طراحی مدل انتخاب تجهیزات کنترل آلودگی هوا با رویکرد فازی (مطالعه موردی: شرکت سیمان شرق)

فریده گل بابایی[۱] - عادل آذر[۲*] - مهرناز گنجی کاظمیان[۳]

azara@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۴

چکیده

مقدمه: بهداشت هوا یک مساله مهم زیست محیطی است که طی سالیان اخیر به دلیل استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته جهت تامین رفاه مادی و نسبی انسان ها، به مخاطره افتاده است. استفاده از سیستم های کنترل آلودگی و روش های تصفیه کننده، از شیوه های عمومی کنترل آلودگی محیط زیست به شمار می روند. از آن جا که روش‌های کنترل مختلف و متعددی با مزایا و محدودیت های متفاوت به منظور کاهش انتشارات آلودگی هوا به کار می روند، لذا هدف از تحقیق حاضر، طراحی یک مدل تصمیم گیری چند شاخصه فازی برای انتخاب مناسب ترین تجهیزات جهت کنترل آلودگی هوا در شرکت سیمان شرق مشهد می باشد.

روش کار: پس از شناسایی صنعت مورد نظر و فرآیند تولید، به کمک روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی تمامی عوامل موثر بر فرآیند تصمیم گیری مشتمل بر عوامل محیطی، عوامل مهندسی و عوامل اقتصادی در نظر گرفته شدند. اوزان اهمیت این معیارها محاسبه و سپس اولویت گزینه های مدل نیز به کمک این روش، تعیین گردیدند.

یافته ها: از میان معیارهای اصلی مدل، معیار اقتصادی با وزن ۰،۵۵۵ به عنوان مهم‌ترین معیار تاثیر گذار بر انتخاب نوع تجهیزات کنترل آلودگی هوا مشخص شد. معیارهای محیطی و مهندسی نیز به ترتیب با اوزان ۰،۲۸۶ و ۰،۱۵۹ اولویت های بعدی را به دست آوردند. اوزان نهایی تکنولوژی‌های الکتروفیلتر، بگ هاوس و فیلتر هیبریدی در واحد آسیاب سیمان به ترتیب ۰،۲۵۶، ۰،۴۱۵ و ۰،۳۲۹ و در واحد آسیاب مواد و کوره به ترتیب ۰،۲۹۱، ۰،۳۷۴ و ۰،۳۳۴ محاسبه گردید.

نتیجه گیری: بدر نهایت مدل ارایه شده که بر پایه روش تحلیل سلسله مراتبی فازی قرار دارد، نشان می‌دهد که روش مناسب جهت فیلتر کردن گرد و غبار در منابع اصلی انتشار آلودگی در شرکت سیمان شرق، روش بگ هاوس خواهد بود.

کلمات کلیدی: *آلودگی هوا، روش‌های کنترل، تصمیم گیری چند شاخصه، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی*

۱- استاد گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران
۲- استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس تهران
۳- کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس تهران

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

مقدمه

معضل آلودگی محیط زیست، بی هیچ تردیدی امروز به عنوان یکی از اصلی ترین چالش های زندگی شهرنشینی شناخته می‌شود و همه ساله خسارات فراوان جانی و مالی را به شهروندان و ساکنان شهرهای بزرگ و پر جمعیت جهان تحمیل می کند. در این میان معضل آلودگی هوا در صدر فهرست مظاهر آلودگی از بابت خطر ساز بودن قرار گرفته است و مروری بر آمارهای سازمان بهداشت جهانی می‌تواند شاهدی بر این ادعا باشد. بر اساس گزارش‌های این سازمان، آلودگی هوا در محیط‌های بسته و فضاهای باز شهری سالانه جان ۳,۳۰۰,۰۰۰ نفر از ساکنان کره زمین را می‌گیرد که قسمت عمده این مرگ و میرها در کشورهای در حال توسعه اتفاق می افتد (WHO, 2011).

منابع آلاینده ی هوا بیشمار و غالبا ناشی از فعالیت های انسانی هستند. تراکم انبوه جمعیت، تعداد فزاینده ی وسایل نقلیه، کارخانجات، صنایع و غیره از جمله عوامل اصلی و موثر دخالت انسان در پیدایش آلودگی هوا به شمار می‌روند (Eslamipoor and Sepehriar, 2013). از یک سو وجود لاینفک جنبه های زیست محیطی گوناگون از قبیل انتشار گرد و غبار و انتشار گازهای آلاینده نظیر دی‌اکسید گوگرد در فرآیند تولید سیمان و از سوی دیگر افزایش رشد صنعت سیمان در کشور، کارخانجات سیمان سهم عمده‌ای را در افزایش آلودگی محیط زیست به خود اختصاص می دهند. از آن جا که افزایش تولید سیمان جهت تامین زیرساخت های توسعه امری ضروری است، می‌بایست با در نظر گرفتن اصل توسعه پایدار در کارخانجات سیمان، شرایط تولید به نحوی اصلاح گردد که کمترین زیان زیست محیطی را به همراه داشته باشد (Bahadori, 2009).

استفاده از سیستم های کنترل آلودگی هوا و روش های تصفیه کننده از شیوه های عمومی کنترل آلودگی محیط زیست به شمار می روند. از آن جا که هزینه های خرید، راهبری و نگهداری تجهیزات سامانه های کنترل آلودگی هوا زیاد است، انتخاب نوع سامانه کنترل باید درست و با دقت زیاد صورت گیرد تا در حالی که جوابگوی مقررات است کمترین هزینه را هم بر صنعت تحمیل کند (Qiaseddin, 2006). از طرفی اغلب اوقات اطلاعات در مورد پارامترهای سیستم های کنترل آلودگی هوا در دسترس نیست و تخمین های سختی باید زده شود و یا این که قسمت زیادی از اطلاعات در دسترس از قبیل دانش ضمنی تصمیم گیرندگان ممکن است کمیت پذیر نباشند (Lu, *et al.*, 2010). لذا در این تحقیق از رویکرد تصمیم گیری چند شاخصه فازی که جزء شناخته شده ترین شاخه تصمیم گیری هاست استفاده شده است. به این ترتیب می توان پارامترهایی از قبیل دانش، تجربه، قضاوت و تصمیم گیری انسان را وارد مدل نمود و روشن است که نتایج چنین مدل هایی به دلیل لحاظ کردن شرایط واقعی در مدل، دقیق تر و کاربردی تر خواهد بود.

در چند دهه گذشته، تلاش های پژوهشی متعددی در جهت تسهیل تصمیم گیری در حوزه مدیریت مسایل زیست محیطی از جمله کنترل کیفیت هوا با به‌کارگیری روش‌ها و تحقیق در عملیات صورت گرفته است. غالبا در این پژوهش‌ها فنون تصمیم‌گیری سخت مورد توجه محققین بوده و مدل‌های مختلف برنامه‌ریزی‌های ریاضی قطعی، احتمالی و فازی در زمینه مدیریت کیفیت هوا به کار رفته‌اند. به عنوان مثال الیس یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی را جهت کنترل اثرات ناشی از

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

باران‌های اسیدی و شبان و همکاران یک روش برنامه ریزی عدد صحیح مختلط را به منظور تعیین بهترین استراتژی کنترل انتشار آلاینده‌ها طراحی کردند (Cooper *et al.,* 1996 ; Lu *et al.,* 2010). هم چنین کاربرد و توسعه رویکردهای بهینه‌سازی غیر دقیق نظیر برنامه‌ریزی نیرومند فازی، برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر فازی دو مرحله‌ای، برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی بازه-پارامتر و ... با هدف کنترل کیفیت هوای منطقه‌ای تحت شرایط عدم قطعیت مورد توجه محققین بوده‌اند (Lu *et al.,* 2010; Lu *et al.,* 2010; Dong *et al.,* 2012). اما در پاره‌ای از مطالعات، محققین کاربرد فنون تصمیم‌گیری نرم و نمونه بارز آن‌ها یعنی روش‌های تصمیم گیری چند شاخصه را نیز در حوزه مدیریت مسایل زیست‌محیطی بررسی کرده اند. به‌کارگیری روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ، فرآیند تحلیل شبکه ای و یا مدل‌های توسعه یافته ی آن ها به منظور ارزیابی شیوه های مختلف کنترل پساب و حفظ کیفیت آب از زمره این تلاش‌ها بوده‌اند (Tao and Hills, 1999; Bottero *et al.,* 2011; kalbar *et al.,* 2013).

با این وجود، با جستجوهایی که توسط محقق انجام شده است تا کنون تلاش های پژوهشی بسیار کمی در این زمینه در سطح کشور صورت گرفته است. از جمله این مثال‌های معدود می توان به تلاش ادیب زاده برای تدوین یک الگوی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به منظور ارزیابی روش‌های متعدد کاهش آلودگی هوای شهر تهران اشاره کرد (Eshaghi, *et al.,* 2012).

تحقیق حاضر با هدف شناسایی و تعیین معیارهای موثر بر انتخاب تجهیزات کنترل آلودگی هوا و ارایه مدل مناسب برای انتخاب روش مطلوب فیلتراسیون گرد و غبار در کارخانه سیمان شرق با استفاده از رویکرد فازی انجام شده است تا از این طریق بتوان ضمن دست یابی به سطح کاهش مطلوب در میزان انتشار آلودگی به محیط زیست، کمترین هزینه را هم برای صنعت در پی داشته باشد.

روش کار

این تحقیق کاربردی بوده و از نظر گردآوری داده‌ها، مبتنی بر روش پیمایشی است. در مرحله اول با مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی متون علمی موجود در خصوص مدیریت مسایل زیست محیطی و به ویژه مدیریت کیفیت هوای منطقه‌ای و روش‌های تصمیم گیری، ادبیات تحقیق گردآوری شد. سپس با توجه به ادبیات تحقیق، مصاحبه با خبرگان و استفاده از پرسش نامه، معیارها و شاخص های مهم و موثر در انتخاب تجهیزات کنترل آلودگی هوا استخراج گردید. از طرفی، با بررسی فرایند تولید، وضعیت موجود و ویژگی های فنی آن، مراحلی از فرآیند تولید سیمان که به عنوان منابع اصلی انتشار گرد و غبار در صنعت مورد نظر نقش داشتند، تعیین گردیدند. این مراحل شامل آسیاب مواد، کوره و آسیاب سیمان بودند. همچنین با مطالعه مزایا و محدودیت های تجهیزات متعدد فیلتراسیون ذرات و مصاحبه با خبرگان، آن دسته از فناوری های جمع آوری ذرات که قابل کاربرد در فرآیند تولید سیمان هستند، به عنوان گزینه های مدل تحقیق شناسایی شدند. در این مرحله، با طراحی پرسش نامه مقایسات زوجی و تکمیل آن توسط خبرگان و با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی نسبت به وزن دهی معیارها و زیرمعیارها و

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

در نهایت اولویت بندی گزینه ها و انتخاب گزینه مطلوب جهت کنترل آلودگی ناشی از انتشار گرد و غبار اقدام گردید.

ابزار اصلی سنجش در این تحقیق شامل دو پرسش نامه ۱) پرسش نامه غربال نهایی زیرمعیارها و ۲) پرسش نامه مقایسات زوجی است. پرسش نامه‌های تهیه شده با توجه به مطالعات قبلی و نظرات خبرگان دارای روایی می باشند زیرا نخست با مطالعه و بررسی ادبیات موضوع، معیارها و زیرمعیارهای موثر در انتخاب نوع سامانه های کنترل شناسایی شدند و سپس برای تعیین اعتبار این عوامل با تعدادی از خبرگان و اساتید دانشگاهی مشاوره گردید و تغییرات لازم انجام شد. هم چنین در مورد پرسش نامه ۲ که یک پرسش نامه مقایسه زوجی است تا کنون مقالات و تحقیقات بسیاری از نمونه آن ها استفاده کرده و در واقع استفاده از چنین پرسش نامه هایی برای جمع آوری اطلاعات مربوط به روش تحلیل سلسله مراتبی کاملا رایج است. برای سنجش پایایی پرسش نامه ۱ نیز از روش آلفای کرونباخ که به کمک نرم افزار SPSS محاسبه شده، استفاده گردید. میزان آلفای پرسش نامه ۱ برابر ۰/۷۶ به‌دست آمد که بیانگر ثبات و قابلیت اعتماد مناسب آن می‌باشد.

در این پژوهش، پرسش نامه شماره ۱ به منظور غربال نهایی زیرمعیارهای استخراج شده از منابع مختلف طراحی شد و در اختیار ۲۱ نفر از خبرگان قرار گرفت. در این مرحله جامعه آماری تحقیق را کارکنان واحدهای فیلتراسیون و بهره برداری شرکت سیمان شرق تشکیل می دادند که از این میان ۲۱ نفر به صورت هدفمند و به عنوان نمونه تحقیق انتخاب شدند که مستقیما با موضوع انتشار آلودگی ها و کنترل آن مرتبط بوده و آشنایی مناسبی در این زمینه داشتند. در مرحله بعد، پرسش نامه شماره ۲ (پرسش نامه مقایسات زوجی) باید در اختیار آن دسته از خبرگان قرار می گرفت که کاملا در خصوص شرایط و ویژگی های فنی هر یک از نقاط اصلی انتشار گرد و غبار در کارخانه و همین طور مزایا و محدودیت های هر یک از روش‌های کنترل آلودگی، آگاهی و تسلط کافی داشته باشند. با این توضیح و با استفاده از نظرات و راهنمایی‌های مدیران شرکت، ۵ نفر به عنوان خبرگان تحقیق تشخیص داده شدند و نظرات آنان مورد استفاده قرار گرفت.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، یکی از معروف ترین فنون تصمیم گیری چند شاخصه است که توسط ساعتی ابداع گردید (Azar and Faraji, 2010). این روش رویکردی مطلوب برای حل مسایل تصمیم‌گیری پیچیده است و هنگامی که عمل تصمیم گیری با چند گزینه و شاخص تصمیم گیری روبه رو است، می تواند مفید باشد. شاخص ها می توانند کمی یا کیفی باشند. اساس روش AHP بر مقایسات زوجی نهفته است. در این روش تصمیم گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتب تصمیم، کار خود را آغاز می نماید. این درخت، شاخص ها و گزینه های تصمیم گیری را نشان می‌دهد. سپس یک سری مقایسات زوجی انجام می گیرد. این مقایسات وزن هر یک از فاکتورها را در راستای گزینه های رقیب مشخص می‌سازد. در نهایت منطق AHP به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

جدول ۱: مقیاس کلامی برای سنجش درجه اهمیت نسبی

مقیاس کلامی اهمیت نسبی	مقیاس فازی مثلثی	مقیاس فازی مثلثی طرف مقابل
ارجحیت یکسان	(۱/۲،۱،۳/۲)	(۲/۳،۱/۲)
نسبتا با ارجحیت	(۱،۳/۲،۲)	(۱/۲،۲/۳،۱)
با ارجحیت	(۳/۲،۲،۵/۲)	(۲/۵،۱/۲،۲/۳)
بسیار با ارجحیت	(۲،۵/۲،۲)	(۱/۳،۲/۵،۱/۲)
بی اندازه با ارجحیت	(۵/۲،۳،۷/۲)	(۲/۷،۱/۳،۲/۵)

را با یکدیگر تلفیق می سازد که تصمیم بهینه حاصل آید (Azar and Faraji, 2010).

اگرچه در AHP افراد خبره از شایستگی ها و توانایی های ذهنی خود برای انجام مقایسات استفاده می نمایند اما باید به این نکته توجه داشت که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی سنتی، امکان انعکاس سبک تفکر انسانی را به طور کامل ندارد. به عبارت بهتر، استفاده از مجموعه های فازی، سازگاری بیشتری با توضیحات زبانی و بعضا مبهم انسانی دارد و بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه های فازی (به‌کارگیری اعداد فازی) به پیش بینی بلند مدت و تصمیم گیری در دنیای واقعی پرداخت. اولین روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی توسط لارهورن و پدریک در سال ۱۹۸۳ ایجاد شد اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی مورد استقبال قرار نگرفت. در سال ۱۹۹۶ روش دیگری توسط یک محقق چینی به نام یونگ چانگ ارایه گردید که تاکنون این روش کاربردهای فراوانی داشته است. از این رو در ادامه به تجزیه و تحلیل ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی به‌منظور وزن دهی به نظرات خبرگان و تعیین اوزان شاخص‌ها و گزینه‌ها بر مبنای روش تحلیل توسعه‌ای چانگ (EA) می‌پردازیم. این روش به علت سادگی مراحل آن نسبت به سایر رویکردهای AHP فازی و شباهت آن به AHP کلاسیک ترجیح داده شده است. اعداد مورد استفاده در این روش اعداد فازی مثلثی هستند. لذا در این تحقیق فرض شده است تصمیم گیرندگان از مجموعه کلامی مطابق جدول ۱ برای وزن دهی استفاده می کنند (Yüksel and Dagdeviren, 2010):

در روش تحلیل توسعه ای چانگ برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسات زوجی، ارزش SK که خود یک عدد فازی مثلثی است، به صورت رابطه (۱) محاسبه می گردد:

$$S_k = \sum_{j=1}^{n} M_{kj} \otimes \left[\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} M_{ij} \right]^{-1} \quad (۱)$$

که در آن K بیانگر سطر و i و j به ترتیب نشان دهنده گزینه ها و شاخص ها می باشد. در این روش پس از محاسبه SK ها باید درجه بزرگی آن ها را نسبت به هم به دست آورد.

به طور کلی اگر M_1 و M_2 دو عدد فازی مثلثی باشند، درجه بزرگی M_1 بر M_2 به صورت رابطه (۲) تعریف می شود:

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_2) = 1 & if\ m_1 \geq m_2 \\ V(M_1 \geq M_2 = hgt\,(M_1 \cap M_2)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۲)$$

هم چنین داریم:

$$\mathrm{hgt}(M_1 \cap M_2) = \frac{u_1 - l_2}{(u_1 - l_2) + (m_2 - m_1)}$$

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از K عدد فازی مثلثی دیگر نیز از رابطه (۳) به دست می آید:

$$V(M_1 \geq M_2, \dots, M_k) = V(M_1 \geq M_2), \dots, V(M_1 \geq M_k) \quad (۳)$$

برای محاسبه وزن شاخص ها در ماتریس مقایسه زوجی به صورت رابطه (۴) عمل می شود:

$$W'(x_i) = Min\{V(S_i \geq S_k)\}, \quad k = 1,2,\dots,n \qquad K \neq i \quad (۴)$$

بنابراین بردار وزن شاخص ها به صورت رابطه (۵) خواهد بود:

$$W' = [W'(x_1), W'(x_2), \dots, W'(x_n)]^T \quad (۵)$$

که همان بردار ضرایب غیر بهنجار AHP فازی است. اینک بر اساس رابطه (۶) و با استفاده از نرمال سازی، بردار اوزان بهنجار شده به صورت W، که یک عدد غیر فازی است، به دست می آید (Azar and Faraji, 2010):

$$W_i = \frac{w_i'}{\sum w_i'} \quad (۶)$$

یکی از بهترین روش ها برای ترکیب جدول های مقایسه ای اعضای گروه تصمیم گیری، استفاده از میانگین هندسی است. این روش به مدیریت عالی کمک خواهد کرد تا ضمن در نظر گرفتن قضاوت هر عضو به قضاوت گروه درباره هر مقایسه زوجی برسد. از آن جا که مقایسات زوجی، داده ها یی به صورت "نسبت" ایجاد خواهد کرد، میانگین هندسی از نظر ریاضی بهترین میانگین برای آن هاست. به علاوه معکوس بودن ماتریس، مقایسه استفاده از این میانگین را بیش از هر چیز موجه می سازد چرا که میانگین هندسی خاصیت معکوس بودن را در ماتریس مقایسه زوجی حفظ می کند (Azar and Rajabzadeh, 2009). بنابراین در این تحقیق از روش میانگین هندسی مطابق فرمول زیر برای اجماع نظرات خبرگی استفاده شده است (Davis, 1994).

$$l_{ij} = \left[\prod_{k=1}^{K} l_{ijk}\right]^{1/k}; m_{ij} = \left[\prod_{k=1}^{K} m_{ijk}\right]^{1/k}; u_{ij} = \left[\prod_{k=1}^{K} u_{ijk}\right]^{1/k}$$

هرگاه از AHP به عنوان ابزار تصمیم گیری استفاده می‌شود، در آغاز باید یک درخت سلسله مراتب مناسب که بیان کننده مساله تحت مطالعه است فراهم شود. در پژوهش حاضر، درخت سلسله مراتبی تصمیم با توجه به ماهیت مساله تحت بررسی، مطالعه منابع موجود و مدل های مشابه و مشورت با اساتید به صورت یک درخت ۵ سطحی ترسیم گردید.

سطح اول هر درخت بیان کننده هدف تصمیم گیری است. در این پژوهش، هدف از به‌کارگیری فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، انتخاب مناسب ترین تجهیزات جهت کنترل آلودگی هوا در شرکت سیمان شرق می باشد که در سطح اول درخت تصمیم قرار می گیرد. از آن جا که نقاط

جدول ۲: فهرست معیارهای اصلی مدل

معیار	منابع
عوامل اقتصادی	[3,5,11,15,16,17,18,19,22]
عوامل مهندسی	[3,5,15,16,17,19,22]
عوامل محیطی	[3,5,11,15,17]

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

جدول ۳: فهرست معیارها و زیرمعیارهای نهایی مدل تحقیق

معیارها	زیرمعیارها	منابع
EN: عوامل محیطی	EN_1: حداکثر مجاز انتشار آلودگی	[5,15,17]
	EN_2: نیازهای مصرفی (برق، آب و ...)	[3,5,17]
T: عوامل مهندسی	T_1: خواص فیزیکی و شیمیایی ذره	[5,17,19]
	T_2: تراکم ذره	[5,15,17,19]
	T_3: توزیع اندازه و شکل ذره	[5,15,17,19]
	T_4: گذر حجمی جریان گاز	[17,19]
	T_5: دمای جریان گاز	[17,19]
	T_6: رطوبت جریان گاز	[17]
	T_7: بهره وری و قابلیت افزایش بهره وری تاسیسات کنترل	[3,15,16,17,18,22]
EC: عوامل اقتصادی	EC_1: سرمایه گذاری اولیه (خرید و نصب تجهیزات)	[3,5,11,15,16,17,18,19,22]
	EC_2: هزینه بهره برداری و نگهداری	[3,5,11,15,16,17,18,19,22]
	EC_3: عمر مفید تاسیسات	[5,17]

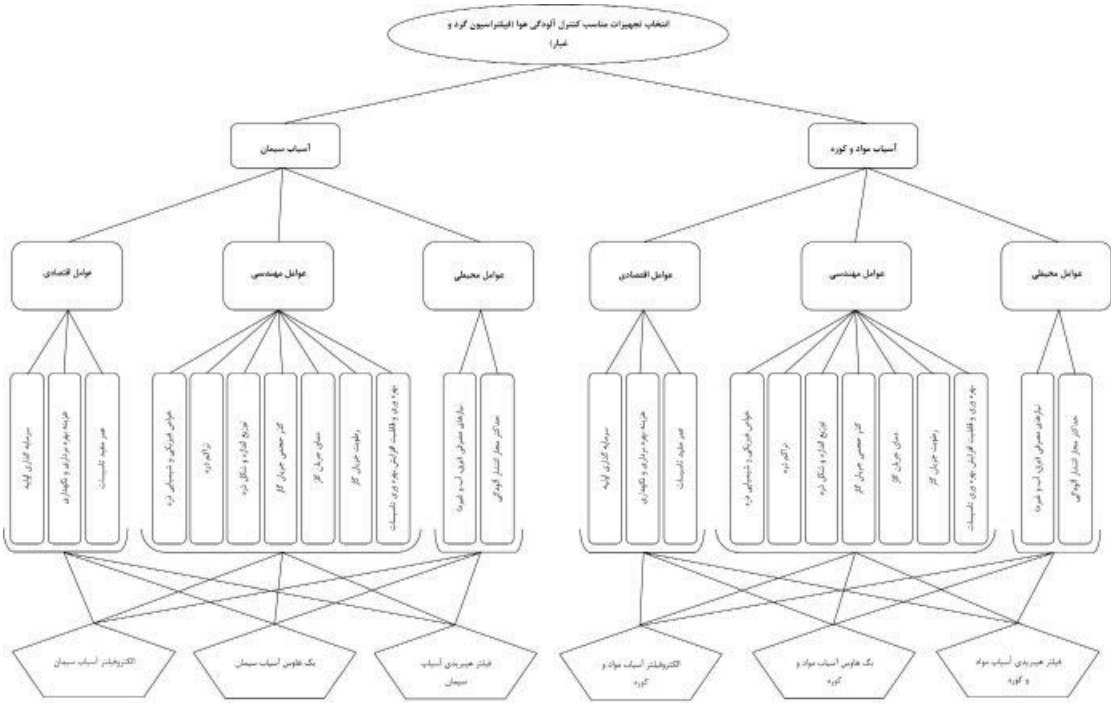
اصلی توزیع ذرات در فرآیند تولید سیمان از لحاظ ویژگی های آلاینده و هم چنین شرایط خاص آن مرحله از تولید متفاوتند و از طرف دیگر روش‌های مختلفی که برای فیلتراسیون گرد و غبار به‌کار می‌روند دارای مزایا و محدودیت های متعددی هستند، به همین جهت ممکن است روش مناسب جهت کنترل و کاهش آلودگی در این نقاط، مشابه یا متفاوت باشد. بدین منظور، هدف اصلی مدل به دو هدف فرعی که انتخاب روش برای قسمت آسیاب مواد و کوره و قسمت آسیاب سیمان است، تقسیم شده است و این اهداف فرعی در سطح دوم درخت تصمیم قرار می‌گیرند.

در مرحله بعد با بررسی منابع کتابخانه ای، معیارهای اصلی و کلی مدل شناسایی شدند که در سطح سوم درخت تصمیم قرار می گیرند. این معیارها همراه با منابع استخراج آن ها در جدول ۲ قابل مشاهده هستند.

گام بعدی در طراحی مدل تحقیق، شناسایی زیرمعیارها خواهد بود که با استفاده از تحقیقات صورت گرفته ۳۳ زیرمعیار استخراج شد. این عوامل پس از بررسی و به منظور تایید و غربال اولیه و نهایی ابتدا از طریق مصاحبه و سپس در قالب پرسش نامه به خبرگان و کارشناسان ارایه شد. در نهایت پس از تحلیل نتایج، برخی عوامل حذف شدند و تعداد زیرمعیارهای اولیه به ۱۲ زیرمعیار کاهش یافت که شرح آن ها به همراه منابع استخراج در جدول ۳ آمده است. زیرمعیارهای نهایی در سطح چهارم درخت تصمیم قرار می‌گیرند.

آخرین مرحله در طراحی مدل، شناسایی

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]



شکل :۱ مدل سلسله مراتبی انتخاب تجهیزات کنترل آلودگی

گزینه های مدل است که در سطح پنجم درخت سلسله مراتبی قرار خواهند گرفت. پس از بررسی، همان طور که پیشتر توضیح داده شد، سه نوع تکنولوژی از میان تکنولوژی‌های تصفیه کننده ذرات به عنوان گزینه های مدل تعیین شدند که عبارتند از: ۱- الکتروفیلتر (فیلتر الکتریکی) ۲- فیلتر هیبریدی ۳- بگ هاوس (پالس جت)

در نهایت نمایش سلسله مراتبی مدل انتخاب تجهیزات مطلوب کنترل آلودگی هوا در شرکت سیمان شرق در شکل ۱ آمده است.

یافته ها

در این مرحله و پس از اتمام مدلسازی، پرسش نامه مقایسات زوجی با توجه به مدل سلسله مراتبی تحقیق، تهیه شده و در اختیار خبرگان قرار گرفت. در تحلیل داده ها، نتایج زیر با استفاده از نرم افزار EXCEL به دست آمد.

در جدول ۴ نتایج حاصل از مقایسه زوجی معیارهای اصلی مدل نسبت به هدف مساله و اوزان و اولویت‌های به‌دست آمده ارایه شده است. سپس اهمیت هر گروه از زیرمعیارهای مدل نسبت به معیار اصلی مربوط به خود و نسبت به هدف کلی مساله از طریق ادغام اوزان، سنجیده شده و اوزان و رتبه های نسبی و نهایی آن ها در جدول ۵ بیان شده است. در نهایت اوزان و اولویت بندی نسبی و نهایی گزینه های مدل نیز در جدول ۶ مشخص گردید.

بحث

یکی از جدی ترین مراحل در مباحث کنترل آلودگی هوا، تصمیم گیری در خصوص بهترین گزینه کنترل آلودگی با توجه به شرایط

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

واقعی اقتصادی، فنی و محیطی است. نتایج این مطالعه با دیدگاه فوق در کارخانه سیمان شرق نشان می‌دهد معیار اقتصادی مهم‌ترین معیار اصلی است که علت این امر را می توان در بالا بودن هزینه های خرید، راهبری و نگهداری سامانه های کنترل جستجو کرد. نتیجه یکسان در مطالعات متعدد دیگری که به منظور کنترل آلودگی های هوا و آب با استفاده از رویکرد MADM صورت گرفته‌اند، گزارش شده است (Zeng *et al.,* 2006 ; Giner-Santonja *et al.,* 2012)

هم چنین اوزان معیارهای محیطی و مهندسی که به ترتیب اولویت های دوم و سوم را به خود اختصاص داده اند، با توجه به نقطه نظرات خبرگان به میزان مناسبی دقیق و مطابق با شرایط واقعی محاسبه شده است. باترو و همکاران رتبه بندی مشابهی را از میزان اهمیت و تاثیر معیارهای مذکور بر ارزیابی و انتخاب نوع سیستم های کنترل پساب در تحقیقات خود نشان داده اند (Bottero *et al.,* 2011). به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که غالبا اولویت بندی معیارهای اصلی یا کلی مدل های

جدول۴: ماتریس مقایسات زوجی و اوزان نهایی ۳ معیار اصلی

GOAL	EC	T	EN	وزن نهایی	رتبه
EC	(1,1,1)	(1.355,1.861,2.364)	(2,2.5,3)	0.555	۱
T	(0.423,0.538,0.741)	(1,1,1)	(1,1.5,2)	0.159	۳
EN	(0.33,0.4,0.5)	(0.5,0.67,1)	(1,1,1)	0.286	۲

جدول۵: اوزان و اولویت بندی نسبی و نهایی زیرمعیارهای مدل

معیارهای اصلی	زیرمعیارها			
	اوزان نسبی	اولویت نسبی	اوزان نهایی	اولویت نهایی
معیار اقتصادی(EC):0.555	EC_1: 0.562	EC_1: 1	EC_1: 0.312	EC_1: 1
	EC_2: 0.291	EC_2: 2	EC_2: 0.162	EC_2: 2
	EC_3: 0.146	EC_3: 3	EC_3: 0.081	EC_3: 5
معیار مهندسی(T):0.159	T_1: 0.213	T_1: 1	T_1: 0.034	T_1: 6
	T_2: 0.1	T_2:6	T_2: 0.016	T_2: 11
	T_3: 0.21	T_3: 2	T_3: 0.033	T_3: 7
	T_4: 0.108	T_4: 5	T_4: 0.017	T_4: 10
	T_5: 0.139	T_5: 4	T_5: 0.022	T_5: 9
	T_6: 0.141	T_6: 3	T_6: 0.0224	T_6: 8
	T_7: 0.089	T_7: 7	T_7: 0.014	T_7: 12
معیار محیطی(EN):0.286	EN_1: 0.5	EN_1: 1	EN_1: 0.143	EN_1: 3
	EN_2: 0.5	EN_2: 2	EN_2: 0.143	EN_2: 4

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

جدول۶: اوزان و اولویت گزینه های مدل با توجه به معیارهای اصلی و با توجه به هدف

گزینه ها		اوزان و اولویت گزینه ها نسبت به معیارهای اصلی						اوزان نهایی	اولویت نهایی
		EC		T		EN			
		وزن	اولویت	وزن	اولویت	وزن	اولویت		
آسیاب سیمان	الکتروفیلتر	0.218	3	0.273	3	0.320	2	0.256	3
	بگ هاوس	0,455	1	0.359	2	0.366	1	0.415	1
	فیلتر هیبریدی	0,327	2	0.367	1	0.313	3	0.329	2
آسیاب مواد و کوره	الکتروفیلتر	0.261	3	0.285	3	0.353	1	0.291	3
	بگ هاوس	0.399	1	0.354	2	0.339	2	0.374	1
	فیلتر هیبریدی	0.340	2	0.361	1	0.308	3	0.334	2

انتخاب تجهیزات کنترل آلودگی به طریق فوق خواهد بود. البته باید در نظر داشت که برخی مطالعات با وجود سناریوی خاص خود که حاکی از شرایط مناسب اقتصادی جهت تامین هزینه ها و زیرساخت های مورد نیاز است، نتایج متفاوتی را نشان می دهند و معیار اقتصادی بعد از دیگر معیارها، آخرین رتبه را از لحاظ اهمیت به‌دست آورده است (Pophali *et al.,* 2011).

در میان زیرمعیارهای مدل، دو زیرمعیار مربوط به معیار اقتصادی با عنوان های سرمایه گذاری اولیه و هزینه بهره برداری و نگهداری، اولویت های اول و دوم را کسب کرده اند که این امر به‌دلیل اهمیت بودن معیار اقتصادی است. سپس زیر معیارهای محیطی حداکثر مجاز انتشار آلودگی و نیازهای مصرفی و زیرمعیارهای مهندسی خواص فیزیکی و شیمیایی ذره و توزیع اندازه ذره، وزن ها و رتبه های بالایی را به خود اختصاص داده اند. شاخص های اقتصادی فوق الذکر در مطالعات مشابه نیز در رقابت با سایر شاخص ها وزن و امتیاز بیشتری به‌دست آورده و اولویت های برتر را از آن خود کرده اند (Zeng *et al.,* 2006; Bottero *et al.,* 2011). اهمیت قابل توجه شاخص استاندارد انتشار ذرات در این مطالعات گزارش شده است (Giner-Santonja *et al.,* 2012). ضرورت حفاظت از کیفیت هوای پاک و داشتن هوای سالم در محیط کار و هم چنین مناطق مسکونی و شهری به ویژه مجاور کارخانجات صنعتی، لزوم سنجش امکان دسترسی به منابع مصرفی مورد نیاز و تمایل به بالا نبودن میزان مصرف، کاربرد تکنولوژی‌های مختلف کنترل برای رده مشخصی از سایز ذرات و تاثیر قطر ذره بر میزان بازدهی جمع آوری از علل مهم و موثر در اختصاص یافتن اهمیت و اولویت های قابل توجه به زیرمعیار های محیطی و مهندسی مذکور می باشند.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

وزن دهی و رتبه بندی مابقی زیرمعیارها نیز مطابق جدول ۵ می باشد. در جدول ۶ از یک طرف اوزان و اولویت نسبی گزینه های مدل با توجه به هر یک از معیارهای اصلی مدل و به تفکیک واحد های منبع آلودگی بررسی شده است که این نتایج نشان می دهند در هر واحد و از منظر هر یک از معیارهای اقتصادی، محیطی و مهندسی به طور جداگانه، کدامیک از گزینه های پیشنهادی اولویت بالاتر و عملکرد بهتری دارند. از طرف دیگر اوزان و اولویت نهایی و معطوف به هدف نیز برای هر یک از گزینه های مدل محاسبه شده است که در واقع نتیجه اصلی و اولویت مورد نظر این تحقیق را مشخص می کند. در این جا لازم به ذکر است میزان سازگاری تمامی ماتریس های مقایسات زوجی کمتر از ۰,۱ بوده و در نتیجه سازگاری مقایسات مورد تایید است و نتایج قابل قبول می باشند.

مروری بر پژوهش ها نشان می‌دهد که غالبا معیار های اقتصادی، فنی یا مهندسی و محیطی در فرآیند انتخاب تکنولوژی مناسب کنترل آلودگی، نقش مهم و موثری داشته و در طراحی مدل های تصمیم گیری، همانند مدل این تحقیق، منظور شده اند. در این مطالعات، محققین با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در دو حوزه قطعی و فازی به ارزیابی سیستم های مختلف کنترل پساب پرداخته‌اند (Bottero *et al.,* 2011; Kalbar *et al.,* 2013). ادیب زاده با تدوین یک الگوی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به منظور سنجش روش‌های متعدد کاهش آلودگی هوای شهر تهران، راهکار اصلاح سوخت را به عنوان مناسب ترین گزینه پیشنهاد نمود. اسحاقی و همکاران نیز طی مطالعه ای از روش AHP جهت انتخاب شیوه مناسب کنترل صدا در شرکت شیشه همدان، بهره گرفتند (Eshaghi *et al.,* 2012). نتایج به‌دست آمده از مطالعات محققین حاکی از آن است که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به عنوان روشی کارآمد در حل مسایل تصمیم گیری چند معیاره کاربردی بوده و در فرآیند کمک به کارشناسان در خصوص تصمیم گیری، به عنوان روش علمی نقش بسزایی داشته است که با نتایج مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد.

مسایل زیست محیطی مواردی هستند که باید معیارها، گزینه‌ها و موارد متعددی در آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. ذهن انسان قادر نیست بیش از ۲±۷ مفهوم را به‌طور هم‌زمان مورد ارزیابی قرار دهد. بنابراین تجزیه و تحلیل چنین مسایلی با استفاده از مدل‌های سلسله مراتبی یا شبکه‌ای این امکان را فراهم می‌کند تا مساله به چندین بخش تجزیه شه و در گروه‌های کوچک جمع آوری گردد و ذهن تصمیم گیرنده بر انجام مقایسات زوجی عناصر تمرکز کند. ماتریس‌های مقایسات چندان بزرگ نیستند و این امر به تصمیم گیرنده اجازه می‌دهد تا تمامی اطلاعات را به خوبی کنترل کند (Giner-Santonja *et al.,* 2012). در نظر گرفتن هم‌زمان شاخص های کیفی و کمی، محاسبه میزان سازگاری قضاوت ها، استفاده وسیع در حل مسایل متنوع، امکان مشارکت گروهی در تصمیم گیری، ادغام قضاوت های افراد و تعیین گزینه نهایی و ... از دیگر

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

مزایای عمده ی روش AHP به شمار می آیند (Fan *et al.*, 2004).

نتیجه گیری

فرآیند انتخاب تجهیزات کنترل آلودگی هوا یک فرآیند تصمیم گیری چند معیاره است که عدم قطعیت، پیچیدگی و سلسله مراتب از مهم‌ترین ویژگی های آن هستند. در تحقیق حاضر یک رویکرد عملی مبتنی بر روش AHP فازی به منظور انتخاب مناسب ترین گزینه از میان گزینه های ممکن و موجود ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد تکنولوژی بگ هاوس بالاترین اولویت را در میان گزینه های پیشنهادی مدل تحقیق به‌دست آورده و بنابراین به عنوان مناسب ترین سامانه کنترل جهت پیاده سازی و انجام عملیات فیلتراسیون گرد و غبار در منابع اصلی انتشار آلودگی در شرکت سیمان شرق انتخاب می شود. علت انتخاب شدن روش بگ هاوس را می توان به ویژه در مطلوب ارزیابی کردن آن از نظر معیار سرمایه گذاری اولیه دانست. این شاخص در مقایسه با دیگر شاخص ها اهمیت قابل توجهی از منظر رای خبرگان کسب کرد. از طرف دیگر روش بگ هاوس از لحاظ معیارهای فنی و مهندسی نیز عملکرد مناسبی داشته و دارای مزایای متعددی است که از آن جمله می توان به راندمان غبارگیری بالا برای ذرات زیر ده میکرون، پایداری بالاتر به تغییرات شرایط کوره نسبت به الکتروفیلتر، عدم حساسیت بگ هاوس به گاز مونوکسید کربن، مقاومت در برابر گازهای قابل اشتعال و ذرات غبار قابل انفجار و غیره اشاره کرد.

منابع

Azar, A.; Faraji, H., (2010). Fuzzy Management Science, 4th.ED. Tehran: Mehraban Nashr Publictaion. (In Persian).

Azar, A.; Rajabzadeh, A., (2009). Applied Decision Making (MADM approach), 3d.ED. Tehran: Negahe Danesh Publication. (In Persian).

Bahadori, B., (2009). Air Pollution in Cement Industry, Review of air pollutants, environmental effects & control methods. Journal of Healthy Work, 2(7), 143-150. (In Persian).

Bottero, M.; Comino, E.; Riggio, V., (2011). Application of the Analytic Hirarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. Environmental Modelling & Software, 26, 1211-1224

Chehregani, H., (2004). Environmental Management in Cement Industry. Tehran: Hazegh Publication. (In Persian).

Cooper, W.W.; Hemphill, H.; Huang, Z.; Li, S.; Lelas, V.; Sullivan, D.W., (1996). Survey of Mathematical Programming Models in Air Pollution Management. European Journal of Operational Research, 96, 1-35.

Davis, M.A.P., (1994). A multicriteria decision model application for managing group decisions. The Journal of the Operational Research Society, 45(1), 47-58.

Dong, C.; Huang, G.H.; Cai, Y.P.; Liu, Y., (2012).

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

Lu, H.; Huang, G.; He, L., (2010). A Two-Phase Optimization Model Based on Inexact Air Dispersion Simulaion for Regional Air Quality Control. Water Air Soil Pollut, 211, 121-134.

Lu, H.W.; Huang, G.H.; Maqsood, I., (2010). Development of an inexact fuzzy flexible programming approach for environmental pollution control. Engineering Optimization, 42(12), 1163-1176.

Perkinz, H., (1994). Air Pollution, Translated by Mansoor Qiaseddin, Tehran: University of Tehran Publication. (In Persian).

Pophali, G.R.; Chelani, A.B.; Dhodapkar, R.S., (2011). Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP & GRA approach. Expert Systems with Applications, 38, 10889-10895.

Qiaseddin, M., (2006). Air Pollution: sources, effects & control methods. Tehran: University of Tehran Publication. (In Persian).

Tao, Y.X.; Hills, P., (1999). Assessment of alternative wastewater treatment approaches in Guangzhou,China. Elsevier Science, 99, 227-234.

Wark, K.; Davis, W.T.; Warner, C.F., (2012). Air Pollution Its Origin & Contorl, Translated by Homa Keshavarzi & Mostafa Kalhor, 2nd. ED. Tehran: University of Tehran Publication. (In Persian).

World Health Organization, (2011). Air pollution report.

An inexact optimization modeling approach for supporting energy systems planning and air pollution mitigation in Beijing city. Energy,37, 673–688.

Eshaghi, M.; Golmohammadi, R.; Riahi Khorram, M., (2012). Prioritizing of Noise Control Methods in the Hamadan Glass Company by the Analytical Hierarchy Process (AHP). Journal of Health and Safety at Work, 1 (1), 75-84. (In Persian).

Eslamipoor, R.; Sepehriar, A., (2013). Firm relocation as a potential solution for environment improvement using a SWOT-AHP hybrid method. Process Safety and Environmental Protection.

Fan, Z.; Guo-Fen, H.; Si-Han, X., (2004). A method for multiple attribute decision-making with the fuzzy preference relation on alternatives. Computers & Industrial Engineering, 46, 321-327.

Giner-Santonja, G.; Aragonés-Beltrán, P.; Niclós-Ferragut, J., (2012). The application of the analytic network process to the assessment of best available techniques. Journal of Cleaner Production, 25, 86-95.

Kalbar, P.P.; Karmakar, S.; Asolekar, S.R., (2013). The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. Journal of Environmental Management, 128, 844-851.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

Yüksel, I.; Dağdeviren, M., (2010). Using the fuzzy analytic network process (ANP) for Balanced Scorecard (BSC): A case study for a manufacturing firm. Expert Systems with Applications, 37, 1270-1278.

Zeng, G.; Jiang, R.; Huang, G.; Xu, M.; Li, J., (2006). Optimization of wastewater treatment alternative selection by Hierarchy Grey Relational Analysis. Journal of Environmental Management, 82, 250-259.

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]

Designing a model for selection of air pollution control equipment using fuzzy logic

F. Golbabaei[1]; A. Azar[2*]; M. Ganji Kazemian[3]

[1] Professor of Department of Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences
[2] Professor of Department of Industrial Management, Faculty of Management and Economy, Tarbiat Modares University of Tehran
[3] Msc.Industrial Management, Faculty of Management and Economy, Tarbiat Modares University of Tehran.

Abstract

Introduction: Air health is an important environmental issue which has been endangered in recent years due to application of advanced technologies used for improving the financial welfare and relative prosperity of humans. Making use of pollution control systems and refinement methods are some general ways to control environmental pollution. Since several different techniques of control, each with its advantages and disadvantages are employed in order to mitigate the spread of air pollution, the aim of current study was to design a fuzzy multi-attribute decision making model to select the most appropriate air pollution control equipment in Mashhad Shargh Cement Company.

Material and Method: After identifying the desired industry and also the production process, all factors affecting decision-making process including environmental factors, technical factors and economic factors were considered by utilizing Fuzzy Analytic Hierarchy Process method. Importance weight of these criteria was calculated and subsequently the priority of model choices were also determined using this approach.

Result: Among main criteria of the model, economic criteria was identified as the most important factor influencing the selection of the type of air pollution control equipment, with the wight of 0.555. Environmental and technical factors with weighting of 0,286 and 0,159 also gained the next priorities, respectively. Final weights of Electro filter, Baghouse and Hybrid filter technologies were calculated 0.256, 0.415 and 0.329 in cement mill unit and 0.291, 0.374 and 0.334 in material grinding and furnace unit, respectively.

Conclusion: Finally, the proposed model that is based on the Fuzzy Analytic Hierarchy Process indicates that the Baghouse Technique is the most appropriate technique for the purpose of dust filtration in major sources of air pollution spread in Shargh Cement Company.

Key words: *Air Pollution, Control Techniques, Multi-Attribute Decision Making, Analytic Hierarchy Process, Fuzzy Logic*

* Corresponding Author Email: *azara@modares.ac.ir*

[Downloaded from jhsw.tums.ac.ir on 2026-06-17]