

مدل سازی و شبیه سازی انفجار ابر ذرات زغال سنگ با کمک شبکه های عصبی مصنوعی

مهدی بیدآبادی^۱، بهزاد سعادت نیا^{۲*}، اباذر وحدت آزاد^۳، مصطفی کشاورزبان^۴
دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق
(behzadsaadatnia@mecheng.iust.ac.ir*)

چکیده

در این مقاله پیش بینی افزایش فشار^۵ با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی انجام شده است. داده های تجربی حاصل از یک مطالعه آزمایشگاهی برای مدل سازی با شبکه های عصبی استفاده شده است. این مطالعه افزایش فشار ناشی از انفجار ذرات زغال سنگ را به عنوان تابعی از غلظت ذرات در هوا، اندازه ذرات و درصد مواد فرار^۶ اندازه گیری نموده است. شبکه های عصبی چند لایه پس انتشار خطا^۷ که از جمله پراستفاده ترین شبکه های عصبی بخصوص در کاربردهای مدل سازی می باشند، برای آموزش و تست شبکه استفاده شده اند. نتایج حاصل از مدل سازی در تطابق بسیار نزدیک با داده های آزمایشگاهی قرار دارند و میانگین درصد خطا ۰.۰۸۹۱٪ بدست آمده است. پس از اعتبارسنجی مدل سازی انجام شده، شبیه سازی افزایش فشار برای ذرات با اندازه ها، غلظت و درصد مواد فرار دیگر انجام شده است. استفاده از نتایج شبیه سازی امکان حذف آزمایشات زمان بر و پر هزینه را فراهم می کند و پیش بینی شرایط مختلف را تسهیل می بخشد، همچنین داده های حاصل از شبیه سازی می توانند برای افزایش ایمنی معادن و انبارهای نگهداری زغال سنگ استفاده شوند.

واژه های کلیدی: احتراق ذرات-زغال سنگ-انفجار-شبکه های عصبی مصنوعی-افزایش فشار

۱- مقدمه

خطرات ناشی از انفجار ابر ذرات زغال سنگ در معادن زیر زمین تا قرن اخیر کاملاً ناشناخته بود تا زمانی که آزمایشات در مقیاس واقعی در کشورهای انگلستان، فرانسه و امریکا نشان داد که ذرات زغال سنگ بدون حضور متان نیز قابلیت انفجار دارند [1]. نبود تئوری های کامل و دقیق برای پیش بینی رفتار انفجاری و انتشار شعله ابر ذرات یکی از مشکلات عمده برای پیش بینی رفتار این ذرات و جلوگیری از حوادث و ضررهای جانی و مالی ناشی از آن می باشد. آزمایشات انفجار ذرات زغال سنگ در مقیاس واقعی در امریکا انجام شده است [2] همچنین در لهستان آزمایشاتی بر روی انفجار ذرات غلات در اندازه های واقعی انجام شده است [3] تا مشخصه های انفجار ذرات در معادن و سایر صنایع شناسایی شوند. در سال های اخیر انجام اینگونه آزمایشات در مقیاس های آزمایشگاهی توسعه بیشتری یافته اند و آزمایشگاه ها نتایج قابل قبول و پر کاربردی ارائه می کنند. در هر صورت انجام آزمایشات چه در مقیاس های واقعی و چه آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه و زمان می باشد. با توجه به افزایش کاربرد ذرات قابل احتراق در صنعت و کشاورزی [4] لزوم استفاده از روش های نوین برای پیش بینی رفتار انفجاری این ذرات اهمیت می یابد.

۱- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

5-Overpressure

6-Volatile content

7-Multilayer feed forward back propagation



در سال ۲۰۱۰ یک مطالعه آزمایشگاهی توسط کینگ مینگ لیو^۱ و همکارانش برای شناسایی مشخصه های انفجار ابر ذرات زغال سنگ در هوا انجام شده است [5]. این مطالعه شامل آزمایشاتی بر روی غلظت های مختلف ذرات زغال سنگ در هوا، با اندازه های مختلف ذرات زغال سنگ و انواع زغال سنگ استخراج شده از معادن مختلف با درصد مواد فرار متفاوت می باشد. در این مقاله با استفاده از روش شبکه های عصبی مصنوعی یک شبیه سازی بر مبنای آزمایشات آقای کینگ مینگ لیو و همکارانش انجام شده و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مرجع [5] مقایسه شده اند.

۲- انفجار ذرات^۲

در آستانه ی قرن اخیر، ورود ابر ذرات قابل اشتعال به صنعت و قابلیت انفجار آن ها باعث شد که خطر انفجار ابر ذرات به عنوان یک موضوع مهم برای مدیریت ایمنی در صنایع مطرح شود. انفجار ذرات ذغال سنگ در معادن یا انفجار ذرات در سیلو های کشاورزی، صنایع چوب خرد کنی، صنایع شکر، پودرهای فلزی، کاغذ، مواد شیمیایی و لاستیک های صنعتی همگی مواردی هستند که صدمات جانی و مالی سنگینی را تحمیل می نمایند. علاوه بر این کاربردهای روز افزون ذرات قابل اشتعال در صنایع مختلف اتم از صنایع نظامی، هوا فضا، صنعت و نیروگاه های تولید انرژی بر اهمیت مطالعه ی احتراق ذرات می افزاید [6]. در ژانویه ی ۲۰۰۳ در کارولینای شمالی انفجار ابر ذرات پلی اتیلن در یک دارو سازی موجب مرگ ۶ نفر، زخمی شدن ۳۸ نفر و آسیب جدی به ساختمان شد. در فوریه ۲۰۰۸ انفجار در کارخانه ی تولید شکر در جرجیای امریکا باعث کشته شدن ۱۴ نفر و زخمی شدن ۴۸ نفر شد [7].

۳- پارامترهای انفجاری

اولین گام برای ایمنی در برابر انفجار های ناشی از ابر ذرات شناخت پارامترهای مؤثر می باشد. هر چه دانش ما از رفتار انفجاری و احتراقی این ذرات افزایش یابد قادر به ارائه ی راهکارها و اقدامات پیشگیرانه ی مؤثرتری خواهیم بود. در اواخر دهه ۷۰ میلادی سازمان پیشگیری از حوادث آلمان در تحقیقی جامع برای اولین بار به بررسی پارامترهای انفجاری ذرات مختلف پرداخت. در این مطالعه پارامترهای انفجاری بیش از ۸۰۰ نوع ذره ی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته بود. اگرچه تمامی پارامترهای لازم برای ایمنی صنایع ارائه نشده بودند اما همین میزان نیز برای افزایش ایمنی در برابر انفجار بسیار مفید بود [8].

زمانی که یک ترکیب ذرات و هوا منفجر می شود، فشار با گذشت زمان تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می یابد و پس از رسیدن به مقدار حداکثر به دلیل انتقال حرارت با محیط، کاهش می یابد. بیشترین افزایش فشار^۳ و حداکثر نرخ افزایش فشار^۴ برای ترکیبات مختلف در حجم ثابت با آزمایش بدست می آید. فشار حداکثر مستقل از حجم ظرف آزمایش می باشد اما حداکثر نرخ افزایش فشار وابسته به حجم ظرف آزمایش است و به همین دلیل با استفاده از قانون ریشه مکعب^۵ به پارامتر ثابت انفجار^۶ (Kst) تبدیل می شود [9].

$$K_{st} = \left(\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \right) \times V^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

1-Qingming Liu

2-Dust explosion

3-Maximum pressure

4-Maximum rate of pressure rise

5-Cubic law

6-Explosion constant



ثابت انفجار (Kst) توسط بارکنت^۱ برای پیش بینی واکنش پذیری ابر ذرات قابل اشتعال بیان شد [6]. اما آزمایشات بر روی ترکیبات ذرات مختلف با ثابت انفجار یکسان، تحت شرایط آزمایشی کاملاً برابر نشان داد که این ترکیبات می توانند شدت های انفجار کاملاً متفاوتی داشته باشند [5]. سرعت انفجار و ثابت انفجار وابسته به میزان اغتشاش مخلوط تغییر می کنند [9].

۴- شبکه عصبی مصنوعی^۲

شبکه های عصبی مصنوعی یا به زبان ساده تر شبکه های عصبی، سیستم ها و روش های محاسباتی نوینی هستند برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش، و در انتها اعمال دانش به دست آمده در جهت پیش بینی پاسخ های خروجی از سامانه های پیچیده. ایده اصلی این گونه شبکه ها الهام گرفته از شیوه کارکرد سیستم عصبی زیستی، برای پردازش داده ها و اطلاعات به منظور یادگیری است. این سیستم ها از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق العاده بهم پیوسته با نام نرون^۳ تشکیل شده که برای حل یک مسأله با هم به طور هماهنگ عمل می کند [10].

با استفاده از دانش برنامه نویسی رایانه می توان ساختار داده ای طراحی کرد که همانند یک نرون عمل نماید. سپس با ایجاد شبکه ای از این نرون های مصنوعی به هم پیوسته، یک الگوریتم آموزشی ایجاد کرد و با اعمال این الگوریتم به شبکه آن را آموزش داد. این شبکه ها برای تخمین و تقریب کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده اند. گستره کاربرد این مدل های ریاضی بر گرفته از عملکرد مغز انسان، بسیار وسیع می باشد که به عنوان چند نمونه کوچک می توان استفاده از این ابزار ریاضی در پردازش سیگنال های بیولوژیکی، مخابراتی و الکترونیکی تا کمک در نجوم و فضا نوردی را نام برد [11].

۵- مدل سازی افزایش فشار

طراحی شبکه عصبی مصنوعی به معنای تعیین ساختار شبکه عصبی اتم از تعداد لایه ها، نحوه اتصال گره های شبکه، تعیین مشخصات گره، تعیین الگوریتم های تعلیم شبکه، مقدار دهی اولیه به وزن ها و روش آموزش شبکه می باشد. هر شبکه عصبی علاوه بر یک لایه ورودی و یک لایه خروجی می تواند دارای یک یا چند لایه پنهان باشد. در مراحل طراحی شبکه عصبی ۹۰٪ داده های تجربی استخراج شده از [۵] برای فرآیند آموزش^۴ شبکه استفاده شده است و ۱۰٪ از داده ها برای اعتبارسنجی^۵ شبیه سازی ها مورد استفاده قرار گرفته اند. شبکه تحت شرایط متعددی مورد آزمایش قرار گرفته اند تا بهترین نتیجه حاصل شود. در این مرحله با تغییر پارامترهای طراحی، صدها شبکه عصبی مختلف با تعداد لایه ها، گره ها، نرخ آموزش (LT) و ثابت مومنتم (Mc) متفاوت ایجاد شدند. برخی از این شبکه ها با نتایج دقیق تر در جدول ۱ آورده شده اند.

انتخاب شبکه عصبی مصنوعی بر مبنای دقت پیش بینی و سادگی شبکه انجام می گیرد. شبکه شماره ۱۵ از جدول ۱ که با رنگ خاکستری نمایش داده شده است به عنوان بهترین شبکه انتخاب شده و شبیه سازی ها در مراحل بعد با استفاده از این شبکه انجام شده اند. لازم به ذکر است که اگرچه شبکه های شماره ۱۴ درصد میانگین خطای کمتری دارد اما به دلیل پیچیدگی بیشتر و زمان محاسباتی بالاتر انتخاب نشده است.

تصویر شماره ۱ شبکه عصبی شماره ۱۵ را نشان می دهد. در این شبکه الگوریتم آموزش پس انتشار^۶ با سه لایه مخفی^۷ استفاده شده است که به ترتیب دارای ۲۴، ۱۲ و ۶ نرون می باشند.

1-Bartknecht
2-Artificial Neural Network
3-Neuron
4-Learning
5-Validation
6-Back-Propagation Feed-Forward
7-Hidden Layer



تابع فعال^۱ لایه مخفی اول و دوم تنسیگ^۲ و لایه مخفی سوم پورلاین^۳ است. تصویر ۱ ساختار شبکه عصبی مورد استفاده را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱ مشخص است لایه ورودی شامل سه نرون است که این نرون ها متغیرهای اندازه، غلظت و درصد مواد فرار را بیان می کنند. لایه خروجی شامل یک نرون است که افزایش فشار را نشان می دهد. این مدل شبکه عصبی توسط الگوریتم لونیگ مارکوئت^۴ آموزش داده می شود. شکل ۲ مقایسه داده های تجربی و پیش بینی شده را نشان می دهد. همچنین تصاویر شماره ۳ و ۴ پارامتر افزایش فشار را بر حسب غلظت های مختلف ذرات با درصد مواد فرار و اندازه ی مشخص نشان می دهد. داده های تجربی نیز بر روی نمودار با علامت ستاره مشخص شده اند. همانطور که مشاهده می شود داده های تجربی به داده های حاصل از شبکه عصبی بسیار نزدیک اند.

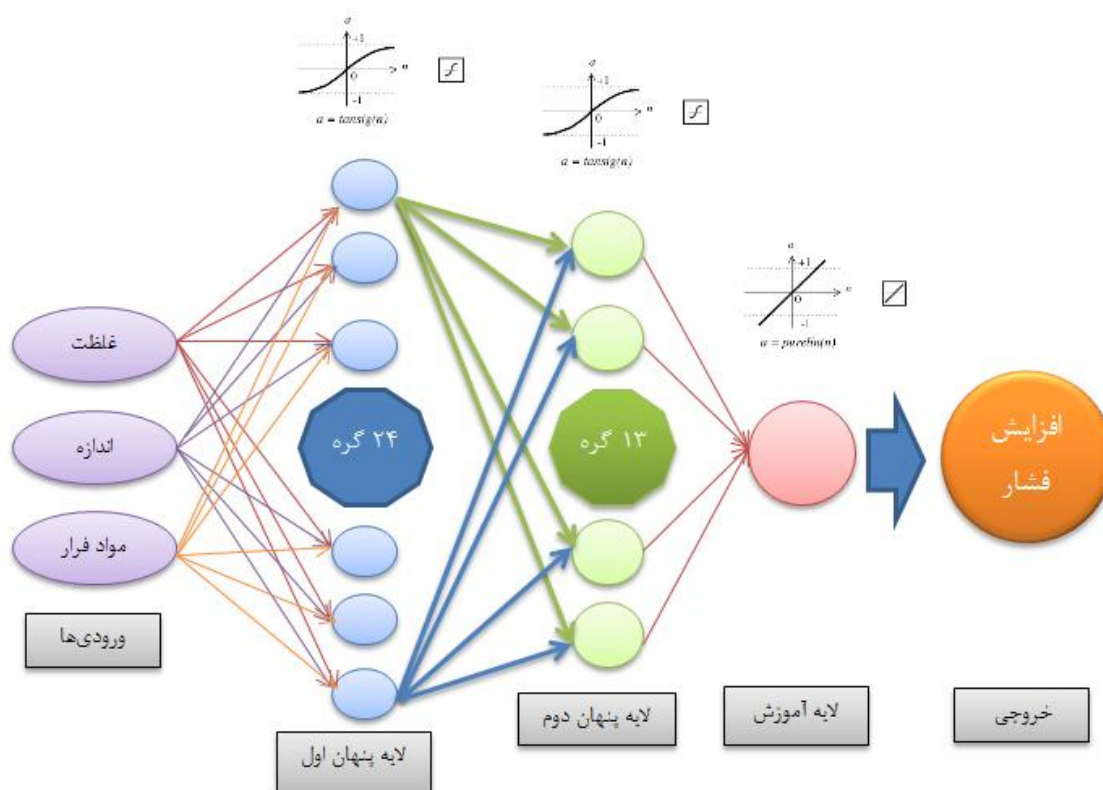
جدول ۱- مقایسه برخی از شبکه های عصبی طراحی شده و انتخاب بهترین شبکه با درصد میانگین خطای کمتر

درصد میانگین خطا (aan)	ثابت مومنتم (Momentum constant)	نرخ آموزش (Learning rate)	تعداد لایه ها و گره ها (layer1,layer2,layer3,layer4)	ردیف
٪۰.۲۸۷۶	۰.۸	۰.۳	۱۹،۱۰،۵،۲	۱
٪۰.۶۴۵۱	۰.۸	۰.۲۵	۱۰،۵،۲	۲
٪۰.۸۷۶۹	۰.۸	۰.۲۵	۱۰،۵	۳
٪۰.۷۲۶۸	۰.۷۵	۰.۲۵	۵	۴
٪۰.۱۳۴۸	۰.۸	۰.۲۵	۲۱،۱۸،۹،۴	۵
٪۰.۳۶۱۵	۰.۸	۰.۲۵	۱۸،۹،۴	۶
٪۰.۴۳۸۹	۰.۸	۰.۲۵	۱۸،۹،۵	۷
٪۰.۵۲۸۱	۰.۷۵	۰.۲۵	۹،۴	۸
٪۱.۰۱۷۹	۰.۷۵	۰.۳	۴	۹
٪۰.۱۴۹۳	۰.۸	۰.۳	۲۱،۱۱،۷،۲	۱۰
٪۰.۲۴۲۰	۰.۷۵	۰.۳	۲۱،۱۱،۵،۲	۱۱
٪۰.۳۷۴۱	۰.۸	۰.۲۵	۱۳،۷،۲	۱۲
٪۰.۶۴۲۷	۰.۸	۰.۲۵	۱۳،۲	۱۳
٪۰.۰۴۴۸	۰.۸	۰.۲۵	۲۹،۲۴،۱۲،۶	۱۴
٪۰.۰۸۹۱	۰.۸	۰.۲۵	۲۴،۱۲،۶	۱۵
٪۰.۱۲۰۶	۰.۸	۰.۲۵	۲۱،۱۲،۶	۱۶
٪۰.۱۱۹۷	۰.۸	۰.۲۵	۲۴،۱۳	۱۷
٪۰.۶۰۳۶	۰.۸	۰.۲۵	۱۳	۱۸

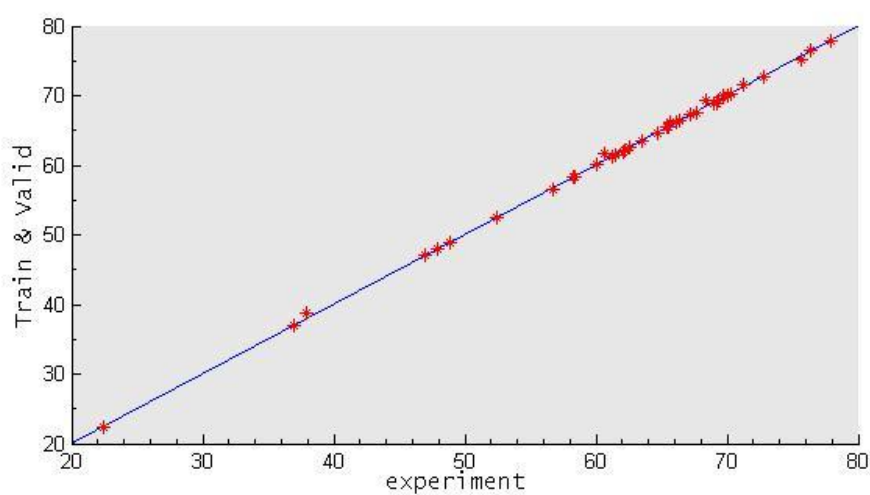
1-Activation Function

2-Tansig

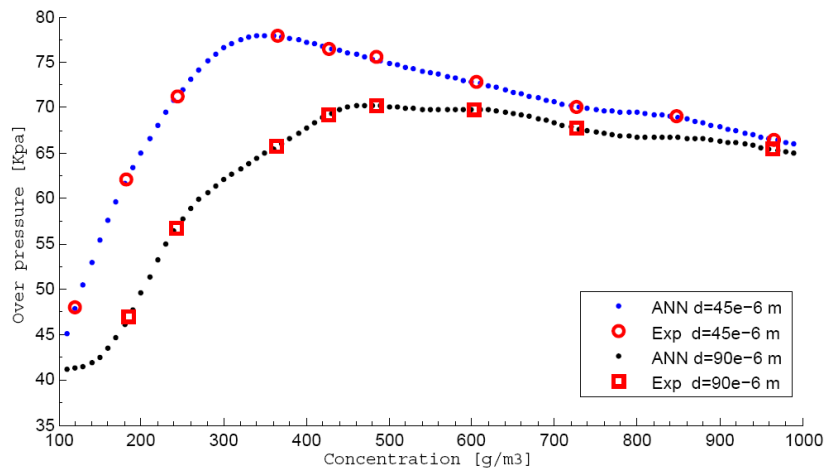
3-Pureline



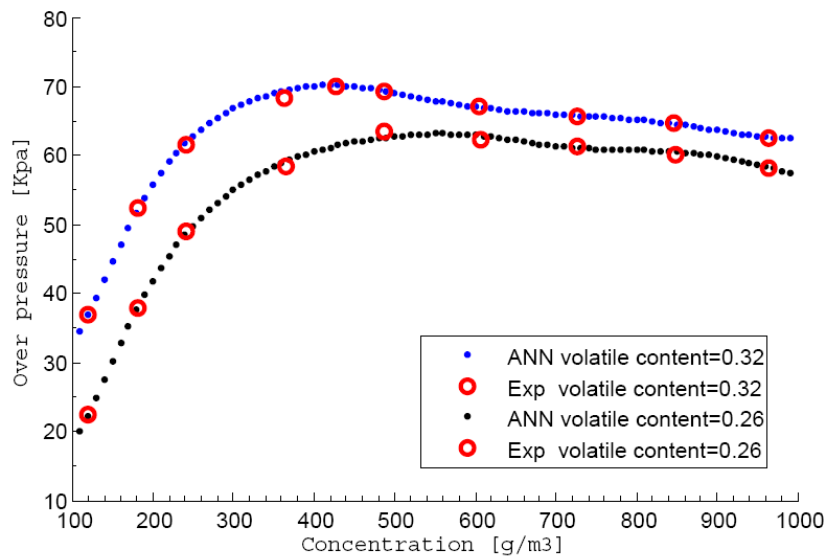
شکل ۱- شبکه عصبی انتخاب شده با دو لایه پنهان



شکل ۲- مقایسه داده های تجربی و مقادیر حاصل از مدل سازی



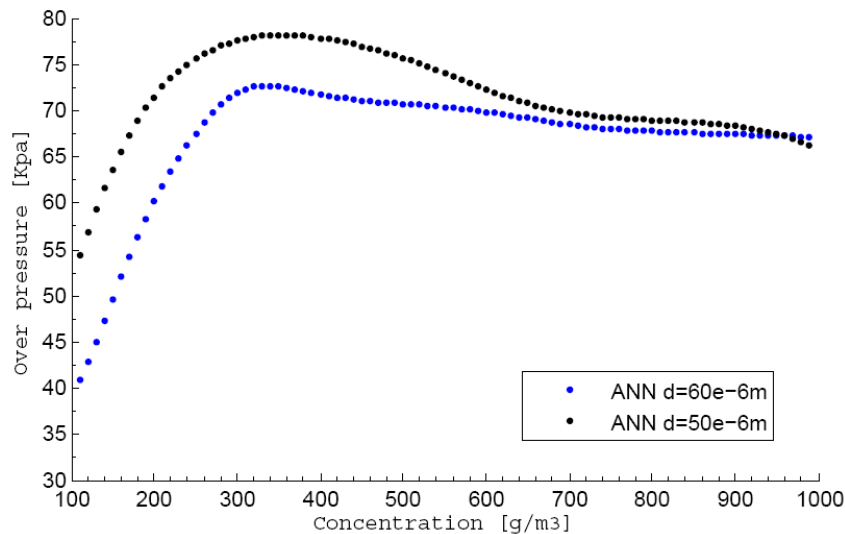
شکل ۳- مقایسه نتایج شبکه عصبی و داده های تجربی برای ذرات زغال سنگ با درصد مواد فرار ۳۶٪



شکل ۴- مقایسه نتایج شبکه عصبی و داده های تجربی برای ذرات زغال سنگ با اندازه ۴۵ میکرومتر

۶- شبیه سازی افزایش فشار

۱۰٪ از داده های تجربی که برای مرحله مدل سازی استفاده نشده بودند برای اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی بکار رفته اند. میانگین درصد خطای کمتر از ۱٪ در مرحله اعتبار سنجی امکان شبیه سازی افزایش فشار در اثر انفجار ذرات زغال سنگ برای شرایط مختلف غلظت ذرات در هوا، اندازه های مختلف ذرات و درصد مواد فرار مختلف فراهم می کند. تصویر ۵ داده های شبیه سازی شده برای پارامتر افزایش فشار را برحسب غلظت ذرات برای اندازه ی ذرات ۵۰ و ۶۰ میکرومتر نشان می دهد. همانطور که از پیش انتظار میرفت با افزایش قطر ذرات افزایش فشار کاهش یافته است. این امر به دلیل کاهش نسبت سطح به حجم ذرات می باشد. این نسبت در احتراق ذرات جامد از اهمیت ویژه ای برخوردار است.



شکل ۵ - افزایش فشار شبیه سازی شده برای ذرات با قطر ۶۰ و ۵۰ میکرومتر

۷- نتیجه گیری

مطالعه پارامترهای انفجاری ذرات ارگانیک به دلیل افزایش کاربرد صنعتی و اهمیت ایمنی در صنایع و معادن مطرح است. هر ساله حوادث ناشی از انفجار ذرات صدمات جانی و مالی بسیاری را بر صنعت تحمیل می کنند. جلوگیری از چنین حوادث ناخواسته ای تا حد زیادی مبتنی بر شناخت عمیق تر ما از مکانیزم انفجار و پارامترهای مؤثر بر آن می باشد. انجام آزمایشات متعدد مستلزم صرف وقت و هزینه ی زیادی است. استفاده از شبکه های عصبی برای پیش بینی و تخمین مسائل مختلف در سال های اخیر گسترش زیادی یافته است. دقت و سرعت این شبکه ها امکان جایگزینی آن ها با آزمایشات پر هزینه را فراهم می آورد.

در این مقاله ابتدا افزایش فشار در اثر انفجار ذرات زغال سنگ با کمک شبکه های عصبی مصنوعی و با استفاده از داده های تجربی مدل سازی شده است، سپس این پارامتر برای شرایط تست نشده در آزمایشگاه شبیه سازی شده است. تطابق بسیار نزدیک داده های پیش بینی شده و داده های تجربی در مرحله مدل سازی، امکان شبیه سازی شرایط گوناگون را فراهم نموده است. شبکه عصبی مدل سازی شده قادر به پیش بینی افزایش فشار به عنوان تابعی از اندازه ی ذرات، درصد مواد فرار و غلظت ذرات در هوا با میانگین درصد خطایی کمتر از ۱٪ می باشد.

مراجع

- 1- Verakis HC, Nagy J, *A brief history of dust explosions*, STP 958, American society for test and materials, 1987.
- 2- Sapko MJ, Weiss ES, Cashdollar KL, Zlochower JA, *Experimental mine and laboratory dust explosion research*, Loss prevent process Ind 2000.
- 3- Lebecki K, Cybulski K, Sliz J, Dyduch Z, Wolanski P, *Large scale grain dust explosions, Shock waves*, Vol 5, pp109-114, 1995.
- 4- Eckhoff, R. K, *Dust explosion in the process industries*, 2nd Edition, Oxford, Butterworth Heinemann 1997.



انجمن احتراق ایران

FCCI2012-6023

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



دانشگاه کاشان

5- Qingming Liu, Chunhua Bai, Xiaodong Li, Li Jiang, Wenxi Dai, *Coal dust/air explosions in a large-scale tube*, Fuel, Vol 89, pp 329-335, 2010.

۶- شکیبی، ا.، "حل تحلیلی احتراق نانو ذرات ارگانیک"، پایان نامه برای دریافت درجه ی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۹.

7- Kristen Butler, Thomas dean, *Combustible Dust*, Georgia Tech Research Institute, 2010.

8- H. Beck, N. Glienke, C. Mohlmann, *Combustion and explosion Characteristics of dusts*, Institute for Occupation Safety of the German Federation of Institutions for Statutory Accident Insurance and Prevention, Sankt Augustin, Germany.

9- Pieter Zeeuwen, *Flammability characteristics of powders*, ATEX seminar, Institution of Mechanical Engineers, London, 2002.

10- Wasserman, P., *Advanced methods in neural computing*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1993.

11- Lippmann, R.P, *An introduction to computing with neural nets*, IEEE, ASSP Magazine, 4-22.