دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان برای سیستم اینورتر تراکشن قطار شهری مشهد

نگارنده:

حمیدرضا زحمت‌کش

استاد راهنما:

دکتر محسن اصیلی

آذر ۱۳۹۶

شماره ۱۵۳۸/ت.ت
تاریخ: ۹۶/۱۱/۹

باسمه‌تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم /آقای**حمیدرضا زحمت‌کش** با شماره دانشجویی **۹۴۰۸۷۹۴** رشته **مهندسی برق- قدرت** گرایش سیستم تحت عنوان : **پیاده سازی، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان، برای سیستم اینورتر تراکشن قطار شهری مشهد** که درتاریخ **۱۳۹۶/۱۱/۰۹** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) ☑ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ■ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	محسن اصیلی	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم	—	—	
۳- استاد مشاور	—	—	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	رحمتی شیرای	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	مرتضی رحیمیان	دانشیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	یاسر اجرلو	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

همسر عزیزم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یاوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

با تشکر از پدر و مادر عزیزم

که همیشه به عنوان پشتوانه‌ای قوی در کنارم بوده‌اند.

از استاد گرامیم جناب آقای دکتر محسن اصیلی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تأمین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌نمود.

این پایان‌نامه با حمایت مالی مرکز پژوهش‌های شورای اسلامی شهر مشهد انجام شده است.

از شرکت قطار شهری مشهد و کارمندان آن، به خصوص جناب آقای مهندس علی‌محمد مشیری برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز این پایان‌نامه، بسیار متشکر و سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب **حمیدرضا زحمت‌کش** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق قدرت- گرایش سیستم‌های قدرت** دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با عنوان **پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان برای سیستم اینورتر ترکشن قطار شهری مشهد** تحت راهنمایی **دکتر محسن اصیلی** متعهد می‌شوم:

• تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
• در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
• مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
• کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
• حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
• در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافتهای آن) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
• در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

• کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
• استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

نگهداری و تعمیرات یکی از فعالیت‌های مهم و ضروری در صنعت امروز جهان است، لذا پیاده‌سازی یک مدل کارآمد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. سیستم اینورتر ترکشن به عنوان درایو موتورهای آسنکرون در سیستم کششی واگن‌های قطار شهری بکار می‌رود. کار مداوم سیستم حمل و نقل قطار شهری مستقیماً با عملکرد صحیح این تجهیز ارتباط دارد. در این پایان‌نامه، از توصیه‌های سازنده، مجموعه کارشناسان خبره قطار شهری مشهد و همچنین بازدید مستقیم از سیستم مورد نظر، برای پیاده‌سازی روش RCM II استفاده شده است. گام‌های مهم مورد استفاده عبارتند از: انتخاب تجهیز، تهیه لیست کارکردهای کلیدی، شناسایی خرابی‌ها (خرابی کارکرد، دلایل وقوع خرابی، اثرات خرابی و پیامدهای خرابی)، انتخاب تاکتیک‌های تعمیرات مؤثر و عملی برای اینورتر ترکشن و در نهایت برنامه-ریزی و پیاده‌سازی تاکتیک‌های انتخابی اینورتر ترکشن. این پایان‌نامه بر روی بخش اینورتر ترکشن به‌عنوان یک سیستم حیاتی در قطار شهری مشهد متمرکز است. به عنوان یک نوآوری، روشی ابتکاری، برگرفته از مقالات پیشین و جدول تصمیم‌گیری RCM II، برای اولویت‌بندی تجهیزات در برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات استفاده شده است که معیارهای اقتصادی و فنی را در نظر گرفته است. نتایج و ایده‌های حاصله علاوه بر استفاده مستقیم در بخش نگهداری و تعمیرات قطار شهری مشهد در سایر سیستم‌های مشابه حمل و نقل ریلی کاملاً قابل استفاده می‌باشد و نمایانگر آن است که RCM II نه‌تنها ایمنی و دسترس‌پذیری سیستم را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه نگهداری و تعمیرات را نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: اینورتر ترکشن، قابلیت اطمینان، قطار شهری، نگهداری و تعمیرات

لیست مقالات مستخرج از پایان‌نامه:

زحمت‌کش. ح، اصیلی. م، مشیری. ع، (۱۳۹۷)، " برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی نگهداری و تعمیرات در سیستم اینورتر ترکشن قطار شهری با استفاده از روش RCM II"، نشریه مهندسی صنایع، دانشگاه تهران (در دست داوری)

زحمت‌کش. ح، اصیلی. م، مشیری. ع، (۱۳۹۷)، "پیاده‌سازی RCM II در زیرسیستم اینورتر پالس قطار شهری مشهد"، بیست و ششمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه صنعتی سجاد (در دست داوری)

زحمت‌کش. ح، اصیلی. م، مشیری. ع، (۱۳۹۶)، "پیاده‌سازی RCM II در زیرسیستم ECON قطار شهری مشهد"، دوازدهمین کنفرانس پایش وضعیت ایران، دانشگاه صنعتی شریف (تأیید شده)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- تاریخچه کوتاهی از نگهداری و تعمیرات ۲

۱-۲- توضیح کلی پایان‌نامه ۲

۱-۳- اهمیت و هدف پایان‌نامه ۴

۱-۴- نوآوری پایان‌نامه ۵

۱-۵- اشاره به مطالب فصل های بعدی ۶

فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- تعریف RCM از دیدگاه های مختلف ۸

۲-۳- روش های مختلف نگهداری و تعمیرات ۸

۲-۴- تاریخچه‌ی کوتاهی از پیدایش RCM II ۱۰

۲-۵- پیاده‌سازی RCM در مقالات مختلف ۱۱

پیاده‌سازی RCM در قطار با سرعت بالای چین [۱۱] ۱۳

پیاده سازی RCM برای مجموعه چرخ‌های واگن قطارهای مسافری راه آهن ایران [۱۲] ۱۵

پیاده‌سازی RCM برای قطع‌کننده‌ی مدار [۱۳] ۱۶

پیاده‌سازی RCM برای بخشهای اصلی کمپرسور [۱۴] ۱۷

پیاده‌سازی RCM برای تجهیزات الکتریکی مهم [۹] ۱۸

پیاده‌سازی RCM برای ریزشبکه خورشیدی با باتری [۱۵] ۱۸

پیاده‌سازی RCM با استفاده از عملکرد دینامیکی [۱۶] ۲۰

پیاده‌سازی RCM با استفاده از روش AHP ۲۱

پیاده‌سازی RCM با استفاده از الگوریتم ژنتیک در سیستم ۹ و ۱۱۸ شینه [۱۹] ۲۱

پیاده‌سازی RCM برای سیستم توزیع [۴] ۲۲

پیاده‌سازی RCM برای واحدهای تولیدی ۲۳

فصل سوم: شناسایی تجهیزات و سیستم اینورتر ترکشن ۲۵

۳-۱- تئوری روش کار اینورتر ترکشن ۲۶

۳-۱-۱- عملکرد مبدل پالس PI ۲۶

۳-۱-۲- کنترل موتور ترکشن ۲۸

۳-۱-۳- الگو پالس ژنراتور ۲۹

۳-۱-۴- مشخصات فنی سیستم اینورتر ترکشن ۲۹
۳-۲- نواحی سیستم اینورتر ترکشن ۳۰
۳-۲-۱- ناحیه ۱، ناحیه قدرت: ۳۱
۳-۲-۲- ناحیه ۲، ناحیه econ: ۳۲
۳-۲-۳- ناحیه ۳، ناحیه خروجی: ۳۳
۳-۲-۴- ناحیه ۴، ناحیه فن: ۳۳
۳-۲-۵- ناحیه ۵، ناحیه کنتاکتور: ۳۴
فصل چهارم: پیاده‌سازی نت RCM II (تحلیل حالات و اثرات خرابی)..... ۳۵
۴-۱- وضعیت های خرابی در عملکردهای اصلی و عملکردهای ثانویه ۳۶
۴-۱-۱- عملکردهای اصلی سیستم اینورتر ترکشن: ۳۷
۴-۱-۲- عملکردهای ثانویه سیستم اینورتر ترکشن ۳۹
۴-۲- چگونگی بدست آوردن دلایل خرابی ۴۱
۴-۳- چگونگی بدست آوردن اثرات خرابی ۴۲
۴-۴- منابع اطلاعاتی FMEA ۴۳
فصل پنجم: پیاده‌سازی نت RCM II (تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی)..... ۵۵
۵-۱- الگوریتم درخت تصمیم‌گیری RCM ۵۶
۵-۲- شرح منحنی P-F ۶۰
۵-۳- منحنی بر حسب عمر مفید ۶۳
۵-۴- فعالیت جستجوی خرابی ۶۶
۵-۵- اجرای جدول تصمیم‌گیری RCM ۶۸
۵-۶- برتری تجهیزات با استفاده از روش ابتکاری در برنامه‌ی RCM II ۷۹
فصل ششم: نتیجه گیری، جمع بندی (برنامه‌ی نهایی)..... ۸۵
A- پیوست..... ۹۴
A-۱- بررسی و توضیحات تجهیزات سیستم اینورتر ترکشن ۹۵
A-1-1- کنتاکتور شارژ ۹۵
A-1-2- کنتاکتور اصلی ۹۶
A-1-3- قطع کننده‌ی مدار کنترل بالا (HSCB) ۹۶
A-1-4- خازن DC-LINK ۹۷
A-1-5- دو مبدل پالس ۱PI و ۲PI ۹۷
A-1-6- کنترل موتور ترکشن (ECON) ۹۸

A-1-7- ترمز چاپرBC ۱ و ۲BC ۹۹
A-1-8- گیت درایو کنترل GDC ۱۰۰
A-1-9- ترانزیستور دوقطبی گیت ایزوله IGBT ۱۰۰
A-1-10- فن ۱۰۱
A-1-11- مقاومت دشارژ ۱۰۲
A-1-12- برقگیر ۱۰۲
A-1-13- خازن EMC ۱۰۲
A-1-14- گیت بورد GB ۱۰۳
A-1-15- ترانس اندازه‌گیری جریان ۱۰۴
A-1-16- مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt ۱۰۴
A-1-17- باسبار انتقال HIGH VOLTAGE ۱۰۴
A-1-18- سنسورهای دما ۱۰۵
A-1-19- نوارهای عایقی PI ۱۰۵
A-1-20- دسته حمل ۱۰۶
A-1-21- پیچ‌های نگهدارنده ۱۰۶
A-1-22- کارت های ECON ۱۰۶
A-1-23- فیلتر ۲۴ ولت DC ۱۰۸
A-1-24- منبع تغذیه ۲۴ ولت ۱۰۸
A-1-25- پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی ۱۰۹
A-1-26- فیلتر FRIT ۱۱۰
A-1-27- شین‌های انتقال ولتاژ ۱۱۱
A-1-28- مقره عایق کننده شین‌ها ۱۱۱
A-1-29- مقاومت شارژینگ ۱۱۱
A-1-30- دریچه خروجی هوا ۱۱۲
A-1-31- فیلتر سلفی خط ۱۱۲
A-1-32- کابل گلند بیرونی ۱۱۳
A-1-33- سنسور دمای داخلی فیلتر سلفی خط ۱۱۳
A-1-34- ترانس فن خنک‌کننده ۱۱۳
A-1-35- کنتاکتورهای فرمان فن ۱۱۴
A-1-36- ترانسدیوسر های ولتاژ ۱۱۴

A-1-37- ترانس تفاضلی (جریان صفر) ۱۱۴
A-1-38- کنتاکتورهای کمکی K1 و K2 ..... ۱۱۵
A-1-39- کابل‌های ولتاژ بالا (HIGH VOLTAGE) ۱۱۵
A-1-40- مقره عایق کننده باس ها از بدنه ۱۱۵
A-1-41- قفل و لولا ۱۱۶

فهرست شکل‌ها

شکل ۲- ۱- انواع منحنی‌های خرابی تجهیزات واقعی [۱۰]..... ۱۳

شکل ۲- ۲- رزرو کانورترها در سیستم ترکشن..... ۱۴

شکل ۲- ۳- الگوریتم تصمیم‌گیری **RCM** برای قطار رجا [۱۲]..... ۱۶

شکل ۲- ۴- مدل حالت تجهیزات با اهمیت [۱۹]..... ۲۱

شکل ۳-۱: نحوه سوئیچینگ در کلیدهای **igbt** [۲۲]..... ۲۷

شکل ۳-۲- تصویر اینورتر ترکشن با تعیین نواحی..... ۳۱

شکل ۳-۳- رسم اینورتر ترکشن با نواحی مجزا [۲۱]..... ۳۱

شکل ۳-۴- رسم ناحیه قدرت با جزئیات [۲۱]..... ۳۲

شکل ۳-۵- رسم ناحیه **ECON** با جزئیات [۲۱]..... ۳۲

شکل ۳-۶- رسم ناحیه‌ی خروجی با جزئیات [۲۱]..... ۳۳

شکل ۳-۷- رسم ناحیه فن با جزئیات [۲۱]..... ۳۳

شکل ۳-۸-رسم ناحیه کنتاکتور به همراه جزئیات [۲۱]..... ۳۴

شکل ۵-۱- الگوریتم درخت تصمیم‌گیری **RCM** (با تغییر در شاخه **O**۱ مرجع [۲۳])..... ۵۹

شکل ۵- ۲- منحنی **P-F** مربوط به نوار عایقی **PI**..... ۶۰

شکل ۵- ۳- منحنی عمر - احتمال خرابی پیچ‌های دسته حمل..... ۶۳

شکل ۵- ۴- تقسیم‌بندی جدول تصمیم‌گیری **RCM II** برای امتیازدهی به تجهیزات..... ۷۹

شکل ۵-۵- نمودار میله ای امتیازات اولویت برای تجهیزات اینورتر ترکشن..... ۸۳

شکل **A**-۱- تجهیز کنتاکتور شارژ در اینورتر ترکشن..... ۹۵

شکل **A**-۲- تجهیز کنتاکتور اصلی در اینورتر ترکشن..... ۹۶

شکل **A**-۳- تجهیز قطع کننده‌ی مدار کنترل بالا در سیستم اینورتر ترکشن..... ۹۶

شکل **A**-۴- خازن **dc-link** در تجهیز اینورتر ترکشن..... ۹۷

شکل **A**-۵- تجهیز **pi** در تجهیز اینورتر ترکشن از نمای بالا..... ۹۷

شکل **A**-۶- تجهیز **pi** در تجهیز اینورتر ترکشن از نمای روبروُ..... ۹۸

شکل **A**-۷- تجهیز **econ** در سیستم اینورتر ترکشن..... ۹۹

شکل **A**-۸- مجموعه ترمز چاپر در اینورتر ترکشن..... ۱۰۰

شکل **A**-۹- نمای بالا از تجهیز **gdc**..... ۱۰۰

شکل **A**-۱۰-تجهیز **IGBT** در قسمت **pi**..... ۱۰۱

شکل A-۱۱- تجهیز فن در سیستم اینورتر ترکشن ۱۰۱
شکل A-۱۲- سیستم مقاومت دشارژ ۱۰۲
شکل A-۱۳- خازن EMC ۱۰۳
شکل A-۱۴-گیت برد از نمای بالا در مجموعه ترمز چاپر BC ۱۰۳
شکل A-۱۵-گیت برد از نمای بالا در مجموعه PI ۱۰۳
شکل A-۱۶- ترانس اندازه‌گیری جریان ۱۰۴
شکل A-۱۷- مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt ۱۰۴
شکل A-۱۸- باسبار انتقال ولتاژ بالا ۱۰۵
شکل A-۱۹- سنسور دما در اینورتر ترکشن ۱۰۵
شکل A-۲۰- دور دریچه محفظه هدسینک، نوار عایقی جهت جلوگیری از ورود گردو غبار وجود دارد ۱۰۵
شکل A-۲۱- دسته‌ی حمل در مجموعه pi ۱۰۶
شکل A-۲۲- پیچ‌های نگهدارنده ۱۰۶
شکل A-۲۳- کارت AVI در مجموعه econ ۱۰۷
شکل A-۲۴-کارت DVI1 در مجموعه econ ۱۰۷
شکل A-۲۵-کارت DVI2 در مجموعه econ ۱۰۷
شکل A-۲۶-کارت GDI در مجموعه econ ۱۰۷
شکل A-۲۷-کارت PB در مجموعه econ ۱۰۸
شکل A-۲۸-کارت TCI در مجموعه econ ۱۰۸
شکل A-۲۹- فیلتر ۲۴ ولت dc ۱۰۸
شکل A-۳۰- منبع تغذیه ۲۴ ولت ۱۰۹
شکل A-۳۱- نوعی از کانکتور الکتریکی ۱۰۹
شکل A-۳۲- نوعی از کانکتور الکتریکی ۱۰۹
شکل A-۳۳- تصویر پین‌ها برای اتصال به کانکتورها ۱۱۰
شکل A-۳۴- فیلتر frit1 ۱۱۰
شکل A-۳۵- فیلتر frit2 ۱۱۰
شکل A-۳۶- شین‌های انتقال ولتاژ ۱۱۱
شکل A-۳۷- مقره از جنس میکا ۱۱۱
شکل A-۳۸- مقاومت شارژینگ ۱۱۱
شکل A-۳۹- دریچه خروجی در محفظه اینورتر ترکشن ۱۱۲

شکل A-۴۰- فیلتر سلفی خط ۱۱۲
شکل A-۴۱- کابل گلند بیرونی اینورتر ترکشن ۱۱۳
شکل A-۴۲- نمای بالا از سنسور دما ۱۱۳
شکل A-۴۳- ترانس فن خنک‌کننده ۱۱۳
شکل A-۴۴- کنتاکتور فرمان فن ۱۱۴
شکل A-۴۵- ترانسدیوسر ولتاژ ۱۱۴
شکل A-۴۶- ترانس تفاضلی جریان صفر ۱۱۴
شکل A-۴۷- کنتاکتور کمکی ۱۱۵
شکل A-۴۸- کابل‌های ولتاژ بالا در محفظه اینورتر ترکشن ۱۱۵
شکل A-۴۹- مقره عایق کننده در پایین شکل از جنس میکا ۱۱۶
شکل A- ۵۰- قفل های در اینورتر ترکشن ۱۱۶
شکل A-۵۱- لولای در اینورتر ترکشن ۱۱۶

فهرست جداول

جدول ۳- ۱- مشخصات فنی اینورتر ترکشن..... ۳۰

جدول ۴- ۱- جدول تحلیل حالات و اثرات خرابی عملکردهای اولیه‌ی تجهیز اینورتر ترکشن..... ۴۴

جدول ۴- ۲- جدول تحلیل حالات و اثرات خرابی عملکردهای ثانویه..... ۵۱

جدول ۵- ۱- بررسی توجیه‌پذیری پیداکردن خرابی بر اساس منحنی P-F برای کارکردهای اصلی..... ۶۱

جدول ۵- ۲- بررسی توجیه‌پذیری پیداکردن خرابی بر اساس منحنی P-F برای کارکردهای ثانویه..... ۶۲

جدول ۵- ۳- جدول بررسی توجیه‌پذیری تعمیر زمان بندی شده برای تجهیز بر اساس منحنی عمر مفید برای کارکردهای اولیه..... ۶۴

جدول ۵- ۴- جدول بررسی توجیه‌پذیری تعمیر زمان بندی شده برای تجهیز بر اساس منحنی عمر مفید برای کارکردهای ثانویه..... ۶۵

جدول ۵- ۵- فعالیت جستجوی خرابی برای تجهیزات اینورتر ترکشن..... ۶۷

جدول ۵-۷- جدول تصمیم‌گیری RCM برای کارکردهای اولیه..... ۶۹

جدول ۵- ۸- جدول تصمیم‌گیری RCM برای کارکردهای ثانویه..... ۷۶

جدول ۵-۹- تجهیزات در جدول تصمیم‌گیری RCM II..... ۸۱

جدول ۵-۱۰- امتیازات اولویت برای تجهیزات اینورتر ترکشن..... ۸۲

جدول۶ - ۱- نمونه ای از برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات کوتاه مدت (روزانه تا ماهانه)..... ۸۷

جدول ۶- ۲- نمونه‌ای از برنامه نگهداری و تعمیرات بلند مدت (۳ ماهه تا ۱۵ ساله)..... ۸۸

فصل اول: مقدمه

۱-۱- تاریخچه کوتاهی از نگهداری و تعمیرات

همه‌ی تجهیزات، به علت طبیعت جهان، در حال فرسایش هستند. در تجهیزات گذشته، می‌توان گفت به علت سادگی در طراحی، عامل خرابی فقط فرسایش بود، بنابراین تنها استفاده از نگهداری و تعمیرات، زمانی بود که تجهیز خراب شود، آنگاه کارکنان مربوطه تجهیز را تعمیر یا تعویض می‌کردند. با پیچیدگی بیشتر تجهیزات، نگهداری و تعمیرات (نت) پیشرفت کرده و فعالیت‌های نت بر اساس زمان، نت اصلاحی، نت بهره‌ور و نت مبتنی بر وضعیت به وجود آمدند (همگی نت‌های گفته شده دارای مزایا و معایب خاص خود هستند که به طور کامل در فصل بعد توضیح داده می‌شود)؛ بنابراین باید فعالیتی وجود داشته باشد که هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات کم و قابلیت اطمینان بالا داشته باشد. از طرفی فعالیت‌های نت گفته شده، اهمیت ایمنی انسان‌ها را آن‌چنان‌که باید، در نظر نگرفته است. از این رو، وزارت دفاع آمریکا مأموریتی به خطوط هوایی می‌دهد تا نگهداری و تعمیراتی تحت عنوان نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه دهند که مشکلات گفته شده را رفع نماید. با نتایج نشان داده شده، متخصصین نت به فعالیت نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM[1]) علاقه‌مند می‌شوند؛ اما هنوز هم قسمتی از این فعالیت نقص داشت و آن این بود که برای مشکلات زیست محیطی اهمیتی قائل نبود؛ بنابراین جان موبری و همکارانش فعالیت RCM را توسعه داده و مشکلات زیست محیطی را هم در این فعالیت جای دادند. این تغییرات به قدری مهم بودند که نت RCM به نت RCM II تغییر نام یافت.

۱-۲- توضیح کلی پایان‌نامه

نت RCM، با استفاده از شناسایی عملکردهای اصلی و ثانویه ، شناخت خرابی‌ها، دلایل خرابی و تحلیل اثرات خرابی، خرابی‌های منجر به عدم عملکرد اینورتر ترکشن و زیرسیستم‌های آن را می‌شناساند و تحلیل

[1] reliability centered maintenance

خوبی از خرابی‌ها به کارکنان مربوطه می‌دهد. در گام بعد با استفاده از درخت تصمیم‌گیری، خرابی‌های پنهان و آشکار، خرابی‌های دارای مسائل ایمنی و زیست‌محیطی و خرابی‌های عملیاتی و غیرعملیاتی را بر اساس توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی، کشف خرابی و چگونگی رفتار با خرابی جداسازی می‌نماید. قسمت‌های بدست آمده به همراه دوره‌ی زمانی، فعالیتی که باید انجام شود و شخص انجام دهنده فعالیت، در جدول تصمیم‌گیری، قرار می‌گیرد. برنامه‌ی ارائه شده، دستورات تعمیر، تعویض، بررسی و حتی دستور عدم نیاز به نت را با زمان مورد نیاز آن‌ها، به تکنسین مورد نظر، می‌دهد.

فعالیت RCM II، به هفت سؤال پاسخ می‌دهد که عبارتند از: ۱- کارکردها و استانداردهای تجهیز چیست؟ ۲-به چه صورتی تجهیز می‌تواند از کارکرد خود متوقف گردد؟ ۳- دلایل هرکدام از خرابی‌ها چیست؟ ۴- اگر خرابی رخ دهد، چه اتفاقی می‌افتد؟ ۵- هر خرابی چقدر مهم است؟ ۶- برای پیش‌بینی و پیش‌گیری هر خرابی، چه می‌توان کرد؟ ۷- اگر نتوان فعالیت پیش اقدام مناسبی پیدا کرد، چه باید کرد؟

کامل نمودن دو جدول FMEA[1] و تصمیم‌گیری، مهم‌ترین بخش‌های پیاده‌سازی RCM II می‌باشند. برای جدول FMEA، در گام اول، عملکردهای اصلی و فرعی اینورتر ترکشن انتخاب گردیده است. در گام دوم، خرابی تجهیزاتی که سبب عدم این عملکردها می‌شوند، مشخص شده است. در گام سوم، دلایل خرابی این تجهیزات گفته شده است. در گام چهارم، اثرات این خرابی‌ها در عملیات، ایمنی و محیط زیست و زمان توقف قطار، بررسی گردیده است. همچنین برای جدول تصمیم‌گیری، در گام اول خرابی‌های آشکار و پنهان را از یکدیگر جدا نموده و برای خرابی‌های آشکار، اگر این خرابی‌ها، تأثیر بر ایمنی و محیط زیست نداشته باشند، تأثیرات بر عملیات بررسی می‌گردد. در گام دوم، توجیه‌پذیر بودن از لحاظ فنی پیدا کردن خرابی‌های پنهان، خرابی‌هایی که تأثیر بر ایمنی و محیط زیست دارند، خرابی‌های عملیاتی و غیرعملیاتی با استفاده از منحنی P-F بررسی می‌گردد. درگام سوم، اگر پیدا کردن خرابی‌ها از نظر فنی توجیه‌پذیر و از نظر اقتصادی

[1] Failure Mode Effects Analysis

به صرفه نبود، برنامه‌ی تعمیر زمان بندی شده با استفاده از منحنی عمر مفید بررسی می‌شود و اگر تجهیز دارای تعریف عمر مفید بود و تعمیر زمان بندی شده‌ای که توجیه‌پذیر باشد، یافت نشد، تعویض زمان بندی شده، انجام می‌پذیرد. در گام چهارم، اگر تجهیز دارای عمر مفید نیز نبود، برای خرابی‌های پنهان، فعالیت جستجوی خرابی، بررسی می‌گردد. در گام پنجم، اگر فعالیت جستجوی خرابی هم توجیه‌پذیر نباشد، ترکیبی از فعالیت‌ها و نهایتاً باز طراحی صورت می‌گیرد.

نت پیاده‌سازی شده، توجه زیادی به خرابی‌های پنهان دارد، به طوری که شاخه‌ای از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری را به این خرابی اختصاص داده است. خرابی پنهان عامل بسیار مهمی است که معمولاً در فعالیت‌های نت دیگر، مورد توجه نیست. این خرابی که معمولاً برای تجهیزات محافظ رخ می‌دهد، در صورت رفع نشدن می‌تواند سبب پیامدهای جدی گردد. این نت دارای مدیریتی قوی برای خرابی است و به دلیل سوال‌های مکرر و ریزبینانه‌ی الگوریتم تصمیم‌گیری در تمامی مسائل عملیاتی و ایمنی، هیچ نوع خرابی یا دلیل خرابی نادیده گرفته نمی‌شود. دیدگاه RCM II آن گونه نیست که حتماً باید از همه‌ی خرابی‌ها جلوگیری کرد، بلکه وابسته به شرایطی همچون هزینه‌ی زیاد نگهداری و تعمیرات نسبت به قیمت تجهیز، عملیاتی نبودن و توجیه‌پذیر نبودن از نظر فنی، اجازه می‌دهد که تجهیز خراب گردد. در این پروژه، نت RCM II برای سیستم اینورتر ترکشن قطار شهری مشهد با توجه به داده‌های ۷ سال گذشته (۱۳۸۹-۱۳۹۶)، پیاده‌سازی گردیده است.

۱-۳- اهمیت و هدف پایان‌نامه

اینورتر ترکشن به دلیل تأمین ولتاژ AC برای ترکشن قطار، یکی از سیستم های حیاتی و مهم برای قطار شهری محسوب می‌شود. چنانچه یکی از تجهیزات اصلی این سیستم خراب گردد، منجر به عدم عملکرد اینورتر ترکشن و نهایتاً عدم حرکت قطار می‌گردد. از طرفی، ولتاژ ورودی به این تجهیز ۷۵۰ ولت مستقیم است، لذا اگر ایمنی مناسب برای این سیستم صورت نگیرد، می‌تواند خطر جانی برای کارکنان داشته باشد.

برای هر شرکتی، کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان عامل های مهمی هستند؛ بنابراین باید فعالیتی کشف نمود که خطرات ایمنی را حذف و خرابی‌ها و هزینه را کاهش و قابلیت اطمینان را افزایش دهد. نگهداری و تعمیرات RCM II، به علت دارا بودن خواسته های گفته شده، بهترین فعالیت برای این سیستم می‌باشد.

به علت اهمیت موضوع نگهداری و تعمیرات به خصوص برای تجهیزات حیاتی همچون اینورتر ترکشن، نت RCM II انتخاب و برای این پروژه پیاده‌سازی گردیده است. نتایج نهایی این پروژه نشان‌دهنده‌ی کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان، افزایش ایمنی، انتقال دانش اینورتر ترکشن و زیرسیستم‌های آن، انتقال دانش خرابی‌های اینورتر ترکشن و تجهیزات داخلی آن به تکنسین‌های مربوطه و مدیریت برنامه-ریزی در نگهداری و تعمیرات است. نتایج بدست آمده از این پژوهش به‌عنوان یک نمونه از پیاده‌سازی RCM برای یک تجهیز در صنعت، حاکی از آن است که پروژه موفق‌آمیز بوده و می‌توان نت RCM II را برای سایر سیستم‌های حیاتی و مهم دیگر پیاده‌سازی نمود.

۱-۴- نوآوری پایان‌نامه

پروژه‌ی پیش رو برای اولین بار، برای تجهیز اینورتر ترکشن قطار شهری مشهد پیاده‌سازی گردیده است و از این لحاظ ایده‌ای نو را پیشنهاد می‌دهد. در بعضی از قسمت‌های این پروژه به‌عنوان نوآوری فعالیت نت، تغییراتی در روش جان موبری همچون عدم تعویض زمان بندی شده‌ی تجهیز در خرابی‌های غیرعملیاتی صورت گرفته است. در فصل پایانی این پایان‌نامه، یک روش ابتکاری با دادن امتیازات به تجهیزات با معیارهای اقتصادی و فنی، با استفاده از جدول تصمیم‌گیری RCM II برای اولویت برتری تجهیز در برنامه‌ی نت، نوآوری دیگری است که در این پایان‌نامه استفاده گردیده است.

۱-۵- اشاره به مطالب فصل های بعدی

در فصل دوم، اشاره‌ای به روش‌های مختلف نت و تاریخچه‌ی مختصری از آن‌ها، پیاده‌سازی RCM در تجهیزات مختلف و تفاوت نت RCM II با بقیه‌ی نت ها، از دیدگاه مقالات و نویسندگان مختلف پرداخته شده و نقد گردیده است. در فصل سوم، به معرفی اینورتر ترکشن و خصوصیات آن پرداخته شده است. در فصل چهارم، تحلیل اثرات و حالات خرابی شرح داده شده است. در فصل پنجم، با استفاده از درخت تصمیم‌گیری و جدول تصمیم‌گیری، برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات ارائه و با استفاده از روش ابتکاری، اولویت-بندی شده است و نهایتاً در فصل ششم، به نتیجه‌گیری پروژه، پرداخته شده است.

فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین

۲-۱- مقدمه

در این فصل، به تعاریف RCM از دیدگاه‌های مختلف، روش‌های مختلف نگهداری و تعمیرات، چگونگی شکل گرفتن RCM II و انواع روش‌های پیاده‌سازی RCM برای تجهیزات مختلف پرداخته شده است.

۲-۲- تعریف RCM از دیدگاه های مختلف

فرآیندی است که بکار می رود تا تعیین شود انجام چه فعالیت‌هایی برای نگه داشتن دارایی‌های فیزیکی در سطح مشخصی از کارآیی (مطابق با نظر استفاده‌کنندگان از آن‌ها) و حفظ کارکرد[1] آنها ضرورت دارد [۱].

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) در استاندارد IEC به عنوان روشی برای شناسایی و انتخاب سیاست‌های مدیریت انتخاب خرابی و رسیدن به ایمنی مورد نیاز، در دسترس بودن و اقتصاد عملیات تعریف شده است [۲].

RCM یک فرایند تصمیم‌گیری سیستماتیک برای حفظ تعادل بین اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی و انتخاب برنامه های نگهداری و تعمیرات مقرون به صرفه به منظور بهبود قابلیت اطمینان است [۳].

RCM به عنوان یک کلید مؤثر برای راه‌حل‌های اقتصادی برای مسائل دشوار نگهداری و تعمیرات در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته ارائه شده است [۴].

۲-۳- روش های مختلف نگهداری و تعمیرات

برای نگهداری و تعمیرات، روش‌های مختلفی وجود دارد که عبارتند از:

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر خرابی: تا قطعه ای خراب نشود، آن را تعمیر یا تعویض نمی‌کنند.

---

[1] function

نگهداری و تعمیرات اصلاحی: تعمیراتی که با توجه به گزارشات مسئولین مربوطه برای اصلاح خرابی یک تجهیز، برای جلوگیری از خرابی ثانویه انجام می‌شود.

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه: مدیریت حفظ تجهیزات قبل از خرابی را می‌توان نت پیشگیرانه نامید [۵].

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر زمان: نوعی نت پیشگیرانه است که قبل از وقوع خطا انجام می‌شود. در تعمیرات پیشگیرانه بر اساس زمان، در یک مدت زمان ثابت تجهیز تعمیر و یا جایگزین می‌گردد. این فاصله زمانی بر اساس اطلاعات آماری از خطاهای گذشته‌ی تجهیز می‌باشد و ممکن است از روش‌های سعی و خطا، قضاوت تجربی، یا روش‌های تحلیلی استفاده کند که هر دو دارای شاخص‌های قابلیت اطمینان و اقتصادی مناسبی باشند. از ویژگی‌های این نت، امکان ایجاد مشکل برای تجهیزات سالم خرابی بر اثر باز و بسته کردن، صدمه زدن به قطعات کناری، عدم وجود تضمین در مورد عدم خرابی بین دو فاصله‌ی زمانی، کم شدن اضطراب در انجام فعالیت نت، انجام فعالیت نت برنامه‌ریزی شده و حذف خرابی‌های ناشی از فرسایش طبیعی می‌باشد [۶].

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت: در این روش با انجام آزمایش های منظم تلاش می‌شود که خرابی‌های در شرف وقوع را پیش بینی کرده و اقدامات تعمیراتی لازم صورت گیرد. این روش از سال ۱۹۷۵ به تدریج جای خود را در صنعت باز کرده است. تعمیرات مبتنی بر وضعیت از اطلاعات بازرسی تجهیزات جهت تخمین شرایط و وضعیت تجهیزات و برنامه تعمیراتی استفاده می‌کند. در این روش تصمیم‌گیری، بر اساس اثرات خطای تجهیز نمی‌باشد و تنها بر اساس اهمیت مربوط به آنها می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام یافته در دانشگاه‌های آمریکا و سوئد در دهه ۶۰ و ۷۰ به این نتیجه رسیدند که تعمیرات پیشگیرانه بر اساس زمان صرفاً هزینه را افزایش می‌دهد. از ویژگی‌های این نت، حداقل کردن احتمال وقوع خرابی، هزینه‌ی

کمتر نسبت به نت مبتنی بر زمان، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه جهت خرید ابزار پایش وضعیت و انجام پایش وضعیت توسط متخصص در این نت می‌باشد [۷].

نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر: نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر (TPM[1]) یک چارچوب فکری منحصر به فرد است که می‌توان بر پایه آن، نظام جامع نت را در یک سازمان پیاده‌سازی کرد. TPM این دیدگاه را مطرح می‌کند که نگهداری و تعمیرات نه تنها یک عملکرد است بلکه فقط زمانی که نیاز است ظاهر می‌شود. یکی از هدف‌های TPM، احساس مسئولیت مشترک بین سرپرستی، تکنسین‌های عملیات و کارکنان نگهداری و تعمیرات است. نه‌تنها حفظ تجهیزات برای نت TPM مهم است بلکه هدف آن افزایش عملکرد تجهیزات است. افزایش مشهود بهره‌وری در کنار افزایش رضایت شغلی و مسائل انسانی از دیگر اهداف TPM است. وظیفه‌ی این نت، فقط پیشگیری از خرابی است [۸].

۲-۴- تاریخچه‌ی کوتاهی از پیدایش RCM II

همانطور که در فصل قبل گفته شد، در تجهیزات گذشته، به علت سادگی در طراحی، بیشترین عامل خرابی فرسایش بود، بنابراین استفاده از نگهداری و تعمیرات، زمانی بود که تجهیز خراب شود، آنگاه کارکنان مربوطه تجهیز را تعمیر یا تعویض می‌کردند. با پیچیدگی بیشتر تجهیزات، نگهداری و تعمیرات بر اساس زمان استفاده گردید که در یک دوره‌ی زمانی ثابت، قبل از وقوع خرابی، تجهیز تعمیر یا تعویض می‌گردد. زمان تعیین شده برای نت مبتنی بر زمان ممکن است بر اساس تجربیات گذشته از خرابی تجهیزات باشد. نگهداری و تعمیرات بعدی، نت مبتنی بر وضعیت هست که با تست‌های متعدد در زمان‌های تعیین شده، سعی می‌کنند خرابی‌ها را پیش بینی کرده و اقدامات لازم را برای رفع خرابی انجام دهند. تجهیز بعد از یک زمان مشخص، می‌توانست به راحتی توسط تکنسین‌های مربوطه برطرف یا جایگزین گردد. از سال ۱۹۵۰ به بعد،

[1] Total productive maintenance

تجهیزات پیچیده و به هم مرتبط شده‌اند. از این سال به بعد، خرابی‌ها فقط به علت فرسایش رخ نمی‌داد، بلکه می‌توانست دلایل مختلفی داشته باشد و بعضی از این خرابی‌ها، می‌توانستند تأثیرات مضرری از جمله تأثیر در عملکرد اصلی، هزینه، تغییر تولید، نرخ خروجی و حتی بر محیط زیست و ایمنی داشته باشند؛ بنابراین در سال ۱۹۷۴، وزارت دفاع آمریکا به خطوط هوایی مأموریت داد تا از فرآیندی که توسط شرکت هوایی غیرنظامی به عنوان نگهداری و تعمیرات استفاده می‌گردد، گزارشی تهیه شود. این گزارش تهیه شده به نام نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) تدوین یافت. شهرت RCM از آن‌جا شروع شد که توانست میزان سقوط‌های ناشی از نقص فنی هواپیما را از ۴۰ سقوط در یک میلیون پرواز به ۰/۱ سقوط در یک میلیون پرواز کاهش دهد. این یعنی ۴۰۰ برابر از سقوط‌ها کاهش یافته که اگر با این زمان مقایسه می‌شد، روزی یک سقوط هواپیما وجود خواهد داشت. از سال ۱۹۸۳ به بعد توجه بیشتری به مسائل زیست محیطی شد و این مسئله به فعالیت RCM اضافه گردید و RCM II شکل گرفت. البته RCM II تغییرات دیگری همچون تغییرات در فعالیت‌های الگوریتم RCM نیز دارد ولی آنچه سبب تغییر نام به RCM II شد، اضافه شدن مسائل زیست محیطی به الگوریتم RCM بود [1].

۲-۵- پیاده‌سازی RCM در مقالات مختلف

فعالیت RCM دارای پیچیدگی‌های تئوری نیست و متخصصان را مجبور به فرآیند یادگیری مهمی نمی‌کند [۴].

RCM چهار ریسک تهدیدات ایمنی، تهدیدات محیط زیستی، تهدیدات عملیاتی و هزینه نگهداری خرابی سیستم را تشخیص می‌دهد. اصل مدیریت دارایی شامل شناسایی "عوامل مهم ایمنی (SCE[1])" و نحوه

[1] Safety critical elements

برخورد با آنها از دیدگاه نگهداری و تعمیرات و حفظ استانداردهای عملکرد از پیش تعیین شده می‌باشد.

RCM چهار بحث کلی را بررسی می‌نماید:

۱- تعیین موقعیت که شامل آماده شدن برای تحلیل، بررسی تجهیزات و شناسایی عملکرد می‌باشد.

۲- تحلیل وضعیت که شامل شناسایی خرابی عملکرد، شناسایی حالت‌های خرابی، علل خرابی و شناسایی و ارزیابی اثرات خرابی و پیامدهای ناشی از آن می‌باشد.

۳- انتخاب وظایف نگهداری و تعمیرات مناسب.

۴- تأیید اقدامات نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده در حال کار.

RCM اهمیت زیادی برای خرابی‌های پنهان قائل است. اگر روشی برای پیدا کردن خرابی پنهان وجود نداشته باشد، آنگاه باید برای آن تجهیز، باز طراحی صورت گیرد. پیامدهای خرابی از بررسی خصوصیات فنی مهمتر است، یکی از دلایل انجام نگهداری و تعمیرات اجتناب از پیامدهای خرابی می‌باشد. پیامدهای خرابی یکی از چهار دسته زیر می باشند:

خرابی پنهان: اکثر تجهیزات پنهان از نوع تجهیزات محافظتی بوده و معمولاً به طور مستقیم روی عملکردهای اصلی تأثیری ندارند، اما می‌تواند سبب خرابی چندگانه گردیده و پیامدهای جدی گردد.

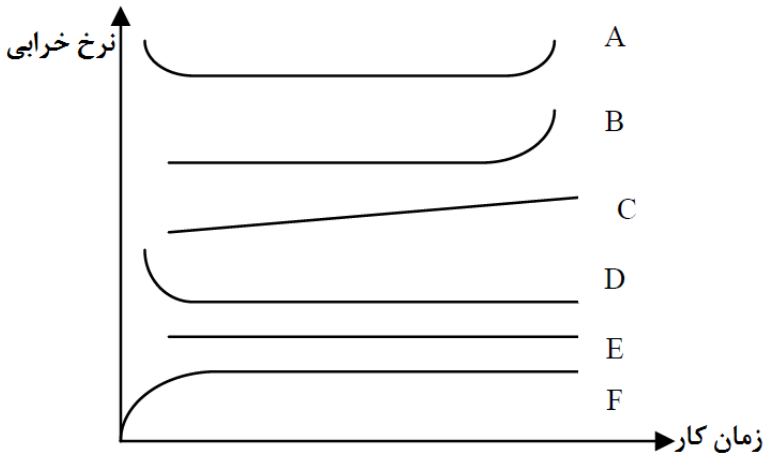
پیامدهای ایمنی و محیط زیست: اگر خرابی سبب کشته یا زخمی شدن کسی گردد، پیامد ایمنی و اگر سبب نقض استاندارد محیط زیستی گردد، دارای پیامد زیست محیطی است.

پیامدهای عملیاتی: اگر خرابی تجهیز سبب تأثیری بر تولید، خروجی، کیفیت محصول و خدمات به مشتری یا سبب هزینه‌های عملیاتی علاوه بر هزینه مستقیم برای اصلاح خرابی گردد، دارای پیامدهای عملیاتی است.

پیامدهای غیرعملیاتی: اگر خرابی تأثیری بر ایمنی و تولید نداشته باشد و فقط شامل هزینه‌های مستقیم برای اصلاح خرابی گردد، دارای پیامدهای غیرعملیاتی می‌باشد.

RCM با این ایده مخالف است که تمام خرابی بد هستند و باید از همگی خرابی‌ها جلوگیری کرد، بلکه تمرکز RCM بر این است که از خرابی‌هایی که بیشترین تأثیر بر عملکرد را دارند، جلوگیری نماید و به جای پیشگیری از خرابی، تمرکز را بر روی مدیریت کردن نگهداری و تعمیرات گذاشته است [۹].

اکثر افراد، خرابی‌های نگهداری و تعمیرات را با منحنی وانی شکل می‌شناسند که بیشتر به خاطر خطاهای انسانی در ابتدا و خطاهای فرسایشی در طول عمر است، اما در عمل اینگونه نیست. در صنعت هواپیمایی، منحنی خرابی ۹۰ درصد تجهیزات دوره‌ی فرسودگی آشکاری ندارند. شکل (۲- ۱) انواع منحنی‌های خرابی در تجهیزات واقعی را نشان می‌دهد منحنی D، E و F اینگونه هستند. به طور کلی تجهیزات برقی پیچیده دوره‌ی فرسودگی آشکاری ندارند [10].

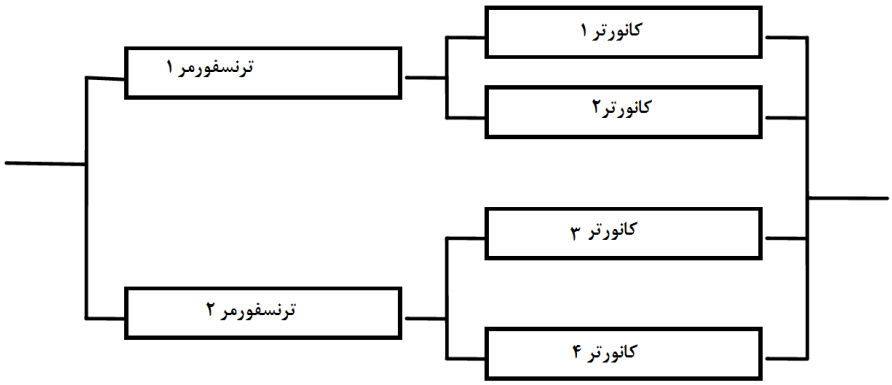


شکل ۲- ۱- انواع منحنی‌های خرابی تجهیزات واقعی [۱۰]

پیاده‌سازی RCM در قطار با سرعت بالای چین [۱۱]

در مرجع [۱۱]، مروری بر پیاده‌سازی RCM در قطار سرعت بالای چین انجام گردیده است که ابتدا سه مبحث قابلیت اطمینان، نگهداری و تعمیرات و تست‌پذیری قطار سرعت بالا مورد بحث قرار گرفته است. در بحث قابلیت اطمینان قطار، سیستم ترکشن شامل دو مجموعه‌ی ترنسفورمر ترکشن و هر ترنسفورمر شامل دو کانورتر است که با هم موازی هستند. شکل(۲-۲) رزرو برای سیستم ترکشن را نشان می‌دهد. چنانچه

یک کانورتر خراب گردد، ۲۵ درصد نیروی ترکشن از دست رفته و قطار با سرعت بالا کار می‌کند. چنانچه یک ترنسفورمر خراب گردد، ۵۰ درصد از نیروی ترکشن از دست رفته و قطار با کمی کاهش سرعت باز هم کار می‌نماید. قابلیت اطمینان به طور گسترده به عنوان یک معیار مهم برای طراحی سیستم، عملیات و نگهداری شناخته شده است [۱۱].



شکل ۲- ۲- رزرو کانورترها در سیستم ترکشن

نگهداری و تعمیرات به گونه‌ای است که تا حد زیادی زمان توقف برای تعمیرات را کم و بازده اقتصادی تعمیرات را افزایش دهد. برای تست‌پذیری، قطار به سیستم شبکه‌های ارتباطی قطار (TCN[1]) مجهز است که با TCN اطلاعات پراکنده‌ی شبکه جمع‌آوری، پردازش و تجزیه و تحلیل می‌گردد. اطلاعات وضعیت تمام تجهیزات از طریق TCN توسط راننده‌ی کابین قابل انتقال است. RCM استفاده شده، خطاها را به سه قسمت خطاهای قابل مشاهده، خطاهای پنهان و خطاهای بالقوه و اثرات خرابی را به سه دسته‌ی اثرات ایمنی، اثرات عملیاتی و اثرات پنهان تقسیم نموده است [۱۰]. وظایفی که نگهداری و تعمیرات RCM در قطار سرعت بالای چین برنامه‌ریزی نموده، عبارتند از: ۱- نگهداری و تعمیرات روزانه ۲- بررسی تجهیزات در زمان عملکرد ۳- تست و تعمیر بر اساس وضعیت ۴- نگهداری و تعمیرات جداسازی تجهیزات ۵- بازسازی و بروز رسانی ۶- ترکیبی از فعالیت‌ها.

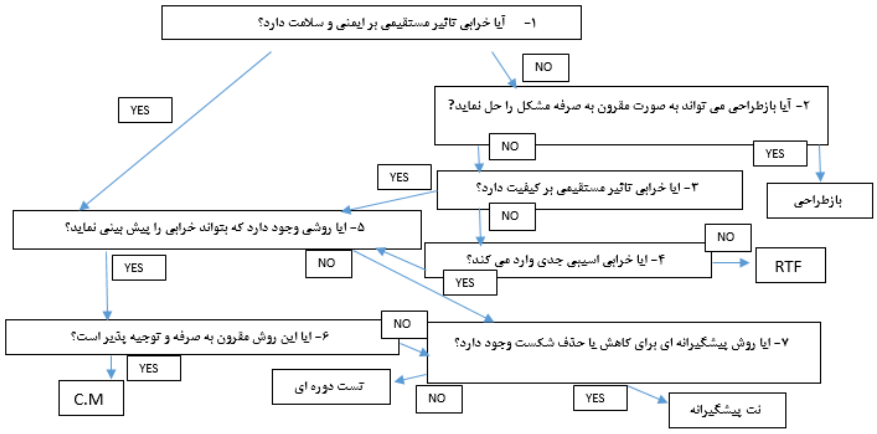
[1] Train Communication Network

پیاده سازی RCM برای مجموعه چرخهای واگن قطارهای مسافری راه آهن ایران [۱۲]

در این بخش، پیاده‌سازی RCM برای مجموعه چرخ قطار رجا بررسی گردیده است. سیستم نگهداری و تعمیرات این قطار به صورت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM[1]) و بر اساس زمان بوده است و به سه قسمت نگهداری و تعمیرات روزانه، نگهداری و تعمیرات سالانه (بوجین، سیستم ترمز، مجموعه چرخ ها و غیره) و نگهداری و تعمیرات اساسی (علاوه بر تعمیرات سالانه) تقسیم می‌گردد. با توجه به اشکالاتی همچون در نظر نگرفتن تفاوت در عملکرد واگن ها و مقرون به صرفه نبودن این نگهداری و تعمیرات، فعالیت نگهداری و تعمیرات RCM برای مجموعه چرخ ها در نظر گرفته شده است. به گفته‌ی این مقاله، مجموعه چرخ مهم‌ترین زیرسیستم در واگن قطار است. در چهار مرحله ی زیر پیاده‌سازی RCM برای این چرخ ها صورت می‌گیرد: در مرحله‌ی ۱ اجزای اصلی که عبارتند از بدنه چرخ و تایر چرخ، محور چرخ ها، بلبرینگ و قطعات ترمز، انتخاب می‌گردند. در مرحله‌ی ۲ عملکردها و خرابی عملکردها مشخص می‌گردد، به طوری که برای هر عملکرد ۲ تا ۳، خرابی عملکرد نوشته می‌شود. در مرحله‌ی سوم، یک ماتریس که ستون عمودی آن از مرحله‌ی ۱ و ردیف افقی آن از مرحله‌ی ۲ انتخاب می‌گردند، ساخته می‌شود. آن دسته از تجهیزات که باعث یک یا چند عدم عملکرد می‌شوند، با حرف X در ماتریس مشخص می‌شوند. برای کامل کردن جدول FMECA[2] مولفه های مشخص شده با X در ستون اول و دوم این جدول قرار می‌گیرند. عدد تشخیص در جدول مربوط به میزان آسیب، عدد رخداد در جدول مربوط به داده‌های گذشته و میزان شدت در جدول مربوط به شدت آسیب است. تعداد اولویت ریسک (RPN[3]) نشان‌دهنده‌ی اولویت هر خرابی در سیستم می‌باشد و از حاصلضرب عدد تشخیص در عدد رخداد و میزان شدت به دست می‌آید. در کمترین حالت RPN، ۱ و در بیشترین حالت ۱۰۰۰ است، ۱۳۳ به‌عنوان مرز میانی انتخاب شده است. در مرحله‌ی ۴، با

[1] Preventive Maintenance
[2] Failure mode, effects and criticality analysis
[3] Risk Priority Number

توجه به درخت الگوریتم تصمیم‌گیری به ستون‌های ۱ تا ۷ جدول تصمیم‌گیری پاسخ داده شده و وظایف تکنسین در نگهداری و تعمیرات و همچنین زمان مورد نظر، تعیین می‌گردد. در شکل (۲- ۳) الگوریتم تصمیم‌گیری RCM برای قطار رجا نشان داده‌شده است. فعالیت نت ارائه‌شده، برخلاف نت مبتنی بر زمان، فقط برحسب نیاز بوده و دارای بهره‌وری مطلوب می‌باشد [۱۲]. به‌عنوان یک نقد، در این مقاله، به علت استفاده از عدد RPN که حاصلضرب اعداد تقریبی است، مقدار واقعی تغییر کرده است. همچنین روش RCM II نسبت به این روش، به علت فصیح‌تر بودن سوالات و کامل‌تر بودن برنامه نت و جدول تصمیم‌گیری، بهتر می‌باشد.



شکل ۲- ۳- الگوریتم تصمیم‌گیری RCM برای قطار رجا [۱۲]

پیاده‌سازی RCM برای قطع‌کننده‌ی مدار [۱۳]

در این بخش پیاده‌سازی RCM برای قطع‌کننده‌ی مدار انجام شده است. تأثیر آلودگی، سطح سرما و تعداد عملکرد موفق و ناموفق قطع‌کننده مدار (CB[1])، از معیارهای شاخص وضعیت تصمیم‌گیری برای فعالیت نت RCM برای CB می‌باشد که از داده‌های واقعی ۶ سال پست استفاده گردیده است. در این فعالیت هر چه تعداد خرابی بیشتر باشد، نیاز به نت پیشگیرانه بیشتر است. عملکرد درست CB، نت پیشگیرانه را کم

[1] Circuit Breaker

می‌کند، اما اگر تعداد این عملکردها زیاد شود، به علت افزایش ریسک در CB، ممکن است سبب افزایش نت پیشگیرانه گردد. مقیاس اهمیت CB، بر اساس تأثیر بر شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد. شاخص اهمیت از سه مرحله زیر به دست می‌آید:

۱- شبیه‌سازی حالت‌های خرابی CB (هر حالت خرابی سبب چه رخدادی می‌شود) ۲- شبیه‌سازی حالات احتمالی ۳- فرمول‌های شاخص اهمیت.

زمانی که شاخص‌های اهمیت و وضعیت به‌دست آیند، CB ها را می‌توان در یک نمودار دوبعدی قرار داد. بر اساس نمودارهای شاخص اهمیت و شاخص وضعیت در CB های پست، اهمیت نت پیشگیرانه مشخص گردیده و نشان داده می‌شود که کدام CB ها مهمتر است و نیاز بیشتری به نت پیشگیرانه دارند [۱۳].

پیاده‌سازی RCM برای بخش‌های اصلی کمپرسور [۱۴]

در این بخش، در مرحله‌ی اول، فعالیت شناسایی موارد مهم کارکردی (FSI[1])، یعنی مواردی که در حالت خرابی آن‌ها اثرات اقتصادی و ایمنی وجود داشته باشد، استفاده شده است تا کارکردهای مهم در سیستم، زیرسیستم و تجهیزات سیستم را شناسایی کند. در مرحله‌ی دوم از فعالیت تحلیل اثرات و حالات خرابی (FMEA) برای شناسایی عملکردها، دلایل خرابی و علل و اثراتی که خرابی دارد، استفاده شده است. در مرحله‌ی سوم برای تصمیم‌گیری RCM، از یک مقیاس ریسک برای انتخاب نوع نگهداری و تعمیرات استفاده شده است. بر اساس سطح ریسک، نگهداری و تعمیرات در فعالیت RCM به سه فعالیت تقسیم گردیده است. نتایج پایانی نشان از شایستگی نت برنامه‌ریزی شده‌ی RCM دارد [۱۴].

[1] functionally significant items

پیاده‌سازی RCM برای تجهیزات الکتریکی مهم [۹]

در این بخش، به علت اهمیت ایمنی جانی در تجهیزات الکتریکی، فعالیت RCM، بررسی گردیده است. برای این پیاده‌سازی، اقدامات RCM به دو دسته اقدامات پیشگیرانه (وظایفی که برای جلوگیری از یک حالت خرابی انجام می‌گردد و شامل پیشگیری و پیش‌بینی است) و اقدامات پیش‌فرض (اقداماتی که با یک حالت خرابی مواجه است و شامل اقدامات عدم نیاز به نگهداری و تعمیرات، کشف خرابی و باز طراحی می‌باشد.) تقسیم گردیده است. برای نظارت مبتنی بر وضعیت تجهیزات از منحنی P-F (در فصل پنجم، منحنی P-F، کاملاً شرح داده‌شده است.) استفاده گردیده است. بحث عمده این مقاله، درباره‌ی خطر جرقه برق از مقدار زیاد انرژی می‌باشد. یکی از بحث‌های کاهش خطر، حذف خرابی توسط قطع کننده‌ی مدار (CB) می‌باشد. برای سرعت عمل بیشتر پیشنهاد شده است که سیستم‌های مدرن جایگزین سیستم های قدیمی‌گردد تا زمان برنامه‌ریزی گردد. در برخی موارد، با توجه به شرایط بحرانی و خرابی تجهیزات، نظارت مبتنی بر وضعیت که با استفاده از منحنی P-F می‌باشد، ممکن است اجرا شود. اگر پیامدهای مهمی وجود نداشت، نگهداری و تعمیرات RCM با تعمیر و بازرسی صورت می‌گیرد. در هنگام برخورد با پیامدهای ایمنی الکتریکی و کاهش خطرات جرقه برق، باز طراحی و اصلاح سیستم و تجهیزات، عاملی برای بهبود، ارتقا سیستم‌های توزیع برق می‌باشند [۹].

پیاده‌سازی RCM برای ریزشبکه خورشیدی با باتری [۱۵]

در این مقاله یک رویکرد هوشمند برای شناسایی خطا در ریزشبکه خورشیدی با باتری ارائه شده است که فعالیت نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان را جهت بهبود فعالیت پیشگیرانه بررسی نموده است. این مقاله فهرست کاملی از خطاهایی که ممکن است برای ریزشبکه فتوولتاییک اتفاق بیفتد، بررسی نموده و راه‌های تشخیص خرابی‌ها و در نهایت انتخاب حداقل سنسورها و جمع آوری داده‌ها با استفاده از RCM

را ارائه می‌دهد. فعالیت‌های مختلفی مانند نت اصلاحی، نت دوره‌ای بر اساس زمان و نت مبتنی بر شرایط برای تشخیص خرابی‌های سیستم استفاده می‌شود اما به گفته‌ی این مقاله، این فعالیت‌های نت، گران یا وقت گیر هستند و برای زمان بندی صحیح و استفاده‌ی مناسب از نت پیشبینانه و نت پیشگیرانه، فعالیت RCM انتخاب شده است. تحلیل قابلیت اطمینان به طور گسترده در صنعت‌های فضایی، دفاع، هسته ای و هواپیمایی مورداستفاده قرار می‌گیرد، چراکه اگر مشکلی در عملکرد آن‌ها به وجود آید، منجر به زیان‌هایی از جمله اثرات شدید محیط زیستی و پیامدهای ایمنی می‌گردد. تحلیل قابلیت اطمینان شامل محاسبات قابلیت اطمینان و احتمالات سیستم است که بر اساس تحلیل اثرات و حالات خرابی مهم (FMECA) انجام می‌شود. همچنین از FMECA، برای تعیین وظایف نگهداری و تعمیرات مناسب و شناسایی هر یک از حالت‌های خرابی و پیامدهای آن، مورداستفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه RCM یک گام به سمت نظارت بر وضعیت واقعی در تمام اجزای سیستم است.

این مقاله برای بهبود فعالیت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، از مراحل زیر استفاده می‌کند:

مرحله ۱- انتخاب سیستم و جمع آوری داده‌ها، مرحله ۲- انتخاب مولفه‌هایی که باید تحلیل شوند، مرحله ۳-شناسایی عملکردهای سیستم، مرحله ۴- شناسایی خرابی‌های پنهان، مرحله ۵- FMECA و مرحله ۶- مشخص شدن وظایف نگهداری و تعمیرات. FMCEA یک راه مقرون به صرفه، با یادگیری راحت و روشی مناسب برای پیدا کردن خرابی‌های احتمالی قبل از وقوع آن‌ها است. مزیت اصلی FMECA شناسایی زود هنگام حالت‌های سیستم است تا یک راه حل برای کاهش خرابی‌های بالقوه طراحی نماید. در FMECA، برای هر احتمال خرابی عددهای برای رتبه‌بندی داده می‌شود. این تحلیل برای رتبه اولویت‌بندی در میان حالت‌های خرابی شناسایی شده انجام می‌گیرد. این رتبه بندی با استفاده از یک شاخص کمی به نام تعداد اولویت ریسک (RPN) انجام می‌گیرد. حالت‌های خرابی که بیشترین RPN را دارند، در اولویت اقدام اصلاحی قرار دارند. البته RPN نباید به‌طور قاطعانه اولویت‌بندی نماید، زیرا ممکن است، بعضی از حالت‌های خرابی

با اینکه RPN بالایی ندارند، باید اقدامی ضروری برای آن‌ها انجام گیرد. محدوده‌ی استفاده از RPN به صورت زیر است:

• از ۱ تا ۵۰: نیاز به اقدام فوری نیست.

• از ۵۱ تا ۹۹: فعالیت نت اصلاحی توصیه می‌شود.

• برای بیش از ۹۹: اقدام فوری نیاز است.

RPN برای تصمیم‌گیری در مورد اقداماتی استفاده می‌شود که با کاهش احتمال وقوع و بهبود شناسایی خرابی، خطر را کاهش می‌دهد [۱۵].

پیاده‌سازی RCM با استفاده از عملکرد دینامیکی [۱۶]

با یک روش علت و معلولی و شبیه‌سازی، رفتار سیستم پیش‌بینی گردیده است. روش علت و معلولی به‌گونه‌ای است که با اتصال تجهیزات مهم، تأثیر تجهیزات برهم مشخص می‌گردد. با رفتار دینامیکی، چگونگی مدیریت بهره‌برداری و نگهداری و تعمیرات مشخص می‌گردد. استفاده از نمودار ساده و عبارات ریاضی مربوط به آن از مزایای مدل دینامیکی می‌باشد. روش دینامیکی با پالایش‌های منظم، خرابی‌های در شرف وقوع را پیش‌بینی نموده تا اقدامات تعمیراتی مناسب انجام گیرد. در این روش هزینه‌ی خرابی مهمتر از هزینه‌ی بررسی خرابی می‌باشد و تصمیم‌گیری برای برنامه‌ی نت بر اساس اهمیت تجهیزات می‌باشد [۱۶].

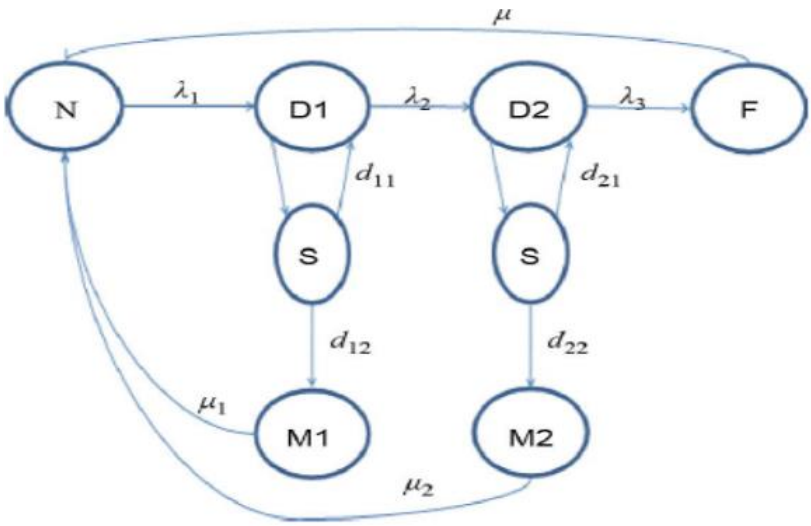
به‌عنوان یک نقد، مهم‌ترین عیب این روش حجم محاسبات بسیار زیاد، مخصوصا هنگامی که سیستم دارای مقیاس بزرگی می‌باشد، است [۱۷].

پیاده‌سازی RCM با استفاده از روش AHP

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP[1]) یکی از روش‌های پرکاربرد برای اولویت‌بندی و تعیین اهمیت تجهیزات است [۱۸].

پیاده‌سازی RCM با استفاده از الگوریتم ژنتیک در سیستم ۹ و ۱۱۸ شینه [۱۹]

در این بخش، برای بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات در سیستم ۹ و ۱۱۸ باسه از الگوریتم ژنتیک (GA[2]) استفاده شده است. برای تجهیزات موجود در سیستم انتقال که دارای عمر فرسایش گوناگون هستند، از مدل حالت تجهیزات استفاده شده است. مدل حالت تجهیزات از چندین حالت برای ارائه ترتیب عمر فرسایش تجهیزات، از کارافتادگی و نگهداری و تعمیرات استفاده می‌کند. مدل حالت تجهیزات ارائه شده در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.



شکل ۲- ۴- مدل حالت تجهیزات با اهمیت [۱۹]

[1] analytic hierachy process
[2] Genetic Algorithm

D1 و D2، حالت‌های بدتر شدن وضعیت در زمانیکه عمر تجهیزات از عمر مفید آن‌ها بیشتر می‌شود را نشان می‌دهد. M1 و M2 روش‌های نگهداری و تعمیرات هستند که به حالت بدتر شدن وضعیت تجهیزات بستگی دارد. اگر هر گونه تعمیری انجام گیرد، حالت تجهیزات به N که بیان کننده‌ی حالت عادی است برمی‌گردد. کنترل‌کننده تصمیم می‌گیرد که تعمیر انجام گیرد یا خیر. کنترل‌کننده مشخص می‌کند که تعمیر به‌عنوان d12 یا d22 انجام بگیرد یا به عنوان d11 وd21 انجام شود. D2 متفاوت از F است. D2 بیان می‌کند که با وجود اینکه تجهیز بدرستی کار نمی‌کند اما هنوز در حال ارائه سرویس هست. F بیان‌کننده‌ی این است که تجهیز کار نمی‌کند و در سرویس نیست. در این‌جا تصمیم‌گیری برای مینیمم کردن کل هزینه انجام می-گیرد. در نهایت نشان داده می‌شود که برنامه‌ی RCM که از روش بهینه‌سازی نت با الگوریتم ژنتیک به دست آمده است، از نگهداری و تعمیرات براساس زمان، اقتصادی‌تر و به صرفه تر برای تمامی تجهیزات است [۱۹].

الگوریتم ژنتیک عمدتا بر اساس میوتیشن‌های تصادفی و کراس اور بین بهترین کاندیدها در هر نسل با این امیدواری که فرزند، بهتر از والدین است و یک تکامل، بعد از چندین مرحله رخ می‌دهد، می‌باشد. میوتیشن های تصادفی وسیله‌ای برای جستجوی راه‌حل‌های بیشتر و اجتناب از یک نتیجه غیر بهینه است. هنگامی که تعداد واحدها افزایش پیدا می‌کند، باید جمعیت یا میوتیشن‌های بیشتری برای اینکه تمام فضای جستجو پوشش داده شود، استفاده گردد که نتیجه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در زمان محاسبه خواهد بود [۱۷].

پیاده‌سازی RCM برای سیستم توزیع [۴]

در مرجع [۴]، پیاده‌سازی فعالیت RCM برای سیستم‌های توزیع واقعی در استکهلم سوئد، انجام شده است. می‌توان گفت، زمانی یک تعمیر بر روی یک تجهیز از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است که همزمان تعمیرات دیگری نیز بر روی آن تجهیز انجام گیرد تا از زمان توقف و باز و بسته نمودن تجهیز کاسته شود. این نوع برنامه‌ریزی به‌عنوان نگهداری و تعمیرات هماهنگ بر تجهیزات شناخته می‌شود و سبب ذخیره منابع مالی

و انسانی می‌گردد. شناسایی تجهیزات بحرانی سیستم در یک روش مبتنی بر قابلیت اطمینان به گونه‌ای انجام شده است که بحرانی بودن تجهیزات را علاوه بر دیدگاه تجهیز بتوان از دیدگاه سیستم نیز بررسی کرد. این مقاله، از یک طرف به هزینه‌های مربوط به روش نگهداری و تعمیرات، نیروی کار و قطعی‌های که به خاطر فرآیند PM رخ می‌دهد، می‌پردازد و از طرف دیگر به سودهایی که به دلیل به تأخیر انداختن نت اصلاحی بوجود می‌آیند، پرداخته است. این روش بر روی یک شبکه آزمایشی توزیع، بکار برده شده است و قابلیت اجرا در عملیات را دارد. برای اولویت‌بندی در این پیاده‌سازی از RPN که در مقالات قبلی معرفی شد، استفاده شده است و برای تحلیلی خرابی و اثرات خرابی از جدول FMECA استفاده گردیده است. روش ارائه شده می‌تواند با کمترین سعی برای برنامه‌نویسی پیاده‌سازی شود. این روش یک الگوریتم ساده است که می‌تواند به آسانی حتی در شبکه‌های مقیاس بزرگ اجرا شود [۴].

پیاده‌سازی RCM برای واحدهای تولیدی[۱۷]

روش ارائه شده، یک روش جدید برای زمان‌بندی واحدهای تولیدی که مجموعه‌ای از دو روش دینامیکی و اولویت‌بندی ریسک با الگوریتم ژنتیک است، می‌باشد. به گفته‌ی این مقاله، اولویت‌بندی ریسک به تنهایی نمی‌تواند یک راه‌حل مناسب برای زمان بندی تعمیر در سیستم‌های قدرت الکتریکی تجدید ساختار یافته، باشد. اگر چه روش اولویت بندی ریسک بسیار سریع است و حجم محاسباتی خیلی کمی دارد، اما این روش اولویت‌های شرکت‌های تولیدی (GENCO[1]) را در نظر نمی‌گیرد و در نتیجه منجر به انحراف بسیار زیادی از زمان‌بندی تعمیر می‌شوند، از طرف دیگر، روش دیگری که برای مسئله زمان بندی تعمیر استفاده‌شده است، برنامه‌ریزی دینامیکی می‌باشد که مشکل روش اولویت‌بندی ریسک را حل نموده است. در روش

[1] generating companies

ارائه‌شده فضای جستجو محدود می‌شود و تعداد بسیار زیادی از راه‌حل‌های ممکن، در یک روش آمده‌اند [۱۷].

فصل سوم: شناسایی تجهیزات و سیستم اینورتر ترکشن

در این فصل به تئوری عملکرد اینورتر ترکشن، ناحیه‌های مختلف اینورتر ترکشن و شناسایی تجهیزات و سیستم اینورتر ترکشن پرداخته شده است.

۳-۱- تئوری روش کار اینورتر ترکشن

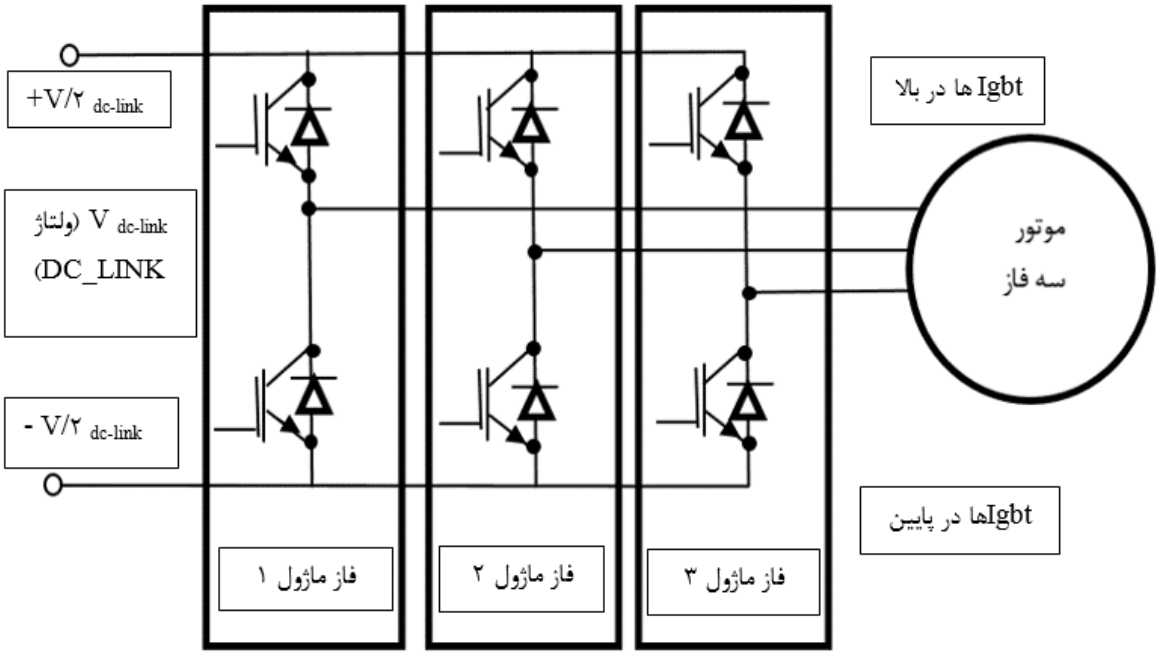
اینورتر ترکشن وظیفه دارد تا انرژی تأمین شده را به‌طور مؤثر تبدیل نموده و در بهترین حالت آن را برای درایوهای موتور در دسترس سازد [۲۰].

۳-۱-۱- عملکرد مبدل پالس PI

PI[1] برای راه‌اندازی موتورهای آسنکرون ولتاژ ۷۵۰ ولت DC را به ولتاژ ۳ فاز ۵۶۱ ولت AC تبدیل می‌نماید. به علت تولید متوسط ولتاژ خروجی مطلوب در یک دوره سوئیچینگ، زمان عملیاتی (نسبت بین زمان روشن شدن و زمان فرکانس سوئیچینگ) متغیر است، البته فرکانس سوئیچینگ ثابت است. فاز ماژول‌های ۱Ph، ۲Ph و ۳Ph، پالس‌های ولتاژ اعمال شده در موتور را تولید می‌کنند. شکل ۳-۱ مدار کلیدهای igbt را نشان می‌دهد. کلیدهای IGBT[2] توسط تجهیزات GDC[3] و GB[4] فعال می‌شوند. با فعال شدن کلیدهای IGBT در بالا، خروجی ماژول‌های فاز به ولتاژ DC_LINK مثبت و با فعال شدن کلیدهای IGBT در پایین، خروجی ماژول های فاز به ولتاژ DC_LINK منفی متصل می‌شوند. ولتاژ های خروجی (ولتاژ تغذیه موتور) نسبت به هم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند که این امر سبب ایجاد یک میدان دوار در موتور می‌گردد. پالس‌های ولتاژ به دلیل اندوکتانس موتور سبب ایجاد یک جریان تقریبا سینوسی می‌گردند که این جریان‌های خروجی توسط ترانسفورمرهای جریان (CT) اندازه‌گیری می‌شوند. به منظور جلوگیری از اتصال کوتاه شدن مدار DC-Link، در هنگام فعال شدن IGBTهای بالا و پایین، یک زمان معین (در GDC تعریف شده) باید در

[1] Pulse Inverter
[2] Insulated Gate Bipolar Transistor
[3] Gate Drive Control
[4] Gate Board of phase module

هنگام تغییر وضعیت از IGBTهای بالا به پایین سپری شود. در این زمان، هیچ کدام از IGBT ها روشن نمی‌شوند. گشتاور موتور به تفاوت بین فرکانس میدان چرخشی یا همان دوار و فرکانس روتور (فرکانس لغزش) بستگی دارد. در لغزش صفر، موتور در عمل بدون بار است و هیچ گشتاوری تولید نمی‌کند. اگر لغزش مثبت باشد (فرکانس روتور < فرکانس میدان چرخشی) ولتاژ در سیم‌پیچ‌های قفس سنجابی ایجاد می‌شود که منجر به تولید یک گشتاور مثبت (محدوده عملکرد موتور) می‌گردد. حال انرژی مورد نیاز موتورها از شبکه ۷۵۰ ولت DC و از طریق PI تأمین می‌گردد. اگر لغزش منفی باشد (فرکانس روتور > فرکانس میدان چرخشی)، باز هم ولتاژی در سیم‌پیچ‌های قفس سنجابی القا گردیده که منجر به گشتاور ترمزی می‌شود (محدوده عملیاتی ژنراتور). انرژی اضافی در حالت ژنراتوری به شبکه ۷۵۰ ولت DC منتقل می‌شود. اگر سیستم کنترلی قادر به استفاده از انرژی تحویل داده‌شده، نباشد، ولتاژ DC-LINK افزایش می‌یابد و اگر ولتاژ DC-LINK بالاتر از سطح تعریف شده، برود، انرژی در مقاومت ترمزی و ترمز چاپر تلف می‌شود [۲۱ و ۲۲].



شکل ۳-۱: نحوه سوئیچینگ در کلیدهای igbt [۲۲]

فرکانس سوئیچینگ ماژول‌های IGBT در ۱۵۰۰ هرتز تنظیم شده است. این عامل سبب کنترل بالا و استفاده‌ی مناسب از PI گردیده و یک جریان تقریبا سینوسی در موتورهای ترکشن را فراهم می‌آورد. همچنین انتشار سر و صدا، تلفات جریان‌های گردابی و گشتاورهای نوسانی موتور را به حداقل می‌رساند. [۲۲]

۳-۱-۲- کنترل موتور ترکشن

وظیفه کنترل موتور، تنظیم مدولاسیون سه فاز مبدل پالس است تا موتورهای ترکشن گشتاور لازم را وابسته به سرعت اندازه‌گیری شده، ایجاد کنند. گشتاور موتور با تولید بین مقدار مطلق شار روتور و مولفه عمود بر جریان استاتور نسبت به شار روتور متناسب است. ماشین DC، شار روتور و جریان تولیدی گشتاور را از طریق سیم پیچ‌های استاتور کنترل می‌کند. با استفاده از سیستم کنترل میدان مغناطیسی، میدان و گشتاور تولیدکننده‌ی مولفه‌های جریان می‌توانند از جریان استاتور جدا شوند؛ بنابراین تمام مقادیر ماشین به یک فرم مرجع تبدیل می‌شوند که با شار روتور چرخشی ثابت می‌شود. مولفه جریان استاتور در جهت شار روتور، اثر مشابهی با جریان القایی در ماشین‌های DC دارد (تولید شار، اما بدون گشتاور). مولفه عمود بر جریان استاتور مربوط به شار روتور، یک گشتاور تولید می‌کند اما هیچ بازخوردی برای شار روتور ندارد. برای ساختار کنترل میدان مغناطیسی ۱۰۰۰ETRIS T، از مدل ماشین معکوس استفاده شده است. مقادیر مرجع کنترل کننده شار و گشتاور بوده و مقادیر اندازه‌گیری شده، جریان و سرعت هستند. برای ایجاد میدان تعیین شده و گشتاور در ماشین، فرکانس، اندازه و موقعیت فاز ولتاژ خروجی با حل معادلات دیفرانسیل ماشین به دست می‌آید. ویژگی‌های دینامیکی ماشین در مدل استفاده شده، گنجانده شده است و بنابراین گشتاور می‌تواند بسیار دینامیکی کنترل شود. در محدوده سرعت پایین‌تر، شار به مقدار نامی کنترل می‌شود و دستگاه می‌تواند به طور ثابت، سرعت مستقل و گشتاور وابسته به جریان حداکثر خود را تولید کند. هنگامی که سرعت ماشین افزایش یابد، ولتاژ خروجی PI در هنگام افزایش سرعت ماشین، برای

حفظ شار در یک مقدار ثابت، افزایش می‌یابد و زمانی که PI به حداکثر ولتاژ خروجی خود می‌رسد، شار، برای افزایش سرعت، باید کاهش یابد. در این محدوده، گشتاور تولید شده به‌طور معکوس و متناسب با سرعت کاهش می‌یابد [۲۲].

۳-۱-۳- الگو پالس ژنراتور

الگوی پالس ژنراتور، سیگنال‌های سوئیچینگ برای ماژول‌های IGBT را با توجه به فرکانس، اندازه و موقعیت فاز ولتاژ خروجی PI، محاسبه می‌کند. با توجه به نسبت سرعت موتور و حداکثر فرکانس سوئیچینگ، سه روش مدولاسیون استفاده می‌شود: ۱- مدولاسیون دلتا: مورد استفاده در محدوده سرعت پایین (بیش از ۱۵ پالس در هر دوره اصلی). فرکانس سوئیچینگ، هیچ مضرب صحیحی از فرکانس خروجی PI (مدولاسیون آسنکرون) نیست. ۲- زاویه سوئیچ: مورداستفاده در محدوده سرعت متوسط (۹، ۷، ۵ یا ۳ پالس در هر دوره اصلی). نسبت بین فرکانس سوئیچینگ و فرکانس خروجی PI همیشه برابر با تعداد پالس در هر دوره اصلی (مدولاسیون سنکرون) است. ۳- مدولاسیون کامل: فقط در سرعت‌های بالا (تنها ۱ پالس در هر دوره اصلی) استفاده می‌شود. الگوی پالس ژنراتور بهترین تکنیک مدولاسیون را با توجه به محدوده عملیاتی سرعت انتخاب می‌کند [۲۲].

۳-۱-۴- مشخصات فنی سیستم اینورتر ترکشن

برای آگاهی بهتر از سیستم اینورتر ترکشن، مشخصات فنی این سیستم در جدول ۳-۱ مشخص‌شده است[۲۲].

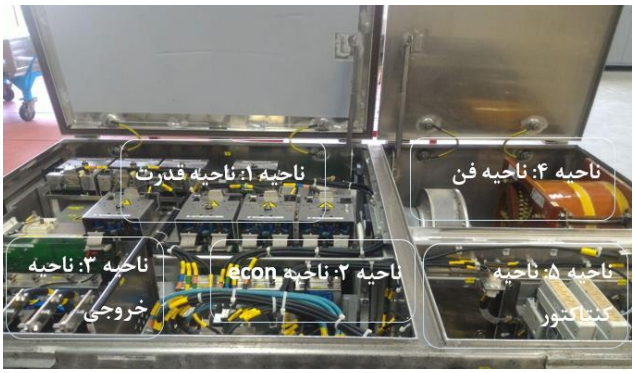
جدول ۳- ۱- مشخصات فنی اینورتر ترکشن

ولتاژ و جریان ورودی به اینورتر	
500V DC =حداقل ولتاژ ورودی به سیستم	750v DC =ولتاژ نامی ورودی
330 A rms =جریان نامی ورودی	900V DC =حداکثر ولتاژ ورودی به سیستم
ولتاژ تجهیزات دیگر	
380V AC =ولتاژ فن	24V DC =ولتاژ واحد کنترل ترکشن وکنتاکتورها
اطلاعات اینورتر ترکشن	
210 A rms =جریان خروجی نامی	561 V AC =ولتاژ خروجی ۳ فاز (ولتاژ موتورها)
390kg =وزن	450 A rms =حداکثر جریان خروجی
250 Hz =فرکانس خروجی	1500 Hz =فرکانس سوئیچینگ آسنکرون
45^{c} =حداکثر دمای محیط	-25^{c} c =حداقل دمای محیط
451.5 mm× 1160× 1620 = ابعاد بدون کانکتور ها و اجزای نصب I ×W ×h	

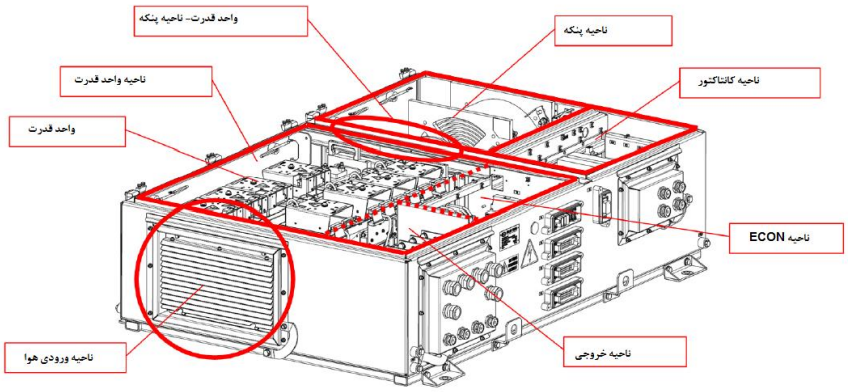
۳-۲- نواحی سیستم اینورتر ترکشن

اینورتر ترکشن از دو اینورتر پالس (۱PI و ۲PI)، دو ترمز چاپر (۱BC[1] و ۲BC) و واحد کنترل ترکشن TCU[2] تشکیل شده است. TCU از یک طرف ارتباط با دیگر تجهیزات را برقرار کرده و از طرف دیگر عملکرد فرمان و کنترل اینورتر ترکشن را انجام می‌دهد. سیستم اینورتر ترکشن دارای ۵ ناحیه اصلی است که هر کدام دارای تجهیزات مختلف است. ناحیه ۱، ناحیه ۲، ناحیه ۳، ناحیه ۴ و ناحیه ۵ به ترتیب، ناحیه قدرت یا PI، ناحیه ECON[3]، ناحیه خروجی، ناحیه فن و ناحیه کنتاکتور می‌باشد که در شکل (۳-۲) نشان داده‌شده است. شکل (۳-۳) اینورتر ترکشن با نواحی مختلف را نشان داده است.

[1] Brake Chopper
[2] Traction Control Unit
[3] ETRIS Controller



شکل ۳-۲- تصویر اینورتر ترکشن با تعیین نواحی



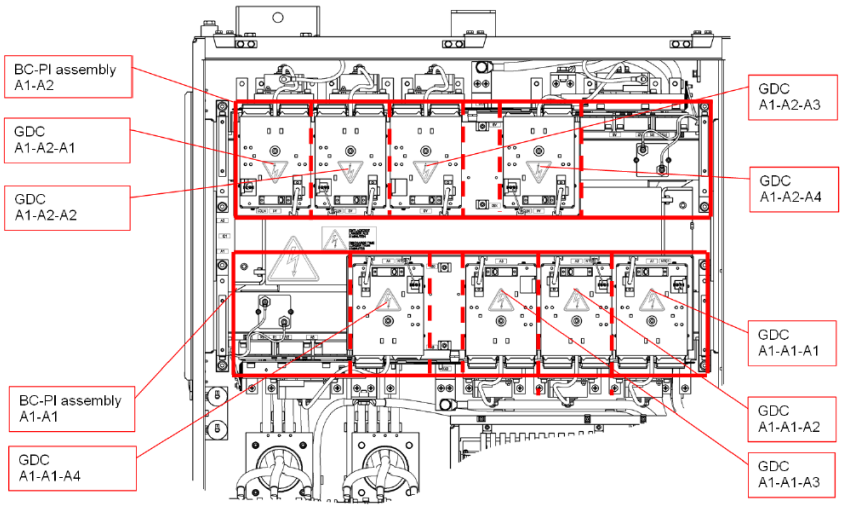
شکل ۳-۳- رسم اینورتر ترکشن با نواحی مجزا [۲۱]

۳-۲-۱- ناحیه ۱، ناحیه قدرت:

برای تبدیل ولتاژ dc[1] به ac[2]، ولتاژ از ناحیه ۵ به ناحیه ۱ و به سمت igbt ها می‌رود. در قسمت ۱، برای هر موتور ۵ igbt وجود دارد که ۳ عدد در pi و دو عدد دیگر در چاپر است. ورودی igbt، dc و خروجی آن ac است، همچنین این قسمت برای کنترل ولتاژ نیز می‌باشد.

تجهیزات ناحیه قدرت شامل مجموعه PI، IGBTها، GDC، گیت‌برد، ترانس جریان، مقاومت دشارژ، مجموعه هدسینک خنک‌کننده IGBT ها، باس بار انتقال HIGH VOLTAGE، سنسورهای دما، نوارهای عایقی PI، دسته‌ی حمل و پیچ‌های نگهدارنده می‌باشد.

[1] Direct Current
[2] Alternating Current

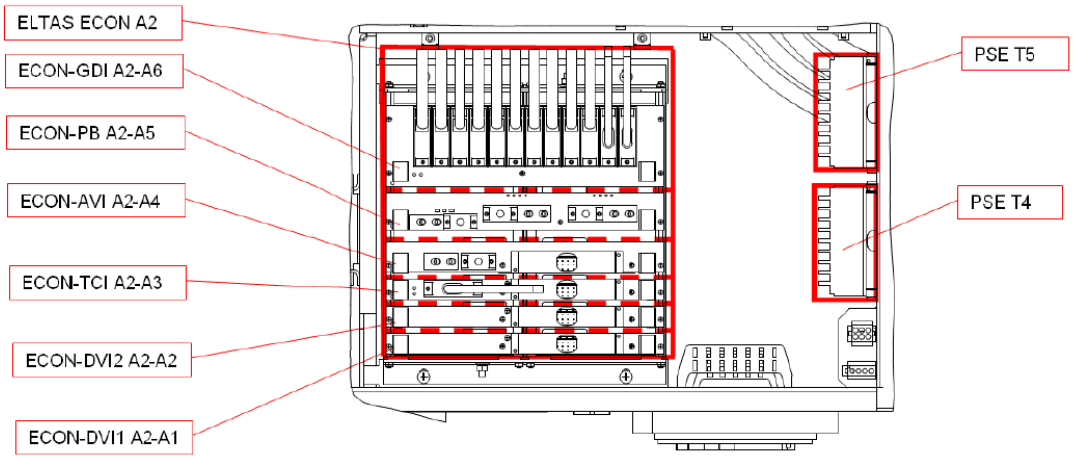


شکل ۳-۴- رسم ناحیه قدرت با جزئیات [۲۱]

۳-۲-۲- ناحیه ۲، ناحیه econ:

این ناحیه شامل پردازنده اصلی etris، گیت‌برد و GDC[1] می‌باشد.

تجهیزات ناحیه ECON شامل کارت‌های ECON، فیلتر، منبع تغذیه ±۲۴ ولت، پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی و پیچ‌های نگهدارنده جعبه ECON است.

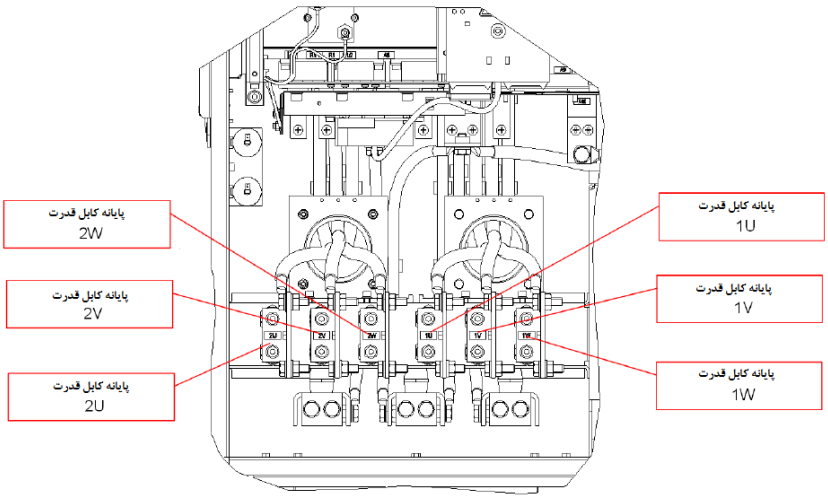


شکل ۳-۵- رسم ناحیه ECON با جزئیات [۲۱]

[1] Gate Drive Control

۳-۲-۳- ناحیه ۳، ناحیه خروجی:

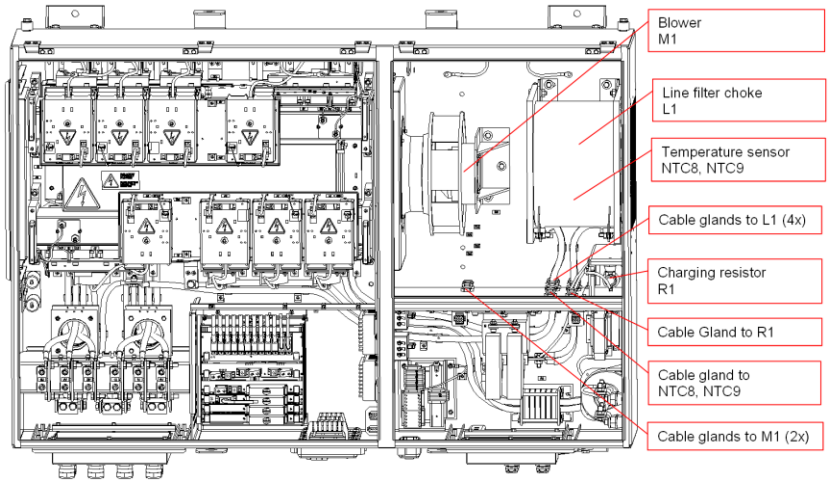
این ناحیه شامل خروجی مقاومت ترمزی و همچنین خروجی تغذیه ترکشن می‌باشد. تجهیزات ناحیه خروجی شامل فیلتر FRIT، شین‌های انتقال ولتاژ، مقره های عایق کننده شین‌ها و پیچ‌های اتصال کابل به شین می‌باشد.



شکل ۳-۶- رسم ناحیه‌ی خروجی با جزئیات [۲۱]

۳-۲-۴- ناحیه ۴، ناحیه فن:

این ناحیه، وظیفه خنک نمودن دمای igbt را دارد.

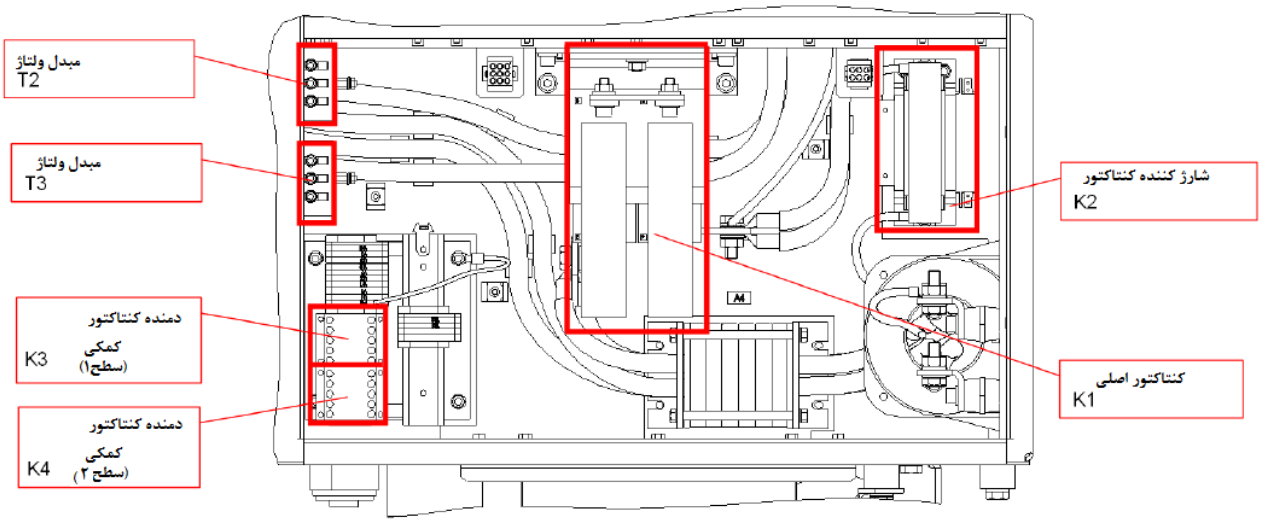


شکل ۳-۷- رسم ناحیه فن با جزئیات [۲۱]

تجهیزات ناحیه فن شامل فن، مقاومت شارژینگ، دریچه خروجی هوا، فیلتر سلفی خط، کابل گلندهای بیرونی و سنسورهای داخلی فیلتر سلفی خط می‌باشد.

۳-۲-۵- ناحیه ۵، ناحیه کنتاکتور:

در قسمت بالا سمت راست این ناحیه، بعد از مدت زمان حدود ۰/۷ ثانیه شارژ انجام شده و سپس کنتاکتور شارژ باز و کنتاکتور اصلی بسته می‌شود و ولتاژ به ناحیه قدرت در قسمت ۱ می‌رود.



شکل ۳-۸-رسم ناحیه کنتاکتور به همراه جزئیات [۲۱]

تجهیزات ناحیه کنتاکتور شامل کنتاکتور اصلی، کنتاکتور شارژینگ، ترانس فن خنک‌کننده، کنتاکتورهای فرمان فن، ترانسدیوسرهای ولتاژ، فیلتر FRIT، ترانس تفاضلی، کنتاکتورهای کمکی K1 و K2، باس‌بارهای HIGH VOLTAGE، کابل‌های HIGH VOLTAGE و مقره‌های عایق‌کننده‌ی باس‌ها از بدنه می‌باشد.

فصل چهارم: پیاده‌سازی نت RCM II (تحلیل حالات و اثرات خرابی)

در بخش اول این فصل، عملکردهای اصلی و عملکردهای ثانویه معرفی گردیده است. در بخش دوم و سوم این فصل به ترتیب به تجهیزات، علل خرابی تجهیزات و اثرات خرابی تجهیزات پرداخته شده است و در بخش آخر این فصل کاربرگ FMEA کامل گردیده و فهرست می‌گردد.

۴-۱- وضعیت‌های خرابی در عملکردهای اصلی و عملکردهای ثانویه

تجهیزات پیچیده دارای عملکردهای اصلی و عملکردهای ثانویه هستند. حال اگر تجهیزی در وضعیت خرابی قرار گیرد، این خرابی در عملکردهای اصلی و ثانویه تجهیز تأثیرگذار خواهد بود. در این بخش بیان خواهد شد که اگر هر یک از تجهیزات با خرابی روبرو شوند، کدام عملکرد تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

برای مشخص نمودن وضعیت‌های خرابی در عملکردهای اصلی و ثانویه باید به نکات زیر که برگرفته از کتاب RCM II (مرجع [۲۳]) می‌باشد، توجه نمود.

سؤال این بخش: عملکرد و استانداردهای عملکرد تجهیز چیست؟

استاندارد عملکرد تجهیز: حداقل استاندارد عملکرد، کار مورد انتظار از تجهیز است.

تجهیز در ابتدای کار باید بیش از حداقل استاندارد، توانایی داشته باشد که به توانایی اولیه یا توانایی ذاتی معروف است.

نگهداری و تعمیرات فقط می‌تواند تجهیز را حداکثر به توانایی اولیه تجهیز ببرد و فراتر از آن امکان‌پذیر نیست، بنابراین همیشه باید توانایی اولیه بالاتر از توانایی مورد انتظار از تجهیز باشد.

عملکرد مورد انتظار باید در محدوده توانایی ذاتی باشد، برای تعیین این موضوع باید از توانایی‌های ذاتی تجهیز و همچنین حداقل عملکرد در شرایط عملیاتی اطلاع داشت. استانداردها باید تا جای ممکن کمی باشند، چون از کیفی دقیق‌تر هستند. استانداردهای زیست محیطی و ایمنی برای تجهیز بسیار مهم است. شرایط عملیاتی تجهیز باید مشخص شود.

کارکردها شامل، کارکردهای اولیه و ثانویه هستند که هر کدام را می‌توان با جزئیات بیشتر بیان نمود. کارکردهای اولیه می‌توانند سریال باشند یعنی چند کارکرد اصلی با هم کار انجام دهند.

ترتیب شیفت های کاری در شرایط عملیاتی مؤثر است (اگر تجهیز زیادتر کار کند، نت بیشتری می‌خواهد).

رزرو، زمان تعمیر و هزینه‌ی آن و همچنین لوازم یدکی و زمان تهیه آن در شرایط عملیاتی مؤثر است.

راندمان جز شرح کارکردها محسوب می‌شود (با چقدر انرژی، چقدر کارایی).

کارکردها در کاربرگ اطلاعات RCM سمت راست فهرست می‌شود و ابتدا کارکردهای اصلی و سپس ثانویه ذکر می‌شوند.

۴-۱-۱- عملکردهای اصلی سیستم اینورتر ترکشن:

۱ و ۲- تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان و نظارت بر عملکرد صحیح موتور ترکشن

اگر تجهیزات زیر دچار وضعیت خرابی شوند، تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان با مشکل مواجه می‌شود.

- در سقف ماژولT : HSCB
- مجموعه PI (ناحیه قدرت): IGBTها، GDC، GB، ترانس جریان، باسبار انتقال HIGH VOLTAGE و خازن dc_link
- کارت های ECON (ناحیهECON): فیلتر منبع ۲۴ ولت مستقیم، منبع تغذیه ۲۴ ولت، پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی
- ناحیه خروجی: شین‌های انتقال ولتاژ و پیچ‌های اتصال کابل به شین
- ناحیه فن: مقاومت شارژینگ و فیلتر سلفی خط
- ناحیه کنتاکتور: کنتاکتور اصلی، کنتاکتور شارژینگ، ترانسدیوسرهای ولتاژ، ترانس تفاضلی، کنتاکتورهای کمکی K1 و K2، باس بارهای، HIGH VOLTAGE و کابلهای HIGH VOLTAGE

۳- حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ برای جریآن‌های نشتی

اگر تجهیزات زیر دچار وضعیت خرابی شوند، حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ برای جریآن‌های نشتی با مشکل مواجه می‌شود.

- در سقف ماژولT : HSCB
- کارت های ECON (ناحیهECON): فیلتر منبع ۲۴ ولت مستقیم، منبع تغذیه ۲۴ ولت، پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی
- ناحیه کنتاکتور: ترانس تفاضلی

۴- حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ

اگر تجهیزات زیر دچار وضعیت خرابی شوند، حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ با مشکل مواجه می‌شود.

- در سقف ماژول T: برق گیر arrester و HSCB
- ناحیه خروجی: خازن EMC
- ناحیه ECON: کارت های ECON
- ناحیه کنتاکتور: ترانسدیوسرهای ولتاژ

۵- مدیریت ترمز الکترودینامیک (مدیریت جریان برگشتی ترمز دینامیکی نسبت به انتقال به شبکه بالادستی و یا تلف کردن جریان در مقاومت ترمزی)

اگر تجهیزات زیر دچار وضعیت خرابی شوند، مدیریت ترمز الکترودینامیک با مشکل مواجه می‌شود.

- در سقف ماژولT : HSCB
- در سقف ماژول M و MC: مقاومت ترمزی
- مجموعه PI (ناحیه قدرت): IGBT ها، GDC، GB، ترانس جریان و باسبار انتقال HIGH VOLTAGE

- کارت های ECON (ناحیهECON): فیلتر منبع ۲۴ ولت مستقیم، منبع تغذیه ۲۴ ولت، پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی
- ناحیه خروجی: شین‌های انتقال ولتاژ و پیچ‌های اتصال کابل به شین
- ناحیه کنتاکتور: کنتاکتور اصلی، ترانسدیوسرهای ولتاژ، باس بارهای HIGH VOLTAGE، کابل-های HIGH VOLTAGE

۴-۱-۲- عملکردهای ثانویه سیستم اینورتر ترکشن

عدم عملکرد هر کدام از عملکردهای ثانویه زیر ناشی از وضعیت خرابی در تجهیزات اینورتر ترکشن می‌باشد که برای هر کارکرد ذکر شده است.

۱-حفاظت در زمان تعمیرات از برق گرفتگی: مقاومت دشارژ

۲-خنک کردن مقاومت دشارژ: مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

۳-خنک کاری igbt ها: مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

۴-جای‌دهی سنسورهای دما در داخل خود: مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

۵-جای‌دهی نوار عایق کننده: مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

۶-انتقال هوا به فیلتر سلفی خط: مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

۷-اندازه‌گیری دما igbtها و GDCها: سنسورهای دما

۸-دریچه ورودی هوا به محفظه هدسینک جهت جلوگیری از ورود گرد و خاک در مجموعه PI: نوارهای عایقی PI

۹-حمل و نصب مجموعه PI: دسته حمل

۱۰-اتصال PI به بدنه ترکشن: پیچ‌های نگهدارنده

۱۱-اتصال ECON به بدنه ترکشن: پیچ‌های نگهدارنده جعبه ECON

۱۲-حذف نویز یا هارمونیک‌های کابل: فیلتر FRIT

۱۳-اتصال شین‌ها به بدنه: مقره عایق کننده شین‌ها

۱۴- ایجاد اتصالی مطمئن در اتصال شین‌ها به بدنه: مقره عایق کننده شین‌ها

۱۵-انتقال هوا جهت خنک‌کردن هدسینک PI: فن

۱۶-هدایت هوا جهت ورود به هدسینک: دریچه خروجی هوا

۱۷-جلوگیری از ورود اجسام بزرگ همچون برگ: دریچه خروجی هوا

۱۸-عایق کردن اتصال کابل به بدنه: کابل گلند بیرونی

۱۹-ثابت کردن کابل: کابل گلند بیرونی

۲۰-انتقال شیلد کابل‌های AC ترکشن به زمین: کابل گلند بیرونی

۲۱-اندازه‌گیری دمای فیلتر سلفی خط: سنسور دمای داخلی فیلتر سلفی خط

۲۲-تبدیل برق مصرفی فن: ترانس فن خنک‌کننده

۲۳-قطع و وصل تغذیه فن: کنتاکتورهای فرمان فن

۲۴-باز و بسته کردن در اینورتر ترکشن: قفل و لولا

۴-۲- چگونگی بدست آوردن دلایل خرابی

سؤال این بخش: به چه صورت‌های ممکن است تجهیز از کارکردهای خود متوقف شود؟

برای پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات RCM در گام دوم، باید از علت‌های خرابی تجهیز مطلع بود. در این بخش علل خرابی تجهیزات اینورتر ترکشن بیان شده است.

برای مشخص نمودن دلایل خرابی در عملکردهای اصلی و ثانویه باید به نکات زیر که برگرفته از کتاب RCM II (مرجع [۲۳]) می‌باشد، توجه نمود.

- خرابی، عدم توانایی تجهیز در انجام خواسته کاربرانش است.
- تمایز واضحی بین وضعیت خرابی (خرابی کارکردی) و پیشامدهای باعث وضعیت خرابی (حالات خرابی) وجود دارد ولی در تعریف بالا این تمایز دیده نمی‌شود و باید توجه داشت که هر تجهیز، چند کارکرد و هر کارکرد، چند استاندارد، ممکن است داشته باشد.
  - مثال برای پیشامدهایی که باعث علل خرابی (حالات خرابی) می‌شوند: روغن کاری نکردن منظم موتور ترکشن، سبب درست کار نکردن موتور می‌شود.
  - مثال برای وضعیت خرابی (خرابی کارکردی): درست کار نکردن موتور ترکشن.
- کاری که تجهیز باید انجام دهد، به‌عنوان کارکرد معرفی می‌شود.
- استاندارد عملکرد با مرز میان عملکرد رضایت بخش و خرابی مشخص می‌شود.
- عدم توانایی تجهیز در انجام عملکرد در سطح استاندارد عملکرد مورد نظر کاربر را خرابی کارکردی گویند.
- خرابی‌های جزئی دارای پیامدهای مختلفی هستند، بنابراین باید تمامی خرابی‌های کارکردی، ثبت شوند.

- تجهیز حتی اگر دچار فرسودگی باشد ولی بتواند در سطح مورد انتظار، کار نماید، خرابی محسوب نمی‌شود.
- برای تعیین استاندارد، بهترین حالت این است که بین افراد مسئول مثل کارکنان نت، مسئول ایمنی و مدیر بخش، به‌طور مشترک تصمیم‌گیری شود.
- سطح نت پیش اقدام مورد نیاز برای جلوگیری از خرابی توسط استاندارد عملکرد، تعریف می‌گردد.
- حالات خرابی باید دارای جزئیات مورد نیاز باشد تا مدیریت خرابی مناسب فراهم گردد.
- حالات خرابی باید در سطحی بررسی شود که تدبیر مناسبی برای مدیریت خرابی وجود داشته باشد.
- از مواردی که باید در FMEA فهرست گردد، خرابی‌هایی است که قبلاً در همان تجهیز اتفاق افتاده‌اند.
- اگر احتمال برود که خرابی دارای پیامدهای جدی است، باید احتمالات خرابی با وقوع کم را نیز در فهرست FMEA فهرست نمود.
- حالات خرابی در شرایط عملیاتی مختلف مانند اقلیم‌های مختلف، متفاوت است.

خرابی‌های کارکردی را در ستون دوم کاربرگ اطلاعات RCM می‌توان فهرست نمود.

۴-۳- چگونگی بدست آوردن اثرات خرابی

سؤال این پخش: چه اتفاقاتی در زمان رخداد خرابی رخ می‌دهد؟

در گام سوم RCM، اثرات خرابی هر تجهیز باید بیان شوند. برای مشخص نمودن دلایل خرابی در عملکردهای اصلی و ثانویه باید به نکات زیر که برگرفته از کتاب RCM II (مرجع [۲۳]) می‌باشد، توجه نمود.

- آنچه در زمان وقوع یک حالت خرابی رخ می‌دهد را اثرات خرابی گویند.

- شرح اثرات خرابی باید به تصمیم‌گیری در مورد پیامدهای عملیاتی و غیرعملیاتی خرابی نیز کمک کند.
- اثرات خرابی باید توضیح دهد که برای تعمیر خرابی چه کارهایی باید انجام شود.
- باید به آشکار بودن یا نبودن خرابی (مثلا روشن شدن چراغ یا صدای آژیر) توجه نمود.
- اگر احتمال خطر ایمنی یا محیط زیستی وجود داشته باشد، باید چگونگی احتمال وقوع در قسمت اثرات فهرست گردد.
- زمان توقف بسیار طولانی‌تر و همچنین ثبت کردن آن بسیار مهمتر از زمان تعمیر می‌باشد.
- زمان توقف ثبت شده در کاربرگ اطلاعات، باید بر اساس بدترین وضعیت ممکن باشد.
- برای پرداختن به اثرات خرابی، باید به پنج سؤال زیر باید پاسخ داده شود:
  - چه شواهدی برای رخداد خرابی وجود دارد؟
  - به چه صورت‌هایی ایمنی و محیط زیست تهدید می‌شوند؟
  - به چه صورت‌هایی بر روی تولید یا عملیات تأثیر گذاشته می‌شود؟
  - چه آسیب‌های فیزیکی توسط خرابی ایجاد شده است؟
  - زمان توقف به علت خرابی چقدر است (مدت زمان توقف یا تعمیر)؟
- در ستون چهارم جدول FMEA به اثرات خرابی پرداخته شده است.

۴-۴- منابع اطلاعاتی FMEA [۲۳]

- ۱- سازنده تجهیز (با استفاده از کاتالوگ سازنده یا درخواست ارائه FMEA تجهیز در قرارداد) ۲- فهرست عمومی حالات خرابی (توسط شرکت ثالث) ۳- کاربران تجهیزات مشابه (البته با توجه به اینکه بازار رقابتی است.)

۴- سوابق فنی (اغلب کامل نبوده و باید با احتیاط استفاده شوند.)

چگونگی ثبت حالات و اثرات خرابی

گام اول: فهرست نمودن تمامی حالات خرابی احتمالی به طور مجزا و به عنوان قسمتی از تجزیه و تحلیل‌های اصلی. به طور کلی حالات خرابی که می‌توانند بر روی یک زیر مجموعه تأثیر داشته باشند باید در سطحی بالاتر ارزیابی و ثبت شوند.

گام دوم: برای شروع کار، فهرستی از خرابی زیر مجموعه‌ها به عنوان یک حالت خرابی واحد در کاربرگ اطلاعات تهیه می‌شود. سپس یک کاربرگ جدید نیز برای بررسی و تحلیل کارکردها، خرابی‌های کارکردی، حالات و اثرات خرابی زیر مجموعه به صورت مجزا باید تهیه کرد.

گام سوم: تهیه فهرست خرابی زیر مجموعه در کاربرگ اطلاعات به عنوان یک حالت خرابی منفرد.

گام چهارم: در برخی موارد یک زیر مجموعه ممکن است از یک یا دو حالت خرابی آسیب ببیند که به سادگی نیز قابل پیشگیری هستند، همچنین تعدادی از خرابی‌های کم احتمال‌تر که پیشگیری آنها خیلی مقرون به صرفه نیست زیرا دارای فرکانس کم بوده و یا پیامدهای مربوطه پیشگیری آن را توجیه نمی‌کند. این گزینه در واقع ترکیبی از گزینه‌های یک تا سه است.

جدول ۴-۱ تحلیل حالات و اثرات خرابی در عملکردهای اولیه‌ی تجهیز اینورتر ترکشن را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲ تحلیل حالات و اثرات خرابی در عملکردهای ثانویه‌ی تجهیز اینورتر ترکشن نشان می‌دهد.

جدول ۴- ۱- جدول تحلیل حالات و اثرات خرابی عملکردهای اولیه‌ی تجهیز اینورتر ترکشن

کارکردهای اولیه		خرابی کارکرد		دلیل خرابی		اثرات خرابی
۱ تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۱	IGBT	A B	خرابی گیت‌بورد خرابی GDC		۱- تأثیر بر عملیات: مشکل در عملکرد سیستم چاپری در ترمز داینامیک و تبدیل ولتاژ ۰ تا ۵۶۱ ولت متناوب به ولتاژ مستقیم متغیر ۲- شواهد: ترک خوردن بدنه خارجی IGBT به علت خطا، جرقه، سیاه شدن تجهیزات پیرامون IGBT ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست
۲ نظارت بر عملکرد موتور ترکشن						

۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: انفجار IGBT ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ۴۸ ساعت
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۲	GDC	A	خرابی سنسور دما	۱- تأثیر بر عملیات: در عملکرد سیستم ترکشن اختلال ایجاد شده و PWM عمل نمی‌کند و در نتیجه عملکردهای تبدیل ولتاژ ۷۵۰ ولت مستقیم به ۰ تا ۵۶۱ ولت متناوب با اختلال ایجاد می‌شود و درنهایت عدم عملکرد ترکشن اینورتر است. انتقال فرمان سوئیچینگ به IGBTها با مشکل مواجه می‌شود. ۲- شواهد: LED CHECKING، اعلام سیستم نرم‌افزاری ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: احتمال آسیب برای تعمیرکننده به علت کار در ارتفاع در همه سیستم اینورتر ترکشن ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۴- زمان توقف: تعویض ۲ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	خرابی IGBT	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			C	خرابی گیت‌بورد	
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۳	GB	A	خرابی المان‌های الکتریکی	۱- تأثیر بر عملیات: عدم اعمال فرمان امیتر، گیت و کلکتور برای سوئیچ کردن IGBT، عدم عملکرد IGBT ۲- شواهد: سوختگی المان‌های گیت‌بورد وخطا نرم‌افزاری سیستم ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: سوختگی المان‌های گیت‌بورد ۵- زمان توقف: ۲ ساعت تعویض، تعمیر ندارد.
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۴	ترانس جریان	A	آسیب دیدگی پین‌ها و کانکتور و کابل	۱- تأثیر بر عملیات: ECON با پردازش خروجی ترانس، دستورات لازم برای قطع ولتاژ ترکشن را اعمال می کند. سیستم اینورتر ترکشن متوقف می‌شود. ۲- شواهد: اعلام نرم‌افزار های سیستم، عدم عملکرد سیستم ۳- تهدیدات ایمنی و زیست: ایزوله است و ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: به علت استفاده رزین (پلمپ بودن) در مدارات قابلیت مشاهده، عیب‌یابی و تعمیر وجود دارد. ۵- زمان توقف: تعویض دو ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۵	باسبار انتقال HIGH VOLTAGE	A	از بین رفتن عایق	۱- تأثیر بر عملیات: شبکه را به صورت مستقیم بی‌برق می‌نماید. چون باعث TRIP در خط اصلی می‌شود و بازخورد آن مستقیماً به پست باز می‌گردد، در صورت قطع پست، خط بی‌برق شده و تمامی قطارهای موجود در آن منطقه متوقف می‌شوند. ۲- شواهد: جرقه میزند، پس از باز کردن PI و خازن قابل مشاهده است. به خاطر اینکه ولتاژ موجود در باس‌های انتقال، بالا بوده، به صورت مستقیم بر فیدرهای بالاسری اثر می‌گذارد. ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: از بین رفتن عایق بین دو شینه ولتاژ بالا، خرابی بر اساس عوامل خارجی ۵- زمان توقف: تعمیر با جوش و تعویض عایق ۱ هفته
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	خرابی مهره‌های متصل به باس	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
۱	تبدیل برق DC به AC	۶	فیلتر منبع ۲۴ ولت DC	A	خرابی پین‌ها و کابل‌های ارتباطی فیلتر	۱- شواهد: خلل در تغذیه ۲۴ ولت سیستم ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: منبع تغذیه LOW VOLTAGE سیستم ترکشن را تغذیه نمی‌کند و سبب توقف اینورتر ترکشن می‌شود. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۲ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۳	حفاظت ترکشن بر جریان نشتی					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					
۱	تبدیل برق DC به AC	۷	منبع تغذیه ۲۴ ولت	A	خرابی پین‌ها و کابل‌های ارتباطی و پیچ‌های اتصال	۱- شواهد: خطا نرم‌افزاری ECON، GDC و گرم شدن تجهیز در بعضی مواقع ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: منبع تغذیه LOW VOLTAGE سیستم ترکشن را تغذیه نمی‌کند و سبب توقف اینورتر ترکشن می‌شود. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر مقرون به صرفه نیست، تعویض ۱ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۳	حفاظت ترکشن بر جریان نشتی					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					
۱	تبدیل برق DC به AC	۸	پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی	A	کج شدن پین‌ها	۱- شواهد: عدم عملکرد صحیح تجهیزات با اطمینان به سالم بودن قطعات ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳-تأثیر بر عملیات: خطاهای ناپایدار در عملکرد سیستم ها و سرانجام توقف ترکشن اینورتر ۴- آسیب فیزیکی: شکسته شدن کانکتورها، کج شدن پین‌ها، قطع شدن سیم ها، سوختن پین‌ها ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر و تعویض در بدترین شرایط ۲ هفته
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	قطع و یا شل شدن اتصال پین با سیم	
۳	حفاظت ترکشن بر جریان نشتی			C	خرابی مجموعه نگهدارنده پین‌ها و پیچ‌ها	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			D	نفوذ رطوبت در کانکتورها	
۱	تبدیل برق DC به AC	۹	شین‌های انتقال ولتاژ	A	خرابی پیچ و مهره‌ها	۱- شواهد: در اثر عبور جریان غیر طبیعی تغییر رنگ می‌دهد. ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: عدم انتقال صحیح ولتاژ، افزایش مقاومت در محل های اتصال به علت شل بودن پیچ‌ها، به علت شل بودن پیچ‌های پایه، احتمال اتصال کوتاه است، می‌تواند سبب ایجاد خطاهای ناپایدار کننده شود و حتی سبب توقف اینورتر ترکشن شود. ۴- آسیب فیزیکی: در صورت شل بودن پیچ‌ها، باعث جرقه می‌شود. ۵- زمان توقف: تعمیر ۵ ساعت، تعویض ۲ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	خراب شدن مقره متصل به باس	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
۱	تبدیل برق DC به AC	۱۰	پیچ‌های اتصال کابل به شین	A B	بریدن پیچ‌ها در زمان بستن پیچ‌ها خرابی گل پیچ	۱- شواهد: لق شدن PI ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: اگر تمامی پیچ‌ها خراب گردد بر مجموعه PI می‌تواند تاثیرگذار باشد. ۴- آسیب فیزیکی: هرز شدن، خرابی گل پیچ، خرابی واشرها ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ندارد، تعویض ۲ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					
۱	تبدیل برق DC به AC	۱۱	مقاومت شارژینگ	A B C	عدم عملکرد صحیح کنتاکتور کمکی آسیب دیدگی کابل‌ها و اتصالات نگهدارنده خرابی کنتاکتور شارژینگ، بوبین و مقاومت شارژینگ	۱- شواهد: خطای مقاومت توسط سیستم پردازنده، تغییر ظاهری مقاومت ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد ۳- تأثیر بر عملیات: عدم عملکرد سیستم شارژینگ و در نتیجه سبب عدم عملکرد بسته شدن کلید اصلی ترکشن می‌شود و سرانجام اینورتر از عملکرد متوقف می‌گردد. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ندارد، تعویض ۳ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۱	تبدیل برق DC به AC	۱۲	فیلتر سلفی خط	A B C	کثیفی زیاد خرابی پین‌ها و کابل‌های ارتباطی و پیچ‌های اتصال نشان دادن دمای بالای سنسور دمای مجموعه	۱- شواهد: خطای نرم‌افزاری سیستم، بالا رفتن حرارت فیلتر سلفی خط ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: اینور ترکشن متوقف می‌گردد. ۴- آسیب فیزیکی: بررسی کردن به وسیله اهم‌متر ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۴ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۱	تبدیل برق DC به AC	۱۳	کنتاکتور اصلی	A B C D	خرابی در تغذیه بوبین کنتاکتور خرابی بوبین کنتاکتور خرابی در کنتاکت‌های ثابت و متحرک خرابی پین و کانکتورهای اتصال	۱- تأثیر بر عملیات: عدم فرمان گیری سیستم ترکشن (با کمک بازخورد سیستم): با توجه به کنتاکتهای کمکی فرمان که وضعیت کنتاکتور اصلی را بررسی می‌کنند، در صورت عدم عملکرد کنتاکتور اصلی، بازخورد مناسب به پردازنده اصلی سیستم ارسال نشده و سیستم با خطا مواجه می‌شود. درنهایت با عدم رسیدن ولتاژ ۷۵۰ ولت به IGBT ها، سیستم عمل نمی‌کند. اگر کنتاکتور اصلی عملکرد نداشته باشد و اتفاقی در یکی از ماژول های قطار بیفتد، قطار در خط اصلی با محدودیت سرعت مواجه می‌شود. حال اگر در هر دو ماژول خرابی رخ دهد، واگن در خط اصلی متوقف شده و مشکل فقط با حضور کارکنان فنی قابل حل می‌باشد و قطار را باید به صورت مانور سرد از خط اصلی خارج کرد. در مانور سرد، واگن از شبکه جدا می‌شود. ۲- شواهد: صدا کم، سیستم ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: ذوب شدن کنتاکت ها ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۳ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
۱	کارکرد مهم و بحرانی تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۱۴	کنتاکتور شارژینگ	A B C D	خرابی در تغذیه بوبین کنتاکتور خرابی بوبین کنتاکتور خرابی در کنتاکت های ثابت و متحرک خرابی پین و کانکتورهای اتصال	۱- تأثیر بر عملیات: عدم فرمان گیری سیستم ترکشن (توضیحات بالا) ۲- شواهد: صدا کم، سیستم ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: ذوب شدن کنتاکت ها ۵- زمان توقف: تعویض ۳ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۱	کارکرد مهم و بحرانی تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۱۵	ترانسدیوسرهای ولتاژ	A B C D E F	خرابی طبیعی ترانسدیوسر عدم عملکرد صحیح آسیب بدنه در زمان نصب خرابی پیچ و مهره‌های اتصال ارتباطات اعمال ولتاژ زیاد غیر صحیح مشکل تغذیه سیستم	۱- شواهد: وجود خطا در سیستم نرم‌افزاری ترکشن ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: عدم عملکرد سیستم اینورتر ترکشن ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض هر کدام دو ساعت (دو عدد وجود دارد)
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۴	حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ					
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک					
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۱۶	ترانس تفاضلی	A B C D	خرابی طبیعی خرابی داخل سیم پیچ خرابی پین، پیچ، کانکتور و کابل-های ارتباطی عدم نصب صحیح در مدار	۱- شواهد: عملکرد سیستم های پردازنده سیستم ترکشن ۲-تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: عدم عملکرد اینورتر ترکشن ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۲ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۳	حفاظت ترکشن بر جریان نشتی					
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۱۷	کنتاکتورهای کمکی K1 و K2	A B C D	خراب شدن کنتاکت‌ها عدم نصب صحیح عدم استفاده صحیح در مدار خرابی سوکت‌ها و پیچ‌های نگهدارنده	۱- شواهد: خطا نرم‌افزاری سیستم ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: عملکرد کنتاکتور شارژینگ و اصلی را مختل می کند. ۴- آسیب فیزیکی: قابل تست است ولی قابل مشاهده نیست ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۱ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
۱	تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۱۸	باس بارهای HIGH VOLTAGE	A	از بین رفتن عایق	۱- شواهد: جرقه میزند، پس از باز کردن PI و خازن، قابل مشاهده است. به خاطر اینکه ولتاژ موجود در باس‌های انتقال، بالا بوده، به صورت مستقیم بر فیدرهای بالاسری اثر می‌گذارد. ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: شبکه را به صورت مستقیم بی‌برق می‌نماید. چون باعث خاموشی در خط اصلی می‌شود و بازخورد آن مستقیماً به پست باز می‌گردد، در صورت قطع پست، خط بی‌برق شده و تمامی قطارهای موجود در آن منطقه متوقف می‌شوند. ۴- آسیب فیزیکی: از بین رفتن عایق بین دو شینه ولتاژ بالا، شکست بر اساس عوامل خارجی ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر با جوش و تعویض عایق ۱ هفته، تعویض ۲ روز
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	خراب شدن مهره-های متصل به باس جهت نصب تجهیزات	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			C	احتمال آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات	
۱	تبدیل برق DC به AC	۱۹	کابل‌های HIGH VOLTAGE	A	آسیب دیدگی فیزیکی	۱- شواهد: خرابی روکش کابل، خطاهای HIGH VOLTAGE در سیستم نرم‌افزاری، مشاهده سوختگی در محل‌های اتصال کوتاه ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: احتمال اتصال کوتاه به بدنه خطر جانی دارد. ۳- تأثیر بر عملیات: عدم عملکرد اینورتر ترکشن ۴- آسیب فیزیکی: خرابی روکش کابل ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ۲ ساعت، تعویض ۵ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	اضافه جریان	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			C	نصب غیر صحیح کابل در مدار	
				D	خرابی پیچ و مهره‌های کابل	
۱	تبدیل برق DC به AC	۲۰	HSCB	A	خرابی مدار فرمان	۱- تأثیر بر عملیات: در صورت عدم عملکرد HSCB، ولتاژ ۷۵۰ ولت به ترکشن‌های واگن نرسیده و واگن فاقد توان حرکتی می‌باشد. درنهایت منجر به عدم ترکشن‌گیری در واگن می‌گردد. ۲- شواهد: صدا، ذوب شدن کنتاکت‌های متحرک و ثابت اتصال، بررسی سیستم از صفحه IDU ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: احتمال آسیب به علت وزن سنگین ۴- آسیب فیزیکی: ذوب شدن کنتاکت‌های متحرک و ثابت اتصال، مشاهده جرقه در ARC SHOOT ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۴ ساعت، تعمیر و توقف ۲۴ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن			B	خرابی مدار نگهدارنده	
۳	حفاظت ترکشن بر جریان نشتی			C	خرابی بوبین	
۴	حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ			D	خرابی مقاومت نگهدارنده	
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک			E	خرابی مدار حفاظت بر اضافه جریان HSCB	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
۱	کارکرد مهم و بحرانی تبدیل برق DC به AC و تبدیل توان	۲۱	خازن DC-LINK	A	دشارژ روغن	۱- تأثیر بر عملیات: در صورت عدم عملکرد خازن، فیلتر LC پایین گذر، تشکیل نشده و سیستم در برابر اعوجاج‌های جریان و ولتاژ خط آسیب پذیر می‌باشد. عدم عملکرد صحیح PWM در سه فاز و IGBT در تولید ولتاژ AC در هر فاز از تاثیرات دیگر بر عملیات می‌باشد. با توجه به هوشمند بودن سیستم و بازخورد از تمامی قطعات موجود، در صورت خرابی خازن، سیستم پردازنده اجازه بسته شدن HSCB و کنتاکت‌های اصلی را نمی‌دهد و ترکشن کار نمی‌کند. ترکشن فاقد عملکرد **۲**- شواهد: شواهد تجربی نداریم. **۳**- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: پخش روغن موجود در محیط سبب لیز خوردن و کثیف شدن **۴**- آسیب فیزیکی: شواهد تجربی نداریم. **۵**- زمان توقف: قابل تعمیر نیست، تعویض ۷ ساعت، توقف ۴۸ ساعت
۲	نظارت بر عملکرد موتور ترکشن					
۴	حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ	۱	کارت-های ECON	A	خرابی هر یک از کارت‌ها (مجموعه هفت کارت)	۱- تأثیر بر عملیات: در صورت خرابی هر یک از المان‌های مذکور در عملکرد سیستم ترکشن اختلال ایجاد شده و PWM عمل نمی‌کند و در نتیجه عملکردهای تبدیل ولتاژ ۷۵۰ ولت مستقیم به ۰ تا ۵۶۱ ولت متناوب با اختلال ایجاد می‌شود و درنهایت عدم عملکرد ترکشن اینورتر است. مشکل در عملکرد سیستم چاپری در ترمز داینامیک و تبدیل ولتاژ ۰ تا ۵۶۱ ولت متناوب به ولتاژ مستقیم متغیر. توقف کلیه کارکردهای ترکشن اینورتر ۲- شواهد: LEDCHECKING و نرم‌افزارهای مربوطه ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: قابل تعمیر نیست، تجربی یکی از کارت ها تعمیر شده (کارت PB)، تعویض ۲ ساعت، توقف:۱- کارت نباشد: از ۵ روز تا ۶ ماه ۲- کارت باشد: ۵ ساعت
				B	خرابی کانکتورهای اتصال	
۴	حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ	۳	برق‌گیر	A	از بین رفتن تنظیم شاخک هدایت جریان	۱- تأثیر بر عملیات: افزایش ولتاژ لحظه‌ای. خطر برق دار شدن واگن در زمان صاعقه ۲- شواهد: شکست مقره، از بین رفتن تنظیم شاخک اصلی ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: استفاده موارد شوینده قوی در انجام نظافت و PM ۴- آسیب فیزیکی: شکست در سرامیک های بدنه ۵- زمان توقف: تعویض ۳ ساعت
				B	شکست در بدنه مقره برق‌گیر	
۴	حفاظت ترکشن بر اضافه ولتاژ	۴	خازن emc	A	خراب شدن خازن EMC	۱- تأثیر بر عملیات: حفاظت سیستم در برابر جریان نشتی بالا کم می‌شود. خراب شدن خازن EMC ۲- شواهد: اطلاعات نرم‌افزاری ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: اطلاعات تجربی نداریم. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۲ ساعت
۵	مدیریت ترمز الکترودینامیک	۱۵	مقاومت ترمزی	A	اضافه ولتاژ	۱- شواهد: ذوب شدن مقاومت (پلیت ها: صفحه‌های نازک مقاومتی) ۲- تأثیر بر عملیات: عدم عملکرد وظیفه ی تلف
				B	کثیفی	

				C	تغییر فاصله صفحه‌های مقاومتی	کردن انرژی تولید شده توسط موتورها ۳- زمان تعمیر یا تعویض: تعویض ۸ ساعت، تعمیر ۲۴ ساعت
				D	اتصال توری محافظ قسمت فوقانی مقاومت با صفحه مقاومتی	

جدول ۴- ۲- جدول تحلیل حالات و اثرات خرابی عملکردهای ثانویه

کارکردهای ثانویه		خرابی کارکرد		دلیل خرابی		اثرات خرابی
۱	حفاظت در زمان تعمیرات از برق گرفتگی	۱ مقاومت دشارژ	A	خرابی مقاومت	۱- تأثیر بر عملیات: در عملیات تاثیری ندارد. ۲- شواهد: شواهد تجربی نداریم. ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: خطر برق گرفتگی ۴- آسیب فیزیکی: ذوب شدن پلیت‌ها، سوختن مقاومت ۵- زمان توقف: تعویض ۱ ساعت	
			B	داغی مقاومت		
			C	خنک نشدن تجهیز		
۲	خنک کردن مقاومت دشارژ	۱ مجموعه هدسینک خنک‌کننده هواigbt	A B	کثیف شدن ضربه خوردن	۱- تأثیر بر عملیات: اگر سیستم خنک نکند، اینور ترکشن به صورت خودکار متوقف می‌شود. ۲- شواهد: قطعه آلمینیومی می‌باشد که تجهیزات خنک‌کننده بر روی آن نصب است، احتمال خرابی این تجهیز خیلی پایین است. ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: ۱ هفته	
۳	خنک کاری igbt ها					
۴	جای‌دهی سنسور دما در					
۵	جای دهی نوار عایق‌کننده					
۶	انتقال هوا به فیلتر سلفی خط					
۷	اندازه‌گیری دما igbtها و GDCها	۱ سنسورهای دما	A	خرابی کانکتور و کابل	۱- تأثیر بر عملیات: در سنسورهای مکمل، اگر خطای دما پایین باشد، ایرادی ندارد، اگر خطا دما بالا باشد، خطاایجاد می‌شود و اگر دما نشان ندهد، سیستم متوجه می‌شود. اگر سنسورها عمل نکنند و سیستم متوجه خرابی نشود، احتمال خرابی IGBT وجود دارد. ۲- شواهد: سیستم نرم‌افزاری ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: خمیر سیلیکون برای محیط زیست ضرر دارد. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۲ ساعت	
			B	از بین رفتن خمیر سیلیکون هدسینک PI		
۸	جلوگیری از ورود گرد و خاک در مجموعه PI	۱ نوارهای عایقیPI	A	عدم نصب صحیح نوار PI	۱- تأثیر بر عملیات: در صورت تشدید گرد و خاک در سیستم های الکترونیکی PI، می‌تواند سبب خرابی المان‌های PI و حتی کل تجهیز PI شده و سرانجام سبب توقف اینورتر ترکشن شود. ۲- شواهد: وجود گرد و خاک در PM های دوره‌ای، مشاهده پارگی در تعمیرات اساسی ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: استهلاک و ترک نوار، پارگی نوار ۵- زمان توقف: تعویض ۷ ساعت	
			B	آسیب در زمان بستن دریچه هوا		
			C	فرسایش		

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل

۹	حمل و نصب مجموعه PI	۱	دسته حمل	A	ضربه	۱- تأثیر بر عملیات: تأثیر به خصوصی ندارد. ۲- شواهد: لق شدن دسته، کم شدن قطعات مانند پیچ ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: اگر دسته شل باشد ممکن است سبب افتادن مجموعه PI روی شخص شده و خطرات جانی را به علت سنگینی تجهیز داشته باشد. ۴- آسیب فیزیکی: شل شدن پیچ‌ها، لق شدن دسته ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ۴ ساعت، تعویض ۲ ساعت
				B	شل شدن پیچ‌ها	
۱۰	اتصال PI به بدنه ترکشن	۱	پیچ‌های نگهدارنده	A	بریدن پیچ‌ها	۱- تأثیر بر عملیات: اگر تمامی پیچ‌ها خراب گردد بر مجموعه PI می‌تواند تاثیرگذار باشد. ۲- شواهد: لق شدن PI ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: هرز شدن، خرابی گل پیچ، خرابی واشرها ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ندارد، تعویض ۲ ساعت
				B	خرابی گل پیچ	
۱۱	اتصال ECON به بدنه ترکشن	۱	پیچ‌های نگهدارنده جعبه ECON	A	بریدن پیچ‌ها در زمان بستن پیچ‌ها	۱- شواهد: لق شدن PI ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: اگر تمامی پیچ‌ها خراب گردد بر مجموعه PI می‌تواند تاثیرگذار باشد. ۴- آسیب فیزیکی: هرز شدن، خرابی گل پیچ، خرابی واشرها ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ندارد، تعویض ۲ ساعت
				B	خرابی گل پیچ	
۱۲	حذف نویز یا هارمونیک های کابل	۱	فیلتر FRIT	A	ضربه خوردن در زمان تعمیر	۱- شواهد: نویز سیستم بالا می‌رود و در تجهیزات تأثیر دارد. ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: فقط نویز را می‌گیرد. ۴- آسیب فیزیکی: شکستگی ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۳ ساعت
۱۳	اتصال شین‌ها به بدنه	۱	مقره عایق کننده شین‌ها	A	ضربه خوردن	۱- تأثیر بر عملیات: سبب انتقال ولتاژ به بدنه می‌شود و سپس سنسورهای حفاظتی، کلیدهای تغذیه سیستم ترکشن را قطع می کند و سپس اینورتر ترکشن از عملکرد متوقف می‌شود و حتی می‌تواند اگر کابل ۷۵۰ ولت اتصال کوتاه شود، سبب عملکرد رله‌های حفاظت پست شده و سبب بی‌برقی خط شود. ۲- شواهد: نشتی برق به بدنه، محکم نبودن شین‌ها در جای خود، تغییر رنگ ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: خطر اتصال برق به بدنه ۴- آسیب فیزیکی: ترک، اتصالات سقف شل هستند، تغییر رنگ در شین‌ها، سبب ایجادخطا high voltage در واگن می‌شود. ۵- زمان توقف: تعویض ۲ ساعت
۱۴	ایجاد اتصالی مطمئن در اتصال شین‌ها به بدنه					
۱۵	انتقال هوای محیط جهت خنک کردن هدسینک PI	۱	فن	A	خرابی ترانس فن	۱- تأثیر بر عملیات: بالا رفتن حرارت. دریچه‌های ورودی- خروجی بسته می‌شود. ۲- شواهد: صدای ناهنجار در زمان کار، ضعیف شدن در مکش باد ۳- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: آلودگی بالا ذرات خارجی، آسیب ایمنی برای گرد و خاک ۴- آسیب فیزیکی: لق شدن پره‌ها، سفت شدن پره‌ها ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۳ ساعت، تعمیر ۳ ساعت
				B	قطعی ولتاژ ورودی فن	
				C	خرابی کنتاکتور فرمان	

				D	گرفتگی دریچه ورودی- خروجی هوا		
				E	خرابی سیم‌پیچ فن		
۱۶	هدایت هوا جهت ورود به هدسینک	۱	دریچه ورودی هوا	A	بریدن پیچ در تعمیر	۱- شواهد: مشاهده خطای حرارت در سیستم ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: اگر به علت خرابی حرارت ترکشن بالا رود، سبب توقف اینورتر ترکشن می‌گردد. ۴- آسیب فیزیکی: بسته شدن دریچه‌های ورودی، مشاهده آلودگی شدید در قسمت فن ۵- زمان تعمیر و یا توقف: نگهداری و تعمیرات (نظافت) در حدود ۵ ساعت
۱۷	جلوگیری از ورود اجسام همچون برگ			B	خرابی نوار عایق		
				C	گرفتگی منافذ ورودی بر اثر آلودگی		
۱۸	عایق کردن محل اتصال کابل به بدنه در مقابل گرد و غبار	۱	کابل گلند بیرونی	A	استهلاک طبیعی لاستیک‌ها، واشر و ارینگ به کار رفته	۱- شواهد: وجود اثرات گرد و خاک و رطوبت در داخل سیستم، شل بودن کابل در محل اتصال گلند ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: اگر لاستیک‌های عایق خراب گردد و کابل با فلز گلند در تماس باشد، امکان آسیب در روکش کابل و اتصال کوتاه به بدنه گلند وجود دارد. ۴- آسیب فیزیکی: پارگی روکش کابل، وجود اثرات رطوبت و گرد و خاک در داخل جعبه ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعمیر ۲ ساعت و تعویض ۲ ساعت
۱۹	ثابت کردن کابل			B	بریدن پیچ و مهره ی اتصال		
۲۰	انتقال شیلد کابل‌های AC ترکشن به زمین						
ادامه‌ی جدول قبل							
۲۱	اندازه گیری دمای لاین فیلتر سلفی خط	۱	سنسور دمای داخلی فیلتر سلفی خط	A	خرابی کانکتور و کابل	۱- شواهد: خطا نرم‌افزاری سیستم ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: خمیر سیلیکون ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: توضیحات بالا برای سنسور PI، سنسور مکمل ندارد. ۴- آسیب فیزیکی: قابل مشاهده نیست. ۵- زمان توقف: جابجایی ۲ ساعت
				B	خرابی مقاومت PT100		
۲۲	تبدیل برق مصرفی فن	۱	ترانس فن خنک‌کننده	A	خرابی کنتاکتور	۱- شواهد: مشاهده خطا وضعیت فن، خطای بالا رفتن دما در کل سیستم، عدم عملکرد کنتاکتورهای فرمان فن۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد. ۳- تأثیر بر عملیات: می‌تواند عامل سوختن فن باشد، عدم عملکرد فن ۴- آسیب فیزیکی: مشاهده اثر سوختگی سیم ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۳ ساعت، تعمیر تا ۲ هفته
				B	خرابی سیم‌پیچ کنتاکتور		
				C	خرابی ترمینال‌های ورودی و خروجی		
				D	خرابی کابل‌های ورودی و خروجی		
				E	خرابی کنتاکتورهای فرمان		
				F	خرابی کانکتور، پین و کابل‌های ورودی ترانس		
۲۳	قطع و وصل تغذیه فن	۱	کنتاکتورهای فرمان فن	A	استهلاک طبیعی کنتاکت‌ها	۱- شواهد: مشاهده خطای وضعیت فن، خطای بالا رفتن دما در کل سیستم، عدم عملکرد کنتاکتورهای فرمان فن ۲- تهدیدات ایمنی و محیط زیست: ندارد ۳- تأثیر بر عملیات: عدم عملکرد فن و خنک کردن سیستم ۴- آسیب
				B	سوختن بوبین		
				C	شل شدن پیچ‌ها		

					D	عدم اعمال فرمان صحیح به کنتاکتور	فیزیکی: عدم عملکرد تست کنتاکتور در زمان بررسی ۵- زمان تعمیر و یا توقف: تعویض ۲ ساعت

فصل پنجم: پیاده‌سازی نت RCM II (تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی)

در فصل قبل کاربرگ FMEA که به‌عنوان مرحله‌ی اول پیاده‌سازی RCM II در این پایان‌نامه یاد شده است، کامل گردید. در این فصل با استفاده از جدول تصمیم‌گیری، نگهداری و تعمیرات برنامه‌ریزی شده و برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات ارائه می‌شود. در پایان فصل، با استفاده از یک روش ابتکاری، برتری تجهیزات با امتیازات مختلف، در برنامه نگهداری و تعمیرات نشان داده شده است.

- **مرحله‌ی دوم پیاده‌سازی RCM II**

برای تصمیم‌گیری راهبردی در فعالیت RCM II، ابتدا سوالاتی که در الگوریتم تصمیم‌گیری RCM II پرسیده شده است را باید به متخصصین باتجربه‌ی قطار شهری توضیح داد تا به راحتی این سوالات را درک نمایند. سپس سوالات هر قسمت از الگوریتم با جزئیات کامل برای هر تجهیز و زیرسیستم اینورتر ترکشن، از متخصصین قطار شهری، پرسیده می‌شود. با استفاده از الگوریتم و متخصصین قطار شهری، جدول تصمیم‌گیری کامل شده و برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات آماده می‌شود.

۵-۱- الگوریتم درخت تصمیم‌گیری RCM

جدول RCM II شامل ۱۶ ستون می‌باشد که ستون اول تا سوم از راست، در واقع ارتباط با جدول FMEA است که اعداد مربوطه به آن جدول، به این جدول ارجاع می‌شوند. ستون چهارم تا سیزدهم از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری (شکل ۵- ۱) به دست می‌آیند. شاخه O۱ از درخت تصمیم‌گیری مرجع [۲۳] به علت مقرون به صرفه نبودن اقتصادی، تغییر داده شده است.

هر حرف انگلیسی الگوریتم نشان دهنده‌ی یک سؤال است که در زیر، این سوال‌ها و چگونگی بدست آوردن جواب‌های آنها، شرح داده شده است:

بلوک H: آیا اگر عملکرد مورد انتظار، به دلیل این نوع خرابی، توسط تجهیز انجام نشود، برای کارکنان عملیاتی آشکار است؟

شرح سؤال: از ستون سوم جدول FMEA در فصل قبل، دلیل خرابی را یافته و بررسی می‌شود که آیا عدم عملکرد به دلیل این خرابی آشکار است. عملکرد زمانی آشکار است که کارکنان همان لحظه خرابی،

خرابی ایجاد شده را بفهمند. به طور مثال، اگر اضافه جریان به یک تجهیز اعمال گردد و آن تجهیز دارای حفاظت فیوز باشد، فیوز، جریان را قطع نموده و در همان لحظه آن خرابی معلوم می‌شود، بنابراین این خرابی، از نوع خرابی آشکار است. حال اگر به جای تجهیز، محافظ آن، یعنی فیوز خراب گردد، به علت کار کردن تجهیز اصلی، این خرابی معلوم نمی‌شود و در صورت اضافه جریان، تجهیز اصلی نیز خراب می‌شود، بنابراین این خرابی، از نوع پنهان است. چون خرابی پنهان سبب آسیب‌های مهمتری می‌گردد، خرابی پنهان از اهمیت بیشتری برخوردار است.

بلوک S: آیا این دلیل خرابی، منجر به زخمی شدن یا آسیب جانی می‌گردد؟

شرح سؤال: از ستون سوم FMEA در فصل قبل، دلیل خرابی مورد نظر را پیدا کرده و باید بررسی کرد که موجب عدم عملکردی می‌شود که سبب آسیب رسیدن به شخصی گردد.

بلوک E: آیا این دلیل خرابی، منجر به آلودگی که استاندارد محیط زیست را نقض نماید، می‌شود؟

شرح سؤال: از ستون سوم FMEA در فصل قبل، دلیل خرابی مورد نظر را پیدا کرده و باید بررسی کرد که سبب عدم عملکردی می‌شود که سبب نقض استاندارد محیط زیست گردد.

بلوک O: آیا این دلیل خرابی تأثیر مستقیمی بر عملیات دارد؟

شرح سؤال: اگر به علت این دلیل خرابی، تجهیز عمل نکند، تأثیری بر کیفیت ولتاژ خروجی، عملکرد مورد انتظار و هزینه دارد؟

بلوک های H۱، S۱، O۱ و N۱: آیا فعالیتی برای پیدا کردن خرابی وجود دارد که از نظر فنی توجیه پذیر باشد؟

شرح سؤال: برای رسیدن به جواب بالا، باید به تمامی سوالات زیر پاسخ داد. اگر حتی به یک سؤال از سوالات زیر جواب منفی داده شود، جواب سؤال بالا، خیر خواهد بود و به عبارت دیگر اگر جواب سؤال بالا، بله است، یعنی جواب تمامی سوالات زیر مثبت است.

۱- آیا شرایط خرابی بالقوه روشن است؟ ۲- شرایط خرابی بالقوه چیست؟ ۳- مدت زمان حدودی فاصله P-F چقدر است؟ ۴- آیا این فاصله میتواند پیامدهای خرابی را حذف یا کم نماید؟ ۵- آیا فاصله P-F با ثبات است؟

شرایط خرابی بالقوه روشن است، یعنی آیا علائمی مثل صدا، لرزش، تغییر شکل ظاهری و یا علائم نرم‌افزاری وجود دارد که تکنسین مربوطه از این علائم به احتمال خرابی تجهیز پی ببرد و اگر وجود دارد، این شرایط چیست.

بلوک های ۲H،۲S،۲O و ۲N: آیا تعمیر زمان بندی شده‌ای برای کاهش خرابی وجود دارد که از نظر فنی توجیه‌پذیر باشد؟

شرح سؤال: برای رسیدن به جواب بالا، باید به تمامی سوالات زیر پاسخ داد. اگر حتی به یک سؤال از سوالات زیر جواب منفی داده شود، جواب سؤال بالا، خیر خواهد بود و به عبارت دیگر اگر جواب سؤال بالا، بله است، یعنی جواب تمامی سوالات زیر مثبت است.

۱- آیا زمانی از عمر تجهیز وجود دارد که در آن زمان، سریعا احتمال خرابی بالا رود؟ ۲- مدت این عمر مفید چقدر است؟ ۳- آیا امکان بازگرداندن توانایی تجهیز با تعمیر وجود دارد؟

بلوک های ۳H، ۳S و ۳N: آیا تعویض زمان بندی‌شده‌ای برای کاهش خرابی وجود دارد که از نظر فنی توجیه‌پذیر باشد؟

شرح سؤال: اگر جواب سؤال آخر بلوک هایH ۲O،۲S،۲ و ۲N (آیا امکان بازگرداندن توانایی تجهیز با تعمیر وجود دارد؟) منفی بود و عمر مفیدی برای تجهیز وجود داشت، آنگاه جواب سوال‌های این بلوک ها مثبت است و اگر عمر مفید وجود نداشت، منفی خواهد بود.

بلوک ۴H: آیا نوعی فعالیت جستجو، برای پیدا کردن خرابی وجود دارد که از نظر فنی توجیه‌پذیر باشد؟

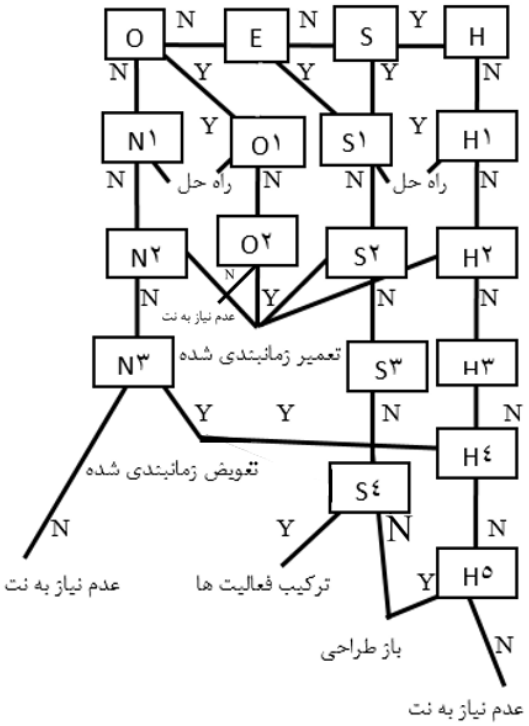
شرح سؤال: با فعالیت جستجوی خرابی، در تجهیزات با عملکرد پنهان، اگر روشی برای تعمیر زمان بندی و پیداکردن خرابی که از نظر فنی توجیه‌پذیر باشد، پیدا نشد، با استفاده از عدم دسترس‌پذیری و مدت زمان بین خرابی‌ها، برای تعیین زمان، از این فعالیت استفاده می‌شود.

بلوک ۴S: آیا ترکیبی از فعالیت‌ها وجود دارد که از نظر فنی توجیه‌پذیر باشد؟

شرح سؤال: ترکیبی از فعالیت‌ها، یک نوع فعالیت غیرمعمول است، به عبارتی این فعالیت توسط کارکنان نت به طور معمول انجام نمی‌گیرد و ممکن است طبق تجربه راه‌حلی را برای رفع احتمال خرابی بدست آورده باشند. برای مثال، برای احتمال خرابی مقاومت دشارژ، باید ولتاژ دو سر مقاومت را بررسی کرد که یک کار معمول برای کارکنان نت نبوده و با تجربه و استفاده از سندها به دست آمده است.

بلوک ۵H: آیا خرابی چندگانه می‌تواند بر ایمنی یا محیط زیست تأثیرگذار باشد؟

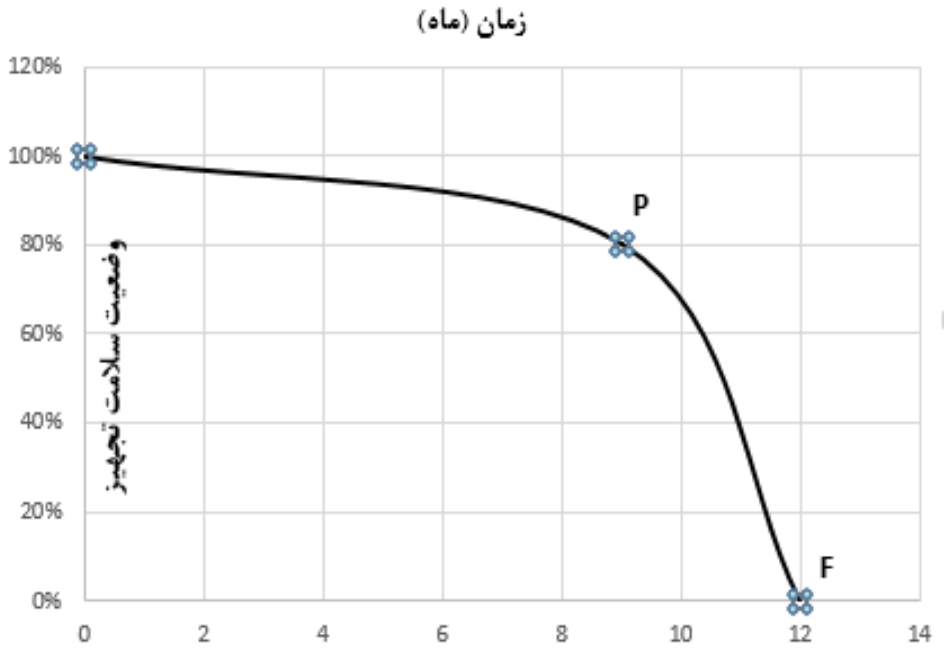
شرح سؤال: خرابی چندگانه زمانی به وجود می‌آید که ابتدا ابزار محافظ تجهیزی خراب گردد و سپس خود تجهیز هم خراب گردد.



شکل ۵-۱- الگوریتم درخت تصمیم‌گیری RCM (با تغییر در شاخه ۱O مرجع [۲۳])

۵-۲- شرح منحنی P-F

مدت زمان فاصله P-F، به زمانی گفته می‌شود که تکنسین به احتمال خرابی پی برده و تا خرابی کامل هنوز زمان هست. به‌عنوان مثال، برای نوار عایقی سیستم PI، منحنی P-F در شکل ۵- ۲ برحسب زمان- وضعیت، رسم گردیده است. نقطه P زمانی است که تکنسین با توجه به تغییر وضعیت ظاهری نوار عایقی، متوجه خرابی گردیده و نقطه F زمانی است که تجهیز خراب می‌شود. از نقطه ی P تا نقطه‌ی F که در واقع، یک مدت زمان سه ماهه (از ماه نهم تا دوازدهم) است، تکنسین باید بتواند در این مدت از وقوع خرابی جلوگیری نماید تا جلوگیری از خرابی توجیه پذیر باشد. اگر فاصله‌ی P-F دارای ثبات نباشد و در دفعات دیگر زمآن‌ها متفاوت باشد، جلوگیری از خرابی توجیه‌پذیر نیست.



شکل ۵- ۲- منحنی P-F مربوط به نوار عایقی PI

در جدول زیر توجیه‌پذیری پیدا کردن خرابی اثبات شده است. همانطور که گفته شد، برای توجیه‌پذیری پیدا کردن خرابی، باید به تمامی سوال‌های جدول جواب مثبت داده شود و اگر مدت زمان P-F وجود داشت، باید زمان آن در جدول نوشته شود. این سوال‌ها به گونه‌ای برای تکنسین‌های نت طرح شده است که هیچ احتمالی برای درک نکردن سؤال توسط تکنسین‌ها، وجود نداشته باشد. البته لازم به ذکر

است که باید قبل از پرسیدن سوالات، توضیحات کافی برای درک هر سؤال، توسط متخصص RCM به تکنسین‌ها داده شود. در جدول ۵-۱و ۵-۲ بررسی توجیه‌پذیری کشف خرابی بر اساس منحنی P-F برای کارکردهای اصلی و ثانویه آورده شده است. دلایل خرابی که ذکر نگردیده است، دارای خرابی بالقوه نبوده‌اند.

جدول ۵- ۱- بررسی توجیه‌پذیری پیداکردن خرابی بر اساس منحنی P-F برای کارکردهای اصلی

شماره کارکرد و حالت خرابی عملکرد اصلی	دلیل خرابی	آیا خرابی بالقوه وجود دارد؟	شرایط خرابی بالقوه چیست؟	مدت زمان حدودی فاصله P-F چقدر است؟	آیا در این فاصله می‌توان اقدامات لازم را انجام داد؟	آیا فاصله P-F با ثبات است؟
1-2-A 2-2-A 5-2-A	خرابی سنسور دما	Y	مشاهده درجه دما به صورت غیرطبیعی	۲۴ ساعت	Y	Y
1-4-A 2-4-A 5-4-A	آسیب‌دیدگی پین‌ها و کانکتور و کابل ترانس جریان	Y	زخمی شدن کابل، اتصالی در تجهیزات	بسیار کم	N	N
1-5-A 2-5-A 5-5-A	از بین رفتن عایق باس‌بار انتقال HIGH VOLTAGE	Y	شکست لایه عایق	۱ سال	Y	Y
1-5-C 2-5-C 5-5-C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات	Y	همان لحظه مشخص می‌شود	بسیار کم	N	N
1-8-D 2-8-D 3-3-D 5-8-D	نفوذ رطوبت در کانکتورها	Y	نفوذ رطوبت در کانکتور	۳ ماه	Y	Y
1-13-C 2-13-C 5-11-C	خرابی در کنتاکت‌های ثابت و متحرک کنتاکتور اصلی	Y	تغییر ضخامت کنتاکت، خوردگی کنتاکت بر اثر جرقه	۵۰۰۰ اتصال کنتاکت (حدود ۱,۵ سال)	Y	Y
1-14-C 2-14-C	خرابی در کنتاکت‌های ثابت و متحرک شارژینگ	Y	قابل تشخیص نیست	۵۰۰۰ کنتاکت (۱,۵ سال)	N	Y
1-18-C 2-18-C 5-13-C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات باس‌بارهای HIGH VOLTAGE	Y	مشاهده فیزیکی	قابل تشخیص نیست	N	Y
1-19-A 2-19-A 5-14-4	آسیب دیدگی فیزیکی کابل های HIGH VOLTAGE	Y	مشاهده فیزیکی	بلافاصله باید درست شود	N	Y

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
5-15-B	کثیفی مقاومت ترمزی	Y	در PM می‌توان دید.	۱ سال	Y	Y
5-15-C	تغییر فاصله‌ی صفحه‌های نازک مقاومتی در مقاومت ترمزی	N	قابل مشاهده نیست.			
5-15-D	اتصال توری محافظ قسمت فوقانی مقاومت ترمزی با صفحه‌های مقاومتی	Y	با مشاهده بصری قابل مشاهده است.	۱ سال	Y	Y

جدول ۵- ۲- بررسی توجیه‌پذیری پیداکردن خرابی بر اساس منحنی P-F برای کارکردهای ثانویه

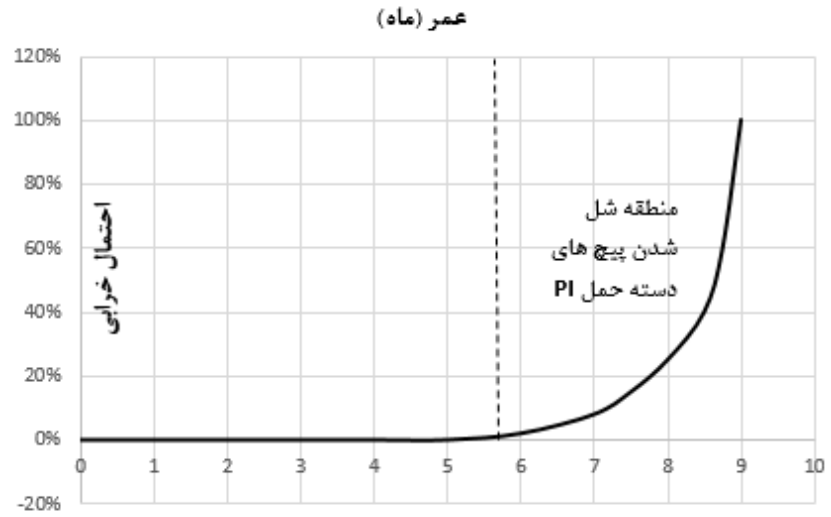
شماره کارکرد و حالت خرابی عملکرد ثانویه	دلیل خرابی	آیا خرابی بالقوه وجود دارد؟	شرایط خرابی بالقوه چیست؟	مدت زمان فاصله P-F چقدر است؟	آیا در این فاصله می‌توان اقدامات لازم را انجام داد؟	آیا فاصله P-F ثبات دارد؟
2-1-A 3-1-A 4-1-A 5-1-A 6-1-A	کثیفی عامل خرابی مجموعه هدسینک خنک کننده هوا igbt	N	مشاهده در PM، اعلام نرم‌افزاری اخطار دما	۶ ماه تا ۱ سال	Y	Y
7-1-B	از بین رفتن خمیر سیلیکون در هدسینک های PI سنسورهای دما	Y	بالا رفتن دما در قطعه و مشاهده فیزیکی خمیر	۱ تا ۳ ماه	Y	Y
8-1-A	عدم نصب صحیح نوار عایقیPI در زمان نصب PI	Y	مشاهده فیزیکی در PM	۳ ماه	Y	Y
8-1-B	آسیب نوارهای عایقیPI در زمان باز و بست کردن دریچه ورودی هوا	Y	مشاهده فیزیکی در PM	بسیار کم هر چه سریع تر عوض شود	N	N
8-1-C	فرسایش طبیعی نوار عایقیPI	Y	مشاهده فیزیکی در PM	بسیار کم هر چه سریع تر عوض شود	N	N
15-1-D	بسته شدن دریچه‌های ورودی و خروجی هوا فن	Y	مشاهده فیزیکی در زمان کار و بررسی دما	۱ ماه	Y	Y

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل						
16-1-C 17-1-C	بسته شدن منافذ دریچه ورودی هوا بر اثر آلودگی	Y	بالا رفتن دما	۱ ماه	Y	Y
22-1-A	خرابی کنتاکتور ترانس فن خنک‌کننده	Y	بازخورد سیستم (بالا رفتن دما)	۱ هفته	Y	Y
22-1-D	خرابی کابلهای ورودی و خروجی ترانس فن خنک‌کننده	Y	جرقه در سیستم	۱۰ دقیقه	N	N
23-1-A	استهلاک طبیعی کنتاکت های کنتاکتور فرمان فن	Y	تغییر ضخامت کنتاکتها، مشکل در قطع و وصل	۲ هفته تا ۱ ماه	Y	Y

۵-۳- منحنی بر حسب عمر مفید

منظور از عمر مفید در تجهیز این است که آیا تکنسین به صورت حدودی عمر مفیدی برای تجهیز با تجربیات خود یا سندهای موجود تجهیز تصور می‌کند و اگر این عمر وجود دارد، چقدر است. حال اگر عمر مفید وجود دارد، توانایی تعمیر توسط کارکنان مربوطه وجود دارد؟

به‌عنوان مثال، پیچ‌های دسته‌ی حمل PI حدوداً هر ۶ ماه، شل می‌شوند، بنابراین عمر مفید برای محکم بودن این پیچ‌ها، ۶ ماه است. شکل ۵- ۳ منحنی عمر مفید و احتمال خرابی را برای پیچ‌های دسته‌ی حمل PI نشان می‌دهد. چون قابلیت محکم کردن پیچ‌ها وجود دارد، پیچ‌ها قابل تعمیرند.



شکل ۵- ۳- منحنی عمر - احتمال خرابی پیچ‌های دسته حمل

در جداول زیر (۵-۳ و ۵-۴) توجیه‌پذیری تعمیر زمان بندی شده برای تجهیز اثبات گردیده است. همانطور که گفته شد، برای توجیه‌پذیری تعمیر زمان‌بندی شده برای تجهیز، باید به تمامی سوال‌های جدول جواب مثبت داده شود.

توجه: حالت‌های خرابی (دلایل خرابی) که ذکر نگردیده است، یا دارای مدت زمان توجیه‌پذیر P-F بوده‌اند یا اینکه عمر مفیدی برای آن‌ها توسط سند اینورتر ترکشن ذکر نشده است و کارکنان قطار شهری نیز از عمر مفید این تجهیزات اطلاعی نداشته‌اند.

جدول ۵- ۳- جدول بررسی توجیه‌پذیری تعمیر زمان بندی شده برای تجهیز بر اساس منحنی عمر مفید برای کارکردهای اولیه

شماره کارکرد و دلیل خرابی عملکردهای اولیه	حالت خرابی	آیا عمری وجود دارد که از آن زمان به بعد، احتمال خرابی بالا رود؟	مدت عمر مفید چقدر است؟	آیا امکان تعمیر برای تجهیزوجود دارد وجود دارد؟
1-4-A 2-4-A 5-4-A	آسیب‌دیدگی پین‌ها و کانکتور و کابل ترانس جریان	Y	۱ سال	Y
1-5-C 2-5-C 5-5-C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات	Y	۱۰ سال	Y
1-9-C 2-9-C 5-9-C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات شین‌های انتقال ولتاژ	Y	۱۰ سال	Y
1-11-A 2-11-A	عدم عملکرد صحیح کنتاکتور کمکی مقاومت شارژینگ	Y	۷ تا ۱۰ سال	N
1-11-C 2-11-C	عدم عملکرد صحیح کنتاکتور شارژینگ، بوبین و کنتاکت های اصلی مقاومت شارژینگ	Y	۷ تا ۱۰ سال	Y
1-12-A 2-12-A	کثیفی بیش از حد فیلتر سلفی خط	Y	۲ سال	Y
1-13-B 2-13-B 5-11-B	خرابی بوبین کنتاکتور اصلی	Y	۵ تا ۷ سال	Y
1-14-B 2-14-B	خرابی بوبین کنتاکتور شارژینگ	Y	۵ تا ۱۰ سال	Y
1-14-C 2-14-C	خرابی در کنتاکت های ثابت و متحرک شارژینگ	Y	۷ تا ۱۰ سال	N

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل				
1-17-A 2-17-A	خراب شدن کنتاکت‌ها کنتاکتورهای کمکی K1 و K2	Y	۷ تا ۱۰ سال	N
1-18-A 2-18-A 5-13-A	از بین رفتن عایق باس‌بارهای HIGH VOLTAGE	Y	۱۰ تا ۱۵ سال	N
1-18-C 2-18-C 5-13-C	آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات باس‌بارهای HIGH VOLTAGE	Y	۱۰ سال	Y
1-19-A 2-19-A 5-14-4	آسیب‌دیدگی فیزیکی کابل‌های HIGH VOLTAGE	Y	۱۰ سال	Y
1-20-A 2-20-A 3-5-A 4-5-A 5-16-A	خرابی مدار فرمان HSCB	Y	۵ تا ۷ سال	Y
1-20-B 2-20-B 3-5-B 4-5-B 5-16-B	خرابی کنتاکتورهای نگهدارنده	Y	۷ تا ۱۰ سال	Y
5-15-A	اضافه ولتاژ مقاومت ترمزی	Y	۱ تا ۳ سال	Y
5-15-C	تغییر فاصله‌ی صفحه‌های نازک مقاومتی در مقاومت ترمزی	Y	۲ تا ۴ سال	N

جدول ۵- ۴- جدول بررسی توجیه‌پذیری تعمیر زمان بندی شده برای تجهیز بر اساس منحنی عمر مفید برای کارکردهای ثانویه

شماره کارکرد و دلیل خرابی عملکردهای ثانویه	حالت خرابی	آیا عمری وجود دارد که از آن زمان به بعد، احتمال خرابی بالا رود؟	مدت عمر مفید چقدر است؟	آیا امکان تعمیر برای تجهیزوجود دارد وجود دارد؟
2-1-A 3-1-A 4-1-A 5-1-A 6-1-A	کثیفی عامل خرابی مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt	Y	۱ تا ۳ سال	Y
8-1-B	آسیب نوارهای عایقیPI در زمان باز و بست کردن دریچه ورودی هوا	Y	۳ سال	Y
8-1-C	فرسایش طبیعی نوار عایقیPI	Y	۱۵ سال	Y
9-1-A	ضربه خوردن دسته حمل	Y	۱۵ سال	Y

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل				
9-1-B	شل شدن پیچ‌های دسته حمل	Y	۶ ماه	Y
15-1-C	خرابی کنتاکتورهای فرمان فن	Y	۷ تا ۱۰ سال	N
16-1-B 17-1-B	خرابی نوار عایق دریچه ورودی هوا	Y	۱۵ سال	Y
18-1-A 19-1-A 20-1-A	استهلاک طبیعی لاستیک‌ها، واشر و ارینگ به کار رفته در کابل گلند بیرونی	Y	۷ تا ۱۰ سال	N
22-1-D	خرابی کابل‌های ورودی و خروجی ترانس فن خنک-کننده	Y	۱۰ سال	Y
22-1-E	خرابی کنتاکتورهای فرمان ترانس فن خنک‌کننده	Y	۵ تا ۷ سال	N
23-1-B	سوختن بوبین کنتاکتورهای فرمان فن	Y	۷ تا ۱۰ سال	N
23-1-C	شل شدن پیچ‌ها کنتاکتور فرمان فن	Y	۲ تا ۴ سال	Y

۵-۴- فعالیت جستجوی خرابی

فعالیت جستجوی خرابی (FFI)، نوعی فعالیت است که صرف نظر از عمر مفید و مدت زمان P-F، با استفاده از عدم دسترس پذیری تجهیز و مدت زمان متوسط خرابی‌ها، زمان بررسی و تعمیر تجهیز را معین می‌کند. به عبارتی هر مدت زمانی که توسط FFI مشخص گردید، تجهیز باید بررسی و تعمیر گردد. معادله ۱، رابطه بدست آوردن FFI را نشان می‌دهد [۱]:

$$FFI= ۲\times \text{عدم دسترس پذیری} \times M_{TIVE} \quad (۱-۵)$$

M_{TIVE}: مدت زمان متوسط بین خرابی برای ابزار محافظ

در تجهیزات با عملکرد پنهان، فعالیت جستجوی خرابی برای تجهیزاتی که عمر مفید و منحنی P-F نداشته‌اند و روشی برای پیدا کردن خرابی وجود دارد، استفاده می‌گردد. جدول زیر فعالیت جستجوی خرابی برای تجهیز اینورتر ترکشن را نشان می‌دهد.

جدول ۵- ۵- فعالیت جستجوی خرابی برای تجهیزات اینورتر ترکشن

شماره	احتمال خرابی	تعداد خرابی در زمان ۷ سال	M_{TIVE} در ۷ سال	عدم دسترس پذیری ((تعداد خرابی×۰/۵) ÷ M_{TIVE}) × ۱۰۰	جستجوی خرابی FFI= ۲× عدم دسترس ×پذیری M_{TIVE}
1-9-A اولیه	خرابی پیچ و مهره‌ها شین‌های انتقال ولتاژ	۲	۳/۵ سال	٪۲۹	۲× ۰/۲۹× ۷= ۴ سال
1-15-C اولیه	آسیب‌دیدگی فیزیکی بدنه در زمان نصب ترانسدیوسرهای ولتاژ	۱	۷ سال	٪۷/۱۴	۱ سال
1-20-E اولیه	خرابی حفاظت جریان کلید HSCB	عمر تجربی ۱۰ سال			۱۰ سال
1-1-C ثانویه	عدم خنک کاری سیستم مقاومت دشارژ	عمر تجربی ۱۰ سال			۱۰ سال
2-1-B ثانویه	ضربه خوردن مجموعه هدسینک خنک‌کننده igbtهوا	عمر تجربی ۱۰ سال			۱۰ سال
14-1-A ثانویه	ضربه خوردن مقره عایق کننده شین‌ها	عمر تجربی ۱۰ سال			۱۰ سال
16-1-A ثانویه	بریدن پیچ در زمان انجام تعمیر دریچه ورودی هوا	۵۰	۵۰ روز	٪۵۰	۵۰ روز

۵-۵- اجرای جدول تصمیم‌گیری RCM

اگر جواب سوال‌های بلوک‌های ۱O،۱S،۱H و ۱N، منفی بود، به ترتیب باید پاسخ بلوک‌های ۲O،۲S،۲H و ۲N را داد و اگر مثبت بود، راه‌حل پیشنهادی برای برنامه‌ی نت را باید انتخاب نمود. اگر پاسخ سوال‌های بلوک‌های ۲S،۲H و ۲N منفی بود، باید پاسخ بلوک‌های ۳H، ۳S و ۳N را داد و اگر مثبت بود، باید تعمیر زمان بندی‌شده انجام شود. اگر پاسخ بلوک ۲O منفی بود، عدم نیاز به نت زمان بندی شده و اگر مثبت بود، تعمیر زمان بندی شده انجام گردد. اگر پاسخ بلوک‌های ۳H، ۳S منفی بود، پاسخ بلوک‌های H4 و S4 داده می‌شود و اگر مثبت بود، تعویض زمان بندی شده انجام گیرد. برای بلوک N3 اگر پاسخ مثبت بود، تعویض زمان بندی شده، انجام شود و اگر منفی بود نیاز به نت نمی‌باشد. اگر بلوک های H4 منفی بود پاسخ بلوک H5 داده شود. اگر S4 منفی بود، باز طراحی انجام گیرد و اگر مثبت بود، برای S4، ترکیبی از فعالیت‌ها و برای H4 فعالیت جستجوی خرابی زمان بندی شود. اگر پاسخ بلوک H5 مثبت بود، باز طراحی انجام شود و اگر منفی بود، نیازی به نت زمان بندی شده نیست.

در ستون ۱۴، فعالیتی که متخصص مربوط باید برای تعمیر، تعویض و یا بررسی انجام دهد، نوشته شده است.

ستون ۱۵، زمان‌های انجام فعالیت است که برای بلوک‌های دارای P-F، مدت زمان P-F، برای بلوک‌های دارای عمر مفید، مدت عمر مفید و برای بلوک‌های جستجوی خرابی، زمان FFI می‌باشد. ستون آخر از راست، افرادی هستند که باید برنامه نت را انجام دهند.

با جداول زیر (۵-۷ و ۵-۸) تصمیم‌گیری و اولویت بندی برای نگهداری و تعمیرات اینورتر ترکشن انجام می‌گیرد. با استفاده از جدول تصمیم‌گیری، می‌توان برنامه‌ای راهبردی ارائه داد و وظایف کارکنان نگهداری و تعمیرات را بر اساس زمانی که فعالیت RCM II پیشنهاد داده است، مشخص نمود.

جدول ۵-۷- جدول تصمیم‌گیری RCM برای کارکردهای اولیه

مرجع اطلاعات			ارزیابی پیامدها				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	اقدامات پیش فرض			فعالیت‌های پیشنهادی	فاصله زمانی اولیه	افراد انجام دهنده
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
۱	۱	A	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲															
۵															
۱	۱	B	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲															
۵															
۱	۲	A	N				Y						برای خرابی سنسور دما، مداوم عملکرد تجهیزات در سیستم نرم‌افزاری ترکشن بررسی گردد، در صورت دیدن خرابی فیزیکی در PM خرابی سخت افزاری مشخص می‌گردد. اگر خراب شده باشد، تعویض شود. برای عوض کردن اینورتر ترکشن باید به تعمیرگاه سنگین منتقل گردد (با دشواری بیشتر در سقف قطار نیز قابل تعویض است).	۲ روز	تکنسین عملیات سبک
۲															
۵															
۱	۲	B	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲															
۵															
۱	۲	C	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲															
۵															
۱	۳	A	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲															
۵															
۱	۴	A	Y	N	N	Y	N	Y					برای اطلاع از آسیب‌دیدگی پین‌ها و کانکتور و کابل ترانس جریان، محکم بودن کانکتور، پین و گلند سیم‌ها بررسی گردد.	۱ سال	تکنسین نت سنگین
۲															
۵															
۱	۵	A	Y	N	N	Y	Y						سطح عایق از نظر شکست و محکم بودن اتصالات مقره‌ها بررسی گردد.	۱ سال	تکنسین نت سبک
۲															
۵															

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																			
۱ ۲ ۵	۵	B	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			
۱ ۲ ۵	۵	C	Y	N	N	Y	N	N	Y					بررسی رنگ سطح شین‌ها، بررسی سالم و سفت بودن پیچ‌های اتصال		۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۱ ۲ ۳ ۵	۶	A	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			
۱ ۲ ۳ ۵	۷	A	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			
۱ ۲ ۳ ۵	۸	A	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			
۱ ۲ ۳ ۵	۸	B	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			
۱ ۲ ۳ ۵	۸	C	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			
۱ ۲ ۳ ۵	۸	D	Y	N	N	Y	Y	N						بررسی پین‌ها و اتصالات از نظر سولفات نشدن، بررسی سالم بودن واشر و ارینگ ها، بررسی پیچ‌های اتصال		۳ ماه	تکنسین نت سبک
۱ ۲ ۵	۹	A	N					N	N	N	Y			فقط با بازدید بصری قابل پیدا کردن می‌باشد. اگر پیچ شل شده باشد، به علت عدم اتصال صحیح، در سیستم نرم‌افزاری اعلام می‌گردد. بر روی سقف قطار قابل تعویض یا تعمیر است.		۲ سال	تکنسین نت سبک
۱ ۲ ۵	۹	B	Y	N	N	Y	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده			

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																		
۱ ۲ ۵	۹	C	Y	N	Y	N	N	Y	N	Y				بررسی پیچ‌های اتصال کابل با شین، بررسی صحت اتصال مقره به شین	۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۱ ۲ ۵	۱۰	A	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲ ۵	۱۰	B	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲	۱۱	A	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	Y		فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۷ تا ۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۱ ۲	۱۱	B	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲	۱۱	C	Y	N	Y	N	N	Y	N	Y	N	N		فعالیت تعمیر زمان‌بندی شده، انجام شود. ابتدا قسمت جرقه گیر را باز کرده، پس از باز کردن جرقه گیر، کنتاکت‌های ثابت و متحرک قابل مشاهده هستند و می‌توان سلامت آن‌ها را به این صورت چک نمود. جهت تست گرم مدار در ابتدای حرکت قطار سیستم شارژینگ به مدت کوتاهی وارد مدار شده و سپس خارج می‌گردد. در صورت اشکال در این فرآیند، سیستم نرم‌افزاری خرابی را اعلام و ثبت می‌نماید.	۷ تا ۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۱ ۲	۱۲	A	Y	N	N	Y	N	Y	N	Y				فعالیت تعمیر زمان‌بندی شده، انجام شود. بازدید بصری در PM دوره‌ای و نظافت. نظافت در بالای قطار انجام می‌شود.	۲ سال	تکنسین نت سبک
۱ ۲	۱۲	B	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲	۱۲	C	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲ ۵	۱۳	A	Y	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲ ۵	۱۳	B	Y	N	Y	N	N	Y	N	Y					۵ تا ۷ سال	تکنسین نت سنگین

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																		
۱ ۲ ۵	۱۳	C	Y	N	N	Y	Y	N	Y						بـاز کردن کنتـاکتور و مشـــاهـده وضـــعیـت پلاتین‌های کنتاکت، بررسی وضعیت جرقه گیر، بررسی وضعیت فنرهای کنتاکتور	۱,۵ سال	تـکنســـین نت سبک
۱ ۲ ۵	۱۳	D	Y	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲	۱۴	A	Y	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲	۱۴	B	Y	N	N	Y	N	N	Y						فعالیت بازسـازی زمان‌بندی شـده، انجام شـود. (قسمت‌هایی که در کنتاکتور شارژینگ احتمال خرابی در آن‌هـا محتمـل می‌باشـــد، ۱- بوبین کنتـاکتور، ۲- کنتـاکـت هـای ثـابت و محرک ۳HIGH VOLTAGE- فنرهای موجود در کنتـاکتور ۴- کنتاکتور های کمکی و ۵- جرقه گیر می‌باشد. در صورت معیوب بودن هر یک از این قطعات باید تعویض گردند.)	۵ تا ۱۰ سال	تـکنســـین نت سنگین
۱ ۲	۱۴	C	Y	N	N	Y	N	N	Y						فعالیت از تعویض تجهیز به صـــورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۷ تـا ۱۰ سال	تـکنســـین نت سنگین
۱ ۲	۱۴	D	Y	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲ ۴ ۵	۱۵	A	Y	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲ ۴ ۵	۱۵	B	Y	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱ ۲ ۴ ۵	۱۵	C	N					N	N	N	Y				دقت در نصـب ترانسدیوسر ولتاژ، بازدید بصری در PM، در صـــورت خرابی باید تعویض گردد. تعویض در سقف قطار ممکن است.	۱ سال	تـکنســـین نت سبک
۱ ۲ ۴ ۵	۱۵	D	Y	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																				
۱	۱۵	E	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۴																		
۵																		
۱	۱۵	F	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۴																		
۵																		
۱	۱۶	A	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۳																		
۱	۱۶	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۳																		
۱	۱۶	C	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۳																		
۱	۱۶	D	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۳																		
۱	۱۷	A	Y	N	N	N	Y	N	N	Y						فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۷ تا ۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۲																		
۱	۱۷	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۱	۱۷	C	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۱	۱۷	D	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۱	۱۸	A	Y	N	N	N	Y	N	N	Y						فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۱۵ سال	تکنسین نت سنگین
۲																		
۵																		
۱	۱۸	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N						عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																		
۵																		
۱	۱۸	C	Y	N	N	N	Y	N	Y							بررسی آسیب‌های فیزیکی در باسبارها، بررسی پیچ‌های اتصال	۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۲																		
۵																		

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																				
۱	۱۹	A	Y	N	N	N	Y	N	Y	N	N	Y	N					بررسی اتصالات کابل‌ها، بررسی عایق کابل‌ها	۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۲																				
۵																				
۱	۱۹	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N					عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																				
۵																				
۱	۱۹	C	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N					عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																				
۵																				
۱	۱۹	D	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N					عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																				
۵																				
۱	۲۰	A	Y	N	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	N					فعالیت تعمیر زمان‌بندی شده، انجام شود. (بررسی وایرینگ، بررسی مدارهای اعمال فرمان، بررسی صحت عملکرد تجهیزات، در صورت معیوب بودن و نیاز المان معیوب تعویض گردد.)	۵ تا ۷ سال	تکنسین نت سبک
۲																				
۳																				
۴																				
۵																				
۱	۲۰	B	Y	N	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	N					فعالیت تعمیر زمان‌بندی شده، انجام شود. بررسی صحت عملکرد المان‌های موجود در مدار، در صورت معیوب بودن و نیاز المان معیوب تعویض گردد.	۷ تا ۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۲																				
۳																				
۴																				
۵																				
۱	۲۰	C	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N					عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																				
۳																				
۴																				
۵																				
۱	۲۰	D	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N					عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲																				
۳																				
۴																				
۵																				
۱	۲۰	E	N						N	N	N	Y	N					بررسی ولتاژ سیستم (اگر ولتاژ شبکه بالاتر از ۱۰۵۰ ولت DC با توجه به اطلاعات موجود در سند سیستم بود و کلید HSCB باز نگردیده باشد، حفاظت جریان HSCB با مشکل برخورده است.) در صورت نیاز تعویض گردد. برای تعمیر یا تعویض به تعمیرگاه سنگین منتقل گردد.	۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۲																				
۳																				
۴																				
۵																				

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																
۱ ۲	۲۱	A	N					N	N	Y	N		باز طراحی الزامی است. در صورت اعلام خرابی توسط سیستم نرم‌افزاری ترکشن، بررسی فنی با توجه به دستورات سند، انجام گردد. در صورت خرابی حتماً تعویض گردد. تعویض در تعمیرگاه سنگین صورت گیرد. بازطراحی می‌تواند حتی یک نوع آموزش خاص به کارکنان باشد.		
۴	۱	A	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۴	۱	B	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۴	۳	A	Y	Y	N	Y								ترکیبی از فعالیت‌ها: فقط مشاهده بصری در PM های دوره‌ای، در صورت خرابی حتماً تعویض گردد. تعویض در تعمیرگاه سبک (در سقف قطار) انجام می‌گردد.	۳ سال	تکنسین نت سبک
۴	۳	B	Y	Y	N	Y								ترکیبی از فعالیت‌ها: فقط مشاهده بصری در PM های دوره‌ای، در صورت خرابی حتماً تعویض گردد. تعویض در تعمیرگاه سبک (در سقف قطار) انجام می‌گردد.	۳ سال	تکنسین نت سبک
۴	۴	A	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۵	۱۵	A	Y	Y	N	Y		N	N	N	N	N		فعالیت تعمیر زمان‌بندی شده، انجام شود. (اندازه‌گیری فاصله‌ی صفحه‌های مقاومتی، نظافت و مقاومت، بررسی وضعیت توری محافظ با صفحات مقاومتی)	۱ تا ۳ سال	تکنسین نت سنگین
۵	۱۵	B	Y	Y	N			Y						برای نظافت و تعمیرات مقاومت، مقاومت باید باز گردیده و به تعمیرگاه سنگین فرستاده شود. به علت نصب مقاومت ترمزی در سقف واگن و مجاورت با هوای آزاد و نیز وجود پانتوگراف و نشستن گرد کربن بر روی مقاومت‌ها مقدار مقاومت پس از مدتی تغییر می‌نماید. احتمالاً بریدگی در PM، خطر زیست محیطی به علت نوع استفاده از مواد شوینده	۱ سال	تکنسین نت سبک
۵	۱۵	C	N			Y	N	N						فعالیت تعمیر تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۲ تا ۴ سال	تکنسین نت سنگین
۵	۱۵	D	Y	N	N	Y	Y	N	N					به علت سرد و گرم شدن بدنه‌ی فلزی مقاومت ترمزی، پس از مدتی توری‌های محافظ شکل اولیه خود را از دست داده و نیاز است مجدداً با فرایندهای فیزیکی، توری‌های محافظ به شکل اولیه خود باز گردند و این کار توسط جرثقیل موجود در کارگاه ترکشن انجام می‌گیرد.	۱ سال	تکنسین نت سبک

جدول ۵- ۸- جدول تصمیم‌گیری RCM برای کارکردهای ثانویه

مرجع اطلاعات			ارزیابی پیامدها				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	اقدامات پیش فرض			فعالیت‌های پیشنهادی	فاصله زمانی اولیه	افراد انجام دهنده
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4			
۱	۱	A	Y	Y			N	N	N			Y	چک کردن با احتیاط ولتاژ دو سر مقاومت (خطر دشارژ نشدن خازن DC-LINK) در صورت خرابی تعویض گردد. در تعمیرگاه سبک قابل تعویض است.	۵ سال	تکنسین نت سبک
۱	۱	B	Y	N	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱	۱	C	N				N	N	N	Y			با افزایش حرارت سیستم نرم‌افزاری خطا می‌دهد. تعویض در تعمیرگاه سبک.	۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۲	۱	A	N				N	Y					تعمیر انجام شود. (به وسیله دمنده‌ی باد، مسیر عبور هوا نظافت گردد.)	۱ سال	تکنسین نت سبک
۳															
۴															
۵															
۶															
۲	۱	B	N				N	N	N	Y			مشاهده بصری تنها راه می‌باشد. در صورت خرابی در تعمیرگاه سنگین تعویض گردد.	۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۳															
۴															
۵															
۶															
۷	۱	A	Y	N	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۷	۱	B	Y	N	N	Y	Y						باز کردن GDC هایی که سنسور دما در آن وجود دارد، مشاهده‌ی وضعیت خمیرهای سیلیکون، در صورت خشک شدن و یا پاک شدن خمیرهای سیلیکون، نظافت و استفاده از خمیرکاری مجدد	۳ ماه	تکنسین نت سبک
۸	۱	A	Y	N	N	Y	Y						چک کردن سالم بودن نوار، نظافت نوار و جایگاه نوار، بررسی شکل نوار	۳ ماه	تکنسین نت سبک

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																		
۸	۱	B	N	Y	N								جهت بازکردن PI ابتدا پیچ‌های اتصال شین‌ها را باز نموده و سپس کابل‌های قدرت خروجی ترانس‌های جریان را باز کرده و در آخر ۲ فیش کابل اتصال خازن EMC را از PI جدا می‌کنیم. ۴ پیچ اتصال PI به کف را باز نموده و حال می‌توان تعویض برای نوار عایقی PI را انجام داد.	۳ سال	تکنسین نت سبک
۸	۱	C	Y	N	Y	N	N	Y					با توجه به اسناد فنی هر ۱۵ سال تعویض گردد.	15 سال	تکنسین نت سبک
۹	۱	A	N	Y	N								در صورتی که ضربه سبب شکست شود، تعویض شود.	15 سال	تکنسین نت سبک
۹	۱	B	N	Y	N								در صورت شل بودن پیچ‌ها با آچار سفت گردد.	۶ ماه	تکنسین نت سبک
۱۰	۱	A	Y	N	N	N	N	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۰	۱	B	Y	N	N	N	N	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۱	۱	A	Y	N	N	N	N	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۱	۱	B	Y	N	N	N	N	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۲	۱	A	Y	N	N	N	N	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۳	۱	A	Y	N	N	N	Y	N	N	Y			در صورت شدید بودن ضربه در نرم‌افزار قابل مشاهده می‌باشد. در PMهای دوره‌ای با مشاهده بصری قابل تشخیص است. در صورت خرابی در تعمیرگاه سنگین تعویض گردد.	۱۰ سال	تکنسین نت سنگین
۱۴															
۱۵	۱	A	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۵	۱	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۵	۱	C	Y	N	N	Y	N	N	Y				فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۱۵	۱	D	Y	Y	N	N	Y			Y			باز کردن دریچه‌ها و تمیز کردن آن	۱ ماه	تکنسین نت سبک
۱۵	۱	E	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N		عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۶	۱	A	N							N	Y		برای جلوگیری از خرابی باید هر پیچ به میزان گشتاور مورد نیاز سفت گردد. مشاهده بصری فقط خطا را نمایان می‌نماید. در صورت خرابی در تعمیرگاه سبک تعویض گردد.	۴ ماه	تکنسین نت سبک
۱۷															
۱۶	۱	B	Y	N	N	Y	Y	N	Y				فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۱۵ سال	تکنسین نت سبک
۱۷															
۱۶	۱	C	Y	Y	N	N	Y			Y			باز کردن دریچه‌ها و تمیز کردن آن	۱ ماه	تکنسین نت سبک
۱۷															

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل																	
۱۸	۱	A	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N				فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۷ تا ۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۱۹																		
۲۰																		
۱۸	۱	B	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۱۹																		
۲۰																		
۲۱	۱	A	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲۱	۱	B	Y	N	N	Y	Y	N	N	N						از تجهیز سنسور دما در فیلتر سلفی خط دو قطعه در سیستم جایگذاری شده که یکی از آن‌ها رزرو است و بررسی سالم بودن این سنسورها توسط نرم‌افزار LISTWATCH امکان‌پذیر است. در صورت اطمینان از خرابی باید سربندی سنسور پشتیبان با سنسور اصلی تعویض گردد.	۱ هفته	تکنسین نت سبک
۲۲	۱	A	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲۲	۱	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲۲	۱	C	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲۲	۱	D	Y	N	N	Y	N	Y	N	N	N	N				بررسی وضعیت فیزیکی ترمینال‌ها از نظر سالم بودن پیچ‌های اتصال و وضعیت فیزیکی از نظر حرارت	۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۲۲	۱	E	Y	N	N	Y	N	N	N	N	N	N				فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۵ تا ۷ سال	تکنسین نت سبک
۲۲	۱	F	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		
۲۳	۱	A	Y	N	N	Y	Y	N	N	N						در صورت اعلام نرم‌افزاری خرابی سیستم، تعویض کنتاکتور انجام گردد.	۲ هفته تا ۱ ماه	تکنسین نت سبک
۲۳	۱	B	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				فعالیت تعویض تجهیز به صورت زمان‌بندی شده، انجام شود.	۷ تا ۱۰ سال	تکنسین نت سبک
۲۳	۱	C	Y	N	N	Y	N	Y	N	N	N	N				فعالیت تعمیر زمان‌بندی شده، انجام شود. در PM ها با آچار مربوط محکم گردد.	۲ تا ۴ سال	تکنسین نت سبک
۲۳	۱	D	Y	N	N	N	Y	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده		

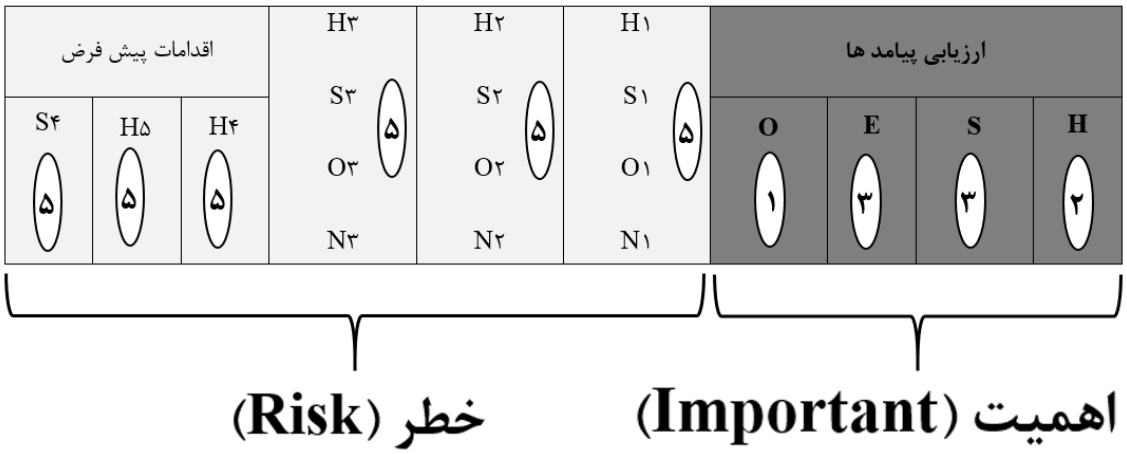
با استفاده از سه ستون سمت چپ جدول تصمیم‌گیری (زمان، فرد انجام دهنده و فعالیتی که باید انجام شود)، برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات تعیین می‌گردد. برای اینکه تعداد برنامه‌های نت کمتر و منظم‌تر

گردد، بایستی زمان‌هایی که نزدیک هم هستند (۴ ماهه نزدیک به سه ماهه است.) یا بین دو زمان قرار دارند (از ۱ سال تا ۲ سال)، به یک زمان واحد که معمولاً زمان کمتر است، تبدیل شود.

۵-۶- برتری تجهیزات با استفاده از روش ابتکاری در برنامه‌ی RCM II

تا اینجا با استفاده از روش RCM II، برنامه نگهداری و تعمیراتی بدست آمد که توجیه‌پذیری تجهیزات را از لحاظ فنی بررسی نموده است. برای درک بهتر اهمیت تجهیزات در نگهداری و تعمیرات، با استفاده از جدول تصمیم‌گیری RCM II و الگوگیری از روش‌های کار شده در مقالات پیشین، در این پایان‌نامه روشی ارائه شده است که اهمیت اجزا را بر اساس قیمت تجهیز، احتمال خطر نیافتن خرابی در تجهیز و اهمیت تجهیز از لحاظ ایمنی، آشکار بودن یا نبودن و تأثیر در عملیات بررسی می‌نماید.

در این روش الگوریتم جدول تصمیم‌گیری RCM II، به دو قسمت تقسیم می‌گردد که قسمت اول اهمیت تجهیز از لحاظ ایمنی و محیط زیست (S و E در جدول تصمیم‌گیری)، آشکار بودن یا نبودن (H در جدول تصمیم‌گیری) و تأثیر در عملیات (O در جدول تصمیم‌گیری) و قسمت دوم احتمال خطر نیافتن خرابی و راه حل مناسب در تجهیز ($H_{1,2,3,4,5}$، $S_{1,2,3,4}$، $O_{1,2,3}$ و $N_{1,2,3}$) است. شکل ۵- ۴ تقسیم بندی جدول تصمیم‌گیری RCM II برای امتیازدهی به تجهیزات را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ۴- تقسیم‌بندی جدول تصمیم‌گیری RCM II برای امتیازدهی به تجهیزات

یک فعالیت پیش اقدام زمانی از لحاظ اقتصادی به صرفه خواهد بود که هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم را به حدی کاهش دهد که انجام آن فعالیت دارای توجیه باشد. پیامدهای خرابی می‌توانند به ترتیب به پیامدهای ایمنی و زیست محیطی، پیامدهای عملیاتی و پیامدهای غیرعملیاتی تقسیم گردند. انجام یک فعالیت پیش اقدام، زمانی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود که هزینه‌ی حالات خرابی پیامدهای غیرعملیاتی که قرار است از آن جلوگیری گردد، کمتر از هزینه‌ی تعمیر خرابی باشد. یک فعالیت پیش اقدام زمانی برای خرابی پنهان، از لحاظ اقتصادی به صرفه است که دسترس‌پذیری مورد نیاز جهت کاهش خرابی چندگانه را تأمین نماید [1].

برای تحلیل اهمیت تجهیز از لحاظ اقتصادی، قیمت تجهیزات نیز به صورت امتیازاتی در این روش محاسبه شده است. قسمت اول گفته‌شده، به‌عنوان امتیاز اهمیت (I در جدول)، قسمت دوم به‌عنوان امتیاز خطر (R در جدول) و قسمت اقتصادی تجهیزات به‌عنوان امتیاز قیمت (P در جدول) می‌باشد.

به ترتیب اهمیتی که روش RCM II به خرابی‌ها داده است، امتیازات خرابی‌های دارای تأثیرات بر ایمنی و محیط زیست (S و E)، خرابی‌های پنهان (H) و تأثیر بر عملیات (O) به ترتیب دارای ۳، ۲ و ۱ می‌باشد. اگر جواب سؤال H، منفی باشد، ۲ امتیاز، اگر جواب سؤال E و S مثبت باشد، ۳ امتیاز و اگر جواب سؤال E مثبت باشد، ۱ امتیاز ثبت گردیده و در غیر اینصورت امتیازی ثبت نمی‌گردد.

امتیازات قسمت اقتصادی، با توجه به قیمت‌های داده‌شده در جدول (هزار تومان) برای ۰≤P<۲۵۰۰، ۲۵۰۰≤P<۷۵۰۰، ۷۵۰۰≤P<۱۲۵۰۰ و P ≥۱۲۵۰۰ به ترتیب ۰، ۱، ۲، ۳ می‌باشد. برای توازن توجیه-پذیری فنی و اقتصادی، حداکثر امتیازات قسمت اهمیت و قسمت اقتصادی، برابر انتخاب شده است.

در قسمت خطر، ابتدا آن تجهیزاتی که در جدول تصمیم‌گیری RCM II، به نگهداری و تعمیرات زمان بندی شده نیازی نداشتند را حذف می‌نماییم و برای بقیه تجهیزات، به ازای هر جواب منفی از سوالات $H_{1,2,3,4,5}$، $S_{1,2,3,4}$، $O_{1,2,3}$ و$N_{1,2,3}$ ، ۵ امتیاز ثبت می‌گردد. حداکثر امتیازات اهمیت (I)، خطر (R) و قیمت (P^{1}) به ترتیب ۳، ۲۰ و ۳ و حداقل امتیاز آنها صفر است.

[1] Price

برای بدست آوردن برتری[1] تجهیزات در نگهداری و تعمیرات، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌گردد:

$$E_i = \left(I + \frac{P_i}{\sum P_i}\right) \times R_i \qquad (i = 0,1,2,\dots,n) \qquad (۲-۵)$$

حداقل و حداکثر امتیاز E به ترتیب برابر صفر و ۱۲۰ است.

جدول ۵-۹، جدول تصمیم‌گیری بر اساس تجهیزات را جهت امتیازدهی به اولویت تجهیزات و جدول ۵-۱۰ امتیازات اولویت برای تجهیزات اینورتر ترکشن نشان می‌دهد. شکل ۵-۵ نمودار میله ای امتیازات اولویت برای تجهیزات اینورتر ترکشن است.

جدول ۵-۹- تجهیزات در جدول تصمیم‌گیری RCM II

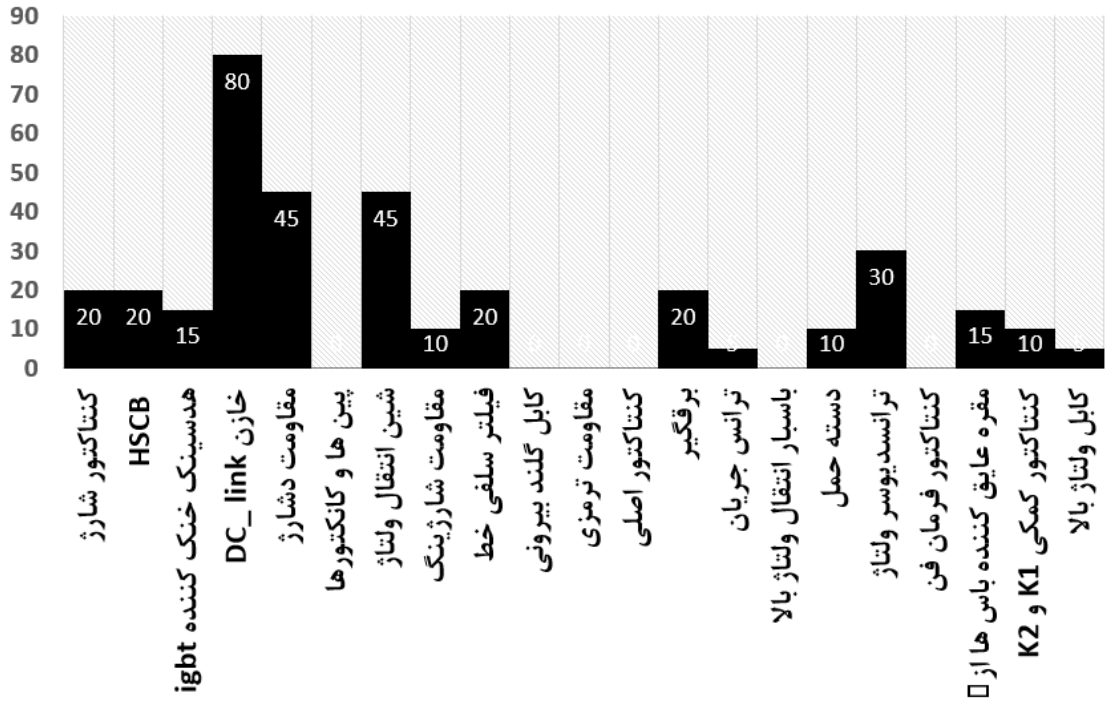
تجهیز	ارزیابی پیامدها				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	اقدامات پیش‌فرض			فعالیت‌های پیشنهادی
	H	**S**	**E**	**O**				H 4	H 5	S 4	
IGBT	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
GDC	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
GB	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
ترانس جریان	Y	N	N	Y	N	Y					
باسبار انتقال ولتاژ بالا	Y	N	N	Y	Y						
خازن dc_link	N				N	N	N	N	Y		
کارتهای ECON	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
فیلتر منبع ۲۴ ولت DC	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
منبع تغذیه ۲۴ ولت	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
پین‌ها و کانکتور	Y	N	N	Y	Y						
شین‌های انتقال ولتاژ	N				N	N	N	Y			
پیچ‌های اتصال کابل به شین	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
خازن EMC	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
مقاومت شارژینگ	Y	N	N	Y	N	N	Y				
فیلتر سلفی خط	Y	N	Y		N	Y					
کنتاکتور اصلی	Y	N	N	Y	Y						
کنتاکتور شارژینگ	Y	N	N	Y	N	N	Y				
ترانسدیوسر ولتاژ	N				N	N	N	Y			
ترانس تفاضلی	Y	N	N	Y	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
کنتاکتورکمکی K1 و K2	Y	N	N	Y	N	N	Y				
باس بار ولتاژ بالا	Y	N	N	Y	N	Y					
کابل ولتاژ بالا	Y	N	N	Y	N	Y					

[1] Excellence

HSCB	Y	N	N	Y	N	Y	Y	N				
برقگیر	Y	Y	N			Y	N					
مقاومت ترمزی	Y	Y	Y				Y					
مقاومت دشارژ	Y	Y	Y		N	N	N				Y	
هدسینک خنک‌کننده هوا igbt	N					Y	N					
دسته حمل	N					Y	N					
فیلتر FRIT	Y	N	N	N	N	N	N	N				عدم نیاز به نت برنامه‌ریزی شده
مقره عایق کننده شینها	Y	N	N	Y	N	N	N	Y				
کابل گلند بیرونی	Y	N	N	N	N	N	N	N				
کنتاکتورهای فرمان فن	Y	N	N	Y	Y		Y	N				

جدول ۵-۱۰- امتیازات اولویت برای تجهیزات اینورتر ترکشن

تجهیز	امتیاز			امتیاز اولویت	قیمت (هزار تومان)	تجهیز	امتیاز			امتیاز اولویت	قیمت (هزار تومان)
	P	I	R				P	I	R		
کنتاکتور شارژ	۱	۱	۱۰	۲۰	۳۰۰۰	کنتاکتور اصلی	۱	۱	۰	۰	۵۰۰۰
HSCB	۳	۱	۵	۲۰	۵۰۰۰۰	برقگیر	۱	۳	۵	۲۰	۴۰۰۰
هدسینک خنک‌کننده igbt	۱	۲	۵	۱۵	۶۰۰۰	باسبار انتقال ولتاژ بالا	۲	۱	۰	۰	۵۰۰۰
مقره عایق کننده باس ها از بدنه	۰	۱	۱۵	۱۵	۵۰۰	کنتاکتور کمکی K1 و K2	۰	۱	۱۰	۱۰	۳۰۰
مقاومت دشارژ	۰	۳	۱۵	۴۵	۳۰۰	دسته حمل	۰	۲	۵	۱۰	۲۰۰
پین‌ها و کانکتورها	۰	۱	۰	۰	۲۰۰۰	ترانسدیوسر ولتاژ	۰	۲	۱۵	۳۰	۸۰۰
شین انتقال ولتاژ	۱	۲	۱۵	۴۵	۳۵۰۰	کنتاکتور فرمان فن	۰	۱	۰	۰	۵۰۰
مقاومت شارژینگ	۰	۱	۱۰	۱۰	۱۵۰۰	خازن DC_ link	۲	۲	۲۰	۸۰	۸۰۰۰
فیلتر سلفی خط	۱	۳	۵	۲۰	۵۰۰۰	ترانس جریان	۰	۱	۵	۵	۱۰۰۰
کابل گلند بیرونی	۰	۰	۱۰	۰	۱۰۰	کابل ولتاژ بالا	۰	۱	۵	۵	۱۰۰۰
مقاومت ترمزی	۳	۳	۰	۰	۱۵۰۰۰						



شکل ۵-۵- نمودار میله ای امتیازات اولویت برای تجهیزات اینورتر ترکشن

فصل ششم: نتیجه گیری، جمع بندی (برنامه‌ی نهایی)

در این پایان‌نامه، روش RCM II برای سیستم اینورتر ترکشن، پیاده‌سازی گردید. فعالیت نگهداری و تعمیراتی که قبلاً برای این تجهیز استفاده می‌شد، نگهداری و تعمیرات مبتنی بر زمان بود. این فعالیت که بر حسب فواصل زمانی ثابت و بدون توجه به وضعیت تجهیز می‌باشد، نگهداری و تعمیراتی غیر ضروری و یا در بعضی اوقات، دیرتر از زمان مورد نیاز بود؛ همچنین افزایش هزینه نت و کاهش قابلیت اطمینان را به همراه داشت.

فعالیت RCM II به خاطر نوع الگوریتمی که دارد، پس از بررسی آشکار یا پنهان بودن خرابی، بررسی می‌کند که خرابی برای جان انسان‌ها و محیط زیست، ضرری نداشته باشد، چرا که در RCM II بیشترین اهمیت را به ایمنی جان انسان‌ها و محیط زیست داده است.

RCM II بیان می‌کند که اگر تجهیز دارای خرابی آشکار، تأثیری بر ایمنی و محیط زیست نداشته باشد و همچنین مدت زمان P-F و عمر مفیدی برای تجهیز قابل تعریف نباشد، نیازی به صرف وقت و هزینه کارکنان برای نت ندارد؛ زیرا اگر فعالیت نگهداری و تعمیرات برای این تجهیزات وجود داشته باشد، به علت رفع نشدن خطا، عاجز بودن تکنسین‌ها از یافتن خطا و تعمیر آن، با عدم وجود فعالیت نگهداری و تعمیرات فرقی ندارد؛ بنابراین بهتر است که هزینه‌ای در این زمینه انجام نگیرد و هر وقت تجهیز خراب گردید، فقط آن را تعویض نمود.

فعالیت RCM II با توجه به تجربیات کارکنان درباره‌ی تجهیز بهترین برنامه را ارائه می‌دهد که اجازه‌ی هیچ خرابی بالقوه ای را به تجهیزات نمی‌دهد. اگر عمر مفیدی برای تجهیز وجود داشته باشد و این تجهیز بر عملیات تأثیرگذار باشد و قابلیت تعمیر نیز وجود نداشته باشد، دقیقا بعد از عمر مفید، تجهیز از رده خارج شده و تجهیز دیگری جایگزین می‌گردد تا از توقف قطار و هزینه‌ی بیشتر در هنگام خرابی که در آینده ممکن است به وجود آید، جلوگیری گردد.

این فعالیت با تمام جزئیات برای سیستم اینورتر ترکشن پیاده‌سازی گردیده و تمام خرابی‌ها در جدول FMEA معرفی شده‌اند تا تکنسین‌های مربوطه با تمامی دلایلی که مانع از یک عملکرد می‌شوند، آشنا

باشند؛ بنابراین این روش، بسیاری از هزینه‌ها همچون نت بیهوده را کم نموده و دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد.

از برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات که نتیجه‌ی این پایان‌نامه محسوب می‌گردد، وظایف کارکنان مربوطه اینورتر ترکشن برای ۱۵ سال مشخص گردیده است. این برنامه، آنچه که باید انجام شود را به صورت هوشمندانه، برنامه‌ریزی نموده است. این برنامه جدا از برنامه‌های نت مبتنی بر خرابی، نت مبتنی بر زمان، نت مبتنی بر وضعیت و نت اصلاحی نیست، بلکه از همه‌ِی این برنامه‌ها به صورت هوشمندانه استفاده می‌نماید و تبدیل به برنامه‌ی جامع RCMII گردیده است. جدول ۶-۱ برنامه‌ی نهایی کوتاه‌مدت و جدول ۶-۲ برنامه‌ی نهایی بلندمدت را نشان می‌دهد.

در این پروژه برای دانستن اهمیت تجهیزات در برنامه‌ی نت RCM II، از روش ابتکاری امتیازدهی برای اولویت‌بندی استفاده گردیده است و اهمیت هر تجهیز را از لحاظ تأثیر در ایمنی و محیط زیست، عملیات، خرابی‌های پنهان، توجیه‌پذیری یافتن خرابی و اقتصاد، نسبت به دیگر تجهیزات نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از برنامه‌های نت RCM II نمایانگر جامع بودن این برنامه‌ی نت است که کاهش هزینه‌ی نت و افزایش قابلیت اطمینان را به همراه دارد.

جدول۶ - ۱- نمونه ای از برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات کوتاه مدت (روزانه تا ماهانه)

برنامه نگهداری و تعمیرات کوتاه مدت	
اینورتر ترکشن	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۲ روزه	تکنسین‌های عملیات (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای بررسی خرابی سنسور دما، مداوم عملکرد تجهیزات در سیستم نرم‌افزاری ترکشن بررسی گردد، در صورت دیدن خرابی فیزیکی در PM خرابی سخت افزاری مشخص می‌گردد. اگر خراب شده باشد، تعویض شود. برای عوض کردن اینورتر ترکشن باید به تعمیرگاه سنگین منتقل گردد (با دشواری بیشتر در سقف قطار نیز قابل تعویض است).	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل	
فاصله زمانی	انجام دهنده
هفتگی	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز مورد نظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
سالم بودن مقاومت ۱۰۰PT سنسور دمای داخلی فیلتر سلفی خط، توسط نرم‌افزار LISTWATCH بررسی شود. در صورت اطمینان از خرابی باید سربندی سنسور پشتیبان با سنسور اصلی تعویض گردد. (از تجهیز سنسور دما در فیلتر سلفی خط دو قطعه در سیستم جایگذاری شده که یکی از آن‌ها رزرو است.)	
فاصله زمانی	انجام دهنده
هر دو هفته	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای جلوگیری از استهلاک طبیعی کنتاکت‌های کنتاکتور فرمان فن، در صورت اعلام نرم‌افزاری خرابی سیستم، تعویض کنتاکتور انجام گردد.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
ماهانه	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای جلوگیری از مشکل بسته شدن منافذ دریچه ورودی هوا، دریچه‌ها باز شده و تمیز گردد.	

جدول ۶- ۲- نمونه‌ای از برنامه نگهداری و تعمیرات بلند مدت (۳ ماهه تا ۱۵ ساله)

برنامه نگهداری و تعمیرات بلند مدت	
اینورتر ترکشن	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۳ ماهه	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای جلوگیری از نفوذ رطوبت در کانکتورها، پین‌ها و اتصالات از نظر سولفات نشدن، سالم بودن واشر و ارینگ‌ها و پیچ‌های اتصال بررسی گردد.	
برای رفع مشکل از بین رفتن خمیر سیلیکون در هدسینک های PI سنسورهای دما، GDCهایی که سنسور دما در آن وجود دارند، باز نموده و وضعیت خمیرهای سیلیکون مشاهده گردد، در صورت خشک شدن و یا پاک شدن خمیرهای سیلیکون، نظافت گردیده و خمیرکاری مجدد انجام شود.	
برای جلوگیری از مشکل عدم نصب صحیح نوار عایقی PI در زمان نصب PI، سالم بودن نوار، نظافت نوار، جایگاه نوار و شکل نوار بررسی گردد.	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل	
برای جلوگیری از بریدن پیچ در زمان انجام تعمیر دریچه ورودی هوا، باید هر پیچ به میزان گشتاور مورد نیاز سفت گردد. فقط مشاهده بصری خطا را نمایان می‌نماید. در صورت خرابی در تعمیرگاه سبک تعویض گردد.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۶ ماهه	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
در بررسی دسته‌ی حمل PI، پیچ‌ها بررسی گردد و در صورت شل بودن پیچ‌ها با آچار سفت گردد.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
سالانه	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سنگین)
تجهیز موردنظر به تعمیرگاه سنگین آورده شود، سپس:	
برای اطلاع از آسیب‌دیدگی پین‌ها و کانکتور و کابل ترانس جریان، محکم بودن کانکتور، پین و گلند سیم ها بررسی گردد.	
نظافت گردد. برای نظافت و تعمیرات مقاومت ترمزی، مقاومت باید باز گردیده و به تعمیرگاه سنگین فرستاده شود. به علت نصب مقاومت ترمزی در سقف واگن و مجاورت با هوای آزاد و نیز وجود پانتوگراف و نشستن گرد کربن بر روی مقاومت‌ها مقدار مقاومت پس از مدتی تغییر می‌نماید. احتمالاً بریدگی در PM، خطر زیست‌محیطی به علت نوع استفاده از مواد شوینده	
فاصله زمانی	انجام دهنده
سالانه	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای اطلاع از مشکل از بین رفتن عایق باسبار انتقال HIGH VOLTAGE، سطح عایق از نظر شکست و محکم بودن اتصالات مقره ها بررسی گردد.	
برای احتمال خرابی در کنتاکت های ثابت و متحرک کنتاکتور اصلی، کنتاکتور باز شده و وضعیت پلاتین‌های کنتاکت مشاهده گردد. وضعیت جرقه گیر و وضعیت فنرهای کنتاکتور بررسی شود.	
برای حل مشکل آسیب‌دیدگی فیزیکی بدنه در زمان نصب ترانسدیوسرهای ولتاژ، در نصب ترانسدیوسر ولتاژ دقت گردد. در PM بازدید بصری صورت گرفته و در صورت خرابی تعویض گردد. تعویض در سقف قطار ممکن است.	
برای حل مشکل کثیفی عامل خرابی مجموعه هدسینک خنک‌کننده هواigbt ، به وسیله دمنده‌ی باد، بدون توجه به مقداری کثیفی، مسیر عبور هوا کاملاً نظافت گردد.	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل

در اتصال توری محافظ قسمت فوقانی مقاومت ترمزی با صفحه‌های مقاومتی، به علت سرد و گرم شدن بدنه‌ی فلزی مقاومت ترمزی، پس از مدتی توری‌های محافظ شکل اولیه خود را از دست داده و نیاز است مجدداً با فرایندهای فیزیکی، توری‌های محافظ به شکل اولیه خود باز گردند و این کار توسط جرثقیل موجود در کارگاه ترکشن انجام می‌گیرد.

فاصله زمانی	انجام دهنده
۲ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سنگین)

تجهیز مورد نظر به تعمیرگاه سنگین آورده شود، سپس:

اگر تغییر در فاصله‌ی صفحه‌های نازک مقاومتی در مقاومت ترمزی، مشاهده شد، این صفحات تعویض گردند.

فاصله زمانی	انجام دهنده
۲ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)

تجهیز مورد نظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

خرابی پیچ و مهره‌ها شین‌های انتقال ولتاژ فقط با بازدید بصری آشکار می‌شود. اگر پیچ به علت عدم اتصال صحیح، شل شده باشد، در سیستم نرم‌افزاری اعلام می‌گردد. بر روی سقف قطار قابل تعویض یا تعمیر است.

برای رفع مشکل کثیفی بیش از حد فیلتر سلفی خط، بازدید بصری و نظافت انجام گیرد. نظافت در بالای قطار انجام می‌شود.

برای رفع مشکل شل شدن پیچ‌ها کنتاکتور فرمان فن، پیچ‌ها با آچار مربوطه محکم گردد.

فاصله زمانی	انجام دهنده
۳ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)

تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از بین رفتن تنظیم شاخک هدایت جریان برقگیر فقط با مشاهده بصری قابل مشاهده است، در صورت خرابی حتماً تعویض گردد. تعویض در تعمیرگاه سبک (در سقف قطار) انجام می‌گردد.

شکست در بدنه‌ی مقره برقگیر فقط با مشاهده بصری قابل مشاهده است، در صورت خرابی حتماً تعویض گردد. تعویض در تعمیرگاه سبک (در سقف قطار) انجام می‌گردد.

برای رفع آسیب‌دیدگی نوارهای عایقی PI در زمان باز و بست کردن دریچه ورودی هوا، جهت بازکردن PI از داخل جعبه TCU ابتدا دریچه‌های ورودی و خروجی هوا را باز نموده تا نوارها آزاد شوند، سپس پیچ‌های اتصال شین‌ها را با پیچ‌گوشتی مدل .۳PH باز نموده و سپس کابل‌های قدرت خروجی ترانس‌های جریان را باز کرده و در آخر ۲ فیش کابل اتصال خازن EMC را از PI جدا شود. ۴ پیچ اتصال PI به کف را باز نموده و حال به کمک دسته‌ی حمل PI، می‌توان PI را جا به جا نمود و تعویض برای نوار عایقی PI را انجام داد.

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۵ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سنگین)
تجهیز مورد نظر به تعمیرگاه سنگین آورده شود، سپس:	
قسمت‌هایی که در کنتاکتور شارژینگ احتمال خرابی در آن‌ها محتمل می‌باشد، ۱- بوبین کنتاکتور، ۲- کنتاکت‌های ثابت و محرک ۳HIGH VOLTAGE- فنرهای موجود در کنتاکتور ۴- کنتاکتورهای کمکی و ۵- جرقه گیر می‌باشد. در صورت معیوب بودن هر یک از این قطعات باید تعویض گردند.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۵ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز مورد نظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای رفع احتمال خرابی مدار فرمان HSCB، وایرینگ، مدارهای اعمال فرمان، صحت عملکرد تجهیزات بررسی گردد. در صورت معیوب بودن و نیاز، المان معیوب تعویض گردد.	
برای رفع احتمال خراب شدن مقاومت دشارژ، با احتیاط ولتاژ دو سر مقاومت بررسی گردد. (خطر دشارژ نشدن خازن DC-LINK) در صورت خرابی تعویض گردد. در تعمیرگاه سبک قابل تعویض است.	
برای رفع احتمال خرابی کنتاکتور های فرمان ترانس فن خنک‌کننده، صرف نظر از وضعیت این کنتاکتورها، کنتاکتورها تعویض گردند.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۷ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سنگین)
تجهیز مورد نظر به تعمیرگاه سنگین آورده شود، سپس:	
برای رفع مشکل عدم عملکرد صحیح کنتاکتور کمکی مقاومت شارژینگ، بدون در نظر گرفتن نوع وضعیت کنتاکتور، کنتاکتور تعویض گردد.	
برای رفع عدم عملکرد صحیح کنتاکتور شارژینگ، بوبین و کنتاکت‌های اصلی مقاومت شارژینگ، ابتدا قسمت جرقه گیر را باز کرده، پس از باز کردن جرقه گیر، کنتاکت های ثابت و متحرک قابل مشاهده هستند و می‌توان سلامت آن‌ها را به این صورت بررسی نمود. جهت تست گرم مدار در ابتدای حرکت قطار، سیستم شارژینگ به مدت کوتاهی وارد مدار شده و سپس خارج می‌گردد. در صورت اشکال در این فرآیند، سیستم نرم‌افزاری خرابی را اعلام و ثبت می‌نماید.	
برای رفع احتمال خرابی در کنتاکت های ثابت و متحرک شارژینگ، صرف نظر از وضعیت این کنتاکت ها، کنتاکت تعویض گردند.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۷ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل	
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای رفع احتمال خراب شدن کنتاکت ها کنتاکتورهای کمکی ۱K و ۲K، صرف نظر از وضعیت این کنتاکت ها، کنتاکت تعویض گردند.	
برای رفع احتمال خرابی در کنتاکتور های نگهدارنده، صحت عملکرد المان‌های موجود در مدار بررسی گردد. در صورت معیوب بودن و نیاز، المان معیوب تعویض گردد.	
برای رفع احتمال استهلاک طبیعی لاستیک‌ها، واشر و ارینگ به کار رفته در کابل گلند بیرونی، صرف نظر از وضعیت این کنتاکت ها، کنتاکت تعویض گردند.	
برای رفع احتمال سوختن بوبین کنتاکتورهای فرمان فن، صرف نظر از وضعیت این کنتاکتور، کنتاکتور تعویض گردند.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۱۰ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سنگین)
تجهیز موردنظر به تعمیرگاه سنگین آورده شود، سپس:	
برای حل مشکل آسیب‌دیدگی باسبار HIGH VOLTAGE، رنگ سطح شین‌ها، سالم و سفت بودن پیچ‌های اتصال بررسی گردد.	
برای حل مشکل آسیب‌دیدگی در زمان تعمیرات شین‌های انتقال ولتاژ، پیچ‌های اتصال کابل با شین و صحت اتصال مقره به شین بررسی گردد.	
برای حل مشکل آسیب‌دیدگی فیزیکی کابل‌های HIGH VOLTAGE، اتصالات کابل‌ها و عایق کابل‌ها بررسی گردد.	
برای جستجوی خرابی مدار ایزولاتور داخلی کلید HSCB، ولتاژ سیستم بررسی گردد. (اگر ولتاژ شبکه بالاتر از ۱۰۵۰ ولت DC با توجه به اطلاعات موجود در سند سیستم بود و کلید HSCB باز نگردیده باشد، حفاظت جریان HSCB با مشکل برخورده است.) در صورت نیاز تعویض گردد. برای تعمیر یا تعویض به تعمیرگاه سنگین منتقل گردد.	
برای جستجوی خرابی ضربه خوردن مقره عایق کننده شین‌ها، در صورت شدید بودن ضربه، در نرم‌افزار قابل مشاهده می‌باشد. در PM های دوره‌ای با مشاهده بصری قابل تشخیص است. در صورت خرابی در تعمیرگاه سنگین تعویض گردد.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۱۰ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای جستجوی خرابی همچون ضربه خوردن عامل خرابی مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt، مشاهده بصری در PM تنها راه می‌باشد. در صورت خرابی در تعمیرگاه سنگین تعویض گردد.	
سیم پیچ فن بدون توجه به ظاهر و کارکردش از رده خارج شده و تعویض گردد.	

ادامه‌ی جدول صفحه‌ی قبل	
برای حل مشکل خرابی کابل‌های ورودی و خروجی ترانس فن خنک‌کننده، وضعیت فیزیکی ترمینال‌ها از نظر سالم بودن پیچ‌های اتصال و وضعیت فیزیکی از نظر حرارت بررسی گردد.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۱۵ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سنگین)
تجهیز موردنظر به تعمیرگاه سنگین آورده شود، سپس:	
برای رفع احتمال از بین رفتن عایق باس بارهای HIGH VOLTAGE، صرف نظر از وضعیت این عایق ها، عایق ها تعویض گردند.	
فاصله زمانی	انجام دهنده
۱۵ ساله	تکنسین‌های نت (تعمیرگاه سبک)
تجهیز موردنظر در تعمیرگاه سبک (در قطار شهری) مورد بررسی قرار می‌گیرد.	
برای رفع احتمال فرسایش طبیعی نوار عایقی PI، صرف نظر از وضعیت این نوار ها، نوار ها تعویض گردند.	
برای رفع احتمال خرابی دسته حمل با ضربه خوردن، بررسی گردد.	
برای رفع احتمال خرابی نوار عایق دریچه ورودی هوا، صرف نظر از وضعیت این نوار ها، نوار ها تعویض گردند.	

A- پیوست

A-۱- بررسی و توضیحات تجهیزات سیستم اینورتر ترکشن

اینورتر ترکشن شامل تجهیزات مختلفی با عملکردهای مختلف می‌باشد. در ادامه به معرفی این تجهیزات پرداخته شده است.

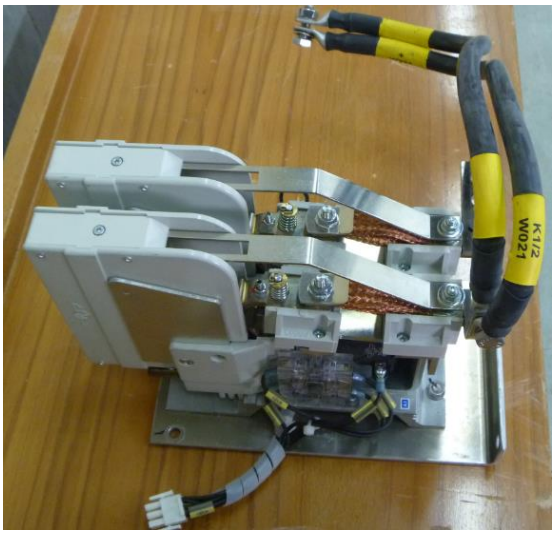
A-۱-۱-کنتاکتور شارژ

وقتی دستگاه روشن می‌شود، کنتاکتور شارژ روشن شده و خازن dc-link توسط مقاومت شارژ، شارژ می‌شود که در نتیجه آن، جریان پیک محدود می‌شود. به محض اینکه تفاوت بین ولتاژ خط و ولتاژ dc-link (ولتاژ در خازن اصلی) به زیر آستانه تعریف شده، برسد، کنتاکتور اصلی روشن می‌شود (کنتاکتور شارژ بعد از یک مدت کوتاه خاموش می‌شود) و خازن dc-link توسط فیلتر سلفی خط به ولتاژ خط متصل می‌شود. اگر یک انحراف غیر طبیعی (مانند اتصال کوتاه) بین محاسبات تئوری و اندازه‌گیری ولتاژ dc-link شناسایی شود، کنتاکتور شارژ خاموش شده و خطای شارژ نمایش داده می‌شود [۲۱].

شکل A-۲- تجهیز کنتاکتور شارژ در اینورتر ترکشن

A-۱-۲-کنتاکتور اصلی

وضعیت عملیاتی کنتاکتور اصلی به‌طور مداوم توسط ELTAS ECON نظارت می‌شود. یکی دیگر از کنتاکت‌های کمکی به یک کنترلر متصل می‌شود که تضمین می‌کند، پانتوگراف تنها زمانی که کنتاکتور اصلی خاموش است، می‌تواند بالا رود. هنگام خاموش بودن، کنتاکتور اصلی تضمین می‌کند که اینورتر ترکشن از ولتاژ خط جدا شده است [۲۱].



شکل A-۳- تجهیز کنتاکتور اصلی در اینورتر ترکشن

A-۱-۳-قطع کننده‌ی مدار کنترل بالا (HSCB)

حفاظت از اضافه جریان و اضافه ولتاژ و همچنین قطع و وصل زیر بار از وظایف مهم قطع کننده‌ی مدار کنترل بالا (HSCB[1]) می‌باشد.

شکل A-۴- تجهیز قطع کننده‌ی مدار کنترل بالا در سیستم اینورتر ترکشن

[1] HIGH CONTROL CIRCUIT BRIKER

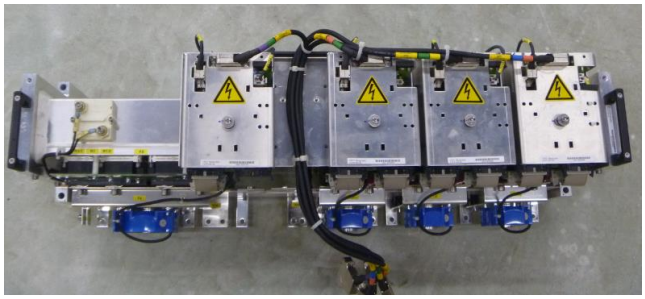
A-۱-۴-خازن DC-LINK

خازن DC-link ولتاژ ورودی برای PI را تثبیت می‌کند و همراه با فیلتر سلفی خط، یک فیلتر ورودی LC را شکل می‌دهد که هارمونیک جریان خط را در سطح پایین نگه می‌دارد. علاوه بر این، خازن DC-link یک منبع DC را برای ترمز چاپر و PI تضمین می‌کند. موازی با خازن DC-link، دو مقاومت مقاوم در برابر سیم برق متصل می‌شوند [۲۱].

شکل A-۴- خازن dc-link در تجهیز اینورتر ترکشن

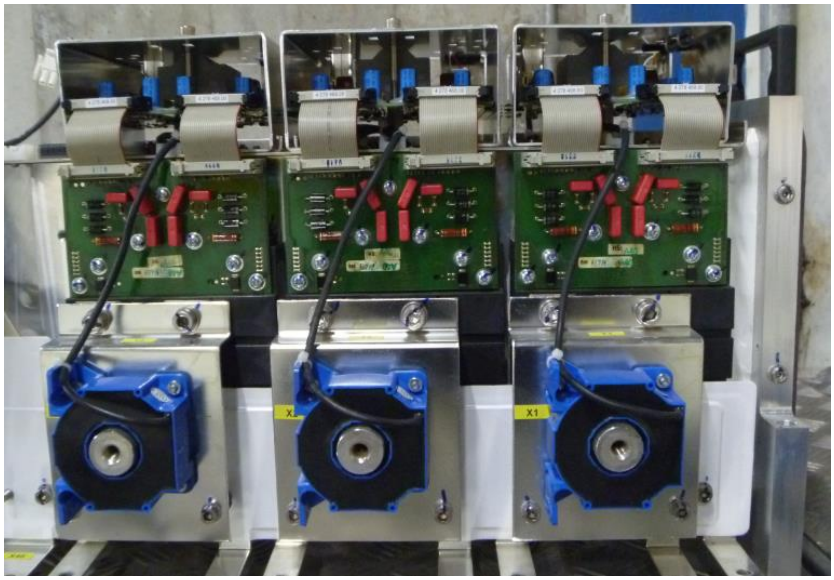
A-۱-۵-دو مبدل پالس PI[۱] و PI[۲]

سوئیچینگ، اندازه‌گیری جریان، تبدیل ولتاژ، انجام عملکرد PWM[1]، دشارژ خازن اتصال DC و خنک‌کننده IGBT از وظایف مهم PI ها می‌باشد. هر دو مبدل پالس PI یک موتور آسنکرون را با یک ولتاژ AC سه فاز تأمین می‌کنند. برای رسیدن به گشتاور مورد انتظار در موتورهای آسنکرون، ELTAS ECON اندازه، فرکانس و فاز ولتاژ خروجی را توسط تولید الگوی پالس مناسب برای ماژول‌های IGBT کنترل می‌کند [۲۱].



شکل A-۵- تجهیز pi در تجهیز اینورتر ترکشن از نمای بالا

[1] Pulse-width modulation



شکل A-۶- تجهیز pi در تجهیز اینورتر ترکشن از نمای روبروُ

A-۱-۶-کنترل موتور ترکشن (ECON)

ECON در اینورتر ترکشن یک واحد کنترل است و توانایی برقراری ارتباط با سایر واحدهای کنترل دیگر را از طریق چندین نوع باس دارد. TCU متشکل از چندین گروه اصلی است که بر روی بُردهای مدار چاپی الکترونیکی (PCB[1]) قرار دارند. PCB ها در یک محفظه PCB محکم با یک قاب سیستم ۱۹ اینچی نصب می‌شوند. همه رابطها (به‌عنوان مثال اتصالات کابل) از طرف مقابل قفسه در دسترس هستند. هر گونه خوب عمل نکردن یا خرابی سیستم، از جمله هر اطلاعات پس زمینه مربوط به رخداد، در حافظه خطا که در صفحه پردازنده قرار دارد ثبت می‌شود [۲۱]. وظایف زیر توسط ELTAS ECON انجام می‌شود:

• اجرای کنترل موتور میدان مغناطیسی

• کنترل IGBT دو مبدل پالس و ترمز چاپر

• منبع تغذیه واحدهای GDC و مبدل های جریان

• دریافت و دستیابی به مقادیر اندازه گیری مانند ولتاژ، جریان و دما

• کنترل مدار شارژ، کنتاکتور اصلی و فن

[1] printed circuit boards

• ارتباط با سایر واحد های کنترل

• دریافت خطاهای عملیاتی و داده های حوزه

شکل A-۷- تجهیز econ در سیستم اینورتر ترکشن

A-۱-۷-ترمز چاپرBC ۱ و BC۲

ترمز چاپر باید وظایف زیر را انجام دهد:

چاپر وظیفه مدیریت توان برگشتی در ترمز الکترودینامیک را داراست. ترمز الکترودینامیک عملکرد موتوری را به ژنراتوری تبدیل می‌نماید و ولتاژ اضافی را به شبکه و یا به مقاومت ترمزی تزریق می‌نماید.

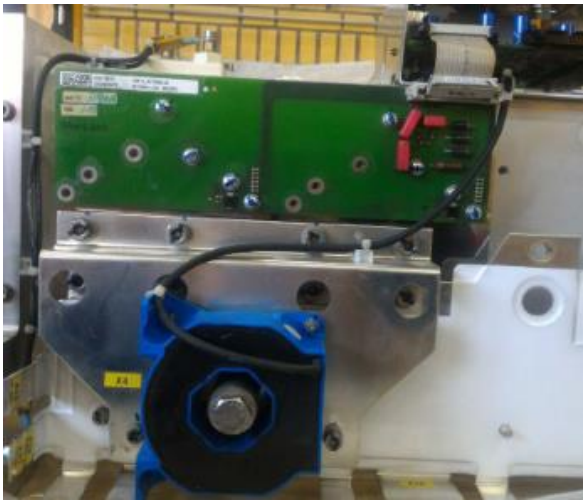
• انرژی ترمزی را از طریق مقاومت ترمزی تلف کند.

اگر سیستم تغذیه ۷۵۰ ولت DC تنها قادر به جذب بخشی از انرژی ترمز یا غیر از آن باشد، انرژی اضافی از طریق دو مقاومت ترمزی تخلیه می‌شود. BC مانند یک محدود کننده ولتاژ عمل می‌کند.

• فعال شدن حفاظت از اینورتر ترکشن در برابر ولتاژ بالا. اگر ولتاژ DC-link بیش از حد باشد، دو ترمز چاپر به صورت خودکار سوئیچ می‌کنند (وارد مدار می‌شوند).

• فعال شدن میرایی فیلتر ورودی LC در صورت تغییرات سریع ولتاژ خط.

• تخلیه خازن DC-link از طریق مقاومت ترمزی بعد از اینکه اینورتر ترکشن از سیستم منبع تغذیه ۷۵۰ ولت DC قطع شده است [۲۱].



شکل A-۷- مجموعه ترمز چاپر در اینورتر ترکشن

A-۱-۸-گیت درایو کنترل GDC

ماژول های IGBT، همکاری واحدهای GDC و GB با یکدیگر را در یک واحد تشکیل می‌دهد. واحد GDC درایو کردن الکتریکی مجزا ماژول های IGBT را تضمین می‌کند. آنها دستورات درایو کردن را توسط ELTAS ECON دریافت می‌کنند و وضعیت OK یا وضعیت خطا را ارسال می‌کنند. علاوه بر این، سیگنال های اندازه‌گیری شده جریان و دما نیز از طریق واحدهای GDC به ELTAS ECON ارسال می‌شوند [۲۱].

شکل A-۸- نمای بالا از تجهیز gdc

A-۱-۹-ترانزیستور دوقطبی گیت ایزوله IGBT

ولتاژ DC را با کمک فرکانس و جریان به ولتاژ AC تبدیل می‌کند.

شکل A-۱۰-تجهیز IGBT در قسمت pi

A-۱-۱۰-فن

خنک کردن هوا توسط فن فراهم می‌شود که هوا را از طریق محفظه آلمینیومی هدسینک و از طریق فیلتر سلفی خط، به محیط متصل می‌کند. فن توسط ELTAS ECON کنترل می‌شود. واحد قدرت با استفاده از محفظه آلمینیومی هدسینک خنک‌کننده که هر کدام یک طرف خازن DC-link قرار دارد، خنک می‌شود. فن خنک‌کننده، محفظه آلمینیومی هدسینک گرمای مولفه های قدرت را با استفاده از محیط خنک‌کننده هوا، خنک می‌کنند [۲۱].

شکل A-۹- تجهیز فن در سیستم اینورتر ترکشن

A-۱-۱۱-مقاومت دشارژ

در زمان نت (سیستم خاموش)، ولتاژ موجود در خازن را، در ظرف مدت ۵ دقیقه دشارژ کرده و شرایط ایمنی را برای انجام کار بر روی قطعات الکتریکی ایجاد می کند. موازی با خازن DC-link، دو مقاومت دشارژ برای ایمنی دشارژ خازن متصل می شوند.

شکل A-۱۰- سیستم مقاومت دشارژ

A-۱-۱۲-برقگیر[1]

المانی حفاظتی است که واگن را در برابر صاعقه و یا افزایش ولتاژ لحظه ای محافظت می‌کند. در صورت برخورد صاعقه با پانتوگراف ARRESTER برق را به بدنه و درنهایت به زمین منتقل می‌کند.

A-۱-۱۳-خازن EMC

در صورتی که ولتاژ از ARRESTER به سمت سیستم ترکشن نشتی پیدا کند، توسط خازن EMC که به باس بار ۷۵۰ ولت سیستم ترکشن متصل است، این نشتی به بدنه و نهایتاً جهت حفاظت کلیه المان‌های موجود در سیستم ترکشن به زمین منتقل می‌شود.

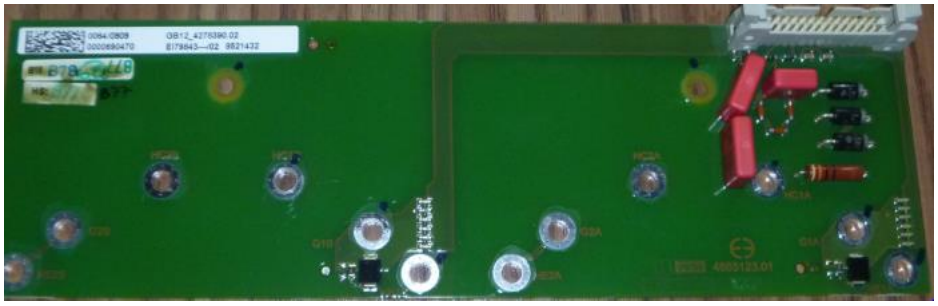
[1] ARRESTER

شکل A-۱۱- خازن EMC

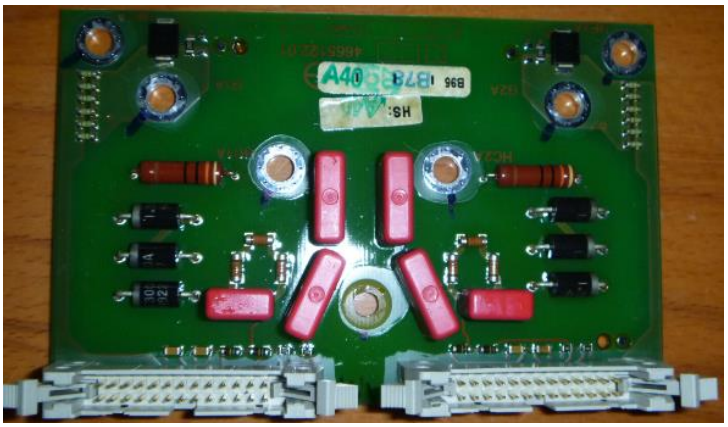
A-۱-۱۴-گیت بورد GB

در دو بخش ترمز چاپر و مبدل پالس PI استفاده می‌شود. از وظایف GB به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- رابط فرمان ECON به GDC و IGBT
- اعمال فرمان امیتر، گیت و کلکتور برای سوئیچ کردن IGBT



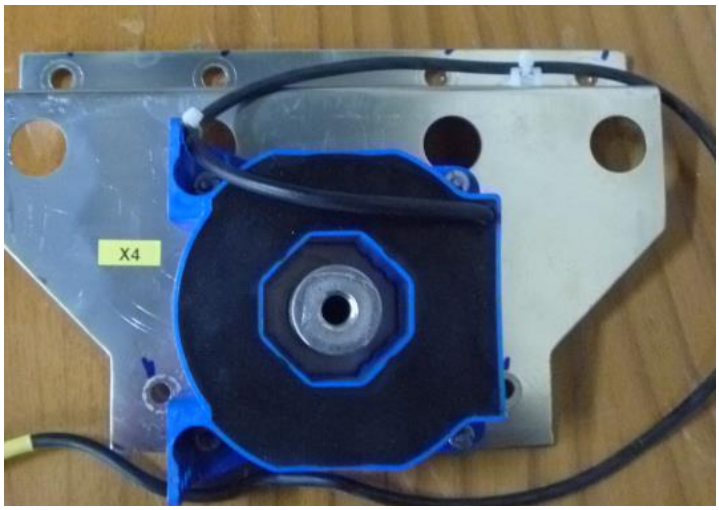
شکل A-۱۲-گیت برد از نمای بالا در مجموعه ترمز چاپر BC



شکل A-۱۵-گیت برد از نمای بالا در مجموعه PI

A-۱-۱۵-ترانس اندازه‌گیری جریان

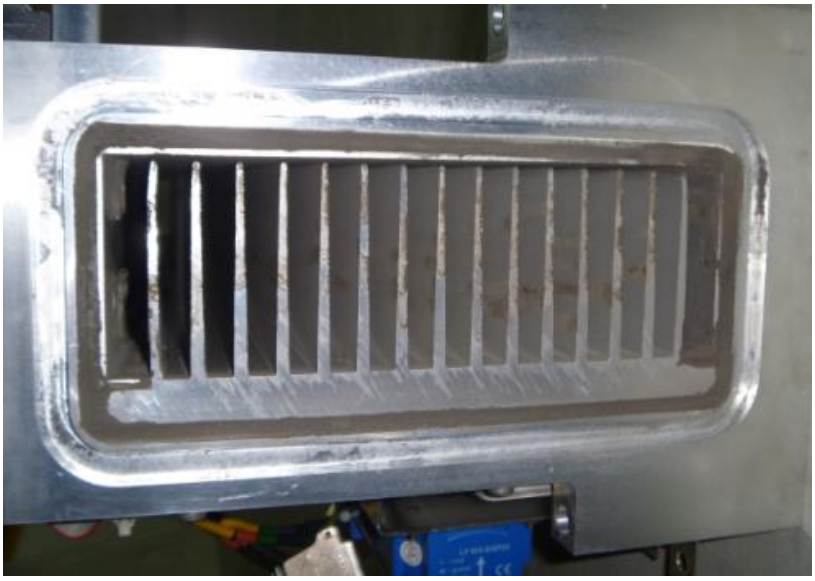
بر اساس نسبت تبدیل مشخص، جریان را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل A-۱۳- ترانس اندازه‌گیری جریان

A-۱-۱۶-مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

از عملکردهای آن، خنک کردن مقاومت دشارژ، خنک کاری igbt ها، جای‌دهی سنسورهای دما در داخل خود و نوار عایق کننده و انتقال هوا به فیلتر سلفی خط است.



شکل A-۱۷- مجموعه هدسینک خنک‌کننده هوا igbt

A-۱-۱۷-باسبار انتقال HIGH VOLTAGE

وظیفه آن انتقال ولتاژهای زیاد (حدود ۷۵۰ ولت) می‌باشد و در قسمت PI (زیر PI) قرار دارد.

شکل A-۱۸- باسبار انتقال ولتاژ بالا

A-۱-۱۸-سنسورهای دما

اندازه‌گیری دما igbt ها و GDC ها وظیفه سنسور دما می‌باشد.

شکل A-۱۹- سنسور دما در اینورتر ترکشن

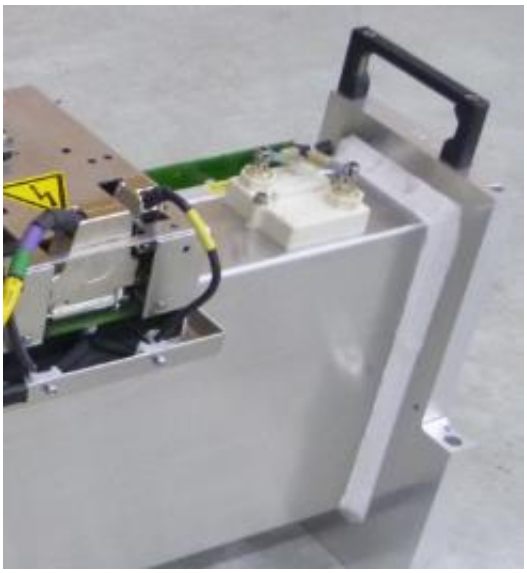
A-۱-۱۹-نوارهای عایقی PI

در دریچه ورودی هوا به محفظه هدسینک جهت جلوگیری از ورود گرد و خاک در مجموعه PI قرار داده می‌شود.

شکل A-۲۰- دور دریچه محفظه هدسینک، نوار عایقی جهت جلوگیری از ورود گردو غبار وجود دارد.

A-۱-۲۰-دسته حمل

کاربرد دسته حمل در حمل و نصب مجموعه PI می‌باشد و در دو گوشه ی مجموعه pi قرار دارد.



شکل A-۲۱- دسته‌ی حمل در مجموعه pi

A-۱-۲۱-پیچ‌های نگهدارنده

اتصال PI به بدنه ترکشن وظیفه پیچ‌های نگهدارنده و همچنین وظیفه پیچ‌های نگهدارنده جعبه ECON،

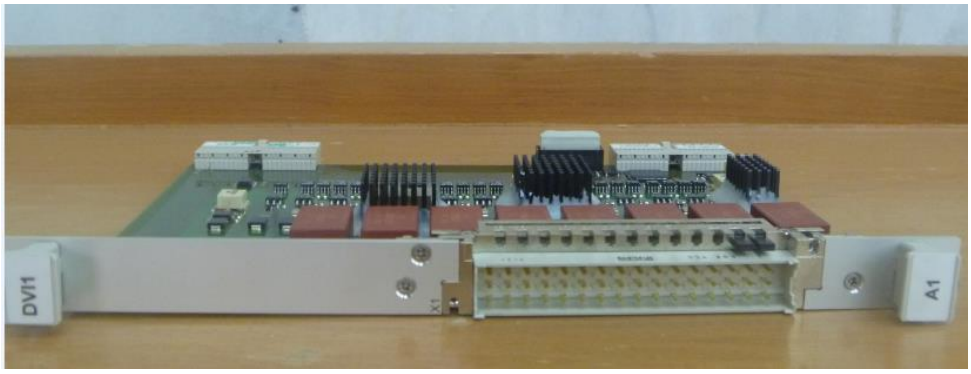
اتصال ECON به بدنه ترکشن می‌باشد.

شکل A-۲۲- پیچ‌های نگهدارنده

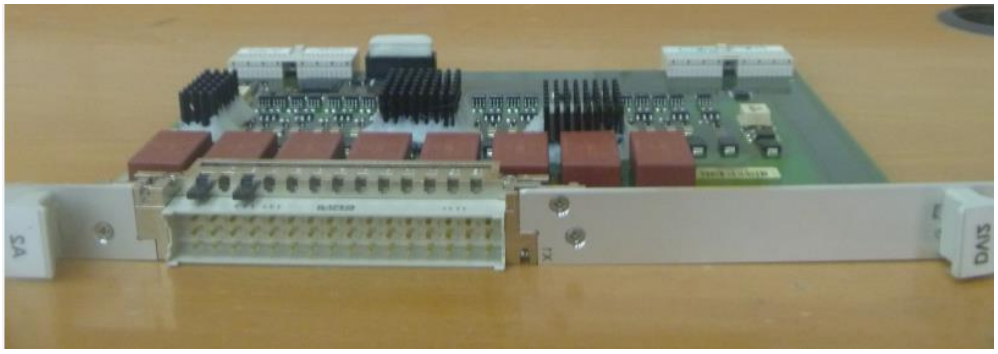
A-۱-۲۲-کارت های ECON

شامل شش کارت AVI،DVI1،DVI2، GDI، PB و TCI می‌باشد که وظایف ECON را انجام می‌دهند.

شکل A-۱۴- کارت AVI در مجموعه econ



شکل A-۲۴-کارت DVI1 در مجموعه econ



شکل A-۲۵-کارت DVI2 در مجموعه econ

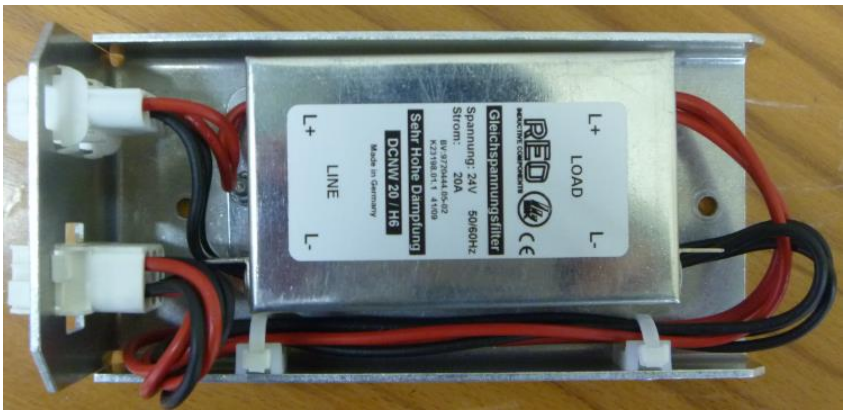
شکل A-۱۵-کارت GDI در مجموعه econ

شکل A-۲۷-کارت PB در مجموعه econ

شکل A-۲۸-کارت TCI در مجموعه econ

A-۱-۲۳-فیلتر ۲۴ ولت DC

جلوگیری از نوسانات ولتاژ، وظیفه فیلتر ۲۴ ولت DC می‌باشد و در قسمت ECON قرار دارد.



شکل A-۲۹- فیلتر ۲۴ ولت dc

A-۱-۲۴-منبع تغذیه ۲۴ ولت

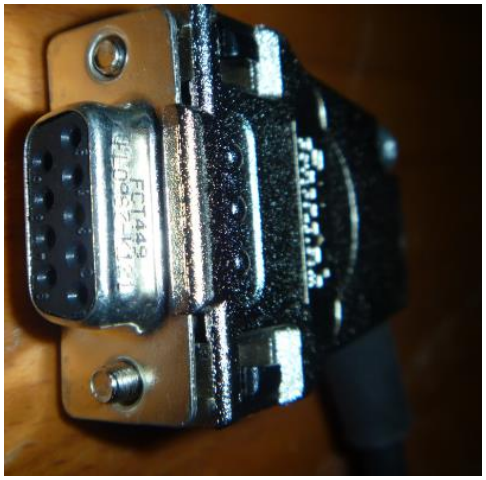
در اینورتر ترکشن دو منبع تغذیه موجود است که هر دو در کنارهم در ناحیه ECON قرار دارند و وظیفه ی آنها تشکیل ولتاژ مثبت و منفی ۲۴ ولت می‌باشد.

شکل A-۳۰- منبع تغذیه ۲۴ ولت

A-۱-۲۵-پین‌ها و کانکتورهای اتصالات الکتریکی

جهت سهولت در تعویض قطعات الکتریکی از کانکتورهای الکتریکی استفاده می‌شود. در کانکتورهای الکتریکی، به قطعه‌ای که هدایتگر جریان الکتریکی می‌باشد، پین گفته می‌شود.

شکل A-۱۶- نوعی از کانکتور الکتریکی

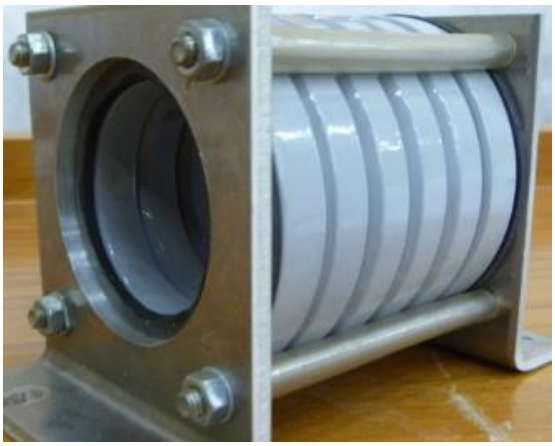


شکل A-۱۷- نوعی از کانکتور الکتریکی

شکل A-۳۳- تصویر پین‌ها برای اتصال به کانکتورها

A-۱-۲۶-فیلتر FRIT

وظیفه فیلتر FRIT حذف نویز یا هارمونیک‌های کابل می‌باشد.

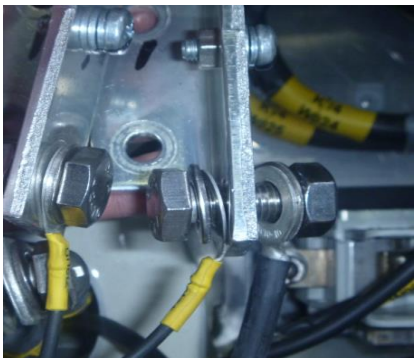


شکل A-۱۸- فیلتر frit1

شکل A-۳۵- فیلتر frit2

A-۱-۲۷-شین‌های انتقال ولتاژ

وظیفه آن انتقال ولتاژ در اینوتر ترکشن یا رابط بین دو کابل در جعبه های ترمینال می‌باشد.



شکل A-۳۶- شین‌های انتقال ولتاژ

A-۱-۲۸-مقره عایق کننده شین‌ها

اتصال شین‌ها به بدنه و ایجاد اتصالی مطمئن در اتصال شین‌ها به بدنه وظیفه این تجهیز می‌باشد.

شکل A-۳۷- مقره از جنس میکا

A-۱-۲۹-مقاومت شارژینگ

با توجه به ساخت فیلتر پایین گذر توسط سلف و خازن DC-LINK، خازن اتصال DC توسط مقاومت شارژ، شارژ می‌شود که در نتیجه آن جریان پیک محدود می‌شود و در ناحیه فن قرار دارد.

شکل A-۳۸- مقاومت شارژینگ

A-۱-۳۰-دریچه خروجی هوا

عملکرد این تجهیز، هدایت هوا جهت ورود به هدسینک و جلوگیری از ورود اجسام بزرگ همچون برگ می‌باشد.

شکل A-۳۹- دریچه خروجی در محفظه اینورتر ترکشن

A-۱-۳۱-فیلتر سلفی خط[1]

اتصال سری فیلتر سلفی خط و خازن اتصال DC به‌عنوان یک فیلتر پایین گذر عمل می‌کند. ازاین‌رو، فیلتر سلفی خط (کارکنان قطار شهری، فیلتر سلفی خط را لاین فیلتر چوک می گویند.)، جریان خازن اتصال DC را در مقابل تغییرات سریع ولتاژ خط محدود کرده و از تغییرات سریع ولتاژ اتصال DC جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، تناسب ولتاژ خط و جریان خط با توجه به فعالیت سوئیچینگ اینورتر (هارمونیک جریان خط) به مقادیر مجاز محدود می‌شود [۲۱].

شکل A-۴۰- فیلتر سلفی خط

[1] line filter choke

A-۱-۳۲-کابل گلند بیرونی

کاربرد این تجهیز عایق کردن محل اتصال کابل به بدنه در مقابل گرد و غبار، ثابت کردن کابل و انتقال شیلد کابل‌های AC ترکشن به زمین می‌باشد.

شکل A-۴۱- کابل گلند بیرونی اینورتر ترکشن

A-۱-۳۳-سنسور دمای داخلی فیلتر سلفی خط

اندازه‌گیری دمای فیلتر سلفی خط، وظیفه این تجهیز می‌باشد.

شکل A-۴۲- نمای بالا از سنسور دما

A-۱-۳۴-ترانس فن خنک‌کننده

تبدیل برق مصرفی فن اینورتر ترکشن، عملکرد این تجهیز می‌باشد.

شکل A-۴۳- ترانس فن خنک‌کننده

A-۱-۳۵-کنتاکتورهای فرمان فن

قطع و وصل تغذیه فن و مدیریت سرعت دورها، وظیفه کنتاکتورهای فرمان فن می‌باشد.

شکل A-۴۴- کنتاکتور فرمان فن

A-۱-۳۶-ترانسدیوسر های ولتاژ

ولتاژ DC-LINK و جریان خط را اندازه‌گیری می کند.

شکل A-۴۵- ترانسدیوسر ولتاژ

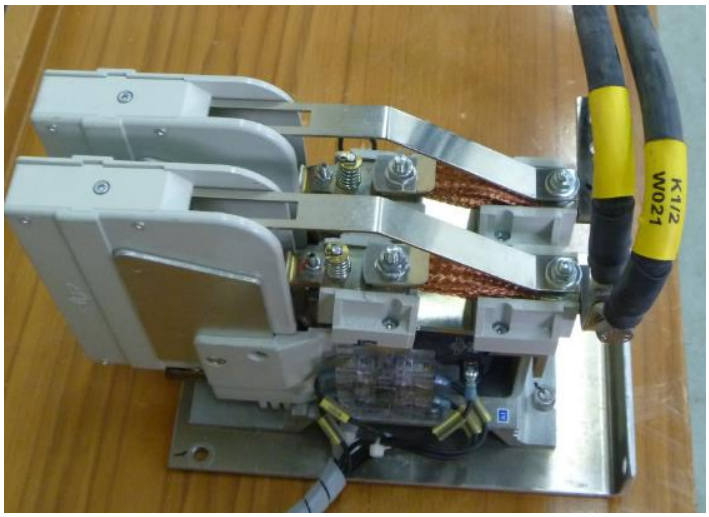
A-۱-۳۷-ترانس تفاضلی (جریان صفر)

حفاظت مدار از اتصال کوتاه و نشت جریان در اینورتر ترکشن وظیفه این تجهیز می‌باشد.

شکل A-۴۶- ترانس تفاضلی جریان صفر

A-۱-۳۸-کنتاکتورهای کمکی K1 و K2

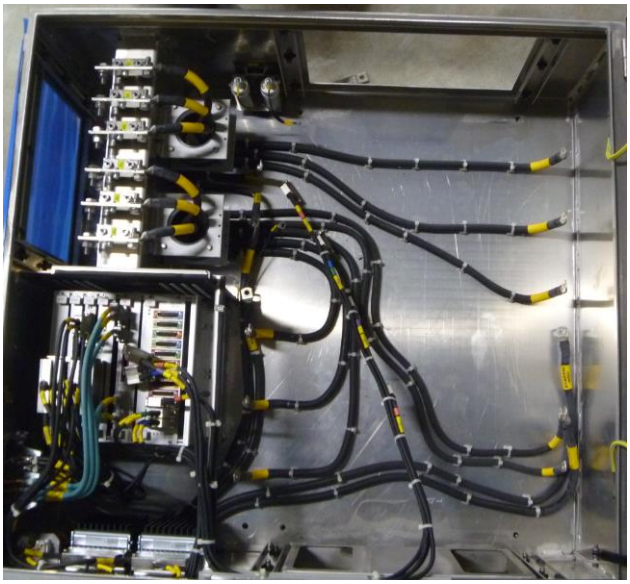
وظیفه این تجهیز، اعلام وضعیت باز یا بسته بودن کنتاکتورهای اصلی و شارژ به سیستم پردازنده می‌باشد.



شکل A-۴۷- کنتاکتور کمکی

A-۱-۳۹-کابل‌های ولتاژ بالا (HIGH VOLTAGE)

وظیفه این تجهیز، انتقال ولتاژ زیاد می‌باشد.



شکل A-۴۸- کابل‌های ولتاژ بالا در محفظه اینورتر ترکشن

A-۱-۴۰-مقره عایق کننده باس ها از بدنه

اتصال شین‌ها به بدنه و ایجاد اتصالی مطمئن در اتصال شین‌ها به بدنه وظیفه این تجهیز می‌باشد.

شکل A-۴۹- مقره عایق کننده در پایین شکل از جنس میکا

A-۱-۴۱-قفل و لولا

وظیفه آن باز و بسته کردن در اینورتر ترکشن می‌باشد.

شکل A- ۱۹- قفل های در اینورتر ترکشن

شکل A-۲۰- لولای در اینورتر ترکشن

منابع

[1] Moubray J, (1997), "**Reliability centered maintenance RCM II**" ,Vol. 1, Oxford, UK: Butterwoth/Heinnemann

[2] Iony P., Siqueira., (2006), "Software Requirements for Reliability-Centered Maintenance Application", **International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems**, pp.1-7.

[3] Yssaad B., Khiat M. and Chaker A., (2014), "Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems", **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, pp.108-115.

[4] Dehghanian p., Fotuhi-Firuzabad M., (2013), "A Comprehensive Scheme for Reliability-Centered Maintenance in Power Distribution Systems—Part II: Numerical Analysis", **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY,** VOL. 28, pp.771-778.

[5] Chen F., Zhang H, Binbin X., Chen X., Yang Z., Yifeng Y., Qunya X., (2016), "Research on imperfect preventive maintenance strategy for turret system of the CNC lathe", **11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety**, pp.1-4.

[6] Grida M., Zaid A., Kholief G., (2017), "Optimization of preventive maintenance interval", **Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)**, pp.1-7.

[7] Barnes A., (2014), "Increased locomotive performance using condition based maintenance", **6th IET Conference on Railway Condition Monitoring**, pp.1-7.

[8] Hutchins D., (1998), Introducing TPM, **IET Journals & Magazines MANUFACTURING ENGINEER**, VOL. 77, pp.34-39.

[9] Webb J., Fontaine M., Green D., Stoppello P., (2013), "RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE FOR ELECTRICAL EQUIPMENT CRITICAL TO WORKER SAFETY", **Conference Record of 2013 Annual IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC)**, pp.157-164.

[10] WANG H., ZHANG L., Xiaobing M., (2009), "Preliminary Study on Reliability-centered Maintenance of High-speed Train", **2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety**, pp.633-638.

[11] Wang Y., Li L., Huang S., Chang Q., (2012), "Reliability and covariance estimation of weighted k-out-of-n multi-state systems", **European Journal of Operational Research**, pp.138-147.

[12] Rezvanizaniani S., Valibeigloo M., Asghari M., Barabady J., Kumar U., (2008), "Reliability and covariance estimation of weighted k-out-of-n multi-state systems' Wheel sets of Passenger Trains of Iranian Railway", **2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, pp.516-520.

[13] Abbasghorbani M., Rajabi Mashhadi H., Damchi Y., (2014), "Reliability-centred maintenance for circuit breakers in transmission networks", **IET Generation, Transmission & Distribution**, pp.1583-1590.

[14] Liang W., Pang S., Zhang L., Jinqiu H., (2012), "Reliability-Centered Maintenance Study on Key Parts of Reciprocating Compressor", **2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering,** pp.414-418.

[15] Vma Raol K, A Parvatikar, Gokul S, Nitish N, Pramod Rao, (2016), "A Novel Fault Diagnostic Strategy for PV Micro Grid to Achieve Reliability Centered Maintenance", **1st IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems**, CPEICES, pp.1-4.

[16] Khorshidi H, (2015), "Reliability centered maintenance using System Dynamics Approach", **2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, pp.1932-1936.

[17] Saeedifard M., Graovac M., Dias R., and Iravani R., (2014), "Reliability-based maintenance scheduling of generating units in restructured power systems", **Turk J Elec Eng & Comp Sci**, pp.1147-1158.

[18] Zhang H., Chen C., Zhan D., Liu J., Zhang Y., (2012), "Research on RCM-AHP Based

Armored Equipment Maintenance Tactic Optimizing", **2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering**, pp.503-506.
[19] Heo J., Kim M., Park G., Yoon Y., (2011), "A Reliability-Centered Approach to an Optimal Maintenance Strategy in Transmission Systems Using a Genetic Algorithm", **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, VOL. 26, pp.2171-2179.
[20] Salam Z., Goodman C.J., (1996), "COMPENSATION OF FLUCTUATING DC LINK VOLTAGE FO INVERTER DRIVE", **Power Electronics and Variable Speed Drives, Conference IEE**, pp.23-25.
[21] ELIN EBG Traction GmbH, (2011), "Maintenance Manual of Traction Inverter (LRV Mashhad)", **The document of ELIN EBG Traction GmbH,** Germany.
[22] ELIN EBG Traction GmbH, (2011), "Functional Description (LRV Mashhad)", **The document of ELIN EBG Traction GmbH**, Germany.
[۲۳] موبری ج، (۱۳۹۱)، ترجمه: علی زواشکیانی، رضا آزادگان، "***نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان***"؛ ناشر: آریانا قلم، تهران، چاپ دوم.

ABSTRACT

Maintenance is considered as an important activity in today world industry, so implementing an efficient model is of great importance. The traction inverter system is used as an asynchronous motors drive in the tramway system of the urban railway. The continuous operation of the urban transport system is directly related to the correct operation of this equipment. In this thesis, the recommendations of the manufacturer, certified expert of the urban railway of Mashhad, as well as by direct visiting of the system, were used for implementing the RCM II method. The important steps to be taken include the selection of equipment, the preparation of a list of key functions, the identification of failures (operation failure, the causes of failure, the effects of failure and the consequences of failure), the choice of effective and practical repair tactics for the inverter and, finally, the planning and implementation of the selected tactics of the traction inverter. This dissertation focuses on the traction inverter section as a vital system in the urban railway of Mashhad. An innovative method, based on previous articles and the RCM II decision table, has been used to prioritize equipment in the maintenance plan, which considers the economic and technical criteria. The results and ideas directly use in the maintenance of the urban railway of Mashhad, in addition, can be fully utilized in other similar systems and rail transport. It indicates that the RCM II not only increases the safety and availability of the system but also decreases the cost of maintenance significantly.

Keywords: traction inverter, reliability centered maintenance, urban railway, failure

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

Implementing Reliability Centered Maintenance (RCM) for Traction Inverter System of Mashhad Urban Railway

By:
Hamid reza Zahmatkesh

Supervisors:
Dr. Mohsen Asili

December 2017