

طراحی فیلتر کیسه‌ای با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی و مدل‌سازی معادلات ساختاری (مورد مطالعاتی: کارخانجات تولید سیمان)

معصومه زینال نژاد^{۱*}، توحید پوررستم^۲

^(۱) گروه مهندسی صنایع، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^(۲) گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

چکیده

با وجود آنکه امروزه مدل‌سازی‌های داده‌محور در بهبود فرآیندهای سازمان‌های تولیدی مرسوم گشته، کمتر در طراحی ماشین‌آلات و تجهیزات صنعتی به کار گرفته شده‌اند. در این تحقیق، با توجه به آلودگی‌های زیست محیطی توسعه صنعت سیمان، فیلترهای کیسه‌ای مورد نیاز جهت کنترل و پالایش هوای آلوده طراحی گردید. محاسبه صحیح و دقیق ابعاد فیلتر کیسه‌ای یا بگ‌فیلتر می‌تواند نقش بسزایی در کاهش آلاینده‌های کارخانجات سیمان و توجیه‌پذیری اقتصادی آنها داشته باشد. از این‌رو هدف، لحاظ نمودن پارامترهای کلیدی و ارایه روشی کارا به منظور محاسبه ابعاد بهینه کیسه مورد نیاز هر فیلتر با استفاده از تحلیل داده‌های موجود است. برای این منظور از تکنیک‌های داده‌کاوی و مدل‌سازی معادلات ساختاری استفاده گردید. پارامترهای مهم در طراحی بگ‌فیلترها عبارتند از دما، فشار، میزان درصد غبار ورودی، دانه بندی غبار، میزان رطوبت گرد و غبار، نوع ذره و میزان اشتعال پذیری مواد که به دلیل ثابت بودن برخی از پارامترها و عدم اشتعال پذیری ذرات در تولید سیمان، صرفاً سه عامل میزان دبی گرد و غبار، میزان گرد و غبار، و اندازه غبار مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد الگوریتم شبکه عصبی ترکیبی (ensemble) با روش boosting می‌تواند سطح مورد نیاز کیسه را با دقت قابل قبول ۹۵٫۴ درصد پیش‌بینی نماید. همچنین، در هر فیلتر کیسه‌ای، میزان دبی گرد و غبار ۸۰ درصد در محاسبه میزان سطح پارچه مورد نیاز آن تاثیرگذار است و عوامل میزان گرد و غبار و اندازه آن، با اختلاف زیادی نسبت به دبی، به ترتیب با ۱۵ و ۶ درصد، در درجه دوم و سوم اهمیت قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: داده‌کاوی، شبکه عصبی، مدل‌سازی معادلات ساختاری، فیلترهای کیسه‌ای، صنعت سیمان.

۱- مقدمه

با رشد روز افزون جوامع صنعتی و افزایش روند مصرف منابع محدود، مصرف بتن نیز افزایش یافته است. بتن حاصل اختلاط ماسه، آب و سیمان بوده و از اصلی‌ترین اجزای پروژه‌های ساختمانی به شمار می‌رود. سیمان از مواد اولیه‌ای چون مارل و آهک تهیه می‌شود و در فرایند تولید، پس از خردایش و آسیاب شدن مواد اولیه، در کوره پخته شده تا به کلینکر تبدیل شود و در نهایت، با اختلاط با گچ یا برخی مواد افزودنی دیگر، به سیمان تبدیل می‌شود. طی پروسه تولید سیمان و هر جا انتقال مواد اولیه یا نهایی صورت می‌گیرد، ذرات گرد و غبار با سایزهای مختلف ایجاد می‌شود که می‌باید توسط فیلترهای الکترواستاتیکی یا کیسه ای از هوا جداسازی شده و میزان گرد و خاک در هوای خروجی دودکش به میزان استاندارد کاهش یابد.

مدت هاست که آلودگی ذرات گرد و غبار سیمان به دلیل پایداری سمیت در محیط، توجه محققان را به خود جلب کرده است. گرد و غبار سیمان با فلزات سنگین سمی غنی شده است و می‌تواند در یک منطقه وسیع توسط باد و باران پخش شود و روی گیاهان، حیوانات و خاک و در نهایت بر سلامت انسان تأثیر سوء داشته باشد [۱]. میزان تولید غبار در کارخانجات سیمان به ازای هر تن کلینکر تولیدی ۵۴۰ گرم است [۲] که در یک کارخانه سه هزار تنی در هر روز این رقم به میزانی بالغ بر یک و نیم تن خواهد رسید. مطابق آمار انجمن صنفی کارفرمایان سیمان کشور، ظرفیت سالانه کارخانجات سیمان کشور بیش از ۸۵ میلیون تن بوده [۳] که جمعا سالانه بیش از ۴۶ هزار تن گرد و غبار تولید کرده و حدود ۲۵ میلیون تن گاز کربنیک را به هوا وارد می‌نمایند.

آمار و همکاران [۱] در بررسی محیطی کارخانه سیمان مفتاح الجزایر نشان دادند خاک به میزان قابل توجهی توسط فلزاتی مانند سرب، روی، مس و

کادمیوم آلوده شده بوده است و بنابراین نظارت سیستماتیک و مستمر بر فیلترهای کیسه‌ای کارخانه برای کاهش انتشار گرد و غبار سیمان بسیار مهم است. از این‌رو، ابراهیمی و همکاران [۴]، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و یک الگوریتم فرا ابتکاری، زمان‌بندی تعویض فیلتر کیسه‌ای با هدف نگهداری پیشگیرانه برنامه‌ریزی‌شده را تعیین کردند تا سطح مشخصی از قابلیت اطمینان با حداقل هزینه نگهداری حفظ گردد.

بارگوا [۵] فیلترهای کیسه‌ای را برای تولید ۱۰۰ تن سیمان در روز با استفاده از فناوری کوره شفت عمودی در راجستان هندوستان بر اساس داده‌های میدانی واقعی طراحی کرد. هایس و همکاران [۶]، برای کنترل انتشار جیوه در عملیات کوره سیمان پرتلند، فیلتر کیسه‌ای طراحی کردند که ذرات را جمع‌آوری نموده و طی یک فرآیند غیرآلی در کوره مجدداً مورد استفاده قرار می‌داد. همچنین، زمان و همکاران [۷] یک سیستم نظارت مستمر بر انتشار آلاینده‌ها مبتنی بر تکنیک هوش مصنوعی فازی طراحی کردند که شامل یک هواکش مکنده، یک فیلتر کیسه‌ای و یک سیستم جمع‌آوری و تخلیه گرد و غبار بود.

کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی در صنعت و بخش خدمات روز به روز بیشتر شده و اخیراً نیز این امر، به حیطه طراحی تجهیزات وارد شده است که در این مقاله کاربرد الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در طراحی فیلترهای کیسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته تا بتوان روشی را برای محاسبه تأثیر همزمان پارامترهای اصلی موثر بر طراحی فیلترهای کیسه‌ای در کارخانجات سیمان ارایه نمود. در این مقاله، به صورت موازی از روش معادلات ساختاری برای محاسبه سطح کیسه مورد نیاز فیلترهای کیسه‌ای استفاده شده و در نهایت، خروجی‌های هر دو مدل مقایسه شده است.

۲- پیشینه تحقیق

مساله دستیابی به انتشار صفر گازهای گلخانه‌ای در تولید سیمان مستلزم کاهش اساسی در انتشارات فرآیند تولید است [۸]. اغلب در گذشته، آلاینده‌های صنعت سیمان با نصب رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک کنترل می‌شدند، اما این تجهیزات با چالش‌هایی همچون حساسیت نسبت به کاهش توان، نوسانات ولتاژ، و نسبت نامناسب سوخت به مواد خام در کوره، مواجه بودند [۵]. همچنین، در آنها باید دمای گاز ورودی نسبتاً پایین باشد تا بتوانند گرد و غبار را به طور موثر حذف کنند، و این مستلزم آن است که به آب خنک کننده بیشتری در برج تهویه برای خنک کردن گاز از ۴۰۰ درجه سانتیگراد تا حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد نیاز باشد [۹]. از این‌رو، امروزه بگ فیلترها تا حدود زیادی جانشین رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک شده‌اند. پورنومو و همکاران [۹] نشان دادند استفاده از بگ فیلترها می‌تواند به طور قابل توجهی انتشار گرد و غبار را از ۳۰ به ۶ میلی‌گرم بر متر مکعب کاهش دهد و در عین حال انتشار CO_2 را ۰/۲۴ تن در سال از طریق صرفه جویی در مصرف برق کاهش دهد.

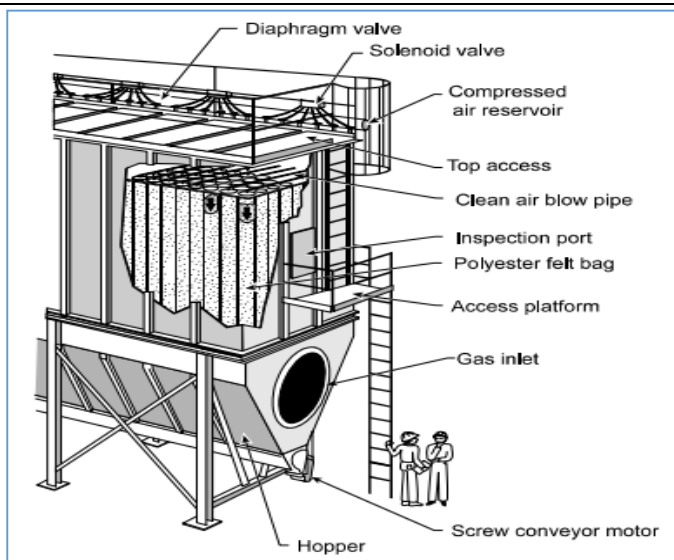
۲-۱. کاربرد بگ فیلتر

فیلترهای کیسه‌ای یا بگ فیلترها، بیشترین درصد فیلترهای موجود در یک کارخانه سیمان را تشکیل می‌دهند [۷] و در مقایسه با رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، اجازه می‌دهند تا دمای گاز ورودی بیشتر باشد و در نتیجه راندمان حذف گرد و غبار بالاتر رود [۹]. امروزه در کشور، طراحان در شرکت‌های مشاور از جداول یا نمودارهای خاصی برای طراحی بگ فیلترها استفاده می‌کنند که در دسترس عام قرار ندارند. پارامترهای دخیل در

طراحی بگ فیلترها به صورت کلی عبارتند از دما، فشار، میزان درصد غبار ورودی، دانه بندی غبار، میزان رطوبت گرد و غبار، نوع ذره و میزان اشتعال‌پذیری مواد که در صنعت سیمان به دلیل مشخص بودن برخی از پارامترها و عدم اشتعال‌پذیری ذرات، عملاً میزان دبی گرد و غبار، دما، اندازه غبار و میزان آن مهم بوده و بر اساس آنها، سطح پارچه مورد نیاز محاسبه می‌شود [۱۰].

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است غبار ایجاد شده در خط تولید، توسط هودها و داکت‌ها از نقاط غبارخیز جمع‌آوری شده و به صورت شناور در بستر هوا به سمت فیلتر کیسه‌ای، انتقال می‌یابد که این امر، توسط یک دستگاه فن با ایجاد فشار منفی داخل شبکه و دستگاه‌ها انجام می‌گیرد.

سرعت انتقال مواد در کانال‌ها، تابع خواص فیزیکی ذرات غبار بوده ولی محدوده مجاز طراحی بین ۱۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. ذرات غبار به همراه هوا وارد محفظه اصلی دستگاه شده و پس از عبور از کیسه‌ها (که از جنس الیاف با خواص و دانسیته متفاوت می‌باشند و بسته به نوع غبار و مشخصات غبار انتخاب می‌شوند) جداسازی شده و در نتیجه هوای تصفیه شده، توسط فن و از طریق دودکش به بیرون رانده می‌شود. پس از پوشیده شدن کیسه‌ها توسط غبار، سنسور اختلاف فشار که اختلاف فشار هوا قبل و بعد از پوشانیده شدن کیسه را به صورت پیوسته کنترل می‌نماید، فرمان تمیزکاری را به شیرهای برقی، صادر می‌کند. این شیرهای برقی در زمانی حدود ۱۰۰ تا ۲۵۰ هزارم ثانیه باز می‌گردند و هوای فشرده را با فشار شش بار، از طریق لوله‌ها به دهانه کیسه‌ها، هدایت می‌کنند که باعث ایجاد یک موج ضربه روی کیسه‌ها و تخلیه غبار کیسه‌ها می‌گردد [۱۰].



شکل (۱). شمایی از یک فیلتر کیسه‌ای [۱۱]

استفاده این مقاله بوده به صورت مختصر شرح داده می‌شود:

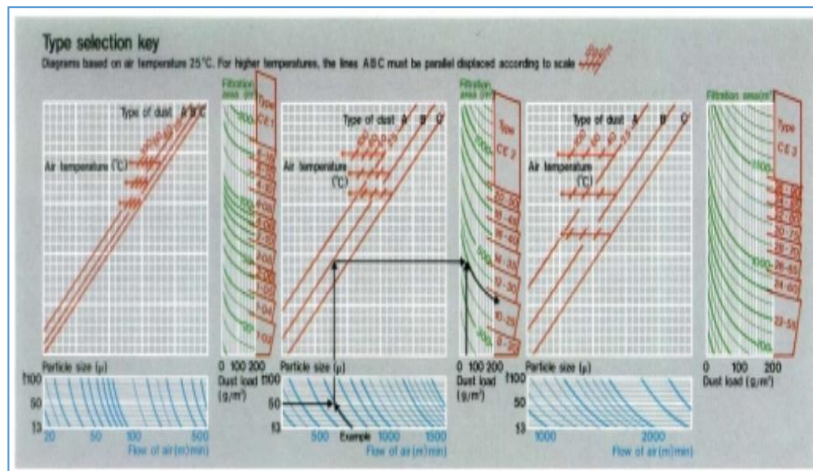
ابتدا می‌بایست نوع گرد و غبار انتخاب شود. در صنعت سیمان در بخش تولید کلینکر، با توجه به نوع گرد و غبار، تیپ B انتخاب می‌شود ولی چنانچه هدف انتخاب فیلتر در بخش تولید سیمان از کلینکر باشد، نوع C باید انتخاب شود.

سایز گرد و غبار تولیدی با توجه به محل خیزش و نوع مواد و تجهیز در حال کار، از جداول خاصی که در هندبوک‌ها و مراجع صنعت سیمان موجود است [۱۵] انتخاب می‌شود.

دبی گرد و غبار با توجه به مشخصات هر تجهیز از جمله تعداد نقاط خیزش گرد و غبار، فاصله تا نقطه غبارگیری و استقرار فیلتر، ظرفیت تجهیزات یا سرعت انتقال مواد، که توسط سازندگان هر تجهیز جداگانه اعلام شده و در مستندات و کاتالوگ‌های شرکت‌های تولیدکننده، ذکر می‌شوند، انتخاب می‌شود که شیوه محاسبات و جداول مربوطه در هندبوک‌های طراحی صنعت سیمان [۱۵] ذکر شده است.

۲-۲- روش‌های طراحی بگ فیلتر

علی‌رغم قدمت بیش از ۷۵ ساله صنعت سیمان در ایران، در این زمینه، تلاش خاصی برای تدوین روش‌های طراحی صورت نگرفته و بررسی‌های محدود صورت گرفته، نیز به دلیل عدم دسترسی به نحوه محاسبه و برخی پیچیدگی‌های موجود، چندان موفق نبوده است [۱۲]. از شیوه‌های طراحی موجود، می‌توان به روش طراحی شرکت FLSmidth دانمارک [۱۳] با چند دهه سابقه در این امر و مالک شرکت تخصصی FLSAirtech که یکی از بزرگان طراحی سیستم‌های فیلتراسیون در دنیا است، اشاره نمود که در این تحقیق نیز این شیوه مورد استناد قرار گرفته، هر چند که جداول و نمودارهای مربوط به این شیوه نیز، هم‌اکنون در دسترس عموم نمی‌باشد. مثال ارایه شده توسط بارگوا [۵] با پیش فرض‌های خاص یک پروژه تهیه شده، لذا با اطمینان کافی نمی‌توان آن را به صورت عمومی به کار برد. شیوه آبیشک و رام‌چاندان [۱۴] عمومی‌تر بوده، هر چند فرمولاسیون ارایه شده در آن، دارای اشکالاتی است. در اینجا شیوه محاسبه شرکت FLSmidth [۱۳] که مورد



شکل (۲). بخشی از نمودارهای شرکت FL Smidth برای انتخاب سایز بگ فیلتر (به دلیل حق کپی‌رایت، گراف‌ها توسط شرکت طراح، محو گردیده است) [۱۳]

دردو بند پیشین، سطح مورد نیاز بگ فیلتر خواهد بود.

۵. نقطه تقاطع دو خط رسم شده در دو بند پیشین، سطح مورد نیاز بگ فیلتر خواهد بود.

۳- روش تحقیق

۳-۱- الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

این الگوریتم بر اساس ساختار عصبی انسان بنا شده و شامل مغز و اعصاب متصل به آن می‌باشد. در این شبکه، پردازشگرهای کوچک و بسیار زیادی، با نام نورون، وجود دارد که به عمل پردازش داده‌ها سرعت می‌بخشند و هر یک دارای بخش‌های جسم سلولی یا همان توابع هر مدل، دندریتها یا دربرگیرنده ورودی توابع و آکسون‌ها یا همان خروجی توابع می‌باشند [۱۶].

همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده، ساختار شبکه عصبی سه لایه دارد که لایه ورودی پس از دریافت داده‌ها و اعمال وزن به آن‌ها، سیگنال ورودی را به لایه بعد، که لایه میانی یا لایه پنهان یک یا چند لایه نیز نامیده می‌شود، منتقل می‌کند. در انتها خروجی وزن‌دار لایه پنهان به خروجی ارسال می‌گردد که همین لایه، پیش‌بینی خروجی نهایی شبکه را نیز برعهده دارد [۱۶]. برای ساخت

پس از انتخاب سایز و میزان دبی، برای تعیین ظرفیت فیلترهای کیسه‌ای از نمودارهای ارائه شده توسط شرکت FL Smidth کمک می‌گیریم [۱۳] که بخشی‌هایی از این نمودارها در شکل ۲ آمده است:

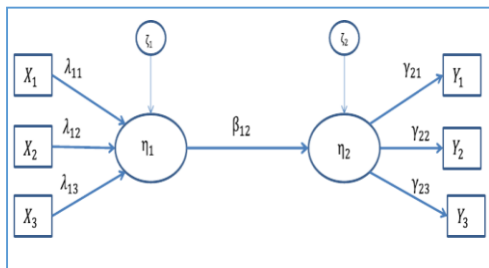
۱. اندازه ذرات را بر حسب میکرون از نمودار مربوط به سایز ذرات پیدا کرده و از آنجا خطی به موازات افق رسم می‌کنیم تا نمودار میزان دبی مورد نظر را در یک نقطه قطع کند (در شکل ۲ خطی از سایز ۵۰ میکرون به صورت افقی رسم شده تا خط دبی ۷۰۰ مترمکعب در دقیقه را قطع نماید).

۲. از نقطه تقاطع خط دبی و سایز، به صورت عمودی خطی رسم کرده تا خطوط قرمز مایل را با توجه به دما و نوع ذرات گرد و غبار در یک نقطه قطع کند.

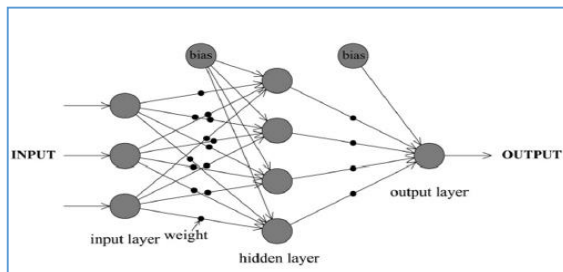
۳. از نقطه یاد شده در بند قبل، به صورت افقی خطی رسم می‌کنیم.

۴. میزان Dust Load محاسبه شده را در سمت راست گراف وسط پیدا کرده از آن نقطه خطی عمودی رسم کرده تا خط افقی ایجاد شده در بند سوم را قطع کند. نقطه تقاطع دو خط رسم شده

الگوریتم شبکه عصبی ترکیبی مورد استفاده در تحقیق حاضر، از روش boosting استفاده شد.



شکل (۴). ساختار مدل معادلات ساختاری [۱۷]



شکل (۳). شمایی از روش کار الگوریتم شبکه عصبی [۱۷]

۳-۲- روش معادلات ساختاری

تکنولوژی شرکت FLSmidth دانمارک و مبانی و روش‌های محاسباتی مطرح شده توسط آن شرکت، مبانی محاسبات مربوط به سطح کیسه قرار گرفته است. این شرکت در طرح‌های اخیر خود میزان خروجی را به زیر ۲/۵ میلی‌گرم در هر نرمال مترمکعب رسانده درحالی‌که استاندارد ایران ۱۰۰ میلی‌گرم در هر نرمال مترمکعب می‌باشد [۱۳]. هنگام طراحی بگ فیلترها دمای استاندارد ۲۵ درجه سانتیگراد برای محیط در نظر گرفته شده و محاسبات بر اساس فیلترکیسه‌ای تیپ B انجام شده‌اند. بدیهی است تغییرات دمایی و تیپ فیلتر، می‌تواند بر برخی از پارامترهای موثر در طراحی، اثر بگذارد که این امر هنگام به‌کارگیری نتایج تحقیق حاضر، باید مورد توجه قرار گیرد.

در مدل معادلات ساختاری، با تعریف ساختارهای علی خاص بین مجموعه‌ای از سازه‌های غیرقابل مشاهده ارتباط ایجاد می‌شود. این مدل‌ها از دو نوع خاص تشکیل می‌شوند که در یکی ارتباط بین متغیرهای پنهان تعیین می‌شود و در دیگری روابط بین متغیرهای پنهان و مشاهده شده حدس زده می‌شود. نوع مرسوم از این ساختار در شکل ۴ آمده است.

۳-۳- فرض‌های تحقیق

در این مقاله، فرض‌های اولیه ذیل در نظر گرفته شده‌اند: میزان دبی گرد و غبار، دما، اندازه غبار و میزان آن از پارامترهای اصلی دخیل در محاسبه میزان سطح پارچه بگ فیلترهای خطوط تولید سیمان می‌باشند [۱۸].

جدول (۱). پارامترهای اساسی موثر در طراحی بگ فیلتر [۱۵]

ردیف	نام پارامتر	اثر ایجاد شده روی طراحی فیلتر
۱	میزان دبی گرد و غبار ورودی	سطح پارچه
۲	سایز متوسط ذرات ورودی	سطح پارچه، نوع پارچه
۳	میزان موجود گرد و غبار در هر نرمال مترمکعب هوای ورودی	سطح پارچه
۴	دمای هوای ورودی به بگ فیلتر	نوع پارچه
۵	فشار هوای ورودی به بگ فیلتر	مقاومت بدنه، فاصله رینگ‌های کیسه‌ها
۶	میزان رطوبت هوای ورودی به بگ فیلتر	نوع پارچه، ایزولاسیون فیلتر
۷	نوع ذره از دید میزان سایش یا چسبندگی	نوع پارچه
۸	میزان اشتعال پذیری ذرات	نوع پارچه، پوشش بدنه

Debit: میزان دبی گرد و غبار ورودی به هر بگ فیلتر را نشان می‌دهد.

Size: نشانگر اندازه متوسط ذرات ورودی به هر فیلتر کیسه‌ای است.

Dust Load: میزان موجود گرد و غبار در هر نرمال مترمکعب هوای ورودی به بگ فیلتر است.

فیلد FinalFA هدف ما در این بررسی بوده و سطح موثر مورد نیاز هر فیلتر طراحی شده در این فیلد وارد می‌شود.

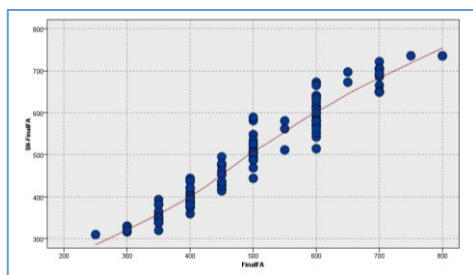
پارامترهای موثر، از نوع داده عددی پیوسته هستند و مطابق با مدل مفهومی تشریح شده در شکل ۵ مدل‌سازی شده‌اند.

این مدل براساس دانش کسب شده از مرور ادبیات تحقیق و تجربیات محققین پیشین و نظر کارشناسان و خبرگان صنعت سیمان طراحی و ارائه گردید.

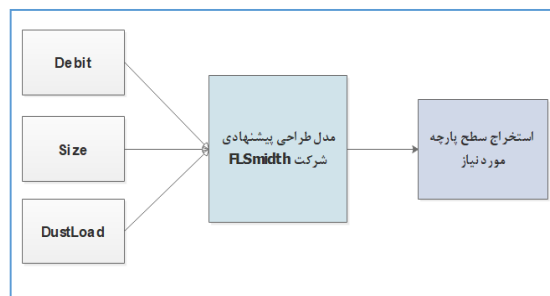
واحدهای اندازه‌گیری میزان دبی، دما، اندازه ذرات، و مساحت کیسه، به ترتیب عبارتند از مترمکعب بر دقیقه، درجه سانتیگراد، میکرون متر، و مترمربع.

۳-۴- مدل مفهومی تحقیق

مشخصات اساسی موثر در طراحی بگ فیلترها و اثرات ایجاد شده روی طراحی بگ فیلتر در جدول ۱ ذکر شده است. در این جدول، پارامترهای ردیف‌های یک الی سه، روی سطح پارچه مورد نیاز فیلتر کیسه‌ای، تاثیر گذاشته و تغییر در سایر عوامل، روی نوع پارچه، مقاومت بدنه خارجی فیلتر کیسه‌ای، فاصله بین رینگ‌هایی که کیسه‌ها در آن قرار داده می‌شوند، و ایزولاسیون فیلتر یا پوشش‌دهی آن، تاثیر می‌گذارند. لذا در بانک اطلاعاتی مورد نیاز، صرفاً فیلدهای زیر در نظر گرفته شده است و مابقی پارامترها به دلایل فوق‌الذکر، در جدول اطلاعاتی وارد نشده‌اند.



شکل (۶). مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی



شکل (۵). مدل مفهومی تحقیق

جدول (۲). مشخصه‌های آماری پارامترها

پارامتر	مینیمم	ماکزیمم	انحراف استاندارد
Debit	500	1000	171.579
Size	30	100	22.768
Dust Load	40	160	41.723

مشخصه‌های آماری پارامترهای مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است.

۴-۲- ساخت و اجرای مدل شبکه عصبی

در این تحقیق برای ساخت الگوریتم شبکه عصبی ترکیبی (ensemble) از روش boosting (تقویتی)

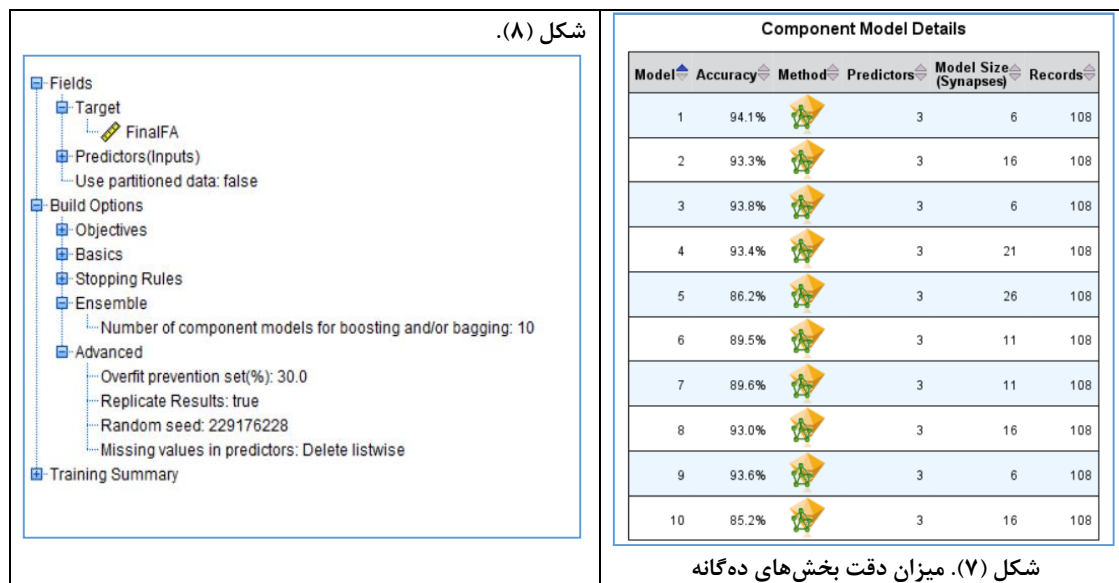
۴- تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی

۴-۱- آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مقاله، مشخصات مربوط به ۱۰۸ فیلتر طراحی شده، می‌باشد. خلاصه

تقریب خوبی سطح بگ فیلتر را پیش‌بینی نماید بجز در قسمت‌هایی که تعداد داده‌ها کم بوده که در این موارد نیز، عمدتاً مقدار سطح را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی نموده است. نتایج اجرای مدل با ده بخش در شکل ۷ آمده است.

در نرم افزار IBM Modeler استفاده شد [۱۹]. نتایج حاصل از اجرای مدل و رابطه بین میزان سطح محاسبه شده و سطح واقعی در شکل ۶ آمده است. با بررسی خطوط و نقاط ترسیم شده در شکل ۶، ملاحظه می‌گردد الگوریتم شبکه عصبی توانسته با

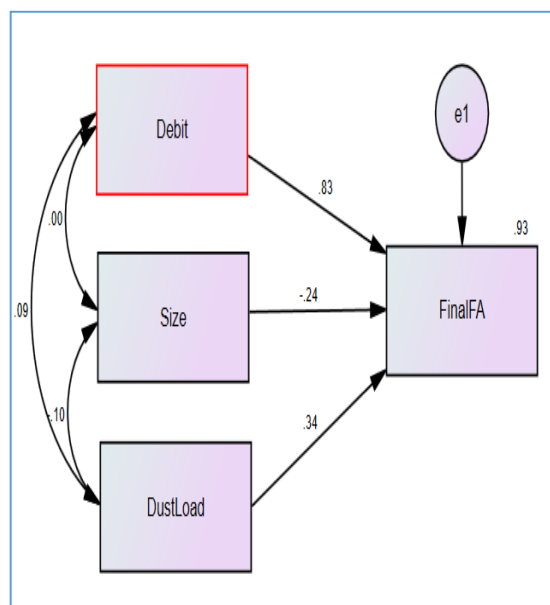


Name	Label	Observed	Variance Estimate	SE
Debit		✓	29166.67	3987.58
Size		✓	513.58	70.22
DustLoad		✓	1724.69	235.79
FinalFA		✓		
e1		□	1073.36	146.75

Dependent	Independent	Estimate	SE	Standardized
FinalFA	e1	1.00		
FinalFA	Debit	.63	.02	.83
FinalFA	Size	-1.34	.14	-.24
FinalFA	DustLoad	1.04	.08	.34

Variable 1	Variable 2	Estimate	SE	Correlation
Size	DustLoad	-95.68	91.45	-.10
Debit	Size	.00	374.16	.00
Debit	DustLoad	648.15	688.51	.09

شکل (۱۰). نتایج اجرای مدل معادلات ساختاری



شکل (۹). مدل معادلات ساختاری تحقیق

طراحی یعنی دبی، میزان گرد و غبار و اندازه ذرات است. طراح می‌تواند برای یکسان‌سازی و یکنواخت نمودن قطعات یدکی کیسه‌ها، ارتفاع و قطر کیسه‌ها را ثابت نگه داشته، ولی تعداد کیسه‌ها در واحد سطح و یا طول و عرض خود فیلتر را بنا به نیاز و با در نظر گرفتن محدودیت‌های محیطی، طراحی نماید به‌طوری که سطح مورد نظر در هر فیلتر تامین شود. با روش پیشنهادی تحقیق حاضر می‌توان سطح فیلترهای کیسه‌ای مورد نیاز در صنایع مشابه، از جمله صنایع معدنی و فولاد را، محاسبه نمود.

مقایسه دقت مدل پایه شبکه عصبی با مدل ترکیبی طراحی شده نشان می‌دهد دقت پیش‌بینی از ۹۴٫۱ درصد به ۹۵٫۴ درصد افزایش یافته است.

۴-۳- ساخت و اجرای مدل معادلات ساختاری

مدل معادلات ساختاری تحقیق در شکل ۹ نمایش داده شده است. این مدل با استفاده از نرم افزار IBM Amos طراحی و اجرا گردید. ضرایب استاندارد محاسبه شده در این شکل مشخص شده‌اند.

مقادیر واریانس تخمین زده شده مربوط به متغیرها، وزن‌های رگرسیونی، و کواریانس بین متغیرها در شکل ۱۰ ارائه شده است.

۵- تحلیل یافته‌ها و نتیجه‌گیری

مقایسه دقت مدل‌های شبکه عصبی ترکیبی و معادلات ساختاری طراحی شده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد شبکه عصبی پیشنهادی نسبت به مدل معادلات ساختاری، با دقت ۹۴٫۵ درصد، دقیق‌تر عمل کرده، لذا می‌تواند برای طراحی فیلترهای کیسه‌ای در خطوط کارخانجات سیمان گزینه بهتری محسوب گردد. به عبارت دیگر، الگوریتم شبکه عصبی ensemble با استفاده از روش boosting و لحاظ نمودن پارامترهای اصلی طراحی فیلترهای کیسه‌ای شامل دبی، غلظت و اندازه ذرات گرد و غبار، قادر است سطح مورد نیاز کیسه را با دقت ۹۴٫۵ درصد پیش‌بینی نماید.

همچنین، نتایج مدل‌سازی نشان داد در هر فیلتر کیسه‌ای، میزان دبی گرد و غبار، می‌تواند تا ۸۰ درصد در محاسبه میزان سطح پارچه مورد نیاز آن فیلتر، تاثیر گذار باشد و عوامل میزان گرد و غبار و اندازه آن، با اختلاف زیادی نسبت به دبی، به ترتیب با ۱۵ و ۶ درصد، در درجه دوم و سوم اهمیت قرار دارند.

آنچه در این مدل محاسبه می‌شود، سطح مورد نیاز کیسه برای هر فیلتر بر حسب پارامترهای اصلی

- and Control, 7958740, 109-114 (2017).
- [8] D.R. Nhuchhen, S.P. Sit, D.B. Layzell. Towards net-zero emission cement and power production using Molten Carbonate Fuel Cells. *Applied Energy*. 306,118001 (2022).
- [9] C.W. Purnomo, W. Budhijanto, M. Alfisyah, M. Triyono. Improvement of cement plant dust emission by bag filter system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 316(1), 012031 (2018).
- [10] J.I. Bhatti. Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland cement Association, 740-745 (2004).
- [11] J.D. McKenna, D. Furlong. Fabric filters, In A. J. Buonicore and W. T. Davis (Eds.), *Air Pollution Engineering Manual*. New York, Van Nostrand Reinhold (1992).
- [12] G. Habert, S.A. Miller, V.M. John, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ* 1, 559–573 (2020).
- [13] FLSmidth.com
- [14] P.S. Abhishek, P.N. Ramachandran. Design of Pleated Bag Filter System for Particulate Emission Control in Cement Industry. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2(5) (2015).
- [15] J. Brito, R. Kurda. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*. 281, 123558 (2021).
- فهرست منابع**
- [1] S. Ameraoui, A. Boutaleb, N. Souiher, D. Berdous. Investigation of potential accumulation and spatial distribution of heavy metals in topsoil surrounding the cement plant of Meftah (southeastern Algiers region, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*.10(21), 464 (2017)
- [2] K. Scrivener, A. Ouzia, P. Juilland, A.K. Mohamed. Advances in understanding cement hydration mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 124, 105823 (2019)
- [3] Cement Industry Employers Association <http://cementassociation.ir>
- [4] M. Ebrahimi, S.M.T.F. Ghomi, B. Karimi. Application of the preventive maintenance scheduling to increase the equipment reliability: Case study-bag filters in cement factory. *Journal of Industrial and Management Optimization*. 16(1), 189-205 (2020).
- [5] A. Bhargava. Design of Bag Filter for the Control of Dust Emissions for a Cement Plant. *International Journal of Scientific Development and Research*. 1 (3) (2016).
- [6] J.B. Hayes, J. Wang, J.G. Roessler, D. Deford, T.G. Townsend. Evaluation of leaching of trace metals from concrete amended with cement kiln baghouse filter dust. *Resources, Conservation and Recycling*. 94, 92-98 (2015).
- [7] H. Zermane, H. Mouss, T. Oulmi, S. Hemal. Fuzzy-based process control system of a bag-filter in cement manufacturing plant. 16th International Conference on Systems

- [16] A. Mohammed, S. Rafiq, W. Mahmood, H. Al-Darkazalir, R. Noaman, W. Qadir, K. Ghafor. Artificial Neural Network and NLR techniques to predict the rheological properties and compression strength of cement past modified with nanoclay. *Ain Shams Engineering Journal*. 12 (2), 1313-1328 (2021).
- [17] J.L. García-Alcaraz, J.R. Díaz-Reza, J.L. Hernandez, G. Cortes-Robles. The Application of Structural Equation Models in Industry: Tendencies, *International Journal of Management Sciences*. 4(10), 429-444 (2014).
- [18] A.A. Shubbar, M. Sadique, H.K. Shanbara, K. Hashim. The Development of a New Low Carbon Binder for Construction as an Alternative to Cement. *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*. 35 (2020).
- [19] Z.H. Zhou, J. Wu, W. Tang. Ensembling neural networks: Many could be better than all. *Artificial Intelligence*. 174 (18), 1570 (2010).