پژوهش در مدیریت و مهندسی صنایع، شماره ۱۲ ، زمستان ۱۳۹۶، ص ۲۱- ۱۳

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

فصلنامه علمی پژوهش در مدیریت و مهندسی صنایع (سال سوم)
شماره ۱۲ / زمستان ۱۳۹۶ / ص ۳۱- ۱۳

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، تکنیک-های مختلف داده‌کاوی مانند رگرسیون خطی ساده، رگرسیون لاسو، رگرسیون تیغه‌ایی، 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 پیش بینی 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 پیش خور (Feed Forward) با تکنیک Gradient descent برای پیش بینی 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 تیغه‌ایی، جنگل‌های تصادفی، درخت‌های تصمیم، استحکام فشاری سرد.

پژوهش در مدیریت و مهندسی صنایع، شماره ۱۲ ، زمستان ۱۳۹۶، ص ۲۱ – ۱۳

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

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 نمی‌باشد زیرا در جاهای خالی فشرده شده و راه‌های نفوذ را می‌بندد و بستر غیرقابل نفوذ ایجاد می‌کند. همچنین ذرات سنگ آهن همراه با گاز خروجی به صورت غبار خارج می‌شوند. 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. معمول‌ترین روش آگلومره کردن گندله سازی است که شامل تولید گلوله‌های خام از پودر کنسانتره سنگ آهن و حرارت دادن در دماهای بالا برای سخت کردن و دستیابی به خواص مطلوب می‌باشد[۱]. استحکام فشاری سرد، CCS به عنوان یکی از معیارهای اصلی محک گندله برای فرایندهای متالورژیکی در کوره بلند است. گندله‌های با CCS پایین نمی‌توانند وزن بار کوره بلند را تحمل کنند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تولید ذرات ریز باعث کاهش نفوذپذیری و استحکام فشاری بالا باعث رفتار بهتر گندله در کوره می‌شود. بهبود CCS گندله، تولید ذرات ریز غبار را در حین احیا کاهش و به افزایش تولید واحدهای تولید آهن کمک می‌کند.

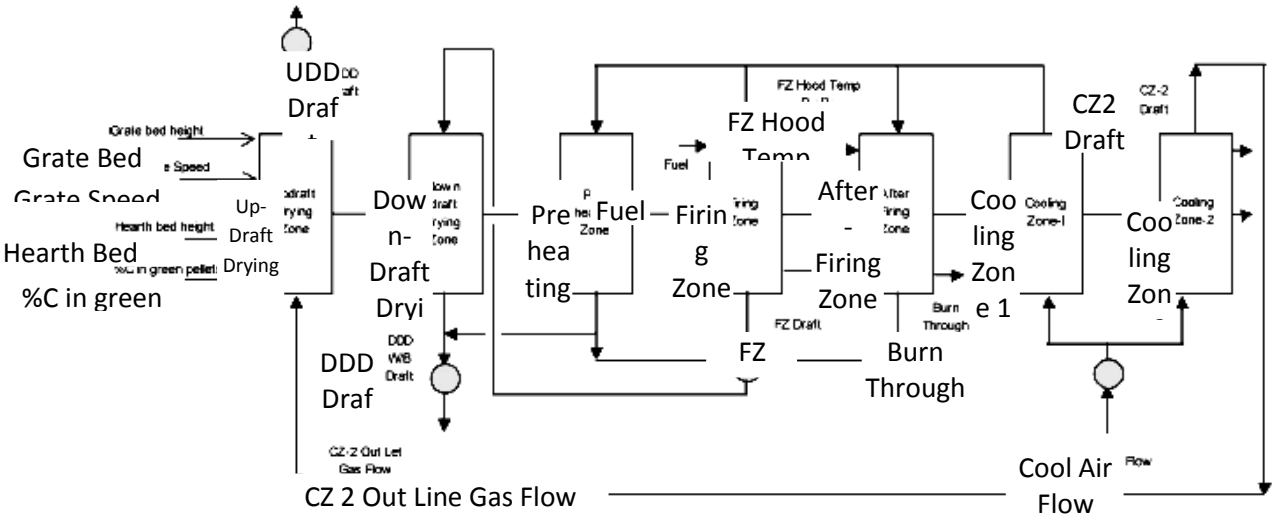
تلاش‌های زیادی برای مدل کردن فرایند گندله سازی به منظور پیش بینی کیفیت گندله انجام شده است[۲،۳]. پیچیدگی انتقال حرارت و انتقال جرم در کنار واکنش‌های گاز-جامد و جامد-جامد و فرایند سوختن همگی مدل کردن گندله سازی را بسیار سخت می‌کند. باترهان(۱۹۸۶) فرمولاسیونی را بیان نمود که استحکام فشاری را با استفاده از مدل هسته کاهنده پیش بینی می‌نمود. وی رابطه بین انقباض و استحکام را نیز استخراج نمود[۴]. مکانیزم‌های 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 سیستم‌های پیچیده شبکه عصبی یک تکنیک مناسب می‌باشد. 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 از شبکه عصبی سیستم‌های متالورژیکی مختلفی به طور موفقیت آمیزی مدلسازی شده‌اند[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 داده‌های زیادی از یک کارخانه گندله سازی در شرکت سنگ معدن گل گهرگرفته 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، گندله‌های خام با استفاده از دیسک‌های گندله ساز تولید می‌شوند. گندله‌های خام در کوره به منظور دستیابی به خواص فیزیکی، مکانیکی و متالورژیکی مناسب برای خوراک دهی به واحدهای تولید آهن، پخته می‌شوند.

کنترل و عملیات کوره دارای بحث‌های 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 گندله‌های پخته قبل از تخلیه روی نوار نقاله و انتقال به استک پایل. گندله‌ها در طول کوره به وسیله پنجره‌های آهنی به اسم گریت که اجازه عبور هوا را می‌دهد انتقال داده می‌شوند. این گریت‌ها با پنج سانتیمتر از گندله پخته به عنوان لایه محافظ بارگیری شده و سپس به ارتفاع ۵۰ سانتیمتر از گندله خام پر می‌شود. شکل۱ فلوشیت ساده‌ای از جریان مواد در کوره را نشان می‌دهد. 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 سردکردن۱ Primary Cooling(CZ1) و منطقه سردکردن۲ Primary Cooling(CZ2). پنج دمنده هوا برای چرخش هوا در نواحی مختلف کوره به کار برده شده است[۴].

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir



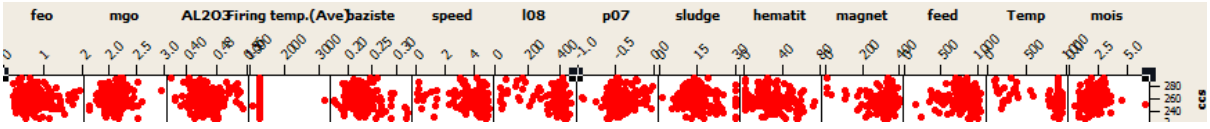
شکل۱: دیاگرام شماتیک از فرایند پخت در کوره برای گندله سازی سنگ آهن

گندله‌های پخته شده دارای FeO (اکسید آهن) کمتر از ۱٪، CCS(Kg/pellet) ۲۶۰-۳۸۰، TI ۹۰-۹۵٪، AI ۵٪، RDI(-6.3 mm) کمتر از ۱۵٪ 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 Sio2)، 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، تیغه‌ایی، 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 شبکه های 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 تیغه‌ایی	۲۰٪
۴	رگرسیون بهترین ترکیب	۱۹٪
۵	درخت CART	۲۵٪
۶	درخت CHILD	۱۷٪
۷	جنگل‌های تصادفی	۲۷٪

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

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].

$$I_i=\{\sum I_J W_{ji}+b_i\} \quad (۱)$$

به طوری که:

i) iامین نورون در لایه i=14, 1 for k=2, 3, 4 K

j) jامین نورون در لایه j=14 K-1

Wji) وزن اتصال داخلی بین jامین نورون در لایه K-1 و iامین نورون در لایه K

Ii) مجموع ورودی‌های iامین نورون در لایه K(K=۴،۳،۲)

Ij) ورودی jامین نورون در لایه K-1

b_i) مقدار اضافی بایاس برای iامین نورون در لایه K

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

$$O_i = \frac{e^{I_i}-e^{-I_i}}{e^{I_i}+e^{-I_i}} \quad (۲)$$

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 جدول۱ 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.

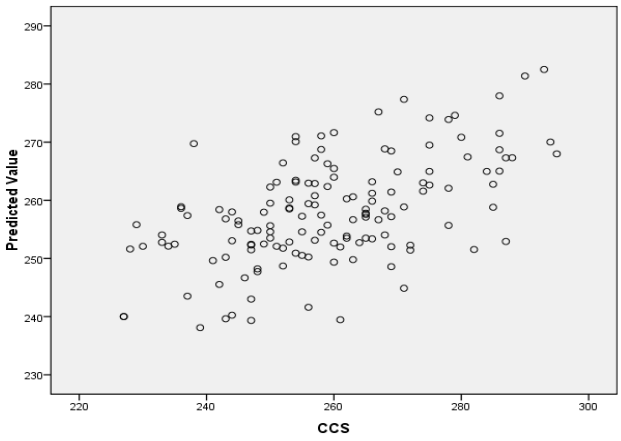
ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

جدول۱: متغیرهای مهم کیفیت استحکام گندله

	تعداد	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار
FeO	۱۵۹	۰,۲۴	۱,۹۱	۰,۸۰	۰,۳۶
MgO	۱۵۹	۱,۶۹	۲,۹۶	۲,۰۸	۰,۱۹۸.
Al2O3	۱۵۹	۰,۳۶	۰,۵۵	۰,۴۶	۰,۰۳۷
FT	۱۵۹	۱۰۹۷,۳۲	۳۲۰۰	۱۲۹۰	۱۵۳,۰۴
Baziste	۱۵۹	۰,۱۷	۰,۳۲	۰,۲۳	۰,۰۲۷
Speed	۱۵۹	۰,۰	۵,۱۳	۳,۹۱	۱,۱۶
H	۱۵۹	۲۴,۴۶	۴۷۰,۵۴	۳۵۹	۱۰۸,۸۷
P	۱۵۹	۰,۹۵-	۰,۰	۰,۴۳-	۰,۱۵۵۳
Sludge	۱۵۹	۱,۲۶	۳۰,۰۴	۱۵,۴۵	۵,۵۰۷
Hematit	۱۵۹	۰,۱۳	۷۴,۳۳	۲۸,۰۵۵	۱۷,۱۸
Magnet	۱۵۹	۰,۵۸	۳۹۹,۲۳	۳۰۸,۱۹	۷۵,۱۰
Feed	۱۵۹	۱۳۰,۷۳	۱۰۵۸,۲۳	۸۰۱,۸	۱۷۵,۲۳
Temp	۱۵۹	۸۴,۸۰	۹۵۴,۶۳	۸۱۵,۹	۲۲۴,۲۷
Mois	۱۵۹	۰,۴۰	۶,۵۰	۱,۹۸	۰,۷۸
Valid N (listwise)	۱۵۹				

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 شکل۳ 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.



شکل۳: نتایج حاصل از آموزش و آزمایش مدل شبکه عصبی برای CCS

پژوهش در مدیریت و مهندسی صنایع، شماره ۱۲ ، زمستان ۱۳۹۶، ص ۲۱- ۱۳

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

تاثیر متغیرهای ورودی روی CCS

تاثیر 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.

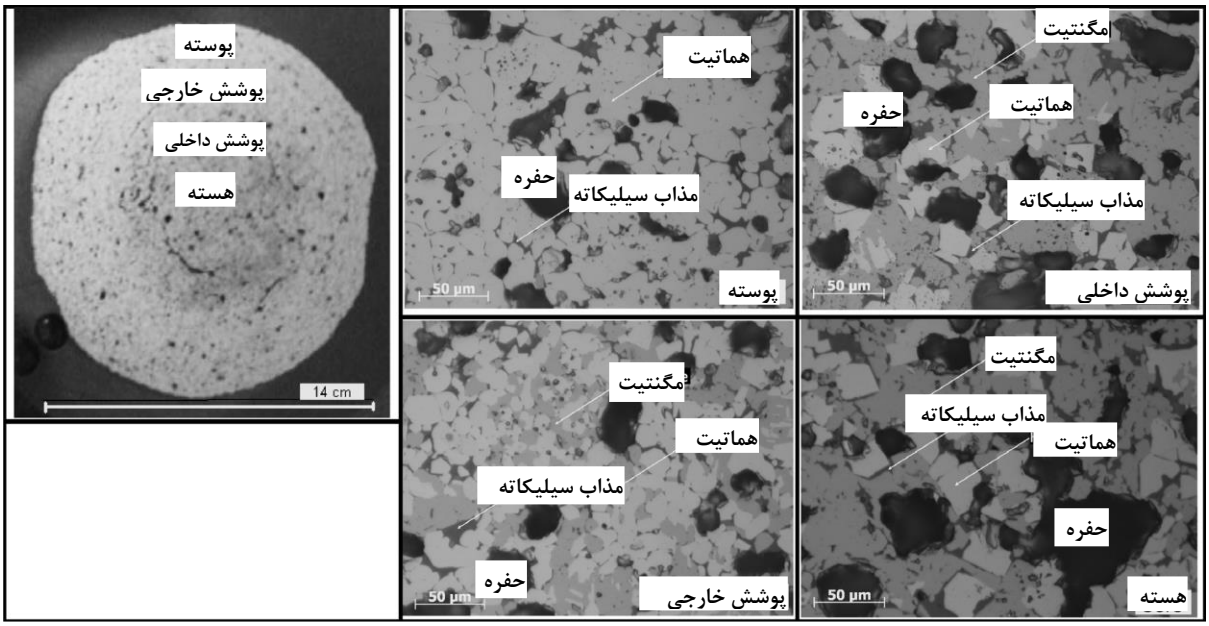
جدول۲: اهمیت متغیرها در CCS

متغیر	وزن
FeO	۰,۱۰۵
MgO	۰,۰۵۸
Al2O3	۰,۰۳۳
FT	۰,۰۹۲
Baziste	۰,۰۹۰
Speed	۰,۰۵۴
H	۰,۰۴۲
P	۰,۰۴۷
Sludge	۰,۰۳۴
Hematit	۰,۱۴۴
Magnet	۰,۰۷۸
Feed	۰,۰۵۴
Temp	۰,۰۸۳
Mois	۰,۰۸۵

افزایش بازیسیته گندله تاثیر زیادی روی CCS دارد. این تاثیر 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 تاثیر 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].

پژوهش در مدیریت و مهندسی صنایع، شماره ۱۲ ، زمستان ۱۳۹۶، ص ۲۱- ۱۳

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir



شکل۴: میکروگراف مربوط به گندله اکسیدشده ضعیف با ساختار دولایه

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

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

ISSN: 2588-2791
http://www.miej.ir

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.