

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل معدن: مطالعه مقایسه‌ای روش‌های

نیمه پارامتری و پارامتری مخاطرات متناسب

زینب اله کرمی، دانشجوی دکترای مهندسی استخراج مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
احمدرضا صیادی (مسئول مکاتبات)، دانشیار گروه مهندسی استخراج مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،
ایران

E-mail: Sayadi@modares.ac.ir

بهزاد قدرتی، استاد گروه مهندسی عملیات و تعمیر و نگهداری، دانشگاه صنعتی لولئو، لولئو، سوئد

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۹

چکیده

همزمان با گسترش تکنولوژی و تجهیزات از سوی صنایع معدنی به منظور تأمین اهداف تولید و افزایش رقابت‌پذیری در بازار، موضوع مدیریت دارایی‌های فیزیکی از جمله ناوگان ماشین‌آلات حمل و نقل از اهمیت به خصوصی برخوردار گردیده است. قابلیت اطمینان یکی از شاخص‌های اصلی در زمینه مدیریت دارایی‌های فیزیکی محسوب می‌شود و عمدتاً تابعی از زمان خرابی و عوامل ریسک متعددی مانند شرایط محیطی و عملیاتی نیز است. یکی از روش‌های پرکاربرد برای بررسی رابطه میان این عوامل و متغیر زمان، مدل رگرسیونی نرخ مخاطرات متناسب است که با توجه به چگونگی فرم تابع خطر پایه در آن، ضرایب رگرسیونی به دو روش پارامتری و نیمه پارامتری قابل برآورد خواهد بود. در این مقاله، داده‌های خرابی یک دستگاه دامپتراک در معدن مس سونگون با استفاده از مدل‌های نیمه پارامتری و پارامتری با تابع خطر پایه وایبل تحلیل و نتایج به دست آمده مقایسه شده‌اند. اگرچه که نتایج حاصل از دو روش تقریباً مشابه بود اما بر اساس معیار سنجش آکایک، مدل پارامتری وایبل، از کارایی بیشتری برای توصیف قابلیت اطمینان و مخاطره ماشین مورد مطالعه برخوردار است. بر اساس نتایج به دست آمده، فاکتورهای ریسکی همچون شرایط جاده ($HR = 0.78$, $P\text{-value} = 0.08$)، مهارت اپراتور ($HR = 0.92$, $P\text{-value} < 0.001$)، فاصله حمل ($HR = 1.17$, $P\text{-value} = 0.02$) و دمای محیط ($HR =$, $P\text{-value} = 0.05$) به عنوان عوامل اثرگذار بر میزان مخاطره دامپتراک شناسایی شدند. این مدل در تعیین بازه‌های بازرسی تعمیرات پیشگیرانه به کار گرفته شد.

واژه‌های کلیدی: توزیع وایبل، دامپتراک، عملیات معدنی، قابلیت اطمینان، نرخ مخاطرات متناسب کاکس

۱. مقدمه

سایر تصمیم‌گیری‌های آتی مربوط به عملکرد سیستم و تولید اثرگذار خواهد بود. روش‌های پارامتری و نیمه پارامتری مدل مخاطرات متناسب^۲ از جمله روش‌هایی هستند که به‌طور گسترده برای تجزیه و تحلیل داده‌های خرابی در حضور عوامل ریسک استفاده می‌شود. روش نیمه پارامتری موسوم به مدل رگرسیونی کاکس^۳ فرض می‌کند که میزان مخاطره تابعی از متغیرهای مستقل است، اما هیچ‌گونه فرضی در مورد ماهیت یا شکل تابع خطر پایه در نظر نمی‌گیرد. ویژگی رویکرد کاکس این است که این نامشخص بودن، مشکلی برای تخمین پارامترهای مدل ایجاد نمی‌کند. به عبارتی حتی اگر خطر پایه مشخص نشده باشد، هنوز می‌توان تخمین خوبی برای ضرایب رگرسیون، نسبت خطر و منحنی‌های خطر به دست آورد. در واقع تفاوت اصلی بین دو نوع مدل این است که در مدل مخاطرات متناسب پارامتری فرض می‌شود که تابع خطر پایه از یک توزیع خاص تبعیت می‌کند، درحالی‌که مدل کاکس چنین محدودیتی ندارد. همچنین در مدل کاکس ضرایب با روش درستمایی جزئی تخمین زده می‌شوند اما در مدل پارامتری، ماکزیمم درستمایی به کار می‌رود. اگرچه مدل‌های پارامتری کاربردی‌ترند اما نیازمند پیش‌فرض‌های بیشتری نیز هستند. چنانچه این پیش‌فرض‌ها برقرار باشند نتایج حاصل از این مدل‌ها می‌تواند مناسب‌تر باشد چراکه تحلیل و تفسیر آن برای پژوهشگر نیز ساده‌تر است (Oakes, 1983). با این وجود، هر دو نوع معادل هستند و می‌توانند در شرایط مشخصی جایگزین یکدیگر باشند، همچنین، نسبت مخاطره در آن‌ها تفسیر یکسانی دارد و متناسب بودن مخاطرات همچنان در هر دو مدل مفروض است.

تاکنون در مطالعات متعددی اثر فاکتورهای ریسک بر عملکرد و وضعیت سیستم بررسی شده است. از جمله می‌توان به مطالعه کومار و همکارانش در سال ۱۹۹۲ اشاره نمود که در آن با استفاده از مدل نیمه پارامتری مخاطرات متناسب، اثر نوع کابل و شماره خرابی را روی قابلیت اطمینان کابل لودهای برقی بررسی نمودند (D. Kumar, Klefsjö, & Kumar, 1992).

صنعت معدنکاری در حال حاضر با افزایش نسبی هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی مواجه بوده و حفظ یا افزایش رقابت‌پذیری مستلزم کاهش هزینه‌ها است. یکی از روش‌های مؤثر مدیریت هزینه‌ها، ارتقای عملکرد ناوگان ماشین‌آلات حمل‌ونقل از طریق بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات است (Basiri & Sharifi, 2019). مطالعات گسترده‌ای تاکنون در رابطه با قابلیت اطمینان در حوزه مهندسی معدن صورت گرفته است. از جمله می‌توان به یکی از اولین مطالعات در دهه ۱۹۸۰ در خصوص قابلیت اطمینان ماشین‌آلات حمل‌ونقل در معادن زیرزمینی اشاره کرد (U. Kumar, Klefsjö, & Granholm, 1989) که تا سال‌های اخیر نیز همچنان در حوزه‌های متفاوت ماشین‌آلات معدن زیرزمینی و روباز گسترش و ادامه یافته است (Choudhary, Tripathi, & Shankar, 2019; Allahkarami & Sayadi, 2016; Allahkarami, Sayadi, & Lanke, 2016; Hoseinie, Ataei, Khalokakaie, Ghodrati, & Kumar, 2012). در اغلب این مطالعات متغیر زمان به‌عنوان تنها عامل تأثیرگذار در نرخ خرابی سیستم در نظر گرفته شده است (Hall & Daneshmend, 2003; U. Kumar, 1990).

از آنجایی‌که فعالیت‌های معدنکاری در محیطی پیچیده و دارای عدم قطعیت صورت می‌گیرد، عوامل متعددی به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان سیستم اثرگذار است. این عوامل که به‌عنوان فاکتور ریسک نیز شناخته می‌شوند، ممکن است شامل محیط عملیات، تاریخچه عملیاتی، نوع طراحی، کیفیت و مواد به‌کاررفته در ساخت تجهیزات باشد (Ghodrati, 2011, 2005). نادیده گرفتن این عوامل موجب انحراف در برآورد پارامترهای مدل و در نتیجه دور شدن جواب‌ها از نتیجه واقعی خواهد شد (Hougaard, 2000). در نتیجه می‌توان گفت، شرایط عملیاتی بر کل فرایند فرموله کردن استراتژی نگهداری و تعمیرات، مدیریت انبار، زمان‌بندی تولید و

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل معدن: مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نیمه پارامتری و پارامتری مخاطرات متناسب

نوع سرمته حفاری، نوع سنگ و طول چال حفاری را از جمله عوامل مهم معرفی نمودند [۲۶]. در سال ۲۰۱۶، نوری و همکاران با استفاده از مدل مخاطرات متناسب کاکس، مطالعه‌ای روی لاستیک لودر انجام دادند، در این مطالعه با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی معدن و مشخصات سیستم (فاکتورهای ریسک) تعداد لاستیک‌های موردنیاز را تخمین زدند. در این مطالعه، محور چرخ، دما و بارندگی به‌عنوان فاکتورهای اثرگذار بر قابلیت اطمینان و تعداد قطعات یدکی مشخص شد و سناریوهای مختلف بر اساس مقادیر مختلف فاکتورهای ریسک مهم و مؤثر برای تخمین تعداد لاستیک در نظر گرفته شد. نتایج حاصل اختلاف زیادی را در تعداد لاستیک پیش‌بینی شده در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن فاکتورهای ریسک نشان داد (Nouri Qarahasanlou, Ataei, Khalokakaie, & Jafarei, 2016). آن‌ها همچنین در مطالعه‌ای دیگر به اندازه‌گیری اهمیت دسترسی بر مبنای عوامل محیطی و مدل پارامتری مخاطرات متناسب در ناوگان معدنکاری پرداختند (Qarahasanlou, Khalokakaie, Ataei, & Ghodrati, 2017). قدرتی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان و بر اساس روش پارامتری مبتنی بر مخاطرات متناسب و ایبل، میانگین عمر باقی‌مانده سیستم هیدرولیک LHD را با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی موردبررسی و مطالعه قرار دادند (Ghodrati, Hoseinie, & Kumar, 2017). منیری و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از مدل پارامتری مخاطرات متناسب و توزیع و ایبل به‌عنوان نرخ خطر پایه، تأثیر عوامل ریسکی همچون شرایط آب و هوایی، دما شدت خرابی و نوع زیرسیستم بر تجهیزات حمل و نقل را مورد مطالعه قرار دادند (Moniri-Morad, Pourgol-Mohammad, Aghababaeia, & Sattarvand, 2018). در سال ۲۰۱۹، نوری و همکاران به‌منظور ارائه برنامه مدیریت انبار، مطالعه‌ای روی لاستیک لودر انجام دادند، در این مطالعه با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی (فاکتورهای ریسک) معدن به تخمین تعداد لاستیک‌های موردنیاز بر اساس روش

همچنین در سال ۲۰۰۵، قدرتی و کومار به‌منظور تخمین قطعات یدکی اثر فاکتورهای ریسک عملیاتی و محیطی را به روش پارامتری مخاطرات متناسب مدل کردند. طبق نتایج به‌دست‌آمده در نظر نگرفتن فاکتورهای ریسک (متغیر کمکی^۴) موجب خطا در برآورد قطعات موردنیاز خواهد شد (Ghodrati & Kumar, 2005). برآبادی و همکاران در سال ۲۰۱۱ به‌منظور تعیین تعمیرپذیری سرند مربوط به یک کارخانه سنگ‌شکنی، از مدل رگرسیون مخاطرات متناسب و توسعه‌یافته آن در حضور متغیرهای وابسته به زمان استفاده نمودند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از روش پارامتری مبتنی بر زمان منجر به تحلیل‌های نادرست نسبت به مدل مخاطرات متناسب مبتنی بر عوامل ریسک می‌شود (Barabadi, Barabady, & Markeset, 2011a). همچنین آن‌ها در مطالعه دیگری به بررسی ظرفیت تولید ماشین‌آلات معدنکاری با در نظر گرفتن شرایط محیطی پرداختند و قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری را به‌عنوان عوامل مؤثر روی ظرفیت تولید مطرح نمودند (Barabadi, Barabady, & Markeset, 2011b). قدرتی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش مخاطرات متناسب، عمر مفید باقی‌مانده در جک‌های هیدرولیک ماشین LHD در یکی از معادن زیرزمینی سوئد را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند (Ghodrati, Ahmadzadeh, & Kumar, 2012). مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۳ توسط مارک هو و هودکیویچ جهت بررسی نقش عوامل مؤثر بر رفتار شکست و قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی شامل دوزر و لودر جلوریزه انجام شد. آن‌ها دو عامل سختی مطلق و اندیس سایش را به‌عنوان متغیرهای مؤثر در لودرها معرفی نمودند و همچنین شناخت این عوامل را به‌عنوان فرصتی برای کاهش نرخ خرابی در تجهیزات مطرح نمودند (Ho & Hodkiewicz, 2013). در سال ۲۰۱۴ برآبادی و همکاران، به تخمین تعداد قطعات یدکی سرمته‌های حفاری در معدن بوکسیت جاجریم پرداختند. ایشان ضمن بیان اهمیت تأثیر عوامل ریسک در قابلیت اطمینان و تخمین تعداد موردنیاز قطعات، سه عامل،

محبوبیت و سادگی استفاده از این رویکرد است. اگرچه برقراری فرض تناسب مخاطرات یک پیش‌نیاز اساسی برای این مدل است. در مقایسه با مدل کاکس، مدل‌های پارامتری از اعتبار و دقت بالاتری در برآورد پارامترها برخوردار هستند و همچنین به بررسی فرض خطرات متناسب احتیاج ندارند. در مقابل، مدل‌های پارامتری نیاز به در نظر گرفتن تابع توزیع مناسب برای زمان خرابی دارند که در صورت انتخاب نامناسب توزیع اولیه نتایج آن قابل اعتماد نخواهد بود. بر اساس بررسی صورت گرفته، تاکنون هیچ مطالعه به منظور مقایسه کارایی دو رویکرد پارامتری و نیمه پارامتری برای تعیین فاکتورهای ریسک اثرگذار بر مخاطره سیستم‌های معدنی صورت نگرفته است. به همین دلیل هدف این مقاله، ارزیابی قابلیت اطمینان با دو رویکرد تخمین نیمه پارامتری و پارامتری با استفاده از یک مجموعه داده واقعی است. از این رو، داده‌های خرابی یک دستگاه دامپتراک به عنوان رایج‌ترین سیستم عملیات حمل و نقل مواد در معادن روباز متعلق به معدن مس سونگون تحلیل و کارایی دو مدل مقایسه شده است. در همین راستا، اثر دو دسته فاکتورهای ریسک عملیاتی (فاصله حمل، مهارت اپراتور و شرایط جاده) و آب و هوایی (دما) در میزان مخاطره دامپتراک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

این مقاله در چهار بخش اصلی تدوین شده است که در بخش اول بیان مسئله و پیشینه مطالعات ارائه شد. در ادامه نیز، در بخش دوم، مبانی نظری و در بخش سوم، قابلیت مدل و یافته‌ها با استفاده از یک مطالعه موردی بیان می‌گردد. در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری

قابلیت اطمینان به صورت احتمال اینکه سیستم وظیفه محوله خویش را تحت شرایط مشخص و در زمان معین به طور مطلوب و بدون خرابی انجام دهد تعریف می‌گردد (Dhillon, 2008). تحلیل قابلیت اطمینان فرایندی است که هم در مراحل طراحی و هم در مراحل مختلف بهره‌برداری به کنترل، ارزیابی، تجزیه و تحلیل، اصلاح و رفع خرابی‌های بالقوه و بالفعل موجود فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال چهاردهم / شماره دوم (۵۵) / زمستان ۱۴۰۱

پارامتری کاکس طبقه‌بندی شده پرداخته شد. فاکتورهای ریسک در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل شرایط آب و هوایی، محور چرخ، طول آج، برند لاستیک و مدل ماشین بوده و نتایج حاصل اختلاف زیادی را در تعداد لاستیک پیش‌بینی شده در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن فاکتورهای ریسک نشان داد. در این مطالعه، محور چرخ، دما و بارندگی به عنوان فاکتورهای اثرگذار بر قابلیت اطمینان و تعداد قطعات یدکی مشخص شد (Nouri Qarahasanlou, Barabadi, (Ataei, & Einian, 2019). مطالعه دیگری توسط ایشان و همکارانش در همین سال روی یکی از دامپتراک‌های معدن سونگون انجام دادند. در این مطالعه نیز با استفاده روش مخاطرات متناسب کاکس و استفاده از مدل قانون توان برای مخاطره پایه، اثر شرایط عملیاتی را قابلیت اطمینان ماشین بررسی شد. از جمله فاکتورهای مؤثر در این مطالعه می‌توان به نوبت کاری، محل کار، تناسب با دامپتراک، وضعیت آب و هوا، دمای محیط و وضعیت جاده اشاره کرد (Nouri Qara Hasanlou, Ataei, Khalokakaie, Fatoorachi, & Barabady, 2019).

با توجه به بررسی ادبیات موضوع، مشاهده شد که روش‌های مختلف رگرسیون نیمه پارامتری و پارامتری برای تعیین رابطه بین عوامل ریسک مرتبط با خرابی سیستم و داده‌های زمانی بکار رفته است. در واقع انتخاب مدل مناسب یک عنصر اصلی در تجزیه و تحلیل داده‌های خرابی برای استنباط آماری قابل اعتماد و پیش‌بینی صحیح وضعیت فعلی و آتی سیستم است چراکه نتیجه این ارزیابی منجر به افزایش عمر مفید تجهیزات و کاهش هزینه‌های نگهداری و تولید می‌شود. بنابراین به منظور انتخاب برنامه نگهداری مؤثر و کارآمد، باید قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از مدل‌ها و روش‌های مناسب ارزیابی شود. با توجه به ویژگی‌های منحصر به هریک از این دو رویکرد یکی از دغدغه‌های اصلی محققین یافتن رویکرد مناسب است. مدل نیمه پارامتری بدون نیاز به در نظر گرفتن نرخ مخاطره پایه قادر به برآورد ضرایب مدل رگرسیونی را داراست و همین امر موجب

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل معدن: مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نیمه پارامتری و پارامتری مخاطرات متناسب

در سیستم در طول عمر سرویس دهی آن می‌پردازد و در نهایت پیش‌بینی نرخ وقوع خرابی و تخمین قابلیت اطمینان مجموعه مورد مطالعه را امکان‌پذیر می‌سازد. وجود برنامه برای دسترسی به سطوح قابل قبول قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و در نتیجه دسترسی سیستم ضروری است و در اولین فرصت طی زمان آماده‌سازی سیستم ایجاد و در چرخه عمر سیستم تصحیح می‌شود. بهبود قابلیت اطمینان سیستم در فاز طراحی که توسط تأمین‌کنندگان صورت می‌گیرد، در نگاه اول منجر به افزایش هزینه تملک برای مشتری می‌گردد، اما این هزینه به‌صورت کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش قابلیت اطمینان و زمان مفید فعالیت که منجر به افزایش بهره‌وری می‌گردد، به‌صورت تصاعدی جبران خواهد شد (شکل ۱) (Dhudsia, 1997).

در صورت نقض فرض متناسب بودن مخاطره توسط فاکتورهای ریسک، مخاطره نسبی به زمان t بستگی دارد. در این شرایط از تعمیم مدل کاکس مانند روش لایه‌بندی می‌توان استفاده نمود که در آن می‌توان از طریق طبقه‌بندی، متغیری را که فرض PH را نقض می‌کند، کنترل نمود. در این حالت تنها فاکتورهای ریسکی که فرض PH را نقض نمی‌کنند وارد مدل می‌شوند و متغیری که لایه‌بندی می‌شود در مدل حضور نخواهد داشت. بنابراین، عملکرد اجزاء در هر لایه به‌صورت جدا به روش مدل مخاطرات متناسب قابل محاسبه خواهد بود (Kleinbaum & Klein, 2012).

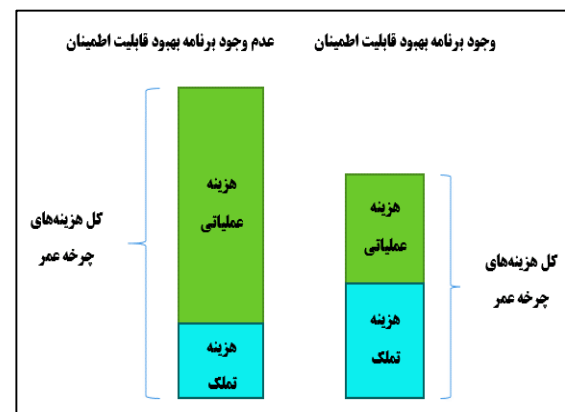
متناسب بودن مخاطرات (PH)، یک فرض کلیدی در این روش است. فرض مخاطرات متناسب به این معنی است که نسبت مخاطره دو سیستم در همه زمان‌ها یکسان و مستقل از زمان است (رابطه (۲)) (Wienke, 2011; David R Cox, 1972):

$$\frac{h_i(t)}{h_j(t)} = \frac{h_0(t) \exp(X_i \beta)}{h_0(t) \exp(X_j \beta)} = \frac{\exp(X_i \beta)}{\exp(X_j \beta)} \quad (2)$$

در صورت نقض فرض متناسب بودن مخاطره توسط فاکتورهای ریسک، مخاطره نسبی به زمان t بستگی دارد. در این شرایط از تعمیم مدل کاکس مانند روش لایه‌بندی می‌توان استفاده نمود که در آن می‌توان از طریق طبقه‌بندی، متغیری را که فرض PH را نقض می‌کند، کنترل نمود. در این حالت تنها فاکتورهای ریسکی که فرض PH را نقض نمی‌کنند وارد مدل می‌شوند و متغیری که لایه‌بندی می‌شود در مدل حضور نخواهد داشت. بنابراین، عملکرد اجزاء در هر لایه به‌صورت جدا به روش مدل مخاطرات متناسب قابل محاسبه خواهد بود (Kleinbaum & Klein, 2012).

۲-۲ مدل پارامتری

در مدل‌های پارامتری برخلاف مدل نیمه پارامتری کاکس، که فرضیه‌ای برای فرم مخاطره پایه در نظر گرفته نمی‌شود، یک فرم پارامتری مانند توزیع وایبل، نمایی و ... برای تابع پایه در نظر گرفته می‌شود. مدل وایبل به دلیل انعطاف‌پذیر بودن و برازش مناسب به‌عنوان بهترین توزیع در تحلیل داده‌های خرابی سیستم‌های مکانیکی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد



شکل ۱. تأثیر برنامه بهبود قابلیت اطمینان در کاهش هزینه‌های چرخه عمر سیستم (Dhudsia, 1997)

۲-۱ مدل نیمه پارامتری مخاطرات متناسب کاکس

مدل مخاطرات متناسب یک مدل نیمه پارامتری و ضربی است (David R Cox, 1972) که در آن، نرخ خطر یک سیستم مطابق با رابطه (۱) به‌صورت حاصل ضرب یک نرخ مخاطره پایه که فقط به زمان بستگی دارد (بخش ناپارامتری) و یک تابع مثبت از عوامل ریسک مؤثر (بخش پارامتری) که چگونگی تغییر نرخ مخاطره را توصیف می‌کند، است:

$$h_i(t) = h_0(t) \exp(X_i \beta) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \log PL(\beta)}{\partial \beta_k} = \sum_{i=1}^n \delta_i (x_{k,i} - \bar{x}_{k,i}) \quad (6)$$

که در آن در آن $k=1,2,\dots,p$ و

$$\bar{x}_{k,i} = \sum_{j \in R_i} w_{ij} x_{k,j} \quad (7)$$

$$w_{ij} = \frac{\exp(X_j \beta')}{\sum_{j \in R_i} \exp(X_j \beta')} \quad (8)$$

با برابر صفر قرار دادن رابطه (6) و برآورد ماکزیمم درستنمایی، پارامترهای مجهول β حاصل می‌گردد.

۲-۴ ارزیابی مدل

به منظور مقایسه کارایی دو مدل نیمه پارامتری کاکس و مدل پارامتری وایبل از معیار آکاییک (AIC) استفاده شد (عبداللهی، حق شناس، & ریخته گران، ۱۳۹۸). این آزمون یک معیار متداول به منظور مقایسه و سنجش برتری مدل است (Li & Ma, 2011; Bisgaard & Kulahci, 2013) که بر اساس تئوری اطلاعات درستنمایی است. این معیار نشان می‌دهد کدام مدل نسبت به سایرین بهتر عمل می‌کند که شامل دو بخش نیکویی برازش و یک عبارت پنالتی برای تعداد پارامترهای تخمین خورده در مدل است. معیار ارزیابی AIC، نمایانگر میزان اطلاعاتی است که توسط مدل از دست رفته و در نتیجه هر چه مقدار معیار ارزیابی AIC کوچک‌تر باشد، مدل مورد نظر نسبت به بقیه مدل‌ها، بهتر و مناسب‌تر است. رابطه (۹)، فرمول آکاییک را نشان می‌دهد (Xu, Vaida, & Harrington, 2009; Akaike, 1974):

$$AIC = -2 \log(L) + 2K \quad (9)$$

که در آن، L نشان‌دهنده درستنمایی است و K تعداد پارامترهای موجود در مدل است.

۳. مطالعه موردی

معدن مس سونگون در ۱۱۱ کیلومتری شمال تبریز واقع شده و دارای ارتفاع متوسط ۲۱۱۱ متر نسبت به سطح دریا است. بر اساس آخرین محاسبات انجام‌شده، میزان ذخیره زمین‌شناسی این

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال چهاردهم / شماره دوم (۵۵) / زمستان ۱۴۰۱

(Ghodrati et al., 2012). به همین دلیل در این تحقیق نیز از مدل پارامتری وایبل برای تحلیل داده‌های خرابی استفاده خواهد شد. با در نظر گرفتن تابع توزیع وایبل به‌عنوان مخاطره پایه، شکل پارامتری نرخ مخاطره به‌صورت زیر خواهد بود:

$$h_i(t) = \frac{\lambda}{\gamma} \left(\frac{t}{\gamma} \right)^{\lambda-1} \exp(X_i \beta) \quad (3)$$

که در آن λ پارامتر شکل و γ پارامتر مقیاس در مدل وایبل را نشان می‌دهد. همچنین $h_0(t) = \frac{\lambda}{\gamma} \left(\frac{t}{\gamma} \right)^{\lambda-1}$ نرخ مخاطره پایه است.

۲-۳ تخمین پارامترهای مدل

برآورد پارامترهای مجهول در مدل مخاطره پارامتری بر اساس فرضیات پارامتری در رابطه با مخاطره پایه مورد نظر است و به روش ماکزیمم درستنمایی به دست می‌آید. اما در مدل نیمه پارامتری استفاده از روش متداول حداکثر درستنمایی مسئله‌ساز خواهد بود؛ بنابراین، به یک نسخه تعدیل‌شده از درستنمایی نیاز هست که حاوی اطلاعات کافی در مورد بردار پارامتر β باشد، اما شامل مخاطره پایه نامشخص نباشد. کاکس در این مورد استفاده از روش درستنمایی جزئی را پیشنهاد کرد (David R Cox, 1975). در این روش با وجود نامعلوم بودن قسمت خطر پایه مدل، امکان برآورد ضرایب رگرسیونی در قسمت نمایی مدل وجود دارد. برآورد β بر اساس تابع درستنمایی جزئی برای n داده خرابی به‌صورت زیر است.

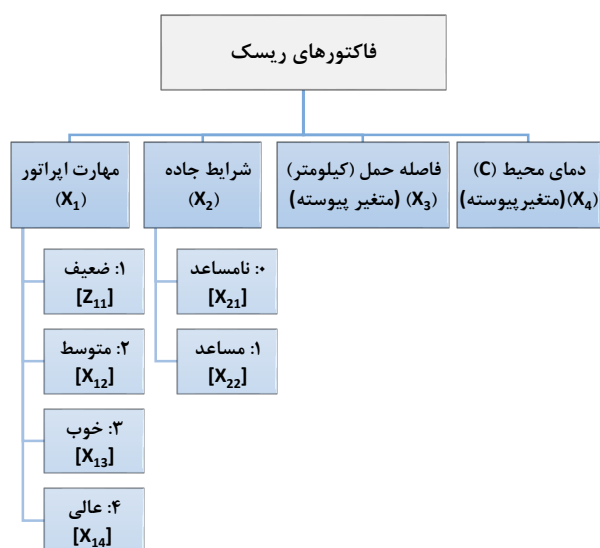
$$PL(\beta) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{\exp(X_i \beta')}{\sum_{j \in R_i} \exp(X_j \beta')} \right\}^{\delta_i} \quad (4)$$

که در آن δ_i نشان‌دهنده وضعیت خرابی است که در صورت رخداد خرابی یا سانسور به ترتیب مقادیر یک و صفر می‌گیرد. لگاریتم درستنمایی جزئی به‌صورت است:

$$\log PL(\beta) = \sum_{i=1}^n \delta_i \left[X_i \beta' - \log \left(\sum_{j \in R_i} \exp(X_j \beta') \right) \right] \quad (5)$$

مشق لگاریتم درستنمایی جزئی با توجه به β ها، به‌صورت زیر خواهد بود:

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل معدن: مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نیمه پارامتری و پارامتری مخاطرات متناسب



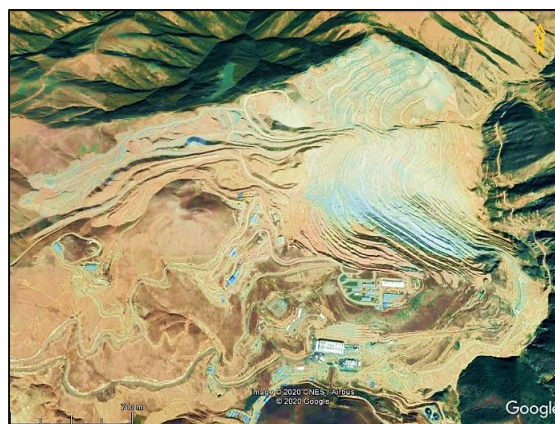
شکل ۴. فاکتورهای ریسک در نظر گرفته شده در مدل سازی

لازم به ذکر است به منظور بررسی صحت و حذف داده‌های نادرست با کارشناسان سایت معدن و دفتر مرکزی مصاحبه شد. پس از گردآوری و پالایش داده‌ها، داده‌های مورد نیاز به صورت یک دیتاست یکپارچه آماده گردید. اطلاعات موجود در این دیتاست شامل ستون‌هایی است که در آن مدل دستگاه، شناسه دستگاه، تاریخ عملیات (روز، ماه و سال)، شرایط جاده، فاصله حمل (کیلومتر)، دما (سانتی‌گراد)، مهارت اپراتور و زمان‌های بین خرابی (ساعت) است. همچنین هر یک از سطرهای این مجموعه داده متعلق به یک رویداد خرابی یا سانسور خرابی (که توسط ستون وضعیت به ترتیب با کد ۱ و ۰ مشخص شده‌اند) است. نمونه‌ای از داده‌های جمع‌آوری شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. نمونه داده‌های جمع‌آوری شده

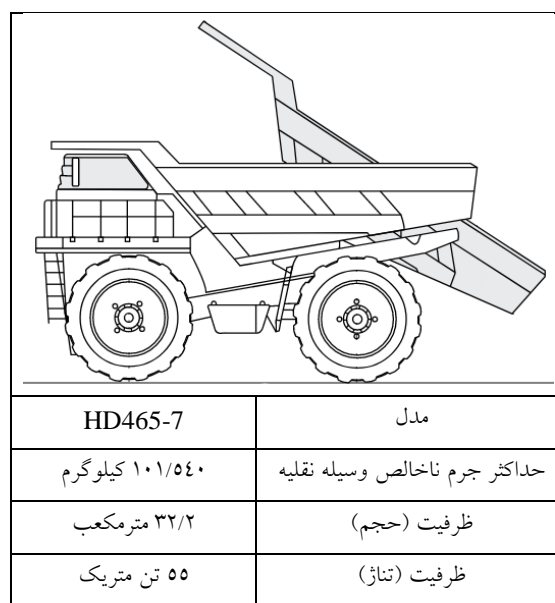
ردیف	سال	ماه	روز	مهارت اپراتور	شرایط جاده	فاصله حمل	دما	وضعیت	زمان خرابی
۱	۹۴	۵	۲۵	۲	۱	۱/۶	۲۶/۴	۱	۲/۵
۲	۹۴	۵	۲۸	۲	۱	۱/۶	۲۵/۵	۱	۲۳/۵
۳	۹۴	۵	۲۹	۲	۱	۲/۶	۲۳/۵	۱	۷/۸
۴	۹۴	۷	۴	۲	۱	۲/۱	۲۰/۷	۱	۲۲/۵
۵	۹۴	۷	۵	۴	۱	۱/۶	۱۲/۵	۱	۱۱/۸

کانسار ۸۰۶ میلیون تن با عیار ۰,۶۱ درصد مس برآورد گردیده است. شکل ۲ نمایی از معدن مس سونگون را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویر Google Earth از معدن مس سونگون

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های تولید، خرابی و شرایط آب و هوایی، در بازه زمانی ۲۰ ماه مربوط به یک دستگاه دامپتراک HD465-7 است (شکل ۳). داده‌های مربوط به آب و هوا شامل میانگین دمای روزانه از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به معدن دریافت شد. داده‌های خرابی و فاکتورهای عملیاتی با توجه به اطلاعات میدانی، گزارش‌های تولید روزانه معدن، تعمیرگاه و همچنین تکمیل پرسشنامه جمع‌آوری گردید. اطلاعات مربوط فاکتورهای ریسک جهت مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان دامپتراک در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳. مشخصات دامپتراک مورد مطالعه

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال چهاردهم / شماره دوم (۵۵) / زمستان ۱۴۰۱

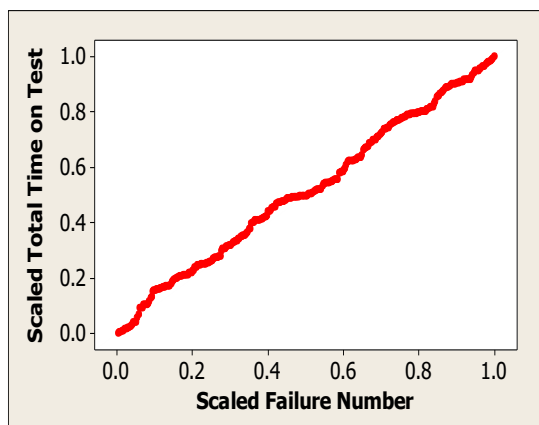
مورد مطالعه میانگین دمای روزانه از محدوده ۱۵- تا ۳۰+ متغیر بوده است.

۳-۱ بررسی پیش فرض های مدل

به منظور استفاده از مدل های فرایند تجدید پذیر همچون وایبل و کاکس در ابتدا می بایست آزمون روند و همبستگی جهت بررسی فرض مستقل و مانا بودن^۷ (iid) داده ها، مورد ارزیابی قرار گیرد. در اینجا از نرم افزار Minitab16 برای انجام دو آزمون استفاده شده است. چنانچه داده ها فاقد روند و همبستگی باشد فرض iid برقرار و استفاده از مدل های مذکور بلامانع خواهد بود. به این منظور از روش های گرافیکی استفاده می شود. از دیگر پیش فرض های استفاده از مدل کاکس، پیش فرض تناسب مخاطرات در طول زمان است که نیاز به بررسی دارد و در ادامه به آن پرداخته می شود.

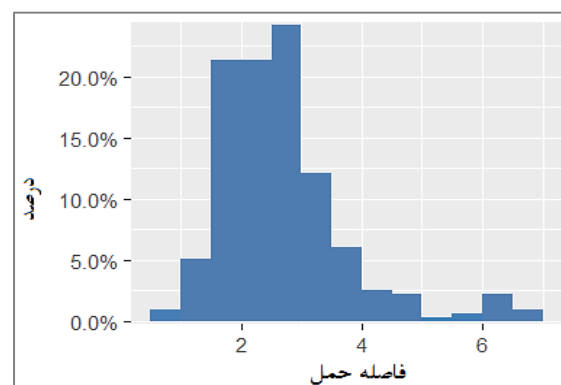
۳-۱-۱ آزمون روند

در این آزمون، شماره خرابی ها بر اساس تابعی از زمان جمع می شود و وقوع هر خرابی (زمان تا خرابی) به صورت نقاط مجزایی رسم می شوند. نحوه قرارگیری این نقاط نشان دهنده نوع رفتار دستگاه وجود یا عدم وجود روند در داده ها است. در صورتی که الگوی کلی قرارگیری نقاط به صورت خطی باشد، داده ها عاری از روند هستند. وجود حالت تحدب، تقعر و یا به طور کلی انحنا در نحوه قرارگیری نقاط، نشان دهنده روند در داده ها است (D. Kumar et al., 1992; Ascher & Feingold, 1984). شکل ۷ روند داده های خرابی دامپتراک را نمایش می دهد.

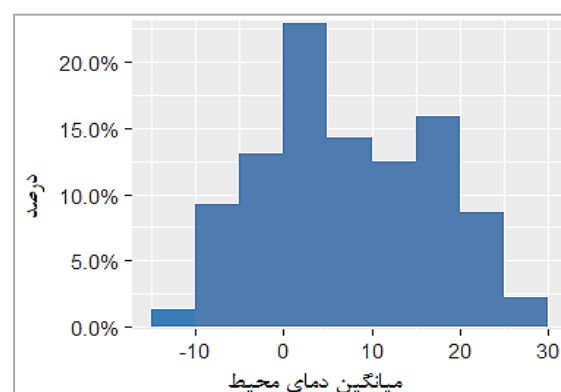


زمان تین	وضعیت خرابی	دما	فاصله حمل	شرایط جاده	مهارت اپراتور	روز	پد	تد	ردیف
۲۳/۰	۱	۱۲/۵	۱/۸	۱	۴	۶	۷	۹۴	۶
۲۷/۵	۱	۱۲/۷	۲/۲	۱	۲	۸	۷	۹۴	۷
۲/۰	۱	۱۶/۷	۱/۵	۱	۲	۹	۷	۹۴	۸
۲۵/۰	۱	۱۶/۵	۱/۹	۱	۴	۱۰	۷	۹۴	۹
۱۱/۵	۱	۱۵/۶	۲/۴	۱	۲	۱۱	۷	۹۴	۱۰
...

هیستوگرام متغیرهای پیوسته فاصله حمل و دما در بازه زمانی مطالعه به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۵. هیستوگرام متوسط فاصله حمل طی شده (کیلومتر)

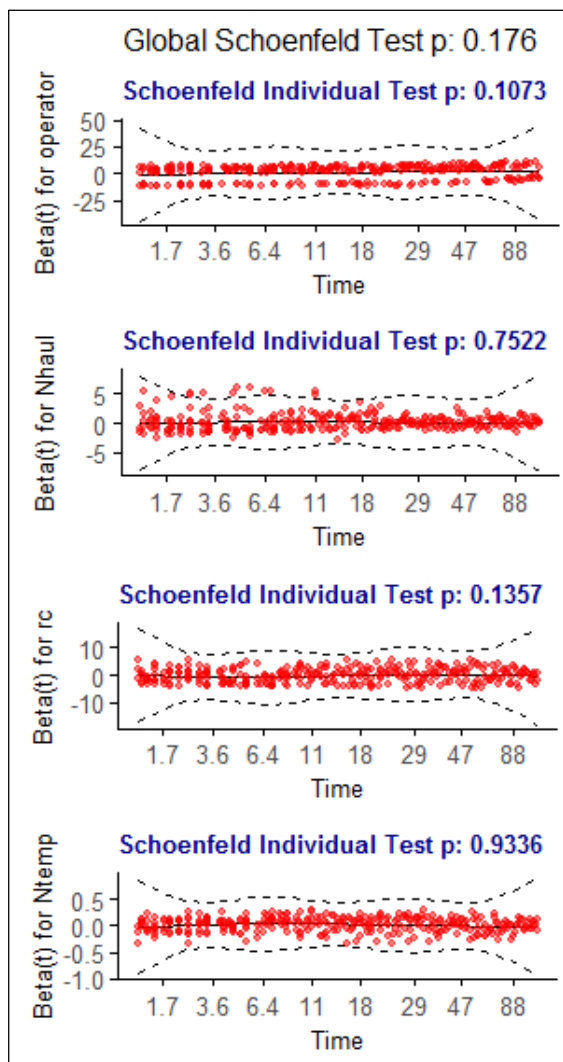


شکل ۶. هیستوگرام متوسط دما (سانتی گراد)

همان گونه از هیستوگرام فاکتور فاصله حمل مشخص است به طور میانگین در طول عملیات باربری دامپتراک، فاصله حمل حداکثر حدود ۷ کیلومتر و بیشترین میزان عملیات در محدوده ۱،۵ تا ۳،۵ کیلومتر صورت گرفته است. همچنین در بازه

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل معدن: مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نیمه پارامتری و پارامتری مخاطرات متناسب

فرض، نمودار باقیمانده‌ها به صورت افقی و مستقل از زمان مشاهده می‌گردد. بنا بر نمودارهای باقیمانده شوئفلد شکل ۹ می‌توان استنباط کرد استفاده از مدل مخاطرات متناسب کاکس بلا مانع است.

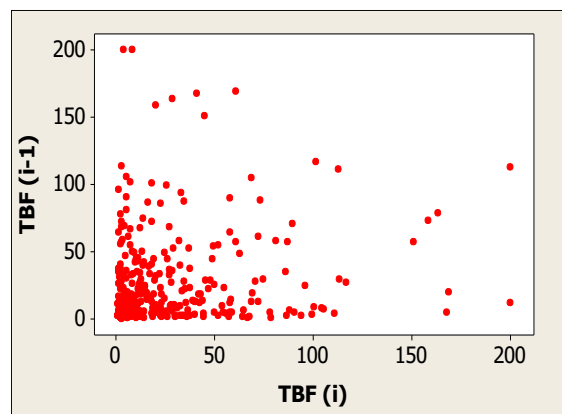


شکل ۹. نمودارهای باقیمانده شوئفلد برای فاکتورهای ریسک

شکل ۷. آزمون روند داده‌های خرابی دامپتراک

۳-۱-۲ آزمون همبستگی

در آزمون همبستگی سری، n آمین داده‌های خرابی، به صورت تابعی از $(n-1)$ آمین داده‌های خرابی در یک فضای XY رسم می‌شوند. اگر نقاط موجود در فضای رسم شده دارای نظم و ترتیب خاصی نباشد، گفته می‌شود که داده‌ها دارای همبستگی ندارند (Vagenas, Runciman, & Clément, 1997; Ascher & Feingold, 1984). شکل ۸ همبستگی داده‌های مربوط به زمان خرابی دامپتراک را نشان داده شده است.



شکل ۸. آزمون همبستگی داده‌های خرابی دامپتراک

چنانچه نمودارهای مربوط به آزمون‌های روند و همبستگی نمایش می‌دهد فرض iid در مورد داده‌های خرابی سیستم مورد مطالعه برقرار است.

۳-۱-۳ پیش فرض متناسب بودن مخاطرات

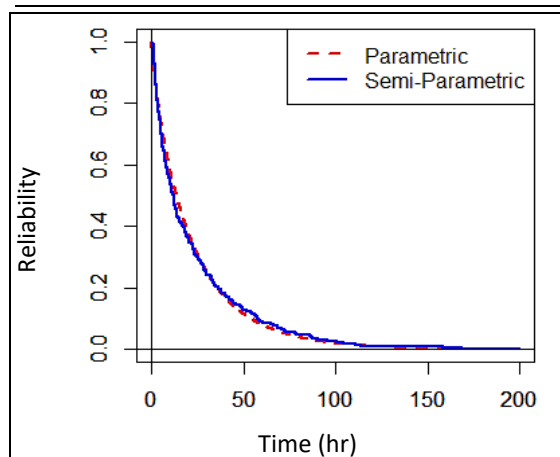
پس از جمع‌آوری داده‌ها و عوامل خطر مشاهده‌شده، باید وابستگی زمانی عوامل ریسک بررسی شود. در اینجا از آزمون باقیمانده شوئفلد^۸ که یک آزمون آماری در مورد فرض متناسب را در اختیار قرار می‌دهد استفاده شده است (Kleinbaum & Klein, 2012). در این آزمون آماری اگر فرض متناسب برای یک فاکتور خاص برقرار باشد، باقیمانده‌های شوئفلد برای آن متغیر، وابسته به زمان نخواهد بود. رد فرضیه صفر منجر به این نتیجه می‌شود که فرض متناسب نقض شده است. در اینجا، از سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شده است. در صورت برقراری

جدول ۲. برآورد ضرایب فاکتورهای ریسک

مدل نیمه پارامتری کاکس		مدل پارامتری وایبل		مدل
P value	نسبت مخاطره (HR)	P value	نسبت مخاطره (HR*)	فاکتور ریسک
	سطح مرجع		سطح مرجع	X ₁₂
۰/۵۱	۰/۹۲	۰/۵۱	۰/۹۲	X ₁₃
۰/۰۱	۰/۶۷	P<۰/۰۰۱	۰/۶۵	X ₁₄
	سطح مرجع		سطح مرجع	X ₂₁
۰/۰۷	۰/۷۷	۰/۰۸	۰/۷۸	X ₂₂
۰/۰۳	۱/۱۶	۰/۰۲	۱/۱۷	X ₃
۰/۰۸	۱/۰۱	۰/۰۵	۱/۰۲	X ₄
پارامترهای تابع مخاطره پایه				
-		۰/۸۷	λ	مقیاس
-		۳۲/۰۱	γ	شکل
نتایج مقایسه دو مدل با استفاده از آزمون آکایک				
۲۹۷۸		۲۶۸۱	AIC	

$$HR = \text{Exp}(\beta) *$$

** سطح یک در بین داده‌های جمع‌آوری شده مشاهده نشد.



شکل ۱۰. نمودارهای قابلیت اطمینان مدل پارامتری و

نیمه پارامتری

۲-۳ تحلیل قابلیت اطمینان

پس از بررسی پیش فرض‌های مدل، هر دو مدل پارامتری وایبل و نیمه پارامتری کاکس روی داده‌های خرابی برازش می‌شود که نتایج مدل‌سازی در جدول ۲ آورده شده است. برازش مدل‌ها روی داده‌های موجود نشان می‌دهد که هر دو مدل تقریباً بر هم منطبق هستند (شکل ۱۰ و شکل ۱۱). بر اساس نتایج به دست آمده از برازش دو مدل، هر چهار فاکتور ریسک در نظر گرفته شده در مرحله اول، در سطح معنی داری ۰,۱، به عنوان عوامل اثرگذار بر میزان مخاطره دامپتراک معنی دار شده است.

- مدل پارامتری:

$$h(t) = 0.027 \left(\frac{t}{32.01} \right)^{-0.13} * \exp(-0.42X_{14} - 0.25X_{22} + 0.16X_3 + 0.02X_4)$$

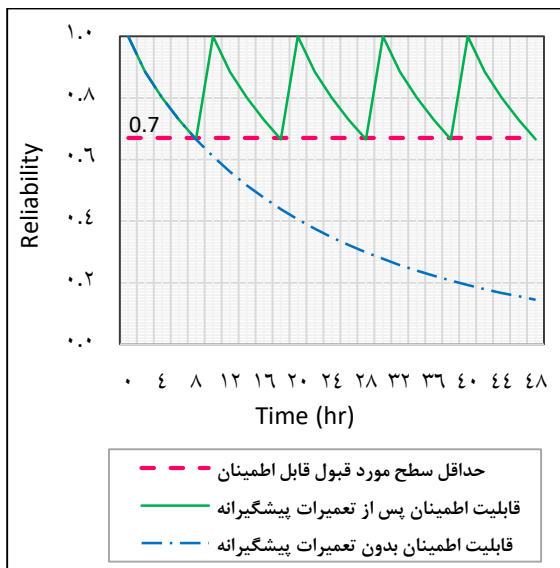
- مدل نیمه پارامتری:

$$h(t) = h_0(t) \exp(-0.4X_{14} - 0.26X_{22} + 0.15X_3 + 0.01X_4)$$

۴. تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر قابلیت

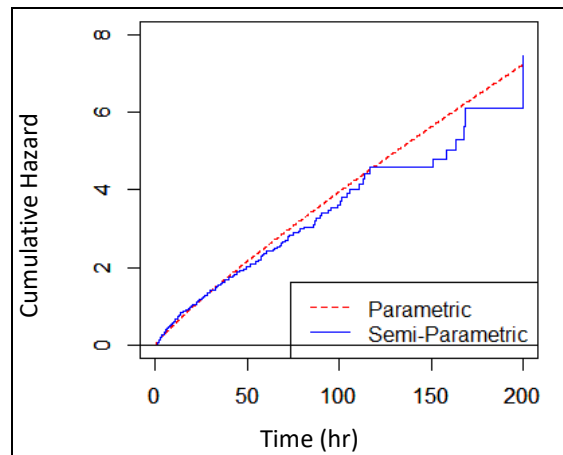
اطمینان

با توجه به نتایج به دست آمده در بخش قبل، مدل پارامتری و ایبل به عنوان مدل مناسب برای توصیف قابلیت اطمینان دامپتراک مورد مطالعه در نظر گرفته شد. قابلیت اطمینان دامپتراک پس از طی ۴ ساعت به ترتیب به سطح ۸۰ درصد تنزل می‌یابد. از آنجایی که متوقف نمودن دستگاه در حین عملیات جهت بازرسی دوره‌ای موجب کاهش دسترسی سیستم می‌شود، لذا پیشنهاد می‌گردد که پس از پایان هر شیفت ۸ ساعته بازدید دوره‌ای برای تعمیرات پیشگیرانه صورت گیرد. دامپتراک پس از طی این مدت به قابلیت اطمینان حدود ۷۰ درصد خواهد رسید که پس از اعمال تعمیرات پیشگیرانه مجدد در آغاز شیفت کاری بعد با قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصدی شروع به کار خواهد کرد. در شکل ۱۲ نمودار قابلیت اطمینان دامپتراک قبل و بعد از تعمیرات پیشگیرانه نشان داده شده است. بر اساس نمودار، در صورت نبود بازرسی‌های دوره‌ای قابلیت اطمینان ماشین پس از ۴۰ ساعت به کمتر از ۲۰ درصد خواهد رسید.



شکل ۱۲. نمودارهای قابلیت اطمینان پس از اعمال تعمیرات

پیشگیرانه



شکل ۱۱. نمودارهای مخاطره تجمعی مدل پارامتری و

نیمه پارامتری

اگرچه نتایج حاصل از مدل کاکس و مدل پارامتری و ایبل نتایج تقریباً مشابهی را گزارش می‌دهند ولی با توجه به معیار سنجش AIC، مدل پارامتری و ایبل، مدل کاراتری نسبت به مدل کاکس است. نتایج این آزمون در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است.

با توجه به تحلیل صورت گرفته، در نهایت مدل پارامتری به عنوان مدل مناسب برای توصیف مخاطره ماشین در نظر گرفته می‌شود. بنا به نتایج ارائه شده در جدول ۲، در این مدل، مهارت اپراتور با سطح عالی ($P\text{-value} < 0.001$)، ریسک وقوع خرابی را تا ۳۵ درصد نسبت به سایر سطوح کاهش می‌دهد. همچنین شرایط نامساعد جاده ($P\text{-value} = 0.08$)، بروز خرابی را حدود ۲۸ درصد افزایش می‌دهد. از طرفی به ازای هر کیلومتر افزایش در فاصله حمل ($P\text{-value} = 0.02$)، نرخ وقوع خرابی ۱۷ درصد افزایش خواهد یافت. دما ($P\text{-value} = 0.05$) نیز به عنوان یکی دیگر از فاکتورهای اثرگذار، ریسک وقوع خرابی را به ازای هر ۵ درجه افزایش در حدود ۱۰ درصد افزایش می‌دهد.

با توجه به نمودار قابلیت اطمینان دامپتراک که در مقادیر متوسط عوامل ریسک ترسیم شده است، پس از گذشت تقریباً ۱۵۰ ساعت از کارکرد ماشین میزان قابلیت اطمینان آن به صفر خواهد رسید.

۵. بحث و نتیجه گیری

قابلیت اطمینان، به عنوان یک شاخص تحلیل عملکرد سیستم، نقشی حیاتی در دستیابی به تولید رقابتی را ایفا می کند. دو روش عمده در تحلیل قابلیت اطمینان، روش های پارامتری و نیمه پارامتری هستند. در این مطالعه یک بررسی مقایسه ای بین مدل پارامتری وایبل و مدل نیمه پارامتری کاکس در تحلیل داده های خرابی دامپتراک، به عنوان مهم ترین سیستم حمل و نقل مواد در معادن روباز، صورت گرفت و به منظور ارزیابی دو مدل از معیار آکایک استفاده گردید. همچنین به جهت ارزیابی نکویی برازش مدل، آزمون فرض تناسب خطر برای فاکتورهای ریسک موردنظر با استفاده از باقی مانده های شونفلد انجام شد و نتایج آزمون، برقراری فرض تناسب را نشان داد. بر اساس مطالعه انجام شده، نتایج حاصل از برازش دو مدل در داده های مورد مطالعه تقریباً مشابه ولی در مجموع کارایی مدل پارامتری نسبت به مدل کاکس بیشتر است و کمتر سبب از دست رفتن اطلاعات می شود. با توجه به اینکه در مدل های پارامتری، امکان ارائه تحلیل های قوی تری وجود دارد، در صورت برقراری پیش فرض های مدل در مورد شکل تابع مخاطره پایه، استفاده از مدل پارامتری پیشنهاد می گردد. همچنین با توجه به نتایج مدل پارامتری برازش شده، عوامل ریسک مدنظر شامل شرایط جاده، مهارت اپراتور، دما و فاصله حمل به عنوان فاکتورهای اثرگذار بر قابلیت اطمینان دامپتراک شناسایی شد. این نتایج حاکی از آن بود که در شرایط نامساعد جاده، نرخ مخاطره ماشین آلات ۲۸ درصد نسبت به شرایط مساعد افزایش می یابد. همچنین میزان کاهش مخاطره در سطح مهارت عالی اپراتور حدود ۳۵ درصد نسبت به سطوح پایین تر به دست آمد. از طرفی به ازای یک واحد افزایش دمای محیط و فاصله حمل دامپتراک، میزان مخاطره به ترتیب حدود ۲ و ۱۶ درصد افزایش خواهد یافت. با توجه به مدل حاصل، بازه های ۸ ساعته جهت بازرسی های دوره ای و انجام تعمیرات پیشگیرانه پیشنهاد شد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، دامپتراک به عنوان یک سیستم کلی مورد مطالعه قرار گرفته

است، پیشنهاد می شود که با در نظر گرفتن زیرسیستم های مختلف دامپتراک (مانند موتور، هیدرولیک و...)، خرابی های مربوط به هر بخش به تفکیک مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد و بازه زمانی پیشنهادی برای هر زیرسیستم مورد بازبینی قرار گیرد.

۶. پی نوشت ها

1. Hazard Ratio (HR)
2. Proportional Hazard Model (PHM)
3. Cox
4. Covariate
5. Front – End Loader
6. Akaike Information Criterion (AIC)
7. Independent and Identically Distributed
8. Schoenfeld Residuals Test

۷. مراجع

- عبدالمهی، ر.، حق شناس، ح.، و ریخته گران، ر. (۱۳۹۸). مدل سازی همزمان تاثیر عوامل هندسی، توپوگرافی و دسترسی راه در تصادفات راه های برون شهری با عامل سازی و رگرسیون خطی تعمیم یافته (مطالعه موردی: راه های استان کرمان).

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification Selected Papers of Hirotugu Akaike (pp. 215-222): Springer.

- Allahkarami, Z., & Sayadi, A. R. (2016). Maintainability Analysis and Modeling of Hydraulic System of Shavel. Paper presented at the International Conference on Industrial Engineerin and Managment, Tehran (In Persian).

- Allahkarami, Z., Sayadi, A. R., & Lanke, A. (2016). Reliability Analysis of Motor System of Dump Truck for Maintenance Management Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety (pp. 681-688): Springer

- Dhudisia, V. (1997). Guidelines for equipment reliability Technical Publication: SEMATECH, Inc.
- Ghodrati, B. (2005). Reliability and operating environment based spare parts planning. (PhD PhD diss.), Lulea, University of Technology, Lulea.
- Ghodrati, B. (2011). Efficient Product Support—Optimum and Realistic Spare Parts Forecasting. In L. Tadj, M.-S. Ouali, S. Yacout, & D. Ait-Kadi (Eds.), Replacement Models with Minimal Repair (pp. 225-269). London: Springer.
- Ghodrati, B., Ahmadzadeh, F., & Kumar, U. (2012). Remaining useful life estimation of mining equipment: a case study. Paper presented at the ISMPES Proceeding, New Delhi.
- Ghodrati, B., Hoseinie, S. H., & Kumar, U. (2017). Context-driven mean residual life estimation of mining machinery. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1-9.
- Ghodrati, B., & Kumar, U. (2005). Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study. International Journal of Logistics: Research and Applications, 8(2), 95-105.
- Hall, R. A., & Daneshmend, L. K. (2003). Reliability modelling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 17(3), 139-155.
- Ho, M., & Hodkiewicz, M. (2013). Factors That Influence Failure Behaviour and Remaining Useful Life of Mining Equipment Components. Advances in Mechanical Engineering, 5, 9.
- Ascher, H., & Feingold, H. (1984). Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes: M. Dekker.
- Barabadi, A., Barabady, J., & Markeset, T. (2011a). Maintainability analysis considering time-dependent and time-independent covariates. Reliability Engineering & System Safety, 96(1), 210-217.
- Barabadi, A., Barabady, J., & Markeset, T. (2011b). A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition. Reliability Engineering & System Safety, 96(12), 1637-1646.
- Basiri, M. H., & Sharifi, M. R. (2019). Behavior Analysis of Transport Fleet in Open Pit Mine With Uncertain Data. Journal of Transportation Research, 16(3 (60)), 83-93 (In Persian).
- Bisgaard, S., & Kulahci, M. (2011). Time Series Analysis and Forecasting by Example: Wiley.
- Choudhary, D., Tripathi, M., & Shankar, R. (2019). Reliability, availability and maintainability analysis of a cement plant: a case study. International Journal of Quality & Reliability Management, 36(3), 298-313.
- Cox, D. R. (1972). Regression models and life tables (with discussion). Series B (Methodological). Journal of the Royal Statistical Society, 34(2), 187-220.
- Cox, D. R. (1975). Partial likelihood. Biometrika, 62(2), 269-276.
- Dhillon, B. S. (2008). Mining equipment reliability, maintainability, and safety. Berlin: Springer.

Numerical Methods In Mining Engineering, 9(18), 129-141.

- Nouri Qarahasanlou, A., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Jafarei, R. (2016). Tire demand planning based on reliability and operating environment. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 50(2), 239-248.

- Nouri Qarahasanlou, A., Barabadi, A., Ataei, M., & Einian, V. (2019). Spare part requirement prediction under different maintenance strategies. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(3), 169-182.

- Oakes, D. (1983). Comparison of models for survival data. *Statistics in Medicine*, 2(2), 305-311. doi:10.1002/sim.4780020227

- Qarahasanlou, A. N., Khalokakaie, R., Ataei, M., & Ghodrati, B. (2017). Operating Environment-Based Availability Importance Measures for Mining Equipment (Case Study: Sungun Copper Mine). *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17(1), 56-67.

- Vagenas, N., Runciman, N., & Clément, S. R. (1997). A methodology for maintenance analysis of mining equipment. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 11(1), 33-40.

- Wienke, A. (2011). *Frailty models in survival analysis*: CRC Press.

- Xu, R., Vaida, F., & Harrington, D. P. (2009). Using profile likelihood for semiparametric model selection with application to proportional hazards mixed models. *Statistica Sinica*, 19(2), 819-842.

- Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., & Kumar, U. (2012). Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(1), 98-119.

- Hougaard, P. (2000). *Analysis of Multivariate Survival Data*. New York: Springer.

- Kleinbaum, D. G., & Klein, M. (2012). *Survival Analysis: A Self-Learning Text*, Third Edition. New York: Springer.

- Kumar, D., Klefsjö, B., & Kumar, U. (1992). Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety*, 37(3), 217-222.

- Kumar, U. (1990). Reliability analysis of load-haul-dump machines. (PhD), Luleå University of Technology, Luleå.

- Kumar, U., Klefsjö, B., & Granholm, S. (1989). Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine. *Reliability Engineering & System Safety*, 26(4), 341-361.

- Li, J., & Ma, S. (2013). *Survival analysis in medicine and genetics*: CRC Press.

- Moniri-Morad, A., Pourgol-Mohammad, M., Aghababaeia, H., & Sattarvand, J. (2018). Reliability-based regression model for complex systems considering environmental uncertainties. Paper presented at the Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 14), Los Angeles, CA.

- Nouri Qara Hasanlou, A., Ataei, M., Khalokakaie, R., Fatoorachi, S., & Barabady, R. (2019). Operating Environment Based Reliability Analysis of Mining Equipment Case Study: Molybdenum-Copper Mine (Sungun Copper Mine). *Journal of Analytical and*

تحلیل قابلیت اطمینان سیستم حمل و نقل معدن: مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نیمه پارامتری و پارامتری مخاطرات متناسب

زینب اله‌کرمی، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی معدن در دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم، تعمیرپذیری، مدیریت ناوگان ماشین‌آلات معدنی و همچنین برنامه ریزی و مدیریت تعمیر و نگهداری است.



احمدرضا صیادی، درجه کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته اقتصاد معدن از مدرسه عالی معادن پاریس (فرانسه) اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان اقتصاد معدن، بهره‌وری، تعمیر و نگهداری و مدیریت زنجیره تأمین بوده و در حال حاضر عضو هیئت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه تربیت مدرس است.



بهزاد قدرتی، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن را از دانشگاه تهران و درجه دکتری در رشته عملیات، تعمیر و نگهداری را از دانشگاه صنعتی لولئو (سوئد) اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان قابلیت اطمینان، تعمیرات و نگهداری، اتوماسیون در معادن است. در حال حاضر عضو هیئت علمی با مرتبه استاد در دانشگاه صنعتی لولئو است.

