



## بهبود بازدهی کارخانه‌های تولید کنسانتره آهن، با ارزیابی شاخص‌های فرآوری خوراک

عطاله بهرامی<sup>۱</sup>، پارسا محبی<sup>۲</sup>، سیامک فرهودی<sup>۳</sup>، فاطمه کاظمی<sup>۴</sup>، پیمان جباری<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه - ایران [a.bahrani@urmia.ac.ir](mailto:a.bahrani@urmia.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه - ایران [parsa.963071055@gmail.com](mailto:parsa.963071055@gmail.com)

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه - ایران [farhoudisiamak@gmail.com](mailto:farhoudisiamak@gmail.com)

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان - ایران [f.kazemi@grad.kashanu.ac.ir](mailto:f.kazemi@grad.kashanu.ac.ir)

<sup>۵</sup> کارشناس کارخانه تولید کنسانتره آهن مهستان فرآور، زنجان - ایران [p.jabari@yahoo.com](mailto:p.jabari@yahoo.com)

### چکیده

در نواحی شمالغرب و غرب ایران، اندیس‌ها و معادن کوچک مقیاسی از سنگ آهن یافت می‌شود؛ که محصول خروجی این واحدها - سنگ آهن دانه‌بندی - به کارخانه‌های تولید کنسانتره آهن منتقل می‌شود. بازدهی کارخانه‌های تولید کنسانتره با توجه به تامین خوراک آنها از معادن مختلف، همواره با نوساناتی مواجه است. هدف از تحقیق حاضر، بهبود کارایی کارخانه‌های تولید کنسانتره آهنی است که خوراک آنها از معادن سنگ آهن متعدد تامین می‌شود. مطالعه موردی این تحقیق، کارخانه تولید کنسانتره آهن مهستان فرآور اروند - واقع در استان زنجان - است. خوراک این کارخانه از سه معدن سنگ آهن واقع در استان‌های آذربایجانغربی، آذربایجانشرقی و کردستان، تامین می‌گردد. در اولین گام به شناسایی خواص کانسنگ‌های آهن مورد مطالعه پرداخته شده است. عیار آهن در نمونه‌های مورد مطالعه از ۳۸ تا ۴۷ درصد متغیر است. مقدار  $d_{80}$  آنها نیز از ۶ تا ۱۸ میلی‌متر متغیر بوده، همچنین درجه آزادی مناسب (تقریباً ۹۰ درصد) برای کانی مگنتیت برای هر کانسنگ منحصربفرد است. بر اساس آنالیز XRD در تمامی نمونه‌ها مگنتیت کانی اصلی حاوی آهن بوده؛ اما فازهای همراه اصلی و فرعی برای این کانی، در هر کانسنگ متفاوت است. با انجام آزمایش‌های خردایش نتیجه گردید که رفتار خردایشی کانسنگ‌های آهن از یکدیگر متفاوت و به ترکیب کانی‌شناسی آنها وابسته است. در حالی که مگنتیت و گارنت فازهای اصلی کانسنگ بوده، قابلیت خردایش پایین‌تر از کانسنگ حاوی فازهای مگنتیت و کوارتز بوده است. همچنین شکل ذرات حاصل از خردایش بر اساس تغییرات کانی‌شناسی از ذرات گرد تا سوزنی شکل متفاوت است. بر اساس نتایج آزمایش‌های جدایش مغناطیسی، برای هر نمونه با کاهش اندازه ذرات، عیار آهن در کنسانتره - به دلیل افزایش درجه آزادی و راه‌یابی ذرات آزاد مگنتیت به کنسانتره - روند افزایشی داشته است. اما عیار آهن کل و کارایی جدایش بیشترین تاثیر را از نحوه درگیری مگنتیت با کانی‌های گانگ داشته‌اند.

### واژه‌های کلیدی

بهبود کارایی، کارخانه کنسانتره، سنگ آهن دانه‌بندی، خواص بافتی، شاخص فرآوری



## ۱. مقدمه

سنگ آهن ماده اولیه تولید فولاد است، و ۹۸ درصد از سنگ آهن استخراج شده در سطح جهان برای تولید فولاد بکار می‌رود. کانه‌های آهن استخراج شده با توجه به عیار پایین و وجود مواد گانگ، بطور مستقیم برای تولید فولاد قابل مصرف نیستند. بنابراین بر روی آنها فرایندهای خردایش و پرعیارسازی در طی مراحل متعدد انجام می‌گیرد [۱، ۲]. لذا اولین قدم، آزادسازی ذرات آهن‌دار از ذرات گانگ همراه است. مراحل بعدی، شامل جدایش ذرات کانی‌های حاوی آهن از کانی‌های گانگ است، که از دیدگاه کیفیت و کمیت (ظرفیت) محصول تولیدی، تاثیرپذیری بالایی از مرحله خردایش دارند [۳]. فرایندهای فرآوری و متالورژی آهن، به سبب محدودیت‌هایی در خصوص کیفیت و دانه‌بندی خوراک، و تاثیر پارامترهایی اعم از عیار آهن، میزان عناصر مضر مانند گوگرد و فسفر، با چالش‌های متعددی روبرو هستند. در این میان، میزان و نحوه درگیری کانی‌های اکسیدی آهن با کانی‌های گانگ و کاهش درجه آزادی، مهمترین پارامتر محدود کننده از نقطه نظر دستیابی به عیار و بازیابی مطلوب است [۴]. درگیری میان کانی‌های با ارزش با گانگ و دستیابی به درجه آزادی مطلوب، طی فرایندهای خردایش حاصل می‌گردد. واضح است که میزان خردایش یک کانه مرتبط با درجه آزادی آن است؛ اما پارامتر اصلی مفقود در اغلب تئوری‌های خردایش، رابطه خردایش کانسنگ و خواص بافتی و کانی‌شناسی آن است [۵]. هر کانسنگ - حتی در سینه کارهای مختلف یک معدن - به دلایلی از جمله تاثیر گسل‌ها، حضور دایک و همچنین نوع و تیپ ذخیره، دارای خواص ژئومکانیکی متفاوتی است. تغییر در خواص ژئومکانیکی، موجب بروز رفتارهای خردایش متفاوت برای کانسنگ در طی عملیات آتشیاری و خردایش توسط سنگ‌شکن‌ها و آسیابها خواهد شد. به بیان دیگر، با توجه به تنوع و گستردگی کانی‌ها و تفاوت در ضریب خردایش آنها، خوراک ورودی به کارخانجات فرآوری شامل توزیعی از انواع و دانه‌بندی ذرات است. از این‌رو، بررسی کانی‌شناسی و ویژگی‌های بافتی یک کانسنگ و سنگ میزبان آن، موجب حصول اطلاعات ارزشمندی از دیدگاه رفتار خردایشی کانسنگ و کانی‌های محتوی و در نتیجه طراحی و یا بهینه‌سازی فرایندهای خردایش آنها خواهد شد. از طرف دیگر، در مدارهای فرآوری مواد معدنی، مرحله خردایش بیشترین میزان مصرف انرژی را دارد. لذا کارایی نامناسب مدار خردایش، هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی را تا چندین برابر افزایش خواهد داد [۶].

در راستای بهینه‌سازی مدارهای فرآوری کانه‌های آهن تحقیقات متعددی صورت گرفته است. Qiu et al. (2015) به بررسی تاثیر شرایط مدار خردایش بر کارایی جدایش مغناطیسی و همچنین مرحله فلوتاسیون (جهت گوگردزدایی) در کانه‌های آهن سولفور بالا پرداخته‌اند. در این تحقیق تاثیر خردایش چند مرحله‌ای در بازدهی فرایندهای مذکور نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. Reichert et al. (2015) با توجه به افزایش مصرف کل انرژی برای خردایش کانه‌های آهن ناشی از پیچیدگی مینرالیزاسیون کانه‌ها، به بررسی استفاده از تجهیزات پیشرفته در خردایش سنگ آهن پرداخته‌اند. بدین منظور تاثیرات پارامترهای آسیابنی بر درجه آزادی کانی‌های با ارزش بررسی گردید. نتایج حاکی از تاثیرپذیری بالای فرایند خردایش بر مصرف انرژی، درجه آزادی و نرخ تولید است [۸]. Rodrigues et al. (2021) به بررسی تاثیر روش‌های مختلف خردایش در پرعیارسازی دو نوع مختلف خوراک کم عیار و پرعیار سنگ آهن پرداخته‌اند. آنها در این تحقیق به بررسی تاثیر نوع کانه، توزیع اندازه ذرات، نوع مدار خردایش (باز یا بسته بودن)، حالت خردایش (نوع آسیاب)، بار خرد کننده، و همچنین لزوم خردایش ثانویه پرداختند. نتایج نشان دهنده لزوم تغییر در مدار خردایش حاضر، جهت حصول بهره‌وری فنی و کاهش مصرف انرژی است [۹]. Jong (2023) به بررسی ترکیب اختلاط کانه‌های آهن برای کارخانه پلیت (Tata steel pelletizing) پرداخته است. در این راستا، یک روش پیش‌بینی خردایشی بر روی ترکیب نمونه‌های مختلف به منظور کمک به بهبود انتخاب ترکیب ایجاد شده است [۱۰].

در نواحی شمالغرب و غرب کشور و در استان‌های آذربایجانغربی، آذربایجانشرقی، کردستان، همدان و زنجان معادن سنگ آهن کوچک مقیاسی وجود دارد. از جمله این معادن می‌توان به سنگ آهن صاحب، حسن سالاران، آلیجان (استان کردستان)، بالستان، آهن اینچه وارن، قالوشیخان، اسکندیان (استان آذربایجانغربی)، آوان (استان آذربایجانشرقی)، سرخه دیزج، گوزل‌دره (استان زنجان) اشاره کرد. در این معادن بطور معمول کانسنگ استخراجی از معدن با عیار آهن کل حدود ۳۰ درصد، طی مراحل سنگ‌شکنی و جدایش مغناطیسی خشک پرعیار می‌گردد. خروجی این مرحله که اصطلاحاً سنگ آهن دانه‌بندی نامیده می‌شود، محصولی با عیار آهن کل بیش از ۴۵ درصد است. محصول دانه‌بندی شده معادن مختلف برای تولید کنسانتره آهن (بار ورودی به مرحله ذوب) به کارخانه‌های تولید کنسانتره فروخته می‌شود. در استان زنجان کارخانه‌های متعدد تولید کنسانتره آهن وجود داشته، که خوراک ورودی به آنها از واحدهای دانه‌بندی استان‌های



همجوار (کردستان، آذربایجانغربی، آذربایجانشرقی و همدان) تامین می‌گردد. با توجه به موقعیت جغرافیایی مناسب استان زنجان (نزدیکی به مرکز کشور و شرکت‌های ذوب آهن و فولاد)، همجواری با استان‌های مذکور، و همچنین وجود ذخایر مناسبی از آهن در خود استان، انتظار می‌رود که صنعت تولید کنسانتره آهن در این منطقه روند رو به رشدی داشته باشد.

تامین خوراک کارخانه‌های تولید کنسانتره از معادن مختلف، موجب بروز نوسانات و چالش‌هایی در بازدهی مدار کارخانه خواهد شد. با توجه به تغییرات ترکیب کانی‌شناسی و بافتی کانسنگ آهن معادن مختلف، یک مدار واحد لزوماً بهترین بازدهی را برای انواع کانسنگ‌ها نخواهد داشت. در تحقیق حاضر سعی بر آن شده است که به بهبود بازدهی مدارهای مذکور و رفع چالش‌های آنها پرداخته شود. در این راستا مطالعات بر روی کارخانه تولید کنسانتره آهن مهستان فرآور ارونند، واقع در شهرستان خرمدره (استان زنجان) انجام گرفته است. خوراک این کارخانه، از سنگ آهن دانه‌بندی معادن استان‌های کردستان، آذربایجانغربی و آذربایجانشرقی تامین می‌گردد. از این رو بار ورودی به مدار فرآوری این کارخانه با تغییر در ویژگی‌های کانی‌شناسی و نوسانات عیار مواجه است [۱۱]. با توجه به تنوع بار ورودی به مدار این کارخانه، بازدهی مدار متغیر و تاثیرپذیری بالایی از خواص خوراک از جمله توزیع دانه‌بندی آن، نوع کانی‌های گانگ همراه و در نتیجه خواص خردایشی آنها دارد. با توجه به این تغییرات خوراک، مدار تولید کنسانتره با چالش حد جدایش در سرندهای مدار، و خطا در جدایش باطله و کنسانتره مواجه است. بروز خطا در حد جدایش سرندها، سبب بالا رفتن میزان انرژی مصرفی مدار خردایش، و همچنین کاهش عیار و بازیابی نهایی مدار شده است. هدف از تحقیق حاضر انجام مطالعات کانی‌شناسی، آنالیزهای شیمیایی و دانه‌بندی، و سپس انجام آزمایش‌های مختلف خردایش و پرعیارسازی در مقیاس آزمایشگاهی، برای خواص سنجی دقیق خوراک‌های مختلف کارخانه و اعمال تنظیمات لازم برای هر خوراک ورودی در مدار خردایش است؛ تا از این طریق بهینه‌ترین حالت را برای خردایش و در نتیجه بازدهی نهایی مدار ارائه دهد.

## ۲. مواد و روش‌ها

کارخانه تولید کنسانتره آهن مهستان فرآور ارونند، واقع در شهرستان خرمدره (استان زنجان) از معدود شرکت‌های فرآوری سنگ آهن بوده، که خوراک آن از سنگ آهن دانه‌بندی معادن مختلف فراهم می‌شود. ظرفیت بار ورودی به خط فرآوری این کارخانه در حدود ۹۰۰-۶۰۰ تن در روز با متوسط عیار ۳۵-۵۰ درصد بوده؛ که از روش جدایش مغناطیسی تر برای پرعیارسازی سنگ آهن، بهره برده می‌شود. در مدار فرآوری کارخانه پس از خردایش اولیه خوراک توسط آسیای گلوله‌ای، پرعیارسازی توسط جداکننده‌های مغناطیسی انجام می‌گیرد. خروجی این مدار کنسانتره‌ای با متوسط عیار ۶۸-۶۰ درصد و بازیابی وزنی ۷۰-۵۰ درصد، و باطله با مقدار آهن کمتر از ۱۴ درصد است.

### ۱.۲. معادن تامین کننده بار ورودی به کارخانه و خواص شناسی آنها

بار ورودی به مدار فرآوری کارخانه تولید کنسانتره آهن مهستان فرآور ارونند، از سه معدن سنگ آهن دانه‌بندی بالستان - کد BAL (واقع در استان آذربایجانغربی)، آلیجان - کد ALI (واقع در استان کردستان) و آوان - کد AVA (واقع در استان آذربایجانشرقی) تامین می‌گردد. بدین ترتیب که محصول دانه‌بندی هر معدن به صورت مجزا به کارخانه خوراک‌دهی می‌شود. با توجه به ترکیب و خواص منحصر بفرد هر ذخیره معدنی، تغییر در نوع بار ورودی به مدار منجر به نوسان در بازدهی آن می‌شود. برای تعیین حالت بهینه‌ای برای مدار کارخانه مهستان فرآور ارونند، از خوراک‌های ورودی به مدار کارخانه نمونه‌برداری به عمل آمد. بر روی هر سه نمونه آنالیز شیمیایی به منظور تعیین مقدار آهن کل و FeO انجام گرفته است. در جدول ۱ نتایج مربوط این آنالیز آمده است. بر اساس نتایج آنالیزهای شیمیایی عیار آهن کل در بار ورودی به مدار کارخانه از ۳۸ تا ۴۷ درصد متغیر است. بر روی هر سه نمونه آنالیز XRD با هدف بررسی تغییرات ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های سنگ آهن صورت گرفته است. در جدول ۲ نتایج مربوط به این آنالیز آمده است. بر اساس آنالیزهای XRD، در هر سه نمونه سنگ آهن مگنتیت یکی از فازهای اصلی است. در کانه‌های BAL، ALI کوارتز دیگر فاز اصلی شناسایی شده است، اما در کانه AVA گارنت دیگر فاز اصلی است. فازهای فرعی شناسایی شده در هر سه نمونه نیز کاملاً متفاوت از یکدیگر هستند. بنابر مطالب مذکور می‌توان گفت که خواص خردایشی سه کانسنگ مذکور از یکدیگر متفاوت خواهد بود. در کانه AVA به دلیل وجود گارنت، خردایش با مصرف انرژی بالاتری نسبت به کانه‌های BAL و ALI همراه خواهد بود. همچنین بر اساس فازهای فرعی می‌توان گفت که کانه معدن AVA به مراتب از کانی‌های با سختی بالاتری نسبت به دو کانه دیگر برخوردار است. در نمونه کانسنگ BAL به دلیل وجود فازهای



کلریت و تالک، ممکن است در طی فرایندهای خردایش مقدار نرمه بیشتری تولید شود، که علاوه بر کاهش کارایی مرحله خردایش، در مراحل جدایش نیز مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد. وجود هماتیت در کانسنگ‌های *ALI* و *BAL* در صورت درگیری با مگنتیت، موجب افزایش عیار آهن کل در کنسانتره خواهد شد.

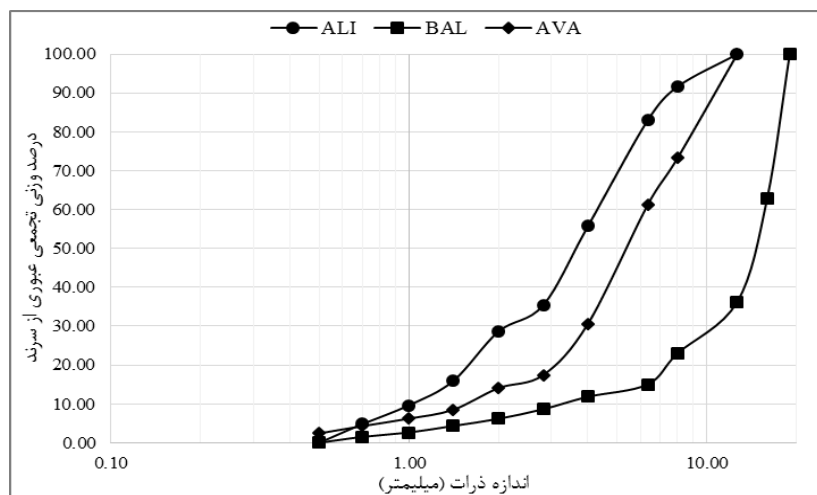
جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی کانسنگ‌های آهن معادن مورد مطالعه

ترکیب	BAL	ALI	AVA
Fe (T) %	۴۲/۶۸	۳۸/۱۰	۴۷/۰۰
FeO %	۱۶/۹۰	۱۱/۵۰	۱۵/۵۰

جدول ۲- نتایج آنالیز XRD کانسنگ‌های آهن معادن مورد مطالعه

کد نمونه	مگنتیت	کوارتز	دولومیت	گارنت	آلبیت	کلسیت	گروه آمفیبول	گوتیت	هماتیت	تالک	کلریت	فلدسپات	سیدریت
BAL	فازهای اصلی				فازهای فرعی					فازهای فرعی			
ALI	فازهای اصلی						فازهای فرعی						
AVA	فاز اصلی	فاز فرعی	فاز فرعی	فاز اصلی	فاز فرعی							فاز فرعی	

در شکل ۱ نمودارهای توزیع دانه‌بندی سه نمونه کانه *BAL*، *ALI* و *AVA* نمایش داده شده است. بر اساس شکل، در کانسنگ *ALI* مقدار  $d_{80}$  برابر با ۶ میلی‌متر، و برای کانه‌های *BAL* و *AVA* به ترتیب ۱۸ و ۸ میلی‌متر است.



شکل ۱- نمودارهای توزیع دانه‌بندی کانسنگ‌های آهن معادن مورد مطالعه

## ۲.۲ روش کار

### الف) آزمایش‌های خردایش

۱.۱ در راستای بررسی رفتار خردایشی نمونه‌ها، هر یک از کانسنگ‌های مورد مطالعه توسط سنگ‌شکن غلتکی تحت فرایند خردایش قرار گرفته‌اند. خردایش در سنگ‌شکن غلتکی برای هر نمونه در شرایط عملیاتی مختلف تولید خروجی با اندازه ۰-۲، ۰-۱، ۰-۰/۵ و ۰-۰ میلی‌متر انجام شده است. خروجی هر یک به منظور بررسی توزیع اندازه ذرات، تحت آنالیز سرندهی قرار گرفته است. در مرحله بعد با خردایش هر



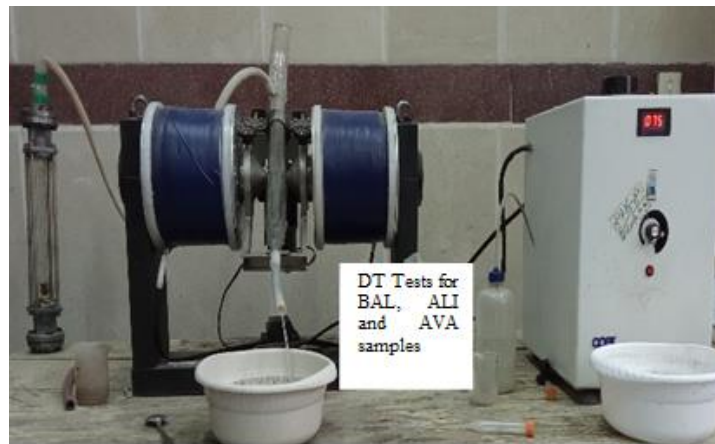
یک از نمونه‌های مذکور در آسیای میله‌ای با مدت زمان‌ها خردایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه به بررسی قابلیت خردایش هر یک از کانه‌های آهن مورد مطالعه پرداخته شده است. خردایش در آسیای با مشخصات مذکور در جدول ۳ انجام شده است.

جدول ۳- مشخصات آسیای میله‌ای آزمایشگاهی مورد استفاده برای خردایش کانسنگ‌های آهن مورد مطالعه

تعداد میله‌ها	وزن هر میله (Kg)	طول هر میله (Cm)	قطر هر میله (mm)	قطر آسیا (Cm)	طول آسیا (Cm)	سرعت دوران آسیا (rpm)
۱۰	۱/۵	۳۰	۱۵	۱۵/۷۰	۳۵	۹۵

### ب) آزمایش‌های جدایش مغناطیسی

برای بررسی تاثیر رفتار خردایشی هر کانسنگ آهن بر بازدهی جدایش مغناطیسی آن، بر روی تمامی نمونه‌های خرد شده، آزمایش‌های دیویس تیوب در شدت میدان مغناطیسی ۲۰۰۰ گوس انجام گرفته است. در شکل ۲ تصویری از دستگاه دیویس تیوب مورد استفاده نمایش داده شده است. هر آزمایش دیویس تیوب برای نمونه‌ای با وزن ۲۰ گرم، با نرخ جریان آب ۱/۳ l/min و مدت زمان جدایش ۲ دقیقه انجام شده است. محصولات هر آزمایش جدایش مغناطیسی، پس از خشک شدن توزین و تحت آنالیز شیمیایی تعیین مقدار FeO و Fe(T) قرار گرفته‌اند.



شکل ۲- تصویری از دستگاه دیویس تیوب مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های جدایش مغناطیسی

### ۳. بحث و نتایج

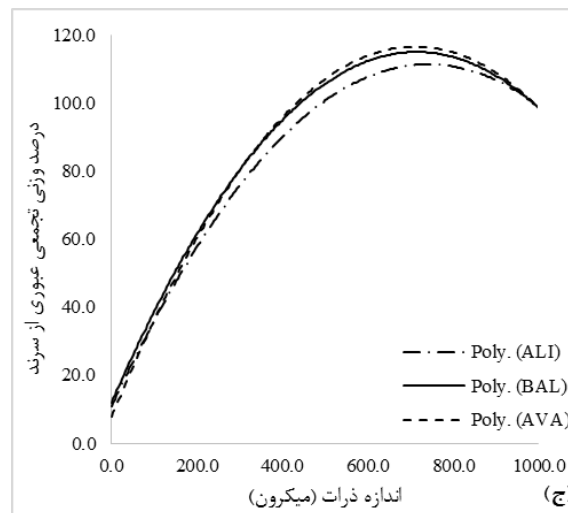
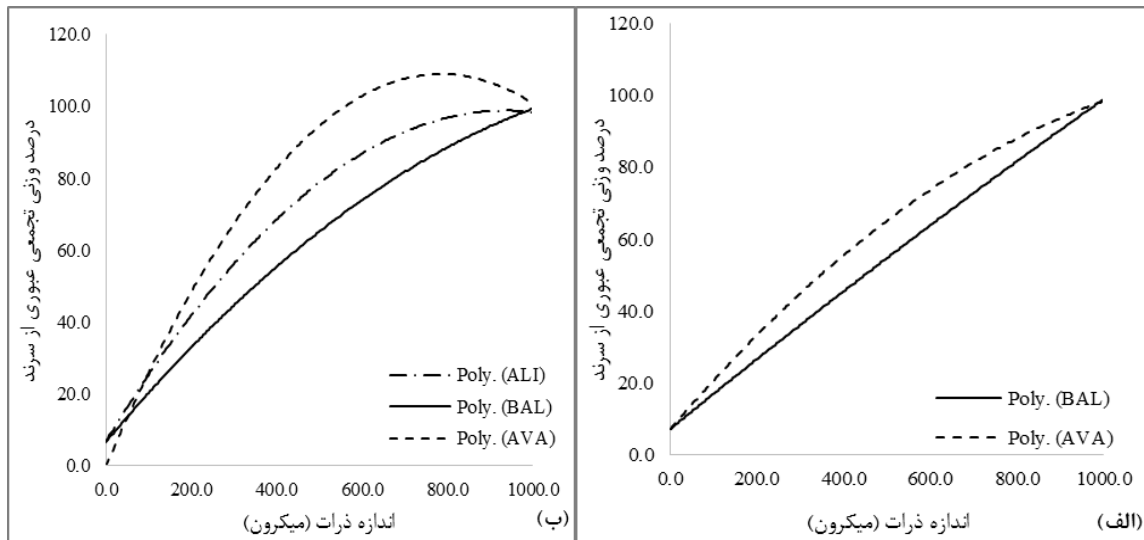
#### ۱.۳. بررسی رفتار خردایشی کانه‌های مختلف آهن

هر یک از نمونه‌های سنگ آهن با کدهای BAL, ALI و AVA با مقادیر  $d_{80}$  به ترتیب ۱۸، ۶ و ۸ میلی‌متر (شکل ۱)، توسط سنگ‌شکن غلتکی تحت خردایش قرار گرفته‌اند. خروجی سنگ‌شکن در مراحل مختلف محصولاتی با اندازه ذرات ۰-۲، ۰-۱ و ۰-۰/۵ میلی‌متر بوده است. در شکل ۳ (قسمت الف) منحنی‌های توزیع دانه‌بندی خروجی سنگ‌شکن برای محدوده ابعادی ۰-۲ میلی‌متر نمایش داده شده است. در شرایط مشابه خردایش، کانسنگ BAL از توزیع دانه‌بندی درشت‌تری نسبت به معدن AVA برخوردار بوده است. با توجه به قسمت ب - شکل ۳، در محصول خرد شده با اندازه ذرات ۰-۱ میلی‌متر، کانسنگ AVA از توزیع ریز دانه‌تری نسبت به دو نمونه دیگر برخوردار بوده است. در منحنی‌های قسمت ج - شکل ۳ که نمایش دهنده توزیع ابعادی در محدوده ۰-۰/۵ میلی‌متر هستند؛ BAL از توزیع دانه‌بندی ریزتری برخوردار است. بعبارت دیگر می‌توان گفت که با تعدد مراحل خردایش (بار در گردش) کانسنگ BAL قابلیت خردایش بهتری نسبت به دو کانسنگ دیگر خواهد داشت.





در جدول ۴ مقادیر  $d_{80}$  برای توزیع دانه‌بندی هر نمونه بیان شده است. بر اساس جدول ۴ برای خردایش تا محدوده ابعادی ۰-۲ میلی‌متر کانسنگ‌های BAL و AVA مقدار  $d_{80}$  برابری داشته‌اند؛ در حالیکه مقدار  $d_{80}$  خوراک این دو نمونه به ترتیب ۱۸ و ۸ میلی‌متر بوده است. بر اساس جدول ۲ در نمونه BAL مگنتیت و کوارتز فازهای اصلی بوده، و برای AVA فازهای اصلی شامل مگنتیت و گارنت هستند. بنابراین در نمونه AVA وجود گارنت به دلیل سختی بالاتر منجر به مقاومت در مقابل خردایش شده است. همچنین بر اساس این جدول نمونه BAL دارای کانی‌های گانگ با ضریب خردایش پایین‌تری نسبت به نمونه AVA است. با کاهش محدوده دانه‌بندی به ۰-۱ میلی‌متر کانسنگ AVA قابلیت خردایش بهتری خواهد داشت. با توجه به مطالعات کانی‌شناسی در نمونه AVA بخش عمده ذرات سوزنی شکل و دارای اندازه کمتر از ۵۰۰ میکرون هستند. بنابراین می‌توان گفت که یکی از دلایل عمده کاهش مقدار  $d_{80}$  نمونه AVA شکل ذرات آن از دیدگاه عبور سهل‌تر ذرات سوزنی شکل از روزنه‌های سرند در راستای عمودی ذرات است. بررسی مقادیر  $d_{25}$  سه نمونه کانسنگ آهن (جدول ۴) حاکی از آن است که مقدار این پارامتر برای نمونه BAL کمتر از نمونه AVA و تقریباً مشابه با نمونه ALI است. بر اساس نتایج آنالیز XRD (جدول ۲)، در ترکیب نمونه‌های BAL و ALI وجود کانی‌های کلریت، تالک، کلسیت و غیره موجب تولید ذرات نرمه و ریز دانه خواهد شد.



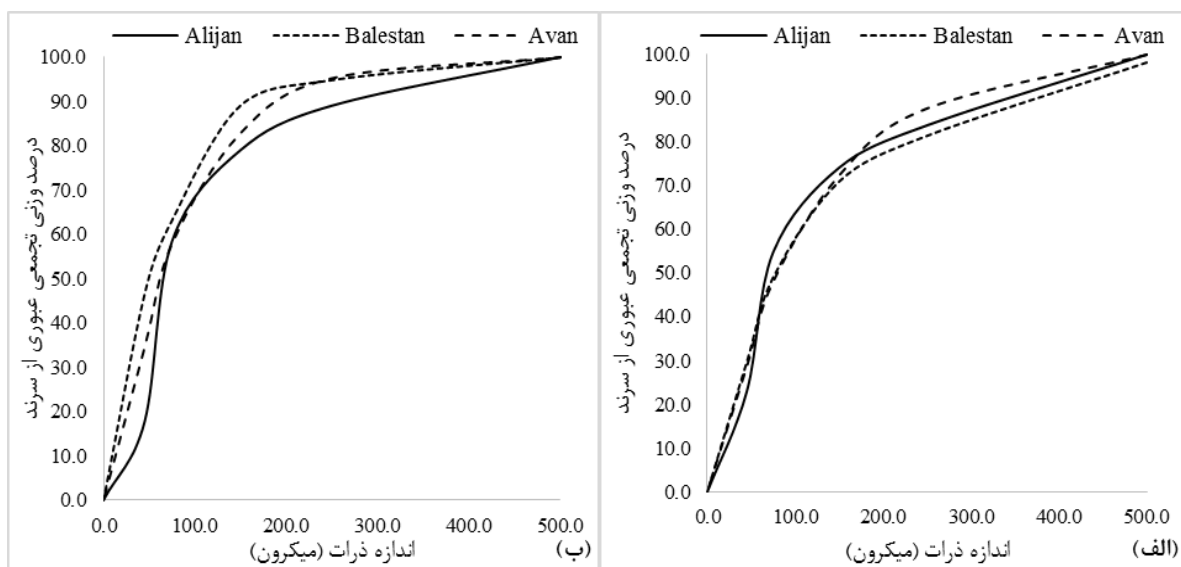
شکل ۳- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی کانسنگ‌های مختلف آهن - خروجی سنگ‌شکن غلتکی در محدوده‌های ابعادی الف) ۰-۲، ب) ۰-۱ میلی‌متر و ج) ۰-۵/۰ میلی‌متر

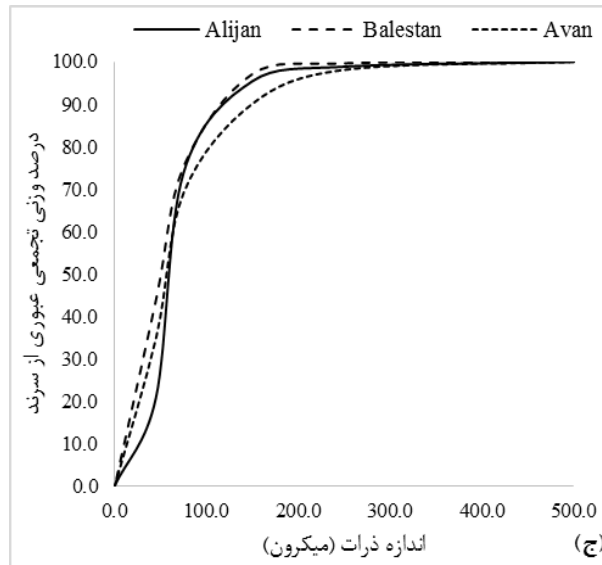


جدول ۴- مقادیر پارامترهای حاصل از توزیع دانه‌بندی کانسنگ‌های مختلف آهن - خروجی سنگ‌شکن غلتکی

کانسنگ / محدوده دانه‌بندی	خوراک اولیه	۰-۲ میلی‌متر	۰-۱ میلی‌متر	۰-۰/۵ میلی‌متر
BAL	d <sub>80</sub> (μm)	۱۶۰۰۰	۸۰۰	۲۵۰
	d <sub>50</sub> (μm)	۱۴۸۰۰	۵۰۰	۱۰۰
	d <sub>25</sub> (μm)	۸۵۰۰	۹۰	۴۲
ALI	d <sub>80</sub> (μm)	۶۰۰۰	-	۴۰۰
	d <sub>50</sub> (μm)	۳۰۰۰	-	۱۴۰
	d <sub>25</sub> (μm)	۱۴۱۰	-	۴۵
AVA	d <sub>80</sub> (μm)	۸۰۰۰	۸۰۰	۳۰۰
	d <sub>50</sub> (μm)	۵۵۰۰	۳۰۰	۱۴۰
	d <sub>25</sub> (μm)	۲۱۰۰	۱۳۰	۶۰

در شکل ۴ و جدول ۵ نتایج آزمایش‌های خردایش و دانه‌بندی کانسنگ‌های آهن مورد مطالعه در آسیای میله‌ای در مدت زمان‌های خردایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه آمده است. بر اساس منحنی‌های توزیع دانه‌بندی و همچنین مقدار d<sub>80</sub> تعیین شده، در مدت زمان خردایش ۱۰ دقیقه، کانسنگ‌های ALI و AVA رفتار تقریباً مشابهی داشته‌اند و محصول ریزتری نسبت به کانسنگ BAL تولید کرده‌اند. علت این مسئله می‌تواند فراوانی نسبی و درشت دانه‌بندی ذرات کوارتز در کانسنگ BAL نسبت به دو کانسنگ دیگر باشد. با افزایش زمان خردایش به ۲۰ دقیقه، کانسنگ‌های BAL و AVA محصولات مشابهی تولید کرده و از توزیع دانه‌بندی ریزتری نسبت به کانسنگ ALI برخوردار بوده‌اند. در مدت زمان خردایش ۳۰ دقیقه رفتار خردایشی هر سه کانسنگ تقریباً مشابه و ۸۰ درصد محصول تولید آنها دارای اندازه کمتر از ۷۵ میکرون است. از دیدگاه تولید ذرات نرمه و ریز دانه نمونه BAL منجر به تولید ذرات ریز دانه‌تر و نرمه بیشتر شده است (نسبت به دو نمونه دیگر). علت این مسئله تفاوت در ترکیب کانی‌شناسی و کانی‌های تشکیل دهنده هر نمونه است (جدول ۲). شایان ذکر است که افزایش میزان ذرات نرمه مشکلات متعددی را در مراحل خردایش و همچنین جدایش مغناطیسی ایجاد می‌کند. در مرحله خردایش ذرات نرمه منجر به کاهش ظرفیت آسیا و افزایش مصرف انرژی خواهند شد. در بخش جدایش مغناطیسی نیز این ذرات با آگلومره شده و تشکیل ترکیبات ژلاتینی، کارایی جدایش مغناطیسی را کاهش می‌دهند.





شکل ۴- منحنی‌های توزیع دانه‌بندی کانسنگ‌های مختلف آهن - خروجی آسیای میله‌ای در زمان‌های الف) ۱۰، ب) ۲۰ و ج) ۳۰ دقیقه

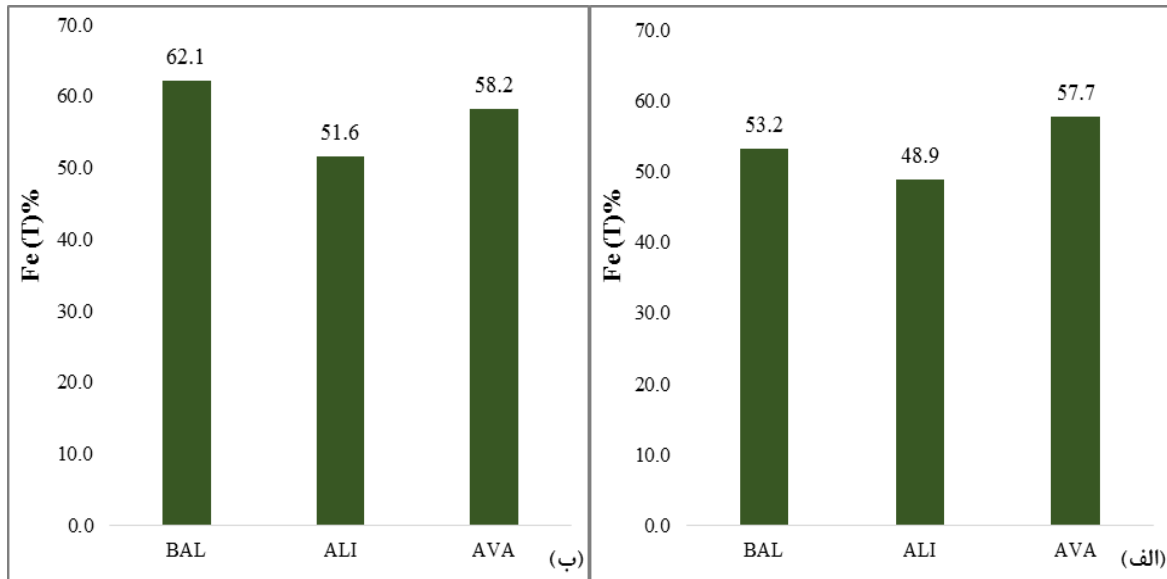
جدول ۵- مقادیر  $d_{80}$  حاصل از توزیع دانه‌بندی کانسنگ‌های مختلف آهن - خروجی آسیای میله‌ای

کانسنگ / زمان خردایش	۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه
BAL	$d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	۲۴۰	۹۰
	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	۷۷	۴۶
	$d_{25}$ ( $\mu\text{m}$ )	۴۰	۲۵
ALI	$d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	۲۱۰	۸۰
	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	۷۰	۴۸
	$d_{25}$ ( $\mu\text{m}$ )	۴۸	۳۸
AVA	$d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	۲۰۰	۸۰
	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	۷۹	۵۰
	$d_{25}$ ( $\mu\text{m}$ )	۳۹	۳۰

### ۲,۳. بررسی رفتار مغناطیسی کانه‌های مختلف آهن

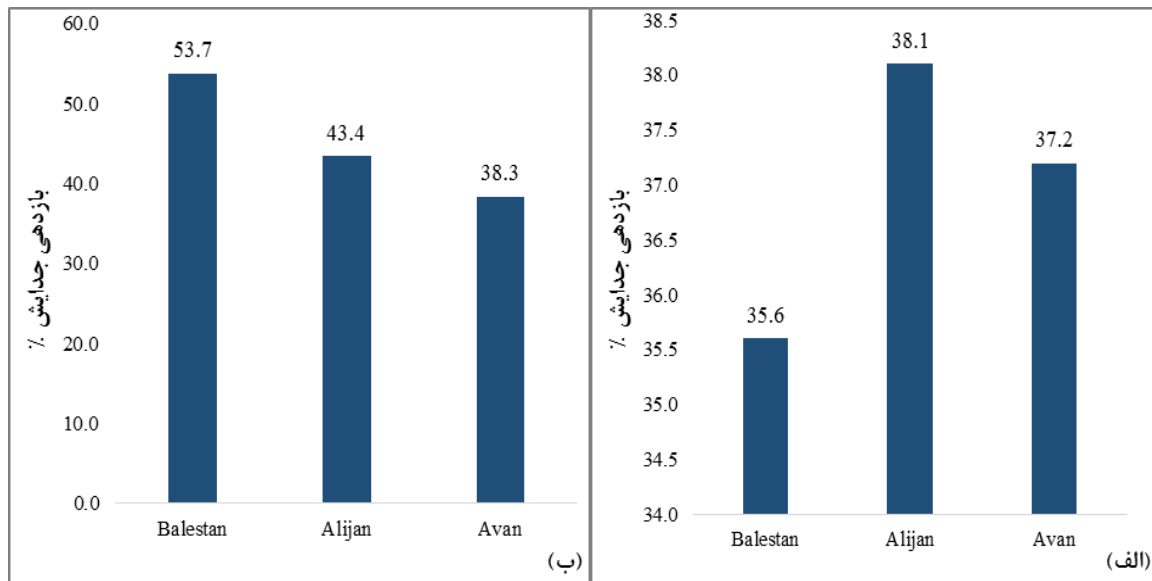
برای بررسی تاثیر خواص خردایشی کانسنگ‌های آهن بر جدایش مغناطیسی آنها، بر روی نمونه‌های خروجی سنگ‌شکن در ابعاد ۱- و ۰-۱/۵ میلی‌متر و خروجی‌های آسیای میله‌ای در مدت زمان‌های مختلف، آزمایش جدایش مغناطیسی در شدت میدان ۲۰۰۰ گوس انجام شده است. در شکل ۵ تغییرات عیار آهن در کنسانتره آزمایش‌های جدایش مغناطیسی برای خوراک در محدوده‌های ابعادی ۱- و ۰-۱/۵ میلی‌متر نمایش داده شده است. برای هر سه نمونه با کاهش اندازه ذرات، عیار آهن در کنسانتره - به دلیل افزایش درجه آزادی و راه-یابی ذرات آزاد مگنتیت به کنسانتره - روند افزایشی داشته است. در محدوده‌های ابعادی ریزتر ۰-۱/۵ میلی‌متر، جدایش مغناطیسی کانسنگ آهن BAL منجر به تولید کنسانتره با عیار بالاتر شده است.



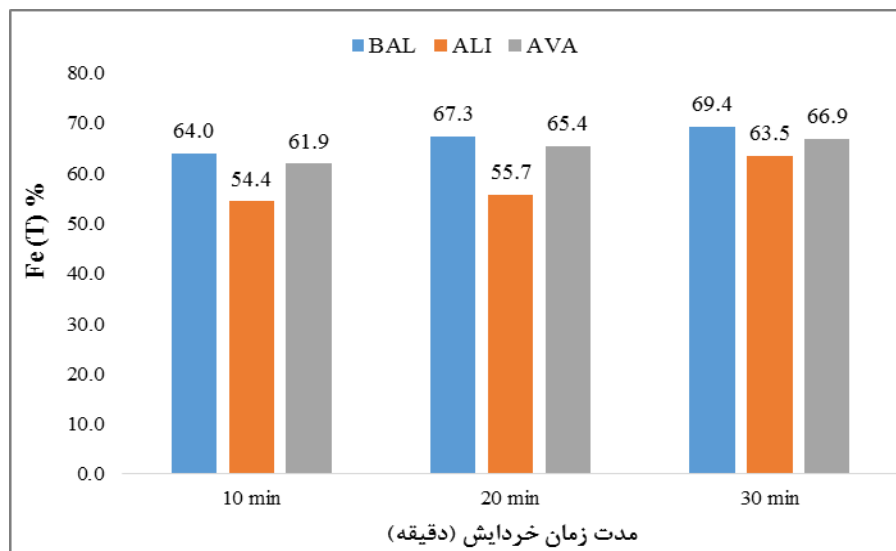


شکل ۵- نمودارهای میله‌ای عیار آهن کل در کنسانتره برای کانسنگ‌های مختلف در محدوده‌های دانه‌بندی الف) ۰-۱ و ب) ۰-۰/۵ میلی‌متر

در شکل ۶ نمودارهای میله‌ای تغییرات بازدهی جدایش مغناطیسی برای هر کانسنگ نمایش داده شده است. در بازه ابعادی درشت‌تر (۱-۰ میلی‌متر) مقادیر کارایی جدایش برای هر سه نمونه کانسنگ آهن کمتر از محدوده ابعادی ۰-۰/۵ میلی‌متر است. دلیل این مسئله درجه آزادی کمتر مگنتیت در ابعاد درشت‌تر است. در محدوده ابعادی ۰-۱ میلی‌متر کانسنگ ALI دارای بیشترین بازدهی جدایش بوده است (۳۸/۱ درصد). بر اساس جدول ۴ در این بازه ابعادی مقدار  $d_{80}$  این کانسنگ ۶۰۰ میکرون و برابر با  $d_{80}$  کانسنگ BAL است؛ در حالیکه بازدهی جدایش کانسنگ BAL در این محدوده ابعادی کمترین مقدار است. بر اساس مطالعات میکروسکوپی در کانسنگ ALI کانی‌های گانگ کوارتز و فلدسپات به صورت جزئی با مگنتیت درگیر هستند. اما در نمونه کانسنگ BAL افشان بودن کانی کوارتز در داخل کانی مگنتیت می‌تواند دلیلی بر پایین آمدن کارایی جدایش آن در این محدوده ابعادی باشد. همانگونه که در قسمت ب شکل ۶ مشاهده می‌شود، با کاهش سایز به ۰-۰/۵ میلی‌متر کارایی جدایش برای کانسنگ آهن BAL ( $d_{80}$  برابر با ۲۵۰ میکرون) به مقدار چشمگیری افزایش یافته است؛ علت این امر افزایش درجه آزادی مگنتیت است. بنابراین می‌توان گفت علاوه بر توزیع دانه‌بندی، نحوه درگیری کانی‌های نیز پارامتری بسیار موثر بر بازدهی جدایش مغناطیسی است. با مقایسه مقادیر  $d_{80}$  سه کانسنگ BAL، ALI و AVA (در محدوده ۰-۰/۵ میلی‌متر) با مقادیر به ۲۵۰، ۴۰۰ و ۳۰۰ میکرون نیز می‌توان گفت که نحوه درگیری مگنتیت با کانی‌های باطله بیشترین تاثیر را در بازدهی جدایش نسبت به اندازه ذرات خوراک داشته است.



شکل ۶- نمودارهای میله‌ای بازدهی جدایش برای کانسنگ‌های معادن مختلف در محدوده‌های دانه‌بندی الف (۱-۰ و ب) ۵/۰-۰ میلی‌متر در شکل ۷ تغییرات عیار آهن در کنسانتره مغناطیسی برای خوراک‌های با  $d_{80}$  مختلف نمایش داده شده است. برای هر سه نمونه، با کاهش اندازه ذرات و در نتیجه افزایش درجه آزادی، عیار آهن در کنسانتره افزایش یافته است. در شکل ۸ نمودارهای میله‌ای تغییرات بازدهی جدایش برای کانسنگ‌های مختلف آهن خروجی آسیای در مدت زمان‌های مختلف خردایش آمده است. برای هر کانسنگ با افزایش مدت زمان خردایش و در نتیجه کاهش اندازه ذرات، کارایی جدایش افزایش یافته است. در خردایش در مدت زمان ۱۰ دقیقه، مقدار  $d_{80}$  برای کانسنگ‌های BAL، ALI و AVA به ترتیب ۲۴۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ میکرون است؛ اما مقدار بازدهی جدایش برای کانسنگ BAL بیشتر از دو کانسنگ دیگر است. بر اساس مطالعات میکروسکوپی در این محدوده ابعادی درجه آزادی کانسنگ BAL بیش از ۹۰ درصد اندازه‌گیری شده است. این در حالی است که درجه آزادی کانسنگ AVA حدود ۷۰ درصد و در آن کانی‌مگنتیت بصورت درگیر با کوارتز و کلسیت مشاهده می‌شود. درجه آزادی کانسنگ ALI نیز در این محدوده ابعادی تقریباً ۸۰ درصد تعیین شده است. بنابراین می‌توان گفت که تغییر در خواص خردایشی کانسنگ‌های مختلف و در نتیجه درجه آزادی آنها، دلیل تغییرات بازدهی جدایش بوده است.

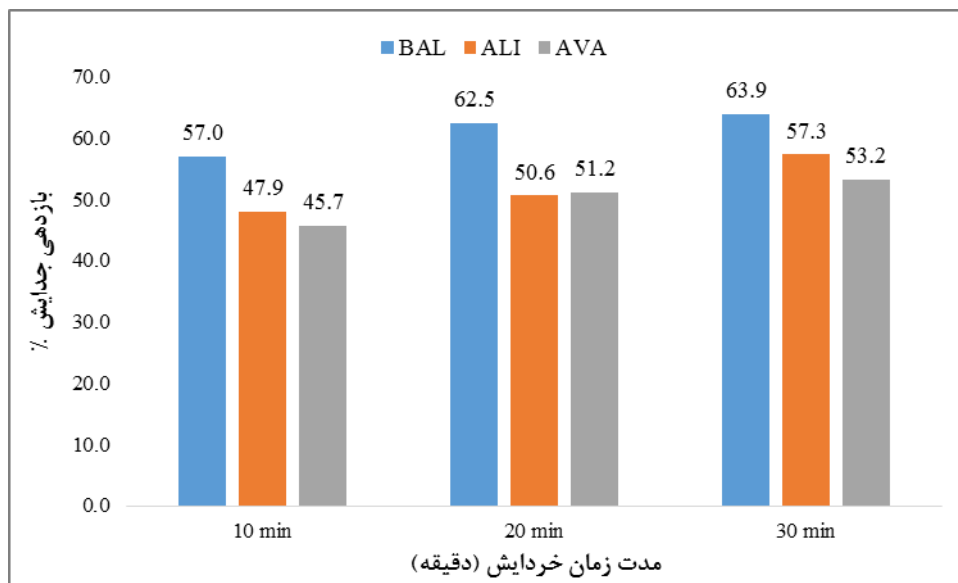


شکل ۷- نمودارهای میله‌ای عیار آهن کل در کنسانتره برای کانسنگ‌های معادن مختلف در زمان‌های خردایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه



با افزایش مدت زمان خردایش به ۲۰ دقیقه، مقدار  $d_{80}$  کانسنگ‌های BAL، ALI و AVA به ترتیب ۹۰، ۱۵۰ و ۹۰ میکرون بوده است. بر اساس شکل ۸ در این حالت هم مقدار بازدهی جدایش کانسنگ بالستان بالاتر از دو کانسنگ دیگر است. دلیل اصلی این مسئله درجه آزادی بالای کانی مگنتیت در کانسنگ BAL است. در مورد کانسنگ ALI با افزایش زمان خردایش به ۲۰ دقیقه، درجه آزادی مگنتیت نسبت به نمونه خرد شده در زمان ۱۰ دقیقه افزایش داشته است؛ با این وجود درگیری‌های قابل ملاحظه‌ای بین مگنتیت و کانی‌های باطله قابل مشاهده است. در کانسنگ AVA درجه آزادی مگنتیت در این محدوده بیش از ۹۰ درصد تعیین شده است. دلیل کارایی پایین جدایش این نمونه می‌تواند ناشی از ذرات نرمه و تاثیر آنها بر بازدهی جدایش مغناطیسی باشد.

در مدت زمان خردایش ۳۰ دقیقه مقدار  $d_{80}$  هر سه کانسنگ تقریباً برابر و بطور متوسط ۷۵ میکرون است؛ علیرغم این مسئله مقادیر بازدهی جدایش متفاوت هستند. بر اساس مطالعات میکروسکوپی برای هر سه کانسنگ مقدار درجه آزادی در این محدوده ابعادی بیش از ۹۰ درصد است. اما در مورد کانسنگ AVA حتی در این محدوده ابعادی ریز ذرات کانی مگنتیت در داخل کانی گارنت قابل مشاهده هستند. این مسئله می‌تواند دلیلی بر کاهش بازدهی جدایش برای کانسنگ AVA باشد.



شکل ۸- نمودارهای میله‌ای بازدهی جدایش برای کانسنگ‌های معادن مختلف در زمان‌های خردایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه

#### ۴. نتیجه‌گیری

فرآوری سنگ آهن یکی از مهمترین فرایندهای زنجیره تولید فولاد و پیش‌نیاز آن است. در سال‌های اخیر با افزایش تقاضای جهانی برای فولاد، تولید سنگ آهن نیز روند افزایشی چشمگیری داشته است. بر اساس آمارهای موجود تا پایان سال ۲۰۲۱ میلادی (USGS)، ایران با تولید سالانه ۳۳ میلیون تنی سنگ آهن، و تولید بیش از ۳۵ میلیون تن فولاد، دهمین کشور تولید کننده فولاد در جهان محسوب می‌شود. ایران با تولید این مقدار از فولاد، بیش از ۷۲ درصد فولاد غرب آسیا را تامین می‌کند. بنابر آمار مذکور و با توجه به رشد تقاضا برای فولاد و بالتبع مواد اولیه آن یعنی سنگ آهن، بهره‌وری از ذخایر کوچک و غیرفعال سنگ آهن از جمله موارد مورد توجه بوده است. همچنین روش‌های استخراج و فرآوری کانه‌های آهن در راستای بهبود بهره‌وری، و تولید محصول با کیفیت بالا، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به وجود ذخایر متعددی از سنگ آهن در نواحی شمالغرب و غرب کشور - در استان‌های آذربایجانغربی، آذربایجانشرقی، کردستان، همدان و زنجان - می‌توان این نواحی را از جمله گزینه‌های مستعد برای افزایش تولید سنگ آهن کشور تلقی نمود. در این معادن بطور معمول کانسنگ استخراجی از معدن، طی مراحل سنگ‌شکنی و جدایش مغناطیسی خشک پرعیار می‌گردد. خروجی این مرحله که



اصطلاحاً سنگ آهن دانه‌بندی نامیده می‌شود، برای تولید کنسانتره آهن (بار ورودی به مرحله ذوب) به کارخانه‌های تولید کنسانتره فروخته می‌شود. همانگونه که در این مقاله بررسی گردید، برای فرآوری محصولات این معادن در یک واحد تولید کنسانتره، چالش‌هایی از دیدگاه حصول بازدهی بهینه وجود دارد. تعیین شاخص‌های فرآوری کانه شامل ترکیب شیمیایی، کانی‌شناسی و درجه آزادی می‌تواند با ارائه اطلاعاتی در مورد هر کانه راهکاری مفید باشد. بر مبنای این اطلاعات دو راهکار بهینه برای بهبود بازدهی کارخانه قابل ارائه است. راهکار اول، ایجاد تغییراتی در مدار مانند تغییر در حد جدایش کلاسیفایرهای مدار خردایش، تغییر سرعت درام مغناطیسی و یا تغییر در تناژ بار ورودی مدار، برای هر خوراک است. راهکار دوم، تعیین الگوی مناسب برای اختلاط کانسنگ‌ها و خوراک‌دهی یکنواخت به مدار کارخانه است.

### منابع

- [1] Al-Wakeel, M. I., El-Rahman, M. K., 2006. Beneficiation of low grade Choragi iron ore, Baha Riya Oasis, Egypt: a case study, Min. Proc Ext Metall. (Trans Inst Mineral Metall. C), 115(4), 177–82.
- [۲] بهرامی، عطاله؛ ایمانی، فاطمه؛ کاظمی، فاطمه؛ میرمحمدی، میرصالح؛ رفیعی، مرتضی؛ ۱۴۰۲. بازیافت آهن از باطله‌های کارخانه سنگ آهن بالستان، نشریه مهندسی منابع معدنی.
- [۳] کاظمی، فاطمه؛ عبدالله زاده، علی اکبر؛ ۱۴۰۰. بکارگیری رویکردهای ژئومتالورژیکی با هدف تعیین روش بهینه بازفرآوری ذخایر باطله کارخانه فرآوری سنگ آهن دانه‌بندی، دهمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان.
- [4] Roy, S. K., Nayak, D., Rath, S. S., 2020. A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation, Powder Technology, 1(367), 796–808.
- [5] Quast, K., 2018. A review on the characterisation and processing of oolitic iron ores, Minerals Engineering, 1(126), 89–100.
- [6] Kojovic, T., Michaux, S. P., Walters, S., 2010. Development of new comminution testing methodologies for geometallurgical mapping of ore hardness and throughput, In XXV International Mineral Processing Congress 2010, IMPC 2010 (Vol. 2, pp. 891-899). Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [7] Qiu, T., Wu, C., Ai, G., Zhao, G., Yu, X., 2015. Effects of multi-stage grinding process and grinding fineness on desulfurization separation of high-sulfurous iron ore, Procedia engineering, 102, 722-730.
- [8] Reichert, M., Gerold, C., Fredriksson, A., Adolfsson, G., Lieberwirth, H., 2015. Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill, Minerals Engineering, 73, 109-115.
- [9] Rodrigues, A. F., Delboni Jr, H., Powell, M. S., Tavares, L. M., 2021. Comparing strategies for grinding itabirite iron ores in autogenous and semi-autogenous pilot-scale mills, Minerals Engineering, 163, 106780.
- [10] Jong, T. P., 2023. A prediction of blend grinding result based on individual ore size measurements and grinding tests, Minerals Engineering, 191, 107950.
- [۱۱] محبی، پارسا؛ ۱۴۰۲. تعیین کلاسیفایرهای اولیه و ثانویه بر اساس کیفیت و مشخصات کانی‌شناسی خوراک سنگ آهن ورودی به مدار کارخانه تولید کنسانتره آهن مهستان فراور اروند، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.