بررسی مشخصات دانه‌بندی سنگدانه‌های مواد پرکننده معادن زیرزمینی به همراه ارزیابی دانه‌بندی سنگدانه حاصل از نخاله ساختمانی

فائزه سادات خندانی[۱]، هادی عطاپور*[۲]، مصطفی یوسفی راد [۳]، بهزاد خوش[۴]

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
۲. استادیار گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
۳. دانشیار گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک
۴. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

چکیده

مواد پرکننده فضاهای زیرزمینی معدنی از انواع مصالح مهندسی است که مشخصات دانه‌بندی سنگدانه آن‌ها تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی و فیزیکی این مواد دارد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، معیار جامعی در مورد مشخصات دانه‌بندی سنگدانه‌های مواد پرکننده معادن زیرزمینی ارائه نشده است. در مقاله حاضر محدوده‌های اندازه دانه‌ها و مشخصات دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در انواع پرکننده‌های معدنی شامل پرکننده هیدرولیکی، پرکننده خمیری و پرکننده سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، منابع موجود در زمینه انواع مواد پرکننده جمع‌آوری شد. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، محدوده ابعادی دانه‌ها در هر یک از پرکننده‌ها تعیین شد. سپس مشخصات دانه‌بندی هر یک از مواد پرکننده معادن از جمله میانگین قطر دانه‌ها (D50)، ضریب یکنواختی (Cu) و ضریب انحنا (Cc) محاسبه گردید. نتایج حاصل از بررسی منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده‌های خمیری، هیدرولیکی و سنگی نشان داد که دانه‌ها در پرکننده سنگی، هیدرولیکی و خمیری به ترتیب دارای درشت‌ترین تا ریزترین محدوده ابعادی می‌باشند. در نهایت مشخصات دانه‌بندی پرکننده تهیه شده از نخاله‌های ساختمانی به عنوان یک پرکننده جدید ارائه و با دانه‌بندی هر یک از پرکننده‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد منحنی دانه‌بندی پرکننده تهیه شده از نخاله ساختمانی در مرز بالایی محدوده ابعادی پرکننده هیدرولیکی و مرز پایینی محدوده ابعادی پرکننده سنگی قرار دارد.

کلیدواژه‌ها: مواد پرکننده، معدنکاری زیرزمینی، مشخصات دانه‌بندی، نخاله ساختمانی، سنگدانه.

* نویسنده مسئول: h.atapour@arakut.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.3.105984

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

مقدمه

معدنکاری زیرزمینی و استخراج مواد معدنی با ارزش، موجب پدید آمدن فضاهای خالی با شکل‌های متفاوتی می‌شود. این فضاهای خالی به وجود آمده، خطرات ریزش را برای دیواره‌های اطراف کارگاه‌های استخراج در پی دارند. همچنین امکان نشست برای زیر ساخت‌های واقع شده روی سطح زمین، تنها بخشی از خطرات رها کردن این فضاهای خالی است (Sheshpari, 2015). با هدف پیشگیری از خطرات مذکور، یا باید پایه‌هایی حاوی ذخایر ماده معدنی به جای گذاشته شوند که در این صورت بخش زیادی از ماده معدنی از دست خواهد رفت، یا باید این فضاهای خالی با مواد مناسبی پُر شوند (Li, 2014). از منابع و مصالح اولیه برای پرکردن فضاهای خالی ناشی از معدنکاری زیرزمینی می‌توان به سنگ‌های حاصل شده از استخراج زیرزمینی اشاره کرد که منابع خوبی برای مواد پرکننده به شمار می‌روند. همچنین باطله‌های کارخانه فرآوری، در صورتی که مواد خاصیت خودسوزی نداشته باشند، می‌توانند به عنوان مواد پرکننده انتخاب شوند. (عطایی، ۱۳۸۴). مطالعه اثر عوامل مختلف بر مشخصات مواد پرکننده معادن زیرزمینی، امکان تولید پرکننده با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب را مهیا می‌کند. یکی از موثرترین پارامترهای سنگدانه‌ها در مقاومت مواد پرکننده، ابعاد و نحوه توزیع ابعادی یا به عبارتی دانه‌بندی آن است. شکل نمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها غالباً به صورت یک منحنی نیمه لگاریتمی است (ضابطه شماره ۷۱۰، ۱۳۹۶). با استفاده از نمودار دانه‌بندی پارامترهایی همچون ضریب یکنواختی[۱] (Cu) و ضریب انحنا[۲] (Cc) مصالح که به صورت کمی بیان می‌شوند، قابل محاسبه خواهند بود (ضابطه شماره ۲۸۳، ۱۳۹۴). دانه‌بندی خوب باید به نحوی باشد که در نهایت، ریزدانه‌ها فضای خالی بین درشت دانه‌ها را پرکنند و ضمن کاهش تخلخل باعث متراکم شدن هر چه بیشتر مصالح مربوطه شوند. هرچه تراکم در مصالح بیشتر باشد، وزن مخصوص و مقاومت آن بیشتر خواهد شد (Arioglu, 1984; عزتی، ۱۳۹۷). جهت به دست آوردن یک مقاومت مشخص در مواد پرکننده، با دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌های مورد استفاده می‌توان از سیمان کمتری به عنوان ماده چسباننده استفاده کرد. این امر با توجه به حجم ماده پرکننده مورد استفاده، منجر به صرفه اقتصادی قابل توجهی می‌شود. ب

در مقاله حاضر، پیرو مطالعات قبلی انجام شده (خندانی و همکاران، الف ۱۴۰۲، ب ۱۴۰۲) بررسی جامعی بر روی مشخصات دانه‌بندی انواع مواد پرکننده معادن زیرزمینی انجام و نتایج حاصل ارائه شده است. شایان ذکر است که اهمیت موضوع دانه‌بندی مناسب در مواد پرکننده معادن به علت ابعاد بزرگ فضاهای زیرزمینی مورد نظر و امکان کاهش حجم قابل توجهی از سیمان مورد نیاز، از اهمیت زیادی برخوردار است. در ادامه مقاله، مشخصات دانه‌بندی مواد پرکننده حاصل از نخاله‌های ساختمانی که اخیراً از طرف مؤلفین به عنوان یک ماده پرکننده جدید پیشنهاد شده، ارائه شده است (Khandani et al., 2023; خندانی، ۱۴۰۱).

[۱] Uniformity coefficient (Cu)

[2] Curvature coefficient (Cc)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

انواع مواد پرکننده در معدنکاری

از مهم‌ترین اهداف بکارگیری مواد پرکننده می‌توان به مواردی از قبیل کنترل و نگهداری دیواره‌ها، افزایش نرخ استخراج ماده معدنی، کنترل ترقیق، ایجاد سکوی کار در کف و سقف کارگاه، بازیابی پایه‌ها و کنترل نشست اشاره کرد (هارتمن، ۱۳۸۵). مواد پرکننده را می‌توان بر مبنای استفاده یا عدم استفاده از سیمان، به دو گروه سیمانی شامل پرکننده‌های هیدرولیکی، خمیری و سنگی و غیر سیمانی مانند پرکننده‌های هیدرولیکی، پرکننده‌های سنگدانه‌ای، پرکننده‌های سنگی و پرکننده‌های ماسه‌ای طبقه‌بندی نمود (Sivakugan et al., 2015). در ادامه به صورت مختصر به معرفی انواع مواد پرکننده سیمانی مذکور که نسبت به پرکننده‌های فاقد سیمان رایج‌تر می‌باشند، پرداخته شده است.

پرکننده هیدرولیکی

پرکننده هیدرولیکی در اوایل دهه ۱۹۹۰ در معدن طلا آنگلو[۳] در آفریقای جنوبی معرفی شد (Fall et al., 2005). پرکننده هیدرولیکی می‌تواند حداکثر ۱۰ درصد از ذرات ریزدانه کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر را در خود داشته باشد (Börgesson et al., 2003). پرکننده‌های هیدرولیکی در ابتدا به شکل دوغاب، با مقدار جامد ۷۵-۶۵ درصد و مقدار آب ۵۴-۳۳ درصد، به کارگاه‌ها منتقل می‌شود. به منظور تخلیه آب اضافی، موانعی با استفاده از آجرهای متخلخل مخصوص ساخته می‌شوند. این آجرها عموماً از ملات ترکیبی شامل شن، ماسه، سیمان و آب ساخته شده‌اند و نفوذپذیری ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ برابر بیشتر از پرکننده‌های هیدرولیکی دارند (عزتی، ۱۳۹۷). در شکل ۱، نمونه‌ای از پرکننده هیدرولیکی به همراه آجرهای متخلخل استفاده شده قابل مشاهده است.

شکل ۱. (الف) نمونه‌ای از بافت پرکننده هیدرولیکی (Ibishi, 2019) (ب) دیوار ساخته شده از آجرهای متخلخل (Sivakugan et al., 2013)
Fig. 1. (a) Example of hydraulic backfill texture (b) wall made of porous bricks

[۳] Anglo Gold Ashanti (AGA)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

پرکننده خمیری

اگر پرکننده حاوی حداقل ۱۵ درصد از ذرات کوچک‌تر از ۲۰ میکرومتر باشد و همچنین پس از ته‌نشین شدن آب از آن خارج نشود، پرکننده خمیری نامیده می‌شود (Potvin et al., 2005). این پرکننده با ترکیب مناسبی از باطله‌ها و یا سایر ضایعات جامد به همراه مقدار مناسبی از سیمان پرتلند و آب تهیه می‌شود (Hughes, 2014). در مقایسه با سایر روش‌های پرکردن، پرکننده خمیری از مقدار جامد بیشتری تشکیل شده است. پوتوین[۴] (Potvin et al., 2005) پرکننده خمیری را به عنوان مخلوطی از مواد شامل ۷۵ تا ۸۵ درصد وزنی جامد و ۱ تا ۱۲ درصد وزنی ماده چسباننده تعریف کرده است. در برخی از موارد، سنگ‌های باطله یا مواد افزودنی نیز برای بهبود توزیع اندازه ذرات و قوام پرکننده استفاده می‌شود (Hane et al., 2017; Yang et al., 2018). در شکل ۲ نمایی از جریان پرکننده خمیری به همراه بافت این پرکننده نشان داده شده است.

شکل ۲. (الف) جریان (Dong et al., 2023) و (ب) بافت پرکننده خمیری (Behera et al., 2021)
Fig. 2. (a) Flow and (b) paste backfill texture

پرکننده سنگی

جذابیت اصلی این پرکننده در دسترس بودن سنگدانه آن در معادن است (Hustrulid et al., 2001). نتایج مطالعات عملی به وضوح نشان داده است که پرکننده سنگی دارای مزایای قابل توجهی نسبت به سایر پرکننده‌های سیمانی، به ویژه از دیدگاه نیاز به سیمان کم و سرعت پر شدن بالا دارد (Arioglu, 1983; Thomas, 1979). این نوع پرکننده می‌تواند با مقادیر کم مواد سیمانی به عنوان یک پرکننده با مقاومت قابل توجه مورد استفاده قرار گرفته و مشکل محدودیت در ظرفیت برداشت از ماده معدنی در معادن عمیق را برطرف نماید (Greberg and Salama, 2020; Wu et al., 2021). طرح اختلاط مناسب باید شامل تعیین نسبت صحیح سیمان، سنگدانه‌ها و آب باشد تا یک ترکیب مناسب با ویژگی‌های مورد انتظار مانند مقاومت، دوام و غیره تولید شود (Arioglu, 1984). در شکل ۳، نمایی از ابعاد سنگدانه‌های این پرکننده به همراه برخی از نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده است.

[۴] Potvin

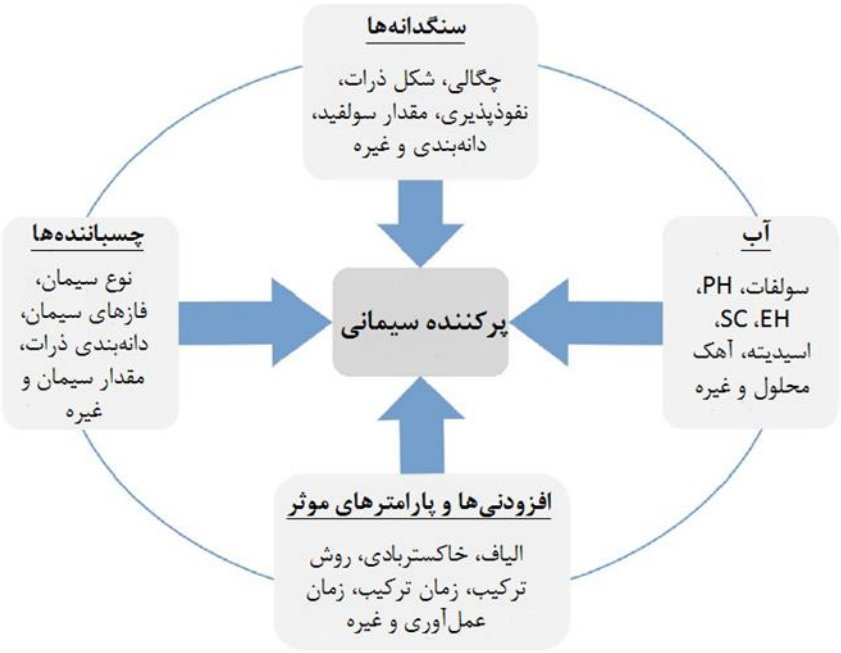
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

شکل ۳. (الف) سنگدانه مورد استفاده در پرکننده سنگی و (ب) نمونه تهیه شده پرکننده سنگی (Sainsbury et al., 2021)
Fig. 3. (a) Aggregate used in rock backfill and (b) a sample of rock backfill

بررسی مشخصات دانه‌بندی انواع مواد پرکننده

مواد پرکننده سیمانی در معدنکاری زیرزمینی از چهار بخش سنگدانه، چسباننده‌ها، آب و مواد افزودنی تشکیل می‌شود (شکل ۴). هر یک از این اجزا بر روی مشخصات مقاومتی و فیزیکی پرکننده تأثیر می‌گذارد. مطابق شکل ۴، مشخصات جزء سنگدانه‌ای شامل چگالی، شکل ذرات، نفوذپذیری، مقدار سولفید و توزیع اندازه ذرات است. توزیع اندازه ذرات بخش سنگدانه، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقاومت پرکننده‌های سیمانی است (Qi and Fourie, 2019). انتخاب نامناسب ابعاد و توزیع دانه‌بندی دانه‌ها برای مواد پرکننده می‌تواند سبب افزایش تخلخل و کاهش وزن مخصوص مواد پرکننده شود. تخلخل بالا و وزن مخصوص کم در نهایت منجر به کاهش مقاومت ماده پرکننده می‌شود. توزیع دانه‌بندی سنگدانه مواد پرکننده باید به گونه‌ای باشد که فضای خالی بین دانه‌ها به کم‌ترین مقدار خود برسد و در نهایت پرکننده‌ای با مقاومت بالا حاصل شود (عزتی، ۱۳۹۷).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



شکل ۴. نمودار شماتیک اجزای پرکننده سیمانی و ویژگی‌های مرتبط با آن‌ها (Ke et al., 2015)
Fig. 4. Schematic diagram of cemented backfill components and their related properties

با توجه به اهمیت دانه‌بندی سنگدانه مواد پرکننده و وجود انواع مختلف پرکننده‌ها در معادن، در سال‌های اخیر چندین مطالعات در این راستا انجام شده است. سیواکوگان و همکاران[۵] (Sivakugan et al., 2006) بیش از ۲۰ نوع پرکننده هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند که طیف وسیعی از معادن در استرالیا را شامل می‌شود. یکی از قسمت‌های برجسته این مطالعه مربوط به ارائه یک محدوده مناسب برای دانه‌بندی مواد پرکننده این معادن است. شروع محدوده ارائه شده برای پرکننده هیدرولیکی از حدود ۱ تا ۱۰ میکرومتر و پایان این بازه تقریباً به ۱۰۰۰ میکرومتر می‌رسد. سویی و فال[۶] (Cui and Fall, 2017) نیز میانگین دانه‌بندی جمع‌آوری شده از پرکننده‌های خمیری ۹ معدن در کانادا را به منظور اطمینان از محدوده اندازه ذرات سنگدانه خود، مورد مقایسه قرار داده‌اند. لازم به ذکر است، محدوده ابعادی میانگین این ۹ معدن از پرکننده‌های خمیری از ۰/۱میکرومتر تا ۱۰۰۰ میکرومتر بوده است.

یکی از موارد مورد توجه در ارزیابی دانه‌بندی مواد پرکننده، اثر قابل توجه ابعاد ذرات بر روی خواص مقاومتی و فیزیکی مواد پرکننده است. مطالعات تأثیر اندازه ذرات سنگدانه بر ویژگی‌های مقاومتی پرکننده‌ها، نتایج مختلفی را نشان داده‌اند. تفاوت در نتایج می‌تواند ناشی از چندشکلی بودن در توزیع اندازه ذرات باشد که به شدت بر همگنی مواد پرکننده تأثیر می‌گذارد (Börgesson et al., 2003; Fall et al., 2005; Ke et al., 2015; Yılmaz et al., 2007).

به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که توزیع اندازه ذرات مناسب نه تنها می‌تواند ساختار پرکننده‌ها را برای دستیابی به مقاومت بهینه آن بهبود ببخشد (Bosiljkov, 2003; Gautam et al., 2017; Ke et al., 2016; Kesimal et al., 2003 Liu

[۵] Sivakugan et al
[۶] Cui and Fall

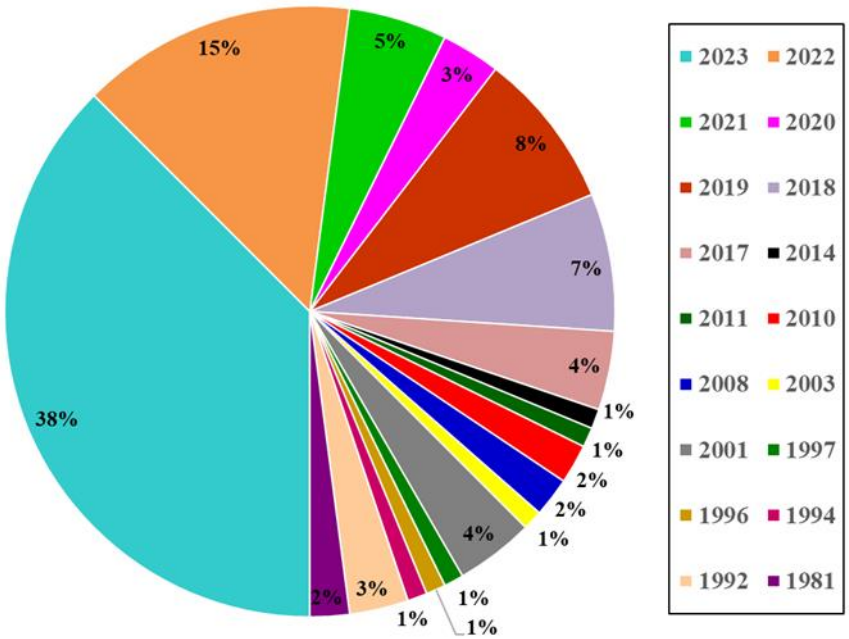
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

et al., 2016; Liu et al., 2016; Orejarena and Fall, 2010; Sari and Pasamehmetoglu, 2005; Yilmaz et al., 2014)، بلکه مقاومت در برابر یخ‌زدگی و مقاومت در برابر خوردگی را نیز افزایش می‌دهد (Lamontagne and Pigeon, 1995). در همین راستا، می‌توان به مطالعه کی و همکاران[7] اشاره کرد که از طریق انجام آزمایش‌های مختلف دریافتند که در مواد پرکننده سنگی با توزیع دانه‌بندی ریزدانه‌تر مقاومت فشاری تک محوری بالاتری حاصل می‌شود (Ke et al., 2015). فال و همکاران[8]، کسیمال و همکاران[9] و ارسیکدی و همکاران[10] نیز از پارامتر مدول نرمی برای توصیف دانه‌بندی ذرات سنگدانه استفاده کردند و مدول‌های نرمی بهینه به دست آمده ازمایش‌ها را به ترتیب ۳۵ درصد (Ercikdi et al., 2013)، ۲۵ درصد (Fall et al., 2005) و ۲۷/۷ درصد (Kesimal et al., 2003) عنوان کرده‌اند. مدول نرمی در حقیقت معیاری تجربی است که برای سنجش نرمی و زبری سنگدانه به کار می‌رود؛ هرچه دانه‌های سنگی درشت‌تر باشند مدول نرمی بیشتر خواهد بود و بالعکس. اصلی‌ترین کاربرد آن نیز در تعیین نسبت طرح اختلاط نمونه‌ها است (قاسمیه، ۱۳۹۸). وو و همکاران[11] (Wu et al., 2020) نشان داده‌اند که ویژگی ریزساختار پرکننده‌های سنگی با توزیع دانه‌بندی تغییر خواهد کرد؛ به صورتی که پرکننده سنگی با توزیع اندازه ذرات ریزتر از ذرات سنگدانه، تعداد بیشتری از ریز حفره‌ها و ریز ترک‌ها را تولید می‌کند، در حالی که پرکننده‌های سنگی با توزیع دانه‌بندی درشت‌تر از ذرات سنگدانه‌ها حاوی ریز حفره‌ها و ریزترک‌های درشت‌تری است که در نهایت نمی‌توانند به طور کامل توسط سیمان پر شوند. فال و همکاران (Fall et al., 2005) نیز با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی انجام شده بر روی پرکننده خمیری، به این نتیجه رسیدند که اندازه ذرات سنگدانه تأثیر قابل توجهی بر مقاومت، هزینه، میزان آب مورد نیاز و ریزساختارهای این پرکننده دارد. چی و همکاران[12] (Qi et al., 2018) هم، مقاومت فشاری کوتاه مدت پرکننده خمیری را از طریق آنالیز تعداد زیادی از نتایج آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری کوتاه مدت، رابطه مثبتی با ضریب یکنواختی سنگدانه‌ها دارد.

در ادامه مقاله حاضر، منحنی‌های دانه‌بندی و محدوده اندازه دانه‌های مورد استفاده در هر یک از مواد پرکننده ارائه شده است. همچنین مشخصات دانه‌بندی از قبیل ضریب یکنواختی، ضریب انحنا و میانگین قطر دانه‌ها (D50) برای هر یک از منحنی‌ها محاسبه و به صورت جدول ارائه شده است. شایان ذکر است در مطالعه حاضر ۹۶ منحنی دانه‌بندی ارائه شده است که از این تعداد ۲۶، ۵۳ و ۲۱ درصد به ترتیب مربوط به پرکننده هیدرولیکی، خمیری و سنگی است. در مجموع جهت به دست آوردن داده‌های مذکور از ۷۷ مطالعه استفاده شده است. در شکل ۵ نیز سال‌های انتشار این مطالعات، به تفکیک قابل مشاهده است.

[7] Ke et al
[8] Fall et al
[9] Kesimal et al
[10] Ercikdi et al
[11] Wu et al
[12] Qi et al

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



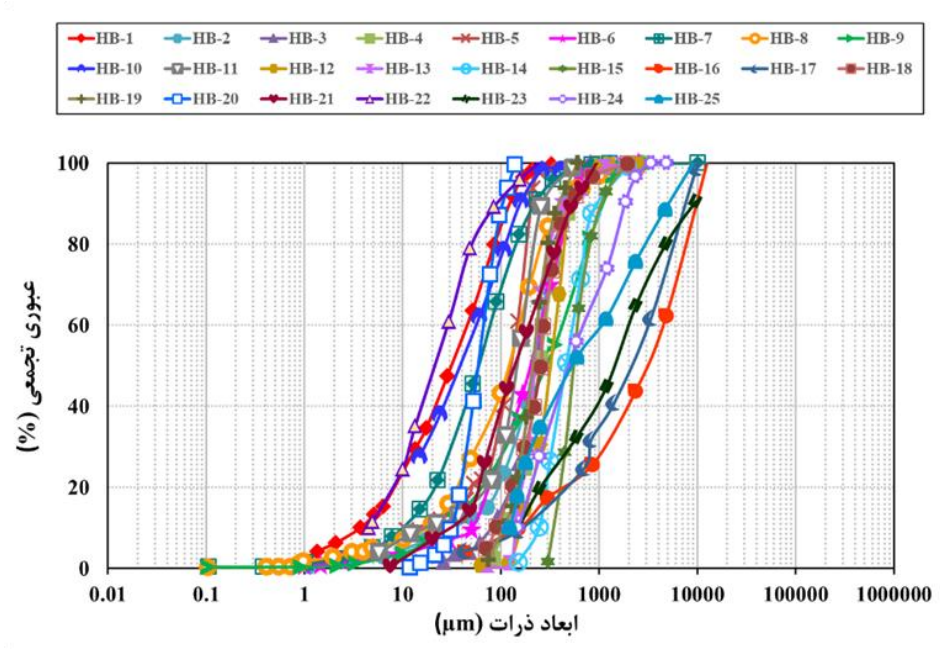
شکل ۵. زمان انتشار مطالعات مورد استفاده در مقاله حاضر
Fig. 5. Publication time of the used researchs this paper

دانه‌بندی پرکننده هیدرولیکی

در شکل ۶، نمودار مربوط به منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده هیدرولیکی حاصل از منابع جمع‌آوری شده در مطالعه حاضر، نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، برای منحنی‌های پرکننده هیدرولیکی ارائه شده در این مطالعه، از عبارت اختصاری HB[۱۳] استفاده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشخص است، محدوده اندازه دانه‌ها در منحنی‌های دانه‌بندی این نوع پرکننده از ۰/۱ میکرومتر تا حدود ۱۰۰۰۰ میکرومتر است. البته عمده اندازه دانه‌ها در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر است. به عبارتی دیگر عمده ذرات در حدود ابعاد سیلت‌های متوسط تا ماسه‌های درشت قرار دارد (Sivakugan, 2015). به عنوان نمونه، در منحنی HB-21 که از سیلت به عنوان سنگدانه در تهیه پرکننده هیدرولیکی استفاده شده است، ذراتی با ابعاد کمتر از ۱۰ میکرومتر تا بیشتر از ۱۰۰۰ میکرومتر وجود دارد و تقریباً در محدوده میانی این منحنی‌ها جای گرفته است.

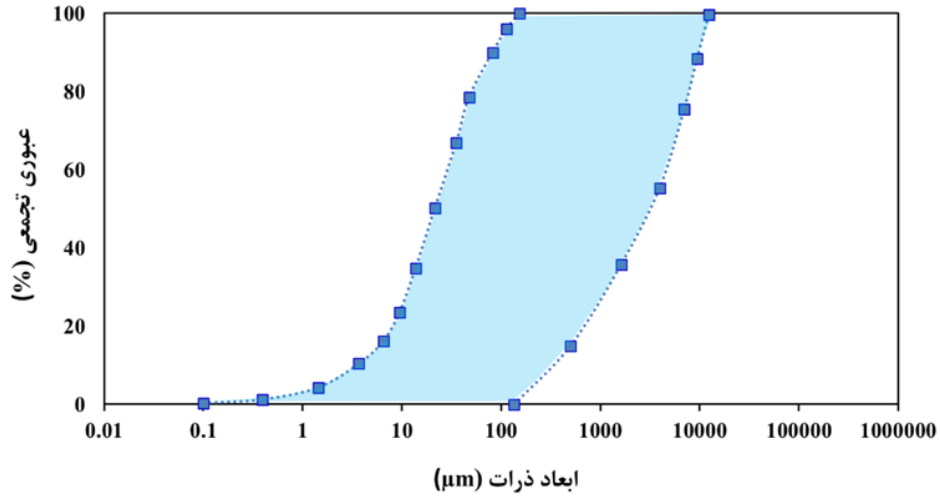
[۱۳] Hydraulic Backfill (HB)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



شکل ۶. نمودار منحنی‌های دانه‌بندی جمع‌آوری شده از مطالعات پرکننده‌های هیدرولیکی
Fig. 6. Graph of particle size distribution curves collected from hydraulic backfill studies

در شکل ۷، محدوده دانه‌بندی حاصل از ارزیابی منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده هیدرولیکی ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، حد چپ این محدوده، بازه‌ای بین ۰/۱ تا ۱۵۰ میکرومتر و حد راست این محدوده، بازه‌ای بین ۱۳۵ تا ۱۲۰۰۰ میکرومتر را دارد. بنابراین، می‌توان بازه‌ای بین ۰/۱ تا ۱۲۰۰۰ میکرومتر را به ترتیب برای ریزترین و درشت‌ترین ابعاد ذرات پرکننده هیدرولیکی استفاده شده تعیین نمود.



شکل ۷. محدوده منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده هیدرولیکی
Fig. 7. The range of particle size distribution curves of hydraulic backfill

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

پارامترهایی نظیر ضریب یکنواختی، ضریب انحنا و قطر میانگین دانه‌ها از نمودارهای دانه‌بندی ترسیم شده، قابل محاسبه است. از آنجایی که این سه مؤلفه رایج‌ترین شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت دانه‌بندی است، لذا با محاسبه آن‌ها می‌توان کیفیت توزیع اندازه ذرات مواد پرکننده را مورد بحث قرار داد. بر اساس استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه، سنگدانه‌های با ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از چهار (Cu >۴) و ضریب انحنا بزرگ‌تر از یک (Cc >۱) در زُمره سنگدانه‌های با دانه‌بندی مناسب برای توده‌های پرکننده قرار می‌گیرند (ضابطه شماره ۲۸۳، ۱۳۹۴). برای تمامی منحنی‌های مواد پرکننده هیدرولیکی ارائه شده در شکل ۶، این مشخصه‌ها محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که در این جدول ارائه شده است، از ۲۵ منحنی دانه‌بندی هیدرولیکی، در ۶۴ درصد موارد پارامتر ضریب یکنواختی دارای مقادیر بزرگ‌تر از چهار و در ۶۸ درصد موارد پارامتر ضریب انحنا دارای مقادیر بزرگ‌تر از یک می‌باشند. در نهایت، با در نظر گرفتن هم‌زمان هر دو پارامتر مطابق با شکل ۸، مشخص است که تنها حدود ۴۴ درصد از پرکننده‌های هیدرولیکی استفاده شده دارای شرایط بهینه از نظر دانه‌بندی سنگدانه بوده‌اند. این امر نشان می‌دهد که در پرکننده‌های هیدرولیکی به موضوع دانه‌بندی بهینه مواد پرکننده کمتر توجه شده است. از دیگر پارامترهای مهم محاسبه شده از منحنی‌های دانه‌بندی، مشخصه میانگین قطر دانه‌ها یا اصطلاحاً D50 است. میانگین قطر دانه‌ها، اندازه ذره در نقطه‌ای از منحنی توزیع دانه‌بندی است که ۵۰ درصد ذرات ریزتر و ۵۰ درصد ذرات درشت‌تر از آن اندازه‌اند (ضابطه شماره ۷۱۰، ۱۳۹۶). با توجه به جدول مذکور، مؤلفه میانگین قطر دانه‌ها برای منحنی‌های پرکننده هیدرولیکی محدوده‌ای از ۲۱/۹۰ تا ۳۰۲۰ میکرومتر دارند. معدل مقادیر کسب شده میانگین قطر دانه‌ها برای این منحنی‌ها نیز ۴۶۲ میکرومتر است.

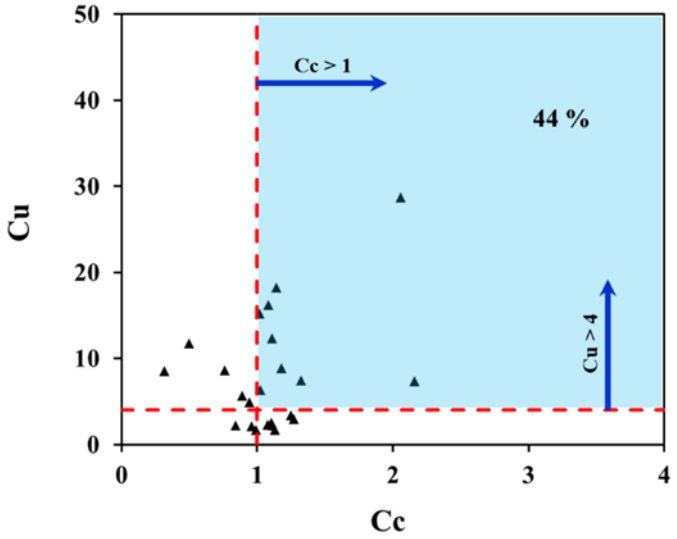
جدول ۱. مؤلفه‌های دانه‌بندی منحنی‌های پرکننده هیدرولیکی

Table 1. Gradation components of hydraulic backfill curves

رفرنس	D50 (µm)	Cc	Cu	عنوان	رفرنس	D50 (µm)	Cc	Cu	عنوان
(Küpper et al., 1992)	462.5	0.84	2.21	HB-14	Dalcé et) (al., 2019	31.4	1.11	12.30	HB-1
(Küpper et al., 1992)	547	0.99	1.73	HB-15	Dalcé et) (al., 2019	212.4	2.16	7.37	HB-2
(Urdanivia et al., 2020)	3020	2.06	28.72	HB-16	Dalcé et) (al., 2019	226	1.25	3.38	HB-3
(Urdanivia et al., 2020	2120	1.15	18.25	HB-17	Dalcé et) (al., 2019	246.5	1.11	2.51	HB-4
(Chen et al., 2003)	255	1.27	3.00	HB-18	Eshun et) (al., 2018	126.1	5.48	15.47	HB-5
(Lian et al., 2019)	211.4	1.12	2.20	HB-19	Dalcé et) (al., 2019	199.2	0.94	4.87	HB-6
Blight and Melentev.,) (1994	58.8	0.96	2.13	HB-20	Liu et al.,) (2017	59.2	1.33	7.46	HB-7
Volnin and Pinalov.,) (1981	137	0.50	11.78	HB-21	Liu et al.,) (2017	121.6	1.18	8.89	HB-8
Volnin and Pinalov.,) (1981	21.9	1.03	6.36	HB-22	Liu et al.,) (2017	292	1.02	15.24	HB-9
(نیک گفتار و همکاران، ۱۳۹۷)	1455	1.09	16.18	HB-23	Cooke,) (2001	40.2	0.77	8.62	HB-10
(نیک گفتار و همکاران، ۱۳۹۷)	491	0.89	5.69	HB-24	Cooke,) (2001	145	4.06	10.39	HB-11
(نیک گفتار و همکاران، ۱۳۹۸)	529	0.32	8.51	HB-25	Pierzyna,) (2017	322.8	1.08	2.28	HB-12
					Küpper et) (al., 1992	218	1.13	1.68	HB-13

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



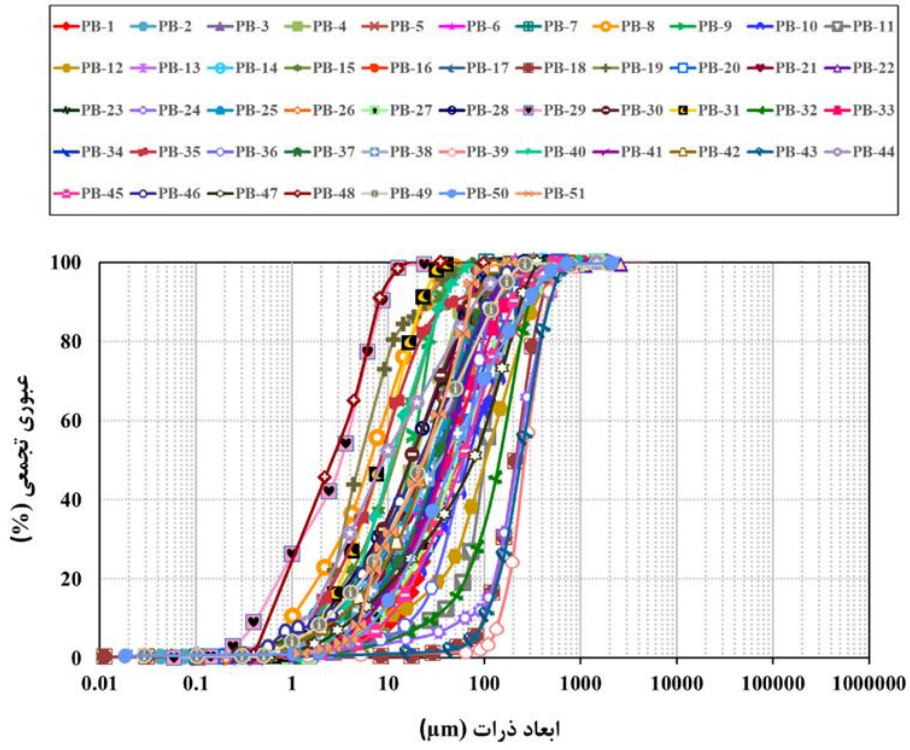
شکل ۸. ارزیابی ضرایب یکنواختی و انحنا پرکننده‌های هیدرولیکی استفاده شده در فعالیت‌های معدنکاری
Fig. 8. Evaluation of coefficients of uniformity and curvature of hydraulic backfill used in mining activities

دانه‌بندی پرکننده خمیری

در شکل ۹، منحنی‌های دانه‌بندی جمع‌آوری شده از مطالعات پرکننده‌های خمیری ارائه شده است. در این بخش برای منحنی‌های خمیری عنوان اختصاری PB[۱۴] در نظر گرفته شده است. طیف ابعاد ذرات در این نوع پرکننده از ۰/۰۱ میکرومتر تا بیش از ۱۰۰۰ میکرومتر است. با نگاهی دقیق‌تر به شکل مذکور، تجمع منحنی‌های این پرکننده از حدود ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر مشهود است. به عبارتی دیگر، غالب اندازه ذرات در حدود ابعاد رس تا ماسه‌های ریز دانه است. به عنوان نمونه، منحنی دانه‌بندی PB-50 که باطله سرب و روی را به عنوان سنگدانه در تهیه پرکننده خمیری مورد استفاده قرار داده است، کمترین مقدار ۰/۰۱ میکرومتر تا بیشترین مقدار حدود ۲۱۰۰ میکرومتر را به خود اختصاص داده است. علاوه بر این، بزرگ‌ترین بازه ترسیم شده در بین منحنی‌های شکل حاضر مربوط به منحنی دانه‌بندی PB-50 است. اگر تجمع اندازه ذرات پرکننده هیدرولیکی و خمیری با یکدیگر مورد مقایسه قرار داده شوند، عمده اندازه ذرات در پرکننده خمیری ریزدانه‌تر از پرکننده هیدرولیکی است. ریزدانه بودن سنگدانه‌ها در ماده پرکننده موجب کاهش تخلخل می‌شود. از طرفی خردایش بیشتر و پودر کردن سنگدانه نیاز به دستگاه‌های خردایش پیشرفته‌تر و چه بسا هیدروسیکلون‌ها دارد که هزینه بیشتری را برای تهیه پرکننده خمیری در پی خواهد داشت.

[14] Paste Backfill (PB)

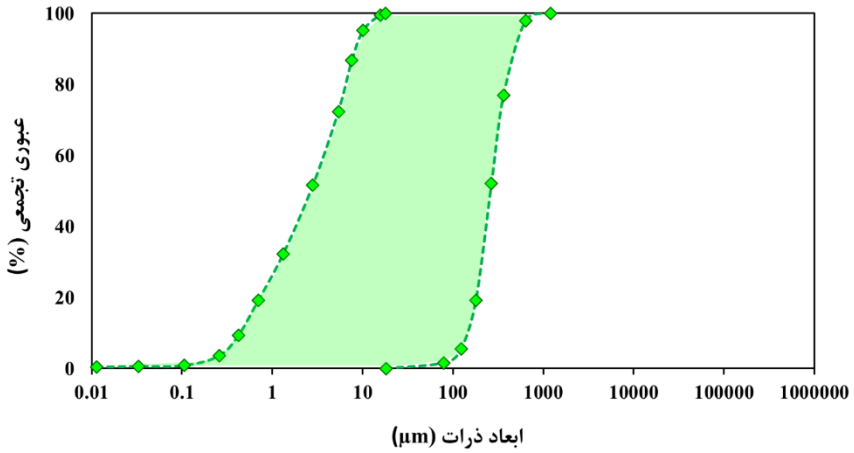
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



شکل ۹. نمودار منحنی‌های دانه‌بندی جمع‌آوری شده از مطالعات پرکننده‌های خمیری

Fig. 9. The graph of particle size distribution curves collected from paste backfill studies

در شکل ۱۰ محدوده حاصل از ارزیابی منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده خمیری ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، ۰/۰۱ تا ۱۲۰۰ میکرومتر به ترتیب به عنوان ریزترین و درشت‌ترین ابعاد ذرات پرکننده خمیری می‌باشد. علاوه بر این، ۰/۰۱ تا ۱۸ میکرومتر به عنوان حد چپ و ۱۸ تا ۱۲۰۰ میکرومتر نیز به عنوان حد راست این محدوده محاسبه شد.



شکل ۱۰. محدوده منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده خمیری

Fig. 10. The range of particle size distribution curves of hydraulic backfill of paste backfill

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

در جدول ۲ پارامترهای دانه‌بندی از قبیل ضریب یکنواختی، ضریب انحنا و میانگین قطر دانه‌ها برای هر یک از نمودارهای دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۹، محاسبه و ارائه شده است. مطابق با محدوده مناسب مطرح شده برای ضرایب انحنا و یکنواختی، از میان ۵۱ منحنی دانه‌بندی پرکننده خمیری تهیه شده در این مطالعه، بیش از ۸۶ درصد از موارد دارای ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از چهار و بیش از ۷۶ درصد از موارد دارای ضریب انحنا بزرگ‌تر از یک می‌باشند که این ارقام حاکی از دانه‌بندی‌های باکیفیت در توده پرکننده خمیری در فعالیت‌های معدنکاری در سال‌های اخیر است. در شکل ۱۱ مقادیر ضرایب یکنواختی و انحنا برای پرکننده‌های خمیری مورد استفاده در معدنکاری زیرزمینی ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، حدود ۶۵ درصد از پرکننده‌های خمیری استفاده شده دارای شرایط مناسب از نظر دانه‌بندی سنگدانه بوده‌اند. این امر نشان دهنده کیفیت بالاتر پرکننده‌های خمیری نسبت به پرکننده‌های هیدرولیکی از نظر نوع دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده است. برای پرکننده خمیری کمترین و بیشترین مقدار میانگین قطر دانه‌ها (D50) به ترتیب ۲/۵ و ۲۵۹/۲۵ میکرومتر به دست آمد. بدیهی است با توجه به ریزدانه بودن ابعاد ذرات سنگدانه پرکننده خمیری بازه مربوط به مؤلفه میانگین قطر دانه‌ها نیز نسبت به پرکننده هیدرولیکی کمتر است.

جدول ۲. مؤلفه‌های دانه‌بندی منحنی‌های پرکننده خمیری

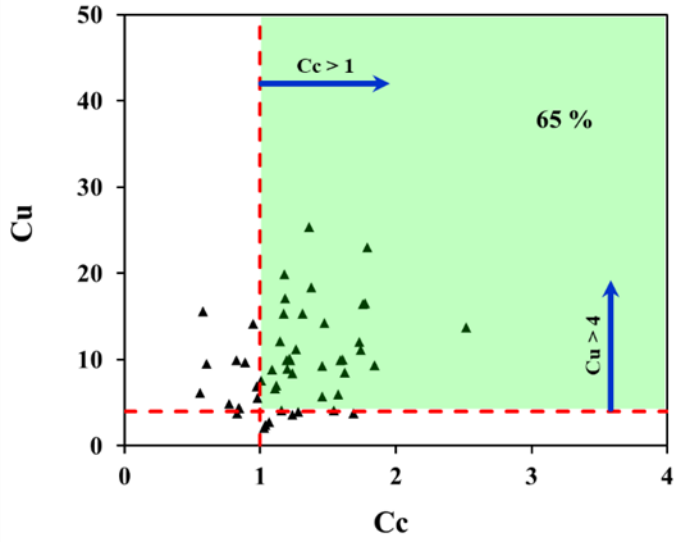
Table 2. Gradation components of paste backfill curves

رفرنس	D50 (µm)	Cc	Cu	عنوان	رفرنس	D50 (µm)	Cc	Cu	عنوان
Vigneaux et al., 2023)	50.4	1.20	9.95	PB-27	(Behera et al., 2020)	38.8	1.16	4.10	PB-1
Vigneaux et al., 2023)	16.8	1.15	12.16	PB-28	Haruna and Fall., (2022)	35.5	1.48	14.22	PB-2
Zhou et al., (2023)	3.2	0.89	9.63	PB-29	(Hu et al., 2023)	24.1	1.61	9.98	PB-3
Yin and Yan, (2023)	16.9	1.27	11.23	PB-30	(Libos et al., 2021)	18.65	1.60	9.97	PB-4
Guo et al., (2023)	8.5	0.98	5.50	PB-31	Nasharuddin et al., (2022)	55.6	1.18	19.91	PB-5
Xiang et al., (2023)	144.88	1.58	5.95	PB-32	(Ruan et al., 2023)	33.9	1.38	18.38	PB-6
Sun et al., (2023)	41.2	1.22	9.95	PB-33	(Ruan et al., 2023)	40.5	1.85	9.33	PB-7
Zhang et al., (2023)	36.3	1.22	10.08	PB-34	(Shi et al., 2022)	6.42	1.09	8.80	PB-8
Zhang et al., (2023)	8.38	1.13	7.00	PB-35	(Shi et al., 2022)	17.2	1.24	3.57	PB-9
Zhang et al., (2023)	60.5	1.28	3.97	PB-36	(Song et al., 2022)	88	1.01	7.60	PB-10
Yue et al., (2023)	33	1.73	12.06	PB-37	(Zhang et al., 2022)	100.1	1.69	3.80	PB-11
Wang et al., (2023)	34.6	0.58	15.55	PB-38	(Zhao et al., 2020)	102.7	2.52	13.74	PB-12
Ruan et al., (2023)	259.25	1.03	2.05	PB-39	(Wang et al., 2022)	35.9	1.11	6.64	PB-13
Wang et al., (2023)	10.73	0.85	4.31	PB-40	(Yan et al., 2022)	27.75	1.32	15.31	PB-14
Guner et al., (2023)	37.4	1.24	8.41	PB-41	(Wang et al., 2021)	11.85	0.98	6.89	PB-15
(Hu et al., 2023)	24.78	1.75	11.14	PB-42	Eker and Bascetin, (2022)	35.8	1.46	5.68	PB-16

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

Al-Bakri et al.,) (2023	239	1.07	2.75	PB-43	(Tuylu, 2022)	28.4	1.19	17.13	PB-17
Al-Bakri et al.,) (2023	8.9	0.61	9.52	PB-44	(Xin et al., 2022)	211.6	1.04	2.46	PB-18
Wu et al.,) (2023	10.76	0.85	4.34	PB-45	(Wang et al., 2022)	5.2	0.83	3.74	PB-19
Wang et al.,) (2022	22	0.95	14.13	PB-46	(Zhou et al., 2019)	44.8	1.76	16.45	PB-20
Jiang et al.,) (2023	76.5	1.36	25.41	PB-47	(Hu et al., 2023)	24.6	1.46	9.29	PB-21
Zhao et al.,) (2023	2.5	0.77	4.87	PB-48	(Sari et al., 2023)	36.45	1.20	8.95	PB-22
(Li et al., 2022)	23.8	1.18	15.36	PB-49	(Zhou and Fall, 2023)	22.4	1.78	16.48	PB-23
Wang et al.,) (2023	52.2	0.83	9.89	PB-50	(Zhu et al., 2023)	217.5	1.55	4.07	PB-24
Liu et al.,) (2020	23.2	0.56	6.16	PB-51	(Wang et al., 2023)	27.7	1.80	23.03	PB-25
					(Feng et al., 2023)	45	1.63	8.46	PB-26



شکل ۱۱. ارزیابی ضرایب یکنواختی و انحنا پرکننده‌های خمیری استفاده شده در فعالیت‌های معدنکاری

Fig. 11. Evaluation of coefficients of uniformity and curvature of paste backfill used in mining activities

دانه‌بندی پرکننده سنگی

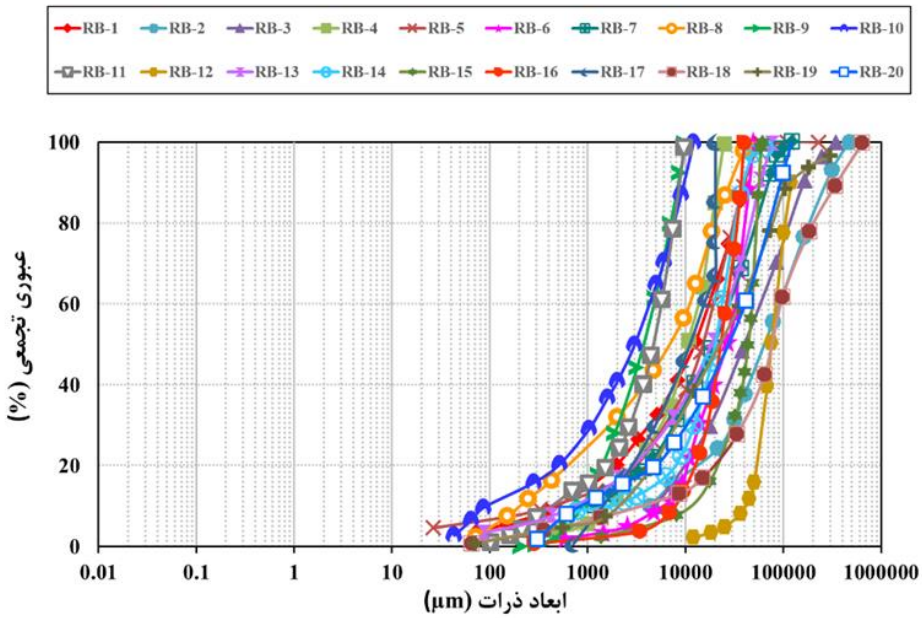
نمودار منحنی‌های دانه‌بندی جمع‌آوری شده از مطالعات مربوط به پرکننده سنگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشابه با دو پرکننده دیگر، برای نمایش منحنی‌های پرکننده سنگی عنوان اختصاری خاصی در نظر گرفته شد که عبارت است از RB[۱۵]. گستره اندازه ذرات در این نوع پرکننده حدوداً از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ میکرومتر است. از منحنی‌های دانه‌بندی به وضوح مشخص است که در پرکننده سنگی از آنجا که جنس سنگدانه، سنگ‌های باطله می‌باشند، اندازه ذرات بزرگ‌تر از سایر

[15] Rock Backfill (RB)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

پرکننده‌ها است و بیشترین تجمع ابعادی را در حدود بازه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ میکرومتر را دارا است. به عنوان نمونه، منحنی دانه‌بندی RB-20 از سنگ‌های باطله رسوبی (کوارتزیت، ارسکارن و شیست) استفاده نموده است و حدود اندازه ذرات آن از ۳۰۰ تا حدود ۱۳۶۰۰۰ میکرومتر ثبت شده است.



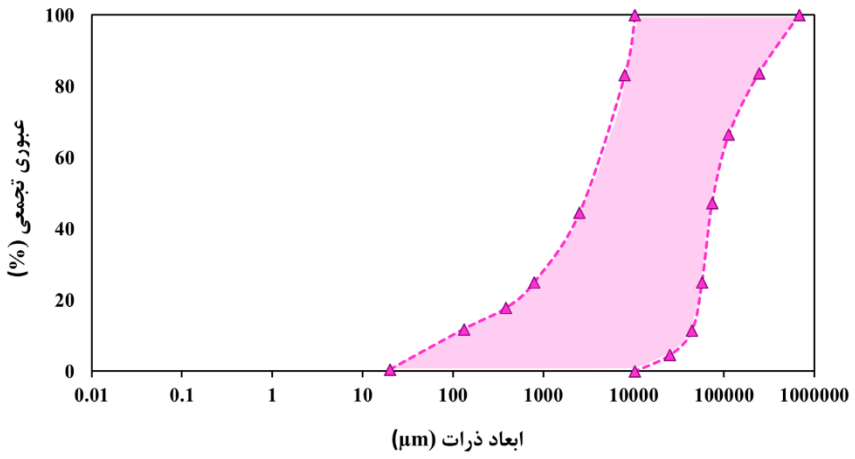
شکل ۱۲. نمودار منحنی‌های دانه‌بندی جمع‌آوری شده از مطالعات پرکننده‌های سنگی

Fig. 12. The graph of particle size distribution curves collected from rock backfill studies

در شکل ۱۳، محدوده حاصل از ارزیابی منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده سنگی ارائه شده است. همانطور که این شکل محدوده دانه‌بندی مواد پرکننده سنگی را نشان می‌دهد، به طور دقیق ابعاد ۲۰ میکرومتر به عنوان ریزدانه‌ترین و ۶۸۰۰۰۰ میکرومتر به عنوان درشت دانه‌ترین ذرات این پرکننده را تشکیل داده است. با مقایسه محدوده دانه‌بندی انواع مواد پرکننده، مشخص است که محدوده پرکننده سنگی، درشت‌ترین و محدوده پرکننده خمیری، ریزترین محدوده ابعادی را در میان این سه نوع پرکننده دارند. از طرف دیگر، محدوده ابعادی پرکننده هیدرولیکی با قرار گرفتن میان این دو محدوده، بازه میانی پرکننده‌های معادن زیرزمینی را دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



شکل ۱۳. محدوده منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده سنگی

Fig. 13. The range of particle size distribution curves of rock backfill

مؤلفه‌های دانه‌بندی ضریب یکنواختی، ضریب انحنا و میانگین قطر دانه‌ها برای هر یک از منحنی‌های دانه‌بندی پرکننده سنگی محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به بازه بهینه ضریب یکنواختی و انحنا در دستورالعمل مواد پرکننده معدنی (ضابطه شماره ۲۸۳، ۱۳۹۴)، در ۹۰ درصد از موارد، پارامتر ضریب یکنواختی و در ۸۰ درصد از موارد، پارامتر ضریب انحنا دارای مقدار بهینه می‌باشند. محدوده میانگین قطر دانه‌ها برای پرکننده سنگی اعدادی از ۳۰۰۰ تا ۷۵۵۰۰ را به خود اختصاص داده‌اند که نسبت به میانگین قطر دانه‌های مربوط به پرکننده خمیری و هیدرولیکی اعداد بسیار بزرگ‌تری می‌باشد.

جدول ۳. مؤلفه‌های دانه‌بندی منحنی‌های پرکننده سنگی

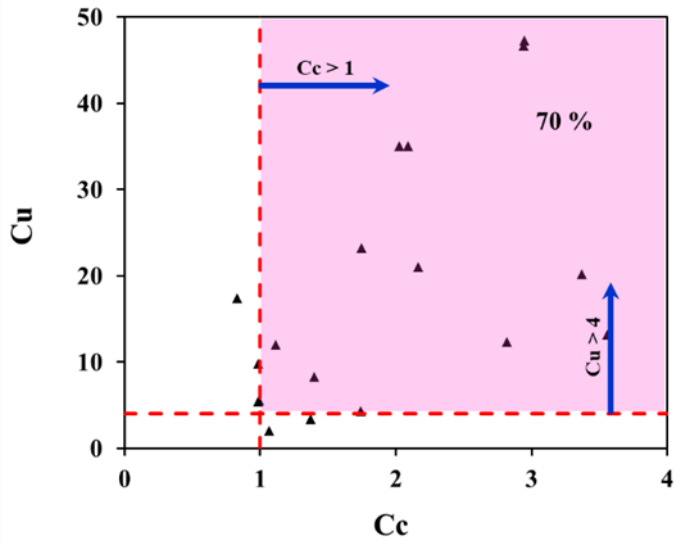
Table 3. Gradation components of rock backfill curves

رفرنس	D50 (µm)	Cc	Cu	عنوان	رفرنس	D50 (µm)	Cc	Cu	عنوان
(Jiang et al., 2019)	4690	2.82	12.37	RB-11	Basanta et al.,) (2008	12400	2.03	35.05	RB-1
(Sainsbury., 2021)	75300	1.07	2.06	RB-12	(Guo et al., 2014)	64000	2.17	21.00	RB-2
Warren et al.,) (2018	18500	2.09	35.03	RB-13	(Guo et al., 2014)	40200	1.12	11.96	RB-3
(Shrestha., 2008)	20100	3.56	13.18	RB-14	(Komurlu,. 2023)	10420	1.40	8.30	RB-4
Lingga and) (Apel., 2018	43700	1.75	4.33	RB-15	(Rafraf et al., 2023)	15100	4.54	41.96	RB-5
Golosinski et) (al.,1997	23000	1.37	3.38	RB-16	Sainsbury and) (Sainsbury,. 2014	26600	0.99	5.58	RB-6
Zhang et al.,) (2019	11100	0.99	9.84	RB-17	(Saw et al., 2011)	19800	1.75	23.25	RB-7
Hustrulid et al.,) (2001	75500	3.38	20.22	RB-18	(Wei et al., 2022)	7050	1.37	54.00	RB-8
Hustrulid et al.,) (2001	23200	0.83	17.38	RB-19	(Wu et al., 2023)	3740	0.99	5.38	RB-9
(Peterson., 1996)	27800	2.95	47.25	RB-20	(Yao et al., 2023)	3000	2.94	46.67	RB-10

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

در شکل ۱۴ مقادیر ضرایب یکنواختی و انحنا برای پرکننده‌های سنگی استفاده شده در فعالیت‌های معدنی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل روشن است، حدود ۷۰ درصد از پرکننده‌های خمیری استفاده شده دارای دانه‌بندی مناسبی برای سنگدانه بوده‌اند. این مقدار نشان می‌دهد که از نظر دانه‌بندی، پرکننده‌های سنگی استفاده شده دارای وضعیت مناسب‌تری بوده‌اند.



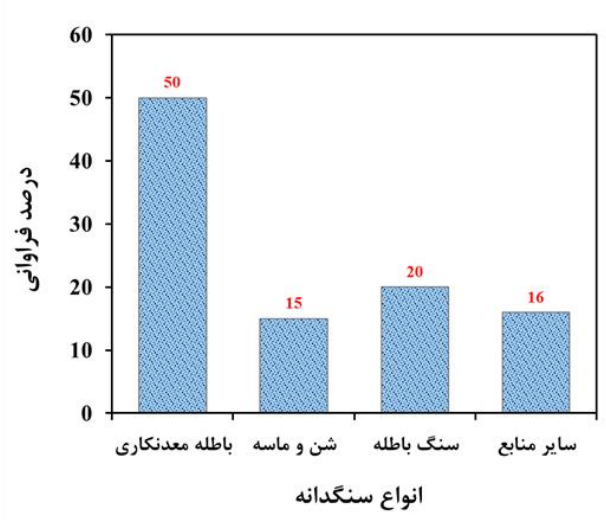
شکل ۱۴. ارزیابی ضرایب یکنواختی و انحنا پرکننده‌های سنگی استفاده شده در فعالیت‌های معدنکاری

Fig. 14. Evaluation of coefficients of uniformity and curvature of rock backfill used in mining activities

منبع تهیه انواع سنگدانه‌های مورد استفاده در مواد پرکننده معدنی، در شکل ۱۵ ارائه داده شده است. باطله‌های معدنکاری که غالباً مصالح اولیه پرکننده خمیری را تشکیل می‌دهند، بیشترین مقدار را دارا می‌باشند. سنگ‌های باطله ناشی از معدنکاری به عنوان منابع اولیه پرکننده سنگی محسوب می‌شود. از طرف دیگر نیز انواع شن و ماسه‌ها، جنس اصلی پرکننده هیدرولیکی را تشکیل داده‌اند و از دیگر انواع سنگدانه‌های بکار گرفته شده در مواد پرکننده محسوب می‌شوند. در مواردی که نوع سنگدانه مورد استفاده در مطالعه قابل تشخیص نبوده یا با موارد فوق الذکر متفاوت بوده نیز به عنوان سایر منابع در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



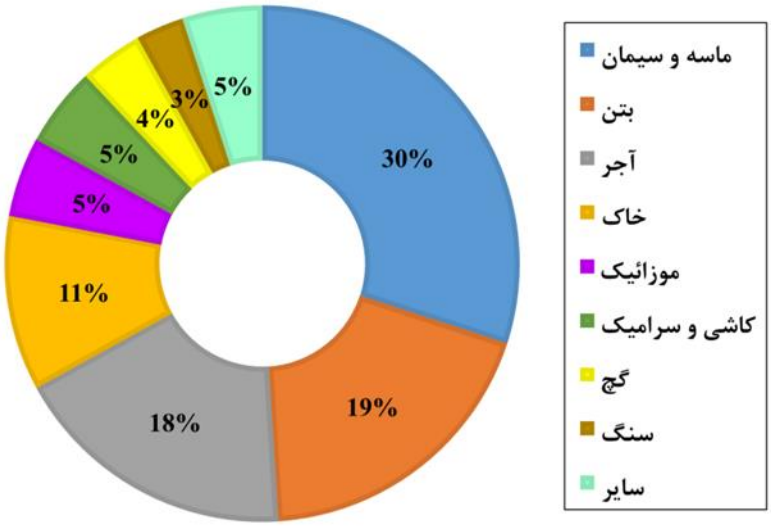
شکل ۱۵. منابع مختلف تهیه سنگدانه مورد استفاده در مواد پرکننده معادن زیرزمینی
Fig. 15. Different sources of aggregate used in underground mine backfill materials

ارزیابی دانه‌بندی نخاله‌های ساختمانی به عنوان یک ماده پرکننده جدید

نخاله‌های ساختمانی از عملیات‌های ساخت و ساز، نوسازی و تخریب مانند عملیات‌های عمرانی، پاک‌سازی محل، ساخت و ساز جاده‌ای، حفاری زمین یا تسطیح و سایر فعالیت‌های تخریبی تولید می‌شوند (Associates, 1998). همچنین سیل‌ها، زلزله‌ها و طوفان‌ها همگی نمونه‌هایی از فجایع زیست محیطی بوده که مقادیر زیادی نخاله ساختمانی به محیط زیست تحمیل می‌کنند (Attia et al., 2021). پُر واضح است که نخاله‌های ساختمانی به یکی از بزرگ‌ترین منابع تولید زباله تبدیل شده است که ۳۰ تا ۴۰ درصد از زباله‌های جامد شهری را در برمی‌گیرد (Huang et al., 2018). در ایران و فقط برای شهر تهران طی ۵ سال، بیش از ۸۰ میلیون مترمکعب نخاله ساختمانی تولید شده است که از این مقدار تنها حدود ۲۶ درصد در کارخانه ریگسازان بازیافت شده است (Asgari et al., 2017). حجم زیادی از پسماندهای ساختمانی بدون رعایت استاندارد خاصی، در مکان‌های دفن زباله ریخته می‌شوند. دفع نادرست نخاله‌ها در زمین موجب بروز مشکلات متعددی از جمله شیوع بیماری‌های خطرناک برای انسان‌ها، اثرات منفی بر روی گیاهان و جانوران، تخریب چشم‌اندازهای شهری، سیل، اشغال زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای و غیره می‌شود که این موارد تنها بخشی از این معضلات یاد شده است (Moretti et al., 2016; Vieira et al., 2016). چگونگی رسیدگی به مشکلات زباله‌های ساختمانی نگرانی‌هایی را از دیدگاه‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی ایجاد کرده است.

با توجه به مشکلات مذکور، بازیافت نخاله‌های ساختمانی یکی از راه‌حل‌های کلیدی برای کنترل این مواد دورریز است. به همین منظور، تحقیقات گسترده‌ای بر روی بازیافت و استفاده مجدد از این پسماندها در فعالیت‌های مهندسی انجام شده است. اخیراً امکان استفاده از نخاله‌های ساختمانی به عنوان سنگدانه در تهیه مواد پرکننده معادن زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مثبتی حاصل شده است. اجزای نخاله ساختمانی مورد استفاده به تفکیک در شکل ۱۶ نشان داده شده است. ماسه و سیمان، بتن و آجر به ترتیب بیشترین حجم نخاله را تشکیل داده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]



شکل ۱۶. اجزای تشکیل دهنده نخاله ساختمانی شهر تهران
Fig. 16 .Components of construction and demolition waste of Tehran

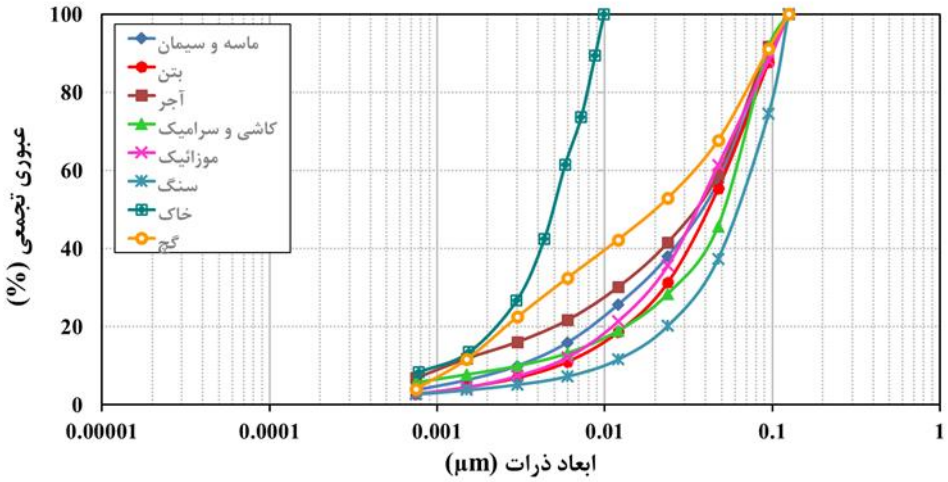
تمام اجزای نخاله ساختمانی جهت انجام عملیات خردایش به آزمایشگاه منتقل و به کمک سنگ‌شکن فکی خرد شدند. شایان ذکر است که به منظور کنترل ابعاد مصالح در حین خردایش، از سرند ۱/۲ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) استفاده شده است؛ به طوری که مصالح باقی‌مانده بر روی این الک، برای رسیدن به ابعاد مناسب مجدداً به درون سنگ‌شکن ریخته شدند. در شکل ۱۷، نمایی از مصالح خرد شده با استفاده از سنگ‌شکن فکی نشان داده شده است.

شکل ۱۷. (الف) سنگ‌شکن فکی مورد استفاده و (ب) سنگدانه‌های حاصل از خردایش نخاله
Fig. 17. (a) The used jaw crusher (b) the aggregates of waste components

پس از اتمام مرحله خردایش، دانه‌بندی هر یک از اجزای نخاله ساختمانی شامل ماسه و سیمان، بتن، آجر، خاک، موزائیک، کاشی و سرامیک، گچ و سنگ انجام شد. برای انجام عملیات دانه‌بندی از روش پیشنهادی در دستورالعمل مربوط به ASTM C136 استفاده شده است (ASTM C136, 2019). مطابق با این روش، از هر کدام از اجزای نخاله فوق الذکر مقدار ۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

کیلوگرم به عنوان نمونه انتخاب و عملیات دانه‌بندی انجام شد. منحنی‌های توزیع اندازه ذرات هر کدام به تفکیک در شکل ۱۸ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، عمده‌ی اندازه ذرات از ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ میکرومتر بوده است.



شکل ۱۸. منحنی‌های دانه‌بندی اجزای نخاله ساختمانی

Fig. 18 .Particle size distribution curves of components of construction and demolition waste

مشخصات دانه‌بندی هر یک از اجزای نخاله ساختمانی به طور مجزا در جدول ۴ ارائه شده است. با استفاده از منحنی دانه‌بندی هر یک از اجزاء، مؤلفه‌های D10، D30، D50 و D60 و ضرایب یکنواختی و انحنا محاسبه شد. مطابق با استاندارد مواد پرکننده در کارگاه‌های استخراج معادن زیرزمینی (ضابطه شماره ۲۸۳، ۱۳۹۴)، دانه‌بندی مناسب برای یک توده پرکننده باید دارای ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از چهار و ضریب انحنا بزرگ‌تر از یک باشد. همانطور که از داده‌های جدول ۴ مشخص است، ضرایب یکنواختی و انحنای هر یک از اجزا سنگدانه تهیه شده از نخاله ساختمانی دارای مقادیر بهینه می‌باشند.

جدول ۴. مشخصات دانه‌بندی سنگدانه‌های اجزای نخاله ساختمانی

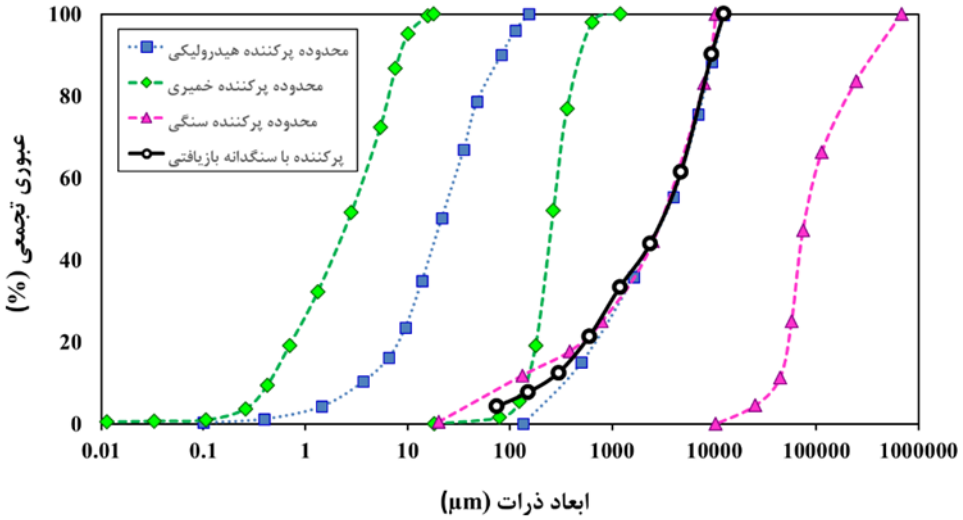
Table 4. The characteristics of aggregates of construction and demolition waste component

ویژگی‌ها	سنگدانه‌های اجزای نخاله ساختمانی							
	ماسه و سیمان	بتن	آجر	خاک	موزائیک	کاشی و سرامیک	گچ	سنگ
D10 (µm)	۴۵۰	۴۶۰	۱۲۰	۱۰۴	۴۶۰	۳۱۰	۱۳۰	۹۷۰
D30 (µm)	۱۵۸۰	۲۲۵۰	۱۱۹۰	۳۳۴	۱۸۵۰	۲۵۱۰	۵۰۰	۳۷۶۰
D50 (µm)	۳۸۰۰	۴۱۰۰	۳۵۰۰	۴۹۹	۳۵۶۰	۵۲۰۰	۲۰۰۰	۶۴۰۰
D60 (µm)	۵۲۰۰	۵۳۸۰	۴۹۰۰	۵۷۱	۴۶۲۰	۶۲۰۰	۳۴۲۰	۷۶۸۰
ضریب یکنواختی (Cu)	۱۱/۵۶	۱۱/۷۰	۴۰/۸۳	۵/۴۹	۱۰/۰۴	۲۰	۲۶/۳۱	۷/۹۲
ضریب دانه‌بندی (Cc)	۱/۰۷	۲/۰۵	۲/۴۱	۱/۸۸	۱/۶۱	۳/۲۸	۰/۵۶	۱/۹۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

با ترکیب سنگدانه‌های مختلف تهیه شده از اجزا مختلف نخاله، سنگدانه نهایی برای تهیه مواد پرکننده حاصل شده است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه حاصل به همراه محدوده دانه‌بندی هر یک از پرکننده‌های هیدرولیکی، خمیری و سنگی در شکل ۱۹ ارائه شده است. محدوده دانه‌بندی پرکننده‌های سنگی، هیدرولیکی و خمیری به ترتیب درشت دانه‌ترین تا ریزدانه‌ترین ابعاد را در پرکننده‌ها دارند. همانطور که در این شکل مشخص است، ابعاد سنگدانه بازیافتی در محدوده حد راست پرکننده هیدرولیکی و حد چپ پرکننده سنگی قرار گرفته است. با توجه به سایر مشخصات پرکننده حاصل از نخاله ساختمانی، این نوع ماده پرکننده را می‌توان در طبقه پرکننده سنگی قرار داد.



شکل ۱۹. منحنی دانه‌بندی سنگدانه بازیافتی به همراه محدوده‌های منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه‌های انواع مواد پرکننده مرسوم

Fig. 19. The partical size distribution curve of recycled aggregate with the partical size distribution curve ranges of various conventional backfill aggregates

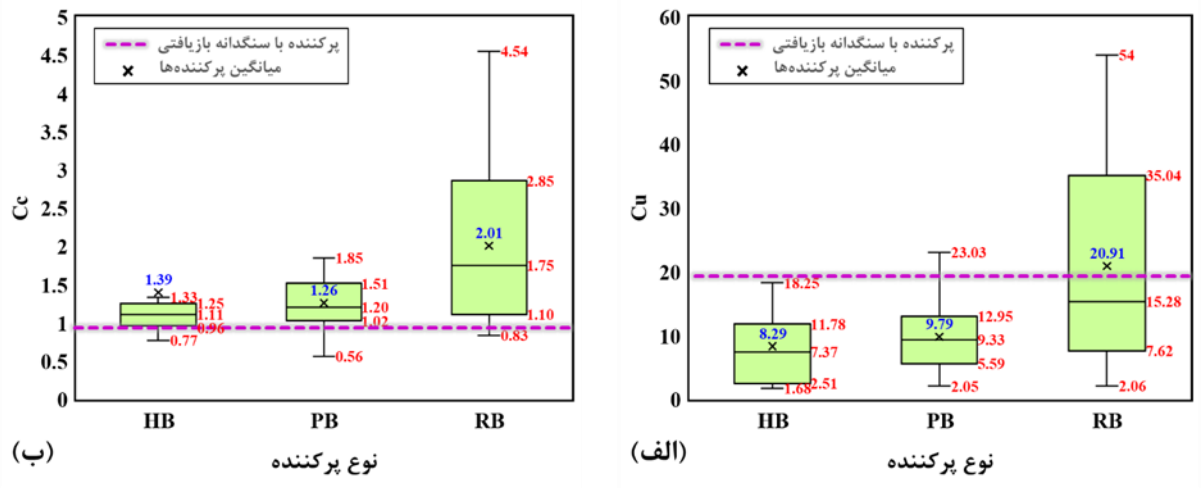
پس از بررسی منحنی دانه‌بندی سنگدانه بازیافتی با استفاده از محدوده‌های به دست آمده از سه پرکننده موجود، ارزیابی سایر مؤلفه‌های این سنگدانه مد نظر قرار گرفت. همانطور که پیش از این اشاره شد، از جمله مهم‌ترین مؤلفه‌های کاربردی و تأثیرگذار در دانه‌بندی می‌توان به ضرایب انحنا و یکنواختی اشاره نمود. از این رو، تحلیل و بررسی هر چه بهتر این مؤلفه‌ها با استفاده از روش‌ها و نمودارهای مناسب لازم و ضروری است. در همین راستا و به منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج حاصل شده، از نمودارهای جعبه‌ای[16] به منظور بررسی پراکندگی نتایج بهره گرفته شد. در شکل ۲۰، نمودارهای جعبه‌ای مربوط به ضرایب انحنا و یکنواختی سه پرکننده موجود به همراه سنگدانه بازیافتی ارائه شده است. همانطور که در بخش (الف) این شکل مشخص است، نمودار جعبه‌ای مربوط به ضریب یکنواختی برای هر سه پرکننده مذکور به همراه میانگین ضریب یکنواختی مربوط به سنگدانه بازیافتی نشان داده شده است. با بررسی اولیه این نمودار می‌توان دریافت که مقادیر میانگین برای سه پرکننده هیدرولیکی، خمیری و سنگی به ترتیب روندی صعودی را از خود به نمایش گذاشته است؛ به طوری که میانگین

[16] Box plot

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

ضریب یکنواختی پرکننده‌های خمیری و سنگی به ترتیب ۱۸ و ۱۵۲ درصد نسبت به میانگین ضریب یکنواختی پرکننده هیدرولیکی بیشتر می‌باشند. به بیان دیگر، میانگین ضریب یکنواختی در پرکننده‌های خمیری و هیدرولیکی نزدیک به یکدیگر و در پرکننده سنگی بسیار بیشتر از دو پرکننده دیگر است. از طرف دیگر، ضریب یکنواختی مربوط به سنگدانه بازیافتی بسیار نزدیک به میانگین ضریب یکنواختی پرکننده سنگی است؛ به طوری که اختلاف ضریب یکنواختی سنگدانه بازیافتی نسبت به پرکننده سنگی کمتر از ۸ درصد است. این در حالی است که مقدار ضریب یکنواختی سنگدانه بازیافتی نسبت به دو پرکننده دیگر بیش از دو برابر است.

در شکل ۲۰ بخش (ب) نمودار جعبه‌ای مربوط به ضریب انحنا برای هر سه پرکننده مذکور همراه با ضریب انحنا سنگدانه بازیافتی نمایش داده شده است. در این بخش نیز میانگین‌های حاصل شده ضریب انحنا برای سنگدانه پرکننده خمیری و هیدرولیکی نزدیک به یکدیگر و به ترتیب دارای مقادیر ۱/۲۶ و ۱/۳۹ بوده‌اند. میانگین ضریب انحنای سنگدانه پرکننده سنگی دارای مقدار بیشتری نسبت به دو پرکننده دیگر بوده؛ به طوری که نسبت به پرکننده هیدرولیکی حدود ۴۵ درصد و نسبت به پرکننده خمیری حدود ۶۰ درصد بیشتر است. از آنجا که برای ساخت پرکننده سنگی، سنگ‌های باطله مختلف با اندازه‌های متفاوت استفاده می‌شود، این اختلاف چشمگیر را می‌توان به نوع سنگدانه پرکننده سنگی مرتبط دانست. از طرفی، با نگاهی کلی به شکل مزبور می‌توان دریافت که مقدار ضریب انحنا برای سنگدانه بازیافتی نسبت به سایر پرکننده‌ها دارای مقدار کمتری است. به عبارتی دیگر ضریب انحنای سنگدانه بازیافتی نسبت به سنگدانه سه پرکننده هیدرولیکی، خمیری و سنگی به ترتیب حدود ۳۴، ۲۷ و ۵۴ درصد کمتر است.



شکل ۲۰. نمودار جعبه‌ای مربوط به (الف) ضریب یکنواختی و (ب) ضریب انحنای پرکننده‌های هیدرولیکی، خمیری و سنگی به همراه پرکننده حاصل از سنگدانه بازیافتی

Fig. 20. Box plot related to (a) uniformity coefficient and (b) curvature coefficient of hydraulic, paste and rock backfill along with the backfill obtained from recycled aggregate

همانطور که پیش از این ذکر شد، پارامتر میانگین قطر دانه‌ها (D50) به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم در ارزیابی دانه‌بندی سنگدانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق با روش نمودار جعبه‌ای در جدول ۵، مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین هر یک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

از پارامترهای D10، D30، D50 و D60 برای پرکننده‌های هیدرولیکی، خمیری و سنگی به همراه پرکننده بازیافتی حاصل از نخاله ساختمانی ارائه شده است. همانطور که در جدول مذکور مشخص است، میانگین قطر دانه‌ها برای سه پرکننده هیدرولیکی، خمیری و سنگی به ترتیب مقادیری برابر با ۴۶۱/۹۶، ۵۰/۶۳ و ۲۶۲۶۰ میکرومتر دارند. بنابراین ابعاد سنگدانه‌های پرکننده خمیری نسبت به سنگدانه‌های پرکننده هیدرولیکی و سنگی ریزدانه‌تر است؛ به گونه‌ای که ابعاد سنگدانه‌ها در پرکننده‌های سنگی و هیدرولیکی نسبت به پرکننده خمیری به ترتیب حدود ۵۱۸ و ۹ برابر می‌باشند. همچنین، اندازه ذرات پرکننده سنگی نسبت به پرکننده هیدرولیکی حدود ۵۶ برابر می‌باشد. از طرف دیگر، مقدار میانگین قطر دانه‌های سنگدانه بازیافتی حاصل از نخاله‌های ساختمانی در حد واسط بین میانگین قطر دانه‌های سنگدانه‌های پرکننده هیدرولیکی و سنگی قرار دارد. سایر مشخصات آماری نیز در جدول ۵ محاسبه و ارائه شده است.

جدول ۵. مشخصات ابعادی سنگدانه‌های انواع مواد پرکننده

Table 5. Dimensional characteristics of various backfill material aggregates

نوع پرکننده	مشخصه	D10 (µm)	D30 (µm)	D50 (µm)	D60 (µm)
هیدرولیکی	میانگین	۸۸/۴۰	۲۲۶/۳۶	۴۶۱/۹۶	۶۴۰/۷۸
	حداکثر	۲۴۶/۲۰	۵۰۳	۵۴۷	۱۰۵۵
	حداقل	۳/۶۸	۱۱/۵	۲۱/۹	۲۸/۶۰
	چارک اول[17]	۱۷/۵	۷۷	۱۲۶/۱	۱۵۵/۵
	چارک سوم[18]	۱۲۴	۲۴۷/۶	۴۶۲/۵	۵۴۳
	میانه[19]	۸۰	۱۶۴/۵	۲۱۸	۲۷۰
	دامنه میان چارکی[20]	۱۰۶/۵	۱۷۰/۶	۳۳۶/۴	۳۸۷/۵
خمیری	میانگین	۱۳/۱۲	۳۰/۴۱	۵۰/۶۳	۶۴/۳۱
	حداکثر	۱۱/۹۵	۴۱/۷۸	۸۸	۱۱۴/۷۰
	حداقل	۰/۴۴	۱/۲۸	۲/۵۰	۳/۶۹
	چارک اول	۲/۲۹	۹/۰۲	۱۷/۹۳	۲۷/۴
	چارک سوم	۷/۱۹	۲۳/۸۵	۴۷/۷	۶۸/۰۵
	میانه	۳/۷۳	۱۲/۷۵	۳۳/۹	۴۵
	دامنه میان چارکی	۴/۹	۱۴/۸۳	۲۹/۷۷	۴۰/۶۵
سنگی	میانگین	۴۶۰۷/۵۵	۱۴۰۲۹/۲۵	۲۶۲۶۰	۳۴۰۹۶
	حداکثر	۷۷۵۰	۳۰۲۵۰	۴۳۷۰۰	۵۸۶۰۰
	حداقل	۹۳	۱۰۹۰	۳۰۰۰	۴۳۴۰
	چارک اول	۷۰۰	۴۷۲۵	۱۰۹۳۰	۱۴۹۶۲/۵
	چارک سوم	۴۶۷۵	۱۷۰۰۰	۳۰۹۰۰	۴۲۲۰۰
	میانه	۱۶۰۵	۷۸۲۵	۱۹۹۵۰	۲۶۵۰۰
	دامنه میان چارکی	۳۹۷۵	۱۲۲۷۵	۱۹۹۷۰	۲۷۲۳۷/۵
سنگدانه بازیافتی حاصل از نخاله ساختمانی		۲۳۵/۷	۹۹۱	۳۱۱۵	۴۵۳۰

[17] First quartile
[18] Third quartile
[19] Median
[20] Interquartile range (IQR)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

نتیجه‌گیری

اندازه دانه‌ها و نحوه توزیع ابعادی آن‌ها از عوامل مهم و مؤثر در مشخصات نهایی مواد پرکننده مورد استفاده در فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی است. نبود اطلاعات کافی در مورد مشخصات دانه‌بندی بهینه برای تهیه انواع مواد پرکننده فضاهای زیرزمینی معدنی از چالش‌های موجود در تهیه و بکارگیری این مواد در معادن می‌باشد. در مطالعه حاضر، مرور جامعی بر مشخصات دانه‌بندی انواع مواد پرکننده مورد استفاده در معادن زیرزمینی انجام شده است. در این راستا، ابتدا منابع موجود در زمینه مطالعه انواع مواد پرکننده معدنی شامل پرکننده‌های هیدرولیکی، خمیری و سنگی جمع‌آوری شد. سپس بر اساس داده‌های ارائه شده در منابع، برای هر یک از انواع مواد پرکننده، مشخصات مربوط به دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده تهیه شد. از جمله مهم‌ترین اهداف مطالعه حاضر، تعیین محدوده دانه‌بندی مورد استفاده برای هر یک از مواد پرکننده و همچنین محاسبه مشخصات دانه‌بندی از جمله میانگین قطر دانه‌ها، ضریب یکنواختی و ضریب انحنا (Cu، Cc و D50) بوده است. نتایج حاصل از ترسیم و بررسی منحنی‌های دانه‌بندی سه پرکننده خمیری، هیدرولیکی و سنگی نشان داد که محدوده ابعادی هر پرکننده به ترتیب برابر با ۱۲۰۰-۰/۰۱، ۱۲۰۰۰-۰/۱ و ۶۸۰۰۰۰-۲۰ میکرومتر است. در این میان، پرکننده سنگی و خمیری به ترتیب درشت‌ترین و ریزترین محدوده‌های ابعادی را از خود ثبت نموده‌اند و پرکننده هیدرولیکی نیز در بازه میانی این دو پرکننده جای گرفته است؛ به طوری که حد راست پرکننده هیدرولیکی با حد چپ پرکننده سنگی به طور کاملاً مناسبی انطباق دارند. نتایج بررسی و ترسیم هم‌زمان پرکننده حاصل از سنگدانه بازیافتی با سایر پرکننده‌ها حاکی از قرارگیری این دانه‌بندی در محدوده مرزی پرکننده هیدرولیکی و سنگی است. بررسی هم‌زمان دو مؤلفه ضرایب یکنواختی و انحنا برای سه پرکننده هیدرولیکی، خمیری و سنگی نشان داد که به ترتیب ۴۴، ۶۵ و ۷۰ درصد از این دو مؤلفه‌ها، مطابق با استاندارد مربوطه در بازه مجاز قرار دارند. در واقع، پرکننده هیدرولیکی، نامناسب‌ترین و پرکننده سنگی، مناسب‌ترین دقت در دانه‌بندی را از خود ثبت نموده‌اند. همچنین قطر میانگین دانه‌ها (D50) طبق روش ارزیابی پراکندگی نمودار جعبه‌ای برای پرکننده‌های سنگی، هیدرولیکی و خمیری به ترتیب در محدوده ۴۳۷۰۰-۳۰۰۰، ۵۴۷-۲۱/۹ و ۸۸-۲/۵ میکرومتر قرار دارند.

قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور ((Iran National Science Foundation (INSF) با کد طرح به شماره ۹۹۰۱۶۶۹۴ و در دانشگاه صنعتی اراک انجام شده است. بدین‌وسیله مؤلفین مقاله از حمایت‌های صورت گرفته قدردانی می‌نمایند.

منابع

خندانی، ف.. ۱۴۰۱. امکان‌سنجی استفاده از نخاله‌های ساختمانی به عنوان مواد پرکننده در معدنکاری زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی اراک، ۹۱ ص.

خندانی، ف.، عطاپور، ه.، یوسفی‌راد، م.، خوش، ب.، الف۱۴۰۲. بررسی مشخصات دانه‌بندی مواد پرکننده سنگی در فعالیت‌های معدنکاری زیرزمینی. چهارمین کنفرانس ملی داده کاوی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

خندانی، ف.، عطاپور، ه.، یوسفی‌راد، م.، خوش، ب.، ب۱۴۰۲. مطالعه ویژگی‌های سنگدانه پرکننده هیدرولیکی کارگاه‌های استخراج. چهارمین کنفرانس ملی داده کاوی علوم زمین, دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

ضابطه شماره ۲۸۳، ۱۳۹۴. دستور العمل پرکردن کارگاه‌های استخراج معادن زیرزمینی. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۱۳ ص.
ضابطه شماره ۷۱۰، ۱۳۹۶. دستورالعمل دانه‌بندی مواد معدنی. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۰۸ ص.
عزتی، م.. ۱۳۹۷. امکان سنجی استفاده از باطله معدن روباز جهت پرکردن فضای زیر زمینی معدن انگوران با تأکید بر مشخصات مکانیکی مواد پرکننده. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه زنجان، ۱۳۳ص.
عطایی، م.، ۱۳۸۴. معدنکاری زیرزمینی جلد دوم. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۳۵۹ ص.
قاسمیه، م.. ۱۳۹۸. بررسی تأثیر مدول نرمی مصالح سنگی بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی موسسه آموزش عالی زند شیراز، ۹۸ ص.
نیک گفتار، م.، عطایی، م.، کاکایی، رضا.، رضوانیان‌زاده، م.، ۱۳۹۷. ارائه طرح اختلاط مناسب پرکننده بتنی هیدرولیکی در پرکردن معادن اورانیوم. تحقیقات بتن، ۱۱(۳): ۱۲۱–۳۲.
نیک گفتار، م.، عطایی، م.، خالوکاکایی، رضا.، رضوانیان‌زاده، م.، ۱۳۹۹. استفاده از باطله‌های استخراج شده و آب‌های زهکشی شده معادن اورانیم در پرکردن معدن زیرزمینی اورانیم ساغند با نگرش کاهش آلودگی‌های زیست محیطی. مجله علوم و فنون هسته‌ای، ۴۱ (۲): ۱۷۸-۱۸۸.
هارتمن، ه.، ۱۳۸۵. اصول مهندسی معدن، چاپ دوم، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران، ۶۹۲ ص.
Al-Bakri, A., Haitham, A., and Mohammed, H., 2023. Eco-Sustainable Recycling of Cement Kiln Dust (CKD) and Copper Tailings (CT) in the Cemented Paste Backfill. Sustainability, 15(4), 3229.
Arioglu, E., 1983. Engineering Properties of Cemented Aggregate Fill for Uludag Tungsten Mine of Turkey. In Proceedings of the International Symposium on Mining with Backfill in Lulea University of Technology. Lulea. Sweden.
Arioglu, E., 1984. Design Aspects of Cemented Aggregate Fill Mixes for Tungsten Stoping Operations. Mining Science and Technology, 1(3), 14–209.
Asgari, A., Ghorbanian, T., Yousefi, N., Dadashzadeh, D., Khalili, F., Bagheri, A., Mahvi , A., 2017.Quality and Quantity of Construction and Demolition Waste in Tehran. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 15(1), 1–8.
Associates, F., Village, P., 1998. Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response.
ASTM. 2019.ASTM International. C136/C136M-19 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA.
Attia, T., Nehal, E., Amr, H., Mohamed, E., 2021. Quantifying Construction and Demolition Waste Using Slam-Based Mobile Mapping System: A Case Study from Kafr El Sheikh, Egypt. In 2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI), IEEE, 63–459.
Behera, S K., Ghosh, C N., Mishra, K., Mishra, V P., Singh, P., Mandal, P K., Buragohain, J., Sethi, M K., 2020. Utilisation of Lead–Zinc Mill Tailings and Slag as Paste Backfill Materials. Environmental Earth Sciences, 79 (389), 1–18.
Behera, S K., Mishra, D P., Singh, Prashant., Mishra, K., Mandal, S K., Ghosh, C N., Kumar, R., Mandal, P K., 2021. Utilization of Mill Tailings, Fly Ash and Slag as Mine Paste Backfill Material: Review and Future Perspective. Construction and Building Materials, 309, 120-125.
Béket Dalcé, J., Li, L., Yang, P., 2019. Experimental Study of Uniaxial Compressive Strength (UCS) Distribution of Hydraulic Backfill Associated with Segregation. Minerals, 9(3), 147.
Blight, G E., MELENTEV., 1994. The Master Profile for Hydraulic Fill Tailings Beaches. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 107(1), 27–40.
Börgesson, L., Johannesson, L E., Gunnarsson, D., 2003. Influence of Soil Structure Heterogeneities on the

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

Behaviour of Backfill Materials Based on Mixtures of Bentonite and Crushed Rock. Applied clay science, 23(1–4), 31–121.

Bosiljkov, V., 2003. SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler. Cement and Concrete Research, 33(9), 86–1279.

Chen, J., Lin, C., Lee, W., 2003. Cemented Behavior of Hydraulic Fill Material. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference in Ottawa. ISOPE, ISOPE-I, Canada.

Cooke, R., 2001.Design Procedure for Hydraulic Backfill Distribution Systems. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 101(2), 97–102.

Cui, L., Fall, M., 2017 .Multiphysics Model for Consolidation Behavior of Cemented Paste Backfill. International Journal of Geomechanics, 17(3), 4016077.

Dalcé, J B., Li, L., Yang, P., 2019. Effect of Segregation on the Geotechnical Properties of a Hydraulic Backfill. In Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers Reston. VA, 76–269, USA.

Dong, H., Nuraini A., Shafri, H., Kamarul, A., 2023. Computational Fluid Dynamics Study on Cemented Paste Backfill Slurry. Construction and Building Materials, 369, 130558.

Eker, Hasan, and Atac Bascetin. 2022. “Influence of Silica Fume on Mechanical Property of Cemented Paste Backfill.” Construction and Building Materials 317: 126089.

Ercikdi, B., Baki, H., İzki, M., 2013. Effect of Desliming of Sulphide-Rich Mill Tailings on the Long-Term Strength of Cemented Paste Backfill. Journal of environmental management, 115, 5–13.

Eshun, S., Gidigasu, S., Gawu, S., 2018. The Effect of Clay Pozzolana-Cement-Composite on the Strength Development of a Hydraulic Backfill. Ghana Mining Journal, 18(1), 32–38.

Fall, M., Benzaazoua, M., Ouellet, S., 2005. Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on the Quality of Cemented Paste Backfill. Minerals engineering, 18(1), 41–44.

Feng, Y., Qi, W., Zhao, Q., Huang, Y., Ren, Q., Qi, W., Kong, F., 2023. Synthesis and Characterization of Cemented Paste Backfill: Reuse of Multiple Solid Wastes. Journal of Cleaner Production, 383, 135376.

Gautam, B P., Panesar, D K., Sheikh, S A., F J, Vecchio., 2017. Effect of Coarse Aggregate Grading on the ASR Expansion and Damage of Concrete. Cement and Concrete Research, 95, 75–83.

Golosinski, T S., Wang, C., Ganeswaran, R., 1997. Investigations on the Composition and Properties of Cemented Rock Fill. Mineral Resources Engineering, 6(04), 27–221.

Greberg, J., Abubakary, S., 2020. Analysis of the Current Challenges for Deep Underground Mines: Labour Productivity Improvement. Tanzania Journal of Engineering and Technology, 39(1).

Guner, N U., Yilmaz, E., Sari, M., Kasap. T., 2023. Cementitious Backfill with Partial Replacement of Cu-Rich Mine Tailings by Sand: Rheological, Mechanical and Microstructural Properties. Minerals, 13(3), 437.

Guo, L., Yang, X., Xie, L., 2014. An Experimental Study on the Mechanical Properties of Cemented Rock-Tailings Fill. Advanced Materials Research, 941, 19–2611.

Guo, Zh., Qiu, J., Jiang, H., Zhu, Q., Wang Kwek, J., Ke, L., Qu, Zh., 2023. Experimental and Modeling Study on the Transient Flow and Time-Dependent Yield Stress of Superfine-Tailings Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 367, 130363.

Hane, I., Belem, T., Benzaazoua, M., Maqsoud, A., 2017. Laboratory Characterization of Cemented Tailings Paste Containing Crushed Waste Rocks for Improved Compressive Strength Development. Geotechnical and Geological Engineering, 35, 62–645.

Haruna, S., Fall, M., 2022. Reactivity of Cemented Paste Backfill Containing Polycarboxylate-Based Superplasticizer. Minerals Engineering, 188, 107856.

Hu, Y., Yin, Sh., Li, K., Han, B., Zhang, B., 2023. Formation Mechanism and Thermal Decomposition Properties of Hydration Products of Superfine Tailings Cemented Paste Backfill. Arabian Journal of Chemistry, 16(8), 104977.

Hu, Y., Li, K., Zhang, B., Han, B., 2023a. Development of Cemented Paste Backfill with Superfine Tailings:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

Fluidity, Mechanical Properties, and Microstructure Characteristics. Materials, 16(5), 1951.

Hu, Y., Li, K., Zhang, B., Han, B., 2023b. Effects of Mixing Time and Nano Silica on Some Properties of Superfine-Tailings Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 378, 131188.

Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y., Bleischwitz, R., Ren, J., 2018. Construction and Demolition Waste Management in China through the 3R Principle. Resources, Conservation and Recycling, 129, 36–44.

Hughes, P., 2014. Design Guidelines: Underhand Cut and Fill Cemented Paste Backfill Sill Beams.Ph.D. thesis, Univ of British Columbia, Vancouver, 369p.

Hustrulid, W A., Richard L B., 2001. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. SME, Colorado, 718p.

Ibishi, G., 2019. Stability Assessment of Post Pillars in Cut-and-Fill Stoping Method at Trepça Underground Mine.Ph.D. thesis, Univ of Eskisehir, Turkey, 215p.

Jiang, H., Ren, L., Gu, X., Zheng, J., Cui, L., 2023. Synergistic Effect of Activator Nature and Curing Temperature on Time-Dependent Rheological Behavior of Cemented Paste Backfill Containing Alkali-Activated Slag. Environmental Science and Pollution Research, 30(5), 12857–12871.

Jiang, H., Fall, M., Li, Y., Han, J., 2019. An Experimental Study on Compressive Behaviour of Cemented Rockfill. Construction and Building Materials, 213, 10–19.

Ke, X., Hou, H., Zhou, M., Wang, Y., Zhou, X., 2015. Effect of Particle Gradation on Properties of Fresh and Hardened Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 96, 82–378.

Ke, X., Zhou, X., Wang, X., Wang, T., Hou, H., Zhou, M., 2016. Effect of Tailings Fineness on the Pore Structure Development of Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 126, 50–345.

Kesimal, A., Ercikdi, B., Yilmaz, E., 2003. The Effect of Desliming by Sedimentation on Paste Backfill Performance. Minerals Engineering, 16(10), 11–1009.

Khandani, F S., Atapour, H., Yousefi Rad, M., Khosh, B., 2023. An Experimental Study on the Mechanical Properties of Underground Mining Backfill Materials Obtained from Recycling of Construction and Demolition Waste. Case Studies in Construction Materials, 18, e02046.

Komurlu, E., 2023. Use of Microgrid Fibre as a New Reinforcement Additive to Improve Compressive and Tensile Strength Values of Cemented Rock Fill Mixes. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1–9.

Küpper, A A G., Morgenstern, N R., Sego, D C., 1992. Laboratory Tests to Study Hydraulic Fill. Canadian Geotechnical Journal, 29(3), 17–405.

Lamontagne, A., Pigeon, M., 1995. The Influence of Polypropylene Fibers and Aggregate Grading on the Properties of Dry-Mix Shotcrete. Cement and concrete research, 25(2), 293–293.

Li, L., 2014. Generalized Solution for Mining Backfill Design. International Journal of Geomechanics 14(3), 4014006.

Li, Z., Yu, B., Guo, L., Xu, W., Zhao, Y., Peng, X., 2022. Numerical Study of the Layered Blasting Effect on a Cemented Backfill Stope. Metals, 13(1), 33.

Lian, J., Xu, H., He, X., Yan, Y., Fu, D., Yan, Sh., Qi, H., 2019. Biogrouting of Hydraulic Fill Fine Sands for Reclamation Projects. Marine Georesources & Geotechnology, 37(2), 22–212.

Libos, I., Loan, S., Liang, C., Xinrong L., 2021. Effect of Curing Temperature on Time-Dependent Shear Behavior and Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 311, 125302.

Lingga, B A., Derek B A., 2018. Shear Properties of Cemented Rockfills. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10(4), 44–635.

Liu, G., Li, L., Yao, M., Landry, D., Malek, F., Yang, X., Guo, L., 2017. An Investigation of the Uniaxial Compressive Strength of a Cemented Hydraulic Backfill Made of Alluvial Sand. Minerals, 7(1), 4.

Liu, L., Xin, J., Huan, Ch., Qi, Ch., Zhou, W., Song, K., 2020. Pore and Strength Characteristics of Cemented Paste Backfill Using Sulphide Tailings: Effect of Sulphur Content. Construction and Building Materials,

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

237, 117452.

Liu, R., Yujing, J., Bo, L., Liyuan, Y., 2016. Estimating Permeability of Porous Media Based on Modified Hagen–Poiseuille Flow in Tortuous Capillaries with Variable Lengths. Microfluidics and Nanofluidics, 20, 1–13.

Liu, R., Bo, L., Yujing, J., 2016. Critical Hydraulic Gradient for Nonlinear Flow through Rock Fracture Networks: The Roles of Aperture, Surface Roughness, and Number of Intersections. Advances in Water Resources, 88, 53–65.

Moretti, J P., Sales, A., Almeida, F C R., Rezende, M A M., Gromboni, P P., 2016. Joint Use of Construction Waste (CW) and Sugarcane Bagasse Ash Sand (SBAS) in Concrete. Construction and Building Materials, 113, 23–317.

Nasharuddin, R., Luo, G., Robinson, N., Fourie, A., Johns, M., Fridjonsson, E., 2022. Cemented Paste Backfill Compressive Strength Enhancement via Systematic Water Chemistry Optimisation. Construction and Building Materials, 347, 128499.

Orejarena, L., Fall, M., 2010. The Use of Artificial Neural Networks to Predict the Effect of Sulphate Attack on the Strength of Cemented Paste Backfill. Bulletin of engineering geology and the environment, 69, 70–659.

Peterson, S M., 1996. Cemented Rockfill Optimization in Vertical Block Mining. MS.C. thesis, univ of Alberta, Canada, 232p.

Pierzyna, P., 2017. Disposal of Coal Combustion Wastes in the Hydraulic Backfill Process. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 12011.

Portocarrero-Urdanivia, C., Ochoa-Cuentas, A., Arauzo-Gallardo, L., Raymundo, C., 2020. Hydraulic Fill Assessment Model Using Weathered Granitoids Based on Analytical Solutions to Mitigate Rock Mass Instability in Conventional Underground Mining. In Proceedings of the 5th Brazilian Technology Symposium: Emerging Trends, Issues, and Challenges in the Brazilian Technology, Springer, 2, 23–215.

Potvin, Y., Thomas, Ed., Fourie, A., 2005. Handbook on Mine Fill. Australian Centre for Geomechanics, USA, 179p.

Qi, Ch., Fourie, A., 2019. Cemented Paste Backfill for Mineral Tailings Management: Review and Future Perspectives. Minerals Engineering, 144, 106025.

Qi, Ch., Fourie, A., Chen, Q., Zhang, Q., 2018. A Strength Prediction Model Using Artificial Intelligence for Recycling Waste Tailings as Cemented Paste Backfill. Journal of Cleaner Production, 183, 78–566.

Rafraf, G., Belem,T., Mrad, H., Gélinas, L P., Krichen, A., 2023. Experimental Validation of a Prediction Model of the Compressive Strength of Cemented Rockfills.

Ruan, Sh., Liu, L., Zhu, M., Shao, Ch., Xie, L., Hou, D., 2023. Application of Desulfurization Gypsum as Activator for Modified Magnesium Slag-Fly Ash Cemented Paste Backfill Material. Science of The Total Environment, 869, 161631.

Ruan, Zh., Fu, H., Wu, A., Bürger, R., Wang, J., 2023. Utilization of Rice Straw as an Inhibitor of Strength Deterioration of Sulfide-Rich Cemented Paste Backfill. Journal of Materials Research and Technology, 24, 43–833.

Sainsbury, B., Gharehdash, S., Sainsbury, D., 2021. Large-Scale Characterisation of Cemented Rock Fill Performance for Exposure Stability Analysis. Construction and Building Materials, 308, 124995.

Sainsbury, D P., Sainsbury, B L., 2014. Design and Implementation of Cemented Rockfill at the Ballarat Gold Project. In Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill, Australian Centre for Geomechanics, 16–205.

Sari, D., Pasamehmetoglu, A G., 2005. The Effects of Gradation and Admixture on the Pumice Lightweight Aggregate Concrete. Cement and concrete research, 35(5), 42–936.

Sari, M., Yilmaz, E., Kasap, T., 2023. Long-Term Ageing Characteristics of Cemented Paste Backfill: Usability of Sand as a Partial Substitute of Hazardous Tailings. Journal of Cleaner Production, 401, 136723.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

Saw, H., Prentice, S., Villaescusa, E., 2011. Characterisation of Cemented Rock Fill Materials for the Cosmos Nickel Mine, Western Australia. In Proceedings International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering, Canada.

Sheshpari, M., 2015. A Review of Underground Mine Backfilling Methods with Emphasis on Cemented Paste Backfill. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20(13), 5183–5208.

Shi, X., Wang, X., Wang, X., 2022. Dual Waste Utilization in Cemented Paste Backfill Using Steel Slag and Mine Tailings and the Heavy Metals Immobilization Effects. Powder Technology, 403, 117413.

Shrestha, B K., Tannant, D D., Proskin, S., Reinson, J., Greer, S., 2008. Properties of Cemented Rockfill Used in an Open Pit Mine. GeoEdmonton, 8, 16–609.

Shrestha, B., 2008. Properties of Cemented Rockfill at Diavik Mine. MS.C. thesis, Univ of Alberta, Canada, 178p.

Sivakugan, N., Rankine, R M., Rankine, K J., Rankine, K S., 2006. Geotechnical Considerations in Mine Backfilling in Australia. Journal of Cleaner Production, 14(12–13), 75–1168.

Sivakugan, N., Kelda R., Julie L., William H., 2013. Flow Rate Computations in Hydraulic Fill Mine Stopes. Indian Geotechnical Journal, 43, 195–202.

Sivakugan, N., Veenstra, R., Naguleswaran, N., 2015. Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills. International journal of geosynthetics and ground engineering, 1, 1–7.

Song, X., Hao, Y., Wang, Sh., Zhang, L., Liu, W., Li, J., 2022. Mechanical Properties, Crack Evolution and Damage Characteristics of Prefabricated Fractured Cemented Paste Backfill under Uniaxial Compression. Construction and Building Materials, 330, 127251.

Sun, W., Gao, T., Zhao, J., Cheng, H., 2023. Research on Fracture Behavior and Reinforcement Mechanism of Fiber-Reinforced Locally Layered Backfill: Experiments and Models. Construction and Building Materials, 366, 130186.

Thomas, E G., 1979. Fill Technology in Underground Metalliferous Mines. M.SC. thesis, Univ of British Columbia, Canada, 168p.

Tuylu, S., 2022. Effect of Different Particle Size Distribution of Zeolite on the Strength of Cemented Paste Backfill. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(1), 40–131.

Vieira, C S., Pereira, P M., de Lurdes Lopes. M., 2016. Recycled Construction and Demolition Wastes as Filling Material for Geosynthetic Reinforced Structures. Interface Properties. Journal of Cleaner Production, 124, 299–311.

Vigneaux, P., Shao, Y., Frigaard, I A., 2023. Confined Yield Stress Lubrication Flows for Cement Paste Backfill in Underground Stopes. Cement and Concrete Research 164, 107038.

Volnin, B A., Pinalov, I V., 1981. Results of Investigating the Physical and Mechanical Characteristics of Hydraulic-Fill Fine-Grained Tailings. Hydrotechnical Construction, 15, 18–612.

Wang, B., Li, Q., Dong, P., Gan, S., Yang, L., Wang, R., 2023. Performance Investigation of Blast Furnace Slag Based Cemented Paste Backfill under Low Temperature and Low Atmospheric Pressure. Construction and Building Materials, 363, 129744.

Wang, J., Fu, J., Song, W., Zhang, Y., 2022. Effect of Rice Husk Ash (RHA) Dosage on Pore Structural and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill. Journal of Materials Research and Technology, 17, 51–840.

Wang, X., Wan, W., Liu, Y., Gao, R., Lu, Z., Tang, X., 2023. Analysis of Factors Influencing the Flow Characteristics of Paste Backfill in Pipeline Transportation. Sustainability, 15(8), 6904.

Wang, Y., Lu, H., Wu, J., 2021. Experimental Investigation on Strength and Failure Characteristics of Cemented Paste Backfill-Rock Composite under Uniaxial Compression. Construction and Building Materials, 304, 124629.

Wang, Y., Cao, Y., Cao, C., Wang, H., 2023. Effect of Curing Temperature under Deep Mining Conditions on the Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill. Minerals, 13(3), 383.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

Wang, Z., Wang, Y., Cui, L., Bi, C., Wu, A., 2022. Insight into the Isothermal Multiphysics Processes in Cemented Paste Backfill: Effect of Curing Time and Cement-to-Tailings Ratio. Construction and Building Materials, 325, 126739.

Wang, Z., Wang, Y., Wu, L., Wu, A., Ruan, Z., Zhang, M., Zhao, R., 2022. Effective Reuse of Red Mud as Supplementary Material in Cemented Paste Backfill: Durability and Environmental Impact. Construction and Building Materials, 328: 127002.

Wang, Z., Wang, Y., Zhang, M., Wu, A., Ruan, Z., Yu, G., 2023. Effect of Curing Pressure on the Stability of Bottom Cemented Paste Backfill under Different Types of Barricade. Case Studies in Construction Materials, 18: e01732.

Warren, S N., Raffaldi M J., Dehn K K., Seymour J B., Sandbak, L A., Armstrong, J., 2018. Estimating the Unconfined Compressive Strength (UCS) of Emplaced Cemented Rockfill (CRF) from QA/QC Cylinder Strengths. Society for Mining, Metallurgy, & Exploration,
18–31.

Wei, C., Apel, D., Katsaga, T., 2022. Coupled Finite-Difference and Discrete-Element Method for Modelling Direct Shear Tests on Combined Rock-Cemented Rockfill Specimens. Mining, Metallurgy & Exploration, 1–21.

Wu, F., Xiao, B., Yang, F., 2023. Rheological and Strength Properties of Steel-Slag Cemented Paste Backfill: Link to Gypsum Type and Dosage. Minerals, 13(3), 421.

Wu, J., Jing, H., Yin, Q., Meng, B., Han, G., 2020. Strength and Ultrasonic Properties of Cemented Waste Rock Backfill Considering Confining Pressure, Dosage and Particle Size Effects. Construction and Building Materials, 242, 118132.

Wu, J., Yin, Q., Gao, Y., Meng, Bo., Jing, H., 2021. Particle Size Distribution of Aggregates Effects on Mesoscopic Structural Evolution of Cemented Waste Rock Backfill. Environmental Science and Pollution Research, 28, 601–16589.

Wu, J., Wong, H., Yin, Q., Ma. D., 2023. Effects of Aggregate Strength and Mass Fraction on Mesoscopic Fracture Characteristics of Cemented Rockfill from Gangue as Recycled Aggregate. Composite Structures, 311, 116851.

Xiang, J., Li, Z., Qiu, J., Wu, N., Cheng, H., 2023. Investigating the Potential for Porous Ceramics as Bacterial Carrier in Self-Healing Cemented Paste Backfill. Ceramics International 49(9), 500–13490.

Xin, J., Liu, L., Jiang, Q., Yang, P., Qu, H., Xie, G., 2022. Early-Age Hydration Characteristics of Modified Coal Gasification Slag-Cement-Aeolian Sand Paste Backfill. Construction and Building Materials, 322: 125936.

Yan, B., Jia, H., Yilmaz, E., Lai, X., Shan , P., Hou, C., 2022. Numerical Study on Microscale and Macroscale Strength Behaviors of Hardening Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 321: 126327.

Yang, L., Yilmaz, E., Li, J., Liu, H., Jiang, H., 2018. Effect of Superplasticizer Type and Dosage on Fluidity and Strength Behavior of Cemented Tailings Backfill with Different Solid Contents. Construction and Building Materials, 187, 98–290.

Yao, N., Liu, Y., Wang, Q., Oppong, F., Huang, T., Zhou, Z., Du, P., 2023. Experimental Study on Delamination and Strength Characteristics of Cemented Waste Rock Backfill. Construction and Building Materials, 365, 130058.

Yilmaz, E., Benzaazoua, M., Bussière, B., Pouliot, S., 2014. Influence of Disposal Configurations on Hydrogeological Behaviour of Sulphidic Paste Tailings: A Field Experimental Study. International Journal of Mineral Processing, 131, 12–25.

Yin, S., Yan, Z., 2023. The Effect of Coarse Aggregate on the Bleeding and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill. Journal of Central South University, 30(2), 67–555.

Yılmaz, E., Belem, T., Benzaazoua, M., Kesimal, A., Erçıkdı, B., 2007. Evaluation of the Strength Properties

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

of Deslimed Tailings Paste Backfill. The International Journal of Mineral Resources Engineering, 12(2).

Yue, C., Liguo, X., Zhiyun, Z., Xiangling, W., 2023. Modification of Cemented Paste Backfill with Calcined Layered Double Hydroxides for Lead-Containing Tailings Disposal. Powder Technology, 414, 118089.

Zhang, C., Fu, J., Song, W., Kang, M., Li, T., Wang, N., 2022. Analysis on Mechanical Behavior and Failure Characteristics of Layered Cemented Paste Backfill (LCPB) under Triaxial Compression. Construction and Building Materials, 324: 126631.

Zhang, P., Zhang, Y., Zhao, T., Tan, Y., Yu, F., 2019. Experimental Research on Deformation Characteristics of Waste-Rock Material in Underground Backfill Mining. Minerals, 9(2), 102.

Zhang, S., Wang, K., Li, H., Zhang , X., Jiang , Y., 2023. Novel SCMs Produced by the Calcination of Secondary Aluminium Dross with Dolomite and Their Potential Usage in Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 365: 130119.

Zhao, K., Zhou, Y., Yu, X., Yan, Y., He, Z., Shan, P., Zhang, X., Ji, Y., 2023. Strain-Rate Effects on the Crack Evolution Pattern and Damage Characteristics of Cemented Paste Backfill. Geotechnical and Geological Engineering, 41(1), 295–310.

Zhao, Y., Taheri, A., Karakus, M., Chen, Z., Deng, A., 2020. Effects of Water Content, Water Type and Temperature on the Rheological Behaviour of Slag-Cement and Fly Ash-Cement Paste Backfill. International Journal of Mining Science and Technology, 30(3), 78–271.

Zhou, X., Hu, S., Zhang, G., Li, J., Xuan, D., Gao, W., 2019. Experimental Investigation and Mathematical Strength Model Study on the Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill. Construction and Building Materials, 226, 524–33.

Zhou, Y., Fall, M., 2023. Mechanical and Microstructural Properties of Cemented Paste Backfill with Chloride-Free Antifreeze Additives in Subzero Environments. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(6), 4023148.

Zhou, Y., Yin, S., Zhao, K., Wang, L., Liu, L., 2023. Understanding the Static Rate Dependence of Early Fracture Behavior of Cemented Paste Backfill Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Techniques. Engineering Fracture Mechanics, 283, 109209.

Zhu, C., Liu, L., Pu, Y., Qi, C., Chen, Q., Chen, J., 2023. Effect of Ice Addition on the Properties and Microstructure of Cemented Paste Backfill at Early-Age. Journal of Building Engineering, 71,106439.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

Study of the gradation characteristics of backfill materials in underground mines along with evaluating the gradation of construction and demolition waste aggregate

Faeze Sadat Khandani [1], Hadi Atapour*[2], Mostafa Yousefi Rad[3], Behzad Khosh[4]

1. M.Sc, Department of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
2. Assistant Professor, Department of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
3. Associate Professor,Department of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
4. M.Sc, Rock mechanics group, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 04 Sep 2023 Accepted: 16 Dec 2023

Abstract

Backfill materials used to fill underground mines are a type of engineered material whose particle size distribution (PSD) directly affects their mechanical and physical properties. According to the authors' review, there is no comprehensive standard for the properties of aggregates used in underground mine backfill materials. In this paper, the particle size ranges and particle size distribution curves of various mine backfill materials, including hydraulic backfill, paste backfill and rock backfill, have been reviewed. The available data on different types of backfill materials were collected. Based on the collected data, the smallest particle size, the largest particle size and the PSD curve ranges for each type of backfill material were determined. Then the characteristics of the particle size distribution curve of each backfill material, including the mean particle diameter (D50), the uniformity coefficient (Cu) and the curvature coefficient (Cc), were calculated. The results of the analysis of the PSD curves for paste backfill, hydraulic backfill and rock backfill materials showed that the particles in rock backfill and paste backfill had the largest and smallest sizes, respectively. Finally, the particle size distribution characteristics of a new backfill material prepared from construction and demolition waste (CDW backfill) are presented and compared with the particle size distribution of each of the conventional backfill materials. The results indicate that the PSD curve of the CDW backfill lies at the upper limit of the range of the particle size distribution curve of hydraulic backfill and at the lower limit of the range of the particle size distribution curve of rock backfill.

Introduction

Mineral extraction involves both underground and surface methods. Underground mining activities often result in the creation of large underground voids, known as stops, which can range in size from 10 to 1000 meters. Efficient stability management of these stops in underground mines is critical, and one effective technique is the use of backfill materials. Typically, tailings from mineral extraction or processing operations serve as the primary source of backfill material. The strength of these backfill materials is increased by the addition of various additives such as cement, slag, various types of fiber, fly ash and others. These components are mixed to form a composite mixture, which is then transported to the excavated areas through boreholes and specialized pipelines. From a geotechnical point of view, backfill materials are classified as either unncemented or cemented. Cemented backfill

*Corresponding author: h.atapour@arakut.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.3.105984

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

materials, including hydraulic, paste and rock backfill, are commonly used in underground mining. The particle size distribution of the aggregate plays an important role in determining the strength characteristics of cemented backfill materials. However, the lack of standardized guidelines specifying aggregate particle size limits poses a challenge in the formulation of these materials. Therefore, this study investigates the particle size ranges and gradation characteristics of aggregates used in different types of mine backfill, including hydraulic backfill, paste backfill and rock backfill.

Materials and Methods

An extensive collection of literature on different types of backfill materials was collected. The grain size distribution curves of each sample collected were then analyzed to determine key grading parameters, including mean grain diameter (D50), coefficient of uniformity (Cu) and coefficient of curvature (Cc). The study presents a dataset of 96 grain size curves with 26%, 53% and 21% attributed to hydraulic, paste and rock fills respectively. In addition, the gradation characteristics of C&D waste backfill, proposed by the authors as a novel backfill material, were compared with the grain size curves of traditional backfill materials. By investigating and comparing the gradation characteristics of different backfill materials, this research aims to inform and improve the understanding of optimal aggregate sizes for different types of backfill used in underground mining.

Results and Discussion

0.1-12000 and 20-680000 micrometers respectively. Furthermore, the investigation of backfill derived from recycled C&D waste revealed that its gradation falls within the transitional range between hydraulic and rock backfill. According to established standards, aggregates with a coefficient of uniformity (Cu) greater than four and a coefficient of curvature (Cc) greater than one are considered suitable for use as backfill. These characteristics were then calculated for all the grading curves of the backfill materials. Of the 25 hydraulic backfill curves analyzed, 64% had Cu values greater than four and 68% had Cc values greater than one. However, only about 44% of the hydraulic backfills met the optimum aggregate grading criteria when both parameters were considered simultaneously. Similarly, over 86% of the 51 paste backfill curves had Cu values greater than four and over 76% had Cc values greater than one, with approximately 65% meeting the appropriate aggregate gradation conditions. According to the optimum ranges of Cu and Cc, for rock backfill, the Cu parameter was found to be within the optimum range in 90% of cases, while the Cc parameter met the optimum criteria in 80% of cases.

Conclusions

The present study places considerable emphasis on the critical aspect of particle size distribution in backfill materials. Recognizing the lack of standardized guidelines for specifying aggregate gradation, a comprehensive review of the gradation characteristics of various backfill materials used in underground mining was undertaken. This involved the collection of relevant literature relating to hydraulic, paste and rock backfill, followed by the calculation of aggregate gradation characteristics for each backfill material. The results of the analysis revealed distinct particle size ranges for rock, paste and hydraulic backfill. In addition, the study of backfill derived from recycled aggregates together with conventional backfill showed its transitional gradation between hydraulic and rock backfill. Furthermore, hydraulic backfill was found to have the least suitable aggregate gradation, while rock backfill had the most suitable characteristics, as assessed by uniformity and curvature

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]

coefficients. These results provide valuable insights into the importance of defining the optimum aggregate gradation for backfill materials and provide direction for further research in this area.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.3.105984]