

## اثر عوامل مؤثر بر فرآیند تشکیل گندله آهن در دیسک‌های گندله‌سازی- رویکرد آزمایشگاهی

اکبر جعفری<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی عربی پاریزی<sup>۲،۳</sup>، غلامحسین برادران<sup>۲</sup>، مهدی عزیز کریمی<sup>۲</sup>، علی مهربانی<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳- مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر، سیرجان، ایران.

### چکیده

در تحقیق حاضر با روش آزمایشگاهی اثر عوامل شیب و سرعت چرخشی دیسک گندله‌سازی و همچنین درصد رطوبت و بنتونیت بر کارایی فرآیند تولید گندله مطالعه گردید. مقدار اندازه میانه (شاخص سایز) و عدد افتادن (شاخص استحکام) به‌عنوان ویژگی‌های اساسی گندله تولیدی در نظر گرفته شده است. با توجه به تعدد عوامل اثرگذار، فرآیند طراحی آزمایش با رویکرد سطح پاسخ نوع مرکب مرکزی اجرا و تعداد آزمایش‌های لازم و همچنین مقدار متغیرهای آنها تعیین گردید. برای رسیدن به توابع ریاضی صریح، برازش منحنی روی نتایج آزمایشات انجام و توابعی چهار متغیره برای دو ویژگی اندازه میانه و عدد افتادن بر حسب چهار عامل معرفی شده استخراج شد. برای پی بردن به جزئیات و نقش هر کدام از عوامل بر نتایج، نمودارهای لازم تهیه و علاوه بر مشخص شدن آثار هر کدام از آنها، تاثیر متقابل دوطرفه نیز بررسی گردید. با مشخص شدن نوع اثرگذاری هر پارامتر، در مورد دلایل و تفسیر فیزیکی آنها بحث گردید. در مجموع مشخص شد که برای دو فاکتور سرعت چرخش و شیب دیسک، محدوده بهینه‌ای وجود دارد که منجر به کسب گندله مطلوب از هر دو منظر اندازه و استحکام می‌گردد. بعلاوه، مشخص شد که رطوبت و بنتونیت در محدوده مورد بررسی لزوماً تاثیر هم‌زمان مثبت بر اندازه و استحکام محصول ندارند. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند محدوده مناسبی از تنظیم عوامل مؤثر در تولید گندله را در اختیار قرار دهد که برای کارخانه‌های تولیدی این محصول مفید و کاربردی خواهد بود.

### کلمات کلیدی

دیسک گندله‌سازی، آهن‌سازی، بنتونیت، رطوبت.

## Studying effects of pelletizing process parameters on the main properties of iron ore green pellets-laboratory approach

Akbar Jafari<sup>\*1</sup>, Mohamad Mahdi arabi Parizi<sup>2,3</sup>, Gholamhosein Baradaran<sup>2</sup>, Mahdi Azizkarimi<sup>3</sup>, Ali Mehrabani<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

3- Pelletizing plant, GolGohar Mining and Industrial Complex, Sirjan, Iran.

### Abstract

In the present research, effect of pelletizing disk angle and rotation speed, as well as the percentage of moisture and bentonite on the median size (pellets size distribution index) and the mean drop number (pellets strength index) are studied experimentally. Design of experiment approach is applied leading to obtain reasonable number of experiments with specific settings. To achieve parametric mathematical functions, curve fitting is performed on the experimental results and four-variable functions were developed for the two characteristics of median size and drop number. In order to reveal the details and the role of each factor on the results, the necessary contour graphs are prepared. Based on the observed influences of each parameter on the pellets characteristics, the probable reasons and their physical interpretation were discussed. It was found that there are optimal settings for the two factors of rotation speed and disc inclination, leading to obtain the desired pellet from both the size and strength perspectives. In addition, it was found that in the studied range, the moisture and bentonite do not necessarily have a positive effect on both pellets size and strength concurrently. The results of the present research can be useful for pellet production plants as assist to arrive optimal settings of the production process.

### Keywords

Iron production, Pelletizing disk, Bentonite, Moisture.

## ۱-مقدمه

آهن غالباً به صورت سنگ‌های اکسیدی با ترکیب‌های مختلفی وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به هماتیت و مگنتیت اشاره کرد. طی فرآیند تولید آهن خالص، سنگ آهن را پس از استخراج از معدن آسیاب می‌کنند تا حذف ناخالصی‌ها و تغلیظ آن میسر گردد. ذرات سنگ آهن پر عیار شده را نمی‌توان به صورت مستقیم در کوره‌های احیا مورد استفاده قرار داد چرا که تحت جریان گاز احیاگر به صورت گرد و غبار خارج می‌شوند که باعث آلودگی و اتلاف بار کوره می‌گردد. از آنجا که پودر سنگ آهن آسیاب شده بسیار نرم است، طی حمل و نقل با کامیون، قطار یا نوار نقاله بخش قابل توجهی از آن بواسطه وزش باد هدر می‌رود. بعلاوه غبار سنگ آهن می‌تواند برای محیط زیست و همچنین شاغلین در محیط مضر باشد.

به همین دلیل این نرمه‌ها را به صورت کلوخه یا گندله<sup>۱</sup> در می‌آورند [۱، ۲]. اصول فرآیند گندله‌سازی<sup>۲</sup> به این ترتیب است که کنسانتره سنگ آهن را با یک چسب معدنی از جمله بنتونیت، آهک و مقدار معینی آب مخلوط می‌کنند و در استوانه یا دیسک، دوران می‌دهند و در نتیجه گندله‌های تقریباً کروی با اندازه‌های متفاوت شکل می‌گیرند. تولید گندله در دیسک دوار از سال ۱۹۵۰ و توسط شرکت لورگی<sup>۳</sup> به صنعت معرفی شد و بتدریج جانشین گندله‌سازی در استوانه دوار شده است. دیسک گندله سازی صنعتی معمولاً به قطر حدود ۶ تا ۱۰ متر و ارتفاع لبه آن ۳۰ تا ۷۰ سانتی متر است. این دیسک معمولاً با افق زاویه‌ای در محدوده ۴۰ تا ۵۰ درجه می‌سازد و با سرعت ۱۰ تا ۳۰ دور بر دقیقه می‌چرخد [۳]. پودر تغذیه توسط نوار نقاله در محل مناسبی از دیسک ریخته و آب توسط نازل‌هایی بر روی آن‌ها پخش می‌شود. تیغه‌هایی

به نام اسکرپر نیز در سیستم تعبیه شده که نه تنها از انباشته شدن مواد جلوگیری می‌کند بلکه جریان مواد بر روی دیسک را کنترل می‌نماید. دوران دیسک باعث می‌شود که ذرات روی هم از بالا به پایین غلتیده و در اثر تماس با یکدیگر، بر قطر آن‌ها افزوده

شود و به دفعات با دوران دیسک، به قسمت بالای دیسک منتقل شده و عمل غلتیدن تکرار می‌شود. بطور خلاصه تولید گندله خام شامل مراحل زیر است [۳، ۴]:

- تشکیل جوانه در اثر تماس اولیه ذرات با یکدیگر
- رشد جوانه
- تشکیل گندله از طریق غلتیدن گلوله‌های اولیه در بستری از مواد روی دیسک و رشد آن‌ها در اثر پیوندهای متعدد بعدی جوانه‌ها توسط ذراتی که فیلمی از آب دور آن‌ها تشکیل شده است به وجود می‌آیند. معمولاً در محل سقوط بار روی دیسک، آب به صورت اسپری به سطح بار و روی ذرات پاشیده می‌شود و بدین ترتیب جوانه‌ها تشکیل می‌گردند. هر چند فرآیند چسبیدن ذرات به همدیگر و گندله سازی صنعتی در کارخانه‌های واقع در نقاط مختلف جهان در حال انجام است ولی همچنان افزایش راندمان فرآیند مورد انتظار است و تحقیقات در این رابطه ادامه دارد [۷-۵]. در همین رابطه روش‌های جدیدی از جمله پردازش تصویر نیز مورد تحقیق قرار گرفته و به سمت صنعتی شدن می‌روند [۱۳-۸]. بعلاوه، امروزه تکیه بر ملاحظات محیط زیستی و بهره گیری از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی نیز در حال گسترش است [۱۶-۱۴]. باید تاکید نمود که به علت وابستگی فرآیند به ویژگی‌های عناصر و شاخص‌های مواد تشکیل دهنده، هر چند نتایج تحقیق روی یک معدن یا یک کارخانه می‌تواند اطلاعات مفیدی برای دیگران فراهم نماید ولی لزوماً در جزئیات بطور کامل با هم سازگار نیستند. از اینرو تحقیقات اختصاصی با تکیه بر ویژگی‌های محلی را طلب می‌نماید [۱۷، ۱۸] و پژوهش جاری نیز در همین راستا صورت گرفته است. تجربه نشان می‌دهد که ذرات درشت و همچنین مواد ناخالص نیز می‌توانند به‌عنوان جوانه عمل کنند. رشد جوانه‌ها در اثر غلتیدن ذرات و برخورد با سایر ذرات صورت می‌گیرد. ابعاد گندله‌های تشکیل شده به قطر دیسک، شیب، سرعت چرخش و ارتفاع لبه دیسک بستگی دارد. طی تشکیل گندله‌ها، به تدریج طبقه بندی شده به طوری که

<sup>۱</sup>Pellet

<sup>۲</sup>Pelletizing

<sup>۳</sup>Lurgi

پذیری ذرات تاثیر گذار بوده و به نوبه خود به جنس، اندازه ذرات و هندسه آنها وابسته است. طبق استاندارد ASTM C ۲۰۴-۰۷ این شاخص بر اساس زمان مورد نیاز برای عبور حجم معینی هوا از میان بستر نمونه تعیین می‌شود. در اینجا شاخص بلین کنسانتره مورد استفاده حدود ۱۳۰۰ بوده است.

جدول ۱- جدول توزیع دانه‌بندی کنسانتره مورد استفاده در

## آزمایش‌ها

اندازه هر سرنده (میکرومتر)	مقدار روی هر سرنده (g)	درصد تجمعی عبوری
۲۵۰	۱.۱۵۸	۹۹.۳
۱۸۰	۲.۷۲۹	۹۷.۶۸
۱۲۵	۱۰.۳۳۵	۹۱.۵۱
۹۰	۱۷.۷۵۲	۸۰.۹۲
۷۵	۹.۴۱۹	۷۵.۳
۵۳	۱۹.۶۰۶	۶۳.۶
۳۸	۱۷.۳۷۳	۵۳.۲۴
.	۸۹.۲۴۸	.

بنتونیت مورد استفاده در آزمایش‌ها از ترکیب ۳۵ کیلوگرم تولیدی گهر پودر و ۱۸ کیلوگرم تولیدی کانه گستر بوده است. مشخصات بنتونیت نهایی استفاده شده توسط آنالیز XRF به دست آمده و در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲- ترکیب عناصر بنتونیت مورد استفاده در آزمایشات

عنصر	P	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>
درصد	۰.۰۲۲	۶۴.۳۱	۱۳.۵۲	۳.۹۶	۲.۳۸	۰.۲۳

بر اساس نتایج آزمایش‌ها، میزان جذب رطوبت بنتونیت و بلین آن به ترتیب ۵.۷۳ درصد و ۴۲۴۲ گرم بر سانتی‌متر مربع به دست آمده است. اگر وزن کل مواد را با  $X$  نشان دهیم از جمع وزنی کنسانتره آهن، بنتونیت، آب (رطوبت)، و سود سوزآور بدست می‌آید که به ترتیب با  $C$ ،  $B$ ،  $M$  و  $N$  نمایش داده می‌شوند. بدین ترتیب درصد وزنی هر کدام از اجزای معرفی شده شامل  $c$ ،  $b$ ،  $m$  و  $n$  از روابط زیر تعیین می‌شوند. برای مخلوط شدن کامل مواد، از یک همزن پره‌ای ساخت شرکت ایریک آلمان

گندله‌های ریزتر در زیر و درشت‌ترها بر روی آنها قرار گرفته و بصورت سر ریز خارج می‌شوند. گندله‌های خارج شده بر روی نوار نقاله ریخته و به فرآیند بعد فرستاده می‌شوند [۲، ۴].

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در صنعت همواره تلاش می‌شود که گندله‌های هر چه مطلوب‌تری تولید نمود که مهم‌ترین شاخص‌های آن اندازه و استحکام است. از اینرو تحقیقات کاربردی و میدانی در حال توسعه هستند. هدف کاربردی تحقیق حاضر این است که با روش آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر محصول تولیدی دیسک گندله‌سازی بررسی و چگونگی اثر گذاری آنها شناسایی گردد. علاوه بر این، طی این مطالعه با جزئیات به چگونگی اثرگذاری متغیرها پرداخته می‌شود و توابعی ریاضی برای هر کدام از آنها ارائه می‌گردد. با در اختیار قرار گرفتن توابع ریاضی، تاثیر منفرد هر متغیر و تاثیر متقابل متغیرها بررسی شده و شرایط بهینه تعیین می‌گردد. با استناد به نتایج حاصل، محدوده بهینه تنظیمات در شرایط کار واقعی روشن‌تر می‌شود و می‌تواند در کاهش زمان‌های آماده‌سازی و هزینه‌ها تاثیر گذار باشد.

## ۲- مواد و روش پژوهش

برای انجام آزمایش‌ها از کنسانتره مگنتیتی آهن خطوط ۵ و ۶ شرکت گل‌گهر و با همان کیفیت شرایط واقعی استفاده گردید. برای تعیین دانه بندی از الک‌های لرزشی آزمایشگاهی استفاده شده و مشخصات بدست آمده برای دانه‌بندی این کنسانتره در جدول ۱ درج گردیده است. با استفاده از آنالیز دستگاهی XRF ترکیب درصد وزنی عناصر شامل ۶۸ درصد آهن (Fe)، ۲۳.۷۳ درصد اکسید آهن (FeO) و ۰.۲۱۴ درصد گوگرد (S) است. در واقع کنسانتره مذکور غالباً مگنتیت بوده و خاصیت مغناطیسی دارد و بر اساس آنالیز انجام شده مقدار مگنتیت آن ۷۶.۴۳ درصد و مقدار هماتیت آن ۱۸.۰۸ درصد بدست آمده است. باقیمانده آن نیز گانگ‌هایی از جمله CaO، SiO<sub>2</sub>، MgO، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> هستند. یکی از ویژگی‌های مهم مواد پودری میزان سطح موثر آنهاست که معمولاً بر حسب سانتی متر مربع بر گرم اندازه گیری شده و با شاخصی به نام بلین<sup>۱</sup> شناسایی می‌شود. این ویژگی در تراکم

جدول ۳: متغیرها و سطوح عددی قابل انتخاب مربوط به هر کدام

متغیر	نماد و واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
سرعت	$N(\text{rpm})$	۱۶	۲۰	۲۴	۲۸	۳۲
شیب	$\alpha^\circ$	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵
درصد بنتونیت	$b(\%)$	۰.۴	۰.۷	۱.۰	۱.۳	۱.۶
درصد رطوبت	$m(\%)$	۶.۵	۷.۰	۷.۵	۸.۰	۸.۵

برای تعیین تعداد آزمایش‌ها از یک الگوریتم طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ نوع CCC استفاده شده است. برای اجرای فرآیند طراحی آزمایش و تعیین شرایط هر آزمایش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۱۱ استفاده گردید [۱۹]. بر این اساس، تعداد ۲۶ آزمایش طراحی گردید که مقدار هر کدام از چهار متغیر در هر آزمایش در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر متغیرها در هر کدام از آزمایش‌ها

#	$N$ (rpm)	$\alpha^\circ$	$b$ %	$m$ %	#	$N$ (rpm)	$\alpha^\circ$	$b$ %	$m$ %
۱	۲۴	۴۵	۰.۴	۷.۵	۱۴	۲۴	۵۵	۱	۷.۵
۲	۲۸	۴۰	۱.۳	۸	۱۵	۲۰	۵۰	۰.۷	۸
۳	۲۸	۴۰	۱.۳	۷	۱۶	۱۶	۴۵	۱	۷.۵
۴	۲۸	۵۰	۰.۷	۷	۱۷	۲۸	۴۰	۰.۷	۸
۵	۲۴	۴۵	۱	۶.۵	۱۸	۲۴	۴۵	۱	۸.۵
۶	۲۸	۴۰	۰.۷	۷	۱۹	۲۴	۳۵	۱	۷.۵
۷	۲۰	۵۰	۱.۳	۷	۲۰	۲۸	۵۰	۱.۳	۸
۸	۲۴	۴۵	۱.۶	۷.۵	۲۱	۲۸	۵۰	۰.۷	۸
۹	۲۴	۴۵	۱	۷.۵	۲۲	۳۲	۴۵	۱	۷.۵
۱۰	۲۰	۴۰	۰.۷	۸	۲۳	۲۰	۴۰	۰.۷	۷
۱۱	۲۴	۴۵	۱	۷.۵	۲۴	۲۰	۵۰	۱.۳	۸
۱۲	۲۸	۵۰	۱.۳	۷	۲۵	۲۰	۴۰	۱.۳	۷
۱۳	۲۰	۵۰	۰.۷	۷	۲۶	۲۰	۴۰	۱.۳	۸

لازم به ذکر است که جهت افزایش اطمینان به نتایج آزمایش‌ها، هر کدام دو بار انجام شده است. توضیح دیگر اینکه، سود سوزآور همواره به مقدار ۰.۵ درصد بوده که برای ۶۰ کیلوگرم

استفاده شده است. توضیح جزئیات روش آماده سازی در بخش آماده سازی خوراک در ادامه مقاله آمده است.

$$c = \frac{C}{X} \times 100, b = \frac{B}{X} \times 100, \quad (1)$$

$$m = \frac{M}{X} \times 100, n = \frac{N}{X} \times 100$$

مخلوط بدست آمده وارد یک دیسک گندله‌سازی آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ شده و با طی فرآیندی که در ادامه تشریح می‌شود گندله تولید می‌گردد. دیسک گندله‌سازی ساخت شرکت اتوتک<sup>۱</sup> بوده و مشخصات اصلی آن بدین شرح است:

- قطر دیسک: ۸۰ cm
- شیب دیسک بین ۱۰ تا ۷۰ درجه قابل تغییر است.
- ارتفاع لبه دیسک: ۱۲.۵ cm
- سرعت دوران قابل تنظیم و حداکثر قابل انتخاب 32rpm



شکل ۱- تصویری از دیسک گندله سازی مورد استفاده

#### ۱-۲- طراحی آزمایش

در عمل چهار عامل یا فاکتور مؤثر بر فرآیند شامل سرعت چرخش دیسک ( $N$ )، شیب دیسک ( $\alpha$ )، درصد بنتونیت ( $b$ ) و درصد رطوبت ( $m$ ) انتخاب گردید که از لحاظ اجرایی قابل کنترل هستند. جهت طراحی آزمایش‌ها، در اینجا پنج سطح برای هر کدام از این متغیرها مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

تخلیه صورت گرفته است. باید دقت داشت که معمولاً مقداری از خمیر در ته دیسک می‌چسبد و جدا از بقیه مواد تخلیه و در یک ظرف نگهداری شده و در نهایت به عنوان ته دیسک ثبت می‌گردد.



شکل ۲- نمایش از خوراک دهی دیسک آزمایشگاهی در زمان

### گندله‌سازی

### ۳- اندازه‌گیری ویژگی‌های محصول تولیدی و برازش منحنی

پس از تولید گندله، باید خواص مختلف آن اندازه‌گیری گردد تا بتوان وابستگی آنها به شرایط آزمایش را مطالعه نمود. ویژگی‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل توزیع اندازه گندله‌ها، و همچنین استحکام آنهاست که در ادامه به توضیح آنها پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱- شاخص اندازه گندله‌ها و تعیین اندازه میانه ( $D_{50}$ )

برای تعیین دانه‌بندی از الک‌هایی با اندازه روزه ۶.۳، ۸، ۱۰، ۱۲.۵، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر استفاده گردیده است. این الک‌ها در طبقات روی هم از درشت به ریز از بالا به پایین قرار گرفته‌اند. وزن گندله باقیمانده روی هر الک مشخص کننده سهم گندله در یک محدوده اندازه مشخص است. اعداد بدست آمده در قالب جدول ثبت و به عنوان آنالیز سرنندی شناخته می‌شود. با در اختیار قرار گرفتن توزیع اندازه، شاخصی به نام اندازه میانه ( $D_{50}$ ) تعیین می‌شود که بیانگر اندازه‌ای است که ۵۰ درصد وزن گندله‌ها بزرگ‌تر از آن و ۵۰ درصد دیگر کوچک‌تر از آن باشند.

#### ۳-۲- شاخص استحکام با عدد افتادن ( $D_n$ )

ویژگی دیگر گندله، استحکام آن است که با شاخصی به نام عدد افتادن شناسایی شده و بیانگر مقاومت آن در برابر متلاشی شدن است. بر اساس استاندارد، یک گندله خام تولیدی از ارتفاع ۴۶ سانتی‌متری بر روی یک صفحه فولادی رها می‌شود و این کار

مواد معادل ۳۰ گرم خواهد بود. این مقدار در استوانه مدرج توزین، سپس جهت رقیق شدن و اختلاط مطلوب یک لیتر آب به آن اضافه شده است.

#### ۲-۲- آماده سازی خوراک دیسک

ابتدا یک نمونه سه تنی از کنسانتره خطوط ۵ و ۶ تولید کنسانتره گل گهر تهیه شد که مقداری کافی برای تعداد آزمایشات است. برای انجام هر آزمایش مقدار ۶۰ کیلوگرم برداشت و داخل دستگاه میکسر ریخته شده و به مدت ۲۰ ثانیه مخلوط گردید. پس از اضافه شدن بنتونیت، اختلاط به مدت ۵ ثانیه دیگر ادامه یافته است. در نهایت محلول سود سوزآور را به همراه رطوبت مورد نیاز باقی مانده از طریق دوش بالای میکسر به آن اضافه کرده و ۲۰ ثانیه دیگر همزنی شده است. دلیل اینکه زمان محدودی

برای هم زدن در نظر گرفته شده این است که طولانی‌تر شدن آن می‌تواند سبب تشکیل جوانه‌ها و یا ریز گندله در مخلوط گردد. در ادامه، یک نمونه از مخلوط به دست آمده تعیین رطوبت شده است. برای حصول اطمینان از این که رطوبت بر شرایط تعیین شده منطبق باشد، از چند جای میکسر نمونه برداشت و رطوبت سنجی گردید. در صورت عدم انطباق، به مقدار لازم رطوبت یا مخلوط کنسانتره اضافه شده است.

#### ۳-۲- خوراک دهی دیسک

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده، مخلوط به دست آمده توسط یک نوار نقاله با نرخ ۴ کیلوگرم بر دقیقه به عنوان خوراک روی دیسک ریخته می‌شود. بدین ترتیب طی مدت حدود ۶.۲۵ دقیقه همه خوراک وارد دیسک می‌شود. لازم به ذکر است که به ازای هر یک دقیقه به مدت ۵ ثانیه رطوبت از طریق نازل بالای دیسک به مواد اضافه می‌شود. این رطوبت زدن به دیسک تا دقیقه ۷ انجام شده و بعد از آن متوقف گردیده است. به تجربه ثابت شد که اگر زمان کارکرد دیسک از حد مشخصی کمتر باشد حداقل گندله لازم تولید نمی‌شود. از اینرو برای همه آزمایش‌ها زمان یکسانی اختصاص یافت و فرآیند چرخش دیسک همچنان تا ۱۵ دقیقه دیگر پس از اتمام رطوبت زنی ادامه داشته و سپس

منحنی نرم افزار دیزاین اکسپرت ۱۱ استفاده شده است. در اینجا از تابع درجه دوم با چهار ضریب ثابت بصورت زیر استفاده شده است. بدین ترتیب تابع درجه دوم برازش شده برای اندازه میانه و عدد افتادن بترتیب بصورت زیر بدست می آید.

$$D_{50} = -245.58 + 3.91N + 6.5\alpha + 17.9b + 11.54m - 0.03N\alpha - 0.41b\alpha - 0.21m\alpha - 0.051N^2 - 0.04\alpha^2 \quad (2)$$

$$D = -42.27 + 0.47N + 0.52\alpha - 3.41b + 7.2m - 0.004\alpha N + 0.068bN + 0.046ab - 0.12bm - 0.007N^2 - 0.005\alpha^2 + 0.52b^2 - 0.46m^2 \quad (3)$$

برای بررسی میزان دقت تابع برازش شده، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب تعیین تعدیل یافته ( $R_{adj}^2$ ) در مدل رگرسیونی تعیین گردید. به ازای تابع بدست آمده برای اندازه میانه ضریب تعیین به مقدار  $R^2 = 0.95$  بدست آمده که نزدیک بودن آن به یک بیانگر مطلوب بودن تابع است [۲۲]. با این وجود برای اطمینان بیشتر، ضریب تعیین تعدیل یافته نیز محاسبه گردید که در این مورد  $R_{adj}^2 = 0.9233$  بدست آمد که مقدار آن نیز انحراف زیادی از واحد ندارد. همچنین به ازای تابع بدست آمده برای عدد افتادن ضریب تعیین به مقدار  $R^2 = 0.928$  و ضریب تعیین تعدیل یافته به مقدار  $R_{adj}^2 = 0.837$  بدست آمده‌اند. مقادیر بالای ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته نشان می‌دهند که مدل انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

#### ۴- نتایج و بحث

برای مطالعه اثر هر کدام از متغیرهای مستقل بر دو شاخص وابسته یعنی اندازه میانه و عدد افتادن می‌توان هر یک را به صورت مستقل بررسی نمود یا این که آنها را در قالب گراف‌های دو متغیره مطالعه نمود. واقعیت این است که هر کدام از متغیرهای مستقل بر شاخص‌های مورد مطالعه موثر است ولی ممکن است میزان اثرگذاری آن به دیگر متغیرها نیز وابسته باشد. از اینرو در ادامه وابستگی‌های متقابل مورد بررسی قرار گیرد.

در شکل ۳ نمودارهای هم تراز تأثیر متقابل سرعت و شیب

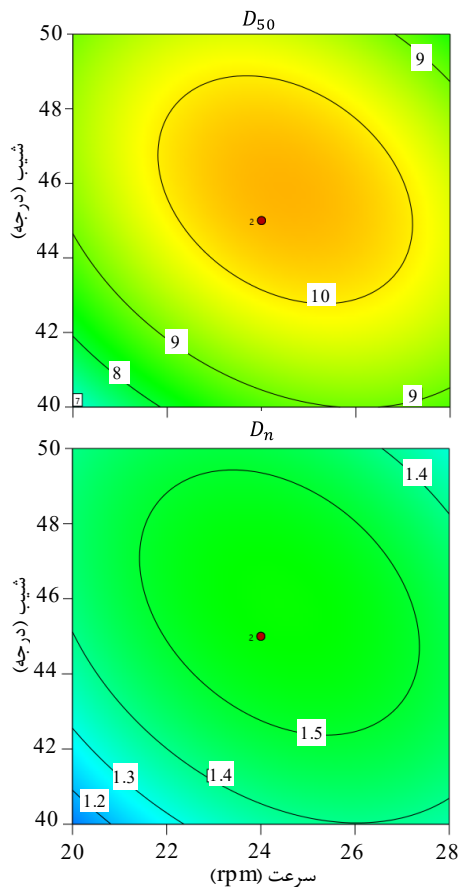
به دفعات لازم تا اینکه گندله دچار ترک یا تغییر شکل دائم شود تکرار می‌گردد. بدین ترتیب این تعداد دفعات به‌عنوان عدد افتادن شناخته می‌شود. البته معمولاً این اندازه‌گیری روی ده گندله انجام و میانگین نتایج به دست آمده را به‌عنوان عدد افتادن در نظر می‌گیرند. بدیهیست که عدد افتادن به اندازه گندله بستگی دارد و در تحقیق جاری اندازه‌گیری‌ها روی گندله‌هایی با محدوده اندازه ۸ تا ۱۲ میلیمتر انجام شده است.

#### ۳-۳- برازش منحنی روی نتایج

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده شامل عدد میانه و عدد افتادن در جدول ۵ آمده است. لازم به ذکر است که هر آزمایش دو بار انجام شده و متوسط نتایج آنها انتخاب شده است. البته نتایج بررسی تکرار پذیری برای بیشتر آزمایش‌ها راضی‌کننده بوده است جدول ۵- مقادیر بدست آمده عدد میانه و عدد افتادن در هر آزمایش

#	D50 (mm)	D50 (mm)	$D_n$	$D_n$	#	D50 (mm)	D50 (mm)	$D_n$	$D_n$
۱	۹.۸۵	۸.۲۵	۱.۴	۱.۲	۱۴	۶.۵۰	۶.۴۴	۱.۱	۱.۰
۲	۱۰.۸۰	۹.۳۲۳	۱.۴	۱.۶	۱۵	۱۰.۵۵	۱۱.۴۳	۱.۴	۱.۷
۳	۶.۹۲	۵.۵۱۸	۱.۳	۱.۱	۱۶	۶.۱۷	۷.۲۳	۱.۰	۱.۱
۴	۸.۸۶	۸.۱۸	۱.۰	۱.۱	۱۷	۱۰.۰۴	۱۱.۰۲	۱.۴	۱.۶
۵	۷.۳۱	۷.۳۴۵	۱.۰	۱.۰	۱۸	۱۱.۴۹	۱۰.۳۵	۱.۲	۱.۱
۶	۶.۵۰	۷.۳۳۶	۱.۰	۱.۰	۱۹	۵.۱۰	۶.۱۲	۱.۰	۱.۱
۷	۶.۷۴	۶.۸	۱.۳	۱.۱	۲۰	۷.۹۱	۶.۹۹	۱.۶	۱.۴
۸	۹.۹۷	۱۰.۴۵۳	۲.۱	۲.۳	۲۱	۹.۱۳	۸.۸۳	۱.۰	۱.۲
۹	۱۰.۵۰	۱۰.۱۴	۱.۶	۱.۵	۲۲	۷.۰۳	۷.۱۰	۱.۲	۱.۰
۱۰	۷.۴۶	۷.۲۴	۱.۲	۱.۲	۲۳	۵.۱۴	۶.۴۱	۱.۰	۱.۰
۱۱	۱۰.۱۴	-	۱.۵	-	۲۴	۸.۳۰	۸.۶۷	۱.۵	۱.۴
۱۲	۷.۴۰	۸.۳	۱.۴	۱.۶	۲۵	۵.۷۵	۵.۸۸	۱.۰	۱.۰
۱۳	۹.۵۰	۹.۲۳	۱.۲	۱.۴	۲۶	۷.۹۱	۷.۵۶	۱.۰	۱.۰

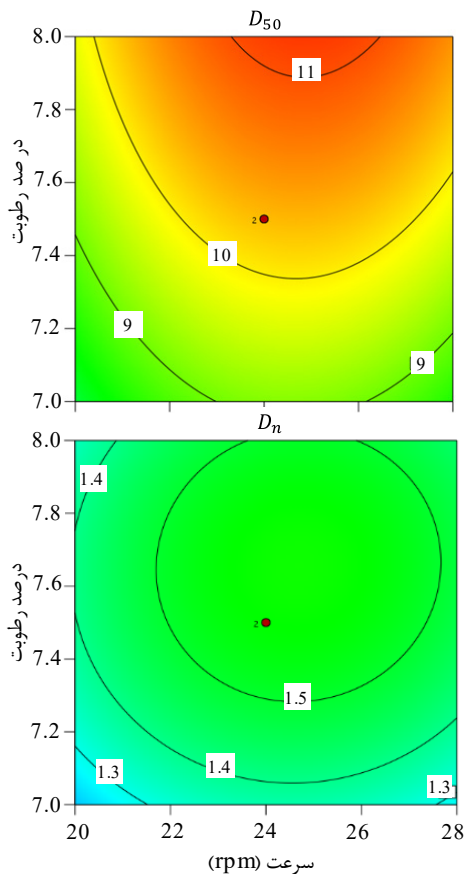
در برخی مطالعات آزمایشگاهی از الگوریتم‌های دیگر از جمله الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی برای پیش بینی نتایج استفاده شده که به علت عدم فراهم شدن توابع ریاضی، مطالعه پارامتری را مشکل می‌کند [۲۰، ۲۱]. با مشخص شدن نتایج آزمایشات، به جستجوی روابط پارامتری برای بیان وابستگی اندازه میانه و عدد افتادن بر حسب متغیرهای مستقل مسئله شامل سرعت، شیب، بنتونیت و رطوبت می‌پردازیم. برای این منظور از ابزار برازش



شکل ۳- کانتورهای تأثیر متقابل سرعت و شیب (در حالت بنتونیت ۱ درصد و رطوبت ۷.۵ درصد) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن

در شکل ۴ کانتورهای تأثیر متقابل سرعت و بنتونیت (در شرایط شیب ۴۵ درجه و رطوبت ۷.۵ درصد) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن ترسیم شده است. ملاحظه می شود که خطوط همتراز در هر دو گراف، منحنی‌های باز هستند و با حرکت در خط افقی از دو طرف به سمت وسط، خطوط همتراز اعداد بزرگتری را نشان می دهند. بنابراین نتیجه می گیریم همانگونه که در مورد اثر متقابل سرعت با شیب مشاهده شد در اینجا نیز به ازای همه محدوده بنتونیت مطالعه شده، حد بهینه سرعت وجود دارد که منجر به افزایش اندازه میانه و همچنین عدد افتادن شده است. در مقابل مشاهده می شود که با حرکت در راستای قائم که متناظر با افزایش درصد بنتونیت است خطوط همتراز اندازه میانه عدد کوچک تری می دهند و خطوط همتراز عدد افتادن به سمت اعداد بزرگتری می روند. ملاحظه می شود که خطوط همتراز در گراف اندازه میانه نزدیک به خط قائم هستند بنابراین در نواحی

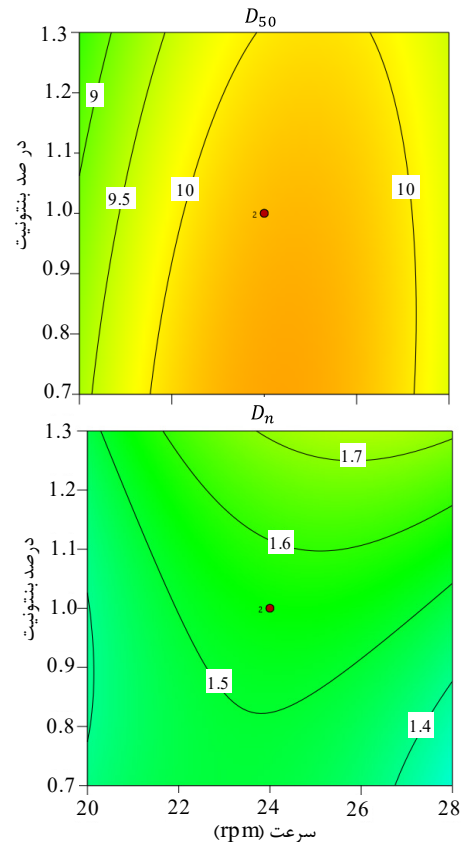
(به ازای بنتونیت ۱ و رطوبت ۷.۵ درصد) بر روی اندازه میانه و همچنین عدد افتادن ترسیم شده است. ملاحظه می شود که در هر دو گراف خطوط هم تراز بصورت حلقوی هستند و با حرکت به سمت مرکز مقدار خطوط همتراز عدد بالاتری را نشان می دهد. بنابراین با افزایش هم‌زمان سرعت و شیب هر دو ویژگی اندازه میانه و عدد افتادن افزایش یافته و بعد از آن روال کاهشی گرفته است. لازم به ذکر است که در مراجع مطالعه شده به تاثیر متقابل این دو فاکتور اشاره‌ای نگردیده است. با این وجود از نظر تابعیت زاویه، نتیجه حاضر منطبق بر نتیجه بدست آمده توسط سنا و ونوگوپال [۲۳] است. نوع وابستگی به سرعت نیز بسیار شبیه نتایج گزارش شده توسط پاندی و همکاران [۲۴] است. در تفسیر فیزیکی این نوع وابستگی می توان گفت که با افزایش شیب دیسک، میزان ارتفاع گیری،  $h$ ، ذرات افزایش یافته و طبق فرمول  $mgh$  انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد. سپس با رها شدن ذرات، این انرژی به جنبشی تبدیل می‌گردد. از آنجا که انرژی جنبشی با سرعت تناسب دارد، بالا رفتن آن منجر به افزایش سرعت می‌شود. این افزایش سرعت می تواند باعث حرکت بیشتر آنها در یک زمان مشخص گردیده و بزرگتر شدن اندازه و همچنین تراکم بیشتر را به دنبال داشته باشد. به بیانی دیگر، طی یک زمان یکسان، افزایش سرعت منجر به طی مسافت بیشتری شده که افزایش قطر گندله را دنبال دارد. در عین حال، افزایش ارتفاع سقوط می‌تواند تراکم بیشتر ذرات را دنبال داشته باشد. با این وجود باید اضافه نمود که اگر ارتفاع و سرعت از حد بهینه فراتر روند، می تواند باعث کاهش فرصت برای چسبندگی ذرات شود و همچنین بخشی از گندله‌ها به دلیل سرعت زیاد ممکن است بواسطه نیروی گریز از مرکز به لبه‌های دیسک چسبیده و حرکت غلتشی انجام ندهند و از اینرو اندازه میانه و همچنین میزان تراکم و استحکام کاهش می یابد. با این اوصاف این دو فاکتور باید در محدوده بهینه تنظیم شوند. چنین نتیجه گیری برای یک دیسک صنعتی بسیار مفید خواهد بود و با پایش وضعیت آن می توان حد بهینه را تعیین نمود



شکل ۵- کانتورهای تأثیر همزمان سرعت و رطوبت (شیب ۴۵ درجه و بنتونیت ۱ درصد) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن

بر این اساس، کمیت متناظر با محور افقی یعنی سرعت چرخش دیسک در هر دو منحنی کرانگینه (اکسترمم) دارد. در واقع با افزایش سرعت تا مقدار حدود ۲۵ rpm، اندازه میانه و همچنین عدد افتادن افزایش و بعد از آن کاهش پیدا می‌کنند. از طرفی دیگر، گراف اندازه میانه نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت از ۷ الی ۸ درصد، اندازه میانه افزایش پیدا می‌کند. البته باید متذکر شد که طبق نتایج آزمایش‌ها وقتی رطوبت از ۸ الی ۸.۵ درصد بالاتر بود، گندله‌های تشکیل شده شکل نامتعارفی داشتند که خمیری می‌شدند. با توجه به نوع منحنی بسته خطوط همتراز در گراف عدد افتادن، نتیجه می‌گیریم که علاوه بر سرعت بهینه، برای رطوبت نیز مقدار بهینه وجود دارد. توضیح تفسیر فیزیکی تأثیر سرعت پیش‌تر ارائه گردید و در تفسیر اثر رطوبت می‌توان گفت با افزایش آن تمایل چسبیدن ذرات به همدیگر افزایش یافته و اندازه میانه بالاتر می‌رود ولی به نظر می‌رسد اگر مقدار رطوبت بیش از حد بهینه (حدود ۷.۶ درصد) باشد، گندله‌های تولیدی

دو طرف که سرعت خیلی کمتر از حد بهینه یا خیلی بیشتر از حد بهینه است تأثیر تغییر بنتونیت در اندازه میانه چندان محسوس نیست ولی عدد افتادن وابستگی شدیدتری به درصد بنتونیت دارد. نتیجه بدست آمده برای تأثیر بنتونیت بر استحکام گندله، تقریباً منطبق بر نتیجه گزارش شده در مراجع [۲۷-۲۵] است. در مورد تأثیر سرعت، پیشتر صحبت شد و در تفسیر فیزیکی اثر بنتونیت می‌توان گفت که افزایش آن می‌تواند چسبندگی ذرات را تقویت نموده و به تبع آن استحکام گندله افزایش می‌یابد ولی در مقابل می‌تواند قابلیت جذب رطوبت را کاهش داده و امکان چسبیدن ذرات جدید پیرامون گندله را تضعیف نماید که نتیجه آن کاهش اندازه میانه است.

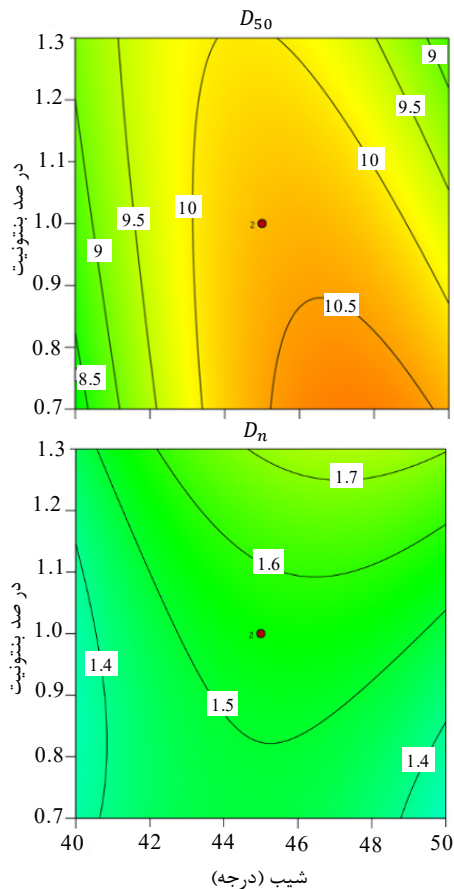


شکل ۴- کانتورهای تأثیر متقابل سرعت و بنتونیت (شیب ۴۵ درجه و رطوبت ۷.۵ درصد) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن

در شکل ۵ کانتورهای تأثیر همزمان سرعت و رطوبت (در حالت شیب ۴۵ درجه و بنتونیت ۱.۰٪) روی اندازه میانه و عدد افتادن ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که خطوط هم تراز اندازه میانه بصورت منحنی باز هستند در حالی که خطوط همتراز عدد افتادن حلقه‌های بسته تقریباً دایره‌ای هستند.

رطوبت بهینه توضیح داده شد از اینرو از بیان مجدد آن صرفنظر می شود.

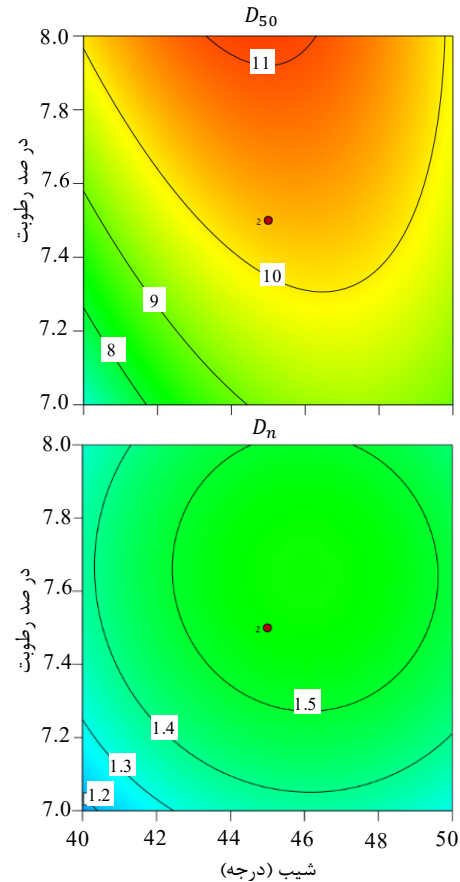
در شکل ۷ کانتورهای تأثیر همزمان شیب و بنتونیت بر اندازه میانه و همچنین بر عدد افتادن (در حالت سرعت ۲۴ rpm و رطوبت ۷.۵ درصد) ارائه شده است. ملاحظه می شود که در هر دو گراف خطوط همتراز بصورت منحنی های باز کاسه ای تقریباً قائم هستند. با این اوصاف، در هر دو گراف محدوده کرانگینه (اکستریم) برای شیب وجود دارد که به نواحی میانی تمایل دارد. بدین ترتیب اگر از دو طرف گراف در راستای محور افقی که متناظر با شیب است به سمت ناحیه میانی حرکت کنیم اندازه میانه و عدد افتادن هر دو سیر صعودی نشان می دهند.



شکل ۷- کانتورهای تأثیر متقابل شیب و بنتونیت (در سرعت ۲۴ دور بر دقیقه و رطوبت ۷.۵ درصد) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن

از طرفی دیگر مشاهده می شود که بخصوص در ناحیه میانی گرافها با افزایش بنتونیت، اندازه میانه کاهش و عدد افتادن افزایش داشته است. البته این تغییرات در نواحی چپ و راست

حالت خمیری به خود می گیرند و به تبع آن عدد افتادن تضعیف می شود.



شکل ۶- کانتورهای تأثیر همزمان شیب و رطوبت (سرعت ۲۴ rpm و بنتونیت ۱ درصد) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن

در شکل ۶ گرافهای کانتوری تأثیر همزمان شیب و رطوبت (به ازای سرعت ۲۴ rpm و بنتونیت ۱ درصد) بر اندازه میانه و عدد افتادن ترسیم شده است. نوع انحنای خطوط هم تراز این گرافها نشان می دهد که در هر دوی آنها شیب بهینه در ناحیه میانی و حدود ۴۵ درجه است بگونه ای که منجر به کسب حداکثر اندازه میانه و عدد افتادن شده است. از طرفی دیگر، در گراف عدد میانه خطوط همتراز در راستای قائم منحنی باز هستند بگونه ای که با افزایش رطوبت اندازه میانه افزایش دارد ولی در مورد عدد افتادن خطوط همتراز منحنی بسته به مرکزیت نزدیک به نقطه میانی هستند. بدین ترتیب با افزایش رطوبت تا حدود ۷.۶ درصد مقدار عدد افتادن افزایش یافته و پس از آن روال کاهشی دارد. این نتایج تقریباً با نتایج گزارش منتشر شده در مرجع [۲۳] مطابقت دارد. پیشتر در رابطه با دلیل فیزیکی وجود محدوده شیب بهینه و همچنین

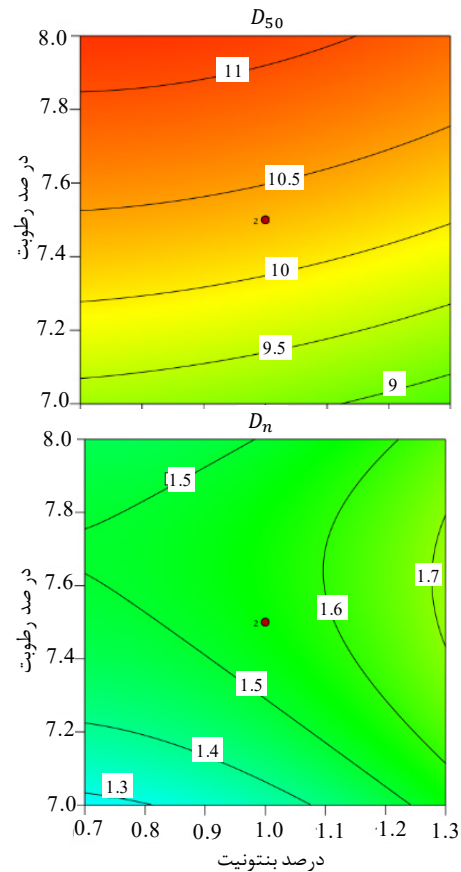
است.

مقایسه این گراف‌ها بیانگر تفاوت وابستگی اندازه میانه و عدد افتادن به دو متغیر مورد مطالعه است. ملاحظه می‌شود که خطوط هم‌تراز در گراف اندازه میانه یکنوا و تقریباً خطوط مایل هستند. بنابراین حد بهینه‌ای برای این دو فاکتور در اثرگذاری روی اندازه میانه وجود ندارد. البته ملاحظه می‌شود که اثرگذاری رطوبت شدیدتر از اثرگذاری بنتونیت است. در مقابل، خطوط هم‌تراز در گراف عدد افتادن به صورت منحنی هستند به نحوی که با حرکت در راستای محور قائم، عدد افتادن افزایش یافته و در نواحی میانه که متناظر با رطوبت حدود ۷.۶ درصد است به حداکثر رسیده و سپس روال کاهشی به خود گرفته است. در رابطه با تاثیر متقابل این دو فاکتور، ملاحظه می‌شود که در ابتدای گراف که درصد بنتونیت کم است با افزایش رطوبت تغییر قابل ملاحظه‌ای در عدد افتادن حاصل می‌شود ولی با افزایش بنتونیت به بالای حدود ۱.۱ درصد تاثیر گذاری رطوبت در عدد افتادن تضعیف شده است. در تفسیر فیزیکی این نوع تابعیت می‌توان گفت احتمالاً با افزایش بنتونیت، چسبندگی مواد زیاد شده و قابلیت جذب رطوبت آن تضعیف شده است.

#### ۴-۱- بهینه‌سازی متغیرهای مورد بررسی

یکی از اهداف این تحقیق دست یافتن به مقادیر بهینه‌ای از متغیرها با توجه به محدودیت‌ها و رسیدن به تولید گندله با ابعاد استحکام مطلوب است. در واقع با یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه سروکار داریم که یک هدف آن حصول عدد میانه در حدود ۱۰ تا ۱۲ میلیمتر است و هدف دیگر آن حداکثر شدن عدد افتادن است [۲۸]. از آنجا که توابع هدف در قالب روابط ریاضی با برازش منحنی بدست آمده‌اند، در اینجا با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی دوهدفه انجام شده و جبهه پارتو<sup>۱</sup> مطابق شکل ۹ بدست آمده است. بر اساس این نمودار می‌توان محدوده قابل قبول که در بالای جبهه پارتو است را شناسایی نمود. لازم به ذکر است که در اینجا با استفاده از نرم افزار متلب فرآیند بهینه‌سازی انجام شده است.

گراف یعنی شیب‌های کم و شیب‌های بیش از حد بهینه چندان محسوس نیست. در رابطه با تفسیر فیزیکی اثر بنتونیت و شیب دیسک پیش‌تر توضیح داده شد. علی‌الرحاله در مورد تاثیر متقابل آنها می‌توان گفت که وقتی شیب دیسک کم است حرکت غلتشی گندله‌ها نیز کم است و افزایش بنتونیت می‌تواند مقداری جبران کننده این کمبود باشد. از طرف مقابل با افزایش شیب به بیش از حد بهینه، سرعت غلتش زیاد است و اضافه کردن بنتونیت احتمالاً باعث تشکیل سریع‌تر هسته‌های اولیه شده و تعداد گندله‌ها بیشتر و در مقابل اندازه آنها کوچک‌تر شده است. در رابطه با عدد افتادن می‌توان گفت وقتی شیب در محدوده بهینه نیست، میزان استحکام بدست آمده پایین است و افزودن بنتونیت می‌تواند جبران کننده آن بوده و استحکام یا به بیانی دیگر عدد افتادن را افزایش دهد.



شکل ۸- کانتورهای تأثیر متقابل بنتونیت و رطوبت (در سرعت ۲۴ rpm و شیب ۴۵ درجه) بر روی اندازه میانه و عدد افتادن

زوج متغیر دیگری که تاثیر متقابل آنها قابل بررسی است، درصد رطوبت و بنتونیت است که گراف‌های کانتوری آنها (در حالت سرعت ۲۴ rpm و شیب ۴۵ درجه) در شکل ۸ ارائه گردیده

با این وجود این پیشنهاد می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب در کارخانه‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد و تغییرات محدود متناسب با شرایط آنجا مورد نیاز خواهد بود.

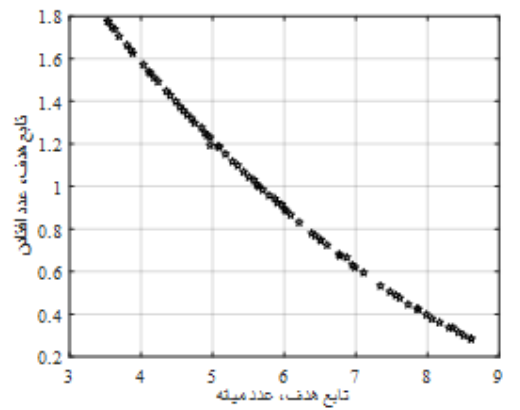
جدول ۶- جدول مربوط به محدودیت‌ها، همراه با متغیرها و

سطوح هر کدام و همراه با مقدار مطلوبیت

شماره انتخاب	اندازه میانه (mm)	عدد افتادن	سرعت (rpm)	شیب (درجه)	رطوبت (%)	بنتونیت (%)
۱	۱۱.۱۷	۱.۴۴	۲۴.۴۶	۴۶.۱۳	۸.۰	۰.۷
۲	۹.۵۸	۱.۷۶	۲۵.۵۹	۴۶.۷۵	۷.۶	۱.۳

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی اثر چهار عامل سرعت و شیب دیسک گندله‌سازی و همچنین درصد رطوبت و بنتونیت بر دو ویژگی اصلی گندله تولیدی شامل اندازه میانه و استحکام (عدد افتادن) پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده، توابعی ریاضی بر نتایج برآزش گردید و در مورد چگونگی تأثیرگذاری عوامل، نمودارهای لازم ارائه گردید. مشخص گردید که در همه موارد با افزایش شیب دیسک تا حدود مشخصی دو ویژگی اندازه میانه و استحکام گندله افزایش یافته و پس از آن روال نزولی اتفاق می‌افتد. در مجموع به نظر می‌رسد زاویه ۴۶ درجه دیسک انتخاب مناسبی برای حصول نتایج به‌عنوان یک گزینه بهینه معرفی باشد. در رابطه با سرعت چرخش دیسک نیز مشخص گردید که در همه حالات با افزایش آن مقادیر اندازه میانه و استحکام افزایش داشته و سپس اثر کاهشی دارد. در رابطه با دلایل فیزیکی این نوع وابستگی نیز توضیحات لازم ارائه گردید و در مورد مقدار بهینه آن می‌توان عدد حدود ۲۵ rpm را در نظر گرفت. پیرامون تأثیرگذاری رطوبت، مشخص گردید که افزایش آن منجر به رشد اندازه میانه می‌گردد ولی تأثیر آن بر استحکام یکنوا نیست بگونه‌ای که افزایش آن تا مقدار مشخصی باعث تقویت استحکام شده و اضافه کردن بیشتر رطوبت اثر تضعیف کننده داشته است. در توجیه فیزیکی چنین رفتاری، توضیحات لازم طی متن ارائه گردید و از نظر مقدار عددی، حدود ۷ تا ۸ درصد به‌عنوان محدوده مطلوب تعیین گردید. با استناد به نتایج آزمایش‌ها، مقدار بنتونیت نیز



شکل ۹- جبهه پارتو برای دو تایع هدف عدد میانه و افتادن

در ادامه دو گزینه به‌عنوان کاندید قابل قبول انتخاب شده که ویژگی‌های آنها شامل اندازه میانه و عدد افتادن و مقادیر متغیرها در جدول ۶ ثبت شده است. این انتخاب‌ها به‌گونه‌ای انجام شده که اندازه میانه در محدوده ۹ تا ۱۲ میلیمتر و عدد افتادن نیز نسبتاً بالا باشد. با مقایسه مقادیر عددی این دو انتخاب مشخص می‌شود که در آنها، تنظیمات تقریباً مشابهی برای سرعت و شیب دیسک و همچنین رطوبت نیاز است و مهم‌ترین اختلاف آنها در عامل بنتونیت است. بر این اساس، در انتخاب ۱ که بیشتر شدن عدد افتادن تعیین کننده بوده، مقدار بنتونیت ۱.۳ درصد و در گزینه ۲ که کسب حداکثر اندازه میانه تعیین کننده بوده، مقدار بنتونیت ۰.۷ درصد باشد. اختلاف متغیرها در این دو انتخاب، تفاوت حدود ۸۵ درصد در مصرف بنتونیت است. از لحاظ مقایسه نتایج، مشاهده می‌شود که در گزینه اول، عدد افتادن حدود ۲۲ درصد نسبت به مقدار آن در گزینه دوم بیشتر است هر چند در مقابل، اندازه میانه حدود ۱۴ درصد کاهش داشته است. از منظر عملیاتی باید اضافه نمود که بنتونیت به‌عنوان یک ماده افزودنی است لذا باید تا حد ممکن مقدار مصرف آن را کاهش داد، و البته برخی مطالعات دیگر نیز نشان می‌دهد که اضافه کردن آن به بیش از ۱ درصد تأثیر مثبت قابل توجهی بر ویژگی‌های گندله ندارد [۲۵]. بدین ترتیب تنظیم دیسک در شیب ۴۶ درجه و سرعت چرخش ۲۵ rpm، رطوبت حدود ۸ درصد و بنتونیت حدود ۱ درصد می‌تواند یک پیشنهاد عملیاتی مناسب باشد. البته این مقادیر به ازای ماده معدنی مورد استفاده در کارخانه تولیدی در این مطالعه است.

- [5] Sudhir, S., et al., Utilization of rice husk substituting fossil fuel for pelletization process of goethite iron ore. *Environmental Technology & Innovation*, 2024. 34: p. 103597.
- [6] Gladky, A., et al., Numerical modeling of bulk flow on a pelletizing disc in different rotational regimes. *Granular Matter*, 2021. 23(3): p. 66.
- [7] Tian, H., et al., Effect of manganese ore and basicity on the consolidation characteristic of nickel-chromium iron ore pellets. *Powder Technology*, 2024. 435: p. 119362.
- [8] Thurley, M.J. and T. Andersson, An industrial 3D vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation. *Minerals Engineering*, 2008. 21(5): p. 405-415.
- [9] Heydari, M., et al., An industrial image processing-based approach for estimation of iron ore green pellet size distribution. *Powder Technology*, 2016. 303: p. 260-268.
- [10] Wu, X., X. Liu, and J. Duan, Online size distribution measurement of dense iron green pellets using an efficient and multiscale nested U-net method. *Powder Technology*, 2021. 387: p. 584-600.
- [11] Ma, W., et al., Pellet image segmentation model of superpixel feature-based support vector machine in digital twin. *Applied Soft Computing*, 2024. 151: p. 111083.
- [12] Wu, X., et al., An image-based method for online measurement of the size distribution of iron green pellets using dual morphological reconstruction and circle-scan. *Powder Technology*, 2019. 347: p. 186-198.
- [13] Duan, J., et al., Online measurement of fill level of disc pelletizers using RGB-D camera. *Measurement*, 2022. 196: p. 111123.
- [14] Srivastava, D., B. Saha, and N. Patra, Design of saccharide based organic binder for low-grade iron ore pelletization using atomistic simulations and machine learning methods. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2024. 129: p. 108730.
- [15] Ma, Y., et al., A novel polymer-type binder to de-

عامل دیگری در ویژگی‌های گندله است به گونه‌ای که افزایش آن در محدوده مورد مطالعه هر چند استحکام را افزایش می‌دهد ولی در مقابل روال کاهش‌ی در اندازه میانه را به دنبال دارد. نتایج نشان داد که حدود ۱ درصد وزنی بنتونیت مقدار بهینه‌ای برای کسب نتایج مطلوب در ویژگی‌های گندله است.

برای مشخص شدن محدوده مطلوب، با استفاده از الگوریتم ژنتیک جبهه پارتو برای مسئله دو هدفه تعیین گردید. هر چند نمی‌توان یک پاسخ قطعی به‌عنوان تنها گزینه مطلوب معرفی نمود ولی بر اساس میزان اهمیتی که به هر تابع هدف داده می‌شود می‌توان گزینه‌های مناسب را انتخاب نمود و بر همین اساس گزینه‌هایی معرفی گردید. در مجموع، نتایج تحقیق حاضر می‌تواند برای واحدهای صنعتی گندله‌سازی مفید باشد. هر چند ممکن است مواد مصرفی از جمله نوع سنگ آهن و نوع بنتونیت در کارخانه‌های مناطق مختلف نسبت به هم مقداری متفاوت باشد ولی نتایج این تحقیق می‌تواند برای تنظیم نزدیک به بهینه مورد استفاده قرار گیرد و متناسب با نیاز تغییرات محدودی در آن اعمال گردد.

## ۶- تشکر و قدردانی

از مدیریت و کارکنان واحد تحقیق و توسعه شرکت گل‌گهر که این تحقیق با حمایت آن انجام شده تقدیر می‌گردد. همچنین از مدیریت و کارکنان محترم آزمایشگاه گندله‌سازی که در انجام آزمایش‌ها حمایت و همکاری نمودند تشکر می‌گردد.

## ۷- مراجع

- [1] Saiedi, Ali and Sotoodeh, Nader. *Iron Production*, Jahad Daneshgahi of Isfahan University of Technology, 2006. (in Persian)
- [2] Tohidi, Naser. *Direct reduction: sponge iron production technology*, University of Tehran, 2003. (in Persian)
- [3] Meyer, K., *Pelletizing of Iron Ores*. 1980: Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Ball, D.F., *Agglomeration of iron ores*. 1973, London: Heinemann Educational Books.

- Bentonite Clays from the Voskresensk Deposit to Make Iron-Ore Pellets. *Metallurgist*, 2014. 58(5): p. 367-371.
- [26] Kawatra, S.K. and J.A. Halt, Binding effects in hematite and magnetite concentrates. *International Journal of Mineral Processing*, 2011. 99(1): p. 39-42.
- [27] Sivrikaya, O. and A.İ. Arol, An investigation of the relationship between compressive strength and dust generation potential of magnetite pellets. *International Journal of Mineral Processing*, 2013. 123: p. 158-164.
- [28] Timofeeva, A.S., T.V. Nikitchenko, and A.L. Rogova, Optimizing the granulometric composition of pellets obtained on a disc pelletizer. *Metallurgist*, 2013. 57(5): p. 402-407.
- crease bentonite dosage during iron ore pelletizing: Performance and mechanisms. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023. 27: p. 6900-6911.
- [16] Lundmark, R., E. Wetterlund, and E. Olofsson, On the green transformation of the iron and steel industry: Market and competition aspects of hydrogen and biomass options. *Biomass and Bioenergy*, 2024. 182: p. 107100.
- [17] Baliarsingh, M., et al., Influence of feed mineralogical characteristics on the reduction behavior of low-grade iron ores. *Powder Technology*, 2024. 434: p. 119253.
- [18] Guo, Y., et al., Mechanism of iron grains aggregation and growth in metalized pellet under the alternating magnetic fields. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024. 29: p. 3726-3737.
- [19] <https://www.statease.com/software/design-expert/>. 2021.
- [20] Nadeem, M., H. Banka, and R. Venugopal, SVM-Based Predictive Modelling of Wet Pelletization Using Experimental and GA-Based Synthetic Data. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016. 41(3): p. 1053-1065.
- [21] Nadeem, M., H. Banka, and R. Venugopal, Estimation of pellet size and strength of limestone and manganese concentrate using soft computing techniques. *Applied Soft Computing*, 2017. 59: p. 500-511.
- [22] Chicco, D., M.J. Warrens, and G. Jurman, The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Comput Sci*, 2021. 7: p. e623.
- [23] Thella, J.S. and R. Venugopal, Modeling of iron ore pelletization using 3 \*\* (k-p) factorial design of experiments and polynomial surface regression methodology. *Powder Technology*, 2011. 211(1): p. 54-59.
- [24] Pandey, P., N.F. Lobo, and P. Kumar, Optimization of Disc Parameters Producing More Suitable Size Range of Green Pellets. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 2012. 1(4): p. 48-59.
- [25] Shapovalov, A.N. and A.V. Zavodyanyi, The Use of