دانشگاه شهید چمران اهواز
انجمن آهن و فولاد ایران
گروه ملی صنعتی فولاد ایران

سمپوزیوم فولاد ۸۷
۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷
اهواز - دانشگاه شهید چمران

کاربرد آسیای غلتکی با فشار بالا (HPGR) به منظور افزایش سطح ویژه بار ورودی به کارخانه‌های گندله سازی

رسول حجازی[1]*، سید مجید سقائیان*[2]
شرکت فکور صنعت تهران

چکیده

بررسی‌های اولیه بر روی کنسانتره ورودی به کارخانه گندله سازی اردکان یزد نشان می داد که این مواد به علت داشتن سطح ویژه نسبتاً پائین (در حدود $1600 cm^2/gr$) نیاز به یک مرحله خردایش مجدد دارند. لذا پس از بررسی‌های بعمل آمده، آسیای غلتکی با فشار بالا (High Pressure Grinding Roll) به دلیل انرژی مصرفی پائین و راندمان فوق العاده زیاد، به عنوان تجهیز اصلی جهت خردایش مجدد کنسانتره پیشنهاد شد. در این مقاله کاربرد آسیای HPGR جهت آسیاکنی مجدد کنسانتره ورودی به کارخانه گندله سازی اردکان یزد و تاثیرات آن بر روی فرآیند گندله سازی پرداخته شده است. پس از انجام آزمایشات نیمه صنعتی بر روی نمونه معرف کنسانتره، آسیایی با قطر غلتک ۱/۵۲۰ متر، عرض غلتک ۱/۱۰۰ متر، توان مصرفی ۱۶۶۰ کیلووات ساعت و ظرفیت ۵۰۰ تن بر ساعت جهت افزایش سطح ویژه کنسانتره به میزان $500 cm^2/gr$ انتخاب شد. نتایج حاصل از بررسی عملکرد آسیا در طی چندین روز راه اندازی نیز نشان داد، سطح ویژه کنسانتره ای با رطوبت ۹ درصد، به میزان $500 cm^2/gr$ افزایش یافته و بهبود قابل ملاحظه ای نیز در عملکرد کارخانه گندله‌سازی مشاهده شد.

کلمات کلیدی: گندله سازی، HPGR، سنگ آهن، اردکان، فکور صنعت.

[1]- hejazi@fstco.com
[2]- saghaeian@fstco.com

۱- مقدمه

در صنایع فولادسازی کانسنگ‌های آهن استخراج شده از معدن پس از عملیات کانه‌آرایی و انجام فرآیندهایی به گندله تبدیل می شود. در تولید گندله عوامل مختلفی موثر هستند که سطح ویژه کنسانتره (مجموع سطح ذرات در واحد جرم) به عنوان مهمترین عامل در عملکرد فرآیند گندله سازی شناخته می شود. تجربه نشان می دهد سطح ویژه مناسب در حدود ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ سانتی متر مربع بر گرم است که به ازای مقادیر کمتر یا بیشتر گندله حاصله دارای خواص قابل قبولی نخواهد بود [۱].

از اینرو کنسانتره ورودی به کارخانه‌های گندله سازی اغلب به علت نداشتن سطح ویژه مناسب، نیازمند خردایش مجدد هستند. با عنایت به اینکه عملیات خردایش به عنوان پر هزینه ترین بخش در فرآیندهای تغلیظ بشمار می رود، لذا انتخاب صحیح این تجهیزات اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

امروزه فن آوری آسیای غلتکی با فشار بالا (HPGR) با توجه به انرژی مصرفی خیلی پائین و عملکرد بسیار مطلوب به عنوان جایگزینی مناسب برای تجهیزات خردایش و آسیاکنی سنتی معرفی شده اند[۲].

در این مقاله ضمن شرح مفصل عملکرد آسیای HPGR و مزایای آن نسبت به تجهیزات آسیاکنی سنتی، به طراحی و کاربرد تجهیز فوق در کارخانه گندله سازی اردکان یزد به منظور افزایش سطح ویژه کنسانتره ورودی از ۱۶۰۰ تا بیش از ۲۰۰۰ سانتی مربع برگرم و تاثیرات آن بر روی فرآیند گندله سازی پرداخته شده است و بعنوان اولین کاربرد آسیای HPGR در صنعت فولادسازی ایران است.

۲- آسیای غلتکی با فشار بالا (HPGR)

۲-۱- تاریخچه

ساخت آسیای HPGR نتیجه تحقیقات پروفسور K. Schonert بر روی فیزیک شکست تک ذره‌ها و نیز لایه‌های چندگانه ذرات در بستر فشرده شده ای از مواد است. این تحقیقات نشان داد که اگر مواد بوسیله HPGR مورد نرم کنی قرار گیرند، ضمن اینکه انرژی بسیار کمی برای خردایش مورد نیاز است، احتمال افزایش ظرفیت مدار، بدون نیاز به اعمال تغییرات اساسی در آن وجود دارد.

اولین کاربرد HPGR در سال ۱۹۸۵ میلادی و در صنعت سیمان برای نرم کنی کلینکر و مواد خام دیگر بوده است. این روند امروزه با کاربرد بیش از ۵۰۰ واحد HPGR در صنعت فرآوری الماس، آهن و همچنین آماده سازی خوراک کارخانه‌های گندله سازی ادامه یافت[۳-۴].

۲-۲- ساختار

آسیای HPGR متشکل از دو غلطک گردان غیر هم جهت بوده که بر روی یاتاقان‌هایی سوار بوده و به کمک موتورهای مشابه جداگانه‌ای با سرعت ثابت یا متغیر گردش می‌کنند. فشار مورد نیاز جهت اعمال بر روی بستر مواد به وسیله یک سیستم هیدرولیکی بر روی یکی از غلطکها اعمال شده و بوسیله

یک سیستم اتوماتیک قابل تنظیم است. جهت خوراک دهی به دستگاه از یک قیف تغذیه که در بالای غلتکها نصب بوده و مجهز به یک سیستم کنترل سطح بار است، استفاده می شود. (شکل۱). ظرفیت HPGR می تواند تا بیش از ۳۰۰۰ تن بر ساعت باشد. انرژی مصرفی HPGR نیز بین ۱ تا ۳ کیلووات ساعت بر تن است. دستگاه فوق کوچک، بدون صدا و لرزش بوده و در نتیجه به زیرساخت کمتری نیاز دارد [۳-۴].

۲-۳- مکانیزم خردایش

مکانیزم اصلی خردایش در HPGR، به صورت ایجاد ترکهای ریز داخلی در ذرات است که به دو صورت خردایش ذرات در بستر مواد[1] (ip) و دیگری خردایش ذرات به صورت تک ذره ای[2] (sp) می‌باشد. خردایش ip هنگامی رخ می دهد که بزرگترین ذره موجود در خوراک از فاصله بین غلطکها کوچکتر باشد. خردایشsp نیز وقتی صورت می گیرد که بزرگترین ذره خوراک از فاصله بین غلطکها بزرگتر باشد (شکل۲) [۳و۴].

۲-۴- مزایا

انگیزه اولیه برای جایگزینی آسیای HPGR با تجهیزات خردایش سنتی، راندمان انرژی آنها در مقایسه با سنگ شکنها و آسیاهای سنتی بود که ناشی از نحوه باردهی و مکانیزم خردایش.

باردهی در ناحیه فشارآسیا HPGR به صورت یکنواخت و معین است، حال آنکه باردهی در سنگ شکنها و به ویژه آسیاهای گردان سنتی اغلب به صورت نایکنواخت است که منجر به کاهش راندمان انرژی می شود. استفاده از فشار به منظور شسکتن ذرات در آسیای HPGR یکی دیگر از عواملی بهبود راندمان انرژی در اثر کاهش اتلاف انرژی‌های گرما و سر و صدا است. عدم نیاز به واسطه های خردایش (گلوله و میله) نیز از جمله مزایای دیگر آسیای HPGR می باشد. به طور کلی مزایای اصلی تجهیز فوق: انرژی مصرفی فوق العاده پائین، ظرفیت باردهی بالا و پایدار، نیاز به فضای کم، هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی پائین و کنترل فوق العاده ساده می باشند [۳-۵].

۳- پارامترهای طراحی

پارامترهای کلیدی در طراحی HPGR، عبارتند از: نرخ ورودی ویژه ، نیروی نرم کنی ویژه و توان مصرفی ویژه که در ادامه به نحوه محاسبه آنها پرداخته می شود [۳-۴].

۳-۱- نرخ ورودی ویژه (Specific Throughput- m^0)

[1] Inter Particle
[2]- Single Particle

عبارت است از ظرفیت یک HPGR با ابعاد واحد (طول و قطر یک متر) و سرعت گردش غلطک یک متر بر ثانیه (بر حسب تن ثانیه بر متر مکعب ساعت) و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$m^0 = M / (D \times L \times u) \ [ts/hm^3] \quad (۱)$$

که m^0 نرخ ورودی ویژه، M ظرفیت (تن بر ساعت)، L پهنای غلطک (متر)، u سرعت خطی غلتک (متر بر ثانیه)، D قطر غلتک (متر)

۳-۲- نیروی نرم کنی ویژه (Specific Press Force-F_{sp})

برابر است با نیروی اعمالی بر غلطک‌ها در واحد سطح (بر حسب مگا پاسکال) و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_{sp} = F / (1000 \times L \times D) \ [MPa] \quad (۲)$$

که F_{sp} نیروی نرم کنی ویژه، F نیروی اعمالی (کیلونیوتن)،L پهنای غلطک (متر)،D قطر غلتک (متر).

۳-۳- انرژی مصرفی ویژه (Specific Energy Consumption-W_{sp})

انرژی مصرفی به ازای هر تن مواد (بر حسب کیلووات ساعت بر تن) و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$W_{sp} \sim c \times (F_{sp} / m^0) \ [kWh/t] \quad (۳)$$

که W_{sp} انرژی مصرفی ویژه، F_{sp} نیروی فشاری ویژه (مگا پاسکال)، m^0 نرخ ورودی ویژه (تن ثانیه بر متر مکعب ساعت) و فاکتور c (تابعی از F_{sp} و m^0)

۴- کارخانه گندله سازی اردکان یزد

بررسی‌های اولیه بر روی کنسانتره ورودی به کارخانه گندله سازی اردکان یزد نشان می‌داد که سطح ویژه این مواد چندان مناسب برای گندله سازی نمی باشد (حدود ۱۶۰۰ سانتی متر مربع بر گرم). این امر لزوم خردایش مجدد کنسانتره ورودی به کارخانه را اجتناب ناپذیر نمود. لذا دو گزینه جهت خردایش کنسانتره مطرح گردید: ۱) استفاده از آسیای گلوله ای ۲) استفاده از آسیای HPGR.

مطالعات فنی و اقتصادی بعمل آمده توسط شرکت فکور صنعت نشان داد که استفاده از آسیای HPGR به دلیل مزایای فراوان نسبت به سیستمهای خردایش سنتی، گزینه‌ای به مراتب مناسبتر نسبت به آسیای گلوله ای است. لذا این شرکت اقدام به انجام آزمایشات مربوطه جهت طراحی و کاربرد آسیای HPGR در کارخانه گندله سازی اردکان نمود. لازم به ذکر است امروزه آسیای HPGR به دلیل افزایش تولید ذرات فوق العاده ریز در کنسانتره، کمک به تولید بیشتر گندله‌های یکنواخت، افزایش مقاومت مکانیکی گندله‌های خام، کاهش مصرف مواد افزودنی چسبنده، امکان کنترل بهتر رطوبت، کاهش

مصرف سوخت و افزایش بازدهی تجهیزات، کاربرد بسیار زیادی در کارخانجات گندله سازی پیدا نموده است. در ادامه به مراحل طراحی و کاربرد آسیای HPGR در کارخانه گندله سازی اردکان و تاثیرات آن بر روی فرآیند گندله سازی پرداخته می شود.

۵- آزمایشات خردایش در مقیاس نیمه صنعتی

به منظور بررسی عملکرد آسیای HPGR و تعیین پارامترهای کلیدی طراحی، اقدام به انجام آزمایشات خردایش با آسیای HPGR نیمه صنعتی در موسسه پلی زیوس آلمان شد. در حین انجام آزمایشات: نرخ ورودی ویژه، نیروی نرم کنی ویژه، انرژی مصرفی ویژه و میزان افزایش سطح ویژه در شرایط عملیاتی مختلف تعیین گردیدند.

۵-۱- مشخصات نمونه معرف کنسانتره

نمونه معرف کنسانتره تهیه شده جهت انجام آزمایشات دارای سطح ویژه ۱۶۰۰ سانتی مربع بر گرم، رطوبت ۸/۷۱ درصد، چگالی مخصوص ۴/۹۵۳ گرم بر سانتی مترمکعب و چگالی ظاهری ۱/۹۰۸ گرم بر سانتی مترمکعب و دانه بندی به شرح جدول ۱ بوده است.

۵-۲- مشخصات HPGR نیمه صنعتی

آسیای HPGR مورد استفاده جهت انجام آزمایشات دارای قطر غلتک ۷۱۰ میلیمتر، عرض غلتک ۲۱۰ میلیمتر، سرعت ۰/۲۹ الی ۱/۱۰ متر بر ثانیه و سطح از نوع میخچه ای بوده است.

۵-۳- نتایج آزمایشات

نتایج آزمایشات خردایش بر روی نمونه معرف کنسانتره که در شرایط عملیاتی مختلف انجام گرفته، در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود:

- با یک مرحله خردایش در شرایط آزمایشی مختلف، افزایش سطح ویژهی برابر با ۴۰۷ cm^2/gr تا ۵۵۳ cm^2/gr حاصل می شود.
- نرخ ورودی ویژه آسیا در حین آزمایشات برابر با ۱۸۱ ts/hm^3 تا ۲۶۳ ts/hm^3 حاصل شود.
- انرژی مصرفی ویژه بسته به شرایط انجام آزمایش برابر با ۱/۶ kWh/t تا ۲/۲ kWh/t می باشد.

طبق نتایج حاصل از انجام آزمایشات، محتوی رطوبت کنسانتره، به عنوان مهمترین عامل تاثیرگذار در عملکرد آسیا شناخته می شود.لذا کنترل رطوبت کنسانتره در حین فرآیند خردایش بسیارحائزاهمیت است.

۶- طراحی آسیای HPGR

هدف از طراحی آسیا تعیین ابعاد دستگاه، به ویژه انتخاب قطر مناسب برای غلطک است که بتواند نرخ ورودی مورد نیاز را تامین کنند که درادامه به شرح آن پرداخته می شود.

۶-۱- تعیین ابعاد آسیا

در صورتی که نسبت طول به قطر آسیا برابر با ۰/۷، ظرفیت کارخانه ۵۰۰ تن بر ساعت و سرعت غلتک‌ها ۱/۶۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شود، بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات نیمه صنعتی می توان ابعاد را تعیین نمود:

$m^0 = M / (D \times L \times u)$ [ts/hm³]

M= 500 t/h L=0.7 D u=1.67 m/s m^0= 263 ts/hm^3

263= 500/ (D× D ×0.7 × 1.67) ⟹ **D= 1.3 m ; L= 0.9 m**

۶-۲- محاسبه توان مصرفی

طبق نتایج حاصل از انجام آزمایشات توان مصرفی آسیا به ازای باروردی ۵۰۰ تن بر ساعت برابر است با:

$P= W_{sp} \times M \times F$

W_{sp} = 2.22 kWh/t M= 500 t/h F= 1.15

P = 2.22 × 500 × 1.15= 1276 kW ⟹ **P = 1276 Kw**

بنابراین مقدار توان مصرفی مور د نیاز برای هر موتور برابر خواهد بود با ۶۳۸ کیلو وات ساعت.

۶-۳- محاسبه نیروی نرم کنی

بر اساس نتایج حاصل از انجام آزمایشات نیمه صنعتی مقدار نیروی نرم کنی لازم برای خردایش مواد برابر خواهد بود با:

$F = F_{sp} \times L \times D \times 1000$ (kN)

F_{sp}= 3.75 N/mm^2 L= 1.6 m D= 2.3 m

F= 3.75 × 1.6 × 2.3 × 1000 = 13800 kN ⟹ **F= 13800 kN**

در نهایت طبق پارامترهای محاسبه شده و جدول ارائه شده توسط شرکت پلی زیوس برای آسیای HPGR، آسیای با مشخصات جدول ۳ برای کارخانه گندله سازی اردکان انتخاب شد.

۷- بررسی عملکرد آسیای HPGR

به منظور بررسی عملکرد آسیای HPGR طراحی و نصب شده در کارخانه گندله سازی اردکان یزد و تاثیر آن بر روی فرآیند گندله سازی، عملکرد کارخانه در چند روز متوالی مورد بررسی و کنترل قرار گرفت که دستاوردهای زیر را برای کارخانه گندله سازی به همراه داشته است.

الف) افزایش سطح ویژه کنسانتره ورودی به میزان ۵۰۰ cm^2/gr (شکل ۳).

ب) کاهش میزان مصرف بنتونیت

ج) تولید گندله‌های یکنواخت و مقاوم تر

د)کاهش باربرگشتی در فرآیند گندله سازی

ه) کاهش هزینه‌های تولید

۸- نتیجه گیری

۱- استفاده ازآسیای HPGR به دلیل انرژی مصرفی پائین، راندمان فوق العاده بالا و هزینه‌های پائین، به عنوان مناسب ترین روش جهت خردایش مجدد کنسانتره ورودی به کارخانه پیشنهاد شد.

۲- بر اساس نتایج آزمایشات نیمه صنعتی بر روی نمونه معرف کنسانتره، آسیای HPGR، با قطر غلتک ۱/۵۲۰ متر، آسیایی با قطر غلتک ۱/۵۲۰ متر، عرض غلتک ۱/۱۰۰ متر، توان مصرفی ۱۶۶۰ کیلووات ساعت و ظرفیت ۵۰۰ تن بر ساعت جهت افزایش سطح ویژه کنسانتره انتخاب شد.

۳- نتایج بررسی‌های بر روی عملکرد آسیای HPGR نصب شده در مدار کارخانه گندله سازی اردکان، حاکی از:

- افزایش سطح ویژه کنسانتره ورودی به طور متوسط به میزان $۵۰۰cm^2/gr$،
- کاهش قابل توجه بنتونیت مصرفی
- تولید گندله‌های مقاوم و یکنواخت‌تر
- و در نهایت کاهش بار درگردش در طی فرآیند گندله سازی بوده است.

۹- مراجع

[۱] ناصر توحیدی، رامز وقار، "آماده سازی بار کوره‌های تولید آهن و فولاد"، ۱۳۷۶، انتشارات دانشگاه تهران.

[2] C. Moley, "High Pressure Grinding Rolls ", A Technology Review- Advances in Comminution, SME, pp. 15-41

[3] R. Klymowsky, N. Patzelt, J. Knecht and E. Burchardt "Selection and Sizing of High Pressure Grinding Rolls ", Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings, SME 2002, Vol. 1, pp. 636-668.

[۴] امیر پرویز مهرانی ، عباس سام و حسن حاجی امین شیرازی "امکان سنجی خردایش مجدد بار در گردش مدار نرم کنی مجتمع سنگ آهن گل گهر"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، زمستان ۱۳۸۳.

[5] L. B.(Rene)Klymowsk, "Selecting and Sizing of High Pressure Grinding Rolls", Polusius AG, Beckum, Germany, 2005.

جدول ۱. دانه‌بندی نمونه معرف کنسانتره ورودی به کارخانه گندله سازی اردکان یزد.

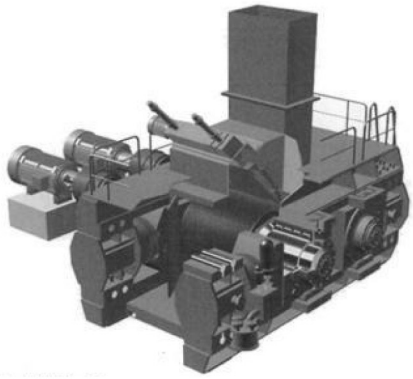
اندازه (میکرون)	۵۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۹۰	۴۵	۳۲
عبوری (٪)	۹۹/۹	۹۹/۴	۹۹/۰	۹۴/۹	۷۸/۰	۶۷/۶

جدول ۲. نتایج آزمایشات خردایش نیمه صنعتی بر روی نمونه معرف کنسانتره با آسیای HPGR.

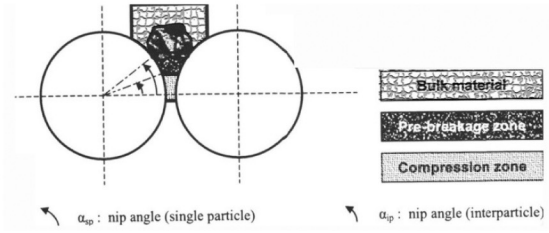
آزمایشات	سطح ویژه (Blaine)			رطوبت	نیروی نرم کنی ویژه	انرژی مصرفی ویژه	نرخ ورودی ویژه
	خوراک	محصول	میزان افزایش				
	cm^2/gr	cm^2/gr	cm^2/gr	(%)	N/mm^2	kWh/t	ts/hm^3
آزمایش ۱	۱۶۱۰	۲۱۱۱	۵۰۱	۸/۵	۳/۰۰	۱/۶۱	۲۶۳
آزمایش ۲	۱۶۱۰	۲۰۱۷	۴۰۷	۹/۵	۲/۸۰	۲/۰۲	۱۸۱
آزمایش ۳	۱۶۱۰	۲۰۷۸	۴۶۸	۹/۰	۲/۹۶	۱/۸۰	۲۳۴
آزمایش ۴	۱۶۱۰	۲۱۳۷	۵۲۷	۹/۰	۳/۵۰	۲/۲۲	۲۱۷
آزمایش ۵	۱۶۱۰	۲۱۶۳	۵۵۳	۸/۵	۳/۷۵	۲/۰۹	۲۵۱

جدول ۳. مشخصات آسیای HPGR انتخاب شده برای کارخانه گندله سازی اردکان یزد.

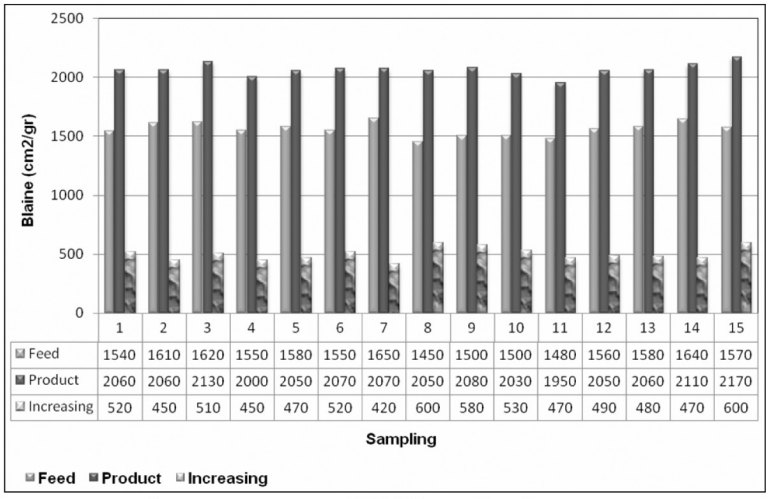
سازنده	Polysius
مدل	۱۵/۱۱-۴
ظرفیت (جامد خشک)	۵۰۰t/h
قطر غلتک	۱/۵۲۰ m
عرض غلتک	۱/۱۰۰ m
توان موتور	۲ × ۸۳۰kWh
سرعت غلتکها	۱/۶۷ m/s



شکل ۱. شمای کلی از آسیای HPGR [۳].



شکل ۲. شمایی از مکانیزم خردایش در آسیای HPGR [۵].



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Feed	1540	1610	1620	1550	1580	1550	1650	1450	1500	1500	1480	1560	1580	1640	1570
Product	2060	2060	2130	2000	2050	2070	2070	2050	2080	2030	1950	2050	2060	2110	2170
Increasing	520	450	510	450	470	520	420	600	580	530	470	490	480	470	600

شکل ۳. نتایج حاصل از بررسی عملکرد آسیای HPGR نصب شده در کارخانه گندله سازی اردکان یزد.