



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

بررسی تأثیر نوع سنگ آهن مصرفی بر خواص گندله‌های خام و پخته شده و آهن اسفنجی تولیدی

مهدی احمدیان^۱، محمدحسن عباسی^۲، مسعود بنجه‌پور^۳
رسول سلیمان پور^۴، سید مصطفی اعتصامی^۵، رضا اسماعیل پور^۶، علیرضا خانی^۷، منوچهر عشیق^۸
۱-۳- دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مواد
۴-۸- شرکت فولاد مبارکه

چکیده

امروزه با توجه به تنوع زیاد سنگ‌های معدنی آهن‌دار و با در نظر گرفتن محدودیت‌های صنعتی، جایگزین کردن سنگ‌های آهنی موجود به جای سنگ‌های دیگر موضوع با اهمیتی برای صنایع آهن و فولاد می‌باشد. در این رابطه جایگزینی بخشی از سنگ آهن گل‌گهر با سنگ آهن چغارت در شرکت فولاد مبارکه مورد نظر می‌باشد. با توجه به تفاوت‌های این دو سنگ نظیر تفاوت در نوع و میزان ناخالصی‌های موجود در آنها پیش بینی می‌شود که خواص و رفتار گندله‌های تولیدی با سنگ‌های متفاوت تغییر یابند. بر این اساس با انجام پژوهش حاضر مشخص گردید که جایگزین کردن سنگ آهن گل‌گهر با سنگ آهن چغارت در فرآیند گندله‌سازی، بر خواص گندله‌های خام و پخته شده و همچنین خواص آهن اسفنجی تولیدی نظیر میزان جذب رطوبت، استحکام فشاری گندله‌های خام و پخته شده و استحکام فشاری، درجه فلز شدگی و درصد آهن فلزی آهن اسفنجی مؤثر می‌باشد.

کلمات کلیدی: آهن اسفنجی، سنگ آهن، گندله و آهن اسفنجی.

مقدمه

نوع سنگ آهن و پارامترهای فرایند گندله سازی بر کیفیت گندله شامل خواص فیزیکی، خواص شیمیایی و خواص متالورژیکی تأثیرات زیادی دارند. لذا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی DRI تولیدی علاوه بر شرایط احیا متأثر از نوع سنگ آهن و شرایط گندله سازی نیز می باشد. در مرحله گندله سازی عواملی همچون نوع سنگ آهن، دانه بندی آن، شرایط گندله سازی (نظیر نوع و میزان مواد افزودنی و ...) بر کیفیت گندله و در مرحله احیا عواملی همچون دمای احیا، ترکیب شیمیایی گاز احیا کننده، افزودن گاز طبیعی و شرایط خنک کردن آهن اسفنجی بر کیفیت DRI تولیدی مؤثر می باشند.

دانه بندی و سطح ویژه مواد اولیه، بالاخص سنگ آهن بر سرعت تشکیل و رشد جوانه ها در فرایند ایجاد گندله بسیار مؤثر هستند. فاکتوری که برای دانه بندی در فرآیند گندله سازی مطرح است درصد سنگ آهن با دانه بندی زیر ۴۵ میکرون (۳۲۵ مش) می باشد. در ساخت گندله مناسبترین حالت موقعی است که این فاکتور به حداکثر برسد. برای افزایش میزان سنگ آهن با دانه بندی زیر ۴۵ میکرون، مقدار انرژی مصرفی آسیاب ها و استهلاک آنها بالا می رود. همچنین خواص گندله نظیر تخلخل نیز تحت تأثیر قرار می گیرد. لذا درصد بهینه سنگ آهن با دانه بندی زیر ۴۵ میکرون برای تشکیل گندله و به دست آمدن خواص مناسب بین ۷۰ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته می شود. با افزایش درصد سنگ آهن با دانه بندی زیر ۴۵ میکرون در مواد اولیه قابلیت گندله شونده گی نیز افزایش می یابد [۱ و ۲]. سطح ویژه مواد اولیه نیز تأثیر مشابهی مانند دانه بندی بر روی خواص گندله دارد. در حین تشکیل گندله نیروهای موئینگی بین ذرات با افزایش سطح ویژه و درصد سنگ آهن با دانه بندی زیر ۴۵ میکرون بیشتر می گردد. با افزایش این نیرو تراکم بین اجزای گندله خام بالا رفته و تخلخل کاهش می یابد. بنابراین استحکام فشاری گندله خام و پخته زیاد می شود. طبق نتایج به دست آمده سطح ویژه بین ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ سانتی متر مربع بر گرم، برای گندله سازی مناسب است [۳]. همچنین دانه بندی بر روی مقاومت غلطشی گندله های پخته نیز اثر مثبتی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردیده است که با افزایش درصد زیر ۴۵ میکرون، سایش گندله های پخته ($< 0.6\text{mm}$ /%) بهبود می یابد. علاوه بر این، دانه بندی بر روی انقباض گندله نیز مؤثر است. با کاهش اندازه ذرات، میزان کاهش حجم گندله های پخته، افزایش پیدا می کند. طبق مطالعات انجام شده، گندله های هماتیته نسبت به مگنتیتی انقباض بیشتری را از خود نشان داده اند [۴].

ترکیب شیمیایی گندله های مورد استفاده برای واحدهای احیای مستقیم بسیار مهم است. بازیسته، مقدار گوگرد، فسفر، آهن کل و FeO باقیمانده از جمله مشخصات شیمیایی مهم در گندله ها می باشند، که باید در مرحله ساخت گندله در نظر گرفته شوند. سنگ آهن های متفاوت دارای ناخالصی ها (نظیر گوگرد و گانگ اسیدی یا بازی) و مشخصات فیزیکی مختلف (نظیر تخلخل و مورفولوژی ذرات

سنگ آهن متفاوت) می‌باشند و لذا یکی دلایل تفاوت در کیفیت گندله و آهن اسفنجی تولیدی، استفاده از کانه‌های آهن دار معادن مختلف می‌باشد. در این تحقیق تأثیر استفاده از سنگ آهن چغارت بر خواص گندله‌های خام و پخته شده و آهن اسفنجی تولیدی بررسی گردیده است.

روش تحقیق

در این پژوهش سه نوع سنگ آهن جهت بررسی تأثیر آن بر خواص گندله‌های خام و پخته شده و آهن اسفنجی تولیدی بررسی شده است. این سنگ‌ها شامل سنگ آهن گل‌گهر، سنگ آهن چادرملو و سنگ آهن چغارت می‌باشند. ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های آهن مصرفی به ترتیب در جداول ۱ تا ۳ آمده است. در آزمایشگاه پابلوت فولاد مبارکه گندله‌هایی با مخلوط سنگ آهن چادرملو- چغارت با درصد های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد سنگ چغارت تولید شده و میزان کربن پذیری آنها تعیین شده‌اند. تأثیر سطح ویژه بر کربن پذیری آهن اسفنجی نیز بررسی شده است. لازم به ذکر می‌باشد که سنگ آهن چادرملو از دانه بندی و سطح ویژه مناسبی برخوردار است و نیازی به آسیاب کردن ندارد ولی سنگ آهن گل‌گهر و چغارت به دلیل درشت دانه بودن آسیاب شده و به سطح ویژه مورد نظر ($2000-2200 \text{ cm}^2/\text{g}$) رسیده‌اند. در گندله‌های تولیدی از مخلوط سنگ آهن چادرملو- چغارت از بنتونیت و سود به ترتیب به میزان ۰/۷ و ۰/۲ در صد استفاده شده است. میزان و نوع این افزودنی‌ها مطابق با افزودنی‌های مصرفی در خط تولید می‌باشند. این مقادیر افزودنی منجر به خواص بهینه در خط تولید شده‌اند، لذا نوع و میزان آن‌ها بر این اساس انتخاب گردیده است. جهت بررسی کیفیت گندله‌های خام تولیدی آزمون‌های مختلف شامل عدد افتادن، استحکام فشاری تر، استحکام فشاری خشک و میزان رطوبت بر استفاده شده‌اند. برای تعیین میزان تخلخل گندله‌های پخته شده از روش جوشاندن در آب استفاده شده است. تعیین سطح ویژه گندله‌های تولیدی توسط روش BET انجام گردید. برای تعیین کیفیت گندله در حین احیا از آزمون‌های چسبندگی و آزمون سبد (Basket) با استفاده از یکی از مدول‌های صنعتی فولاد مبارکه انجام گردید. آزمون‌های سبد حداقل سه مرتبه تکرار گردیدند. در پایان پس از خروج سبدهای حاوی نمونه‌های احیا شده، آهن‌های اسفنجی تولیدی تحت آزمون‌های تعیین ترکیب شیمیایی، درجه فلزشدگی، درصد آهن فلزی و درصد کربن قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تأثیر میزان سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن‌های چغارت-چادرملو بر خواص گندله‌های خام تولیدی در شکل های ۱ تا ۴ آمده است. در شکل ۱ تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در مخلوط گندله بر میزان رطوبت آن نشان داده شده است. همانگونه که از

نمودار میانگین داده‌ها مشهود است، همواره با افزایش درصد سنگ آهن چغارت، میزان رطوبت بطور جزئی کاهش یافته است. بطور کلی مقدار بهینه رطوبت برای گندله بستگی به فاکتورهای نظیر نوع سنگ آهن، مواد اولیه افزودنی، ابعاد و سطح ویژه ذرات، وجود تخلخل، خاصیت جذب آب توسط سطوح کانی، نوع و میزان ناخالصی و مواد گانگ موجود در سنگ آهن دارد. علت این امر با توجه به اثر هر یک از فاکتورهای مذکور در میزان رطوبت گندله و اطلاعات ارائه شده در جدول ۱ می‌توان چنین استنباط نمود که تحت این شرایط عمده‌ترین اختلاف در میزان رطوبت گندله در میان سنگ آهن‌های چادرملو و چغارت در میزان مواد گانگ و سطح ویژه آنها می‌باشد، بطوریکه سطح ویژه سنگ آهن چادرملو بیشتر از سطح ویژه سنگ آهن چغارت می‌باشد [۵].

همانطور که در شکل‌های ۲ تا ۴ مشاهده می‌شود، همواره با افزایش درصد سنگ آهن چغارت مصرف شده، عدد افتادن گندله خام و استحکام آن تحت تأثیر قابل ملاحظه‌ای قرار نمی‌گیرد. از آنجائیکه همواره با افزایش درصد سنگ آهن چغارت، سطح ویژه مخلوط ذرات سنگ آهن در گندله کاهش می‌یابد، این امر می‌تواند باعث کاهش عدد افتادن و در واقع کاهش استحکام فشاری گندله خام شود. از طرف دیگر (مطابق شکل ۷) همواره با افزایش درصد سنگ آهن چغارت میزان تخلخل گندله کاهش یافته، بطوریکه در این حالت می‌تواند منجر به افزایش عدد افتادن و در واقع افزایش استحکام فشاری گندله خام شود. در شکل ۴ نیز تأثیر درصد سنگ آهن چغارت مصرفی در مخلوط گندله بر استحکام فشاری گندله خشک ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، همواره با افزایش درصد سنگ آهن چغارت گندله، استحکام آن تحت تأثیر قابل ملاحظه‌ای قرار نگرفته است. علت این امر را می‌توان با توجه به مطالب ارائه شده در مورد نامحسوس بودن تغییرات استحکام فشاری گندله خام با افزایش درصد سنگ آهن چغارت توجیه نمود زیرا تغییرات استحکام فشاری گندله خشک دقیقاً تابع فاکتورهای مؤثر بر استحکام فشاری گندله خام می‌باشد.

تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن‌های چغارت-چادرملو بر ضریب تست تامبلر، استحکام فشاری گندله‌های پخته شده، میزان چسبندگی گندله‌ها در حین احیا و استحکام فشاری آهن اسفنجی تولیدی در شکل‌های ۵ تا ۸ آمده است. همانگونه که در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود میانگین نتایج تست تامبلر و استحکام فشاری گندله‌های پخته شده با افزایش درصد سنگ آهن چغارت همواره افزایش یافته است. علت اصلی این رفتار می‌تواند ناشی از اثر تغییر ترکیب شیمیایی سنگ آهن موجود در گندله بر فرآیند پخت بویژه مکانیزم سخت شدن گندله ناشی از فازهای سرباره‌ای باشد. از اینرو با توجه به آنالیز شیمیایی و میزان گانگ موجود در سنگ آهن‌های چغارت و چادرملو (مطابق جداول ۳ و ۴) مشاهده می‌شود که میزان گانگ موجود در گندله همواره با افزایش میزان سنگ

آهن چغارت در گندله، افزایش یافته است. با افزایش میزان Al_2O_3 و SiO_2 ، CaO ، MgO به عنوان گانگ و میزان FeO موجود در گندله درصد فازهای سرباره ای که بصورت سیلیکات های آهن با نقطه ذوب پائین ایجاد شده اند، افزایش خواهند یافت که منجر به افزایش پیوندهای سرباره ای در گندله می شوند [۵]. تأثیر میزان سنگ چغارت بر تخلخل گندله تولیدی در شکل ۷ آمده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش میزان سنگ آهن چغارت میزان تخلخل کاهش میابد که به علت تفاوت مورفولوژی ذرات سنگ های مصرفی می باشد [۶].

مطابق شکل ۸ دیده می شود که با افزایش میزان درصد سنگ آهن چغارت در گندله، میزان چسبندگی (خوشه ای شدن) کاهش یافته است. از طرف دیگر دیده می شود (شکل ۹) با افزایش میزان سنگ آهن چغارت در گندله، میزان استحکام فشاری DRI تولیدی افزایش یافته است. همچنین مطابق شکل ۹ دیده می شود، استحکام فشاری از DRI تولیدی از مخلوط سنگ های چغارت-چادرمولو بیشتر یا مشابه DRI تولیدی از گندله خط تولید (نمونه مرجع) می باشد. در مورد میزان چسبندگی و استحکام فشاری DRI، میزان تورم در حین احیا اهمیت زیادی دارد. بطوریکه میتوان پیش بینی نمود که با افزایش میزان سنگ آهن چغارت در گندله، میزان تورم در حین احیا کاهش یافته و در نتیجه میزان چسبندگی کمتر و میزان استحکام فشاری آهن اسفنجی افزایش یافته است.

در شکل های ۱۰ تا ۱۲ تأثیر درصد سنگ آهن چغارت مصرف شده در گندله های تولیدی در پایلوت از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرمولو بر درصد آهن کل، درصد آهن فلزی و درجه فلز شدگی آهن اسفنجی تولیدی بترتیب آمده است. همانگونه در شکل های ۹ تا ۱۱ مشاهده می شود با افزایش درصد سنگ معدن چغارت در ترکیب گندله، قابلیت احیاءپذیری و یا به عبارت دیگر شاخص هایی نظیر درصد آهن فلزی و درجه فلز شدگی به طور جزئی کاهش می یابد. علت این امر تخلخل کمتر گندله هائی است که در آنها سنگ آهن چغارت بیشتر مصرف شده است (شکل ۷). بطوریکه میزان متوسط در صد آهن فلزی و درجه فلز شدگی تقریباً بترتیب برابر ۸۷ و ۹۵ درصد می باشند که مشابه یا بالاتر از نمونه مرجع می باشد. مطابق شکل ۱۲ درصد آهن فلزی در آهن اسفنجی تولیدی از مخلوط سنگ آهن چادرمولو-چغارت بالاتر از آهن اسفنجی خط تولید می باشد که دلیل اصلی آن درصد آهن کل بیشتر در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن چادرمولو-چغارت می باشد (شکل ۱۰).

نتیجه گیری

نوع سنگ آهن مصرفی در ساخت گندله بر خواص گندله‌های خام و پخته شده و آهن اسفنجی تولیدی تأثیر دارد. با افزایش درصد سنگ آهن چغارت در گندله‌های تولیدی از مخلوط سنگ‌های چادرملو- چغارت:

- ۱- درصد رطوبت جذب شده، عدد افتادن و استحکام خشک گندله‌ها بطور جزئی کاهش یافته است.
- ۲- ضریب تست تامبلر، استحکام فشاری گندله‌های پخته شده و استحکام فشاری آهن اسفنجی تولیدی تا حدی افزایش یافته است.
- ۳- میزان تخلخل گندله‌ها کاهش یافته است.
- ۴- میزان چسبندگی گندله‌ها در حین احیاء کاهش یافته است.
- ۵- درجه فلز شدگی و درصد آهن فلزی در آهن اسفنجی بطور جزئی کاهش یافته است.

مراجع

- [1] K. Meyer, "Pelletizing of Iron Ores", Verlag Berline Heidleberg, New York, 1980.
 [2] H. Rumpf, "The strength of granules and agglomerates", Agglomeration, New Yourk, Interscience 1962.
 [۳] ناصر توحیدی و رامرز وقار، "آماده سازی بار کوره‌های تولید آهن و فولاد"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.

- [4] Martinez-vera, Enrique R, "Method for carburizing sponge iron", United States Patent No. 4224057, 1980.
 [5] LI. Guangqiang, Jianghua MA., Hongwei NI., "Influences of Oxide Additions on Formation Reaction of Iron Carbide at 1023 K", ISIJ International, 2006, Vol. 46, No. 7, pp. 981-986.

[۶] مهدی احمدیان، محمدحسن عباسی، مسعود پنجه پور و ...، "ارزیابی تأثیر نوع سنگ آهن مصرفی بر میزان کربن آهن اسفنجی"، سمپوزیوم فولاد ۸۶، منطقه ویژه مواد معدنی و فلزی خلیج فارس، بندرعباس، ۱۳۸۶.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سنگ های معدنی چغارت، چادرملو و گل گهر.

Fe _t	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	P	S	Mn	V	
66.72	18.18	2.31	0.419	0.47	0.196	0.922	0.11	0.048	0.248	0.026	0.04	چغارت
68.35	14.17	2.115	0.316	0.452	0.252	0.182	0.13	0.046	0.048	0.075	0.27	چادرملو
68.16	25.28	1.459	0.248	0.416	0.059	1.553	0.12	0.039	0.625	0.028	0.31	گل گهر

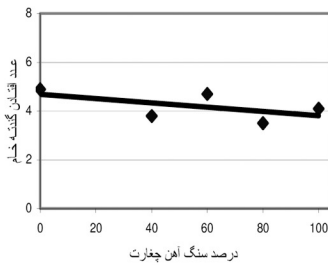
جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگ آهن های مصرفی.

وزن مخصوص (g/cm ³)	درصد دانه بندی زیر ۴۵ میکرون	سطح ویژه (cm ² /g)	نوع سنگ آهن
۵	۷۹/۹۴	۱۸۶۰	چادرملو
۴/۹۵	۶۸/۶	۲۱۲۰	گل گهر
۴/۹۷	۵۳/۱	۲۰۰۰	چغارت

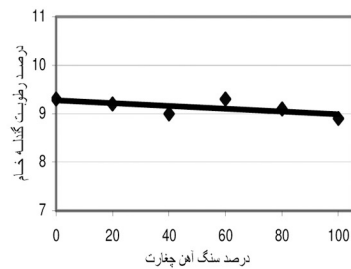
جدول ۳. مشخصات شیمیایی سنگ آهن های مصرفی.

کمانگ: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$

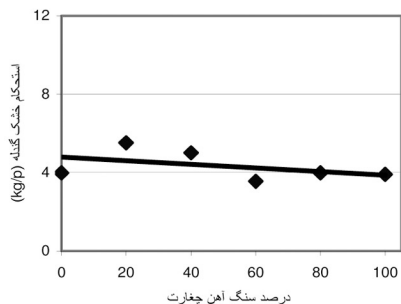
نوع سنگ آهن	درصد کمانگ %	بازیسینه (B4)	بازیسینه (B2)
چادرملو	۳/۴۴۷	۰/۲۵	۰/۲۱۴
گل گهر	۳/۸۵۵	۱/۱۵	۰/۲۸۵
چغارت	۴/۴۲۷	۰/۵۱	۰/۲۰۳



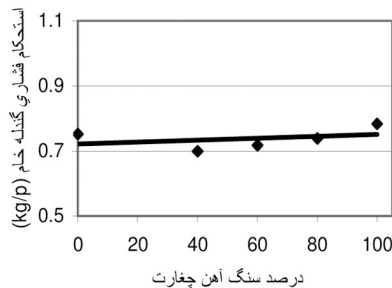
شکل ۲. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر میزان عدد افتادن گندله خام.



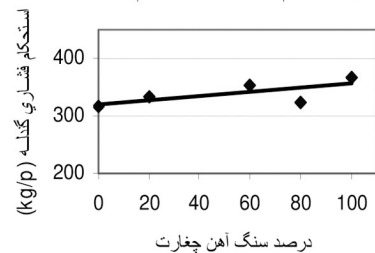
شکل ۱. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر میزان رطوبت گندله خام.



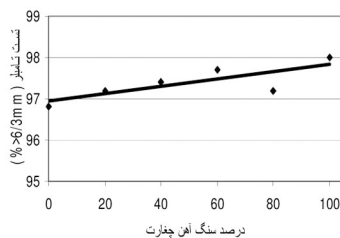
شکل ۴. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر استحکام فشاری گندله خام خشک شده.



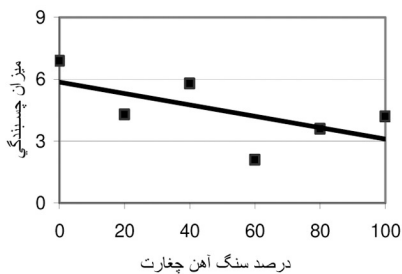
شکل ۳. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر استحکام فشاری گندله خام.



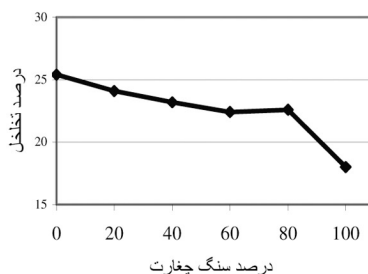
شکل ۶. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر استحکام فشاری گندله های پخته شده.



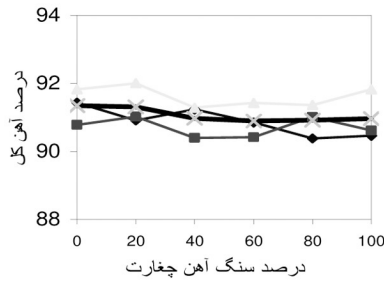
شکل ۵. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر مقاومت گندله های پخته شده در تست تامبلر.



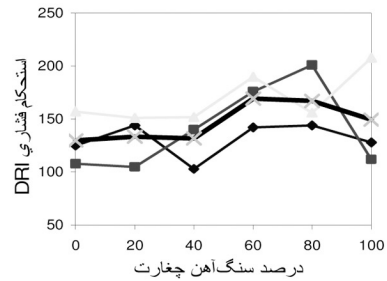
شکل ۸. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر میزان چسبندگی گندله های پخته شده در حین احیاء.



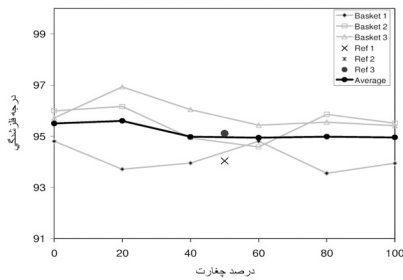
شکل ۷. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر درصد تخلخل گندله.



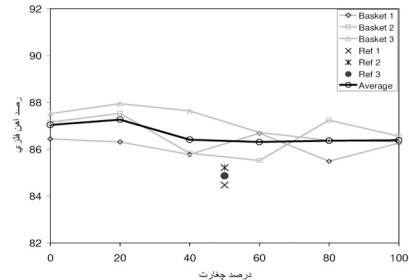
شکل ۱۰. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر درصد آهن کل آهن اسفنجی.



شکل ۹. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر استحکام فشاری آهن اسفنجی.



شکل ۱۲. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر درجه فلز شدگی آهن اسفنجی تولیدی.



شکل ۱۱. تأثیر درصد سنگ آهن چغارت در گندله تولیدی از مخلوط سنگ آهن های چغارت-چادرملو بر درصد آهن فلزی آهن اسفنجی.