مقاله پژوهشی

ارائه یک الگوی توسعه‌یافته به منظور تخمین شاخص سلامت تجهیزات(مطالعه موردی: تجهیز تونل باد

سعید رمضانی
استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. *ramezani.sr@gmail.com*

حمزه سلطانعلی*
(نویسنده عهده‌دار مکاتبات) استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.
h.soltanali@ihu.ac.ir

امید بیات
کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. msc.omidbayat@yahoo.com

چکیده: شاخص سلامت، ابزاری به منظور ارزیابی وضعیت کارکردی یک تجهیز با هدف بهبود عملکرد عملیاتی آن است. در این تحقیق انواع مدل‌های موجود در زمینه تخمین شاخص‌های سلامت به همراه چالش‌ها و محدودیت‌های آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفت که براساس آن یک الگوی توسعه‌یافته با پنج گام اصلی شامل مراحل انتخاب تجهیز، ارزیابی اثر عوامل بارگذاری و موقعیت مکانی، محاسبه نرخ پیری، محاسبه شاخص سلامت اولیه، و در نهایت محاسبه و ارزیابی اصلاح‌گرهای شاخص سلامت و قابلیت اطمینان پیشنهاد شد. الگوی پیشنهادی در پنج نوع فن مختلف از یک تجهیز تونل باد، با توجه به هزینه‌های قابل توجه نگهداشت در آن‌ها پیاده‌سازی شد. نتایج حاصل از شاخص سلامتِ فن‌ها در قالب یک طرح گرافیکی نشان داد که امکان تعیین روند سرعت نرخ خرابی‌ها و عمر کارکردی تجهیزات وجود دارد. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند مورد استفاده در انتخاب استراتژی مناسب نگهداشت با هدف بهبود عملکرد عملیاتی تجهیزات باشد.

واژگان کلیدی: شاخص سلامت؛ الگوی توسعه‌یافته؛ نگهداری و تعمیرات، تجهیز تونل باد.

۱. مقدمه

هر تجهیز، ماشین، ابزار و... در طول عمر و با گذشت زمان فرسوده شده و سطح سلامت آن کاهش پیدا می‌کند. اگر تولیدکننده‌ای بتواند روند طبیعی افت سلامت تجهیز را متناسب با شرایط بهره‌برداری آن‌ها پیش‌بینی کند، هم‌زمان می‌تواند به دو هدف مهم دست‌یابد؛ نخست این‌که امکان تخمین و پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده و نیز سرمایه لازم برای تجهیزات جایگزین فراهم می‌شود؛ دوم آن‌که امکان بررسی برنامه‌های نگهداشت و بازنگری در آن‌ها، به همراه میزان اثربخشی آن‌ها در سلامت تجهیز در طول زمان مطابق با سیر افت عمر طبیعی، فراهم می‌گردد. به‌منظور دست‌یابی به این اهداف، محاسبه شاخص سلامت تجهیز (AHI)[1] و به دنبال آن ترسیم نمودار زوال طبیعی تجهیز بسیار کمک‌کننده می‌باشد [۱]. گرچه شاخص‌هایی چون شاخص‌های کلیدی عملکرد و شاخص دوره گردش موجودی کالا در اندازه‌گیری وضعیت تجهیزات مورد استفاده هستند، اما امکان تعیین سلامت تجهیز به کمک آن‌ها وجود ندارد [۲].

شاخص AHI، یک عدد نسبی است که طی فرآیند ارزیابی وضعیت تجهیز محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده سطح سلامت آن تجهیز است. در واقع شاخص سلامت تجهیز، یک نمره است که به سلامت تجهیز داده شده است. از آن‌جایی‌که سلامت تجهیز در طول زمان افت طبیعی دارد، این شاخص در طول عمر تجهیز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹
دوره ۱۲/ شماره ۴
صفحات ۴۳۸-۴۱۳

*Corresponding author: h.soltanali@ihu.ac.ir
[1]Asset Health Indicator (AHI)

دارای یک سیر نزولی منطقی است که تحت عنوان نمودار زوال طبیعی شناخته می‌شود. نمودار زوال طبیعی بیان می‌کند که هر تجهیز در شرایط بهره‌برداری خاصی که قرار دارد، در طول زمان شاخص سلامت آن افت کرده و به پایان عمر خود می‌رسد[۳]. با کاهش شاخص سلامت تجهیز (خرابی تدریجی تجهیز)، احتمال خرابی افزایش می‌یابد. از این‌رو هدف از ارزیابی سلامت تجهیز، شناسایی و تعیین تخریب آن در بازه طولانی مدت و تعیین طول عمر باقی‌مانده آن است که شامل تشخیص تجهیزاتی می‌شود که طول عمر مفیدشان تمام‌شده یا رو به اتمام است و یا تجهیزاتی که ریسک خرابی بالایی داشته و در صورت خرابی هزینه زیادی برای بازسازی یا تعویض نیاز دارند [۴].

داده‌های مرتبط با وضعیت سلامت در طول عملکرد تجهیز، و یا از منابع اطلاعاتی دیگری مانند سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، سوابق ضمانت فروشنده آن، سوابق مرتبط با نماینده خارجی و غیره به‌دست می‌آید. در واقع شاخص AHI یک دیدگاه بی‌طرفانه برای توجیه سلامت تجهیزات ارائه می‌دهد؛ برای مثال، تمدید عمر مفید یک تجهیز تا چه زمانی امکان‌پذیر است؟ یا به منظور شناسایی تعویض زودهنگام برخی اجزا در نتیجه‌ی کاهش طول عمر، چه زمانی باید اقدام به تعویض تجهیز کرد؟ همچنین این شاخص با داشتن یک روش کاملاً متفاوت محاسبه، به‌منظور دستیابی به شرایط تجهیزات، بازرسی‌های بصری، تاریخچه عملیات، به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی عمل می‌کند. شاخص سلامت دارای مزایای بسیاری از قبیل فراهم کردن معیار نزدیکی به پایان عمر مفید تجهیزات، پیش‌بینی نیازهای بلند مدت، تخمین تعداد تعویض، شناسایی مشکلات، خطرات و فرصت‌های مدیریت نگهداری تعمیرات می‌باشد [۵].

۲. پیشینه تحقیق

مطالعات قابل توجهی در زمینه اهمیت تعریف، تبیین و تخمین شاخص‌های سلامت انواع تجهیزات در صنعت صورت گرفته است. برای مثال در یک تحقیقی یک مدل شاخص سلامت تجهیز بر پایه رویکرد داده محور به منظور ارزیابی وضعیت جرثقیل‌های اسکله در بنادر پیشنهاد شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که شاخص سلامت ارائه شده قابلیت شناسایی عواملی که بر روی چرخه عمر تجهیز تأثیرگذار بودند، را داشت و مضافا شرایط را به منظور مقایسه وضعیت تجهیزات و نیز اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری‌ها در حوزه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات را فراهم می‌کرد [۶].

در مطالعه دیگری به چالش‌های محاسبات شاخص‌های سلامت تجهیزات همگام با ظهور نسل چهارم انقلاب صنعتی[1] پرداخته شد. براساس نتایج به دست آمده برخورداری از ساختارها و فرآیندهای مناسب با هدف جمع‌آوری، دسته‌بندی داده‌های پایشی و نیز ایجاد پایگاه‌های ذخیره اطلاعات در کنار پردازش صحیح داده‌ها از جمله اساسی‌ترین چالش‌های پیش‌رو در برآورد شاخص سلامت تجهیز در دنیای انتقال دیجیتال مطرح شدند [۷].

طی تحقیقی به اهمیت برنامه‌ریزی تعمیرات اساسی و نوسازی تجهیزات بر اساس تحلیل بحرانیت و شاخص سلامت پرداخته شد. روش پیشنهادی قابلیت بررسی اهمیت تجهیزات با توجه به پارامتر بحرانی بودن و پیش‌بینی وضعیت تجهیز در طول زمان و با توجه به سوابق عملیاتی و نگهداری موجود را دارا بود. علاوه بر این، مدل ارائه شده امکان پیش‌بینی این‌که چه زمانی باید نگهداری و تعمیرات را ادامه داد یا به تأخیر انداخت را داشته تا از آن طریق بتوان تأثیرات ناشی از افزایش دفعات خرابیها، مرتبط با پیری را به حداقل رساند. متعاقباً کاربرد مدل برای یک سری از تجهیزات پیچیده حیاتی در یک شرکت نفت و گاز مورد بررسی و تفسیر واقع شده است [۸]. در ادامه پژوهش‌ها، محاسبه شاخص‌های سلامت به طور ویژه در تجهیزات برق و قدرت مورد مطالعه محققان قرار گرفته است. در این طیف مطالعات، تخمین شاخص‌های سلامت تجهیز با در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت، مقایسه اثربخشی روش‌های خطی و غیر خطی شامل انواع روش‌های آماری، یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی در قالب انواع ساختارها و چارچوب‌های توسعه یافته مورد بررسی پژوهشگران و صنعت‌گران در سال‌های اخیر قرار گرفته است[۱۲-۹].

صفی خانی و همکاران (۱۳۸۳) در تحقیقی به برآورد شاخص سلامت تولید در شرکت صنعتی مهرآباد، با هدف بهبود فرآیندها به منظور اخذ گواهینامه استاندارد بین‌المللی ایزو ۹۰۰۱[2] پرداختند. نتایج نشان داد که از میان معیارهای سلامت تعیین شده، شاخص استفاده مؤثر از ماشین‌آلات و شاخص استفاده مؤثر

[1] Industry 4.0

[2] ISO 9001

از نیروی انسانی به ترتیب نسبت زمان استاندارد کار به ماشین و نیروی انسانی به زمان در دسترس بودن آن‌ها در طی مدت شروع فعالیت‌های کنترل کیفیت وابسته است. افزایش در این شاخص‌ها به معنی تأثیر برنامه‌های کیفیت بر کاهش عواملی که مانع استفاده مؤثر از ماشین‌آلات و نیروی انسانی می‌شوند، گزارش شده است [۱۳].

در تحقیق دیگری، تعیین شاخص سلامت تجهیزات از طریق بررسی نرخ پیری در اجزا و ساختارهایی که در آن‌ها خرابی‌های تدریجی رخ می‌دهد، مورد توجه بوده است. هر مرحله متوالی ساختار را به خرابی نزدیک می‌کند. این امر با یک فرآیند دیگر که خارج از دستگاه است، در تضاد است. جایی که بارگیری آن به تدریج در پاسخ به افزایش تقاضا افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که به نقطه‌ای می‌رسد که فراتر از آن دستگاه (یا سیستم) دیگر نمی‌تواند با خیال راحت بار را حمل کند [۱۴].

براساس مطالعه‌ای از مدل قابلیت اطمینان دستگاه، به منظور ارائه برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه بهره گرفته شد. در این تحقیق، ابتدا از شاخص قابلیت فرآیند چند متغیره برای ادغام پارامترهای متعدد تجهیزات در یک شاخص کلی سلامت تجهیزات استفاده شد. شاخص سلامت به عنوان پایه‌ای برای پیش‌آگهی زمان سلامت واقعی تحت مدل پیری زوال عمل می‌کند که مطابق با آن برنامه نگهداشت پویا بر اساس پیش‌آگهی سلامت تعیین می‌شود [۱۵].

رمضانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که ارزیابی وضعیت سلامت، یکی از مهم‌ترین راهکارها با هدف ارائه برنامه‌های نگهداشت است. چرخه روش‌شناسی در این تحقیق، مبتنی بر سلامت تجهیز و بر پایه نگهداشت مبتنی بر وضعیت بود. ارزیابی وضعیت سلامت تجهیز مهم‌ترین مرحله این چرخه است. در این مطالعه، بر اساس مدل ارائ ه‌شده، عمر مفید باقی‌مانده با استفاده از ارزیابی وضعیت تجهیزات برآورد شد[۱۶].

در پژوهشی محققان تاکید داشتند که نگهداشت پیشگویانه در عملیات صنعتی محبوبیت پیدا کرده است، چرا که از قدرت یادگیری ماشین و اینترنت اشیا برای پیش‌بینی وضعیت آینده تجهیزات استفاده می‌شود. با یادگیری شاخص سلامت، وضعیت تجهیزات در طول زمان قابل پیش‌بینی است. به عبارتی، روند تخریب سلامت کنترل می‌شود و برنامه‌ریزی مطلوب بر این اساس انجام می‌شود تا زمان خرابی تجهیزات به حداقل برسد [۱۷].

قاسم زارعی و بنفشه پارسامهر (۱۳۹۷) تاکید داشتند که شرکت‌های فعال در صنعت تجهیزات پزشکی برای توسعه صادرات، شاخص‌های سلامت تجهیزات را با عواملی چون ساختاری، اقتصادی، سازمانی، سیاسی قانونی و بازاریابی در برنامه‌ریزی‌های خود مورد توجه قرار دهند [۱۸].

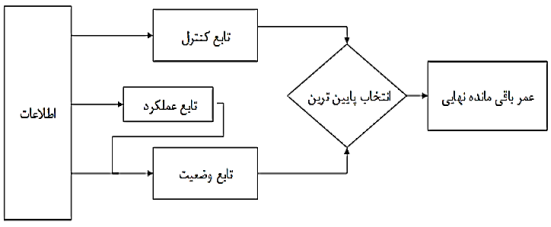
نگری و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که ظهور فناوری‌های نوین از قبیل سیستم‌های فیزیکی سایبری، دوقلوهای دیجیتالی و حسگرهای متصل فراگیر در هوشمندسازی پیش‌بینی سلامت تجهیزات، محور اصلی تحقیق‌های امروزی است[۱۹]. در همین راستا، انجمن اطلاعات آمریکا، مدیریت سلامت تجهیزات را به عنوان یک رشته جدید معرفی کرده است و تاکید بر این بوده است که شناسایی شاخص‌های سلامت تجهیزات بر کیفیت محصول نهایی تأثیرگذار است[۲۰].

رمضانی و همکاران (۱۳۹۸) یک مدل ارزیابی وضعیت سلامت و تعیین عمر مفید باقی‌مانده برای بیرینگ ارائه کردند. در این مدل، از مجموعه داده‌های پایا و ناپایا استفاده شده است که می‌توان نتیجه گرفت، روش تلفیقی پیشنهاد شده، می‌تواند در مواردی که اطلاعات در مورد فیزیک خرابی وجود ندارد، مورد استفاده باشد [۲۱].

در تحقیق دیگری نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مدیریت سلامت تجهیزات صنعتی امتداد تشخیص عیب سنتی است که یکی از حوزه‌های تحقیقاتی مرزی علم اطلاعات است. در این مطالعه مشکلات و تنگناهای فناوری‌های مختلف به منظور تجزیه و تحلیل سلامت تجهیز توضیح داده شده و یک طرح برای مدیریت و ادغام سلامت آینده تجهیزات مورد بحث قرار گرفته است [۲۲].

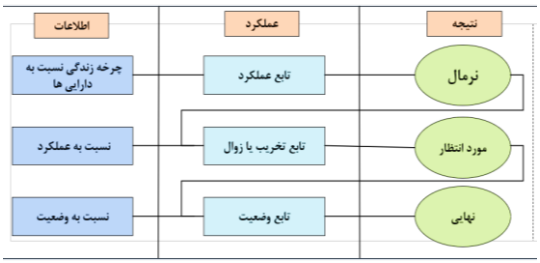
علاوه بر مدل‌های توسعه یافته از سوی محققان، انواع روش‌ها، الگوهای مختلف در زمینه پیاده‌سازی AHI از سوی مؤسسات و سازمان‌های بین‌المللی نیز ارائه شده است. برای مثال؛ معروف‌ترین آن مدل Kinetrics است که ساخت شرکت کینرتیک کانادا است که ارزیابی وضعیت کلی سلامت ترانسفورماتورها را ارائه می‌دهد. ورودی‌های مدل شامل داده‌های خدمات و شناسایی، داده‌های متغیر در عملیات‌های قبلی سیستم از قبیل بار اعمال‌شده بر ترانسفورماتور، تعداد عملیات‌ها، نتایج تحلیل آزمایشگاه‌ها از نمونه‌های روغن ترانسفورماتور آزمونه‌های انجام شده توسط تکنیسین‌ها مانند آزمونه‌های عایق‌بندی، حرارت سنجی، وضعیت خوردگی و غیره می‌باشند. با استفاده از داده‌های متغیرهای ورودی، این روش زیرسیستم‌های مختلف تجهیز (ترانسفورماتور) را از طریق الگوریتم‌های ارزیابی، رتبه‌بندی می‌کند [۲۳].

مدل دیگر شناخته شده به منظور محاسبه شاخص سلامتی قطعات، مدل DNVGL می‌باشد. این مدل توسط شرکت DNVGL پیشنهاد شده است. این روش رویکردی به منظور محاسبه شاخص سلامتی به همراه اهمیت قطعات و محدودیت‌های ضریب اطمینان را ارائه می‌دهد که در اولویت‌بندی نگهداری و تعمیرات، تعمیرات اساسی و تعویض تجهیزات نیز کمک می‌کند. این مدل از داده‌های آماری مربوط به عمر مفید نوع تجهیز استفاده می‌کند. بنابراین امکان تخمین اولیه عمر مفید که با اطلاعات شرایط قطعه (عمر، بار، شرایط تحلیل در محل، تعداد فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه و قابلیت اطمینان (مودهای خرابی و فرکانس) در طول چرخه عمر تجهیز اصلاح می‌شود، را فراهم می‌کند. فرآیند دستیابی به این شاخص به سه بخش تقسیم می‌شود: تابع تخریب، استاتیکی و شرایط/وضعیت. کاربرد این مدل به منظور تخمین عمر تجهیز به داده‌های آماری نیاز دارد. میزان متوسط طول عمر، میانگین عمر فنی بوده که در نهایت با داده‌های شرایط تجهیز اصلاح می‌شود. به زبان ساده، عمر فنی با بهره‌گیری از این داده‌ها (تابع شرایط) ممکن است، افزایش و یا کاهشی باشد. این مدل، به‌صورت هم‌زمان و موازی، فرض می‌کند که تخریب قطعه به استفاده از آن بستگی دارد. بنابراین بر روی افزایش سرعت فرآیند پیری تجهیز (تعداد عملیات، بار و غیره) اثر گذاشته و تجهیزی که سابقه کار با بار بیش‌تری دارد، نسبت به تجهیز دیگری که سابقه بارگذاری کم‌تری دارد و در یک رده سن کارکرد قرار دارد، عمر کوتاه‌تری دارد (تابع تخریب). خروجی این مدل، عمر مفید باقی‌مانده از عمر تجهیز است. پس از محاسبه تمام توابع ارائه شده، نتایج به منظور دستیابی به طول عمر باقی‌مانده قطعه ترکیب می‌شوند. در نتیجه، توابع تخریب به موازات توابع آماری و شرایط انجام می‌شوند؛ مشابه شکل ۱[۲۴].



شکل ۱–روش محاسبه چرخه عمر در مدل DNV GL [۲۴]

مدل معروف دیگر مدل شبکه مشترک شاخص‌های تجهیزات UK DNO[1][2] است. این مدل که در چارچوب یک مرجع مشترک ارائه شده، اصول و روش محاسبه اتخاذ شده توسط تمام اپراتورهای شبکه برق انگلیس برای ارزیابی تنظیمات، پیش‌بینی و گزارش خطرات تجهیزات را ارائه می‌دهد. این چارچوب با شرایط استاندارد ۵۱ (SLC 51[3]) مطابق است. این مدل نیز از داده‌های آماری برای تعیین طول عمر مفید تجهیز بهره می‌برد. این روش، امکان تخمین اولیه عمر مفید که بعداً با اطلاعات موقعیت مکانی، کارکرد تجهیزات و همچنین شرایط نسبی و عوامل مربوط به قابلیت اطمینان (اصلاح‌گرهای سلامت و قابلیت اطمینان) که در طول چرخه عمر تجهیز اتفاق افتاده و اصلاح می‌شود، را فراهم می‌کند. روش پیشنهادی، یک روش محاسبه چند مرحله‌ای است که از سه گام تشکیل می‌شود. این مراحل را می‌توان مشابه مدل‌های توابع آماری، تخریب و شرایط قبلی در نظر گرفت. مدل ارائه شده در این پژوهش، نکات مشترک بسیاری با این مدل دارد که در ادامه با جزئیات شرح داده می‌شود[۲۵]. مطابق با توضیحات ذکر شده، شمای کلی مدل DNO در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲– شبکه ارتباطات مدل DNO

مدل دیگر به منظور محاسبه شاخص سلامت تجهیز معروف به TERNA می‌باشد که توسط شرکت TERNA Rete ارائه شده که براساس پارامترهای استاتیکی و دینامیکی رفتار می‌کند. پارامترهای استاتیکی با موقعیت مکانی تجهیز که نسبت به زمان ثابت و مستقل از تجهیز است، مرتبط هستند. برای مثال، رخ دادن پدیده‌ای فاجعه انگیز، احتمال طوفان الکتریکی و غیره پارامترهای دینامیکی با تجهیز مرتبط هستند و در محل با آزمونه‌های عملیاتی و بصری، آزمونه‌های آزمایشگاهی از طریق تحلیل نمونه‌های روغن، روان‌کننده‌ها و غیره محاسبه می‌شوند. خروجی این مدل یک شاخص بین صفر تا ۰/۵ است که به ترتیب

[1] United Kingdom
[2] Distribution Network Operators
[3] Standard conditions of electricity supply license

به جدید بودن و بحرانی بودن تجهیز اشاره می‌کند. ورودی‌های مدل TERNA شامل متغیرهای استاتیکی و دینامیکی می‌باشند. متغیرهای استاتیکی به خود تجهیز بستگی ندارند، بلکه به مکان آن (فرکانس صاعقه، وقایع ناگوار و موارد دیگر) بستگی دارد. متغیرهای دینامیکی به تجهیز بستگی دارد، و مقادیرشان با تغییر عمر کارکرد قطعه تغییر می‌کند. در روش محاسبه مدل TERNA به دلیل تفاوت فاکتورهای شرایط مختلف، ابتدا باید با معیارهای مرتبط استاندارد شوند. به منظور تبدیل این مقادیر به اعداد بی‌بعد، از دستورالعمل‌های بین‌المللی استفاده می‌شود که در جدول ۱ بیان شده است.

جدول۱- تبدیل مقادیر توصیفی به عدد[۲۶]

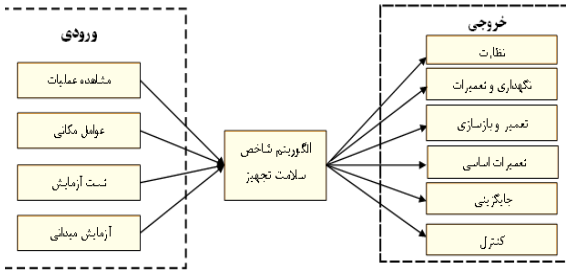
وضعیت	شاخص سلامت
خیلی خوب	۰ - ۰.۱
خوب	۰.۱ - ۰.۲
متوسط	۰.۲ - ۰.۳
مشکوک	≥۰.۳

پس از استانداردسازی پارامترها، از رابطه (۱)، شاخص HI محاسبه می‌شود:

$$HI = \frac{HI_{dielectric} + HI_{thermal} + HI_{mechanical} + HI_{oil}}{HI_{max}} \quad (۱)$$

که در آن: $HI_{\max}$ یک شماره پیشوند است و در نتیجه، شاخص سلامت HI هر تجهیز در هر واحد بیان می‌شود. خروجی مدل TERNA یک مقدار شاخص HI در بازه صفر تا ۰/۵ است. مقادیر بالاتر و پایین‌تر شاخص HI به ترتیب با سطوح ضریب اطمینان پایین‌تر و بالاتر تجهیز ارتباط دارند. قطعات، بسته به شاخص HI شان، در چهار کلاس طبقه‌بندی می‌شوند که با استفاده از روش‌های معمول و استاندارد نگهداری و تعمیرات مدیریت می‌شوند. تجهیزاتی که در گروه‌های "متوسط" و "مشکوک" قرار دارند، نیاز به تحلیل‌های بیش‌تر یا بازرسی‌های عمیق‌تر دارند [۲۶].

اخیرا یک الگوی جدید معروف به مدل کرسپو مارکز[1]، به منظور شناسایی معیارهای تعیین‌کننده در شاخص سلامت یک تجهیز پیچیده معرفی شده که جزییات آن در شکل ۳ آورده شده است. بسیاری از این تجهیزات از زیرسیستم‌های مختلفی تشکیل شده و هر زیرسیستم دارای حالت‌های تخریب و شکست متعددی می‌باشد. در بعضی موارد در نظر گرفته می‌شود که یک تجهیز زمانی که زیرسیستم‌های متعددی به وضعیت رو به خرابی (زوال) برسند، به انتهای عمر مفید خود رسیده که مانع تداوم خدمات مورد نیاز تجاری می‌شود. در نتیجه، شاخص سلامت براساس نتایج مشاهدات عملیاتی، بررسی‌های میدانی و تست‌های آزمایشگاهی، می‌تواند به عنوان یک نشانگر کمی و عینی هدفمند عمل می‌کند [۲۷].



شکل ۳- معیارهای تعیین کننده شاخص سلامت[۲۷]

براساس ادبیات تحقیق صورت گرفته می‌تون اذعان نمود که تمامی مدل‌هایی که در حوزه محاسبه و ارزیابی شاخص سلامت تجهیزات معرفی شدند دارای وجه تشابهات و نیز مزایایی در ماهیت خروجی بودند. برای مثال استفاده از مدل‌های محاسبه شاخص سلامت به طور ویژه مورد استقبال مدیران نگهداری و تعمیرات با هدف ارتقاء عمر مفید باقیمانده تجهیز از طریق تغییرات در گزینه‌هایی چون تغییر سیستم عملیاتی و نیز تعویض جزئی قطعات/ بازسازی برای افزایش طول عمر مفید بوده است. از طرفی یکی از جذابیت مدل‌های شاخص سلامت مورد مطالعه و تئوری‌های آن در پیش‌بینی عملکرد تجهیزات از طریق فراهم کردن بستری برای جمع‌آوری و دسته‌بندی داده‌ها در راستای بهینه کردن چرخه عمر محصول یا تجهیز گزارش شده است. همچنین براساس بررسی‌های صورت گرفته، مدل‌های محاسبه شاخص سلامت، در برگیرنده پارامترهای مهمی چون داده‌های شرایط و عملکرد تجهیزات و در برخی موارد اطلاعات محل جغرافیایی و قابلیت اطمینان قطعات یدکی مورد استفاده در نگهداری و تعمیرات یافت می‌شود. علاوه بر این، در الگوریتم‌های محاسباتی شاخص سلامت مشاهده می‌شود که منابع اطلاعاتی در مدل‌های مختلف براساس اولویت قابل ادغام بوده و این عامل به زمان عملیاتی دستگاه در آن بخش بستگی دارد. مضافا

[1] Crespo Marquez

خروجی مختص هر تجهیز و نیز پیشنهادهای اختصاصی از دیگر وظایف مدل‌های شاخص سلامت مورد بررسی بوده است. با وجود مزایای ذکر شده در این مدل‌ها، بررسی‌ها نشان داد که همراه با محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. برای مثال مدل‌های Kinetrics و DNO مختص ارزیابی وضعیت سلامت در تجهیزات موجود در شبکه‌های توزیع و انتقال برق بوده و متعاقب آن نوع پارامترها یا داده‌های ورودی مدل‌ها نیز براساس ماهیت کارکردی این تجهیزات تعریف شده است. هرچند که برخی از پارامترهای ورودی در این مدل‌ها می‌تواند در برآورد شاخص سلامت در سایر تجهیزات در صنایع دیگر نیز مورد استفاده باشد که در مدل پیشنهادی تحقیق حاضر از آن‌ها استفاده شده است. از این رو، مهم‌ترین نوآوری مطالعه حاضر بررسی ماهیت مدل‌های پیشین در حوزه شاخص سلامت و توسعه آن در قالب یک الگو یا مدل جامع که متشکل از سه سطح شامل الف) داده‌های ورودی، ب)پردازش (روش‌های محاسبه) و نیز ج) خروجی‌ها بوده است، به طوری که قابلیت استفاده در هر تجهیز یا سامانه‌ای را دارا می‌باشد. علاوه بر این، با بررسی مدل‌های پیشیین و به صورت ابتکاری داده‌های ورودی در سه دسته شامل اطلاعات تخصصی تجهیز (کلاس‌بندی، سن، عمر مورد انتظار، سازنده، نوع مدل، محل بهره‌برداری)، داده‌های بهره‌برداری و نگهداشت و داده‌های پایش وضعیت تجهیزات دسته‌بندی شدند. در بحث توسعه روش‌های محاسبه شاخص سلامت (پردازش داده‌ها)، با هدف تعیین وضعیت سلامت در یک تجهیز نو و مقایسه آن وضعیت سلامت آن با گذشت، اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان و اصلاح‌گرهای شاخص سلامت معرفی شدند که در مدل‌های پیشین بدان پرداخته نشده است (مطالعه بیش‌تر در زیر بخش ۴.۱.۳.). علاوه بر این، یکی از نوآوری‌ها و دستاوردهای مطالعه حاضر؛ تعریف، تبیین و بکارگیری تئوری‌های شاخص سلامت بر روی تجهیزات بسیار حیاتی از جمله تونل‌های باد مورد استفاده در صنایع دفاعی کشور است. به عبارتی دیگر محاسبه و ارزیابی شاخص سلامت در تجهیزات تونل باد و ارائه یک مدل با دقت بالا، از جمله اصلی‌ترین نیازمندی‌ها و دغدغه‌ها با هدف ارتقاء برنامه‌های نگهداری و تعمیرات و نیز بهبود کارکردهای عملیاتی بوده است. از این رو مهم‌ترین اهداف و نوآوری‌های مطالعه حاضر به شرح ذیل می‌باشد:

- بررسی انواع مدل‌ها، روش‌ها و الگوهای موجود در حوزه تعریف، محاسبه و ارزیابی شاخص سلامت تجهیزات
- استخراج انواع پارامترهای موثر مستقیم و غیر مستقیم بر روی شاخص سلامت از طریق واکاوی مدل‌های پیشین
- توسعه یک الگوی جدید در محاسبات شاخص سلامت از طریق تجمیع پارامترها و معیارهای تأثیرگذار مدل‌های پیشین و نیز برخی پارامترهای جدید از طریق کسب دیدگاه خبرگان
- پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در یک تجهیز تونل باد که در برگیرنده مواردی چون؛ الف) تعریف پارامترها/معیارها براساس ویژگی‌های خاص تونل باد از طریق اکتساب دیدگاه خبرگان در قالب طراحی پرسشنامه؛ ب) چگونگی نحوه ترکیب این پارامترها با هدف دست‌یابی به مدل شاخص سلامت؛ ج) بهره‌گیری از نتایج مدل توسعه یافته در تصمیمات مدیریتی شامل مدیریت قراردادهای فیمابین کارفرما و پیمانکار، ارتقاء سطح ایمنی، بهینه‌سازی برنامه‌های عملیاتی و نگهداشت در تجهیزات تونل باد می‌باشد.

۳. روش تحقیق

این تحقیق از نوع تحقیقات کاربردی و پیمایشی به منظور تعریف، تبیین و محاسبه شاخص سلامت تجهیزات می‌باشد. از نظر جمع‌آوری داده‌ها، کمی محسوب می‌شود. به صورتی‌که با استفاده از داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری‌شده به یک روش و مدل ریاضی برای به دست آوردن شاخص سلامت تجهیزات می‌توان دست یافت. در تحقیق حاضر برای گردآوری داده‌ها و اطلاعات موردنیاز از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی استفاده شده است.

۳-۱- الگوی پیشنهادی در تخمین شاخص سلامت تجهیز

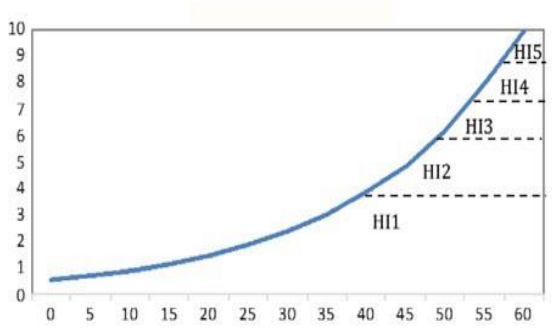
الگوی پیشنهادی ارائه شده در مطالعه حاضر، تجهیز ویژگی‌های مشترکی از مدل‌های قبلی را در بر می‌گیرد. در واقع یک فرآیند کلی برای هر تجهیز پیچیده‌ای، صرف‌نظر از فناوری، بخش صنعتی یا مکانی که در آن قابل بهره‌وری بوده، مورد استفاده است. هم‌چنین از ترکیب روش‌های نوین امروزی هم‌چون روش‌های کرسپو[1] و TERNA بهره‌مند می‌باشد. به‌عنوان مثال،

[1] Crespo Marquez

تعریف ویژگی‌های زیر در مدل پیشنهادی، مشابه با سایر مدل‌ها و الگوهای قبل است:

۳-۱-۱- شاخص سلامت تجهیز

شاخص سلامت تجهیز یک عدد بدون بعد بین ۰/۵ (که مربوط به وضعیت یا شرایط یک تجهیز جدید) و ۱۰ (مربوط به شرایط تجهیزی که عمر مفیدش به پایان رسیده) می‌باشد. الگوی رفتاری شاخص AHI، در طول عمر تجهیز نمایی است. شکل زیر پنج بخش مختلف که شاخص سلامت تجهیز در آن تقسیم می‌شود را نشان می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۴- فاصله شاخص سلامت[۲۸]

بازه شاخص HI1 از دامنه $0.5 \leq AH1 \leq 4$ تشکیل می‌شود؛ که رفتار تجهیزات در این بازه مشابه تجهیزات نو و جدید است. بازه شاخص HI2، مقادیر AHI را در دامنه $4 \leq AHI \leq 6$ در نظر می‌گیرد و مطابق با مدت زمانی است که اولین علائم خراب شدن در تجهیزات ظاهر می‌شوند. در این محدوده، مقدار AHI=5.5، با مقدار شاخص سلامتی تجهیز معادل با عمر نرمال مورد انتظار رده تجهیز مطابقت دارد. از این نقطه، سه بازه در این روش در نشر گرفته شده است: HI3، HI4 و HI5، که به ترتیب مطابق با زمانی است که مقادیر AHI به ترتیب از ۶، ۷ و ۸ فراتر رود. در این روش، فرض می‌شود که در مقادیر بالاتر از AHI=8، تجهیز به پایان عمر مفید رسیده است.

۳-۱-۲- عامل موقعیت مکانی تجهیز

عامل موقعیت مکانی تجهیز به صورت دائمی، موقعیت عملیاتی تجهیز در تأسیسات و منطقه جغرافیایی که در آن واقع‌شده، را در نظر می‌گیرد. قرار گرفتن در معرض عوامل محیطی، محافظت یا عدم محافظت از بیرون تجهیز، فاصله از ساحل یا کار در یک ارتفاع مشخص تأثیرات متفاوتی بر سلامت تجهیز دارد.

۳-۱-۳- عامل بار(کارکرد) تجهیز

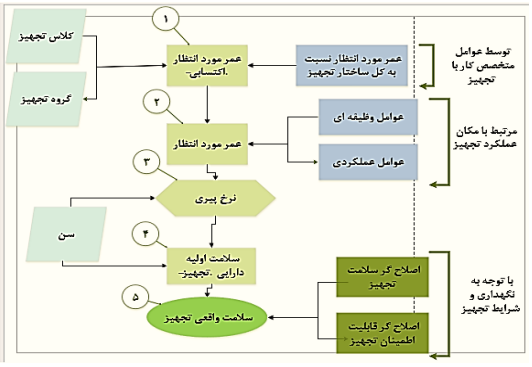
عامل بار هر تجهیز از طریق رابطه بین بار تجهیز در نقطه عملیاتی مورد انتظارش (نقطه تضمین) با موقعیت عملیاتی آن، و حداکثر میزان بار قابل قبولی که می‌تواند تحمل کند، تعریف می‌شود. بنابراین عامل بار، نتیجه‌ای از شرایط عملیاتی است و مقادیری در بازه [۱و۰] را در بر می‌گیرد.

۳-۱-۴- اصلاح‌گرهای شاخص سلامت و ضریب اطمینان

اصلاح‌گرهای شاخص سلامت پارامترهایی هستند که اطلاعات اضافی درباره وضعیت سلامت فعلی تجهیز را ارائه می‌دهند. اصلاح‌گرهای شاخص سلامت به بار فعلی، شرایط تجهیز (نتیجه بازرسی‌ها و چکاب‌ها بر روی آن اعمال شود)، و عملیات (نتیجه ثبت متغیرهای عملیاتی تجهیز، برای مثال متغیرهای موجود در سیستم‌های اطلاعاتی کارخانه‌ها) بستگی دارد. اصلاح‌گر بار (ML(c)) در مدل، زمانی معرفی می‌شود که حالت‌های عملیاتی تجهیز با نقطه تضمین مورد انتظار برای موقعیت مکانی خود متفاوت باشند. به‌طورکلی، مقادیر این اصلاح‌گر در بازه [۱و۰] قرار دارد. در صورتی که بار تجهیز به نقطه تضمین موقعیت فنی نزدیک باشد، این مقادیر بالاتر و به عدد یک نزدیک می‌شوند. شرایط و عملیات اصلاح‌گر تجهیزات، مقادیری در بازه [۱/۵ و ۱] را به خود اختصاص می‌دهد. مقادیر بالاتر اصلاح‌گرها یا عواملی که شاخص سلامت تجهیزات را بیش‌تر ارزیابی می‌کنند، به عدد ۱/۵ نزدیک‌تر است.

۳-۱-۵- مراحل اجرایی الگوی پیشنهادی

مطابق با توضیحات ارائه شده و نیز در نظر گرفتن مشابهات رویکرهای پیشیین در زمینه تخمین شاخص سلامت، الگوی پیشنهادی حاضر براساس یک رویکرد پنج مرحله‌ای است. در این روش با تخمین اولیه طول عمر معمولی مربوط به یک دسته از تجهیزات، شاخص سلامت فعلی تجهیز به دست می‌آید. با این هدف، عوامل مرتبط با تنوع موقعیت عملیاتی، شرایط و عملیات خاص باید در نظر گرفته شود. این روش در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- مراحل اجرایی الگوی پیشنهادیِ تخمین AHI

• **مرحله نخست:** انتخاب تجهیز و تعریف طبقه آن: گردآوری اطلاعات موقعیت مکانی عملکرد تجهیزات، داده‌های فیزیکی تجهیز و به دست آوردن تخمین عمر نرمال تجهیزات، داده‌های مورد نیاز مرحله اول می‌باشد. شناسایی تجهیزات و اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی بررسی می‌شود، برای مثال داریم:

○محل عملکرد تجهیزات در سیستم مدیریت کارخانه که تجهیزات در آن قرارگرفته‌اند.

○وضعیت داخل/خارج تجهیز. این پارامتر برای تعیین تأثیر قرار گرفتن در معرض عوامل خارجی بر روی شاخص سلامت تجهیز در نظر گرفته می‌شود.

○فاصله تا ساحل: این پارامتر، مانند پارامتر قبلی برای آگاهی از احتمال صدمه دیدن تجهیزات، به دلیل رطوبت و محیط خورنده نزدیک به ساحل در نظر گرفته می‌شود.

○میانگین دمای محیط خارجی: از طریق متوسط دمای محیط خارجی، میانگین دمای سالانه در محیط به دست می‌آید و به‌صورت مستقیم بر عملکرد تجهیز در محیط اثر می‌گذارد.

○مجاورت در برابر عواملی مانند: گرد و غبار معلق و جو خورنده. مجاورت تأسیسات به منابع انتشار صنعتی گرد و غبار معلق و عوامل خورنده، منجر به تسریع خرابی در درازمدت می‌گردد.

با توجه به اطلاعات تجهیزات، مواردی چون داده‌های ساخت، مدل و مشخصات طراحی فنی شناسایی می‌گردد. عمر نرمال تخمینی تجهیز، داده‌ای است که به‌طورکلی، از بخش فنی شرکت با توجه به تجارب جمع‌آوری‌شده و اطلاعات تأمین‌شده توسط سازندگان مختلف به دست می‌آید. میزان عمر تخمینی نرمال، به عنوان نقطه شروع انجام تمام محاسبات به کار می‌رود. مقدار آن تقریبی است و تنها به دسته تجهیز بستگی دارد. در واقع این مقدار به کمک ویژگی‌های مکانی و بارگذاری اصلاح می‌شود.

• **مرحله دوم:** ارزیابی اثر عوامل بارگذاری و موقعیت مکانی بر اساس نوع تجهیز، موقعیت فنی و تخمین عمر مورد انتظار: پس از جمع‌آوری تمام اطلاعات مرحله قبلی، عوامل مکان و بارگذاری ارزیابی می‌شوند (همان‌طور که قبلاً گفته شد، عامل بارگذاری به‌صورت غیرمستقیم با موقعیت فنی تجهیز در ارتباط است). از آنجا که بیش از یک متغیر بر هر یک از عوامل اثر می‌گذارد، برای هر یک از آن‌ها یک فاکتور ترکیبی باید محاسبه گردد. عامل مکان (F_L) از از طریق اطلاعات موقعیت فنی تجهیز محاسبه می‌شود. براساس منابع و جداول (۲) تا (۶)، چگونگی تفسیر عوامل و معیارهای مختلف در مدل پیشنهادی ارائه شده است[۲۹].

جدول ۲- نمره فاکتور فاصله از ساحل تجهیز[۲۹]

فاصله تا ساحل	
نمره فاکتور(F_{DC})	فاصله (کیلومتر)
۱.۲	۱-۰
۱.۱۵	۵-۱
۱.۱	۱۰-۵
۱.۰۵	۲۰-۱۰
۱	بیشتر از ۲۰

جدول ۳- نمره متوسط دمای سالانه تجهیز[۲۹]

متوسط دمای سالانه	
نمره فاکتور(F_{Tm})	دما(سانتی گراد)
۱	۱۰-۰
۱.۰۵	۲۰-۱۰
۱.۱	۳۰-۲۰
۱.۱۵	>۳۰

جدول ۴- نمره قرارگیری تجهیز در معرض عوامل خارجی[۲۹]

قرار گرفتن در معرض عوامل خارجی (به‌عنوان‌مثال خورندگی اتمسفر یا جو آب و هوایی) (F_{AG})	
نمره فاکتور	مکان تجهیزات
۱	در معرض قرار نگرفتن
۱.۱	به میزان کم
۱.۲	در حد متوسط
۱.۳	زیاد

جدول ۵- نمره ارتفاع از سطح دریا مکان تجهیز[۲۹]

ارتفاع از سطح دریا (FHSL)	
نمره فاکتور	ارتفاع(متر)
۱	۵۰۰-۰
۱.۱	۱۰۰۰-۵۰۰
۱.۲	۲۰۰۰-۱۰۰۰
۱.۳	بیش از ۲۰۰۰

جدول ۶- نمره فضای مکان قرارگیری تجهیز [۲۹]

محل قرار گرفتن (F_{EXP})	
نمره فاکتور	مکان تجهیزات
۱	در فضای داخلی(محیط بسته)
۱.۲	در فضای باز
۱.۳	بیش از ۲۰۰۰

برای مثال، بسته به این‌که تجهیز در فضای باز یا داخلی باشد، دو راه برای تخمین این عامل وجود دارد. اگر محل فنی تجهیز در فضای باز باشد، محاسبه عامل ترکیبی مکانی با استفاده از رابطه (۲) با فرض این‌که عوامل بالا، برای مثال عامل مثبتی باشند، محاسبه می‌شود. برای موقعیت‌هایی که محل تجهیز در مکانی سر پوشیده باشد، عامل مکانی برابر یک می‌شود ($1 = F_{EXP}$)، به‌جز تجهیزاتی که عوامل دیگر نیز در محاسبات باید در نظر گرفته شود.

$$F_L = \max\left(F_{DC}\ .F_{EXP}.F_{Tm}.F_{Hsl}.F_{AG}\right) \qquad (۲)$$

$\boldsymbol{F_L}$: ضریب موقعیت مکانی تجهیز(عامل مکان)[۱]

$\boldsymbol{F_{DC}}$: ضریب فاصله تا ساحل[۲]

$\boldsymbol{F_{EXP}}$: ضریب محیط قرارگیری تجهیز[۳]

$\boldsymbol{F_{Tm}}$: ضریب متوسط دمای سالانه تجهیز[۴]

$\boldsymbol{F_{Hsl}}$: ضریب ارتفاع از سطح دریا[۵]

$\boldsymbol{F_{AG}}$: ضریب قرار گرفتن در معرض عوامل خارجی[۶]

توجه کنید که ضریب بار ($\boldsymbol{F_{LD}}$) و همچنین فاکتور مکان ($\boldsymbol{F_L}$)، به‌صورت دائمی به محل فنی بستگی دارد. این عامل، بار مورد نیاز تجهیز در آن موقعیت را در مقابل حداکثر بار قابل قبول محاسبه می‌کند. معمولاً این داده‌ها زمان راه‌اندازی و تحویل تجهیزات توسط سازنده مشخصات فنی ثبت‌شده و یا توسط متخصصان تجهیز در آن مجموعه به دست می‌آید(رابطه (۳)).

$$F_{LD} = \frac{\text{میزان کارکرد مورد نیاز تجهیز}}{\text{حداکثر کارکرد تجهیز}} \qquad (۳)$$

سپس عمر تخمینی تجهیز در رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\text{عمر تخمینی} = \frac{\text{عمر معمولی تجهیز}}{F_{LD}.F_L} \qquad (۴)$$

• **مرحله سوم:** محاسبه نرخ پیری[۷]: یک فرضیه اساسی از روش انتخاب شده این است که پیر شدن تجهیز نسبت به عمر کارکرد آن رفتار نمایی دارد. نرخ پیری، یک پارامتر از مدل است که امکان بیان ریاضی این شیوه رفتاری را فراهم می‌کند و همچنین با پدیده‌های مختلفی که تجهیز در طول عمر مفید خود تحمل می‌کند، مرتبط است، با کمک پدیده‌های خورنده، سایش، اکسیداسیون روغن‌ها، شکستگی عایق و غیره. نرخ پیری (∂) و با تعیین رابطه لگاریتم طبیعی بهره سلامت تجهیز جدید و شاخص سلامت تجهیز بعد از رسیدن به عمر تخمینی، عمر تخمینی محاسبه شده بدست می‌آید (رابطه ۵):

$$\partial = \frac{ln\frac{HI_{new}}{HI_{estimated\ life}}}{\text{Estimated life}} \qquad (۵)$$

که در آن؛

∂: نرخ پیری

$\text{HI}_{\text{new}} = 0.5$ شاخص سلامت یک تجهیز جدید[۲۳]

$\text{HI}_{\text{estimated life}} = 5.5$ شاخص سلامت یک تجهیز در پایان عمر تخمینی[۲۱].

• **مرحله چهارم:** دستیابی به شاخص سلامت اولیه در سن t: شاخص سلامت، همان‌طورکه قبلاً گفته شد، یک عدد بی‌بعد بین ۰/۵ تا ۱۰ است که نسبت به عمر کارکرد تجهیز (t)، به‌صورت نمایی رفتار می‌کند که با نرخ پیری تجهیز مشخص می‌شود. برای محاسبه اولیه شاخص سلامت یک تجهیز (HI_i)، رابطه (۶) به کار می‌رود که t عمر کارکرد فعلی تجهیز (در واحد زمان) و نرخ پیری ∂ در مرحله نهایی محاسبه می‌گردد.

$$HI_i(t) = HI_{new}e^{\partial t} \qquad (۶)$$

• **مرحله پنجم:** ارزیابی اثر بار، اصلاح‌گرهای شاخص سلامت و قابلیت اطمینان، و محاسبه شاخص سلامت فعلی: شاخص سلامت (HI)، شاخص سلامت اولیه را که در مرحله چهارم به دست آمد،

[1] Location factor
[2] Distance from coast band
[3] Exposure
[4] Average temperature
[5] Height above sea level
[6] aggressive factors
[7] Aging rate

با استفاده از اصلاح‌گرهای متعدد بار، سلامت و قابلیت اطمینان تنظیم می‌کند. در قدم اول، شاخص سلامت اولیه یک تجهیز (HI_i) برای دستیابی به شاخص سلامت اولیه اصلاح‌شده (HIM_i)، با بهره‌گیری از اصلاح‌گر بار ثبت شده در طول عمر تجهیز، $M_L(t)$، با استفاده از رابطه (۷) اصلاح می‌گردد. اصلاح‌گر بار $M_L(t)$مقادیری در بازه [۱و۰] قرار دارد. در صورتی‌که بار تجهیز به نقطه تضمین موقعیت فنی نزدیک باشد، مقدار آن بیش‌تر و نزدیک به عدد یک می‌شود. شاخص HIM_i زوال قطعه را نسبت به حالت اولیه مورد انتظار آن برای ضریب بار (F_L) محل عملیات مقایسه می‌کند.

$$HIM_i(t) = HI_{new} e^{\frac{\partial t}{M_L}} \quad (۷)$$

در قدم دوم، شاخص سلامت با استفاده از وضعیت تجهیز، شرایط عملیاتی و قابلیت اطمینان در زمان ارزیابی و با کمک رابطه (۸) تعیین می‌شود.

$$HI(t) = HIM_i(t).M_H(t).M_R(t) \quad (۸)$$

که در آن:

t: سن تجهیز

HIM_i: شاخص سلامت اصلاح‌شده

M_H: اصلاح‌گر شاخص سلامت تجهیز (شرایط و عملکرد)

M_R: اصلاح‌گر قابلیت اطمینان تجهیز است

اصلاح‌گر شاخص سلامت تجهیز (M_H) در معادله (۸) از طریق ارزیابی متغیرهای شرایط و عملکرد با محاسبه پتانسیل تخریب تدریجی تجهیز محاسبه می‌شود. به‌عنوان نمونه‌ای از این متغیرها، جدول ۷، مجموعه‌ای از اصلاح‌گرهای شاخص سلامت که در یک شرکت برای انواع مختلف تجهیزات به کار می‌رود را ارائه می‌کند[۲۷]. بارهایی که میزان تأثیر هر یک از این متغیرها را بر سلامت تجهیز اندازه می‌گیرند، نیز باید تعیین شوند. جدول‌هایی با مقادیر قابلیت اطمینان، برای اصلاح‌گر آن (M_R)، بسته به نوع، مدل و سازنده تجهیز، تهیه می‌گردد. از طرفی جدول ۷، مجموعه‌ای از اصلاح‌گرهای شاخص قابلیت اطمینان که در یک شرکت برای انواع مختلف تجهیزات به کار می‌رود را ارائه می‌دهد[۲۹].

جدول ۷- نمونه اصلاح‌کننده سلامت موجود در تجهیزات مختلف[۲۹]

متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری	پمپ‌های سرمازا	کمپرسورهای گاز	قطار کمپرسور توربو	کمپرسورهای جایگزین
جریان عملکرد	X	X		X
جریان حرارت مایعات	X	X		
پرش حرارتی بین مراحل	X	X		X
بدون خاموش و روشن شدن	X	X	X	X
سرعت			X	X
بازرسی بورسکوپ			X	X
تجزیه‌وتحلیل گازهای خروجی			X	X
آنالیز روغن		X	X	X
آنالیز ارتعاش	X	X	X	X
آنالیز استانداردسازی		X		X

به‌طورکلی، مقادیر اصلاح‌گر شاخص سلامت (M_H) و اصلاح‌گر قابلیت اطمینان (M_R)، در طول زمان مشابه روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$M_H(t) = \prod_{j=1}^{j=n} M_{Hj}(t) \quad (۹)$$

$j=1...n$ تعداد اصلاح‌گرهای شاخص سلامت

$M_{Hi}(t)$: اصلاح‌گر سلامت i در سن فعلی تجهیز است.

جدول ۸- اصلاح‌کننده قابلیت اطمینان در تجهیزات مختلف[۲۹]

اصلاح‌کننده قابلیت اطمینان	پمپ‌های سرمازا	کمپرسورهای گاز	قطار کمپرسور توربو	کمپرسورهای جایگزین
عدم فعالیت تجهیز	X	X	X	X
قابلیت اطمینان ساختار تجهیز	X	X	X	X
تعداد تعمیرات اساسی	X	X	X	X

$$M_R(t) = \prod_{k=1}^{k=m} M_{Rk}(t) \quad (۱۰)$$

که در آن:

K=1…m تعداد اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان

$M_{Rk}(t)$: اصلاح‌گر قابلیت اطمینان k در سن فعلی تجهیز است

هر دو رابطه، اصلاح‌گرها را محصول ضرایب با مقادیری در بازه [1, 1.x] تعریف می‌کنند. x به اهمیت متغیر به‌عنوان اصلاح‌کننده سلامت بستگی دارد. برای ساده‌سازی، x=5 فرض می‌شود تا حداکثر پتانسیل تأثیر یک اصلاح‌گر باشد، و اثرشان چند برابر شود. بعلاوه، نتیجه چند برابر شدن اثر باید به‌راحتی تصحیح گردد تا مقدار HI، همان‌طور که در ابتدا تصریح شد، هیچ‌گاه بزرگ‌تر از ۱۰ نشود. به این ترتیب، یک نمایش گرافیکی از تکامل شاخص سلامت برای هر یک از زیرسیستم‌های یک تجهیز به دست می‌آید که سرعت تخریب هر کدام متفاوت است.

۴- نتایج و بحث

الگوی پیشنهادی پنج مرحله‌ای در این مطالعه که در بخش قبل ارائه شد، به منظور بررسی میزان کارایی آن بر روی تجهیزات پنج نوع فن مختلف در یک تونل باد در یک مرکز تحقیقاتی، با توجه به اهمیت نگهداشت اصولی در آن پیاده‌سازی شد. امروزه تونل باد افزون بر آزمودن هواپیما و موشک‌ها، برای شبیه‌سازی جریان سیال حول بالگردها، فضاپیماها، پره‌های توربو ماشین‌ها، خودروها و سازه‌های ساختمانی و همچنین آزمودن عملکرد رادیاتورها، آزمودن خنک کاری مدارهای الکتریکی و شبیه‌سازی طوفان شن و ... استفاده می‌شود [۳۰]. اجزای اصلی تونل باد مورد مطالعه شامل ورودی، نازل همگرا، محفظه، مقطع آزمایش، دیفیوزر مجراها و کانال‌ها، سیستم تأمین هوا (فن به همراه الکتروموتور و سیستم کنترل دور موتور و فن)، سیستم داده‌برداری و کنترل کامپیوتری می‌باشد [۳۰]. اطلاعات و داده-های مورد نیاز به منظور تحلیل شاخص سلامت فن‌ها، از طریق مصاحبه حضوری و نیز طراحی پرسشنامه با هدف کسب نظرات خبرگان و متخصصان مرتبط با تونل بادی به دست آمد. از این رو روایی اطلاعات و پرسشنامه‌ها با نظر خبرگان تعیین شد. از طرفی پایایی پرسشنامه از طریق آلفای کرونباخ ۰/۹۲ اثبات شد. اطلاعات بیش‌تر در زمینه روایی و پایایی پرسشنامه‌های طراحی شده در پیوست (۱) ارائه شده است. مراحل پیاده‌سازی الگوی پیشنهادی به منظور تخمین شاخص سلامت در فن‌های تونل باد به شرح زیر می‌باشد:

۴-۱- مرحله اول: موقعیت فنی تونل باد

- **فاکتور مکان F_L[1]**

۱. فاصله تا ساحل F_{DC}: با توجه به موقعیت مرکز تحقیقاتی موردنظر، فاصله تا ساحل برای هر پنج فن بیش از ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد.

۲. متوسط دمای سالانه F_{Tm}: با توجه به داده‌های ثبت‌شده در مرکز هواشناسی تهران متوسط دمای محیط تونل بادهای مورد نظر در آن منطقه ۱۷ درجه سانتی‌گراد است.

۳. قرار گرفتن در معرض عوامل خارجی F_{AG} : با توجه به آلودگی شهر تهران در اغلب روزهای سال و همین‌طور داده‌های هواشناسی از میزان گرد غبار معلق در هوا و همچنین با توجه به شرایط خوب آب و هوایی در موقعیت مرکز تحقیقاتی، میزان جو آب و هوایی و قرار گرفتن در معرض عوامل خارجی را می‌توان در حد متوسط و حتی به میزان کمی دانست.

۴. ارتفاع از سطح دریا F_{Hsl}: در این شاخص نیز با توجه به موقعیت مکانی مرکز تحقیقاتی موردنظر، ارتفاع از سطح دریا در شهر تهران از ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ متر امتداد یافته است و با توجه به این‌که ارتفاع میدان تجریش از سطح دریا ۱۳۰۰ متر ثبت‌شده است و همچنین موقعیت مرکز تحقیقاتی ارتفاع از سطح دریا برای هر پنج تونل باد ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر پیش‌بینی‌شده است.

۵. محل قرار گرفتن F_{EXP}: محیط قرارگیری تجهیز یکی دیگر از شاخص‌های فاکتور مکان می‌باشد که در مرکز تحقیقاتی هر پنج دستگاه تونل باد در فضای باز قرار دارد. برای مطالعه حاضر داده‌های محاسباتی فاکتور مکان به صورت جدول ۹ قابل تفسیر است.

جدول۹- داده‌های محاسباتی فاکتور مکان

فاکتور مکان F_L	موقعیت فن	ضریب فاکتور
فاصله تا ساحل	بیش از ۲۰ کیلومتر	۱
متوسط دمای سالانه	۱۷ درجه سانتی گراد	۱.۰۵
قرار گرفتن در معرض عوامل خارجی	در حد متوسط	۱.۲
ارتفاع از سطح دریا	۱۷۰۰ متر	۱.۲
محل قرار گرفتن	در فضای باز	۱.۲
MAX (بیشترین)		۱.۲

[1] Location Factor

• **فاکتور کارکرد(بار)**[1] F_{LD}: به صورت دائمی به موقعیت و شرایط بستگی دارد. این داده‌ها در مشخصات فنی تونل باد توسط سازنده یا در مرکز تحقیقاتی توسط خبره و داده‌های ثبت شده پیشیین به دست آمد که نتایج آن در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰- داده‌های محاسباتی فاکتور کارکرد(بار)

عوامل مؤثر بر فاکتور کارکرد	فن شماره ۱-۲-۳	فن شماره ۴-۵
کارکرد موردنیاز فن	۶	۸
حداکثر کارکرد فن	۸	۱۰
F_{LD}	۰.۷۵	۰.۸

• **تخمین عمر:** یکی دیگر از عوامل در تعیین شاخص سلامت، میزان عمر تقریبی تجهیز می‌باشد که با استفاده از فاکتور کارکرد و فاکتور مکان محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است ضرورت به محاسبات کاملاً دقیق و مهندسی برای به‌دست آوردن تخمین عمر فن نیست. این شاخص به صورت تقریبی توسط مرکز تحقیقاتی و یا سازنده محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱- داده‌های محاسباتی تخمین عمر

عوامل مؤثر بر محاسبه تخمین عمر	فن شماره ۱-۲-۳	فن شماره ۴-۵
عمر تخمین زده‌شده تقریبی (برحسب روز)	۱۰۹۵۰	۱۰۹۵۰
فاکتور مکان F_L	۱.۲	۱.۲
فاکتور کارکرد(بار) F_{LD}	۰.۷۵	۰.۸
تخمین عمر (برحسب روز)	۱۲۱۶۶.۷	۱۱۴۰۶.۳

۴-۲- مرحله دوم: نرخ پیری تونل باد

در این گام محاسبه پیر شدن فن نسبت به عمر کارکرد آن، پرداخته شده است. با توجه به محاسبات ریاضی نرخ پیری؛ دو نوع داده شامل شاخص سلامت هنگام نو بودن تجهیز (HI_{new}) و شاخص سلامت یک تجهیز در پایان عمر تخمین زده شده، ($HI_{estimated\ life}$) ثابت است. شاخص سلامت برای یک تجهیز نو به دلیل این‌که در ابتدای عمر خود می‌باشد، برابر با ۰.۵ می‌باشد. هم‌چنین شاخص سلامت یک تجهیز در پایان عمر تخمینی بدون در نظر گرفتن سایر عوامل مؤثر ۰.۵ فرض شده است که نتایج آن برای فن‌ها در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲- محاسبات نرخ پیری

عوامل مؤثر بر نرخ پیری	فن شماره ۱-۲-۳	فن شماره ۴-۵
$HI_{estimated\ life}$	۵.۵	۵.۵
HI_{new}	۰.۵	۰.۵
Ln	۲.۴	۲.۴
عمر تخمین زده‌شده	۱۲۱۶۶.۷	۱۱۴۰۶.۳
نرخ پیری ∂	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲۱

۴-۳- مرحله سوم: شاخص سلامت اولیه تونل باد

این شاخص عددی بین ۰.۵ تا ۱۰ هست که با توجه به سن و عمر تخمینی فن و بدون در نظر گرفتن اصلاح‌گرها می‌باشد و با توجه به عمر فعلی تجهیز رفتار نمایی دارد و برای هر پنج فن به‌صورت جدول ۱۳ مشخص می‌شود.

جدول ۱۳- محاسبات شاخص سلامت اولیه

عوامل مؤثر بر شاخص سلامت اولیه	فن شماره (۱)	فن شماره (۲)	فن شماره (۳)	فن شماره (۴)	فن شماره (۵)
HI_{new}	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵
نرخ پیری	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲۱	۰.۰۰۰۲۱
عمر فعلی تجهیز	۹۴۹۰	۱۰۲۲۰	۹۶۷۳	۹۸۵۵	۱۰۵۸۵
HI_i	۳.۲۵	۳.۷۵	۳.۶۵	۴	۴.۶۳

۴-۴- مرحله چهارم: محاسبه اصلاح‌گرهای شاخص سلامت و قابلیت اطمینان و ارزیابی اثر کارکرد در تونل باد

• **ارزیابی اثر کارکرد یا بار**[2] M_L: ارزیابی اثر کارکرد فن با توجه به کارکرد مرکز تحقیقاتی از تونل باد محاسبه شد که با توجه به گذشته فن در هر پنج تونل باد به‌دست آمد و به صورت جدول ۱۴ می‌باشد.

[1] Load Factor

[2] Load modifier

جدول ۱۴- محاسبات ارزیابی اثر کارکرد M_L

عوامل مؤثر بر ارزیابی اثر کارکرد	فن شماره ۱-۲-۳	فن شماره ۴-۵
میزان کارکرد روزانه فن در تونل باد	۶	۸
میزان کارکرد روزانه مطلوب و مورد انتظار فن در تونل باد	۶	۸
ارزیابی اثر کارکرد M_L	۱	۱

● **اصلاح‌گرهای شاخص سلامت تونل باد:** اصلاح‌گرهای شاخص سلامت همان‌طور که گفته شد از طریق ارزیابی متغیرهای شرایط و عملکرد و با توجه به تخریب تدریجی فن در تونل باد محاسبه‌شده است. اصلاح‌گرهای شاخص سلامت برای فن در مرکز تحقیقاتی موردنظر شاخص‌هایی همچون حرارت و دما، استحکام، ارتعاشات، سرعت، صدا، آنالیز استانداردسازی و پرش حرارتی بودند که با توجه به تحقیقات میدانی صورت گرفته و مصاحبه با متخصصین مرکز تحقیقاتی شاخص‌های حرارت و دما، ارتعاشات، سرعت و صدا مورد تحلیل قرار گرفت. این شاخص‌ها با توجه به محدوده شاخص سلامت که باید بین ۰.۵ تا ۱۰ باشد، دارای محدوده ۱ الی ۱.۵ هستند. بنابراین سه عامل تعیین‌کننده ضریب اصلاح‌گرهای شاخص سلامت به‌صورت زیر است:

۱. با توجه به اهمیت اصلاح‌گر
۲. با توجه به محدوده اصلاح‌گرها (۱تا ۱.۵)
۳. با توجه به محدوده شاخص سلامت (۰.۵ تا ۱۰)

ضرایب اصلاح‌گرهای شاخص سلامت که به‌صورت جدول ۱۵ تکمیل‌شده است، در جدول ۱۶ برای هر فن پنج تونل باد مرکز تحقیقاتی مورد نظر محاسبه شده است.

جدول ۱۵-اصلاح‌گرهای شاخص سلامت

	بیش‌ازحد نرمال ☐	معمولی ☐	بدون مشاهده علائم ☐	دسته‌بندی
	۱.۱	۱.۰۵	۱	حرارت و دما
خطرناک ☐	هشدار ☐	احساس لرزش ☐	خوب ☐	دسته‌بندی
۱.۲	۱.۱	۱.۰۵	۱	لرزش
	کمتر از حد انتظار ☐	معمولی ☐	خوب ☐	دسته‌بندی
	۱.۱	۱.۰۵	۱	سرعت
خطرناک ☐	هشدار ☐	احساس مشکل در صدا ☐	خوب ☐	دسته‌بندی
۱.۱۵	۱.۱	۱.۰۵	۱	صدا

جدول ۱۶- محاسبات اصلاح‌گر شاخص سلامت

اصلاح‌گرهای شاخص‌سلامت	فن شماره (۱)	فن شماره (۲)	فن شماره (۳)	فن شماره (۴)	فن شماره (۵)
حرارت و دما	۱	۱.۰۵	۱	۱	۱.۱
ارتعاش	۱.۰۵	۱.۰۵	۱	۱.۰۵	۱.۱
سرعت	۱	۱	۱.۱	۱.۰۵	۱.۱
صدا	۱.۱	۱.۱۵	۱	۱	۱.۱۵
M_H	۱.۱۵۵	۱.۲۶	۱.۱	۱.۱۰۲	۱.۵۳

● **اصلاح‌گر قابلیت اطمینان تونل باد:** اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان فن بسته به مدل و نوع تونل باد توسط متخصصین و خبره تعیین شد. اصلاح‌گرها شامل عدم فعالیت تجهیز، قابلیت اطمینان ساختار تجهیز و تعداد تعمیرات اساسی بود. در جدول ۱۷ اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان فن نمایش داده شده است. ضرایب با توجه به محدوده گفته شده در قسمت قبل باید باشد. اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان تعیین‌شده برای هر پنج فن تونل باد در جدول ۱۷ محاسبه شده است.

جدول ۱۷ – اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان

اصلاح‌گرهای قابلیت اطمینان	فن شماره (۱)	فن شماره (۲)	فن شماره (۳)	فن شماره (۴)	فن شماره (۵)
تعمیرات اساسی	۱	۱.۰۵	۱.۰۵	۱.۰۵	۱.۱
قابلیت اطمینان ساختار تجهیز	۱	۱.۰۵	۱.۱	۱.۰۵	۱.۱
عدم فعالیت تجهیز	۱.۰۵	۱.۰۵	۱.۱	۱.۰۵	۱.۱
M_R	۱.۰۵	۱.۱۵	۱.۲۷	۱.۱۵	۱.۳۳

۴-۵- مرحله پنجم: شاخص سلامت نهایی (AHI)در تونل باد

همان‌طور که بیان شد، شاخص سلامت اولیه با استفاده از اصلاح‌گرهای سلامت و قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. حال با توجه به محاسبه شاخص سلامت اولیه و اصلاح‌گرها برای هر پنج تونل باد شاخص سلامت نهایی فن به صورت جدول ۱۸ می‌باشد.

جدول۱۸- محاسبات شاخص سلامت

عوامل مؤثر بر شاخص سلامت نهایی	فن شماره (۱)	فن شماره (۲)	فن شماره (۳)	فن شماره (۴)	فن شماره (۵)
HI_{new}	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵
نرخ پیری	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۲۱	۰.۰۰۰۲۱
عمر فعلی تجهیز	۹۴۹۰	۱۰۲۲۰	۹۶۷۳	۹۸۵۵	۱۰۵۸۵
M_L	۱	۱	۱	۱	۱
M_H	۱.۱۵	۱.۲۶	۱.۱	۱.۱	۱.۵۳
M_R	۱.۰۵	۱.۱۵	۱.۲۷	۱.۱۵	۱.۳
AHI	۳.۹۵	۵.۵	۴.۷	۵.۱	۹.۴

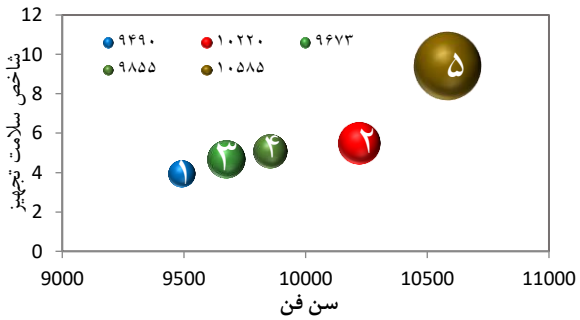
بخش مهم دیگری ارائه نتایج شاخص سلامت می‌باشد. باید روش خوب و مناسبی برای درک مقدار HI_i در مقایسه با HI برای تشخیص بهترِ تخریب تدریجی فن‌ها پیش‌گرفته شود. همچنین ارائه مقایسه سن کارکرد با ساعات عملیاتی فن در تونل باد اهمیت زیادی دارد. در ادامه بررسی سلامت نسبی یک تجهیز در یک مجموعه یا دستگاه تونل باد بسیار مهم است. حتی تجهیزات جدید و نو نیز می‌توانند با تخریب زود هنگام مواجه شوند. نکته اصلی تمرکز ارزیابی نگهداری فعلی آن‌ها می‌باشد. با مقایسه تجهیزات قدیمی بحرانی با تخریب مرتبط منجر به تعیین برنامه‌های تعویض و ترمیم این تجهیزات می‌گردد. در این روش یک نمودار xy پیشنهاد شد که در آن؛ x سن کارکرد تجهیز و y شاخص سلامت آن است (شاخص فعلی در مقابل شاخص اولیه). بنابراین هر تجهیز با یک دایره مشخص می‌شود و مقایسه شاخص سلامت فعلی (یا تخریب) با پارامتر مورد انتظار آن با قطر دایره ($HI- HI_i$) نشان داده می‌شود که در جدول ۱۹ نمایش داده شده است.

جدول ۱۹ - محاسبه شاخص سلامت (ΔAHI)

شاخص سلامت	فن شماره (۱)	فن شماره (۲)	فن شماره (۳)	فن شماره (۴)	فن شماره (۵)
HI	۳.۹۵	۵.۵	۴.۷	۵.۱	۹.۴
HI_i	۳.۲۵	۳.۷۵	۳.۳۵	۴	۴.۶۳
ΔAHI	۰.۷	۱.۷۵	۱.۳	۱.۱	۴.۷

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش با توجه به الگوی پیشنهادی، تخمین شاخص سلامت برای پنج فن مختلف در تجهیز تونل باد مورد مقایسه قرار گرفت. کارنکردن فن در هر تونل باد، شرایط غیرقابل قبول برای مرکز تحقیقاتی به وجود خواهد آورد؛ مانند خسارت‌های صنعتی، تولیدی و یا تحقیقاتی. تعمیرات اساسی و تعویض تجهیزات می‌تواند براساس شاخص سلامت و طبق معمول بر اساس ساعات عملیاتی و یا زمان تعیین گردد. شاخص به‌دست‌آمده بر هر پنج فن، با توجه به عمر فن و شاخص سلامت به‌دست‌آمده مرتب شده است (شکل ۶). فن‌ها نیز بر اساس شاخص‌ها از پایین به بالا مرتب شده‌اند. در مقابل فن‌هایی که شاخص سلامت برتری دارند، بالاتر قرار داده شده‌اند و عدد شاخص بالاتر بیان‌کننده خرابی بیش‌تری است. اندازه هر محیط نیز تفاوت بین شاخص سلامت اولیه و شاخص سلامت فن‌ها را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده پیری تجهیز بیش از انتظار است. در نتیجه باید به این تجهیز توجه و نظارت بیش‌تری شود. برای آن دسته از فن‌هایی که شاخص بالاتر از ۵.۵ دارند، تعمیر اساسی یا تعویض در دوره‌های نزدیک الزامی است. بنابراین فن تونل باد شماره ۵ فورا به تعمیر اساسی و یا تعویض و بازدیدهای دوره‌ای نزدیک نیاز دارد، چون اجزای زیادی در فن مشاهده شده که نزدیک به از کارافتادن قرار دارند. فن تونل شماره ۲ نیز شاخص سلامت ۵.۵ دارد و نیاز به بازدید دوره‌ای دارد و برای عملکرد بهتر تجهیز و کاهش میزان خسارت می‌توان به تعمیر اساسی آن پرداخت، اما کارکرد آن با توجه به مرز بودن سلامت فن به پایان نرسیده و حتی ممکن است در مدت زمان زیادی نیز به کار بپردازد. در ادامه با توجه به شکل (۷)، می‌توان نتیجه گرفت که فن شماره ۳ نیز با توجه به عمر نزدیک آن و حتی سن کم‌تر نسبت به فن شماره ۴ نرخ ΔAHI بیش‌تری دارد. بنابراین در بازدیدهای بعدی باید به این موضوع توجه داشت که در صورت ادامه این شرایط و وضعیت، به تعمیر آن و رفع مشکل پرداخته شود.



شکل ۶- شاخص سلامت فن‌ها در تونل باد

مشابه هر تحقیقی، تحقیق حاضر با توجه به محدویت‌های آن و نیز کسب نتایج به دست آمده، پیشنهاداتی با هدف ارتقاء کیفیت و

دقت مدل پیشنهادی در محاسبه شاخص سلامت در ادامه ارائه کرده است که می‌تواند مورد توجه محققان در مطالعات آتی قرار گیرد. از آن‌جا که مدل بکار رفته در تحقیق حاضر عمدتا در فاز بهره‌برداری مورد استفاده است، امکان توسعه مدل حاضر به منظور قابلیت کاربرد در چرخه عمر تجهیز به ویژه فاز طراحی و ساخت وجود دارد. از طرفی در مطالعه حاضر روند مدل‌سازی نرخ خرابی و قابلیت اطمینان تجهیز به صورت پیشفرض براساس تابع توزیع نمایی استوار بوده، از این‌رو به منظور بررسی اثر نوع تابع توزیع بر روی مقادیر شاخص سلامت، استفاده از سایر توابع توزیع به ویژه توزیع ویبول پیشنهاد می‌گردد. در تحقیق حاضر مقادیر شاخص سلامت ارائه شده بدون تحلیل حساسیت و نیز لحاظ کردن عدم قطعیت مقادیر مورد محاسبه قرار گرفته است، بدین سبب برای رفع این محدویت، استفاده از تئوری‌های فازی به منظور کسب نظر خبرگان قابل پیشنهاد است. مضافا اتخاذ وزن‌دهی به معیارهای تأثیرگذار بر شاخص سلامت با توجه به شرایط کارکردی هر تجهیز نیز از جمله پیشنهاداتی است که امکان بررسی آن در مطالعات آتی وجود دارد. از طرفی با هدف افزایش دقت برخی از معیارهای تأثیرگذار در محاسبات شاخص سلامت تجهیز، اندازه‌گیری آن از طریق تست‌های آزمایشگاهی پیشنهاد می‌گردد.

۶- منابع

[1] Ahmadi, S.H., & Grossi Mokhtarzade, N. (2012). Investigating and prioritizing the sensitivity of devices for preventive maintenance and repairs with the Martel and Zaras model. Journal of Industrial Management, (3) 5, 1-2. (in Persian).

[2] Durán, O., Orellana, F., Perez, P., & Hidalgo, T. (2020). Incorporating an asset health index into a life cycle costing: A proposition and study case. Mathematics, 8(10), 1787.

[3] Hastings, N. (2010). Physical Asset Management. Second Edition, Springer Pulisher

[4] Zille, V., Berenguer. C., Grall, A., & Depujols, A. (2010). Simulation of maintained multicomponent systems for dependability analysis. In A. Faulin, S. Martorell, & J. Ramirez-Márquez (Eds.) Simulation methods for reliability and availability of complex systems. Berlin: Springer (Chapter 12). (pp. 253–272).

[5] ISO 55002. International Organization for Standardization (2014). Asset Management – Management System – Guidelines for the application of ISO 55001.

[6] Crespo Del Castillo, A., Sasidharan, M., Nentwich, C., Merino, J., & Parlikad, A. (2023). Data-driven Asset Health Index–an application to evaluate quay cranes in container ports.

[7] Candón, E., Crespo Márquez, A., Guillén, A., & Leturiondo, U. (2022). Challenges on an Asset Health Index Calculation. In World Congress on Engineering Asset Management (pp. 205-216). Cham: Springer International Publishing.

[8] de la Fuente, A., Crespo, A., Sola, A., Guillén, A., Gómez, J., & Amadi-Echendu, J. E. (2021). Planning major overhaul and equipment renovation based on asset criticality and health index. In 14th WCEAM Proceedings (pp. 83-90). Springer International Publishing.

[9] Rediansyah, D., Prasojo, R. A., & Abu-Siada, A. (2021). Artificial intelligence-based power transformer health index for handling data uncertainty. IEEE Access, 9, 150637-150648.

[10] Manninen, H., Kilter, J., & Landsberg, M. (2021). Health index prediction of overhead transmission lines: a machine learning approach. IEEE Transactions on Power Delivery, 37(1), 50-58.

[11] Zeinoddini-Meymand, H., Kamel, S., & Khan, B. (2021). An efficient approach with application of linear and nonlinear models for evaluation of power transformer health index. IEEE Access, 9, 150172-150186.

[12] Mohd Selva, A., Azis, N., Shariffudin .N. S., Ab Kadir, M. Z. A., Jasni, J., Yahaya, M. S., & Talib, M. A. (2021). Application of statistical distribution models to predict health index for condition-based management of transformers. Applied Sciences, 11(6), 2728.

[13] Safi Khani, M., Pourhaji, M., Farmarez., F. (2002), The use of quality guarantees in raising production indicators in electrical industry equipment. The 19th International Electricity Conference. (in Persian).

[14] Endrenyi, J., & Anders, G. J. (2006). Aging, maintenance, and reliability-approaches to preserving equipment health

and extending equipment life. IEEE Power and Energy Magazine, 4(3), 59-67.

[15] Chen, A., & Wu, G. S. (2007). Real-time health prognosis and dynamic preventive maintenance policy for equipment under aging Markovian deterioration. International Journal of Production Research, 45(15), 3351-3379.

[16] Ramezani, S., Moini, A., & Riahi, M. (2019). A Model to Determining the State of Degradation and Remaining Useful Life of Rotating Equipment, With a New Approach to Combination and Predicting Health Index. Modares Mechanical Engineering, 19(10), 2351-2365.

[17] Zhang, C., Gupta, C., Farahat, A., Ristovski, K., & Ghosh, D. (2019). Equipment health indicator learning using deep reinforcement learning. In Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: European Conference, ECML PKDD 2018, Dublin, Ireland, September 10–14, 2018, Proceedings, Part III 18 (pp. 488-504). Springer International Publishing.

[18] Zarei Q., & Parsa-Mehr B. (2017). Identifying factors affecting the development of medical equipment exports using the data theory approach, 2017, Health and Treatment, (3) 9, 7-18. (in Persian).

[19] Negri, E., Ardakani, H. D., Cattaneo, L., Singh, J., Macchi, M., & Lee, J. (2019). A digital twin-based scheduling framework including equipment health index and genetic algorithms. IFAC-PapersOnLine, 52(10), 43-48.

[20] Peng, C., Tang, Z., Gui, W., Chen, Q., Zhang, L., Yuan, X., & Deng, X. (2020). Review of key technologies and progress in industrial equipment health management. IEEE Access, 8, 151764-151776.

[21] Ramezani, S., Moini, A., & Riyahi, M. (2018). A model for determining the state of deterioration of rotating equipment and determining the remaining useful life, with a new approach to integrating and predicting the health index, Tarbiat Modares University Publications, (19) 10, 2351-2365. (in Persian).

[22] Toothman, M., Braun, B., Bury, S. J., Dessauer, M., Henderson, K., Wright, R., ... & Barton, K. (2021, May). Trend-based repair quality assessment for industrial rotating equipment. In 2021 American Control Conference (ACC) (pp. 502-507). IEEE.

[23] Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F., & Service, J. (2008, June). An approach to determine the health index of power transformers. In Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (pp. 192-196). IEEE.

[24] Vermeer, M., Wetzer, J., van der Wielen, P., de Haan, E., & de Meulemeester, E. (2015, June). Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model. In 2015 IEEE Eindhoven PowerTech (pp. 1-6). IEEE.

[25] DNO-Network Asset Indices Methodology Working Group. (2015). DNO Common Network Asset Indices Methodology.

[26] Scatiggio, F., Rebolini, M., & Pompili, M. (2016). Health Index: The Last Frontier of TSO's Asset Management. TERNA Rete, 1-9.

[27] Crespo Márquez, A., de la Fuente Carmona, A., Guillén López, A. J., Rosique, A. S., Serra Parajes, J., Martínez-Galán Fernández, P., & Izquierdo, J. (2020). Defining asset health indicators (AHI) to support complex assets maintenance and replacement strategies. Value Based and Intelligent Asset Management in Industrial Plants and Infrastructures, 79-99.

[28] Crespo Del Castillo, A., Sasidharan, M., Nentwich, C., Merino, J., & Kumar Parlikad, A. (2023). Data-Driven Asset Health Index–an application to evaluate Quay Cranes in container ports. Maritime Policy & Management, 1-19.

[29] Chen, A., & Wu, G. S. (2007). Real-time health prognosis and dynamic preventive maintenance policy for equipment under aging Markovian deterioration. International Journal of Production Research, 45(15), 3351-3379.

[30] Subsonic Wind Tunnel. (2014) Aeronautics.nasa.gov.

[31] Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. Personnel psychology, 28(4), 563-575.

[32] Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. psychometrika, 16(3), 297-334.

پیوست (۱)

بررسی روایی و پایایی پرسشنامه

در این مقاله از دو پرسشنامه روایی محتوایی، پرسشنامه طیف لیکرت استفاده‌شده است. با توجه به ابعاد و شاخص‌های معرفی‌شده، مدل پیشنهادی این تحقیق شامل ۲ بعد و ۱۱ شاخص و برای تائید و عدم تائید شاخص‌های سلامت و قابلیت اطمینان از پرسشنامه‌های روایی محتوایی و طیف لیکرت استفاده گردیده. مضافا در پرسشنامه روایی از فرمول لاوشه استفاده شده است. مقیاس لیکرت یکی از پرکاربردترین مقیاس‌ها است که در تحلیل آماری مقالات مختلف که بر اساس پرسشنامه انجام می‌شود، بکار گرفته می‌شود. مقیاس لیکرت یک مقیاس ترتیبی است که با استفاده از این مقیاس پاسخ‌دهندگان، یک گزینه بین ۵ گزینه مقیاس‌های پنج نقطه‌ای لیکرت که بیشتر با دیدگاه آن‌ها هماهنگ است، انتخاب می‌کنند. در پرسشنامه حاضر مقیاس‌های پنج نقطه‌ای لیکرت، گزینه‌ها شامل کاملاً موافقم، موافقم، احتمالاً، مخالفم، کاملاً مخالفم" استفاده شده است. با استفاده از مقیاس لیکرت، درجه موافقت و مخالفت پاسخ‌دهندگان به یک سؤال و یا یک موضوع مشخص می‌شود. نمونه پرسش روایی محتوایی و طیف لیکرت به‌صورت جدول (الف) ارائه شده است.

جدول (الف). نمونه پرسشنامه روایی محتوایی و پرسش‌نامه طیف لیکرت

ردیف	عنوان پرسش	روایی محتوایی		پاسخ				
		مناسب و ضروری	غیر ضروری	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
				۵	٤	۳	۲	۱
ابعاد								
۱	شاخص‌ها							

روایی پرسشنامه

ابزاری که برای جمع‌آوری داده‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند، در مرحله اول باید از روایی یا اعتبار[1] رخوردار باشند و در مرحله دوم باید پایایی یا اعتماد داشته باشند. روایی بدین معناست که روش یا ابزار به‌کاررفته تا چه حد می‌تواند خصوصیت موردنظر را درست اندازه‌گیری کند. مقصود از روایی این است که ابزاری که برای اندازه‌گیری موردنظر انتخاب‌شده است ویژگی و خصوصیتی که ابزار برای آن طراحی‌شده است را دارد یا خیر. به‌عبارت‌دیگر مفهوم روایی، به این سؤال پاسخ می‌دهد که ابزار اندازه‌گیری تا چه حد خصیصه موردنظر را می‌سنجد.بنابراین وقتی گفته می‌شود ابزار گردآوری داده‌ها باید روایی داشته باشند بدین معناست که چه پرسشنامه تهیه می‌کنید چه می‌خواهید مصاحبه کنید یا ارزیابی خود را با مشاهده حضوری انجام دهید باید چیزی که سنجیده می‌شود مرتبط باهدفی باشد که پیش‌گرفته‌اید در غیر این صورت نتیجه نهایی از ارزش خاصی برخوردار نخواهد بود [۳۱].

نسبت روایی محتوا - CVR اس اچ لاوشه[2]

اس اچ لاوشه این روش پرکاربرد را با هدف سنجش اعتبار محتوا ابداع کرد. این روش میزان موافقت میان ارزیابان یا داوران را در خصوص "متناسب یا اساسی بودن" یک گویه خاص می‌سنجد. لاوشه پیشنهاد کرد که هر گویه با پرسش به مجموعه‌ای از ارزیابان و خبرگان داده شود و آن‌ها پرسیده شود که آیا گویه موردنظر برای سنجش سازه موردنظر اساسی یا سودمند است یا خیر؟ طبق نظر

[1] Validity
[2] C.H. Lawshe

لاوشه، اگر بیش از نیمی از ارزیابان یا خبرگان بیان داشتند که آن پرسش یا شاخص، اساسی و سودمند است، آن شاخص یا گویه دست‌کم از مقداری اعتبار محتوا برخوردار است. هر چه میزان موافقت میان خبرگان در مورد سودمند بودن یک شاخص و یا گویه معین بالاتر باشد، سطح اعتبار محتوا بالاتر است. لاوشه با استفاده از این فرض، فرمول زیر را برای سنجش محتوا ابداع کرد که به آن نسبت اعتبار محتوا گفته می‌شود. بنابراین اعتبار محتوا، ویژگی ساختاری ابزار اندازه‌گیری است که هم‌زمان با تدوین آزمون در آن تنیده می‌شود. نسبت اعتبار محتوا از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد [۳۱].

$$CVR = \frac{N_e - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \geq 0.6$$

که در آن؛

CVR: نسبت اعتبار محتوا

ne: تعداد خبرگانی که شاخص موردنظر را سودمند و ضروری دانستند.

N: تعداد کل خبرگان

حداقل امتیاز قابل‌قبول به ازای تعداد خبرگان، متفاوت است. در جدول (ب)، حداقل امتیاز لازم به ازای تعداد خبرگان ارائه‌شده است.

جدول (ب). حداقل امتیازات به ازای محاسبهCVR

تعداد خبرگان	حداقل مورد قبول	تعدادخبرگان	حداقل مورد قبول
۵	۰.۹۹	۱۳	۰.۵۴
۶	۰.۹۹	۱۴	۰.۵۱
۷	۰.۹۹	۱۵	۰.۴۹
۸	۰.۷۵	۲۰	۰.۴۲
۹	۰.۷۳	۲۵	۰.۳۷
۱۰	۰.۶۲	۳۰	۰.۳۳
۱۱	۰.۵۹	۳۵	۰.۳۱
۱۲	۰.۵۶	۴۰	۰.۲۹

در تحقیق حاضر برای روایی محتوای پرسشنامه و شاخص‌های مدل پیشنهادی از ۸ خبره دانشی استفاده گردیده و با توجه به فرمول لاوشه و جدول حداقل امتیازات به ازای محاسبه CVR شاخص‌های که نمره حداقل ۰/۷۵ را کسب نمایند موردپذیرش قرار قرار گرفتند. همچنین روایی محتوایی پرسشنامه در جدول (ج) ارائه شده است.

جدول (ج). نسبت روایی محتوای شاخص‌های مدل ارزیابی شاخص سلامت فن تونل باد

ردیف	شاخص‌ها	نسبت روایی محتوای CVR رد یا پذیرش	
۱-۱	میزان اهمیت تأثیر تعداد تعمیرات اساسی در قابلیت اطمینان فن تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۱
۱-۲	میزان اهمیت تأثیر ثبات اقتصادی فن در بین سایر تجهیزات تونل باد چگونه است؟	رد	۰.۵
۱-۳	میزان اهمیت تأثیر فشار کاری واردشده بر فن در تونل باد چگونه است؟	رد	۰.۵
۱-۴	میزان اهمیت تأثیر قابلیت‌های اطمینان سایر اجزای ساختار تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۱
۱-۵	میزان اهمیت تأثیر عدم کارکرد فن در تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۱
۲-۱	میزان اهمیت صدای فن در شاخص سلامت تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۰.۷۵
۲-۲	میزان اهمیت دمای فن در شاخص سلامت تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۱
۲-۳	میزان اهمیت روشن یا خاموش شدن ناگهانی فن در شاخص سلامت تونل باد چگونه است؟	رد	۰.۲۵
۲-۴	میزان اهمیت سرعت فن در شاخص سلامت تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۰.۷۵
۲-۵	میزان اهمیت لرزش فن در شاخص سلامت تونل باد چگونه است؟	پذیرش	۱
۲-۶	میزان اهمیت استحکام فن در شاخص سلامت تونل باد چگونه است؟	رد	۰.۵

بررسی پایایی با روش آلفای کرونباخ[1]

در ادامه روایی پرسشنامه، پایایی یک وسیله اندازه‌گیری عمدتاً به‌دقت نتایج حاصل از آن اشاره می‌کند. پایایی به‌دقت، اعتمادپذیری، ثبات، با تکرارپذیری نتایج آزمون اشاره می‌کند. عبارت است از همسانی ابزار در اندازه‌گیری آنچه اندازه می‌گیرد. منظور از پایایی آزمون ثبات و پایایی ابزار اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف است؛ یعنی ابزار اندازه‌گیری در شرایط یکسان تا چه اندازه نتایج یکسانی به دست می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، همبستگی میان یک مجموعه از نمرات و مجموعه دیگری از نمرات در یک آزمون معادل که به‌صورت مستقل بر یک گروه آزمودنی به‌دست‌آمده چقدر است. به بیان ساده‌تر، اگر ابزار اندازه‌گیری را در یک‌فاصله زمانی کوتاه چندین بار به یک گروه واحدی از افراد بدهیم نتایج حاصل نزدیک به هم باشد. برای اندازه‌گیری پایایی از شاخصی به نام ضریب پایایی استفاده می‌کنیم. دامنه ضریب پایایی از صفرتا یک است. ضریب پایایی صفر نشان‌دهنده‌ی عدم پایایی و ضریب پایایی یک معرف پایایی کامل است. پایایی کامل به‌ندرت دیده می‌شود و در صورت مشاهده قبل از هر چیز باید به نتایج حاصل شک نمود. رابطه بین روایی و پایایی از این‌قرار است که یک آزمون باید پایا باشد تا بتواند روا باشد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری پایایی روش آلفای کرونباخ است [۳۲]. در این مقاله از روش آلفای کرنباخ برای آزمون پایایی پرسشنامه استفاده شده است. محدوده ضریب الفای کرونباخ آن به‌صورت جدول(د)است.

جدول (د). محدوده ضریب الفای کرونباخ

ضریب آلفا کرونباخ	پایایی درونی
$a \geq 0.9$	عالی
$0.9 > a \geq 0.8$	خوب
$0.8 > a \geq 0.7$	قابل قبول
$0.7 > a \geq 0.6$	مورد سوال
$0.6 > a \geq 0.5$	ضعیف
$0.5 > a$	غیرقابل قبول

[1]Cronbach

A Developed Framework for Estimating the Equipment' Health Indicator: A Study for Wind Tunnel Equipment

Saeed Ramezani

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran. Iran.

Hamzeh Soltanali[1*]

(Corresponding author), Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran. Iran.

Omid Bayat

MSc in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran. Iran.

Abstract

Health index is a tool to evaluate the functional condition of an equipment with the aim of improving its operational performance. In this research, the types of models available in the field of asset health index estimation along with their challenges and limitations were examined, based on a developed model. The proposed model was implemented in five different types of wind tunnel equipment fans, due to their significant maintenance and repair costs. The model proposed in this research in order to estimate the health index includes steps such as: 1) selecting the equipment and defining its class, 2) evaluating the effect of loading factors and location, 3) calculating the aging rate, 4) achieving the initial health index at age t and 5) evaluation of load effect, modifiers of health index and reliability, and calculation of current health index. Examining the values obtained from the fan health index, in the form of a graphic design, showed that it is possible to determine the speed of failure rate and the functional life of the equipment. The results of this research can be used in choosing the appropriate strategy for maintenance and repairs with the aim of improving the operational performance of other equipment.

Keywords: Health index, Equipment, Developed model, Maintenance, Wind tunnel turbine.

Introduction

Each equipment wears out during its lifetime and its health level decreases. To that end, it is very helpful to calculate the asset health index (AHI) and then draw the graph of the natural deterioration of the equipment. The AHI index is a relative number that is calculated during

[1] **Corresponding author email**: h.soltanali@ihu.ac.ir

the process of evaluating the condition of the equipment and indicates the level of health of the equipment [2, 3, 6].

Significant studies have been conducted on the importance of defining and estimating the health indicators of various types of equipment. Also, significant models and standards have been provided by different companies. For instance, the most well-known of them is the Kinetrics model, produced by the Canadian business Kinetrics, which offers an evaluation of the general condition of transformers. the load applied to the transformer, the number of operations, the results of laboratory analyses of transformer oil samples, tests carried out by technicians such as insulation tests, thermometry, corrosion status, etc. are just a few examples of the service and identification data, variable data from prior system operations, such as those mentioned previously, as well as other inputs to the model. This method ranks the various equipment subsystems (transformer) using evaluation algorithms and the data from the input variables [4]. DNVGL is a well-known model that is also used to determine a part's health index. DNVGL has proposed this model. This method offers a way to prioritize routine maintenance, significant repairs, and equipment replacement while also calculating the health index, the value of parts, and the reliability factor's upper and lower bounds [5]. The joint network model of UK DNO equipment indicators is another model. This model, which is presented within the framework of a standard reference, outlines the fundamental concepts and calculation techniques used by all UK electricity network operators to evaluate settings, forecast, and communicate equipment risks. This framework complies with Standard 51's (SLC 51) requirements. The useful life of the equipment is also determined by this model using statistical data. With the help of location data, the equipment's function code, as well as local conditions and reliability-related factors (health and reliability modifiers) that arise and change throughout the equipment life cycle, this method enables the initial estimation of useful life, which is later modified [1]. The purpose of this research is to present a new model that has common features of previous models and is capable of being used in any complex equipment, regardless of the type of technology, industrial sector, or place, etc.

A further contribution of the current study is the definition, justification, and application of health index theories to very important machinery, such as wind tunnels used in the nation's defense industries. In order to improve maintenance and repair programs and operational functions, among the most important requirements and concerns are the calculation and evaluation of the health index in wind tunnel equipment and the provision of a high-precision model. Therefore, the following are the study's most significant objectives and innovations:

- Analyzing the various models, techniques, and trends in the definition, computation, and assessment of equipment health index.

- Extraction of direct and indirect health index effective parameters through examination of earlier models.
- Development of a new model in health index calculations by combining previous models' parameters and effective criteria, as well as some new parameters obtained from experts.
- Implementation of the proposed model in wind tunnel equipment, which includes; a) defining the parameters/criteria based on the specific characteristics of the wind tunnel through the acquisition of expert opinions in the form of questionnaire design; b) how to combine these parameters with the goal of achieving the health index model; and c) using the results of the developed model in management decisions, including contract management between the employer and the contractor, raising the safety level, optimizing operational plans and maintenance in the wind tunnel equipment.

Methodology

The model proposed in this research in order to estimate the health index includes steps such as:

1) selecting the equipment and defining its class

The first stage requires gathering information about the location of equipment performance, physical data of the equipment, and estimating the normal life of the equipment. We check equipment identification and location information, for example:

- The location of the equipment in the factory management system where the equipment is located.

-The equipment's inside/outside status. This parameter is used to calculate the impact of external factors on the equipment health index.

- Distance to the coast: As with the previous parameter, this parameter is considered to be aware of the possibility of equipment damage due to the humid and corrosive environment near the coast.

- The average temperature of the external environment: the average annual temperature in the environment is obtained from the average temperature of the external environment, and this directly affects the performance of the equipment in the environment.

- Proximity to factors such as suspended dust and a corrosive environment. The proximity of facilities to sources of industrial emissions of suspended dust and corrosive agents accelerates long-term deterioration.

2) evaluating the effect of loading factors and location

After gathering all of the previous step's information, the location and loading factors are evaluated (as previously stated, the loading factor is indirectly related to the technical position of the equipment). Because each of the factors is affected by more than one variable, a combined factor must be calculated for each of them.

3) calculating the aging rate

The chosen method is based on the basic assumption that the aging of the equipment has an exponential behavior with respect to its working life. The aging rate is a model parameter that allows the mathematical expression of this behavior and is also related to the various phenomena that the equipment experiences during its useful life, such as corrosive phenomena, wear, oil oxidation, insulation breakdown, and so on. The calculated estimated life is obtained by determining the relationship between the natural logarithm of the health benefit of the new equipment and the health index of the equipment after reaching the estimated life.

4) achieving the initial health index at age t.

As previously stated, the health index is a dimensionless number ranging from 0.5 to 10, and it behaves exponentially with respect to the service life of the equipment (t), which is defined by the aging rate of the equipment. For the initial calculation of an equipment's health index (HI_i), equation (6) is used, where t is the equipment's current working life (in time unit) and the aging rate is calculated in the final stage.

5) evaluation of load effect, modifiers of health index and reliability, and calculation of current health index.

Using multiple load, health, and reliability modifiers, the health index (HI) adjusts the initial health index obtained in the fourth step.

Findings

Based on the proposed model, the results showed that fans with an index higher than 5.5 must be overhauled or replaced in the near future. Therefore, wind tunnel fan number 5 urgently needs major repair and periodic visits. Tunnel fan number 2 also has a health index of 5.5 and needs periodic inspections, and it can be overhauled for better equipment performance and to reduce the amount of damage, but its operation is not finished. Further, according to Figure (1), we can conclude that fan number 3 also has a higher AHIΔ rate than fan number 4 due to its near life and even younger age. Therefore, in the next visits, it should be noted that if this condition and situation continues, it should be repaired, and the problem solved.

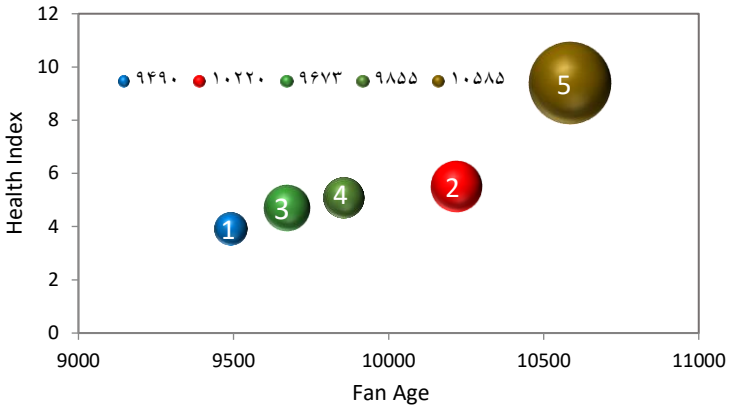


Fig. 1. The results of health index for wind tunnel turbine

Conclusion

Examining the values obtained from the fan health index, in the form of a graphic design, showed that it is possible to determine the speed of failure rate and the functional life of the equipment. The results of this research can be used in choosing the appropriate strategy for maintenance and repairs with the aim of improving the operational performance of other equipment. The results of the proposed AHI model showed that it is possible to determine the speed of failure rate and the functional life of the equipment. The results can be used in choosing the appropriate maintenance strategy with the aim of improving operational performance in other equipment. Similar to any other research, the current study has presented suggestions aimed at improving the quality and accuracy of the proposed model in calculating the health index, which can be of interest to researchers in future studies. take Because the model used in the current study is primarily used during the operation phase, there is a possibility of expanding the current model to be applicable throughout the equipment's life cycle, particularly during the design and construction phases. On the other hand, in the current study, the process of modeling the failure rate and reliability of the equipment is based on the exponential distribution function by default; thus, other distribution functions, particularly the Weibull distribution, are recommended to investigate the effect of the type of distribution function on the health index values. Because the presented health index values were calculated without sensitivity analysis or considering the uncertainty of the values in the current study, it is recommended that fuzzy theories be used to obtain expert opinion. Furthermore, one of the suggestions that can be investigated in future studies is the weighting of the criteria affecting the health index based on the functional conditions of each piece of equipment. On the other hand, laboratory tests are suggested to increase the accuracy of some influential criteria in the calculation of the equipment health index.

References

[1] DNO-Network Asset Indices Methodology Working Group. (2015). DNO Common Network Asset Indices Methodology.

[2] Durán, O., Orellana, F., Perez, P., & Hidalgo, T. (2020). Incorporating an asset health index into a life cycle costing: A proposition and study case. Mathematics, 8(10), 1787.

[3] Hastings, N. (2010). Physical Asset Management. Second Edition, Springer Pulisher

[4] Naderian, A., Cress, S., Piercy, R., Wang, F., & Service, J. (2008, June). An approach to determine the health index of power transformers. In Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (pp. 192-196). IEEE.

[5] Vermeer, M., Wetzer, J., van der Wielen, P., de Haan, E., & de Meulemeester, E. (2015, June). Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model. In 2015 IEEE Eindhoven PowerTech (pp. 1-6). IEEE.

[6] Zille, V., Berenguer. C., Grall, A., & Depujols, A. (2010). Simulation of maintained multicomponent systems for dependability analysis. In A. Faulin, S. Martorell, & J. Ramirez-Márquez (Eds.) Simulation methods for reliability and availability of complex systems. Berlin: Springer (Chapter 12). (pp. 253–272)**.**