

تعیین پارامترهای تاثیر گذار در استحکام فشاری سرد (CCS) گندله با استفاده از تکنیک‌های داده کاوی

رضا شکری زاده^۱، سید محسن نبوی^۲

^۱ دانش‌آموخته دکتری مهندسی صنایع دانشگاه علوم و تحقیقات تهران،

مشاور شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

^۲ مدیر سیستم‌ها، برنامه و بودجه شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

نام نویسنده مسئول:

رضا شکری زاده

چکیده

CCS یکی از پارامترهای کنترلی حین تولید گندله می‌باشد و پیشنهاد شده است برای کنترل فرایند به دقت پایش شود. در این مقاله به منظور توسعه استراتژی کنترل، تکنیک‌های مختلف داده‌کاوی مانند رگرسیون خطی ساده، رگرسیون لاسو، رگرسیون تیغه‌ای، رگرسیون بهترین ترکیب، شبکه‌های عصبی، درخت‌های تصمیم مختلف و جنگل‌های تصادفی بررسی شده‌اند که مدل شبکه عصبی از دقت بسیار بیشتری برخوردار بوده است. برای پیش‌بینی CCS گندله‌ها در مقابل چهارده متغیر ورودی شامل سرعت خوراک دهی گندله خام، ارتفاع بستر گندله‌ها، دمای پخت، دمای مسیر، رطوبت، فشار، لجن، هماتیت، مگنتیت، فید ورودی، اکسید آلومینیم، اکسید منیزیم، اکسید آهن و بازیسیته در گندله پخته شبکه عصبی پیش‌خور (Feed Forward) با تکنیک Gradient descent برای پیش‌بینی CCS به کار برده شده است. مشاهده گردید که متغیرهای هماتیت، اکسید آهن، دمای پخت و بازیسته در گندله پخته بیشترین حساسیت را روی CCS دارند.

واژگان کلیدی: شبکه عصبی، رگرسیون لاسو، رگرسیون تیغه‌ای، جنگل‌های تصادفی، درخت‌های تصمیم، استحکام فشاری سرد.

مقدمه

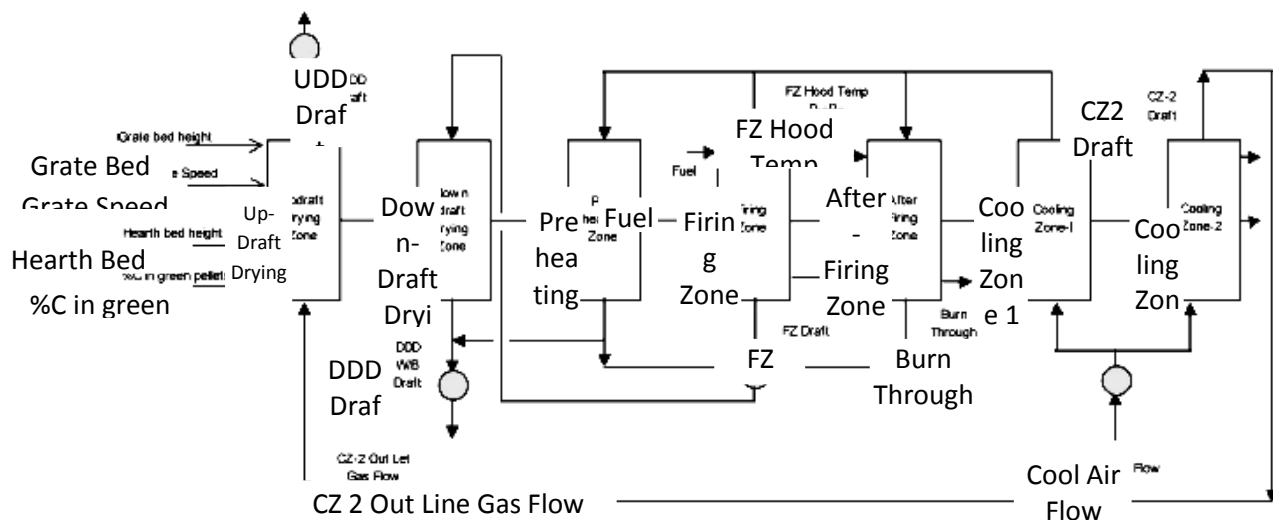
در کوره بلند و یا شافتی بار باید نفوذپذیری لازم را داشته باشد تا گاز به طور یکنواخت و با سرعت بالایی خارج شود. کنسانتره سنگ آهن تولید شده به شکل پودر مناسب نمی باشد زیرا در جاهای خالی فشرده شده و راه های نفوذ را می بندد و بستر غیرقابل نفوذ ایجاد می کند. همچنین ذرات سنگ آهن همواره با گاز خروجی به صورت غبار خارج می شوند. بنابراین پودر کنسانتره سنگ آهن باید به ذرات بزرگتری آگلومره شود تا نفوذپذیری بستر بار کوره و سرعت احیاء افزایش و مواد خروجی از کوره به شکل غبار کاهش یابد. معمول ترین روش آگلومره کردن گندله سازی است که شامل تولید گلوله های خام از پودر کنسانتره سنگ آهن و حرارت دادن در دماهای بالا برای سخت کردن و دستیابی به خواص مطلوب می باشد [۱]. استحکام فشاری سرد، CCS به عنوان یکی از معیارهای اصلی محک گندله برای فرایندهای متالورژیکی در کوره بلند است. گندله های با CCS پایین نمی توانند وزن بار کوره بلند را تحمل کنند. نتایج نشان می دهد که افزایش تولید ذرات ریز باعث کاهش نفوذپذیری و استحکام فشاری بالا باعث رفتار بهتر گندله در کوره می شود. بهبود CCS گندله، تولید ذرات ریز غبار را در حین احیا کاهش و به افزایش تولید واحدهای تولید آهن کمک می کند.

تلاش های زیادی برای مدل کردن فرایند گندله سازی به منظور پیش بینی کیفیت گندله انجام شده است [۲،۳]. پیچیدگی انتقال حرارت و انتقال جرم در کنار واکنش های گاز-جامد و جامد-جامد و فرایند سوختن همگی مدل کردن گندله سازی را بسیار سخت می کند. باترهان (۱۹۸۶) فرمولاسیونی را بیان نمود که استحکام فشاری را با استفاده از مدل هسته کاهنده پیش بینی می نمود. وی رابطه بین انقباض و استحکام را نیز استخراج نمود [۴]. مکانیزم های پیچیده و زیادی برای ایجاد استحکام بدست آمده است ولی در هیچ یک از آنها از روش عددی استفاده نشده است [۲،۳]. برای مدل کردن این سیستم های پیچیده شبکه عصبی یک تکنیک مناسب می باشد. شبکه عصبی این قابلیت را دارد تا روابط غیرخطی و پیچیده بین پارامترهای ورودی و خروجی فرایند را بدست آورد. شبکه عصبی یک روش محاسباتی بوده و نیازی به دانش قبلی از فرایند مدلسازی ندارد. با استفاده از شبکه عصبی سیستم های متالورژیکی مختلفی به طور موفقیت آمیزی مدلسازی شده اند [۵]. در این پژوهش ارتباط بین CCS و چهارده متغیر فرایندی برای پیش بینی CCS با استفاده از شبکه عصبی بررسی و یک مدل پیش بینی کننده ارائه شده است. برای آموزش و آزمایش مدل داده های زیادی از یک کارخانه گندله سازی در شرکت سنگ معدن گل گهر گرفته شد.

فرایند گندله سازی

تولید گندله اکسیدی سنگ آهن از ذرات ریز سنگ آهن شامل عملیات مختلفی مثل خشک کردن برای حذف رطوبت و آسیاب کردن به منظور دستیابی به دانه بندی مناسب است. بعد از مخلوط کردن ذرات پودر شده سنگ آهن با دیگر مواد افزودنی مثل آهک، لجن و دوغاب سنگ آهن، گندله های خام با استفاده از دیسک های گندله ساز تولید می شوند. گندله های خام در کوره به منظور دستیابی به خواص فیزیکی، مکانیکی و متالورژیکی مناسب برای خوراک دهی به واحدهای تولید آهن، پخته می شوند.

کنترل و عملیات کوره دارای بحث های زیادی است زیرا اندازه گیری و کنترل در این واحد بسیار سخت و همراه با مشکلات است. فرایند در کوره دارای سه مرحله اصلی است: (۱) خشک کردن گندله خام (۲) پخت و زینتر کردن در دمای ۱۲۵۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد (۳) سرد کردن گندله های پخته قبل از تخلیه روی نوار نقاله و انتقال به استک پایل. گندله ها در طول کوره به وسیله پنجره های آهنی به اسم گریت که اجازه عبور هوا را می دهد انتقال داده می شوند. این گریت ها با پنج سانتیمتر از گندله پخته به عنوان لایه محافظ بارگیری شده و سپس به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر از گندله خام پر می شود. شکل ۱ فلوشیت ساده ای از جریان مواد در کوره را نشان می دهد. کوره از هفت ناحیه به ترتیب خشک کردن رو به بالا (Up-Draft Drying (UDD)، خشک کردن رو پایین (Down-Draft Drying (DDD)، منطقه پیش گرم (Preheating (PH)، منطقه پخت (Firing (FZ)، منطقه پس از پخت (After-Firing (AFZ)، منطقه سرد کردن ۱ (Primary Cooling (CZ1) و منطقه سرد کردن ۲ (Primary Cooling (CZ2). پنج دمنده هوا برای چرخش هوا در نواحی مختلف کوره به کار برده شده است [۴].



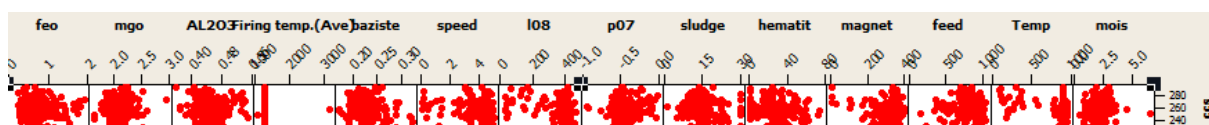
شکل ۱: دیاگرام شماتیک از فرایند پخت در کوره برای گندله سازی سنگ آهن

گندله‌های پخته شده دارای FeO (اکسید آهن) کمتر از ۱٪، CCS(Kg/pellet) ۲۶۰-۳۸۰، TI ۹۵-۹۰، AI ۵-۶.۳ RDI، mm کمتر از ۰.۵ و RDI(-0.5 mm) کمتر از ۵٪ می‌باشند. با توجه به این خصیصه‌های فیزیکی، CCS نقش مهمی در تولید آهن دارد. کیفیت گندله پخته به پارامترهای ورودی زیادی مثل ترکیب شیمیایی، ریزی ذرات SiO_2 ، Al_2O_3 ، مقدار فلاکس و چسب (CaO, MgO و SiO_2)، رطوبت گندله خام، شرایط پخت و دیگر پارامترهای فرایندی مثل سرعت خوراک دهی و ارتفاع بستر بستگی دارد.

روش کار

بررسی ارتباط متغیرهای ورودی با CCS

ابتدا ارتباط بین متغیرهای ورودی و CCS بررسی گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است، همانطور که ملاحظه می‌گردد متغیرهای ورودی با CCS رابطه غیر خطی دارند و استفاده از روشهای رگرسیون خطی ساده، لاسو، تیغه‌ای، بهترین ترکیب و درختهای تصمیم که در جدول (۱) نشان داده شده است دارای ضریب همبستگی خطی بسیار پایین می‌باشند که در این زمینه مناسب نمی‌باشند، به همین دلیل از شبکه‌های عصبی که بسیار توانا در مدل‌سازی روابط غیر خطی و پیچیده می‌باشند، استفاده گردیده است.



شکل ۲- ارتباط بین متغیرهای ورودی با CCS

جدول ۱- خروجی روش‌های مختلف رگرسیون و درخت‌های تصمیم

ردیف	روش	ضریب تعیین
۱	رگرسیون خطی ساده	۱۸٪
۲	رگرسیون لاسو	۲۲٪
۳	رگرسیون تیغه‌ای	۲۰٪
۴	رگرسیون بهترین ترکیب	۱۹٪
۵	درخت CART	۲۵٪
۶	درخت CHILD	۱۷٪
۷	جنگل‌های تصادفی	۲۷٪

طراحی شبکه عصبی

به منظور درک پارامترهای حاکم که بیشترین تاثیر را روی استحکام گندله‌ها می‌گذارند مدل عصبی توسعه داده شد. تکنیک Gradient descent برای آموزش شبکه به کار گرفته شد. برای بهبود آموزش متغیرهایی مثل تعداد نورون‌ها در لایه پنهان، تابع انتقال، تعداد epoch، مومنتم و سرعت آموزش تنظیم شدند. ساختار چهار لایه ۱-۵-۱۴-۶ به کار برده شد. تعداد نورون‌های ورودی برابر با تعداد متغیرهای ورودی است و نورون خروجی نمایانگر CCS می‌باشد.

مکانیزم آموزش

آموزش با ۷۰٪ از داده‌های ورودی- خروجی انجام شد. هنگام آموزش وزن اتصال داخلی بین نورون‌ها به گونه ای تنظیم می‌شود تا میانگین مجموع مربعات خطا در آموزش به حداقل برسد. بعد از آموزش کامل شبکه بهترین وزن‌های بدست آمده برای آزمایش اصلی به کار برده می‌شوند. مکانیزم کار شبکه در زیر توضیح داده می‌شود:

داده‌ها به نورون‌های ورودی وارد می‌شوند و ورودی برای نورون‌های لایه پنهان و خروجی حاصل جمع نتیجه تمام نورون‌های ورودی و وزن اتصال داخلی نورون‌ها می‌باشد [۶].

$$I_i = \{ \sum_j I_j W_{ji} + b_i \} \quad (1)$$

به طوری که:

i آمین نورون در لایه $K=2, 3, 4$ for $i=14$

j آمین نورون در لایه $K-1$ $j=14$

W_{ji} وزن اتصال داخلی بین آمین نورون در لایه $K-1$ و آمین نورون در لایه K

I_i مجموع ورودی‌های آمین نورون در لایه K ($K=4, 3, 2$)

I_j ورودی آمین نورون در لایه $K-1$

b_i مقدار اضافی بایاس برای آمین نورون در لایه K

در پژوهش حاضر تابع هایپربولیکی تانژانت برای انتقال سیگنال در نورون‌های همجوار استفاده شده است.

$$O_i = \frac{e^{I_i} - e^{-I_i}}{e^{I_i} + e^{-I_i}} \quad (2)$$

قبل از شروع آموزش تمام وزن‌ها اتفاقی انتخاب می‌شوند. در حالت آموزش شبکه وزن‌هایی را می‌سازد و خروجی را بدست می‌آورد.

سپس خروجی خروجی آن با خروجی هدف برای تمام نورون‌های خروجی مقایسه می‌شود و وزن‌ها بهنگام می‌شوند [۶].

آموزش و ارزیابی شبکه

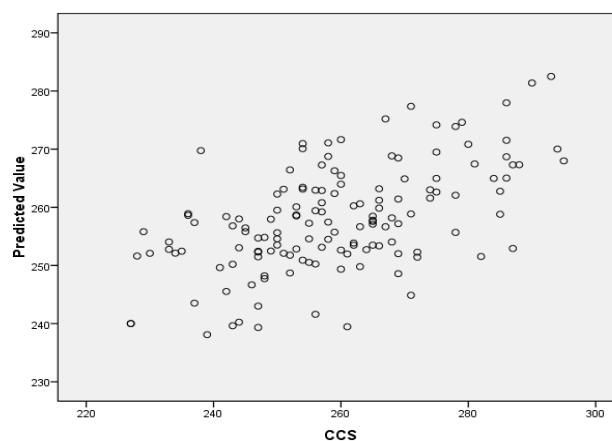
بر اساس تجارب عملیاتی متغیرهای داده شده در جدول ۱ انتخاب شدند. به منظور مدلسازی داده‌های عملیاتی ۱۵۴ روز کارخانه گندله سازی جمع آوری شد. بعد از حذف داده‌های پرت و توجه به داده‌های که در حالت پایدار عملیاتی بدست آمده بودند ۱۵۹ داده برای آموزش و آزمایش شبکه انتخاب شد. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش اصلی به کار برده شد.

جدول ۱: متغیرهای مهم کیفیت استحکام گندله

انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	تعداد	
۰,۳۶	۰,۸۰	۱,۹۱	۰,۲۴	۱۵۹	FeO
۰,۱۹۸	۲,۰۸	۲,۹۶	۱,۶۹	۱۵۹	MgO
۰,۰۳۷	۰,۴۶	۰,۵۵	۰,۳۶	۱۵۹	Al ₂ O ₃
۱۵۳,۰۴	۱۲۹۰	۳۲۰۰	۱۰۹۷,۳۲	۱۵۹	FT
۰,۰۲۷	۰,۲۳	۰,۳۲	۰,۱۷	۱۵۹	Baziste
۱,۱۶	۳,۹۱	۵,۱۳	۰,۰	۱۵۹	Speed
۱۰۸,۸۷	۳۵۹	۴۷۰,۵۴	۲۴,۴۶	۱۵۹	H
۰,۱۵۵۳	۰,۴۳-	۰,۰	۰,۹۵-	۱۵۹	P
۵,۵۰۷	۱۵,۴۵	۳۰,۰۴	۱,۲۶	۱۵۹	Sludge
۱۷,۱۸	۲۸,۰۵۵	۷۴,۳۳	۰,۱۳	۱۵۹	Hematit
۷۵,۱۰	۳۰۸,۱۹	۳۹۹,۲۳	۰,۵۸	۱۵۹	Magnet
۱۷۵,۲۳	۸۰۱,۸	۱۰۵۸,۲۳	۱۳۰,۷۳	۱۵۹	Feed
۲۲۴,۲۷	۸۱۵,۹	۹۵۴,۶۳	۸۴,۸۰	۱۵۹	Temp
۰,۷۸	۱,۹۸	۶,۵۰	۰,۴۰	۱۵۹	Mois
				۱۵۹	Valid N (listwise)

نتایج شبکه برای CCS (Kg/pellet)

شبکه تا زمانی که حداقل میانگین مجموع مربعات خطا بدست آید آموزش داده می‌شود. خروجی واقعی و پیش بینی شده برای شبکه در هنگام آموزش و آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر اولیه آموزش برای دستیابی به وزن‌های اولیه مدل به کار برده شد. میانگین خطای مطلق در هنگام آموزش ۸/۷۳ در پیش بینی CCS می‌شود. در هنگام آزمایش اصلی میانگین خطای مطلق ۳/۷۸ در پیش بینی ایجاد می‌کند.



شکل ۳: نتایج حاصل از آموزش و آزمایش مدل شبکه عصبی برای CCS

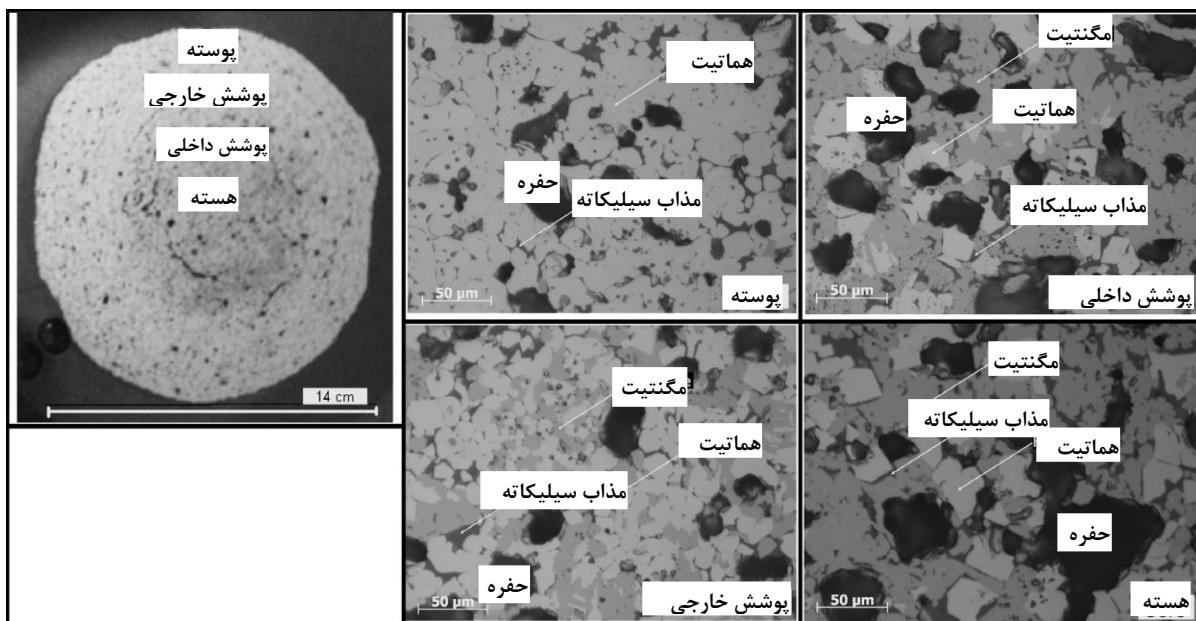
تأثیر متغیرهای ورودی روی CCS

تأثیر پارامترهای ورودی روی CCS روی تمام ورودی‌ها انجام شده است که در جدول ۲ نشان داده شده است، همانطور که ملاحظه می‌گردد متغیرهای هماتیت، FeO، دمای پخت و بازیسته در گندله پخته بیشترین حساسیت را روی CCS دارند.

جدول ۲: اهمیت متغیرها در CCS

وزن	متغیر
۰,۱۰۵	FeO
۰,۰۵۸	MgO
۰,۰۳۳	Al ₂ O ₃
۰,۰۹۲	FT
۰,۰۹۰	Baziste
۰,۰۵۴	Speed
۰,۰۴۲	H
۰,۰۴۷	P
۰,۰۳۴	Sludge
۰,۱۴۴	Hematit
۰,۰۷۸	Magnet
۰,۰۵۴	Feed
۰,۰۸۳	Temp
۰,۰۸۵	Mois

افزایش بازیسته گندله تأثیر زیادی روی CCS دارد. این تأثیر مربوط می‌شود که CaO بیشتر منجر به تشکیل فاز اکسیدی آهن کلسیم در اثر واکنش بین اکسید کلسیم و اکسید آهن می‌شود [۷]. مقدار FeO بالا در گندله پخته تأثیر معکوس روی CCS دارد. مقدار بالای FeO یا Fe₃O₄ نشان دهنده اکسیداسیون ضعیف در همگام پخت گندله است. این امر موجی ایجاد ساختار دولایه در گندله با هسته اکسید نشده و پوسته هماتیتی می‌شود. میکروگراف گندله اکسید شده ضعیف با ساختار دولایه در شکل ۴ نشان داده شده است. هسته و پوشش داخلی مقدار زیاد مگنتیت را نشان می‌دهد در حالی که پوشش خارجی و پوسته مقدار زیاد هماتیت و مقدار خیلی کم از مگنتیت را نشان می‌دهد. ظرفیت تحمل بار کم این ساختار دو لایه از استحکام پایین گندله ناشی می‌شود [۸]. دمای پخت بالا استحکام گندله را بهبود می‌بخشد زیرا ذوب سطحی (surface fusion) پیوندهای جامد بین ذرات ایجاد می‌کند. سطح مقطع اتصال این پیوندها با افزایش دما افزایش یافته و در نتیجه استحکام را افزایش می‌دهد [۹].



شکل ۴: میکروگراف مربوط به گندله اکسیدشده ضعیف با ساختار دولایه

نتیجه گیری

با استفاده از مدل شبکه عصبی و در دست داشتن داده‌های صنعتی زیاد برای آموزش شبکه می‌توان CCS گندله را پیش بینی نمود. شبکه عصبی feed forward Gradient descent متشکل از دو لایه پنهان به طور موفقیت آمیزی برای پیش‌بینی CCS از چهارده متغیر ورودی به کار برده شد. تطابق خوبی بین CCS پیش‌بینی شده و مقدار واقعی آن به وجود آمد. با توجه به تجزیه و تحلیل های انجام شده ، نتایج زیر بدست آمد:

- (۱) مقدار بالای بازیسیته و دمای پخت استحکام فشاری سرد گندله را افزایش می‌دهد.
- (۲) مقدار بالای FeO در گندله پخته به طور فزاینده ای استحکام گندله را کاهش می‌دهد.
- (۳) مقدار رطوبت گندله‌های خام باید به دقت کنترل شود. مقدار زیادی رطوبت استحکام فشاری سرد را پایین می‌آورد

منابع و مراجع

- [1] T. C. Eisele and S. K. Kawatra: Miner. Process. Extra. Metall. Rev., 24 (2003), 5.
- [2] K. Kuçukada, J. Thibault, D. Hodouin, G. Paquet and S. Caron: Can. Metall. Q., 33 (1994), 1.
- [3] S. Caron, G. Ouellet, D. Roy and G. Paquet: Proc. of 59th Iron Making Conf., Iron and Steel Society, Warrendale, PA (USA), (2002), 439.
- [4] R. J. Batterham: Metall. Trans. B, 17B (1986), 481.
- [5] D. Loney, I. Roberts and J. Watson: Ironmaking Steelmaking, 24 (1997), No. 1, 34.
- [6] L. M. Fu: Neural Networks in Computer Intelligence, Tata McGraw-Hill Edition, New Delhi, (2003), 82.
- [7] C. G. Thomas, J. D. G. Hamilton and K. McG. Bowling: Pellet and Granules Symp., AMIM, Parkville, Vic., Australia, (1974), 93.
- [8] V. Niiniskorpi: 61st Iron Making Conf. Proc., Iron and Steel Society, Warrendale, PA (USA), (2002), 533.
- [9] M. Zahirul haque, A. Zahir and M. Abouzeid: Bull. Fac. Eng., Assiut Univ., 21 (1993), No. 1.