

ارزیابی عملکرد سیستم و زیر سیستم‌های تهویه قطارهای مترو تهران به کمک مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی فازی سه مرحله ای

سید علی رضا میر محمد صادقی*، مهدی مغان**، مهدی کشاورز***، مهرنوش کشاورز****،

فاطمه خواجه نوری*****

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۷

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۱۹

چکیده

توسعه شبکه مترو، گستردگی روز افزون و پیچیدگی‌های ذاتی مدیریت آن، ضرورت نگاه علمی و استفاده از تجربیات و دانش روز دنیا در خصوص نگهداری و تعمیرات را اجتناب ناپذیر ساخته است. بخش عمده ای از تجهیزات شبکه مترو و قطارهای آن را تجهیزات تعمیرپذیر تشکیل می‌دهند که درصد قابل توجهی از منابع مالی و انسانی سازمان را به خود معطوف می‌سازند.

هدف این مقاله، اندازه گیری کارایی و رتبه‌بندی سیستم تهویه مطبوع قطارهای دی‌سی مترو تهران و زیر سیستم‌های آن به کمک مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی سه مرحله‌ای می‌باشد. در خصوص اهمیت سیستم تهویه در مترو همین بس که در حدود ۸ ماه از سال، سیستم تهویه پس از ترکشن‌ها که نیروی محرکه جهت جابه جایی قطار را فراهم می‌آورد، بیشترین اهمیت را از منظر مدیریت بهره برداری دارا می‌باشد. در این پژوهش با تعریف سیستم تهویه به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری، از آن جهت ارزیابی عملکرد سیستم و در نهایت کمک به تصمیم‌سازی راهبردی نگهداری و تعمیرات اعم از داشتن تخمینی از ظرفیت کارگاه نگهداری و تعمیرات، تامین قطعات یدکی و نیروی انسانی مورد نیاز استفاده می‌شود. شایان ذکر است به علت وجود خطاهای گوناگونی از جمله خطای انسانی، خطای دستگاه‌ها، محدودیت‌های مربوط به تحلیل داده‌های میدانی و غیره، در این مقاله از رویکرد فازی جهت چالش با عدم قطعیت در داده‌ها استفاده شده است. در ضمن از آنالیز قابلیت اطمینان، قابلیت‌دسترسی و نگهداشت‌پذیری که از مهمترین شاخص‌های حوزه نگهداری و تعمیرات هستند، جهت تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تهویه استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی فازی سه مرحله ای، قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری، نگهداشت‌پذیری، سیستم تهویه

* استادیار مرکز تحقیقات مهندسی سیستم‌ها، دانشگاه جامع امام حسین، تهران

** پژوهشگر مرکز تحقیقات مهندسی سیستم‌ها، دانشگاه جامع امام حسین، تهران (نویسنده مسئول)

moghan@ihu.ac.ir

*** دانشجوی دکترا مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه تهران، تهران

**** کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی تهران

***** کارشناس ارشد شرکت واگن سازی تهران

مقدمه

روند رشد شتابان کلان شهرها در جهان توام با افزایش جمعیت در این شهرها، مشکلات متعددی از جمله معضل ترافیک و اختلال درون شهری را بوجود آورده است. این معضل بدلیل تاثیر گذاری آن بر تمامی عناصر سیستم شهر، یکی از چالش‌ها و دغدغه‌های اساسی فرا روی برنامه ریزی و مدیریت شهری در عصر حاضر می‌باشد. به طوری که در دهه‌های اخیر گسترش حمل و نقل عمومی شهری به عنوان یکی از شاخص‌های مهم توسعه پایدار و راهکار مناسبی برای حفظ منابع محیط زیست و کاهش معضلات ترافیکی شهرها مورد توجه و در دستور کار دولت‌ها قرار گرفته است. در میان وسیله‌های حمل و نقل عمومی، سیستم‌های حمل و نقل سریع به دلیل استفاده تعداد زیادی از مسافران سرتاسر دنیا از آنها، مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. این سیستم‌ها یک روش حمل و نقل ایمن و سریع برای رفت و آمد روزانه مسافران فراهم می‌کند (مرزوک^۱ و عبدالاتی^۲، ۲۰۱۴). در میان سیستم‌های حمل و نقل سریع، سیستم‌های مترو به دلیل داشتن مزیت‌های خاصی از جمله صرفه جویی در زمان و هزینه، نبود ترافیک و عدم تاثیر از شرایط آب و هوایی مورد استقبال بسیاری از مردم قرار گرفته اند (قطبی^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). به نحوی که تقاضای روزافزون برای سفر بین شهری و رقابت بین تمام وجوه حمل و نقل یک حقیقت اجتناب ناپذیر است که سیستم حمل و نقل مترو شهری امروز با آن مواجه است. برای رو به رو شدن با این چالش، سازمان‌های مترو شهری باید جهت استفاده و بهره برداری بهتر از منابع و طرح‌ها تلاش کنند (حسن نایی^۴ و همکاران، ۲۰۱۴).

بخش عمده ای از تجهیزات شبکه مترو و قطارهای آن را تجهیزات تعمیر پذیر تشکیل می‌دهند که درصد قابل توجهی از منابع مالی و انسانی سازمان را به خود معطوف می‌سازد، چالش مهم هر سازمان تولیدی و خدماتی با هر راهبردی که در پیش می‌گیرند، ارزیابی و

¹ Marzouk

² Abdelaty

³ Ghotbi

⁴ Hassannayebi

پایش مستمر وضعیت تجهیزات می‌باشد. به سبب وجود محدودیت‌های دائمی در زمینه منابع مالی و انسانی و نیز وجوه مختلف عملکرد یک تجهیز، تشخیص و تحلیل کلیدی‌ترین پارامترهای اثرگذار بر عملکرد تجهیز، موضوعی بسیار تعیین‌کننده است. سیستم‌ها و تجهیزات به سبب بروز اختلالات مختلف همچون طبیعت سیستم، تعداد خرابی‌ها و زمان لازم جهت تشخیص خرابی در معرض آسیب‌اند. این خرابی‌ها نه تنها به زمان از کارافتادگی سیستم می‌افزاید، بلکه هزینه‌های عملیاتی اضافی و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات گزافی را به سیستم تحمیل می‌کند. ارزیابی و پیش‌بینی مناسب از نحوه عملکرد سیستم و میزان در دسترس بودن تجهیز، دارای ارزش راهبردی برای مدیریت است (مادو^۱، ۲۰۰۵).

تجهیزی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است سیستم تهویه مطبوع قطارهای DC مترو تهران است، در خصوص اهمیت سیستم تهویه در مترو همین بس که در حدود ۸ ماه از سال، سیستم تهویه پس از ترکش‌ها که نیروی محرکه جهت جابه‌جایی قطار را فراهم می‌آورد، بیشترین اهمیت را از منظر مدیریت بهره‌برداری دارا می‌باشد. به منظور روشن‌تر شدن اهمیت تحقیق کافی است حجم بالای جابه‌جایی مسافر توسط قطارهای مترو با ظرفیت اسمی ۴۴ نفر نشسته و ۱۴۴ نفر ایستاده در هر واگن را در نظر گرفته و هزینه‌های اجتماعی عدم رضایت در هر بار انتقال مسافر را به آن بیفزایید. بنابراین باید گفت عملکرد مطمئن سیستم تهویه مترو نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت خدمت ارائه شده بازی می‌کند. در این پژوهش با تعریف سیستم تهویه به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری، از آن جهت ارزیابی عملکرد سیستم و در نهایت کمک به تصمیم‌سازی راهبردی نگهداری و تعمیرات اعم از داشتن تخمینی از ظرفیت کارگاه نگهداری و تعمیرات، تامین قطعات یدکی و نیروی انسانی مورد نیاز استفاده می‌شود.

روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری ارزیابی عملکرد سیستم‌های نگهداری وجود دارد که تعدادی از آنها عبارت‌اند از مدل کارت امتیازی متوازن (السیوف^۲، ۲۰۰۶؛ ماطر^۳، ۲۰۰۵)،

¹ Madu

² Alsyouf

³ Mather

مدل نگهداری و تعمیرات مبتنی لرزش (النجار^۱ و السیوف، ۲۰۰۴)، گسترش عملکرد کیفیت یا گسترش کارکرد کیفی (کوتوسوگلو^۲ و همکاران، ۲۰۰۱)، ارزیابی عملکرد به کمک سیستم‌های اطلاعاتی نگهداری و تعمیرات (آرتز^۳ و همکاران، ۱۹۹۸)، اثربخشی جامع تجهیزات (دال^۴ و همکاران، ۲۰۰۰)، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (بویلاکو^۵ و براگلیا^۶، ۲۰۰۰؛ برتولینی^۷ و بویلاکو، ۲۰۰۶) و اخیراً نیز تحلیل پوششی داده‌ها در مقالات گوناگونی از جمله برای ارزیابی تعمیر و نگهداری هواپیماها (ون دن برگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۳)، پل‌ها (وکچیر^۹ و جی‌ها^{۱۰}، ۲۰۱۱؛ ازبک^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰)، جاده‌ها (ازبک و همکاران، ۲۰۱۰؛ روس^{۱۲} و چیو^{۱۳}، ۲۰۰۹)، بزرگراه‌ها (فلاح فینی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۲) و ... استفاده شده است. تمامی این مقالات از روش‌های سنتی تحلیل پوششی داده‌های استفاده کردند. در سال‌های اخیر مدل DEA^{۱۵} سنتی توسعه یافته و مدل جدیدی تحت عنوان مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی (Relational DEA) ارائه شده است. در این روش، هنگام ارزیابی سیستم، ارتباطات درون سیستم نیز در نظر گرفته می‌شود به طوری که کارائی کلی سیستم از کارائی اجزا درون سیستم حاصل می‌شود.

در این تحقیق هدف ما اندازه‌گیری کارائی سیستم تهویه، بر اساس تجهیزات موجود در آن به کمک تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی سه مرحله‌ای می‌باشد. شایان ذکر است به علت وجود خطاهای گوناگونی از جمله خطاهای انسانی، دستگاه‌ها، داده‌های سانسور شده، داده‌های پرت

¹ Al-Najjar

² Kutucuoglu

³ Arts

⁴ Dal

⁵ Bevilacqua

⁶ Braglia

⁷ Bertolini

⁸ Van den Bergh

⁹ Wakchaure

¹⁰ Jha

¹¹ Ozbek

¹² Rouse

¹³ Chiu

¹⁴ Fallah-Fini

¹⁵ Data envelopment analysis

و مسائل کار کردن با داده‌های میدانی و ... معمولاً داده‌های در دسترس، داده‌های قطعی و معینی نمی‌باشند. در این تحقیق ما از رویکرد فازی جهت مقابله با عدم قطعیت در داده‌ها استفاده خواهیم کرد.

یکی از کارهای مهم در هنگام کار با تحلیل پوششی داده‌ها تعریف هوشمندانه واحدهای تصمیم‌گیری و تعیین مناسب شاخص‌های سیستم می‌باشد. در این تحقیق واحد تصمیم‌گیری سیستم تهویه قطارهای DC مترو شهر تهران بوده و از مهمترین شاخص‌های حوزه نگهداری تعمیرات، آنالیز قابلیت اطمینان، دسترس پذیری و نگهداشت (RAM)^۱ جهت تعیین شاخص‌های (ورودی‌ها و خروجی‌های) واحد تصمیم‌گیری استفاده شده است. از جمله مهمترین معیارهای ارزیابی عملکرد برای سیستم‌های تعمیر پذیر چه در حوزه طراحی و چه در زمینه عملیاتی، آنالیز قابلیت اطمینان نگهداشت پذیری و دسترس پذیری سیستم‌هاست. در این میان تحلیل دسترس پذیری به سبب آنکه هر دو پارامتر قابلیت اطمینان و نگهداشت پذیری را در خود دارد، بسیار حائز اهمیت است.

نوآوری این تحقیق در ارزیابی سیستم تهویه قطار مترو در موارد زیر قابل بررسی است. اولاً، مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی کائو^۲ و لیو^۳ (۲۰۱۱) برای سیستمی که دو زیر سیستم به صورت سری به هم متصل‌اند نوشته شده است که مدل حد پایین آن، مدل غیر خطی می‌باشد. در این مقاله ما از سیستم سری که در آن سه زیر سیستم به صورت سری به هم متصل می‌باشند استفاده کرده و هم چنین حد پایین مدل ارائه شده خطی خواهد بود. لذا مزیت این مدل نسبت به مدل کائو و لیو (۲۰۱۱) در خطی بودن حد پایین و سه مرحله‌ای بودن آن می‌باشد. ثانیاً، برخلاف اکثر مقاله‌ها که از شاخص‌هایی محسوسی همچون درآمد، هزینه، تعداد مسافر و... استفاده می‌شود، از شاخص‌های آنالیز RAM جهت انتخاب ورودی و خروجی‌های مدل استفاده گردیده است. در کنار این موارد، مورد کاوی این مسئله برای اولین بار است که در مقالات به چاپ می‌رسد.

¹Reliability, Availability, Maintainability

² Kao

³ Liu

پیشینه تحقیق

یکی از روش‌های پر کاربرد در جهت ارزیابی کارایی، روش DEA است که به منظور اندازه‌گیری کارایی نسبی واحدهای مشابه که دارای ورودی و خروجی مشترک هستند به کار می‌رود. روش DEA یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه می‌دهد که خروجی آن ترکیب وزنی واحدهای مشابه است. هدف این روش مشخص نمودن واحدهای غیر کارا و واحدهای کارا است. ارزیابی کارایی در مدل‌های تحلیل پوششی داده به شکل کلاسیک آن معمولاً مبتنی بر این فرض است که ورودی‌های سیستم می‌بایست کمینه گردند و خروجی‌ها بیشینه شوند. مروری بر مطالعات انجام شده در حوزه حمل و نقل نشان می‌دهد که DEA به طور گسترده در راه آهن (جیتسوزومی^۱ و ناکامورا^۲، ۲۰۱۰؛ آزاده^۳ و همکاران، ۲۰۰۸)، خطوط هواپیمایی (اسکراگا^۴، ۲۰۰۴)، حمل و نقل عمومی (سمپائو^۵ و همکاران، ۲۰۰۸)، بندرهای دریایی (سولینان^۶ و همکاران، ۲۰۰۶؛ هانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۰) و فرودگاه‌ها (مارتین^۸ و رومن^۹، ۲۰۰۱) استفاده شده است. اسموگی^{۱۰} (۲۰۱۱) مطالعات تحلیل پوششی داده‌ها را در صنعت حمل و نقل بررسی کرده و نشان داده که ۶۴ مورد مطالعات حمل و نقل با استفاده از DEA وجود دارد که بخش فرودگاه‌ها ۲۳ مورد، بنادر ۲۱ مورد، حمل و نقل عمومی ۱۰ مورد، راه آهن ۹ مورد، خطوط هواپیمایی ۴ مورد و بقیه موارد ۲ مورد می‌باشند. در این پژوهش، یکی از تجهیز حیاتی تهویه سیستم حمل و نقل عمومی مترو تهران را مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. مدل DEA هیچ‌گونه فرضیاتی را در مورد فرآیندهای داخلی DMUها در نظر نمی‌گیرد. در واقع تحلیل پوششی داده‌ها با DMUها مثل یک جعبه سیاه (بدون در نظر گرفتن فرآیندهای

¹ Jitsuzumi

² Nakamura

³ Azadeh

⁴ Scheraga

⁵ Sampaio

⁶ Cullinane

⁷ Hung

⁸ Martín

⁹ Román

¹⁰ Somogyi

داخلی آنها) که در آنها ورودی‌ها برای تولید خروجی‌ها استفاده می‌شوند، رفتار می‌کند. اما در بعضی از موارد که چندین ماشین به صورت سری به هم متصل شده اند، DMUها معمولاً شامل دو یا تعداد بیشتری مرحله می‌باشند و نمی‌توان مثل جعبه سیاه با آنها رفتار کرد، زیرا خروجی یک مرحله ورودی مرحله بعد می‌باشد. لذا این مراحل با هم در ارتباط و وابسته می‌باشند. این مسئله سبب توسعه مدل‌های DEA شده است. مقالاتی را که در آنها، ساختار درونی و ارتباطات درون سیستم را در نظر گرفته‌اند را به سه دسته، مستقل، متصل و ارتباطی تقسیم بندی کردند (کائو و لیو، ۲۰۱۱).

در روش مستقل، هر مرحله به طور جداگانه و بدون در نظر گرفتن ارتباط بین دو مرحله ارزیابی می‌شود. سیفورد^۱ و ژو^۲ (۱۹۹۹) اولین کسانی بودند که این مدل را مطالعه کردند. آنها این روش را برای ارزیابی ۵۵ بانک برتر تجاری در آمریکا به کار بردند به طوری که نام مرحله اول سودآوری و نام مرحله دوم این فرآیند، بازاریابی بود. ورودی مرحله اول شاخص‌های کارمندان، دارایی، سرمایه سهامداران و خروجی آن درآمد و سود بود و خروجی مرحله دوم ارزش بازار، درآمد هر سهم و نرخ بازگشت سرمایه است. ژو (۲۰۰۰) روش مشابهی را برای ارزیابی کارایی ۵۰۰ شرکت به کار برد. در مقاله‌های ژو (۲۰۰۰)، سکستون^۳ و لوئیس^۴ (۲۰۰۳) و ناراسیمهان^۵ و همکاران (۲۰۰۴) از این نوع روش استفاده شده است. سکستون و لوئیس (۲۰۰۳) مدل مشابهی را برای اندازه‌گیری کارایی تیم‌ها در لیگ بیسبال به کار بردند. ورودی مرحله اول از جنس پول می‌باشد که تیم برای خرید بازیکن و غیره خرج می‌کند و خروجی آن استعداد بازیکنان است و خروجی مرحله آخر هم تبدیل استعداد به پیروزی در مسابقات است.

در روش متصل، هنگام اندازه‌گیری کارایی سیستم، ارتباطات بین اعضا و زیر سیستم‌ها در نظر گرفته می‌شود. اما برای محاسبه کارایی اجزا مثل روش مستقل، کارایی اجزا به طور مجزا

¹ Seiford

² Zhu

³ Sexton

⁴ Lewis

⁵ Narasimhan

و بدون در نظر گرفتن ارتباطات محاسبه می‌شود. اگر چه در این روش، کارائی محاسبه شده برای کارائی کل سیستم مناسب می‌باشد اما هنوز ارتباطی بین کارائی سیستم و کارائی اجزا وجود ندارد. چون کارائی اجزا مستقل از کارائی سیستم محاسبه شده است. این روش توسط فر^۱ و گروسکوپف^۲ (۲۰۰۰) ارائه گردیده است.

در مدل ارتباطی، هنگام ارزیابی کارائی سیستم، ارتباطات درونی بین اجزاء سیستم در نظر گرفته می‌شود به طوری که با استفاده از یک مدل ریاضی کارایی سیستم و زیر سیستم‌ها محاسبه می‌شود. از آنجا که کارایی سیستم و کارایی زیر سیستم‌ها از درون محدودیت‌های مدل ریاضی بدست می‌آید لذا ارتباط معناداری بین کارایی سیستم و کارائی اجزاء وجود دارد. این مدل اولین بار توسط کائو و هوانگ^۳ (۲۰۰۸) برای سیستم دو جزئی که اعضا آن به صورت سری به هم متصل شده اند ارائه گردید. کائو (۲۰۰۹) با افزودن زیر سیستم‌های بیشتر، مدل تحلیل پوششی ارتباطی را برای حالات سری و موازی توسعه داد. کائو و هوانگ (۲۰۱۰) این مدل را برای محاسبه کارائی ساختارهای شبکه توسعه دادند. مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی در صنعت‌های گوناگونی از جمله دانشکده‌ها (چانگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۲)، سیستم‌های نوع آوری (چن^۵ و گان^۶، ۲۰۱۰)، تاثیر فناوری اطلاعات در عملکرد شرکت (کائو و هوانگ، ۲۰۱۰)، بانک‌ها (وانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۴؛ یانگ و لیو، ۲۰۱۲)، بیمه‌ها (کائو و هوانگ، ۲۰۰۸)، شرکت‌های اینترنتی (یانگ^۸ و لیو، ۲۰۱۲) و ... مورد استفاده قرار گرفته است. دسته‌بندی‌های دیگری هم برای مدل‌های شبکه ای وجود دارد (هالکوس^۹ و همکاران، ۲۰۱۴؛ کائو، ۲۰۱۴). در این تحقیق ما از روش تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی برای

¹ Färe

² Grosskopf

³ Hwang

⁴ Chang

⁵ Chen

⁶ Guan

⁷ Wang

⁸ Yang

⁹ Halkos

ارزیابی سیستم و تجهیزات استفاده خواهیم کرد. یکی از مسائل اصلی در تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی تعیین شاخص‌های کلیدی سیستم می‌باشد.

داده‌ها در دنیا واقعی معمولاً قطعی و معین نمی‌باشند. خلیلی دامغانی و همکاران^۱ (۲۰۱۲) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای برای اندازه‌گیری عملکرد زنجیره تامین ارائه دادند. آن‌ها برای مدل کردن معیارهای مبهم و کیفی در مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی دو مرحله‌ای طراحی شده برای اندازه‌گیری عملکرد زنجیره تامین از متغیرهای کلامی در مجموعه فازی استفاده کردند. خلیلی دامغانی و تقوی فرد^۲ (۲۰۱۳) تحلیل حساسیت و پایداری در تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای با داده‌های فازی انجام دادند. آن‌ها چندین مدل برای اندازه‌گیری شعاع پایداری برای یک DMU پیشنهاد دادند. خلیلی دامغانی و توانا (۲۰۱۴) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی دو مرحله‌ای برای اندازه‌گیری کارایی سیستم و زیر سیستم‌ها ارائه دادند. آن‌ها از بازی استکلبرگ تجزیه کارایی DMU به مجموعه کارایی‌ها برای زیر سیستم‌ها استفاده کردند. خلیلی دامغانی و تقوی فرد (۲۰۱۲) روش تحلیل پوششی داده‌های فازی سه مرحله‌ای را برای اندازه‌گیری عملکرد یک فرآیند سری شامل تولید به هنگام، شاخص‌های جابکی و اهداف کلی در یک زنجیره تامین پیشنهاد دادند. خلیلی دامغانی و توانا^۳ (۲۰۱۳) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای جدید با داده‌های فازی برای اندازه‌گیری جابکی در زنجیره تامین ارائه دادند. آن‌ها مدل ارائه شده را برای اندازه‌گیری جابکی یک مورد کاوی واقعی در صنعت لبنیاتی به کار بردند.

کائو و لیو (۲۰۱۱) مدل تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای با داده‌های فازی توسعه دادند. کائو و لین^۴ (۲۰۱۲) مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی را در حالتی موازی با داده‌های فازی ترکیب کردند. ضعف اساسی مدل کائو و لیو (۲۰۱۱) در غیر خطی بودن حد پایین آن می‌باشد. با توجه به غیر خطی بودن مدل حد پایین، لذا جواب حاصل برای کارایی کل سیستم

¹ Khalili-Damghani

² Taghavifard

³ Tavana

⁴ Lin

و اجزا آن نیز بهینه محلی خواهد شد. با بزرگ شدن ابعاد مسئله امکان دور شدن بیشتر از جواب بهینه بیشتر خواهد شد. در این تحقیق ما مدل تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای کائو و لیو (۲۰۱۱) را برای حالتی که در سیستم، سه زیر سیستم به صورت سری متصل است توسعه می‌دهیم. نقطه قوت اساسی مدل ارائه شده در این است بر خلاف حد پایین کائو و لیو که غیر خطی بود، حد پایین مدل ما خطی می‌باشد لذا کارایی‌های محاسبه شده در حد پایین برای کل سیستم تهویه و هم برای اجزاء آن جواب‌های بهینه خواهد بود. در ضمن مورد کاوی این مسئله برای اولین بار است که در مقالات به چاپ می‌رسد.

متدولوژی

تحلیل پوششی داده‌ها روشی مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی است که کارایی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیرنده را بر اساس شاخص‌های ورودی و خروجی محاسبه می‌کند. تحلیل پوششی داده‌های سنتی توسط چارنس^۱ و همکاران (۱۹۷۸) معرفی و ارائه شد. کائو (۲۰۰۹) برای اولین بار مدل تحلیل پوششی ارتباطی را برای حالت سری ارائه داد. کائو مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی را برای سیستمی که در آن h مرحله به صورت سری به هم متصل شده‌اند را توسعه داد. شکل ۳ سیستم که در آن سه زیر سیستم به صورت سری متصل شده‌اند را نشان می‌دهد. در شکل ۳، X_{ij} و Y_{rj} به ترتیب n آمین ورودی و m آمین خروجی سیستم می‌باشند. $Z_{pj}^{(1)}$ محصول میانی p ام، $Z_{qj}^{(2)}$ محصول میانی q ام، Q زیر سیستم ۲ برای واحد تصمیم‌گیری j می‌باشد. محصولات میانی همزمان خروجی یک مرحله و ورودی مرحله بعدی می‌باشند. جدول ۴ نماد‌های استفاده شده در این مقاله را نشان داده است.

جدول ۴: نماد‌های استفاده شده در تحلیل پوششی داده‌های سه مرحله‌ای

X_{ij}	مقدار n آمین ورودی Q ، که توسط DMU_j ، $j=1, \dots, n$ مصرف می‌شود.
Y_{rj}	مقدار m آمین ورودی، S ، که توسط DMU_j ، $j=1, \dots, n$ تولید می‌شود.

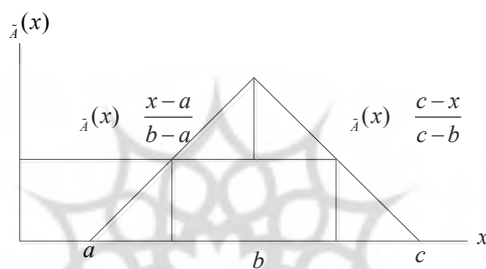
¹ Charnes

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m v_i X_{ik} = 1 \\
 & \sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i X_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \\
 & \sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pj}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i X_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \\
 & \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qj}^{(2)} - \sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pj}^{(1)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
 & \sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} - \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qj}^{(2)} = 0, \quad j = 1, \dots, n \\
 & u_r, v_i, w_p^{(1)}, w_q^{(2)} \geq 0, \quad r = 1, \dots, s, i = 1, \dots, m, p = 1, \dots, P, q = 1, \dots, Q
 \end{aligned}$$

که در آن، u_r, v_i به ترتیب بیانگر وزن ورودی i ام و خروجی r ام می‌باشد. همچنین $w_p^{(1)}$ و $w_q^{(2)}$ به ترتیب مربوط به وزن محصول میانی مرحله اول و دوم می‌باشند. محدودیت شماره یک تضمین می‌کند که مجموع ورودی‌های سیستم برابر یک باشد. محدودیت دوم بیانگر این مطلب است که مجموع وزنی خروجی‌های سیستم باید از مجموع وزنی ورودی‌های سیستم کمتر باشد. محدودیت‌های بعدی نیز تضمین می‌کند که مجموع وزنی خروجی‌های هر مرحله از مجموع وزنی ورودی‌های آن کمتر باشد.

ورودی‌ها و خروجی‌های مدل تحلیل پوششی داده‌های معرفی شده برای قسمت سری، قطعی و معین بودند در حالی که در دنیای واقعی اکثر داده‌ها به صورت غیر قطعی می‌باشند. در این بخش فرض می‌کنیم که تمام داده‌ها یا بخشی از داده‌ها نامعین و غیر قطعی می‌باشند و از ایده فازی برای توصیف آنها استفاده خواهیم انواع مختلف اعداد فازی وجود دارند. از آنجا که اعداد فازی مثلثی رایج‌ترین نوع در ادبیات موضوعی می‌باشند و در عدم اطمینان در مسئله ما به اعداد فازی مثلثی شباهت دارد، در این مقاله فرض کردیم که ورودی‌ها و خروجی‌ها به صورت اعداد فازی مثلثی هستند. تابع عضویت اعداد فازی در رابطه (۲) و به صورت گرافیکی شکل ۴ نشان داده شده است.

$$\bar{a}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$



شکل ۴: نمایش گرافیکی اعداد فازی مثلثی

فرض کنید که متغیرهای $\tilde{X}_{ij}^{(1)}, \tilde{Z}_{qj}^{(2)}, \tilde{Y}_{rj}$ و \tilde{Y}_{rj} به ترتیب نشان دهنده حالت فازی متغیرهای $X_{ij}, Z_{qj}^{(2)}, Z_{pj}^{(1)}, Y_{rj}$ باشند. متغیرهای $\tilde{X}_{ij}^{(2)}, \tilde{Z}_{qj}^{(1)}, \tilde{Y}_{rj}$ به ترتیب با مجموعه فازی با تابع عضویت $\tilde{X}_{ij}, \tilde{Z}_{qj}^{(2)}, \tilde{Z}_{pj}^{(1)}, \tilde{Y}_{rj}$ نشان داده می‌شوند. بر اساس اصل گسترش زاده (۱۹۷۵، ۱۹۷۲) تابع عضویت \tilde{E}_k برای کارائی E_k به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{E}_k(g) = \sup_{\forall i,j,p,q,r} \min \{ \tilde{X}_{ij}(x_{ij}), \tilde{Z}_{pj}^{(1)}(z_{pj}^{(1)}), \tilde{Z}_{qj}^{(2)}(z_{qj}^{(2)}), \tilde{Y}_{rj}(y_{rj}), |g - E_k(x, z, y)| \} \quad (3)$$

که در آن $E_k(x, z, y)$ در مدل (۱) تعریف شده است و در این حالت متغیرهای x_{ij} ، $z_{qj}^{(2)}, z_{pj}^{(1)}$ و y_{rj} که با حروف کوچک نشان داده شده‌اند متغیرهای معین و مشخص می‌باشند. برای برش α حد بالا و پایین متغیرهای $\tilde{X}_{ij}^{(2)}, \tilde{Z}_{qj}^{(1)}, \tilde{Y}_{rj}$ به ترتیب

$(Z_{qj}^{(2)}) \quad [X_{qj}^{(2)L}] Z_{qk}^{(X)}, (Z_{pj}^{(1)}) \quad [X_{pj}^{(1)L}] Z_{pk}^{(U)}, (X_{ij}) \quad [(X_{ij})^L, (X_{ij})^U]$
 و $(Y_j) \quad [Y_j^L, Y_j^U]$ تعریف می‌کنیم. برای پیدا تابع عضویت \bar{E}_k ، کائو و لیو (۲۰۰۰، ۲۰۱۱) برنامه ریزی دو سطحی را پیشنهاد دادند. بر اساس روش آنها که مبتنی بر رابطه (۳) است، برای پیدا تابع عضویت \bar{E}_k ، کافی است حد بالا و پایین برش α تابع عضویت \bar{E}_k را از رابطه‌های زیر بدست آوریم:

$$\begin{aligned}
 (E_k)^U \quad & \max E_k(x, z, y) \\
 & (X_{ij})^L \quad x_{ij} \quad (X_{ij})^U \\
 & (Z_{pj}^{(1)})^L \quad z_{pj}^{(1)} \quad (Z_{pj}^{(1)})^U \\
 & (Z_{qj}^{(2)})^L \quad z_{qj}^{(2)} \quad (Z_{qj}^{(2)})^U \\
 & (Y_j)^L \quad y_j \quad (Y_j)^U \\
 & \forall i, p, q, j
 \end{aligned} \tag{۴}$$

$$\begin{aligned}
 (E_k)^L \quad & \min E_k(x, z, y) \\
 & (X_{ij})^L \quad x_{ij} \quad (X_{ij})^U \\
 & (Z_{pj}^{(1)})^L \quad z_{pj}^{(1)} \quad (Z_{pj}^{(1)})^U \\
 & (Z_{qj}^{(2)})^L \quad z_{qj}^{(2)} \quad (Z_{qj}^{(2)})^U \\
 & (Y_j)^L \quad y_j \quad (Y_j)^U \\
 & \forall i, p, q, j
 \end{aligned} \tag{۵}$$

مدل (۴) و (۵) مدل برنامه ریزی دو سطحی می‌باشند که تنها برای مدل سازی از آنها استفاده می‌شود. لذا برای حل مدل برنامه ریزی دو سطحی باید آنها به مدل برنامه ریزی یک سطحی تبدیل شوند. در این نوع مسائل ابتدا باید مقادیر متغیرهای x_{ij} ، $z_{pj}^{(1)}$ ، $z_{qj}^{(2)}$ و y_{rj} به نحوی تعیین گردد که سبب پیدا شدن حد بالا و پایین مسئله شود.

کران بالا

فرآیندی که موجب پیدا کردن مقدار متغیرهای x_{ij} ، $z_{pj}^{(1)}$ ، $z_{qj}^{(2)}$ و y_{rj} برای ماکزیمم کردن کارائی DMU واحد k ام و تبدیل مدل برنامه ریزی دو سطحی کران بالا به برنامه ریزی یک سطحی کران بالا می‌شود عبارت است از:

✓ جایگذاری بیشترین مقدار خروجی‌ها و کمترین مقدار ورودی‌های DMU k در مدل (۴)

✓ جایگذاری کمترین مقدار خروجی‌ها و بیشترین مقدار ورودی‌های بقیه DMU‌ها در مدل (۴)

با اعمال موارد فوق، مدل به علت متغیرهای میانی ($Z_{pj}^{(1)}$ و $Z_{qj}^{(2)}$) هنوز برنامه ریزی دو سطحی می‌باشد. برای تبدیل آن به برنامه ریزی یک سطحی باید کران‌های متغیرهای میانی ($Z_{pj}^{(1)}$ و $Z_{qj}^{(2)}$) را مشخص نمود. با جایگزینی کردن محدودیت $(Z_{pj}^{(1)})^L$ $z_{pj}^{(1)}$ $(Z_{pj}^{(1)})^U$ و $(Z_{qj}^{(2)})^L$ $z_{qj}^{(2)}$ $(Z_{qj}^{(2)})^U$ در داخل مدل (۴) داریم:

$$E_k \max_{r=1}^s u_r(Y_{rk})^U$$

s.t.:

$$\sum_{i=1}^m v_i(X_{ik})^L = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r(Y_{rk})^U - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ik})^L = 0,$$

$$\sum_{r=1}^s u_r(Y_{rj})^L - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ij})^U = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k$$

$$\sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pk}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ik})^L = 0, \quad (۶)$$

$$\sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pj}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ij})^U = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k$$

$$\sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qj}^{(2)} - \sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pj}^{(1)} = 0, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{r=1}^s u_r(Y_{rk})^U - \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qk}^{(2)} = 0,$$

$$\sum_{r=1}^s u_r(Y_{rj})^L - \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qj}^{(2)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k$$

$$\begin{aligned} (Z_{pj}^{(1)})^L &= z_{pj}^{(1)} - (Z_{pj}^{(1)})^U, & j &= 1, \dots, n, p = 1, \dots, P \\ (Z_{qj}^{(2)})^L &= z_{qj}^{(2)} - (Z_{qj}^{(2)})^U, & j &= 1, \dots, n, q = 1, \dots, Q \\ u_r, & i, w_p^{(1)}, w_q^{(2)}, & r &= 1, \dots, s, i = 1, \dots, m, p = 1, \dots, P, q = 1, \dots, Q, \end{aligned}$$

مدل به دلیل وجود جمله $w_q^{(2)}Z_{qj}^{(2)}$ و $w_p^{(1)}Z_{pj}^{(1)}$ یک مدل برنامه ریزی غیر خطی می باشد. نویسندگان مختلفی از جمله کائو و لیو (۲۰۱۱) از تغییر متغیر برای خطی سازی اینگونه مدلها استفاده کرده اند. برای تبدیل آن به مدل برنامه ریزی یک خطی فرض کنید که:

$$\begin{aligned} L_{pj}^{(1)} &= w_p^{(1)}Z_{pj}^{(1)} & j &= 1, \dots, n, p = 1, \dots, P \\ L_{qj}^{(2)} &= w_q^{(2)}Z_{qj}^{(2)} & j &= 1, \dots, n, q = 1, \dots, Q \end{aligned} \quad (V)$$

با جایگذاری عبارت (V) در مدل (۶) و تغییرات در محدودیت داریم:

$$\begin{aligned} E_k &= \max_{r=1}^s u_r(Y_{rk})^U \\ s.t.: & \\ & v_i(X_{ik})^L = 1 \\ & u_r(Y_{rk})^U - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ik})^L = 0, \\ & u_r(Y_{rj})^L - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ij})^U = 0, & j &= 1, \dots, n, j \neq k \\ & L_{pk}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ik})^L = 0, \\ & L_{pj}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i(X_{ij})^U = 0, & j &= 1, \dots, n, j \neq k \end{aligned} \quad (A)$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{q=1}^Q L_{qj}^{(2)} - \sum_{p=1}^P L_{pj}^{(1)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
 & \sum_{r=1}^s u_r (Y_{rk})^U - \sum_{q=1}^Q L_{qk}^{(2)} = 0, \\
 & \sum_{r=1}^s u_r (Y_{rj})^L - \sum_{q=1}^Q L_{qj}^{(2)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k \\
 & w_p^{(1)} (Z_{pj}^{(1)})^L - L_{pj}^{(1)} = w_p^{(1)} (Z_{pj}^{(1)})^U, \quad j = 1, \dots, n, p = 1, \dots, P \\
 & w_q^{(2)} (Z_{qj}^{(2)})^L - L_{qj}^{(2)} = w_q^{(2)} (Z_{qj}^{(2)})^U, \quad j = 1, \dots, n, q = 1, \dots, Q \\
 & u_r, v_i, w_p^{(t)}, \quad r = 1, \dots, s, i = 1, \dots, m, p = 1, \dots, q, t = 1, \dots, h-1,
 \end{aligned}$$

فرض کنید u_r^* , v_i^* ، $L_p^{*(1)}$ و $L_q^{*(2)}$ مقدارهای بهینه حاصل از مدل فوق می‌باشند. کارائی اجزا سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned}
 (E_k)^U &= \sum_{r=1}^s u_r^* (Y_{rk})^U \bigg/ \sum_{i=1}^m v_i^* (X_{ik})^L - (E_k)^U \sum_{p=1}^P L_{pk}^{*(1)} \bigg/ \sum_{i=1}^m v_i^* (X_{ik})^L \\
 (E_k)^U &= \sum_{q=1}^Q L_{qk}^{*(2)} \bigg/ \sum_{p=1}^P L_{pk}^{*(1)} - (E_k)^U \sum_{r=1}^s u_r^* (Y_{rk})^U \bigg/ \sum_{q=1}^Q L_{qk}^{*(2)} \quad (9)
 \end{aligned}$$

کران پایین

فرآیندی که موجب پیدا کردن مقدار متغیرهای x_{ij} و $z_{pj}^{(t)}$ برای ماکزیمم کردن کارائی DMU واحد k ام و تبدیل مدل برنامه ریزی دو سطحی کران پایین به برنامه ریزی یک سطحی می‌شود عبارت است از:

✓ جایگذاری بیشترین مقدار خروجی‌ها و کمترین مقدار ورودی‌های DMU k ام در مدل (۵)

✓ جایگذاری کمترین مقدار خروجی‌ها و بیشترین مقدار ورودی‌های بقیه DMUها در مدل (۵). با اعمال موارد فوق داریم:

$$\begin{aligned}
 E_k \quad & \max_{r=1}^s u_r (Y_{rk})^L \\
 \text{s.t.} \quad & \\
 & \sum_{i=1}^m v_i (X_{ik})^U = 1 \\
 & \sum_{r=1}^s u_r (Y_{rk})^L - \sum_{i=1}^m v_i (X_{ik})^U = 0, \\
 & \sum_{r=1}^s u_r (Y_{rj})^U - \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij})^L = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k \\
 & \sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pk}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i (X_{ik})^U = 0, \\
 (E_k)^L \quad & \min_{\substack{(Z_{pj}^{(1)})^L, (Z_{pj}^{(1)})^U, \\ (Z_{qj}^{(2)})^L, (Z_{qj}^{(2)})^U \\ \forall p, q, j}} \sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pj}^{(1)} - \sum_{i=1}^m v_i (X_{ij})^L = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k \\
 & \sum_{p=1}^P w_p^{(1)} Z_{pj}^{(1)} - \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qj}^{(2)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, \\
 & \sum_{r=1}^s u_r (Y_{rk})^L - \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qk}^{(2)} = 0, \\
 & \sum_{r=1}^s u_r (Y_{rj})^U - \sum_{q=1}^Q w_q^{(2)} Z_{qj}^{(2)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, j \neq k \\
 & u_r, v_i, w_p^{(1)}, w_q^{(2)}, \quad r = 1, \dots, s, \quad i = 1, \dots, m, \\
 & p = 1, \dots, q, \quad t = 1, \dots, h-1,
 \end{aligned} \tag{10}$$

با اعمال موارد فوق، مدل (۱۰) به علت متغیرهای میانی $(Z_{pj}^{(t)})$ هنوز برنامه ریزی دو سطحی می‌باشد. برای تبدیل آن به برنامه ریزی یک سطحی باید کران‌های متغیرهای میانی $(Z_{pj}^{(t)})$ را مشخص نمود. اما از آنجا که مسئله بیرونی مدل (۱۰) از نوع مینیمم کردن و مسئله داخلی از نوع ماکزیمم کردن می‌باشد نمی‌توان مثل کران بالا، محدودیت را وارد مدل کرد. لذا با استفاده از قضیه دوگان، دوگان مدل داخلی را می‌نویسیم تا هر دو مدل از نوع مینیمم شوند. با نوشتن دوگان مدل داخلی داریم:

$$\begin{aligned}
 (E_k)^L \min &= \left(\begin{matrix} m & s & P & Q \\ s_i^x & s_r^y & s_p^{z(1)} & s_q^{z(2)} \\ i=1 & r=1 & p=1 & q=1 \end{matrix} \right) \\
 & (X_{ik})^U - [\begin{matrix} n \\ k \end{matrix} (X_{ik})^U \begin{matrix} n \\ j=1, j \neq k \end{matrix} (X_{ij})^L] - [\begin{matrix} (1) \\ k \end{matrix} (X_{ik})^U \\
 & \begin{matrix} n \\ j=1, j \neq k \end{matrix} (X_{ij})^L] - s_i^x = 0 \quad i = 1, \dots, m \\
 & [\begin{matrix} (3) \\ k \end{matrix} (Y_{rk})^L \begin{matrix} n \\ j=1, j \neq k \end{matrix} (Y_{rj})^U] - [\begin{matrix} (3) \\ k \end{matrix} (Y_{rk})^L \\
 & \begin{matrix} n \\ j=1, j \neq k \end{matrix} (Y_{rj})^U] - (Y_{rk})^L - s_r^y = 0 \quad r = 1, \dots, s \quad (11) \\
 & \min_{\substack{(Z_{pj}^{(1)})^L, z_{pj}^{(1)}, (Z_{pj}^{(1)})^U \\ (Z_{qj}^{(2)})^L, z_{qj}^{(2)}, (Z_{qj}^{(2)})^U \\ \forall p, q, j}} \\
 & \begin{matrix} n \\ j=1 \end{matrix} (1) z_{pj}^{(1)} - \begin{matrix} n \\ j=1 \end{matrix} (2) z_{pj}^{(1)} - s_p^{z(1)} = 0 \quad p = 1, \dots, P, \\
 & \begin{matrix} n \\ j=1 \end{matrix} (2) z_{qj}^{(2)} - \begin{matrix} n \\ j=1 \end{matrix} (3) z_{qj}^{(2)} - s_q^{z(2)} = 0 \quad q = 1, \dots, Q, \\
 & \begin{matrix} j \\ j \end{matrix} (t) = 0, s_i^x, s_r^y, s_p^{z(1)}, s_q^{z(2)} = 0, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, 3 \\
 & i = 1, \dots, m; r = 1, \dots, s; p = 1, \dots, P; q = 1, \dots, Q
 \end{aligned}$$

در مدل (۱۱)، مسئله درونی و بیرونی هر دو از نوع مینیمم می‌باشند لذا می‌توان مدل برنامه ریزی سطحی را به یک مدل ریاضی یک سطحی به تبدیل کرد. مدل کران پایین برنامه ریزی یک سطحی مدل (۱۱) به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
 (E_k)^L \min &= \left(\begin{matrix} m & s & P & Q \\ s_i^x & s_r^y & s_p^{z(1)} & s_q^{z(2)} \\ i=1 & r=1 & p=1 & q=1 \end{matrix} \right) \\
 st : & \\
 & (X_{ik})^U - [\begin{matrix} n \\ k \end{matrix} (X_{ik})^U \begin{matrix} n \\ j=1, j \neq k \end{matrix} (X_{ij})^L] - [\begin{matrix} (1) \\ k \end{matrix} (X_{ik})^U \\
 & \begin{matrix} n \\ j=1, j \neq k \end{matrix} (X_{ij})^L] - s_i^x = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [\quad_k (Y_{rk})^L \quad_j (Y_{rj})^U] [\quad_k^{(3)} (Y_{rk})^L \quad_j^{(3)} (Y_{rj})^U] \\
 & - (Y_{rk})^L - s_r^y = 0 \quad r = 1, \dots, s \\
 & \quad_j^{(1)} z_{pj}^{(1)} - \quad_j^{(2)} z_{pj}^{(1)} - s_p^{z^{(1)}} = 0 \quad p = 1, \dots, P, \\
 & \quad_j^{(2)} z_{qj}^{(2)} - \quad_j^{(3)} z_{qj}^{(2)} - s_q^{z^{(2)}} = 0 \quad q = 1, \dots, Q, \\
 & (Z_{pj}^{(1)})^L \quad z_{pj}^{(1)} \quad (Z_{pj}^{(1)})^U \quad p = 1, \dots, q,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (Z_{qj}^{(2)})^L \quad z_{qj}^{(2)} \quad (Z_{qj}^{(2)})^U \quad q = 1, \dots, Q, \\
 & \quad_j^{(t)} = 0, s_i^x, s_r^y, s_p^{z^{(1)}}, s_q^{z^{(2)}} = 0, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, 3 \\
 & i = 1, \dots, m; r = 1, \dots, s; p = 1, \dots, P; q = 1, \dots, Q
 \end{aligned}$$

مدل (۱۲) به خاطر جمله $\quad_j^{(t)} z_{pj}^{(t)}$ غیر خطی می‌باشد. برای خطی کردن آن یک متغیر جدید به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{aligned}
 M_{pj}^{(1)} & \quad_j^{(1)} z_{pj}^{(1)}, \hat{M}_{pj}^{(1)} \quad_j^{(2)} z_{pj}^{(1)}, p = 1, \dots, P; j = 1, \dots, n \\
 M_{qj}^{(2)} & \quad_j^{(2)} z_{qj}^{(2)}, \hat{M}_{qj}^{(2)} \quad_j^{(3)} z_{qj}^{(2)}, q = 1, \dots, Q; j = 1, \dots, n
 \end{aligned} \quad (13)$$

هر جمله محدودیت $(Z_{pj}^{(1)})^L \quad z_{pj}^{(1)} \quad (Z_{pj}^{(1)})^U$ را یکبار در $\quad_j^{(1)}$ و بار دیگر در $\quad_j^{(2)}$ ضرب می‌کنیم. به همین ترتیب هر جمله محدودیت $(Z_{qj}^{(2)})^L \quad z_{qj}^{(2)} \quad (Z_{qj}^{(2)})^U$ را یکبار در $\quad_j^{(2)}$ و بار دیگر در $\quad_j^{(3)}$ ضرب می‌کنیم سپس رابطه (۱۳) را در مدل (۱۲) جایگزین می‌کنیم، داریم:

$$(E_k)^L \quad \min - \left(\quad_i^m s_i^x \quad_r^s s_r^y \quad_p^P s_p^{z^{(1)}} \quad_q^Q s_q^{z^{(2)}} \right) \quad (14)$$

st :

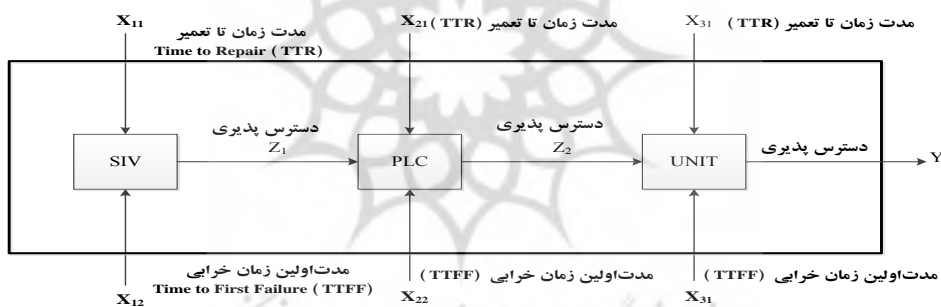
$$\begin{aligned}
 & (X_{ik})^U - [\sum_{j=1, j \neq k}^n (X_{ij})^L] - [\sum_{k=1}^n (X_{ik})^U \\
 & \sum_{j=1, j \neq k}^n (X_{ij})^L] - s_i^x = 0 \quad i = 1, \dots, m \\
 & [\sum_{j=1, j \neq k}^n (Y_{rk})^L \sum_{j=1, j \neq k}^n (Y_{rj})^U] [\sum_{k=1}^n (Y_{rk})^L \sum_{j=1, j \neq k}^n (Y_{rj})^U] \\
 & - (Y_{rk})^L - s_r^y = 0 \quad r = 1, \dots, s \\
 & \sum_{j=1}^n M_{pj}^{(1)} - \sum_{j=1}^n \hat{M}_{pj}^{(1)} - s_p^{z(1)} = 0 \quad p = 1, \dots, P, \\
 & \sum_{j=1}^n M_{qj}^{(2)} - \sum_{j=1}^n \hat{M}_{qj}^{(2)} - s_q^{z(2)} = 0 \quad q = 1, \dots, Q, \\
 & \sum_j (Z_{pj}^{(1)})^L M_j^{(1)} - \sum_j (Z_{pj}^{(1)})^U M_j^{(1)} = 0 \quad p = 1, \dots, P, \\
 & \sum_j (Z_{pj}^{(1)})^L \hat{M}_j^{(1)} - \sum_j (Z_{pj}^{(2)})^U M_j^{(1)} = 0 \quad p = 1, \dots, P, \\
 & \sum_j (Z_{qj}^{(2)})^L M_{qj}^{(2)} - \sum_j (Z_{qj}^{(2)})^U M_{qj}^{(2)} = 0 \quad q = 1, \dots, Q, \\
 & \sum_j (Z_{qj}^{(2)})^L \hat{M}_{qj}^{(2)} - \sum_j (Z_{qj}^{(2)})^U M_{qj}^{(2)} = 0 \quad q = 1, \dots, Q, \\
 & \sum_j (t) s_j^x, s_r^y, s_p^{z(1)}, s_q^{z(2)} = 0, \quad j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, 3 \\
 & i = 1, \dots, m; r = 1, \dots, s; p = 1, \dots, P; q = 1, \dots, Q
 \end{aligned}$$

کارائی اجزا کران پایین از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned}
 (E_k)^L &= \sum_{r=1}^s u_r^* (Y_{rk})^L \Big/ \sum_{i=1}^m v_i^* (X_{ik})^U & (E_k^2)^L &= \sum_{q=1}^Q w_q^{*(2)} z_{qk}^{*(2)} \Big/ \sum_{p=1}^p w_p^{*(1)} z_{pk}^{*(1)} \\
 (E_k^1)^L &= \sum_{p=1}^P w_p^{*(1)} z_{pk}^{*(1)} \Big/ \sum_{i=1}^m v_i^* (X_{ik})^U & (E_k^3)^L &= \sum_{r=1}^s u_r^* (Y_{rk})^L \Big/ \sum_{q=1}^Q w_q^{*(2)} z_{qk}^{*(2)}
 \end{aligned} \tag{15}$$

شناخت مسئله

سیستم تهویه مترو تهران که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است شامل مجموعه‌ای از مبدل از مبدل استاتیک^۱ (SIV)، باکس کنترلی^۲ (PLC) و یونیت می‌باشد. مبدل استاتیک و باکس کنترلی در داخل جعبه‌های فلزی در زیر واگن‌ها تعبیه شده‌اند. یونیت‌ها روی سقف داخلی واگن‌ها استقرار یافته‌اند. نرخ خرابی زیر سیستم‌ها و نحوه ارتباط زیر سیستم‌ها به صورت شکل سری می‌باشد. اتصال سری اجزاء به یکدیگر، عملکرد هر زیر سیستم این مجموعه را به یک مؤلفه بحرانی تبدیل ساخته است. به عبارت دیگر کارایی این سیستم و ارزیابی میزان در دسترس بودن آن به کارایی بالای همه اجزاء آن وابسته می‌باشد. شکل ۵ واحد تصمیم‌گیری که کل سیستم تهویه و ارتباط بین زیر سیستم‌های اصلی و ورودی و خروجی‌های آن را نشان می‌دهد.



شکل ۵: ساختار شبکه سیستم تهویه

تبیین روایی شاخص‌ها

شاخص‌های کلیدی عملکرد را می‌توان به دو دسته کلی شاخص‌های کلیدی عملکرد قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری و نگهداشت پذیری تجهیزات و شاخص‌های کلیدی عملکرد هزینه تقسیم کرد. برخی از مهمترین شاخص‌های عملکرد تجهیزات در جدول زیر آمده است (دو^۳،

(۲۰۰۸):

¹ Static Converter

² programmable logic controller

³ Du

جدول ۵: شاخص‌های ارزیابی عملکرد تجهیزات

توضیحات	واحد	سنجه‌ها/شاخص‌ها
تعداد خرابی در واحد زمان (سنجه ای از قابلیت اطمینان)	No./Unit Time	فرکانس خرابی
متوسط زمان بین خرابی‌ها (سنجه ای از قابلیت اطمینان)	Hours	MTBF
زمان فعال + زمان از کار افتادگی / زمان فعال	%	دسترس پذیری
دسترس پذیری × نرخ عملکرد × نرخ کیفیت	%	اثر بخشی کلی تجهیزات

یکی از مهمترین شاخصه‌های عملکرد سیستم‌های تعمیر پذیر چه به لحاظ طراحی و چه از نظر عملیاتی قابلیت اطمینان و دسترس پذیری سیستم است. بهبود قابلیت اطمینان و دسترس پذیری موضوع حجم وسیعی از تحقیقات بوده و تعداد زیادی از مقالات در این حوزه منتشر شده است. دسترس پذیری و قابلیت اطمینان ارزیابی‌های مناسبی از عملکرد سیستم را ارائه می‌دهند. ارزش این شاخص‌ها به عوامل متعددی از جمله ساختار سیستم وابسته است و با افزایش عمر قطعات کاهش می‌یابند. به عنوان مثال طول زمان سرویس دهی از تعاملات قطعات و اجزا سیستم با هم، سیاست‌های نگهداری و تعمیرات اعمال شده و شرایط محیطی متأثر می‌شود. الزامات اصلی برای عملکرد سیستم‌های پیچیده معمولاً بر حسب هزینه، دسترس پذیری و یا قابلیت اطمینان و یا به شکل معادل بر حسب متوسط زمان عملیاتی یا متوسط زمان از کار افتادگی تحت یک محدودیت هزینه بیان می‌شود (بارابادی^۱ و کومار^۲، ۲۰۰۷).

درک اهمیت دسترس پذیری تجهیزات در موفقیت کسب و کار در زمینه‌های مختلف تولیدی و خدماتی بسیار ارزشمند است. لذا در این پژوهش جهت ارزیابی عملکرد سیستم‌های تهویه رویکرد تحلیل دسترس‌پذیری را بر گزیده ایم چرا که علاوه بر تعیین مدت

¹ Barabady² Kumar

زمان در دسترس بودن سیستم‌های تهویه در طول مدت بهره برداری امکان انجام تحلیل‌های بیشتر در خصوص قابلیت اطمینان ذاتی تجهیز، توان پاسخ‌گویی کارگاه تعمیراتی، میزان نیاز به قطعات یدکی و استخدام پرسنل تعمیراتی مورد نیاز قابل انجام می‌باشد. همانگونه که اشاره شد سیستم تهویه قطارهای DC سیستمی بحرانی تلقی می‌گردد. عملکرد بالای این بخش از طریق قطعاتی با قابلیت اطمینان بالا و نگهداری و تعمیرات مناسب قابل دستیابی است. یکی از شاخصه‌هایی که به شکل گسترده در ارزیابی عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، دسترس پذیری است که تابعی از قابلیت اطمینان و نگهداشت پذیری است. در حقیقت این شاخص نسبت زمان فعال تجهیز به کل زمان بهره برداری از آن می‌باشد (راج^۱ و همکاران، ۲۰۰۰).

بررسی ارتباطات درونی واحد تصمیم‌گیری

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان از شاخص اولین زمان خرابی، برای نگهداشت پذیری از شاخص مدت زمان تا تعمیر خواهیم کرد. همان‌طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است در زیر سیستم SIV، شاخص مدت زمان تا تعمیر (X_{11}) و شاخص اولین زمان خرابی (X_{12}) ورودی‌های سیستم و دسترس پذیری (Z_1) خروجی سیستم می‌باشد. در زیر سیستم PLC، شاخص مدت زمان تا تعمیر (X_{21})، شاخص اولین زمان خرابی (X_{22}) و دسترس پذیری (Z_1) ورودی‌های زیر سیستم بوده و خروجی زیر سیستم دسترس پذیری (Z_2) می‌باشد. در زیر سیستم UNIT، شاخص مدت زمان تا تعمیر (X_{31}) و شاخص اولین زمان خرابی (X_{32}) و دسترس پذیری (Z_2) ورودی‌های زیر سیستم و خروجی آن که برابر خروجی سیستم نیز می‌باشد دسترس پذیری UNIT (Y) می‌باشد. دلیل چنین پیکربندی برای مدل‌سازی درونی واحد تصمیم‌گیری در ماهیت سری بودن سیستم نهفته است. در زیر سیستم SIV شاخص مدت زمان تا خرابی و شاخص مدت زمان تعمیر ورودی‌های زیر سیستم می‌باشد که معیاری جهت تعیین دسترس پذیری این زیرسیستم می‌باشد. بدیهی است به عنوان مثال پایین بودن دسترس پذیری SIV سبب تنزل عملکردی زیر سیستم بعدی (PLC) است

¹ Raje

لذا این شاخص به عنوان شاخص ورودی PLC در نظر گرفته شده است. در این پژوهش ارزیابی دسترس پذیری سیستم تهویه بدون در نظر گرفتن خرابی‌های دوران نوزادی و یا خرابی‌هایی که عموماً در زمان آغاز بهره‌برداری از سیستم‌ها خود را نشان می‌دهند، انجام گرفته است. مرجع اطلاعات جمع‌آوری شده برای این تحقیق حکم کارهای نگهداری و تعمیرات در خصوص اقدامات پیشگیرانه یا اضطراری از نیمه دوم سال ۱۳۸۵ تا انتهای سال ۱۳۸۸ می‌باشد. در خصوص مواردی که رکوردی در شرکت وجود نداشته از نظر خبرگان شرکت استفاده شده و مراحل آماده‌سازی اطلاعات و تحلیل‌ها نیز در این تحقیق به تایید خبرگان شرکت رسیده است. از جمله مهمترین موانع انجام پژوهش‌هایی از این دست نحوه مدیریت داده‌های میدانی است به عنوان مثال داده‌های سانسور شده است، به این معنی که به سبب قابلیت اطمینان بالای تجهیزات استفاده شده در صنعت مترو مشاهده خرابی همه واحد‌های مشابه در طول بازه پایش سیستم مقدور نیست و قاعدتاً جهت انجام محاسبات می‌بایست اصول کار با داده‌های سانسور شده را مدنظر داشت که در طول این پژوهش مورد توجه قرار گرفت و البته به سبب عدم وجود مجال کافی جهت بحث و بررسی پیرامون آن کمتر مورد توجه قرار گرفت. سایر چالش‌های کار با داده‌های میدانی از جمله فقدان وجود داده در برخی از زمینه‌ها، خطاهای اندازه‌گیری و ثبت و... درخور تأمل و توجه است. نکته مهم و البته بسیار مهم در انجام پژوهش‌هایی از این دست وجود بانک اطلاعاتی از تجهیزات است که البته هوشمندانه و در جهت انجام تحلیل‌های مورد نظر شکل گرفته باشند. متخصصان امر اذعان دارند که انجام تحلیل‌های مبتنی بر قابلیت اطمینان نیازمند در دسترس بودن داده‌های میدانی متناسب است که کمتر در کشور ما مورد توجه بوده است. چالش عمده‌ای که در این پژوهش فرارویی پژوهشگران بوده احصاء اطلاعات ضروری از میان حکم کارهای روزانه نگهداری و تعمیرات بود که البته گاهی با بی‌دقتی توسط اپراتورها و یا پرسنل تعمیراتی تکمیل شده بود. علی‌رغم همکاری صمیمانه مدیریت شرکت واکنش‌های سازنده پارس در این زمینه جمع‌آوری داده‌های میدانی چالش عمده این پژوهش بود. مقادیر شاخص‌ها از رویکرد زیر محاسبه شده است:

- ۱) شاخص مدت زمان تا خرابی (TTF) ما به تفاوت تاریخ رویدادن اولین خرابی تا تاریخ شروع بهره برداری بر حسب روز می‌باشد. شایان ذکر است TTFها از زمان‌های مربوط به تعمیرات اضطراری استخراج شده اند و کلیه توقفات واسطه انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی در نظر گرفته نشده‌اند.
- ۲) شاخص مدت زمان تا تعمیر (TTR) را مدت زمان طول کشیدن اولین تعمیر تجهیز بر حسب دقیقه قرار داده ایم. TTR شامل زمان مورد نیاز جهت تشخیص خرابی و عیب یابی، زمان مورد نیاز جهت تامین قطعه و تجهیزات و در نهایت زمان تعمیر است.
- ۳) جهت استخراج شاخص دسترس پذیری از داده‌ها، مدت زمان کار کردن دستگاه را از مجموع خرابی‌های اضطراری و پیشگیرانه کم کرده و سپس عدد حاصل را بر زمان کارکرد دستگاه تقسیم نموده ایم.

جدول ۶: داده‌های شاخص‌ها

P	SIV			PLC			UNIT		
	DMU	TTF	TTR	Availability	TTF	TTR	Availability	TTF	TTR
۱۰۱	۴۹۲	۱۲۰	۰/۹۹۶۰۲۲	۸۳۷	۱۸۰	۰/۹۹۶۶۹۲	۷۵۷	۱۶۵	۰/۹۹۸۳۸۶
۱۰۲	۴۹۵	۱۹۰	۰/۹۹۷۵۱	۸۲۹	۶۰	۰/۹۹۷۵۷۳	۸۲۹	۱۰۰	۰/۹۹۹۳۷۶
۱۰۳	۹۳۶	۶۳۰	۰/۹۹۷۸۸	۸۶۴	۱۳۰	۰/۹۹۸۰۲۲	۸۹۱	۱۰۰	۰/۹۹۸۹۴۳
۱۰۴	۶۰۱	۱۹۰	۰/۹۹۸۹۰۲	۱۱۰۵/۵	۱۳۵	۰/۹۹۹۱۲۶	۹۵۶	۶۰	۰/۹۹۸۷۹۱
۱۰۵	۹۴۹	۱۸۰	۰/۹۹۷۷۷۷	۹۴۹	۱۸۰	۰/۹۹۶۸۱۷	۱۰۵۹/۵	۱۱۲/۵	۰/۹۹۸۹۴۹
۱۰۶	۱۰۸۲	۶۰	۰/۹۹۷۲۵۲	۱۱۰۵/۵	۱۰۰	۰/۹۹۷۷۵۸	۱۳۸۲	۱۰۰	۰/۹۹۹۳۱۲
۱۰۷	۱۲۵۹	۴۵	۰/۹۹۸۱۵۷	۸۴۲/۵	۳۶۰	۰/۹۹۸۱۳۲	۲۲۸	۶۰۰	۰/۹۹۸۵۷۴
۱۰۸	۱۲۰۱	۷۵	۰/۹۹۷۹۳۱	۱۲۰۱	۷۵	۰/۹۹۷۸۰۳	۷۴۶	۲۶۰	۰/۹۹۸۶۸۱
۱۰۹	۱۱۹۱	۱۲۰	۰/۹۹۸۱۴	۱۱۹۱	۱۰۰	۰/۹۹۸۱۲۱۲	۱۱۹۱	۱۰۰	۰/۹۹۸۸۴۷
۱۱۰	۱۰۸۲	۱۹۵	۰/۹۹۸۸۷۴	۱۱۰۵/۵	۱۳۵	۰/۹۹۸۱۱۶	۱۰۵۳	۱۵۰	۰/۹۹۸۰۴۲
۱۱۱	۶۸۵	۱۲۰	۰/۹۹۹۵۴۶	۱۱۰۲	۱۰۰	۰/۹۹۹۶۴۹	۱۰۵۷	۳۰۰	۰/۹۹۸۸۲۳
۱۱۲	۱۰۷۴	۳۰	۰/۹۹۸۱۴	۱۱۰۵/۵	۱۳۵	۰/۹۹۸۱۴۸۷	۱۰۵۹/۵	۱۱۲/۵	۰/۹۹۸۵۲۳
۱۱۳	۱۰۸۷	۹۰	۰/۹۹۷۴۲۲	۱۱۵۳	۹۷/۵	۰/۹۹۷۸۲۶	۷۳۷	۱۰۰	۰/۹۹۸۹۷۱
۱۱۴	۱۰۹۲	۴۲۰	۰/۹۹۹۱۱۸	۱۱۵۳	۹۷/۵	۰/۹۹۹۱۷۵	۳۰۱	۴۲۰	۰/۹۹۸۷۲۳
۱۱۷	۱۳۱۶	۶۳۰	۰/۹۹۶۲۷۳	۱۱۵۳	۹۷/۵	۰/۹۹۶۷۳۲	۷۴۶	۲۶۰	۰/۹۹۹۰۷۱
۱۱۸	۷۷۴	۲۷۰	۰/۹۹۶۳۱	۱۱۵۳	۹۷/۵	۰/۹۹۷۲۲۴	۷۴۶	۲۶	۰/۹۹۷۵۱۵
۱۱۹	۱۲۵۷	۱۸۰	۰/۹۹۹۴۷۶	۱۲۰۴	۴۵	۰/۹۹۹۳۵۷	۷۴۶	۲۶	۰/۹۹۹۵۷۹
۱۲۰	۱۱۱۰	۶۰	۰/۹۹۷۷۰۸	۱۱۵۳	۹۷/۵	۰/۹۹۷۸۲۵	۷۴۶	۲۶	۰/۹۹۸۵

۲۰۱	۵۲۷	۱۵۰	۰/۹۹۳۹۱۶	۳۷۸	۱۲۰	۰/۹۹۴۲۹۳	۳۱۳	۲۶	۰/۹۹۶۰۱۸
۲۰۳	۸۲۱	۳۱۷/۵	۰/۹۹۷۰۷۵	۸۲۱	۱۳۵	۰/۹۹۷۳۱۲	۱۱۸۴	۶۰	۰/۹۹۸۴۷۴
۲۰۴	۹۳۶	۱۲۰	۰/۹۹۵۵۴۶	۵۳۱	۶۱۵	۰/۹۹۶۰۱	۹۴۲	۲۱۰	۰/۹۹۸۶۳۹
۲۰۵	۱۳۹۲	۱۲۰	۰/۹۹۸۲۷۴	۸۶۸	۱۲۰	۰/۹۹۸۰۵۷	۱۳۳۴	۲۴۰	۰/۹۹۸۲۴۲
۲۰۷	۱۶۱۷	۶۰۰	۰/۹۹۹۳۵۹	۸۴۲/۵	۳۶۰	۰/۹۹۹۵۸۶	۱۰۶۳	۵۱۰	۰/۹۹۸۸۱۱
۲۰۸	۱۵۵۰	۹۰	۰/۹۹۸۹۱	۸۴۲/۵	۳۶۰	۰/۹۹۸۶۰۲	۱۰۲۸	۱۵۰	۰/۹۹۸۲۷۸
۲۰۹	۱۰۶۲	۵۴۰	۰/۹۹۷۹۳۲	۸۴۲/۵	۴۸۰	۰/۹۹۷۸۱۵	۴۱۷	۶۰	۰/۹۹۸۵۱۱
۲۱۱	۱۱۲۳	۱۲۰	۰/۹۹۸۵۳۸	۸۴۲/۵	۳۶۰	۰/۹۹۸۳۶۷	۸۶۲/۵	۳۲۲/۵	۰/۹۹۹۱۷۴
۲۱۲	۴۸۱	۶۰	۰/۹۹۶۲۲۲	۸۴۲/۵	۳۶۱	۰/۹۹۸۷۳۹	۴	۲۷۰	۰/۹۹۶۶۷۹
۲۱۳	۴۹۲	۳۰	۰/۹۹۴۱۲۴	۸۴۲/۵	۳۶۲	۰/۹۹۸۵۵۹	۴۹۲	۳۰	۰/۹۹۸۴۷۶
۲۱۵	۴۴۱	۱۲۰	۰/۹۹۵۴۷۹	۸۴۲/۵	۳۶۳	۰/۹۹۸۷۷۵	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۷۱۸۶
۲۱۶	۵۱۸	۲۱۰	۰/۹۹۴۳۴۴	۸۴۲/۵	۳۶۴	۰/۹۹۹۴۸۱	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۸۷۳۷
۲۱۷	۵۶۲	۷۵	۰/۹۹۵۰۲۵	۸۴۲/۵	۳۶۵	۰/۹۹۷۷۳۴	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۸۰۹۱
۲۱۸	۴۱۸	۵۵	۰/۹۹۵۴۱۸	۸۴۲/۵	۳۶۶	۰/۹۹۹۶۹۱	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۹۴۵۳
۲۱۹	۵۶۷	۱۵۰	۰/۹۹۴۸۹۶	۸۴۲/۵	۳۶۷	۰/۹۹۸۸۷۲	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۸۴۵۵
۲۲۱	۲۴۴	۳۰	۰/۹۹۸۰۹۹	۸۴۲/۵	۳۶۸	۰/۹۹۹۹۲۲	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۹۷۶۷
۲۲۲	۴۶۵	۲۴۰	۰/۹۹۸۰۹۱	۸۴۲/۵	۳۶۹	۰/۹۹۹۲۶۵	۳۷۷	۵۵	۰/۹۹۹۷۸۴

نتایج

کران بالا و پایین سیستم تهویه به ترتیب با اعمال مدل (۸) و (۱۲)، محاسبه می‌گردد. جدول ۷ مقادیر کارائی سیستم تهویه و زیر سیستم‌های آن را برای مقادیر مختلف آلفا نشان می‌دهد. در این جدول، S بیانگر کارائی سیستم تهویه، P_1 تا P_3 هم به ترتیب بیانگر کارائی SIV، PLC و UNITها می‌باشد.

جدول ۷: کارایی سیستم تهویه و اعضا برای آلفاهای مختلف

DM U	پارام تر عضو	$\alpha=0$		$\alpha=0.5$		$\alpha=0.8$		$\alpha=1$	
		پایین	بالا	پایین	بالا	پایین	بالا	پایین	بالا
۱۰۱	S	۰/۲۷۹۵	۱/۰۰۰۰	۰/۵۱۷۴	۰/۹۹۱۷	۰/۷۲۸۸	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۱۳	۰/۹۹۱۳
	P_1	۰/۲۲۳۳	۱/۰۰۰۰	۰/۵۲۷۴	۱/۰۰۰۰	۰/۷۳۶۱	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
	P_2	۰/۲۸۶۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۱۹	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۰۵	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۵۱
	P_3	۰/۹۵۴۵	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۳۲	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۲۱	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۱
۱۰۲	S	۰/۲۷۹۶	۱/۰۰۰۰	۰/۵۵۴۷	۰/۹۹۸۸	۰/۸۳۵۰	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۵۷	۰/۹۹۵۷
	P_1	۰/۲۲۲۶	۱/۰۰۰۰	۰/۴۲۱۱	۱/۰۰۰۰	۰/۶۲۵۹	۱/۰۰۰۰	۰/۸۹۴۸	۰/۸۹۴۸
	P_2	۰/۲۸۶۷	۱/۰۰۰۰	۰/۵۶۵۱	۱/۰۰۰۰	۰/۸۴۲۴	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
	P_3	۰/۹۵۴۵	۱/۰۰۰۰	۰/۹۷۹۳	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۳۲	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۶۴	۰/۹۹۶۴
۱۰۳	S	۰/۲۷۹۵	۱/۰۰۰۰	۰/۴۶۳۹	۰/۹۹۸۰	۰/۵۸۹۷	۰/۹۹۱۵	۰/۶۸۹۹	۰/۶۸۹۹
	P_1	۰/۲۲۲۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۱۷۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۹۳	۰/۶۵۸۹	۰/۳۹۱۵	۰/۳۹۱۵
	P_2	۰/۲۸۶۷	۱/۰۰۰۰	۰/۴۷۴۲	۱/۰۰۰۰	۰/۵۹۸۹	۱/۰۰۰۰	۰/۶۹۸۶	۰/۶۹۸۶
	P_3	۰/۹۵۴۵	۱/۰۰۰۰	۰/۹۷۵۱	۰/۹۹۸۰	۰/۹۸۸۲	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۲۷	۰/۹۹۲۷

۰/۹۸۵۷	۰/۹۸۵۷	۰/۹۹۴۰	۰/۶۹۵۶	۰/۹۹۷۳	۰/۵۵۹۴	۱/۰۰۰۰	۰/۳۳۸۹	S	۱۰۴
۰/۷۷۵۹	۰/۷۷۵۹	۱/۰۰۰۰	۰/۶۵۷۴	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۱۶	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۵۵	P _۱	
۰/۶۰۰۹	۰/۶۰۰۹	۰/۹۹۸۹	۰/۶۲۹۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۰۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۳۲	P _r	
۰/۹۹۴۸	۰/۹۹۴۸	۰/۹۹۵۱	۰/۷۰۶۳	۰/۹۹۷۳	۰/۹۷۸۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۱۰	P _r	
۰/۵۹۷۸	۰/۵۹۷۸	۰/۹۷۹۰	۰/۴۹۸۵	۰/۹۹۷۷	۰/۴۱۸۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۷۹۷	S	۱۰۵
۰/۶۰۱۰	۰/۶۰۱۰	۰/۹۸۵۰	۰/۴۵۹۷	۱/۰۰۰۰	۰/۳۶۸۷	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۹۵	P _۱	
۰/۹۸۱۸	۰/۹۸۱۸	۰/۹۹۸۳	۰/۵۰۳۸	۱/۰۰۰۰	۰/۴۲۶۲	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۷۴	P _r	
۰/۹۸۹۸	۰/۹۸۹۸	۰/۹۹۵۲	۰/۹۸۴۷	۰/۹۹۷۷	۰/۹۷۲۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۳۲	P _r	
۰/۸۵۱۸	۰/۸۵۱۸	۰/۹۹۵۲	۰/۶۶۰۰	۰/۹۹۵۸	۰/۴۷۹۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۰۷	S	۱۰۶
۰/۸۶۲۱	۰/۸۶۲۱	۱/۰۰۰۰	۰/۶۶۷۸	۱/۰۰۰۰	۰/۴۶۴۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۱۳	P _۱	
۰/۹۹۳۵	۰/۹۹۳۵	۰/۹۹۹۷	۰/۹۸۵۵	۱/۰۰۰۰	۰/۴۸۹۹	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۶۹	P _r	
۰/۹۸۹۱	۰/۹۸۹۱	۰/۹۹۲۸	۰/۹۸۴۰	۰/۹۹۵۸	۰/۹۷۵۱	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۴۰	P _r	
۰/۹۹۰۲	۰/۹۹۰۲	۰/۹۹۹۳	۰/۶۰۶۶	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۵۹	۱/۰۰۰۰	۰/۲۷۹۷	S	۱۰۷
۰/۸۱۸۰	۰/۸۱۸۰	۱/۰۰۰۰	۰/۴۸۰۴	۱/۰۰۰۰	۰/۳۱۰۴	۱/۰۰۰۰	۰/۱۹۰۴	P _۱	
۰/۷۱۵۳	۰/۷۱۵۳	۰/۹۹۹۳	۰/۶۵۳۴	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۴۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۰۱	P _r	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۶۲۰۱	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۵۲	۱/۰۰۰۰	۰/۹۳۵۶	P _r	
۰/۷۵۴۰	۰/۷۵۴۰	۰/۹۹۶۷	۰/۶۷۲۶	۰/۹۹۹۹	۰/۵۸۷۴	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۳	S	۱۰۸
۰/۷۵۲۲	۰/۷۵۲۲	۱/۰۰۰۰	۰/۴۱۹۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۸۴	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۶۳	P _۱	
۰/۷۶۰۲	۰/۷۶۰۲	۱/۰۰۰۰	۰/۶۸۲۸	۱/۰۰۰۰	۰/۶۰۰۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۹۴	P _r	
۰/۹۹۲۷	۰/۹۹۲۷	۰/۹۹۶۷	۰/۹۸۹۱	۰/۹۹۹۹	۰/۹۸۰۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۰	P _r	
۰/۶۵۵۵	۰/۶۵۵۵	۰/۹۳۴۹	۰/۶۱۷۹	۰/۹۹۸۴	۰/۵۵۳۳	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۳	S	۱۰۹

۰/۶۴۵۴	۰/۶۴۵۴	۰/۹۴۰۵	۰/۴۱۱۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۴۱	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۶۳	P _۱	
۰/۶۶۳۹	۰/۶۶۳۹	۰/۹۹۷۹	۰/۶۲۸۶	۱/۰۰۰۰	۰/۵۶۵۰	۱/۰۰۰۰	۰/۳۱۹۴	P _۲	
۰/۹۸۷۶	۰/۹۸۷۶	۰/۹۹۴۰	۰/۹۸۴۴	۰/۹۹۸۴	۰/۹۸۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۰	P _۳	
۰/۶۰۰۳	۰/۶۰۰۳	۰/۸۱۲۶	۰/۵۳۷۴	۰/۹۹۶۴	۰/۴۴۵۴	۱/۰۰۰۰	۰/۲۷۹۵	S	۱۱۰
۰/۵۴۲۵	۰/۵۴۲۵	۰/۸۸۱۲	۰/۴۱۸۰	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۵۶	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۲۶	P _۱	
۰/۶۰۹۹	۰/۶۰۹۹	۰/۹۹۷۷	۰/۵۴۵۷	۱/۰۰۰۰	۰/۴۵۴۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۶۹	P _۲	
۰/۹۸۷۱	۰/۹۸۷۱	۰/۹۹۲۷	۰/۹۸۳۲	۰/۹۹۶۴	۰/۹۷۳۹	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۴۰	P _۳	
۰/۸۵۸۵	۰/۸۵۸۵	۰/۹۹۱۶	۰/۶۴۰۳	۰/۹۹۷۳	۰/۵۶۲۳	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۳	S	۱۱۱
۰/۸۷۰۶	۰/۸۷۰۶	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۱۹	۱/۰۰۰۰	۰/۴۰۷۴	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۵۶	P _۱	
۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۹۱	۰/۶۴۹۹	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۳۶	۱/۰۰۰۰	۰/۳۹۰۷	P _۲	
۰/۹۸۷۹	۰/۹۸۷۹	۰/۹۹۲۵	۰/۹۸۳۰	۰/۹۹۷۳	۰/۹۷۸۱	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۱۳	P _۳	
۰/۹۸۴۶	۰/۹۸۴۶	۰/۹۹۲۶	۰/۹۴۳۳	۰/۹۹۶۶	۰/۶۳۰۳	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۶۰	S	۱۱۲
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۲۰	۱/۰۰۰۰	۰/۶۴۴۴	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۲۹	P _۱	
۰/۹۹۲۳	۰/۹۹۲۳	۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۰۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۲۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۳۰	P _۲	
۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۴۱	۰/۹۹۰۱	۰/۹۹۶۶	۰/۹۸۰۲	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۲۵	P _۳	
۰/۷۵۷۲	۰/۷۵۷۲	۰/۹۶۴۲	۰/۶۳۴۱	۱/۰۰۰۰	۰/۵۶۰۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۵	S	۱۱۳
۰/۷۵۹۸	۰/۷۵۹۸	۰/۹۶۵۷	۰/۴۴۶۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۶۲۶	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۹۱	P _۱	
۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۹۶	۰/۶۴۲۰	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۱۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۱۹۴	P _۲	
۰/۹۹۵۶	۰/۹۹۵۶	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۱۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۱۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۰	P _۳	
۰/۹۰۳۳	۰/۹۰۳۳	۰/۹۱۴۷	۰/۶۳۳۵	۰/۹۹۷۵	۰/۵۵۹۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۵	S	۱۱۴
۰/۴۰۶۰	۰/۴۰۶۰	۰/۶۲۱۰	۰/۳۷۱۹	۰/۸۰۹۳	۰/۳۲۷۹	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۹۱	P _۱	

۰/۷۵۸۱	۰/۷۵۸۱	۰/۹۲۰۴	۰/۶۴۳۱	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۲۲	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۹۴	P _r	۱۱۷
۰/۹۱۷۰	۰/۹۱۷۰	۰/۹۹۷۵	۰/۹۸۹۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۷۸۵	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۰	P _r	
۰/۶۷۰۲	۰/۶۷۰۲	۰/۹۱۰۱	۰/۶۳۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۵۵۸۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۳	S	
۰/۳۱۴۶	۰/۳۱۴۶	۰/۵۴۲۱	۰/۳۰۴۰	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۸۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۶۴	P _i	
۰/۶۸۰۴	۰/۶۸۰۴	۰/۹۱۸۶	۰/۶۴۱۹	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۱۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۹۴	P _r	
۰/۹۹۳۴	۰/۹۹۳۴	۰/۹۹۷۵	۰/۹۸۹۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۰۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۰	P _r	
۰/۶۷۵۳	۰/۶۷۵۳	۰/۹۶۲۵	۰/۶۳۳۹	۰/۹۹۹۶	۰/۵۶۰۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۷	S	۱۱۸
۰/۵۸۶۴	۰/۵۸۶۴	۰/۹۶۵۸	۰/۴۸۹۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۶۲	۱/۰۰۰۰	۰/۲۳۶۳	P _i	
۰/۶۸۰۷	۰/۶۸۰۷	۰/۹۹۹۴	۰/۶۴۱۷	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۱۷	۱/۰۰۰۰	۰/۳۹۴	P _r	
۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۶۰	۰/۹۸۸۵	۰/۹۹۹۶	۰/۹۷۹۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۱	P _r	
۰/۹۸۵۵	۰/۹۸۵۵	۰/۹۹۳۶	۰/۸۹۲۷	۰/۹۹۹۷	۰/۶۳۶۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۹۸	S	۱۱۹
۰/۴۲۷۴	۰/۴۲۷۴	۰/۸۲۸۰	۰/۴۰۵۰	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۵۰	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۰۷	P _i	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۰۸۷	۱/۰۰۰۰	۰/۶۵۰۳	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۹۷	P _r	
۰/۹۹۳۷	۰/۹۹۳۷	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۱۱	۰/۹۹۹۷	۰/۹۸۱۸	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۳۴	P _r	
۰/۸۳۹۰	۰/۸۳۹۰	۰/۹۹۵۴	۰/۶۴۲۶	۰/۹۹۹۸	۰/۵۶۱۳	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۹۸	S	۱۲۰
۰/۸۴۶۳	۰/۸۴۶۳	۱/۰۰۰۰	۰/۶۴۷۰	۱/۰۰۰۰	۰/۴۱۰۱	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۱۶	P _i	
۰/۹۹۲۷	۰/۹۹۲۷	۰/۹۹۸۹	۰/۹۸۶۸	۱/۰۰۰۰	۰/۵۷۱۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۹۴	P _r	
۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۶۵	۰/۹۸۹۰	۰/۹۹۹۸	۰/۹۷۹۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۴۲	P _r	
۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۳۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۳۵	۱/۰۰۰۰	۰/۶۰۳۰	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۴۳	S	۲۰۱
۰/۹۰۲۱	۰/۹۰۲۱	۱/۰۰۰۰	۰/۶۳۳۵	۱/۰۰۰۰	۰/۴۲۷۴	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۷۰	P _i	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۶۱۲۲	۱/۰۰۰۰	۰/۳۶۸۱	P _r	

۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۷۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۷۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۸۷۳	P _r	۲۰۳
۰/۹۸۲۵	۰/۹۸۲۵	۰/۹۹۴۷	۰/۸۱۰۸	۱/۰۰۰۰	۰/۶۲۳۴	۱/۰۰۰۰	۰/۴۲۳۰	S	
۰/۵۳۸۱	۰/۵۳۸۱	۰/۸۷۳۵	۰/۴۹۲۱	۱/۰۰۰۰	۰/۴۳۱۲	۱/۰۰۰۰	۰/۴۳۶۰	P _۱	
۰/۷۰۹۰	۰/۷۰۹۰	۱/۰۰۰۰	۰/۶۱۹۶	۱/۰۰۰۰	۰/۵۱۶۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۶۲	P _r	
۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۵۹	۰/۸۲۱۸	۱/۰۰۰۰	۰/۶۳۵۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۷۵۰	P _r	
۰/۷۳۳۸	۰/۷۳۳۸	۰/۹۹۷۶	۰/۵۴۵۳	۱/۰۰۰۰	۰/۴۰۴۷	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۱۳	S	۲۰۴
۰/۷۳۹۷	۰/۷۳۹۷	۱/۰۰۰۰	۰/۴۸۱۴	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۷۹	۱/۰۰۰۰	۰/۲۳۰۵	P _۱	
۰/۹۹۱۳	۰/۹۹۱۳	۱/۰۰۰۰	۰/۵۵۱۳	۱/۰۰۰۰	۰/۴۱۳۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۰۰	P _r	
۰/۹۹۲۴	۰/۹۹۲۴	۰/۹۹۷۶	۰/۹۸۵۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۵۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۴۰۶	P _r	
۰/۷۱۴۴	۰/۷۱۴۴	۰/۹۸۹۶	۰/۴۴۵۱	۰/۹۹۸۴	۰/۳۴۲۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۷۹۷	S	۲۰۵
۰/۵۸۵۴	۰/۵۸۵۴	۰/۸۲۶۰	۰/۳۹۸۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۳۷	۱/۰۰۰۰	۰/۱۹۰۴	P _۱	
۰/۷۲۸۲	۰/۷۲۸۲	۱/۰۰۰۰	۰/۴۵۶۸	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۰۷	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۰۱	P _r	
۰/۹۸۴۰	۰/۹۸۴۰	۰/۹۹۲۲	۰/۹۷۲۲	۰/۹۹۸۴	۰/۹۵۶۴	۱/۰۰۰۰	۰/۹۳۵۶	P _r	
۰/۴۴۳۸	۰/۴۴۳۸	۰/۷۴۷۹	۰/۳۹۸۵	۰/۹۹۴۹	۰/۳۴۴۴	۱/۰۰۰۰	۰/۲۷۹۹	S	۲۰۷
۰/۲۷۷۰	۰/۲۷۷۰	۰/۴۷۴۳	۰/۲۶۵۴	۰/۷۷۶۹	۰/۲۴۸۵	۱/۰۰۰۰	۰/۱۹۰۴	P _۱	
۰/۴۵۴۱	۰/۴۵۴۱	۰/۷۶۰۸	۰/۴۰۸۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۵۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۰۱	P _r	
۰/۹۷۴۵	۰/۹۷۴۵	۰/۹۸۸۸	۰/۹۶۷۷	۰/۹۹۸۰	۰/۹۵۲۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۳۷۴	P _r	
۰/۵۹۰۰	۰/۵۹۰۰	۰/۷۹۴۴	۰/۴۰۶۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۶۸	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۱۳	S	۲۰۸
۰/۵۹۵۴	۰/۵۹۵۴	۰/۷۹۷۵	۰/۴۰۹۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۰۱	۱/۰۰۰۰	۰/۱۹۷۰	P _۱	
۰/۹۸۷۶	۰/۹۸۷۶	۰/۹۹۷۶	۰/۹۷۸۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۵۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۹۶	P _r	
۰/۹۸۷۱	۰/۹۸۷۱	۰/۹۹۳۳	۰/۹۷۸۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۲۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۲۶	P _r	

۰/۹۸۱۹	۰/۹۸۱۹	۰/۹۹۱۵	۰/۸۶۷۷	۱/۰۰۰۰	۰/۳۹۵۷	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۲۰	S	۲۰۹
۰/۳۸۲۸	۰/۳۸۲۸	۰/۶۴۰۹	۰/۳۵۳۰	۱/۰۰۰۰	۰/۴۰۰۶	۱/۰۰۰۰	۰/۲۲۲۲	P _۱	
۰/۵۷۴۸	۰/۵۷۴۸	۰/۸۲۸۸	۰/۵۲۸۲	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۸۰	۱/۰۰۰۰	۰/۲۹۰۰	P _r	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۸۶۶۱	۱/۰۰۰۰	۰/۹۶۶۸	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۰۳	P _r	
۰/۶۶۲۱	۰/۶۶۲۱	۰/۹۵۶۷	۰/۴۲۷۱	۱/۰۰۰۰	۰/۳۴۶۵	۱/۰۰۰۰	۰/۲۷۹۹	S	۲۱۱
۰/۶۶۸۷	۰/۶۶۸۷	۰/۹۶۳۱	۰/۴۳۰۶	۱/۰۰۰۰	۰/۳۱۵۷	۱/۰۰۰۰	۰/۱۹۰۴	P _۱	
۰/۹۸۹۰	۰/۹۸۹۰	۰/۹۹۷۰	۰/۹۷۹۵	۱/۰۰۰۰	۰/۳۵۴۳	۱/۰۰۰۰	۰/۲۸۹۶	P _r	
۰/۹۸۹۲	۰/۹۸۹۲	۰/۹۹۵۶	۰/۹۷۷۸	۱/۰۰۰۰	۰/۹۵۸۲	۱/۰۰۰۰	۰/۹۳۹۰	P _r	

دو وضعیت وجود دارد که برای بحث های آینده مفید می باشند. این دو وضعیت عبارت اند $\alpha=0$ و $\alpha=1$. در $\alpha=1$ تنها یک مقدار برای حد بالا و پایین در هر برش آلفا وجود خواهد داشت. در $\alpha=0$ بازه کارائی های ممکن که می تواند ظاهر شود نشان داده می شود. برای مثال، در حالی که در $\alpha=1$ بهترین کارائی در سیستم ۲۰۱ (کارائی ۰/۹۹۹۳) حاصل شده است، مقدار آن در $\alpha=0$ ، بین ۰/۳۷۴۳ تا ۱ در نوسان می کنند.

در برش $\alpha=1$ قطار ۲۰۷ با کارائی ۰/۴۴۳۸ کمترین کارائی را در بین مابقی سیستم ها دارا می باشد در حالی که در $\alpha=0$ ، کارائی قطار ۲۰۷ از ۰/۲۷۹۹ تا ۱ در حال نوسان می باشد. در $\alpha=1$ زیر سیستم SIV، دو قطار ۱۰۱ و ۱۱۲ کارائی کامل را داشته اند. به عبارت دیگر کمترین نرخ حرابی را بین سایر SIVها داشته اند. کمترین کارائی هم در قطار ۲۰۷ با مقدار ۰/۲۸ مشاهده شده است. در زیر سیستم PLC، قطارهای ۱۰۲، ۱۱۹ و ۲۰۱ کارائی کامل را داشته اند. کمترین کارائی هم در قطار ۲۰۷ با مقدار ۰/۴۵۴ مشاهده شده است. در زیر سیستم UNIT، قطارهای ۱۰۷، ۲۰۱ و ۲۰۹ کارائی کامل را داشته اند. کمترین کارائی هم در قطار ۱۱۴ با مقدار ۰/۹۱۷ مشاهده شده است. در حالی که در $\alpha=0$ این مقادیر در حال نوسان بین حد بالا و پایین می باشند.

با توجه به کارائی پایین قطار ۲۰۷ و اختلاف در حد بالا و پایین زیاد، به تصمیم گیرندگان توصیه می‌گردد که نگهداری و تعمیرات، قطعات یدکی و نیروی انسانی را برای قطار ۲۰۷ افزایش دهند. برای مابقی قطارها هم با توجه به میزان کارائی آنها می‌توان تصمیمات مناسب نگهداری و تعمیرات را اعمال نمود.

شایان ذکر قطارهای مورد بررسی در حدود بین ۲ تا ۴ سال فعالیت داشته‌اند. با توجه به ماهیت کارکردی سیستم‌های تهویه که معمولاً بعد گذشت چندین سال خراب می‌شوند، کارائی بالا قطارها کاملاً بدیهی و منطقی می‌باشد.

نتیجه گیری

رشد پیچیدگی‌های سیستم‌های صنعتی، سرعت جهانی شدن و روند گسترش روز افزون فعالیت‌های اقتصادی در اقصی نقاط جهان، سبب افزایش و سخت تر شدن رقابت میان شرکت‌ها شده است. افزایش رقابت میان شرکت‌ها سبب شده است تا شرکت‌ها تلاش‌های زیادی در جهت بهبود عملکرد خود داشته باشند. فاکتورهایی از قبیل تکنولوژی، تجهیزات، مدیریت، افراد و روش‌ها فاکتورهای اصلی هستند که کارائی و اثر بخشی یک سازمان صنعتی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در این میان تجهیزات نقش اساسی در عملکرد کلی سیستم ایفا می‌کند به طوری که بهره‌وری تجهیزات با کارائی کلی سیستم وابسته می‌باشد.

این پژوهش با رویکردی نوآورانه و موضوع محور و در جهت پاسخ به یک نیاز واقعی کارائی سیستم تهویه مترو قطارهای تهران که در آن سه تجهیز به صورت سری به هم متصل شده‌اند را اندازه‌گیری کرده است. بیشتر مطالعات از DEA سنتی جهت ارزیابی کارائی سیستم‌ها استفاده کرده‌اند که به سبب برخورد DEA با سیستم به شکل یک جعبه سیاه که در آن تعدادی ورودی و تعدادی خروجی در نظر گرفته می‌شود، روش مناسبی برای اندازه‌گیری ساختارهای سری نمی‌باشد.

در این مقاله از مدل تحلیل پوششی داده‌های ارتباطی فازی سه مرحله‌ای جهت ارزیابی سیستم تهویه مترو استفاده کرده‌ایم. نوآوری این تحقیق در ارزیابی سیستم تهویه قطار مترو در موارد

زیر قابل بررسی است. در این مقاله ما از سیستم سری که در آن سه زیر سیستم به صورت سری به هم متصل می‌باشند استفاده کرده ایم. مزیت این مدل در خطی بودن حد پایین و سه مرحله ای بودن آن می‌باشد. در ضمن بر خلاف اکثر مقاله‌ها که از شاخص‌هایی محسوسی همچون درآمد، هزینه، تعداد مسافر و... استفاده می‌شود، ما از آنالیز قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی و نگهداشت پذیری که از مهمترین شاخص‌های حوزه نگهداری و تعمیرات هستند، جهت تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تهویه استفاده کرده ایم. در کنار این موارد، مورد کاوی این مسئله برای اولین بار است که در مقالات به چاپ می‌رسد.

داشتن تخمین‌های واقعی از کران‌های بالا و پایین کارایی سیستم‌های تهویه به مدیریت کمک خواهد کرد تا در خصوص ظرفیت نگهداری و تعمیرات، تامین قطعات یدکی، استخدام نیروی انسانی ماهر و غیره تصمیمات علمی و سنجیده اتخاذ نمایند. برای مثال در برش $\alpha=1$ قطار ۲۰۷ با کارائی ۰/۴۴۳۸ کمترین کارائی را در بین مابقی سیستم‌ها دارا می‌باشد در حالی که در $\alpha=0$ ، کارائی قطار ۲۰۷ از ۰/۲۷۹۹ تا ۱ در حال نوسان می‌باشد. این مطلب کمک به تصمیم‌سازی برای افزایش نگهداری و تعمیرات، افزایش قطعات یدکی و نیروی انسانی برای قطار ۲۰۷ می‌باشد.

مدل‌های ارائه شده در این تحقیق مستقل از آلفا-برش نیستند و لذا باید برای آلفا برش‌های مختلف تحلیل شود. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد این مدل‌ها برای حالتی که مستقل از برش آلفا هستند توسعه داده شوند.

منابع

- Al-Najjar, B., & Alsyouf, I. (2004). *Enhancing a company's profitability and competitiveness using integrated vibration-based maintenance: A case study*. European Journal of Operational Research, 157(3), 643-657.
- Alsyouf, I. (2006). *Measuring maintenance performance using a balanced scorecard approach*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 12(2), 133-149.
- Arts, R., Knapp, G. M., & Mann Jr, L. (1998). *Some aspects of measuring maintenance performance in the process industry*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 4(1), 6-11.
- Azadeh, A., Ghaderi, S., & Izadbakhsh, H. (2008). *Integration of DEA and AHP with computer simulation for railway system improvement and optimization*. Applied Mathematics and Computation, 195(2), 775-785.
- Barabady, J., & Kumar, U. (2007). *Availability allocation through importance measures*, International Journal OF Quality & Reliability Management, 24(6) 63-657
- Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). *A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem*. Reliability Engineering & System Safety, 91(7), 839-848.
- Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*. Reliability Engineering & System Safety, 70(1), 71-83.
- Chang, T.-Y., Chung, P.-H., & Hsu, S.-S. (2012). *Two-stage performance model for evaluating the managerial efficiency of higher education: application by the Taiwanese tourism and leisure department*. Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism Education, 11(2), 168-177.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). *Measuring the efficiency of decision making units*. European Journal of Operational Research, 2(6), 429-444.

Chen, K., & Guan, J. (2012). *Measuring the efficiency of China's regional innovation systems: application of network data envelopment analysis (DEA)*. *Regional Studies*, 46(3), 355-377.

Cullinane, K., Wang, T.-F., Song, D.-W., & Ji, P. (2006). *The technical efficiency of container ports: comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(4), 354-374.

Dal, B., Tugwell, P., & Greatbanks, R. (2000). *Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement-A practical analysis*. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(12), 1488-1502. .

Du, j., (2008). Evaluation Of equipment Reliability, Availability and Maintainability in an oil sands processing plant. the university of British Colombia.

Fallah-Fini, S., Triantis, K., Jesus, M., & Seaver, W. L. (2012). *Measuring the efficiency of highway maintenance contracting strategies: A bootstrapped non-parametric meta-frontier approach*. *European Journal of Operational Research*, 219(1), 134-145.

Färe, R., & Grosskopf, S., (2000). Network DEA, *Socio-Economic Planning Sciences*, 34, 35-49.

Ghotbi, M. R., Monazzam, M. R., Baneshi, M. R., Asadi, M., & Fard, S. M. B. (2012). *Noise pollution survey of a two-storey intersection station in Tehran metropolitan subway system*. *Environmental monitoring and assessment*, 184(2), 1097-1106.

Halkos, G. E., Tzeremes, N. G., & Kourtzidis, S. A. (2014). *A unified classification of two-stage DEA models*. *Surveys in operations research and management science*, 19(1), 1-16.

Hassannayebi, E., Sajedinejad, A., & Mardani, S. (2014). *Urban rail transit planning using a two-stage simulation-based optimization approach*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 49, 151-166.

Hung, S.-W., Lu, W.-M., & Wang, T.-P. (2010). *Benchmarking the operating efficiency of Asia container ports*. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 706-713.

Jitsuzumi, T., & Nakamura, A. (2010). *Causes of inefficiency in Japanese railways: Application of DEA for managers and policymakers*. *Socio-Economic Planning Sciences*, 44(3), 161-173.

Kao, C. (2009). *Efficiency decomposition in network data envelopment analysis: A relational model*. *European Journal of Operational Research*, 192(3), 949-962.

Kao, C. (2014). *Network data envelopment analysis: A review*. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 1-16.

Kao, C., & Hwang, S.-N. (2008). *Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan*. *European Journal of Operational Research*, 185(1), 418-429.

Kao, C., & Hwang, S.-N. (2010). *Efficiency measurement for network systems: IT impact on firm performance*. *Decision Support Systems*, 48(3), 437-446.

Kao, C., & Lin, P.-H. (2012). *Efficiency of parallel production systems with fuzzy data*. *Fuzzy Sets and Systems*, 198, 83-98. .

Kao, C., & Liu, S.-T. (2000). *Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis*, *Fuzzy Sets and Systems* 113, 427-437.

Kao, C., & Liu, S.-T. (2011). *Efficiencies of two-stage systems with fuzzy data*. *Fuzzy Sets and Systems*, 176(1), 20-35.

Khalili-Damghani K, Taghavifard M (2012) *A three-stage fuzzy DEA approach to measure performance of a serial process including JIT practices, agility indices, and goals in supply chains*. *International Journal of Services and Operations Management* 13(2), 147-188

Khalili-Damghani, K., Taghavifard, M. (2013). *Sensitivity and stability analysis in two-stage DEA models with fuzzy data*. *International Journal of Operational Research*, 17(1), 1-37.

Khalili-Damghani, K., Taghavifard, M., Abtahi, A.R. (2012). *A fuzzy two-stage DEA approach for performance measurement: real case of agility performance in dairy supply chains*. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 5(4), 293-317.

Khalili-Damghani K, M Tavana . *A new fuzzy network data envelopment analysis model for measuring the performance of agility in supply chains*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 69 (1-4), 291-318

Khalili-Damghani K ., Tavana, M. (2014), *A new two-stage Stackelberg fuzzy data envelopment analysis model*, Measurement 53, 277-296

Kutucuoglu, K., Hamali, J., Irani, Z., & Sharp, J. (2001). *A framework for managing maintenance using performance measurement systems*. International Journal of Operations & Production Management, 21(1/2), 173-195.

Madu, C. N. (2005). *Strategic value of reliability and maintainability management*. International Journal of Quality & Reliability Management, 22(3), 317-328.

Markovits-Somogyi, R. (2011). *Measuring efficiency in transport: the state of the art of applying data envelopment analysis*. Transport, 26(1), 11-19.

Martínez-Correa C (2001). *An application of DEA to measure the efficiency of Spanish airports prior to privatization*. Journal of Air Transport Management, 7(3), 149-157.

Marzouk, M., & Abdelaty, A. (2014). *BIM-based framework for managing performance of subway stations*. Automation in Construction, 41, 70-77.

Mather, D. (2005). *Maintenance Scorecard, The*: Industrial Press.

Narasimhan, R., Talluri, S., & Das, A. (2004). *Exploring flexibility and execution competencies of manufacturing firms*. Journal of Operations Management, 22(1), 91-106.

Ozbek, M. E., de la Garza, J. M., & Triantis, K. (2010). *Data and modeling issues faced during the efficiency measurement of road maintenance using data envelopment analysis*. Journal of Infrastructure Systems, 16(1), 21-30.

Ozbek, M. E., Jesús, M., & Triantis, K. (2010). *Efficiency measurement of bridge maintenance using data envelopment analysis*.

Journal of Infrastructure Systems. .

Raje, D.V., Olaniya, R.S., Wakhare, P.D. & Deshpande, A.W. (2000). *Availability assessment of a two-unit stand-by pumping system*, Reliability Engineering and System Safety 68(3), 269–274..

Rouse, P., & Chiu, T. (2009). *Towards optimal life cycle management in a road maintenance setting using DEA*. European Journal of Operational Research, 196(2), 672-681.

Sampaio, B. R., Neto, O. L., & Sampaio, Y. (2008). *Efficiency analysis of public transport systems: Lessons for institutional planning*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 42(3), 445-454.

Scheraga, C. A. (2004). *Operational efficiency versus financial mobility in the global airline industry: a data envelopment and Tobit analysis*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 38(5), 383-404.

Seiford, L. M., & Zhu, J. (1999). *Profitability and marketability of the top 55 US commercial banks*. management science, 45(9), 1270-1288.

Sexton, T. R., & Lewis, H. F. (2003). *Two-stage DEA: An application to major league baseball*. Journal of Productivity Analysis, 19(2-3), 227-249.

Van den Bergh, J., De Bruecker, P., Beliën, J., De Boeck, L., & Demeulemeester, E. (2013). *A three-stage approach for aircraft line maintenance personnel rostering using MIP, discrete event simulation and DEA*. Expert Systems with Applications, 40(7), 2659-2668.

Wakchaure, S. S., & Jha, K. N. (2011). *Prioritization of bridges for maintenance planning using data envelopment analysis*. Construction Management and Economics, 29(9), 957-968.

Wang, W.-K., Lu, W.-M., & Liu, P.-Y. (2014). *A fuzzy multi-objective two-stage DEA model for evaluating the performance of US bank holding companies*. Expert Systems with Applications, 41(9), 4290-4297.

Yang, C., & Liu, H.-M. (2012). *Managerial efficiency in Taiwan bank branches: A network DEA*. Economic Modelling, 29(2), 450-461.

Zadeh, L. A. (1972). *A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges*.