan, Uzbekistan and Tajikistan). *Earth-Science Reviews*, 55(1–2), 41–71. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00036-8)
8. Duan, H., Wang, W., Xing, L., Xie, B., Zhang, Q., & Zhang, Y. (2025). Identifying geological structures in the Pamir region using non-subsampled shearlet transform and gravity gradient tensor. *Geophysical Journal International*, 240(3), 2125–2143. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf036>
9. Estrada, B., & Weir, F. (2023). Open pits, earthquake damage and seismic design: an overview. *SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference*, 675–684. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2335_45
10. Faryad, S. W., Collett, S., Petterson, M., & Sergeev, S. A. (2013). Magmatism and metamorphism linked to the accretion of continental blocks south of the Hindu Kush, Afghanistan. *Lithos*, 175–176, 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.016>
11. Gorbunova, E., Besedina, A., Petukhova, S., & Pavlov, D. (2023). Reaction of the Underground Water to Seismic Impact from Industrial Explosions. *Water*, 15(7), 1358. <https://doi.org/10.3390/w15071358>
12. Hauksson, E., Yang, W., & Shearer, P. M. (2012). Waveform Relocated Earthquake Catalog for Southern California (1981 to June 2011). *Bulletin of the*



- Seismological Society of America*, 102(5), 2239–2244. <https://doi.org/10.1785/0120120010>
13. Karahan, S., Posluk, E., Büyükdemirci, F. B., & Gokceoglu, C. (2025). Re-design of a railway tunnel intersected by surface rupture of the Erkenek fault segment during the 6 February 2023 Pazarcik (Mw 7.7) Earthquake (Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(4), 198. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04217-y>
 14. Kolapo, P., Oniyide, G. O., Said, K. O., Lawal, A. I., Onifade, M., & Munemo, P. (2022). An Overview of Slope Failure in Mining Operations. *Mining*, 2(2), 350–384. <https://doi.org/10.3390/mining2020019>
 15. Kufner, S.-K., Kakar, N., Bezada, M., Bloch, W., Metzger, S., Yuan, X., Mechie, J., Ratschbacher, L., Murodkulov, S., Deng, Z., & Schurr, B. (2021). The Hindu Kush slab break-off as revealed by deep structure and crustal deformation. *Nature Communications*, 12(1), 1685. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21760-w>
 16. Lenhardt, W. A. (2009). The Impact of Earthquakes on Mining Operations. *BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte*, 154(6), 249–254. <https://doi.org/10.1007/s00501-009-0470-1>
 17. Liao, X., Wang, C., & Liu, C. (2015). Disruption of groundwater systems by earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 42(22), 9758–9763. <https://doi.org/10.1002/2015GL066394>
 18. Mendecki, M. J., Wojtecki, Ł., & Zuberek, W. M. (2019). Case Studies of Seismic Energy Release Ahead of Underground Coal Mining Before Strong Tremors. *Pure and Applied Geophysics*, 176(8), 3487–3508. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02144-0>
 19. Qi, C., Wang, M., Kocharyan, G., Kunitskikh, A., & Wang, Z. (2024). Dynamically triggered seismicity on a tectonic scale: A review. *Deep Underground Science and Engineering*, 3(1), 1–24. <https://doi.org/10.1002/dug2.12060>
 20. Saleem, H. A. (2025). Energy Consumption Reduction in Underground Mine Ventilation System: An Integrated Approach Using Mathematical and Machine Learning Models Toward Sustainable Mining. *Sustainability*, 17(3), 1038. <https://doi.org/10.3390/su17031038>
 21. Schubert, G. (2001). Breakthroughs in our Knowledge and Understanding of the Earth and Planets. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29(1), 1–15. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.1>
 22. Schurr, B., Ratschbacher, L., Sippl, C., Gloaguen, R., Yuan, X., & Mechie, J. (2014). Seismotectonics of the Pamir. *Tectonics*, 33(8), 1501–1518. <https://doi.org/10.1002/2014TC003576>
 23. Sharafi, S. Q., & Saito, T. (2024). Seismic Damage Probability Assessment of Existing Reinforced Concrete School Buildings in Afghanistan. *Buildings*, 14(4), 1054. <https://doi.org/10.3390/buildings14041054>
 24. Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841552>
 25. Shnizai, Z. (2020). Mapping of active and presumed active faults in Afghanistan by interpretation of 1-arcsecond SRTM anaglyph images. *Journal of Seismology*, 24(6), 1131–1157. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09933-4>



26. Shnizai, Z., Walker, R., & Tsutsumi, H. (2024). The Chaman and Paghman active faults, west of Kabul, Afghanistan: Active tectonics, geomorphology, and evidence for rupture in the destructive 1505 earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259, 105925. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105925>
27. Shnizai Z. (n.d.). *Active Tectonics and Seismic Hazard Assessment of Afghanistan and Slip-rate Estimation of the Chaman Fault Based on Cosmogenic ¹⁰Be Dating*. <https://doi.org/http://doi.org/10.14988/00027636>
28. Shroder F. (2015). *Afghanistan Mineral Resources*. https://www.researchgate.net/publication/282029952_Afghanistan_Mineral_Resources
29. Shroder, J. F., Eqrar, N., Waizy, H., Ahmadi, H., & Weihs, B. J. (2022). Review of the Geology of Afghanistan and its water resources. *International Geology Review*, 64(7), 1009–1031. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1904297>
30. Sırrı Sargın, S., & Şensöğüt, C. (2024). Use of Underground Mining Activities in Earthquake Search and Rescue Works. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 14(2), 1–5. <https://doi.org/10.46660/ijeeg.v14i2.129>
31. Stachowiak, M., Koperska, W., Stefaniak, P., Skoczylas, A., & Anufriev, S. (2021). Procedures of Detecting Damage to a Conveyor Belt with Use of an Inspection Legged Robot for Deep Mine Infrastructure. *Minerals*, 11(10), 1040. <https://doi.org/10.3390/min11101040>
32. Sun, W., Wang, E., Li, J., Liu, Z., Zhang, Y., & Qiu, J. (2024). Mining-Induced Earthquake Risk Assessment and Control Strategy Based on Microseismic and Stress Monitoring: A Case Study of Chengyang Coal Mine. *Applied Sciences*, 14(24), 11951. <https://doi.org/10.3390/app142411951>
33. Thomas H., Yun-Tai Chen, Paolo Gasparini, Raul Madariaga, Ian Main, Warner Marzocchi, Gerassimos Papadopoulos, Gennady Sobolev, Koshun Yamaoka, & Jochen Zschau. (2011). OPERATIONAL EARTHQUAKE FORECASTING. State of Knowledge and Guidelines for Utilization. *Annals of Geophysics*, 54(4). <https://doi.org/10.4401/ag-5350>
34. Trifonov, V. G., Ivanova, T. P., & Bachmanov, D. M. (2012). Recent mountain building of the central Alpine-Himalayan Belt. *Geotectonics*, 46(5), 315–332. <https://doi.org/10.1134/S0016852112050068>
35. Turner, A. (2023). Four magnitude-6.3 earthquakes strike in succession near Herat, Afghanistan. *Temblor*. <https://doi.org/10.32858/temblor.326>
36. Wheeler, R. L., & Rukstales, K. S. (2007). *Seismotectonic Map of Afghanistan and Adjacent Areas* (Open-File Report). <https://doi.org/10.3133/ofr20071104>
37. Wu, K., Zou, J., Jiao, Y.-Y., Zhang, X., & Wang, C. (2023). Focal Mechanism of Strong Ground Seismicity Induced by Deep Coal Mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(1), 779–795. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03079-0>



39. Zanoletti, A., & Bontempi, E. (2024). The impacts of earthquakes on air pollution and strategies for mitigation: a case study of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 24662–24672. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32592-8>
40. Zhao, L., Nissen, E., Xu, W., Jamalreyhani, M., Bergman, E. A., Zhao, D., & Xie, L. (2025). Variable fault geometry controls the cascading 2023 Herat, Afghanistan multiplet sequence. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 135. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02113-7>