

بررسی تاثیر شکل بار و سرعت آسیا بر توان کشی در آسیاهای گردان

سعید رحمانی دهنوی^۱، مصطفی مالکی مقدم^{۲*}، رشاد حسامی^۳، صمد بنیسی^۴

^۱ کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان rahmani@kmpc.ir

^۲ استادیار فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر رفسنجان m.maleki@vru.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان hesami@kmpc.ir

^۴ استاد مواد معدنی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان banisi@kmpc.ir

(دریافت ۲۴ دی ۱۳۹۶، پذیرش ۱۹ فروردین ۱۳۹۷)

چکیده

پیش‌بینی توان در انتخاب، کنترل و بهینه‌سازی عملکرد آسیاها نقش مهمی ایفا می‌کند. اغلب روابط ارائه شده برای محاسبه توان کشی، با در نظر گرفتن گشتاور ایجاد شده به وسیله بار داخل آسیا به دست آمده است. در این تحقیق، تاثیر میزان پرشدگی، سرعت آسیا و شکل آستر بر توان کشی با در نظر گرفتن میزان مواد در پرواز و تغییر طول بازوی گشتاور در آسیایی به قطر یک متر مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، میزان بار و درصد مواد در پرواز، با آنالیز تصویری تعیین و با استفاده از نرم‌افزار Solidworks[®] مرکز جرم بار و طول بازوی گشتاور اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش میزان پرشدگی، با توجه به افزایش ضخامت بار، طول بازوی گشتاور کمتر از پرشدگی‌های پایین است و بیشینه بازوی گشتاور و در نتیجه میزان گشتاور، در سرعت‌های بالاتری اتفاق می‌افتد. مقایسه اعداد بی‌بعد شده تاثیر جرم و طول بازو نشان داد، سهم بازوی گشتاور برای پرشدگی ۱۵ درصد زمانی که سرعت ۵۵ درصد است و برای پرشدگی ۳۰ درصد زمانی که سرعت ۷۰ درصد است، بالاتر است و در این سرعت‌ها بیشینه گشتاور مشاهده شد. بررسی روند نوسان توان کشی و گشتاور نشان داد در محدوده‌ای از سرعت، به دلیل عدم تغییر زیاد شکل بار، میزان توان کشی تغییر محسوسی نمی‌کند. تغییرات توان کشی برای آستر نو و آستر ساییده شده سرچشمه با ۵۱۸۴ ساعت کارکرد تعیین و مشخص شد که آستر ساییده شده در تمامی سرعت‌های آسیا نسبت به آستر نو توان کشی بیشتری دارد. به عنوان مثال، برای ۲۵ درصد پرشدگی و سرعت ۷۰ درصد سرعت بحرانی، توان کشی آستر ساییده شده ۱۰ درصد بیشتر از آستر نو بود.

کلمات کلیدی

آسیا، بازوی گشتاور، توان کشی، شکل بار

۱-مقدمه

$$P = \frac{2\pi}{60} \times N \times \tau \quad (1)$$

که در آن:

P توان آسیا

N سرعت دوران آسیا

τ گشتاور

با توجه به رابطه ۱، گشتاور از روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه است:

$$\tau = F \times L = mg \times d \times \sin \alpha \quad (2)$$

$$\tau = \rho \times A \times T \times g \times d \times \sin \alpha \quad (3)$$

که در آن:

F نیرو

L طول بازوی گشتاور

m جرم بار

g شتاب گرانش

d فاصله مرکز جرم با مرکز آسیا

A سطح بار

T ضخامت بار

ρ دانسیته بار

α زاویه قرار بار داخل آسیا

بررسی کلی روابط ارائه شده نشان می‌دهد که اغلب این روابط شکل مشابهی دارند و یا از یک شکل مشابه مشتق شده‌اند. تنها رویکردی که با سایر روش‌ها تفاوت کلی دارد، روش اجزا گسسته^۴ است که اولین بار توسط میشر^۵ و راجامانی^۵ و برای شبیه‌سازی آسیای گلوله‌ای به کار گرفته شد [۹].

مویس^۶ در رابطه‌ای که برای توان کشی در آسیاهای گردان ارائه کرد، اثر طرح آستر و ویسکوزیته پالپ را نیز در نظر گرفت [۱۰]. او در مدل خود، بار داخل آسیا را به دو بخش سانتریفوژ نشده و سانتریفوژ شده تقسیم کرد و نشان داد که برای بخش سانتریفوژ نشده، رابطه تجربی باند [۵]، بدون در نظر گرفتن عامل مربوط به تصحیح توان در سرعت‌های بالا، مناسب است و بخش سانتریفوژ شده نیز هیچ توانی مصرف نمی‌کند. وی برای تعیین ضخامت لایه سانتریفوژ شده یک رابطه تجربی پیشنهاد کرد. این رابطه دارای متغیرهایی بود که به طرح آستر، ویسکوزیته پالپ و سرعت دوران آسیا وابسته‌اند [۱۰].

مورل^۷ با استفاده از روش تصویربرداری از بار در داخل یک آسیای آزمایشگاهی که صفحه جلوی آن شفاف بود، در شرایط عملیاتی مختلف شامل سرعت و میزان پرشدگی، روابطی را برای

در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، آسیاکنی بیشترین سهم مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای را دارد و کمتر از ۵ درصد از این انرژی صرف خرد کردن مواد می‌شود. ارایه روابطی که بتواند تخمین صحیحی از میزان انرژی مورد نیاز برای آسیاکنی را به دست دهد، همواره مورد توجه طراحان، سازندگان و کارکنان کارخانه‌ها بوده و بر این مبنا روابط مختلفی ارایه شده است. بیشتر سازندگان آسیا روابط مخصوص به خود را برای محاسبه توان مورد نیاز دارند. روابط مورد استفاده توسط طراحان ساده‌تر است و معمولاً حداکثر توان را با توجه به میزان پرشدگی و سرعت دوران آسیا محاسبه می‌کنند. از سوی دیگر، روابط ارایه شده توسط محققان، پیچیده‌تر و شامل اندازه‌گیری مقدار متغیرهایی است که دسترسی به مقدار صحیح آن‌ها بسیار مشکل و یا اساساً با توجه به شرایط عملیاتی، غیرممکن است، بنابراین تلاش‌های انجام شده در سال‌های اخیر، در راستای ارایه مدل‌هایی بوده است که علاوه بر سادگی، بتواند به طور صحیحی توان مورد نیاز در آسیاها را پیش‌بینی کند و عوامل مختلف عملیاتی را در نظر گیرد [۱،۲،۳].

۱-۱- روند توسعه مدل‌های توان کشی

اولین تلاش‌ها برای پیش‌بینی توان کشی در آسیاهای گردان در سال ۱۹۱۹ میلادی انجام شد [۴]. متأسفانه اغلب مدل‌های ارایه شده فاقد اطلاعات مربوط به کاربرد عملی در مقیاس صنعتی است و تنها نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی ارایه شده است. حتی در مورد رابطه باند^۱ [۵،۶] نیز که گفته شده بر پایه اطلاعات آسیای گلوله‌ای صنعتی بوده است، هیچ کدام از اطلاعات صنعتی که بر اساس آن‌ها روابط به دست آمده، منتشر نشده است.

از روابطی که برای محاسبه توان کشی در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن ارایه شده است می‌توان به رابطه آستین^۲ اشاره کرد که فقط برای این نوع آسیاها کاربرد دارد [۷]. رابطه هرپس^۳ و همکارانش [۸] توان مصرفی را برای آسیاهای گلوله‌ای، خودشکن و نیمه‌خودشکن محاسبه می‌کند. بنابر بررسی انجام شده، به جز رابطه ارایه شده توسط آستین، سایر روابط ارایه شده برای پیش‌بینی توان برای استفاده در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن مناسب نیستند [۳].

برای محاسبه توان کشی از سه رویکرد گشتاور، موازنه انرژی و نیروی اصطکاک استفاده شده و به همین دلیل روابط زیادی برای محاسبه توان کشی ارایه شده است. یکی از ساده‌ترین روابط برای محاسبه توان کشی به صورت رابطه ۱ است [۴].

بار به صورت تابعی از میزان پرشدگی و سرعت دوران آسیا ارایه کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در یک آسیای مدل با قطر ۱۰۰ و طول ۲۱/۶ سانتی‌متر در محدوده سرعت‌های ۵۵ تا ۸۵ درصد سرعت بحرانی با پرشدگی ۱۴، ۱۸، ۲۰ و ۲۴ درصد و با استفاده از طرح آسترهای نو و ساییده شده سرچشمه و آستر قدیم و جدید گل‌گهر انجام دادند. این محققان با تعیین موقعیت شانه و پاشنه بار در شرایط عملیاتی مختلف و در نظر گرفتن شکل هلالی بار به جای شکل لوبیایی توصیف دقیق‌تری نسبت به مدل مورل از شکل بار در داخل آسیا ارایه کردند [۱۹].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

در اغلب رویکردهای کنترلی، توان‌کشی در آسیاها به عنوان یک متغیر کنترل‌شونده مورد توجه بوده است، اما به دلیل روابط پیچیده و غیرخطی آن با عوامل عملیاتی، غیرواقعی بودن شکل بار و در نظر نگرفتن تمام عوامل تاثیرگذار بر حرکت بار، امکان استفاده مناسب از این عامل، در کنترل آسیاهای صنعتی فراهم نشده است. در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، آسیاکنی بیشترین سهم مصرف کل انرژی را دارد. مسیر حرکت و شکل بار یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر کارایی خردایش و توان‌کشی است. از آنجا که مشاهده مستقیم شکل بار و مسیر حرکت آن در آسیاهای صنعتی امکان‌پذیر نیست در این تحقیق، ترکیبی از روش‌های فیزیکی و تحلیلی برای بررسی تاثیر شکل بار بر توان‌کشی استفاده شد. همچنین در طی عملیات آسیاکنی به دلیل برخوردهایی که بین بار داخل آسیا و بالابرها وجود دارد، بالابرها به تدریج ساییده شده و طرح آن‌ها (زاویه و ارتفاع بالابر و نسبت فاصله به ارتفاع) دچار تغییر می‌شود. این مساله موجب تغییر در الگوی حرکت بار و در نتیجه ظرفیت و توان‌کشی آسیا می‌شود، اما بررسی تحقیق‌های انجام شده نشان داد که تاثیر سایش آستر بر الگوی حرکت بار و توان‌کشی در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن مورد توجه نبوده است. با توجه به نقش اساسی این آسیاها در خط تولید کارخانه‌های فرآوری و سهم عمده آن‌ها از هزینه‌های عملیاتی کارخانه، به نظر می‌رسد که امکان بهبود کارایی آسیاکنی با استفاده از کنترل پارامترهای عملیاتی برای مقابله با تاثیر منفی سایش آستر بر الگوی حرکت بار وجود دارد، بنابراین در این تحقیق درک تاثیر سایش آستر بر الگوی حرکت بار و توان‌کشی در آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن مورد توجه قرار گرفت.

موقعیت شانه و پاشنه بار به صورت تابعی از میزان پرشدگی و سرعت دوران آسیا ارایه کرد و نتیجه گرفت که تاثیر طرح آستر بر میزان لغزش در لایه‌های داخل بار بسیار کم است و در نتیجه در روابطی که برای موقعیت شانه و پاشنه بار ارایه کرد از مقدار متوسط اعداد به دست آمده از هر سه بالابر استفاده کرد. بر این مبنای، روابطی را برای محاسبه توان‌کشی آسیاهای گردان ارایه کرد [۳].

با توسعه توان محاسباتی کامپیوترها، استفاده از روش‌های عددی برای بررسی تاثیر عوامل عملیاتی بر الگوی حرکت بار و شکل آن در داخل آسیاهای گردان توسعه یافت. راجامانی و همکارانش در ادامه تحقیقات خود از راک سه‌بعدی (3D-DEM) استفاده کردند که به دلیل در نظر گرفتن برهم‌کنش ذرات داخل آسیا در راستای طول آسیا به واقعیت نزدیک‌تر بود [۱۱].

پس از آن استفاده از روش‌های عددی سه‌بعدی (3D-DEM)، رویکرد غالب در تحقیق‌های انجام شده، به ویژه در مدل‌سازی آسیاهای خودشکن و نیمه‌خودشکن، به دلیل پیچیدگی‌های موجود در این تجهیزات بود [۱۴-۱۱]. در پژوهش انجام شده توسط بین^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۷، با استفاده از روش DEM، فرآیند کاری آسیاهای گلوله‌ای و تاثیر میزان پرشدگی گلوله، ارتفاع بالابر و سرعت آسیا مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از آسیای آزمایشگاهی به اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی پرداخته شد [۱۵]. آقایان کیلیری و اون^۹ (۲۰۱۸) با انجام ۲۲ سری شبیه‌سازی به روش 3D-DEM رابطه بین پارامترهای شکل بار و عوامل عملیاتی پرشدگی، ارتفاع بالابر و سرعت آسیا را بررسی کردند [۱۶]. در تحقیق دیگری پدربیز^{۱۰} و همکاران به دلیل اشباع شدگی حسگر گشتاورسنج، به شیوه‌ای مشابه روشی را تخمین میزان پرشدگی با توجه به طیف گشتاور پیشنهاد دادند [۱۷]. تاثیر عوامل مختلف بر سایش آسترها با استفاده از روش DEM و مدل‌های سایش در تحقیق دیگری توسط زو^{۱۱} و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۸].

فهم بهتر سازوکار انرژی مصرفی و دینامیک بار آسیا منجر به صرفه‌جویی چشمگیر انرژی مصرفی شود و با تغییر عواملی مانند سرعت و طرح آستر، باعث افزایش ظرفیت و کارایی انرژی مصرفی و آسان‌تر شدن کنترل آن شود [۱۹ و ۲۰].

مالکی مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش تصویربرداری از بار در داخل یک آسیای آزمایشگاهی که صفحه جلوی آن شفاف بود دینامیک بار درون آسیا را مورد بررسی قرار دادند و در شرایط عملیاتی مختلف شامل سرعت، میزان پرشدگی و طرح آستر، روابطی را برای موقعیت شانه، پاشنه و نقطه برخورد

۲- روش کار

۲-۱- مواد مورد استفاده به عنوان بار درون آسیا

در این تحقیق، تاثیر عوامل مختلف بر توان کشی با تغییر در میزان بار درون آسیا و شرایط عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت. برای تطابق بیشتر با شرایط صنعتی، از مواد معدنی که از لحاظ شکل، دانسیته و سایر خصوصیات شبیه بار موجود در آسیای صنعتی است، استفاده شد. برای این کار از بار برگشتی آسیاهای نیمه خودشکن مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر نمونه‌هایی برای انجام آزمایش‌ها تهیه شد. پس از دانه‌بندی مواد، برای جلوگیری از خرد شدن سنگ‌ها در اثر چرخش در آسیای آزمایشگاهی و همچنین عدم تغییر در دامنه دانه‌بندی آن‌ها، این سنگ‌ها با نوعی چسب پوشش داده شدند. این کار تصویربرداری از حرکت بار را نیز به دلیل عدم ایجاد گرد و غبار آسان کرد. بررسی‌ها در این تحقیق نشان داد، استفاده از این روش باعث تغییر معنی‌داری در ضریب اصطکاک سطح آن نشد.

برای آماده‌سازی خوراک با دانه‌بندی مناسب، از جدولی که باند در سال ۱۹۵۸ برای زنجیره گلوله ارایه کرده است، استفاده شد [۱۴]. دانه‌بندی مورد استفاده با کوچک مقیاس کردن اندازه گلوله‌های موجود در جدول ۱ تشکیل داده شد.

جدول ۱ - ترکیب اندازه‌های سنگ‌های داخل آسیا [۱۴]

اندازه (میلی‌متر)	درصد وزنی
۱۲	۲۳
۱۱	۳۱
۹	۱۸
۸	۱۵
۷	۷
۶	۳٫۸
۴	۱٫۷
۳	۰٫۵

۲-۲ آسیای آزمایشگاهی

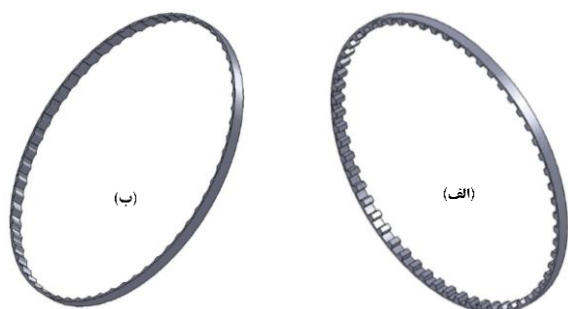
برای بررسی تاثیر عوامل مختلف بر توان کشی و مشاهده واقعی حرکت بار، از یک آسیای مدل با قطر ۱ متر و طول ۱۱ سانتی‌متر استفاده شد (نسبت آسیای مدل به آسیای نیمه‌خودشکن شرکت گل‌گهر ۱ به ۹ و نسبت به آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع سرچشمه ۱ به ۱۰ است). یک دیواره این آسیای مدل، شفاف بود و امکان مشاهده مستقیم وضعیت بار در داخل آسیا را فراهم می‌کرد، همچنین برای کنترل و ثبت

اطلاعات مربوط به شرایط عملیاتی، این تجهیز با استفاده از حسگرها، ابزار نمایشی و عناصر کنترلی، ابزاربندی شده بود (شکل ۱).

برای بررسی تاثیر آستر بر حرکت بار نیز از آسترهای مدل کوچک مقیاس شده استفاده شد. آسترهای مورد استفاده، آستر نو و ساییده شده سرچشمه و آستر جدید گل‌گهر بودند که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آمده است. در شکل ۲ نمونه مدل‌های تهیه شده از آستر نو و مقطع با بیشترین میزان سایش از آستر ساییده شده آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه بعد از ۵۱۸۴ ساعت، برای استفاده در آسیای مدل نشان شده است. جنس آسترهای مدل، از لاستیک پلی‌ارتان انتخاب شد. دلیل انتخاب این جنس به جای فولاد، دقت بالا، ارزان بودن و ماشین‌کاری آسان آن است که در تهیه مدل آسترهای صنعتی، اهمیت زیادی دارد. آزمایش‌های حرکت تک گلوله در آسیای مدل نشان داد تفاوت بارزی در مسیر حرکت گلوله در آستر فولادی و آستر از جنس پلی‌ارتان وجود ندارد.



شکل ۱- نمایی از آسیای آزمایشگاهی



شکل ۲- الف) نمونه مدل تهیه شده از آستر نو - ب) مقطع ششم از آستر کارکرده آسیای نیمه‌خودشکن مجتمع مس سرچشمه بعد از ۵۱۸۴ ساعت

جدول ۲- خصوصیات آسترهای مورد استفاده

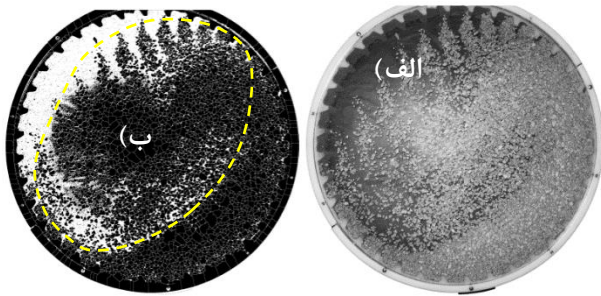
نوع آستر	تعداد بالابر	عرض آستر (mm)	ارتفاع بالابر (mm)	زاویه صفحه بالابر (درجه)	ضخامت کفشک (mm)
گل گهر (آستر جدید)	۳۶	۱۲۵	۲۲۵	۳۰	۷۵
سرچشمه (آستر نو)	۶۰	۱۵۰	۱۵۲	۱۴	۷۶
سرچشمه (آستر ساییده شده)	۶۰	۱۵۰	۹۰	۶۲	۵۵

۳-۲- محاسبه میزان بار در پرواز

اغلب روابط ارائه شده برای محاسبه توان کشی، با در نظر گرفتن گشتاور ایجاد شده توسط بار داخل آسیا به دست آمده است. برای تخمین توان کشی با توجه به این رویکرد، موادی اهمیت دارند که با آسیا در تماس اند، یعنی وزن آن‌ها به دیواره آسیا وارد می‌شود و موادی که در پروازند سهمی در مصرف انرژی ندارند. در نتیجه دانستن سهم مواد در پرواز در پرشدگی و سرعت‌های مختلف آسیا، اهمیت زیادی دارد، بنابراین برای به دست آوردن میزان بار در پرواز ابتدا از آسیای آزمایشگاهی در سرعت و پرشدگی‌های مختلف عکس‌برداری شد، سپس با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر ImageJ با توجه به اندازه‌گیری سطح مواد، درصد بار در پرواز تعیین شد. این نرم‌افزار قابلیت اندازه‌گیری محیط و مساحت مواد را دارد [۱۹].

روند اندازه‌گیری میزان بار در پرواز در شکل ۳ برای آستر جدید گل‌گهر در پرشدگی ۳۰ درصد و سرعت ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی، نشان داده شده است.

پس از آنالیز سطح مواد با نرم‌افزار، بخشی از مواد که در پرواز است، مشخص می‌شوند و سطح کلی آن‌ها به دست می‌آید. با تقسیم مساحت به دست آمده از این مواد بر مساحت کل مواد، درصد مواد در پرواز برای این سرعت و پرشدگی آسیا، قابل اندازه‌گیری است.



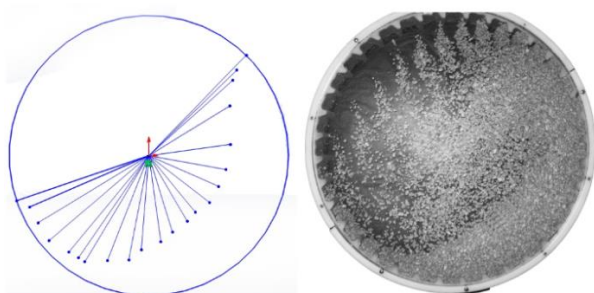
شکل ۳- آسیای آزمایشگاهی با آسترهای جدید گل‌گهر در پرشدگی ۳۰ درصد و سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی. (الف) نمای معمولی، (ب) نمای آنالیز شده با نرم‌افزار آنالیز تصویر ImageJ و سهم مواد در پرواز

۴-۲- محاسبه سطح موثر و طول بازوی گشتاور

همان‌گونه که در بخش ۱-۱ گفته شد، علاوه بر وزن مواد در تماس با دیواره آسیا، طول بازو نیز برای محاسبه گشتاور لازم است. برای به دست آوردن طول بازوی گشتاور ابتدا لازم است که سطح موثر بار در آسیا (سطح موادی که باعث مصرف انرژی در آسیا می‌شوند) مشخص شود.

برای به دست آوردن سطح موثر بار در آسیا، ابتدا به وسیله نرم‌افزار MB-Ruler محدوده بار موثر در داخل آسیا اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار Solidworks[®] سطح بار شبیه‌سازی و در نهایت با کمک همین نرم‌افزار مرکز جرم بار و طول بازوی گشتاور اندازه‌گیری شد (شکل ۴).

روند محاسبه سطح و طول بازوی گشتاور در شکل‌های ۷ و ۸ برای آستر جدید گل‌گهر در پرشدگی ۳۰ درصد و سرعت ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی نشان داده شده است.

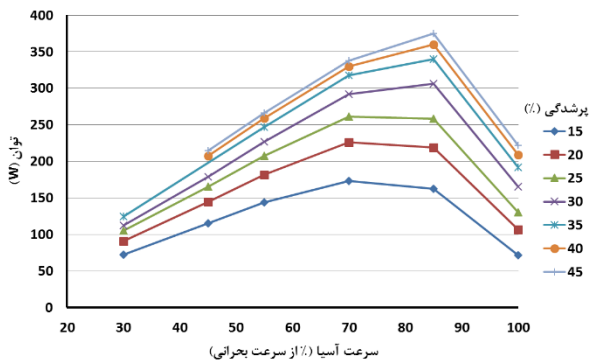


شکل ۴- نحوه به دست آوردن محدوده بار موثر (آستر جدید گل‌گهر در پرشدگی ۳۰ درصد و سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی). (الف) نمای معمولی، (ب) نمایی از محدوده بار موثر به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار MB-Ruler

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، هر چه پرشدگی بیشتر شود، گشتاور بیشتری به دلیل افزایش وزن به آسیا اعمال می‌شود. همچنین با افزایش سرعت آسیا مقدار گشتاور تا مقدار بیشینه‌ای افزایش و با بیشتر شدن سرعت، به دلیل سانتریفوژ شدن بار، شروع به کاهش می‌کند. در سرعت‌های بالا به دلیل اینکه بار سانتریفوژ می‌شود گشتاور به شدت کاهش می‌یابد و به گشتاور آسیای خالی نزدیک می‌شود. این نزدیک شدن گشتاور در سرعت‌های بالا، در شکل ۶ در سرعت ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی مشاهده می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در پرشدگی‌های کم، به دلیل فضای خالی بیشتر و سهم بیشتر مواد در پرواز، بیشینه گشتاور در سرعت‌های کمتر اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال در پرشدگی ۱۵ درصد بیشینه گشتاور در سرعت ۵۵ درصد سرعت بحرانی اتفاق افتاده است، ولی هر چه پرشدگی آسیا بیشتر شود نقش میزان بار در پرواز کاهش پیدا می‌کند و مقدار بیشینه گشتاور برای پرشدگی‌های بیشتر در سرعت‌های بالاتری اتفاق می‌افتد. برای مثال در پرشدگی ۴۵ درصد، بیشینه گشتاور در سرعت ۷۰ درصد سرعت بحرانی است.

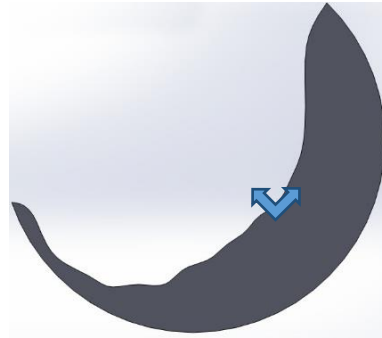
مشابه شکل ۶، نحوه تغییر توان کشی آسیا در شرایط مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دوران آسیا، توان کشی تا یک مقدار بیشینه افزایش یافته و با بیشتر شدن آن، مقدار توان کشی به دلیل سانتریفوژ شدن بار کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه سرعت در مقدار توان کشی نقش مستقیم دارد، مقدار بیشینه توان کشی در سرعت‌های بالاتری نسبت به گشتاور آسیا اتفاق می‌افتد.



شکل ۷- روند تغییرات توان کشی آسیا بر حسب سرعت و پرشدگی مختلف برای آستر جدید گل‌گهر

نحوه تغییر شکل بار در آستر جدید مجتمع سنگ آهن گل‌گهر در پرشدگی ۳۰ درصد و سرعت‌های مختلف ۳۰، ۴۵، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی، در شکل ۸ نشان داده

پس از تعیین سطح موثر بار، با در نظر گرفتن دانسیته یکسان برای بار، نرم‌افزار Solidworks[®] مختصات مرکز جرم را محاسبه می‌کند. با استفاده از مختصات مرکز جرم بار در آسیا، طول بازوی گشتاور قابل اندازه‌گیری است. برای مثال در شکل ۵، با مشخص شدن مختصات مرکز جرم بار، طول بازوی گشتاور برای این سرعت و پرشدگی از آسیا، قابل اندازه‌گیری است.

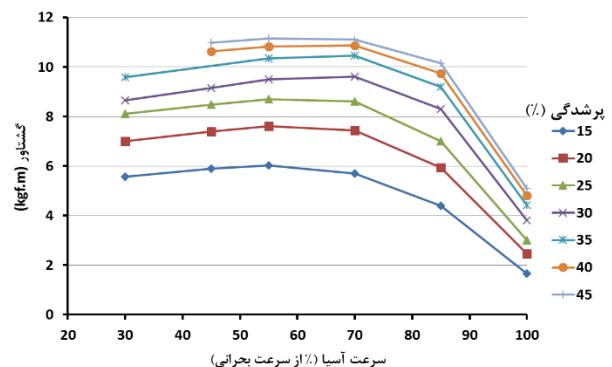


شکل ۵- سطح موثر و مرکز جرم بار در آسیا برای آستر جدید گل‌گهر در پرشدگی ۳۰ درصد و سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر شکل بار بر توان کشی آسیاهای گردان

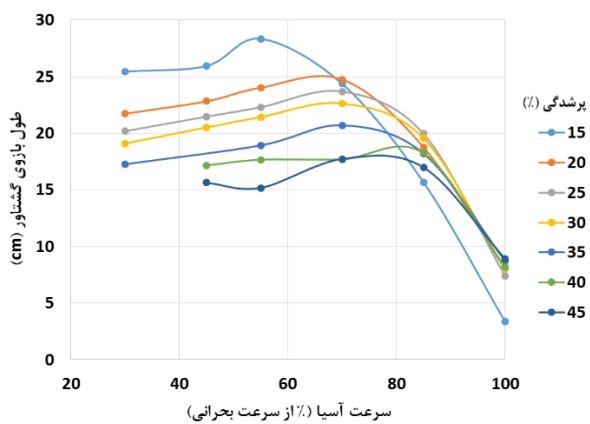
همان‌طور که روابط ۱ و ۲ نشان می‌دهد، توان کشی به میزان گشتاور و سرعت دوران آسیا بستگی دارد و گشتاور ایجاد شده با میزان پرشدگی و فاصله مرکز ثقل از مرکز مرتبط است. بنابراین نحوه قرارگیری بار در گشتاور و در نتیجه میزان توان کشی تاثیر مستقیم دارد. شکل ۶، نمودارهای گشتاور آسیای آزمایشگاهی بر حسب سرعت دوران با استفاده از آستر مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر در پرشدگی‌های ۱۵ تا ۴۵ درصد با فاصله ۵ درصد را نشان می‌دهد.



شکل ۶- روند تغییرات گشتاور آسیا بر حسب سرعت و پرشدگی‌های مختلف برای آستر جدید گل‌گهر

۳-۳- روند تغییرات طول بازوی گشتاور بر حسب سرعت آسیا و میزان پرشدگی

روند تغییرات طول بازوی گشتاور در سرعت و پرشدگی‌های متفاوت در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هرچه میزان پرشدگی بیشتر شود با توجه به اینکه ضخامت بار زیاد می‌شود، در نتیجه طول بازوی گشتاور کمتر از پرشدگی‌های پایین خواهد بود. علاوه بر این، در پرشدگی‌های بیشتر، بیشینه بازوی گشتاور در سرعت‌های بالاتری اتفاق می‌افتد. با افزایش پرشدگی، به دلیل کشیدگی کمتر بار نسبت به سهم کل مواد و قرار گرفتن سهم بیشتری از مواد در مرکز آسیا، طول بازوی گشتاور کاهش می‌یابد و سهم این عامل در گشتاور کمتر می‌شود.

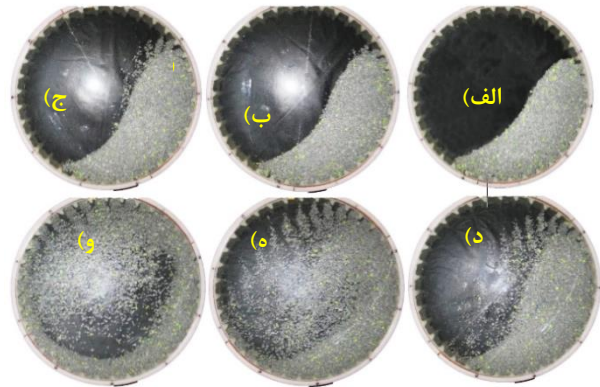


شکل ۱۰- روند تغییرات بازوی گشتاور بر حسب سرعت و پرشدگی آسیا

۳-۴- روند تغییرات مرکز جرم بار بر حسب سرعت آسیا

در این پژوهش علاوه بر تعیین میزان مواد در پرواز، نحوه تغییر مرکز جرم بار نیز مورد بررسی قرار گرفت. با انتخاب ۳ عکس به طور اتفاقی از میان عکس‌های به دست آمده برای هر آزمایش، مراکز جرم بار داخل آسیا با استفاده از نرم‌افزار Solidworks® به دست آمد. به عنوان مثال در شکل ۱۱ روند تغییر مرکز جرم بار با ۱۵ درصد پرشدگی در سرعت‌های ۳۰، ۴۵، ۵۵، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد بحرانی آسیا نشان داده شده است. این نتایج مربوط به آستر جدید مجتمع گل‌گهر است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده شد، روند تغییرات گشتاور آسیا برای پرشدگی ۱۵ تا سرعت ۵۵ درصد بحرانی به صورت صعودی و با افزایش سرعت سیر نزولی پیدا می‌کند.

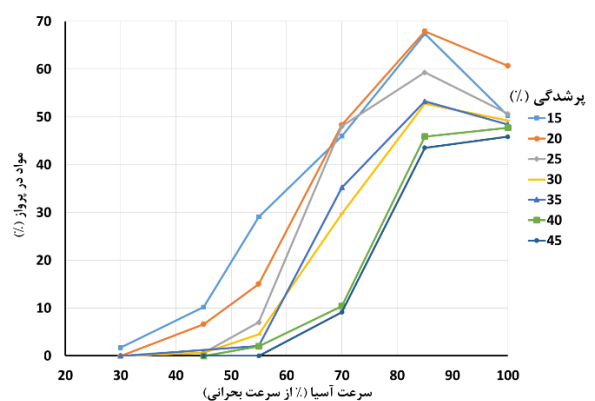
شده است که با افزایش سرعت، میزان مواد در پرواز افزایش می‌یابد و در سرعت ۱۰۰ درصد بحرانی مقداری از بار به بدنه آسیا چسبیده و سانتریفوژ شده است.



شکل ۸- نحوه حرکت بار در آسترهای مجتمع سنگ آهن گل‌گهر در پر شدگی ۳۰ درصد و سرعت‌های مختلف، الف) ۳۰، ب) ۴۵، ج) ۵۵، د) ۷۰، ه) ۸۵، و) ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی

۳-۲- تغییرات میزان مواد در پرواز بر حسب سرعت آسیا و میزان پرشدگی برای آستر جدید گل‌گهر

سهم مواد در پرواز در سرعت‌ها و پرشدگی‌های مختلف آسیا در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هرچه سرعت آسیا بیشتر شود، درصد مواد در پرواز برای هر پرشدگی بیشتر می‌شود و تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که بار سانتریفوژ نشود. با شروع سانتریفوژ شدن به دلیل چسبیدن مواد به پوسته آسیا، درصد مواد در پرواز کاهش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به این شکل مشخص است که هرچه پرشدگی بیشتر شود درصد مواد در پرواز کاهش می‌یابد.



شکل ۹- روند تغییرات درصد مواد در پرواز بر حسب سرعت و پرشدگی آسیا

بیشینه مقدار است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نقش بازوی گشتاور نسبت به جرم بیشتر است.

جدول ۳- مقادیر بی‌بعد شده برای بازوی گشتاور و وزن برای پرشدگی ۱۵ و ۳۰ درصد

۱۵ درصد پرشدگی			۳۰ درصد پرشدگی	
سرعت	جرم	بازوی گشتاور	جرم	بازوی گشتاور
۴۵	۰٫۹۸	۰٫۹۴	۰٫۹۸	۰٫۹۶
۵۵	۰٫۹۵	۱	۱	۰٫۹۶
۷۰	۰٫۹۹	۰٫۹۲	۰٫۸۷	۱
۸۵	۰٫۸۸	۰٫۶۴	۰٫۸۳	۰٫۸۵
۱۰۰	۱	۰٫۱۵	۰٫۸۷	۰٫۴۸

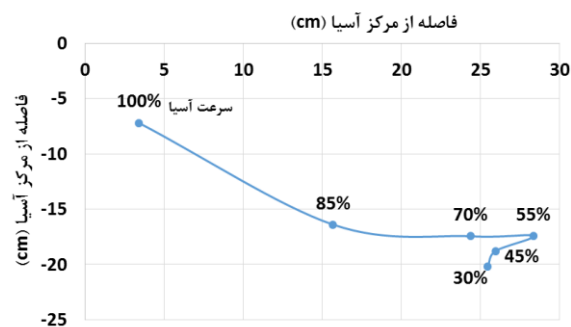
علاوه بر این، بررسی این جدول نشان می‌دهد حداکثر مقدار بی‌بعد جرم در پرشدگی ۳۰ درصد، در سرعت ۵۵ درصد سرعت بحرانی اتفاق افتاده است که به دلیل بازشدگی بیشتر بار و ایجاد سطح بیشتر و در نتیجه سهم جرم بالاتر در این حالت است.

با تعیین و مشاهده تغییرات مکان مرکز جرم بار داخل آسیا مشخص شد که مکان هندسی این مراکز روندی مشابه با تغییرات گشتاور دارند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این تغییر مکان هندسی مراکز جرم تاثیر مستقیمی روی تغییرات گشتاور آسیا و به طور کلی روی توان کشی آسیا دارد.

۳-۶- تغییرات گشتاور بر حسب سرعت و میزان پرشدگی آسیا برای آستر نو سرچشمه

بررسی روند تغییر گشتاور در شرایط مختلف برای آسترهای نو و ساییده شده سرچشمه نیز انجام شد. در شکل ۱۲ تغییرات گشتاور برای آستر نو سرچشمه بر حسب سرعت و میزان پرشدگی آورده شده است.

نکته قابل توجه نوسان کم میزان گشتاور در محدوده وسیعی از سرعت آسیا است. به طور مثال میزان گشتاور برای پرشدگی ۴۰ درصد، از سرعت ۴۵ درصد تا سرعت ۷۶ درصد تفاوت چندانی ندارد و میزان نوسان گشتاور کم است اما از سرعت ۷۶ تا سرعت ۱۱۵ درصد نوسان گشتاور زیاد است. برای بررسی بیشتر، نحوه تغییر شکل بار در سرعت‌های ۴۵ تا ۷۶ درصد سرعت بحرانی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



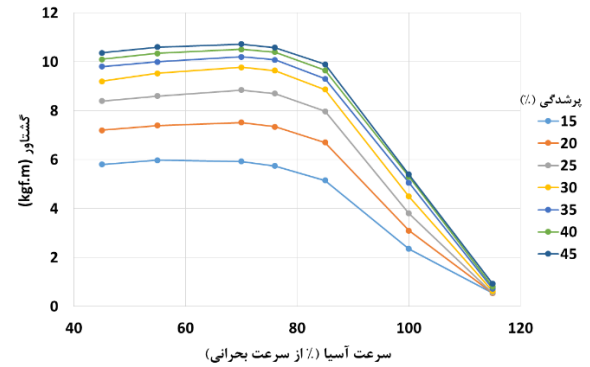
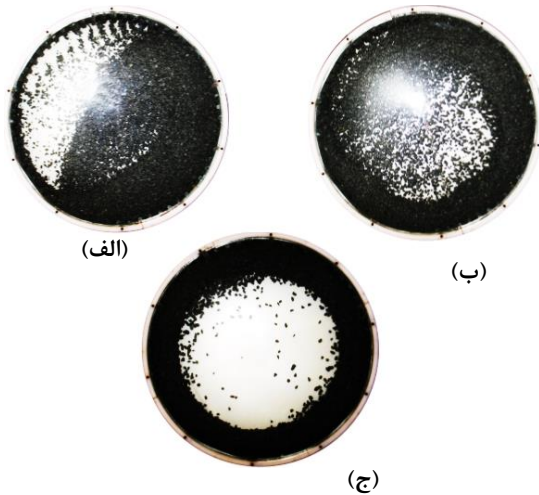
شکل ۱۱- روند تغییر مرکز جرم بار برای پرشدگی ۱۵ درصد بر حسب سرعت آسیا برای آستر جدید گل‌گهر

این روند تغییر با تغییر مرکز بار نشان داده شده در شکل ۱۱ سازگار است. به عبارت دیگر، مکان مرکز جرم بار داخل آسیا تا ۵۵ درصد سرعت بحرانی به سمت بالا و دیواره آسیا جابه‌جا شده و سپس با افزایش سرعت دوران آسیا، مکان مرکز جرم به سمت مرکز آسیا تمایل پیدا می‌کند.

۳-۵- به دست آوردن سهم وزن و بازوی گشتاور در مقدار گشتاور برای آستر جدید گل‌گهر

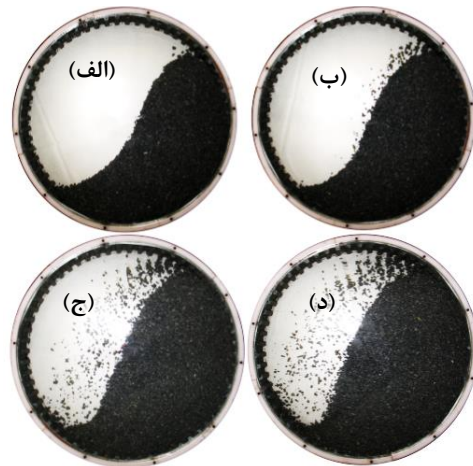
برای مشخص شدن سهم جرم (میزان مواد در پرواز و موادی که در تماس با آسیاند) و بازوی گشتاور در مقدار گشتاور، این مقادیر برای دو پرشدگی ۱۵ و ۳۰ درصد میزان مواد در تماس با آسیا و بازوی گشتاور محاسبه شد. برای قابل مقایسه شدن این دو عامل، مقادیر وزن و بازوی گشتاور با تقسیم بر بزرگترین مقدار مربوط به خود، بی‌بعد شدند. به عنوان مثال، مقادیر بازوی گشتاور در سرعت‌های مختلف برای پرشدگی ۱۵ درصد بر بازوی گشتاور به دست آمده در سرعت ۵۵ و برای پرشدگی ۳۰ درصد بر بازوی گشتاور به دست آمده در سرعت ۷۰ درصد که بزرگ‌ترین بازو است، تقسیم شدند. مقادیر وزن در هر سرعت برای پرشدگی ۱۵ درصد به وزن به دست آمده در سرعت ۱۰۰ درصد بحرانی و برای پرشدگی ۳۰ درصد به وزن مواد در سرعت ۵۵ درصد بحرانی تقسیم شدند. در جدول ۳ این مقادیر بی‌بعد شده مربوط به آستر جدید مجتمع گل‌گهر در سرعت‌های ۴۵ تا ۱۰۰ درصد بحرانی نشان داده شده‌اند. طبق نتایج به دست آمده در شکل ۶، بیشترین مقدار گشتاور برای ۱۵ درصد پرشدگی در سرعت ۵۵ و برای ۳۰ درصد پرشدگی در سرعت ۷۰ درصد حاصل شد. با مقایسه نتایج به دست آمده مشخص است که سهم بازوی گشتاور در سرعت‌هایی که حداکثر گشتاور اتفاق افتاده است، بیشتر است. سهم بازوی گشتاور برای پرشدگی ۱۵ درصد در سرعت ۵۵ و برای پرشدگی ۳۰ درصد در سرعت ۷۰ درصد که بیشترین گشتاورها نیز در همین سرعت ها اتفاق افتاده است،

متر است. در شکل ۱۵ که مربوط به سرعت ۴۵ درصد برای آستر نو سرچشمه است دلیل این موضوع نشان داده شده است. قسمت الف شکل ۱۵ مربوط به پرشدگی ۱۵ درصد و قسمت ب مربوط به ۴۰ درصد پرشدگی است. ناحیه مشخص شده در نیمه سمت چپ، مربوط به سهم مواد ایجادکننده گشتاور موافق است.



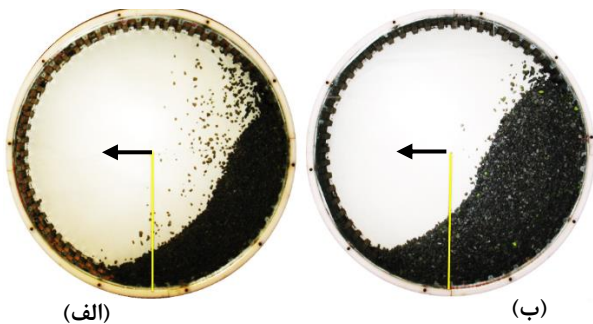
شکل ۱۲- تغییرات گشتاور بر حسب سرعت و میزان پرشدگی آسیا برای آستر نو سرچشمه

با توجه به این شکل در محدوده سرعت‌های ۴۵ تا ۷۶ سهم مواد در پرواز کم است و شکل بار تغییر زیادی نمی‌کند، بنابراین گشتاور در این محدوده تغییرات زیادی ندارد.



شکل ۱۳- نحوه تغییر شکل بار در سرعت‌های ۴۵ تا ۷۶ درصد سرعت بحرانی برای آسترهای نو سرچشمه در پرشدگی ۴۰ درصد و سرعت‌های مختلف، الف) ۴۵، ب) ۵۵، ج) ۷۰ و د) ۷۶ درصد سرعت بحرانی

شکل ۱۴- نحوه تغییر شکل بار برای آسترهای نو سرچشمه در پرشدگی ۴۰ درصد و سرعت‌های مختلف، الف) ۸۵، ب) ۱۰۰ و ج) ۱۱۵ درصد سرعت بحرانی



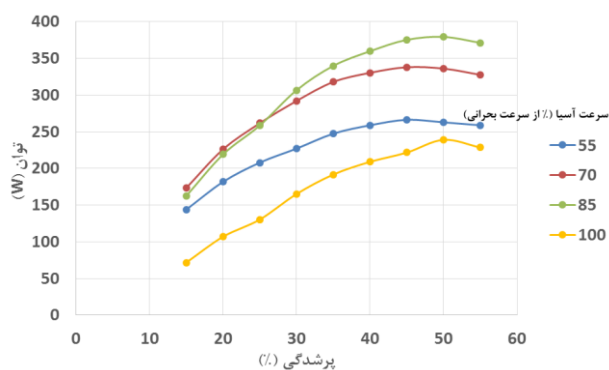
شکل ۱۵- مقدار مواد ایجادکننده گشتاور موافق الف) ۱۵ درصد و ب) ۴۰ درصد پرشدگی آسیا در سرعت ۴۵ درصد سرعت بحرانی

شکل ۱۶ تغییرات سهم مواد ایجادکننده گشتاور موافق بر حسب پرشدگی آسیا در سرعت ۴۵ درصد بحرانی آسیا را برای آستر نو سرچشمه نشان می‌دهد. افزایش میزان این سهم دلیل کاهش فاصله میان نمودارهای پرشدگی در شکل ۱۲ است.

با توجه به شکل ۱۲ مقدار گشتاورهای مربوط به پرشدگی‌های مختلف در سرعت ۱۱۵ درصد به هم نزدیک می‌شوند. دلیل این امر، سانتریفیوژ شدن بار در داخل آسیا در این سرعت برای تمام پرشدگی‌ها است. در شکل ۱۷ سانتریفیوژ

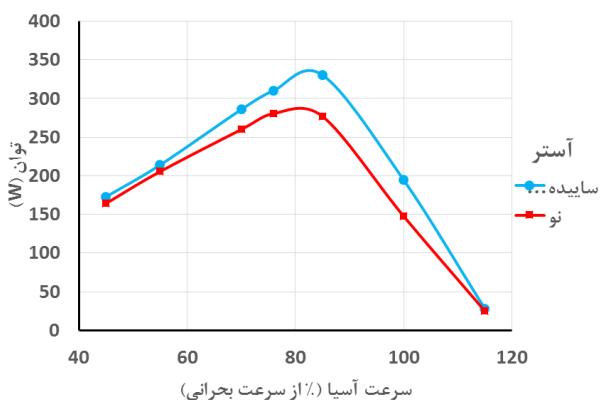
با افزایش سرعت، میزان مواد در پرواز زیاد می‌شود و گشتاور به دست آمده تغییرات زیادی دارد. شکل ۱۴ مربوط به محدوده سرعت ۸۵ تا ۱۱۵ درصد است. در این شکل تغییر شدید گشتاور نسبت به شکل ۱۳ به دلیل افزایش شدید بار در پرواز به روشنی قابل تشخیص است.

نکته مهم دیگری که در شکل ۱۲ نشان داده شده است این است که اختلاف بین گشتاور برای پرشدگی‌های مختلف در یک سرعت یکسان با افزایش پرشدگی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، اختلاف گشتاور بین پرشدگی ۱۵ و ۲۰ درصد در سرعت ۴۵ درصد، ۱/۴۵ کیلوگرم نیرو در متر ولی اختلاف گشتاور بین پرشدگی ۴۰ و ۴۵ درصد در همین سرعت، ۰/۲ کیلوگرم نیرو در



شکل ۱۸- تغییرات توان کشی آسیا بر حسب میزان پرشدگی برای سرعت‌های مختلف

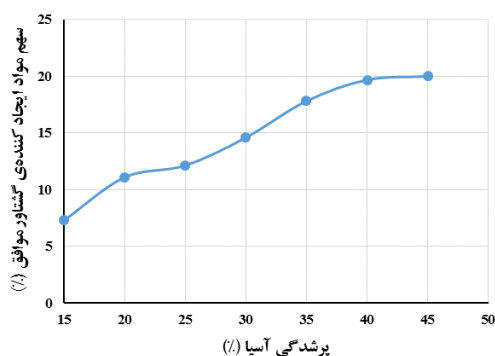
نتایج نشان داد روند تغییرات گشتاور و توان کشی برای هر دو آستر مشابه و مطابق بخش ۳-۱-۶ است. نکته مهم، مقایسه میان توان کشی دو آستر در شرایط مشابه است. در شکل ۱۹ توان کشی آستر نو و ساییده شده سرچشمه، در پرشدگی ۲۵ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، توان کشی با سایش آستر افزایش می‌یابد.



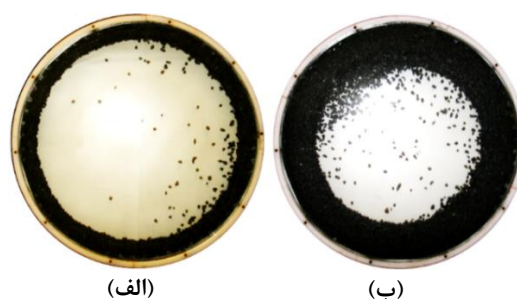
شکل ۱۹- مقایسه تغییرات توان کشی آستر نو و ساییده شده سرچشمه بر حسب سرعت برای پرشدگی ۲۵ درصد

علاوه بر این، در شکل ۲۰ میزان اختلاف توان کشی میان آستر نو و ساییده شده مجتمع سرچشمه بر حسب میزان پرشدگی برای سرعت‌های ۵۵، ۷۰، ۷۶، و ۸۵ درصد سرعت بحرانی نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، بیشترین اختلاف توان کشی در تمام پرشدگی‌ها مربوط به سرعت ۸۵ درصد است. میزان اختلاف توان کشی آستر نو و ساییده شده برای پرشدگی ۲۵ درصد و سرعت ۷۶ درصد که شرایط عملیاتی آسیای صنعتی سرچشمه است، میزان ۱۰ درصد است. بیشترین اختلاف توان کشی مربوط به پرشدگی ۱۵ درصد در سرعت ۸۵ درصد است که در این شرایط، توان کشی آستر ساییده شده ۳۲ درصد بیشتر از توان کشی آستر نو است. این بیشتر بودن توان کشی آسترهای ساییده شده مربوط به وزن

شدن بار داخل آسیا در دو پرشدگی ۱۵ و ۴۵ درصد نشان داده شده است.



شکل ۱۶- تغییرات سهم مواد ایجادکننده گشتاور موافق آسیا بر حسب پرشدگی آسیا



شکل ۱۷- سانتریفیوژ شدن بار (الف) مربوط به پرشدگی ۱۵ درصد و (ب) مربوط به پرشدگی ۴۵ درصد، در سرعت ۱۱۵ درصد سرعت بحرانی آسیا

۳-۷- تغییرات توان کشی آسیا بر حسب میزان پرشدگی

شکل ۱۸ تغییرات توان کشی آسیا را بر حسب میزان پرشدگی در چهار سرعت ۵۵، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد سرعت بحرانی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۸ توان کشی آسیا با افزایش پرشدگی افزایش می‌یابد. در پرشدگی بیش از ۵۰ درصد آسیا به دلیل اینکه سهم موادی که گشتاور موافق ایجاد می‌کنند بیشتر می‌شود، توان کشی کاهش می‌یابد، بنابراین حداکثر توان مستقل از سرعت آسیا در پرشدگی ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد.

در سرعت ۱۰۰ درصد مقدار بحرانی به دلیل اینکه میزان بار در پرواز در مقایسه با سرعت‌های کمتر، زیاد است، توان کشی کاهش می‌یابد.

۳-۸- مقایسه گشتاور و توان کشی آستر نو و ساییده شده سرچشمه

برای بررسی تاثیر سایش در طول عمر آستر بر روی توان کشی آسیا، آزمایش‌هایی با شرایط یکسان در دو آستر نو و ساییده شده سرچشمه (۵۱۸۴ ساعت کارکرد) انجام شد.

۲- هرچه پرشدگی بیشتر شود با توجه به اینکه ضخامت بار زیاد می‌شود، طول بازوی گشتاور کمتر از پرشدگی‌های کمتر خواهد بود و بیشینه بازوی گشتاور در سرعت‌های بالاتری اتفاق می‌افتد. ماکزیمم طول بازوی گشتاور در پرشدگی ۴۰ درصد آسیا در سرعت ۸۰ درصد سرعت بحرانی آسیا اتفاق می‌افتد در صورتی که برای پرشدگی ۱۵ درصد در سرعت ۵۵ درصد سرعت بحرانی است.

۳- بر اساس نتایج به دست آمده برای آستر جدید گل‌گهر، بیشترین مقدار گشتاور برای ۱۵ درصد پرشدگی در سرعت ۵۵ و برای ۳۰ درصد پرشدگی در سرعت ۷۰ درصد به دست آمد. مقایسه اعداد بی‌بعد شده تاثیر وزن مواد و طول بازوی گشتاور نشان داد سهم بازوی گشتاور برای پرشدگی ۱۵ درصد در سرعت ۵۵ و برای پرشدگی ۳۰ در سرعت ۷۰ درصد که بیشترین گشتاورها نیز در همین سرعت‌ها اتفاق افتاده است، بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نقش بازوی گشتاور نسبت به جرم بیشتر بوده است.

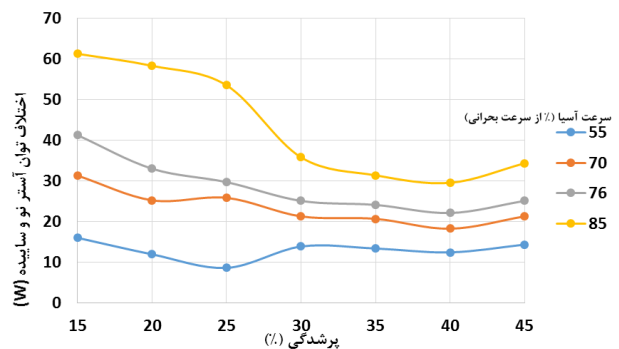
۴- نتایج تغییرات توان کشی در پرشدگی‌های مختلف نشان داد، در پرشدگی بیش از ۵۰ درصد آسیا به دلیل اینکه سهم موادی که گشتاور موافق ایجاد می‌کنند بیشتر می‌شود، در نتیجه توان کشی کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشینه توان کشی، مستقل از سرعت آسیا برای پرشدگی ۵۰ درصد اتفاق می‌افتد.

۵- مقایسه میزان توان کشی آستر نو و ساییده شده سرچشمه نشان داد، آستر ساییده شده در تمامی سرعت‌های آسیا به دلیل بالاروی کمتر بار و سهم کمتر مواد در پرواز نسبت به آستر نو توان کشی بیشتری دارد. به عنوان مثال، برای ۲۵ درصد پرشدگی و سرعت ۷۰ درصد سرعت بحرانی، توان کشی آستر ساییده شده ۱۰ درصد بیشتر از آستر نو بود. بیشترین اختلاف توان کشی مربوط به پرشدگی ۱۵ درصد در سرعت ۸۵ درصد بود که در این شرایط، توان کشی آستر ساییده شده ۳۲ درصد بیشتر از توان کشی آستر نو بود.

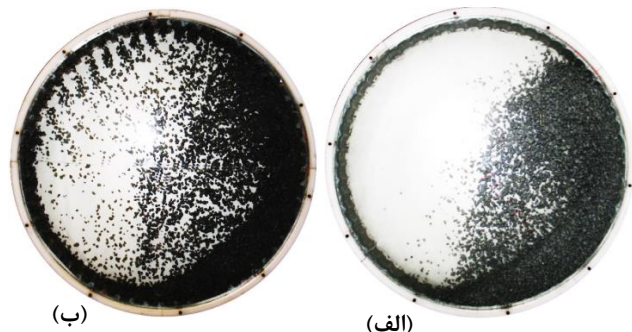
مراجع

- [1] Mulenga F. K., Moys M. H.; 2014; "Effects of slurry filling and mill speed on the net power draw of a tumbling ball mill", Minerals Engineering, vol. 56, pp 45-56.
- [2] Rezaeizadeh M., Fooladi M., Powell M.S., Mansouri S.H.; 2010; "Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power

بیشتر مواد در تماس با پوسته آسیا است. با توجه به اینکه ارتفاع بالابر آستر ساییده شده، کم و زاویه صفحه بالابر آن زیاد است، بالاروی مواد کم شده و مواد روی پوسته آسیا روی هم می‌لغزند و میزان مواد در پرواز نسبت به شرایط مشابه با آستر نو، کم است. این موضوع در شکل ۲۱ نشان داده شده است که در سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی در آسیای با آستر نو میزان مواد در پرواز که نقشی در توان کشی ندارند، زیاد است. در حالی که در آسیای با آستر ساییده شده بخش زیاد بار روی پوسته آسیا است.



شکل ۲۰- میزان اختلاف توان کشی میان آستر نو و ساییده شده مجتمع سرچشمه بر حسب میزان پرشدگی برای سرعت‌های ۵۵، ۷۰، ۷۶، و ۸۵ درصد سرعت بحرانی



شکل ۲۱- الف) آستر ساییده شده و ب) آستر نو سرچشمه در سرعت ۸۵ درصد و پرشدگی ۱۵ درصد

۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج بررسی نشان داد که هرچه میزان پرشدگی بیشتر شود در مقایسه با پرشدگی کمتر، درصد مواد در پرواز کاهش می‌یابد، زیرا در پرشدگی بیشتر، کشیدگی بار در مقایسه با پرشدگی پایین، کمتر است و سهم بیشتری از فضای خالی با مواد پر می‌شود و افت انرژی بین لایه‌های بار بیشتر اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال برای آستر جدید گل‌گهر در پرشدگی ۱۵ و سرعت ۸۵ درصد میزان مواد در پرواز ۶۸ درصد ولی برای پرشدگی ۴۵ درصد میزان مواد در پرواز ۴۵ درصد به دست آمد.

- of mill performance for a full scale three-dimensional SAG mill”, International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Vancouver, Canada, pp 104.
- [15] Bian X., Wang G., Wang H., Wang S. Lv W.; 2017; “Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation”, Minerals Engineering, vol 105, pp 22–35.
- [16] Cleary P. W. Owen P.; 2018; “Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear”, Minerals Engineering, vol 117, pp 42–62.
- [17] Pedrayes F., Normiella J. G., Meleró M. G., Menéndez-Aguado J. M. del Coz-Díaz J.; 2018; “Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring”, Powder Technology, vol 323, pp 433–444.
- [18] Xu L., Luo K. Zhao Y.; 2018; “Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations”, Powder, Technology, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.004>.
- [19] Maleki-Moghaddam M; 2013; “Predicting shape and trajectory of charge in AG and SAG mills; The Gol-E-Gohar Mining and Industrial Company case”, Ph.D. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- [20] Hosseini P., Martins S., Martin T., Radziszewski P. Boyer F. R.; 2011; “Acoustic emissions simulation of tumbling mills using charge dynamics”, Minerals Engineering, vol 24, pp 1440–1447.
- draw and liner impact loading”, Minerals Engineering, vol. 23, pp 1182–1191.
- [3] Morrell S.; 1993; “The optimization of power draw in wet tumbling mills”, Ph.D. Thesis, The University of Queensland, Australia.
- [4] Davis E.W.; 1919; “Fine crushing in ball mills”, AIME Transactions, vol 61, pp 250-296.
- [5] Bond F.C.; 1961; “Crushing and grinding calculations”, Allis Chalmers, Publication No. 07R9235B, Revised Jan.
- [6] Bond F.C.; 1962; “Additions and revision to Crushing and grinding calculations” (Bond, 1961).
- [7] Austin L.G.; 1990; “A mill power equation for SAG mills”, Minerals and Metallurgical Processing, pp 57 – 63.
- [8] Harris C.C.; Scknock E.M.; Arbiter N.; 1985; “Grinding mill power consumption”, Mineral Processing and Technology Review, vol 1, pp 297 – 345.
- [9] Mishra B.K., Rajamani R.K.; 1990; “Numerical simulation of charge motion in a ball mill”. Preprints of the 7th European Symposium on Comminution, pp 555 - 563.
- [10] Morrell S.; 2003; “Grinding mills: How to accurately predict their power draw”, XXII International Mineral Processing Congress, pp 50-59.
- [11] Rajamani R., Joshi A. D., Mishra B. K.; 2002; “Simulation of industrial SAG mill charge motion in 3D space”. 2002 SME Annual Meeting. Phoenix, Arizona: SME Publication.
- [12] Djordjevic N., Shi F. N., Morrison, R.; 2004; “Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM”. Minerals Engineering, vol 17, pp 1135-1142.
- [13] Powell M. S., Govender I., McBride A. T.; 2008; “Applying DEM output to the unified comminution model”. Minerals Engineering, vol 21, pp 744-750.
- [14] Cleary P. W. Franke J.; 2011; “Effect of laser scanned geometry and liner wear on DEM modelling

پی‌نوشت‌ها

- 1- Bond
- 2- Austin
- 3- Harris
- 4- Discrete Element Method (DEM)
- 5- Mishra and Rajamani
- 6- Moys
- 7- Morrell
- 8- Bian
- 9- Cleary and Owen

10- Pedrayes

11- Xu