

برآورد باقیمانده عمر مفید تجهیزات با زوال تدریجی با سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط با حضور دو عامل تسریع کننده خرابی

مهدی دیوسالار

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
صدیق رئیسی*

دانشیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

چکیده

معمولاً تجهیزات بر اساس فرآیند زوال تدریجی با الگوی تصادفی دچار خرابی می شوند. در این موارد سطح زوال به طور تدریجی افزایش می یابد و زمانی که مقدار آن از آستانه زوال از پیش تعریف شده تجاوز کند، از کارافتاده تلقی می شود. علاوه بر آن ممکن است عوامل اغتشاش محیطی مانند دما، رطوبت، فشار و نظایر آن با تغییرات غیر قابل کنترل مواجه شده و الگوهای خرابی را تغییر و یا تسریع کنند. آنجائی که تخمین باقیمانده طول عمر تجهیز اهمیت بسیاری در موثر بودن برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات پیشبینانه دارد و این برآورد متکی بر شناسائی الگوهای تسریع شده خرابی می بایست انجام شود، تحقیق حاضر برای نخستین بار بر برآورد باقیمانده طول عمر تجهیز در شرایط حضور اثرات تسریع کننده دو عامل اخلاص همبسته متمرکز شده است و در آن برای پایش عوامل تاثیر گذار محیطی بر طول عمر تجهیز از نمودارهای کنترلی و چگونگی برآورده متوسط باقیمانده طول عمر تجهیز در شرایط مختلف تحت کنترل بودن، خارج از کنترل بودن به دلیل عامل اخلاص اول، خارج از کنترل بودن به دلیل عامل دوم و خارج از کنترل بودن به دلیل هر دو عامل ارائه شده است. برای تشریح هر چه بیشتر جزئیات محاسبات مثال عددی نیز ارائه شده است.

کلمات کلیدی

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط؛ باقیمانده عمر مفید؛ زوال؛ قابلیت اطمینان؛ آزمون طول عمر تسریع شده^۵

۱- مقدمه

از آنجا که بروز خرابی همواره با ایجاد شرایط نامطلوب و عدم دسترسی به تجهیزات همراه است لذا به منظور ایجاد اطمینان بیشتر در بهره گیری موثر از تجهیزات در دوره زمانی مورد مطالعه تحلیل قابلیت اطمینان یکی از مهم ترین مقوله های مهندسی در طراحی و تحلیل سیستم ها محسوب می شود. طبیعی است اهمیت این موضوع در سیستم هایی که از امکانات و تجهیزات حساس و یا گرانتقیمت استفاده می کنند و یا نسبت به کارکرد موثر سیستم در طول زمان مشخص حساسیت زیاد دارند به مراتب بیشتر است. به عنوان نمونه می توان به هواپیما، زیر دریایی، سیستمهای نظامی و تجهیزات هسته ای اشاره کرد که در آن ها توجه به احتراز از از کارافتادگی تجهیز در طول زمان مشخص بسیار مورد توجه است در این موارد وقوع خرابی می تواند بسیار نامطلوب و یا بعضاً همراه با فاجعه

باشد[1]. همچنین بدلیل تاثیر انباشت یا شرایط محیطی کارکرد، ممکن است قسمتی از تجهیزات فرسوده و یا حتی خراب شده و منجر به تصادف، صدمه رساندن به نیروی انسانی و یا از دست رفتن عملکرد یا خاصیت تجهیز شود. برای برنامه ریزی مناسب جهت ارتقاء قابلیت دسترسی به تجهیزات مهم، به کارگیری روش های موثر نگهداری و تعمیرات اهمیت فراوان دارد. برای این منظور خط مشی های گوناگون تعمیرات موردی تصادفی، پیش گیرانه و پیش بینانه دنبال می شود که خصوصاً مورد اخیراً برای تجهیزات خاص و گرانبهاتر مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش وضعیت تجهیز مورد مطالعه در دوره های زمانی از پیش تعریف شده مورد بررسی قرار می گیرد و حسب پیشرفت سطح زوال و مقایسه آن با سطح آستانه زوال عمر باقیمانده تجهیز برآورد می شود که این کمیت شاخص

* (corresponding author) Raissi@azad.ac.ir

وجود دارد [9]. اگرچه هر تابع انتقالی می تواند جهت مدل نمودن شتاب در سیستم به کار رود ولیکن معمولاً انتقال خطی مقیاس زمانی در این زمینه به کار می رود. تحت این شرایط، طول عمر یا زمان تا خرابی تحت شرایط عملکرد نرمال مطابق رابطه شماره ۱ خواهد بود

$$t_0 = AF t_s \quad (1)$$

در عبارت ۱، AF عامل شتاب دهنده، t_0 زمان تا خرابی در زمان کارکرد نرمال و t_s زمان تا خرابی سیستم در شرایط تنش می باشد. اگر f_s تابع توزیع احتمال در شرایط شتاب داده شده باشد، f_0 نشان دهنده تابع توزیع احتمال در شرایط عادی بوده و خواهیم داشت [9]

$$f_0(t) = \frac{1}{AF} f_s\left(\frac{t}{AF}\right) \quad (2)$$

$$F_0(t) = F_s\left(\frac{t}{AF}\right) \quad (3)$$

$$h_0(t) = \frac{1}{AF} h_s\left(\frac{t}{AF}\right) \quad (4)$$

پی چت در سال ۲۰۰۸ روشهای تخمین عمر را به دو دسته تقسیم نمود که اولی روش بر مبنای مدل و دومی روش استخراج داده^۷ می باشد [10]. سی و همکاران در سال ۲۰۱۱ مدلهای استخراج داده را بیشتر بررسی نمودند و آنها را به مدلهای پیش بر مبنای داده^۸ و مدلهای پیش بر مبنای داده غیر مستقیم^۹ تقسیم نمودند [11]. جاردین و همکاران در سال ۲۰۰۶ روشهای تخمین طول عمر را به سه دسته روشهای بر مبنای آمار، روشهای بر مبنای هوش مصنوعی^{۱۱} و روشهای بر مبنای مدل تقسیم نمودند [2]. مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه را می توان در [12] ملاحظه کرد.

کسیدی و همکاران [13] در سال ۲۰۰۰ یک پژوهش مقدماتی برای مدل و آنالیز نمودن رابطه بین نگهداری و تعمیرات و دیدگاههای سنتی مبتنی بر گذر زمان و زوال و همچنین کنترل فرایند آماری^{۱۲} (SPC) ارائه نمودند. بن دایا و رحیم [14] در سال ۲۰۰۰، چهارچوبی جهت استخراج اثر متقابل بین نگهداری و تعمیرات و کنترل کیفیت جهت مدل نمودن بهینه سازی ادغام این دو امر ارائه نمودند. لیندرمن و همکاران [15] در سال ۲۰۰۵ مدل آنالیزی جهت نمایش این سود اقتصادی ارائه نمودند. تحقیقات بیشتر که در این زمینه انجام شده در [16] قابل ملاحظه است. نورالسنا و مهرافروز در سال ۲۰۱۱ یک سیستم تولیدی تک محصولی را با یک نرخ خرابی مشخص و ثابت که در حالت اولیه، در وضعیت تحت کنترل می باشد در نظر گرفتند. آنها فرض نمودند که این

بسیار مهمی در برنامه ریزی بهنگام و اقتصادی تعمیر قبل از وقوع آثار زیان بار خرابی محسوب می شود. [2]، [3]، [4] و [5]. باید توجه داشت عمر باقیمانده خود یک متغیر تصادفی محسوب می شود و متاثر از تابع چگالی طول عمر تجهیز در شرایط عملکردی محیطی و الگوی زوال تدریجی است. به همین دلیل برآورد صحیح عمر باقیمانده تحت شرایط مختلف عملیاتی یکی از دغدغه های مهم تحقیقاتی در حوزه مهندسی قابلیت اطمینان در دهه اخیر بوده است. همچنین تغییرات معنی دار عوامل محیطی می تواند سبب تسریع فرآیندهای خرابی یا زوال تجهیز شود و این بدین معنا است که تجهیزاتی که طول عمرش در شرایط عادی با الگوی تصادفی معین و پارامترهای مشخص سپری می شود ممکن است در گذر زمان مثلاً با افزایش معنی دار درجه حرارت محیط دچار تسریع فرآیند خرابی شود و این مفهوم به بیان ریاضی به تغییر تابع چگالی احتمال خرابی و یا تغییر پارامترها دلالت دارد که مدل سازی آن در حوزه مشترک مطالعات قابلیت اطمینان، تحلیل شوک، پایش فرآیندهای تصادفی و برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات دنبال می شود. در ادامه ادبیات این موضوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

قابلیت اطمینان، احتمالی است که یک محصول برای یک زمان مشخص (عمر طراحی شده) و تحت شرایط عملکردی طراحی شده (مانند درجه حرارت، ولتاژ، ...) بدون خرابی عملکرد داشته و یا یک سرویس به نحو مناسبی پابرجا و مهیا باشد. به عبارت دیگر، ممکن است قابلیت اطمینان به عنوان یک مقیاس و شاخص موفقیت سیستم در ارائه عملکردش به طور مناسب و طی عمر از پیش طراحی شده اش به کار رود [6].

باقیمانده عمر مفید، زمان مفید باقیمانده در یک تجهیز در یک زمان خاص از عملکرد می باشد. در واقع باقیمانده عمر مفید یک سیستم، به عنوان طول عمر از زمان کنونی تا انتهای عمر مفیدش در نظر گرفته می شود. [7]. همچنین در دنیای واقعی بسیاری از تجهیزات بجز فرسایش و زوال تدریجی، خود در معرض تنش های درونی مانند لرزش و رطوبت یا تنش های بیرونی مانند درجه حرارت محیط قرار دارند و این عوامل تاثیر مهمی در تغییر میزان کارکرد تجهیز داشته و معمولاً سبب کاهش طول عمر آنها می شوند [8].

مدلهای آزمون عمر شتابدار جهت محاسبه عملکرد قابلیت اطمینان در زمان حضور سطوح مختلف تنش کاربرد دارند. مدل های مختلفی جهت سیستمهای با یک و یا چند منبع تنش

این بخش به بررسی و توضیح رابطه بین مکانیزم فرسایش طبیعی و تنش های درونی سیستم و یا محیط و چگونگی تاثیر آنها بر خرابی کل سیستم می پردازد و در نهایت مدلی که در این زمینه طراحی شده است ارائه می دهد.

۱-۲- خرابی ناشی از زوال تجمعی و تدریجی

اولین مکانیزم خرابی که ناشی از فزونی سطح زوال از سطح از پیش تعریف شده می باشد از طریق یک متغیر قابل اندازه گیری، قابل توصیف می باشد. به این معنی که فرض می شود به محض اینکه اندازه متغیر تعیین شده از سطح از پیش تعریف شده L فراتر رود، سیستم از ارایه خدمت بازخواهدماند. حتی اگر سیستم هنوز عملکرد داشته باشد، به دلیل اینکه سطح عملکرد در حد مطلوب نمی باشد، وضعیت سیستم خراب فرض می شود زیرا کیفیت محصول خروجی، نامناسب فرض شده و ضروریست محصول تولید شده ضایعات گردد. لذا آستانه L تعریف شده، نشان دهنده حداقل سطح عملکرد سیستم می باشد که طی آن محصول خروجی نیازمندیهای کیفی را تامین نماید، همچنین می تواند به عنوان سطح فرسودگی ای در نظر گرفته شود که به لحاظ منطق اقتصادی و ایمنی نباید از آن فراتر رفت. درضمن فرض می شود خرابی خود هشدار دهنده نمی باشد و جهت تعیین اینکه سطح خرابی از سطح L فراتر رفته یا خیر، بازرسی مورد نیاز می باشد. فرض می گردد $k \in N$ (X_k) متغیر احتمالی افزایشی پیوسته می باشد که فرایند زوال و فرسایش سیستم را در طی زمان گسسته و بی نهایت $k \in N$ $(t_k = \Delta t)$ توصیف می نماید و بوسیله تابع توزیع چند مرحله ای با پارامتر α مدل می شود. لذا در این پژوهش، افزایش احتمال خرابی در واحد افزایش زمان $X_{k+1} - X_k$ از توزیع نمایی با پارامتر α و تابع توزیع احتمال $f(x) = \alpha e^{-\alpha x}$ تبعیت می نماید.

۲-۲- فرایند خرابی ناشی از تنش

فرض می شود سیستم مورد بررسی تحت تنش محیطی قرار دارد که این تنش می تواند برای سیستم خارجی محسوب گردد مانند حرارت و رطوبت و یا منتج از عملکرد سیستم بوده و تنش داخلی محسوب شود مانند لرزش داخلی، حرارت داخلی. همچنین فرض می شود $k \in N$ (Y_k) فرایند تنش ذریبط در سیستم باشد و متغیر Y_k شدت تنش در سیستم را در زمان t_k نشان می دهد. از کار افتادگی سیستم به دلیل تنش های موجود در آن می تواند با احتمال متفاوت رخ دهد. این احتمال ها، به شدت تنش های موجود در سیستم (Y_{1k}) و (Y_{2k}) بستگی دارد. جهت مدل نمودن تاثیر تنش ها روی

سیستم شامل یک تجهیز فعال می باشد و فرایند تحت تاثیر وقوع یک علت مشخص می باشد که ممکن است فرایند را به یک وضعیت خارج از کنترل سوق دهد. این زوال و خرابی تجهیز روی کیفیت محصول تاثیر می گذارد و فرض می شود که می توان تجهیز را بوسیله پایش یک مشخصه کیفی محصول پایش نمود. همچنین فرض می شود که مشخصه کیفی، بوسیله یک شاخص پیوسته قابل اندازه گیری می باشد. تا زمانیکه پارامترهای توزیع ثابت می باشند، فرض می شود که تجهیز در شرایط اولیه و پایه ای خود قرار دارد و نرخ خرابی تغییری نداشته است. آنها یک نمودار کنترل برای میانگین و جهت پایش مشخصه کیفی یا بطور معادل، پایش شرایط سیستم به کار بردند [17].

پیرو بررسی های انجام شده در این زمینه، بیشتر تحقیقات در خصوص بررسی باقی مانده عمر مفید تجهیزات در زمان حضور یک عامل تنش زا و یا کنترل یک مشخصه انجام شده است. لذا مساله اصلی این تحقیق، ارایه مدلی جهت برآورد باقیمانده عمر مفید تجهیزات با زوال تدریجی در حضور دو عامل تنش زا می باشد. درضمن تعیین معنا دار بودن عوامل تنش زا در سیستم از طریق نمودار کنترل چند متغیره انجام خواهد شد. همچنین در پی یافتن پاسخ مساله اصلی پژوهش، از محاسبات قابلیت اطمینان استفاده شده است. در این مقاله یک سیستم یک جزئی که تحت سه مکانیزم خرابی قرار دارد در نظر گرفته شده است که یکی از فرایندهای خرابی، ناشی از فزونی سطح خرابی یا زوال از آستانه تعریف شده برای زوال تدریجی بوده و دومین و سومین فرایند خرابی، ناشی از تنش یا تنش های داخلی و یا محیطی به سیستم می باشد. جهت پایش وضعیت تنش های سیستم، نمودارهای کنترلی مربوط به SPC به کار گرفته شده است. در ضمن جهت محاسبه عمر باقی مانده سیستم تحت تنش، از آزمونهای عمر شتابدار و مدلی که از این طریق طراحی شده است استفاده شده است. ساختار این مقاله به این ترتیب است: در قسمت دوم، سیستم مورد بررسی، فرایند خرابی و متغیرهای سیستم، در قسمت سوم، روش پیشنهادی جهت انجام محاسبات باقی مانده عمر مفید تجهیزات در حضور دو عامل تنش زا، در قسمت چهارم نتایج مربوط به مثال عددی و تجزیه و تحلیل رفتار سیستم و در نهایت در قسمت پنجم نتیجه گیری و جمع بندی روش پیشنهاد شده جهت انجام محاسبات باقی مانده عمر مفید ارائه شده است.

۲- معرفی سیستم تحت فرسایش طبیعی و متاثر از تنش محیطی

۵- احتمال خرابی سیستم زمانی که زوال سیستم از آستانه خرابی L کمتر بوده و هر دو تنش موجود در سیستم از آستانه خود بزرگتر باشند.

$$P(Z_k=1 | X_k=x < L \text{ و } Y_{1k} > \lambda_1 \text{ و } Y_{2k} > \lambda_2) = 1 - F_{A_1|A_2} e^{-ax - bt_k - ct_k} \quad (9)$$

جهت محاسبه زمان خرابی سیستم و همچنین عوامل شتاب دهنده خرابی در حضور یک عامل تنش زا، از مدل آرنیوس استفاده شده است. زمانی که در سیستم بیش از یک تنش وجود دارد جهت بررسی آن به مدل کامل تری نیاز است. مدل ایرینگ از طریق رابطه 10 می تواند ارتباط بین زمان خرابی و تنش های موجود در سیستم را بیان نماید [9].

$$t = aT^\alpha e^{\frac{b}{T}} \left[c + \left(\frac{d}{T} \right) \right] S_1 \quad (10)$$

در رابطه 10، t ، زمانی که طی آن قسمتی از کل سیستم خراب می شود، T دمای مطلق که می توان آن را با هر تنش یا تنش دیگر جایگزین نمود، S_1 ، سطح فاکتور تنش یا تنش دوم و α ، b ، c و d مقادیر ثابت مدل می باشند. یعنی برای دو تنش موجود در سیستم، در این مدل، پنج ضریب ثابت وجود دارد. در این مقاله جهت محاسبه عوامل شتاب دهنده خرابی از این دو مدل به این ترتیب استفاده شده است که در زمانیکه پس از بررسی نمودار کنترل مشخص گردد تنها یک تنش، خارج از کنترل می باشد، این به معنی حضور تنها یک تنش در سیستم جاری می باشد، لذا در وضعیت های سوم و چهارم از مدل قرار داریم که احتمال های خرابی سیستم از عبارتهای 7 و 8 تبعیت می نماید و در آنها می توان از طریق مدل آرنیوس، عوامل شتاب دهنده را محاسبه کرد. اما در صورتی که بررسی نمودار کنترل نشان دهد که هر دو تنش خارج از کنترل می باشند، در وضعیت پنجم مدل قرار خواهیم داشت. در این حالت احتمال خرابی سیستم از معادله 9 تبعیت می نماید و عامل شتاب دهنده ناشی از دو تنش یا $F_{A_1|A_2}$ از طریق مدل ایرینگ محاسبه شده و در سیستم لحاظ می گردد.

در واقع عوامل شتاب دهنده در هر وضعیت از مدل، یک عدد می باشند که در فرمول کلی، بصورت پارامتری بیان شده اند. لذا پس از محاسبه عوامل شتاب دهنده، جهت تعیین باقیمانده عمر مفید، در فرمول های مدل اصلی به جای پارامترهای F_{A_1} ، F_{A_2} و یا $F_{A_1|A_2}$ ، اعداد محاسبه شده جایگزین می شوند.

احتمال از کار افتادگی سیستم، آستانه های تنش λ_1 و λ_2 تعریف می شود. اگر $Y_{1k} < \lambda_1$ و $Y_{2k} < \lambda_2$ ، به این معنی است که هر دو تنش از آستانه خود کمتر بوده و لذا سیستم تحت شرایط کارکرد نرمال در نظر گرفته می شود و فرض می شود تنش ها کمترین تاثیر را بر احتمال از کار افتادگی سیستم دارند. از طرف دیگر در صورتیکه $Y_{1k} \geq \lambda_1$ یا $Y_{2k} \geq \lambda_2$ و یا $Y_{1k} \geq \lambda_1$ و $Y_{2k} \geq \lambda_2$ ، سیستم تحت تنش در نظر گرفته می شود و احتمال از کار افتادگی سیستم به دلیل وجود تنش در سیستم افزایش می یابد. ضرایب F_{A_1} ، F_{A_2} و $F_{A_1|A_2}$ به ترتیب عامل شتاب دهنده خرابی ناشی از تنش اول، دوم و عامل شتاب دهنده ناشی از حضور هر دو تنش بصورت همزمان در سیستم می باشند. به دلیل اینکه حساسیت سیستم به تنش، متناسب با زمان و میزان کارکرد متغیر می باشد، احتمال خرابی به دلیل تنش، تابعی از سطح فرسایش و زوال کنونی X_k و زمان t_k می باشد. (Z_k) شاخص وضعیت سیستم می باشد. اگر $Z_k = 0$ باشد، سیستم در حالت خوب و $Z_k = 1$ به معنی خراب بودن سیستم می باشد. فهرست علائم استفاده شده در محاسبات این پژوهش در جدول 1 ارائه شده است.

متناسب با موارد بیان شده در بخشهای 2-1 و 2-2، مدلی طراحی شده که شامل پنج قسمت می باشد و طی عبارتهای 5 الی 9 ارایه شده است.

۱- احتمال خرابی سیستم به دلیل فزونی زوال سیستم از آستانه خرابی L

$$P(Z_k=1 | X_k=x \geq L) = 1 \quad (5)$$

۲- احتمال خرابی سیستم زمانی که زوال سیستم از آستانه خرابی L کمتر بوده و هر دو تنش موجود در سیستم از آستانه خود کوچکتر باشند.

$$P(Z_k=1 | X_k=x < L \text{ و } Y_{1k} < \lambda_1 \text{ و } Y_{2k} < \lambda_2) = 1 - e^{-ax - bt_k - ct_k} \quad (6)$$

۳- احتمال خرابی سیستم زمانی که زوال سیستم از آستانه خرابی L کمتر بوده و تنش اول در سیستم از آستانه خود بزرگتر و تنش دوم از آستانه خود کوچکتر باشند.

$$P(Z_k=1 | X_k=x < L \text{ و } Y_{1k} > \lambda_1 \text{ و } Y_{2k} < \lambda_2) = 1 - F_{A_1} e^{-ax - bt_k - ct_k} \quad (7)$$

۴- احتمال خرابی سیستم زمانی که زوال سیستم از آستانه خرابی L کمتر بوده و تنش اول در سیستم از آستانه خود کوچکتر و تنش دوم از آستانه خود بزرگتر باشند.

$$P(Z_k=1 | X_k=x < L \text{ و } Y_{1k} < \lambda_1 \text{ و } Y_{2k} > \lambda_2) = 1 - F_{A_2} e^{-ax - bt_k - ct_k} \quad (8)$$

جدول ۱: فهرست علائم و اختصارات

(X_k)	$k \in \mathbb{N}$	فرایند زمان گسسته که بیان کننده سطح زوال در زمان t_k می باشد	$F_{A_1 A_2}$	فاکتور تسهیل خرابی ناشی از حضور تنش اول و دوم بصورت همزمان
(Y_{1k})	$k \in \mathbb{N}$	فرایند زمان گسسته که بیان کننده تنش اول سیستم در زمان t_k می باشد	b	حساسیت به تنش اول
(Y_{2k})	$k \in \mathbb{N}$	فرایند زمان گسسته که بیان کننده تنش دوم سیستم در زمان t_k می باشد	C	حساسیت به تنش دوم
(Z_k)	$k \in \mathbb{N}$	فرایند زمان گسسته که بیان کننده وضعیت سیستم در زمان t_k می باشد	τ	دوره بازرسی x
Δt		طول واحد زمان	L	آستانه زوال جمعی
t_k		زمان گسسته	λ_1	آستانه تنش ۱
α		پارامتر مقیاس	λ_2	آستانه تنش ۲
F_{A1}		فاکتور تسهیل خرابی ناشی از تنش اول	$f_{\lambda_1}^{(k)}$	تابع توزیع احتمال افزایش زوال بعد از k دوره زمانی خراب نشدن سیستم
F_{A2}		فاکتور تسهیل خرابی ناشی از تنش دوم		

۳-۲- تابع قابلیت اطمینان

اگر $f_{\lambda}^{(k)}$ تابع توزیع احتمال افزایش زوال بعد از k دوره زمانی باشد که طی آن سیستم تحت زوال تدریجی و تنش خراب نشده باشد، جهت محاسبه $R(t_k)$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 R(t_k) &= \int_0^L f_{\lambda}^{(k)}(x) e^{-\alpha x} dx \\
 &= \left((1-p_1)F_{A_1} + p_1 \right)^k \int_0^L \frac{\alpha^k}{\alpha^{k-1}(k-1)!} e^{-(\alpha+a)x} \\
 &\quad \times (1 - e^{-ax})^{k-1} \prod_{j=1}^k e^{-b_j} dx \\
 &\quad + \left((1-p_2)F_{A_2} + p_2 \right)^k \int_0^L \frac{\alpha^k}{\alpha^{k-1}(k-1)!} e^{-(\alpha+a)x} \\
 &\quad \times (1 - e^{-ax})^{k-1} \prod_{m=1}^k e^{-c_m} dx + \left((1-p_3)F_{A_1|A_2} \right. \\
 &\quad \left. + p_3 \right)^k \int_0^L \frac{\alpha^k}{\alpha^{k-1}(k-1)!} e^{-(\alpha+a)x} \\
 &\quad \times (1 - e^{-ax})^{k-1} \prod_{j=1}^k \prod_{m=1}^k e^{-b_j - c_m} dx
 \end{aligned} \quad (11)$$

در عبارت (۱۱)، p_1 احتمال بالاتر بودن میزان تنش اول از آستانه خود یعنی $p_1 = P(Y_1 > \lambda_1)$ می باشد. همچنین مفهوم p_2 و p_3 به ترتیب $p_2 = P(Y_2 > \lambda_2)$ و $p_3 = P(Y_1 > \lambda_1 \text{ و } Y_2 > \lambda_2)$ می باشد.

۳- روش پیشنهادی برآورد باقی مانده عمر مفید

تجهیزات در حضور دو عامل تنش

در این بخش روشی جهت انجام محاسبات باقی مانده عمر تجهیزات در حضور دو عامل تنش را پیشنهاد شده است.

۳-۱- محاسبه باقی مانده عمر مفید تجهیز

سیستم در حال کار بصورت پیوسته و با دوره زمانی τ مورد بازرسی قرار می گیرد. در هر بار نمونه برداری، در صورت کارکرد سیستم، اطلاعات مربوط به میزان تنش های موجود در سیستم نیز استخراج شده و از آنها جهت طراحی نمودار کنترل چند متغیره هاتلینگ^۳ استفاده می شود و در صورت عدم کارکرد سیستم و توقف آن، باقی مانده عمر مفید تجهیز صفر بوده و در واقع وضعیت سیستم، حالت اول مدل اصلی می باشد. در صورت کارکرد سیستم، پس از نمونه برداری از میزان تنش های موجود در سیستم، اطلاعات در نمودار کنترل ترسیم شده و وضعیت سیستم از نظر کنترل و یا خارج از کنترل بودن تنش های وارد به آن تعیین می شود.

در صورتیکه نمودار کنترل حالت تحت کنترل بودن تنش ها را نشان دهد، در وضعیت دوم از مدل اصلی قرارداریم و در واقع هر دو تنش در سیستم وجود دارند ولیکن شدت آنها در حدی پایین است که تاثیر معنا دار بر خرابی تجهیز نخواهد داشت. در صورت خارج از کنترل بودن وضعیت تنش های موجود در سیستم، ابتدا در تجزیه و تحلیل نمودار کنترل، وضعیت سیستم از نظر فعال بودن تنشها مشخص می شود، متناسب با این که تنش اول، تنش دوم و یا هر دو تنش در سیستم فعال باشد، جهت محاسبه باقی مانده عمر مفید تجهیز، به ترتیب به حالت های سوم، چهارم و یا پنجم مدل اصلی مراجعه می شود. سپس متناسب با میزان تنش های اول و دوم، فاکتورهای شتاب دهنده محاسبه شده و نهایتاً باقی مانده عمر مفید تخمین زده می شود.

۲-۳- استفاده از نمودار کنترل جهت تعیین وضعیت تنش های موجود در سیستم

با توجه به این امر که تغییرات تنش های وارد به سیستم درجه حرارت و میزان املاح موجود در آب که به عنوان دو تنش در نظر گرفته شده است، خارج از کنترل سیستم تحت بررسی می باشد لذا تابع چگالی احتمالی تنش های موجود در سیستم نرمال فرض می گردد. این امر در واقع پیش نیاز استفاده از نمودارهای کنترل می باشد. در نمودارهای کنترل چند متغیره، نمودار $HotelingT^2$ در صورت خارج از کنترل بودن شدت تنش ها، در بررسی نمودار بوسیله نرم افزار مینی تب، طی گزارشی قابل تشخیص است که کدام متغیر خارج از کنترل می باشد، لذا از این نمودار در فصل چهارم استفاده شده است.

۴- مثال عددی

به منظور روشن شدن نحوه استفاده از مدل طراحی شده جهت تعیین باقی مانده عمر مفید سیستمهای با زوال تدریجی، فیلتر تصفیه آبی که به صورت پیوسته در حال کار است در نظر گرفته شده است. این تجهیز بسیار حساس بوده و علاوه بر اینکه همواره تحت فرسایش تدریجی در شرایط کار کرد طبیعی می باشد، در صورتیکه درجه حرارت آب ورودی یا میزان املاح موجود در آن از حدی بالاتر برود، سبب بالا رفتن نرخ خرابی و در نتیجه سرعت بخشیدن به خرابی آن می شود. بنابراین تنش اول موجود در سیستم، درجه حرارت برحسب درجه سانتیگراد است که البته در محاسبات، به درجه حرارت مطلق (برحسب کلونین) تبدیل شده و در این مقیاس از آن استفاده می شود و تنش دوم، درصد املاح موجود در آب می باشد. لذا شرایط مورد اشاره در بخش ۲، یعنی سیستمی که تحت سه مکانیزم خرابی قرار دارد و اولین فرایند خرابی، منتج از فزونی سطح خرابی یا زوال از آستانه تعریف شده برای زوال تدریجی و دومین و سومین فرایند خرابی، ناشی از تنش یا تنش های داخلی و یا محیطی به سیستم می باشد در خصوص این تجهیز صادق است. آستانه درجه حرارت، مطابق مشخصات فنی دستگاه، ۲۵ درجه سانتیگراد می باشد. به این ترتیب، $\lambda_1 = 25$ است. یعنی در صورتیکه درجه حرارت آب ورودی از این حد کمتر باشد، سیستم تحت تنش فرض نمی شود. همچنین در خصوص تنش درصد املاح موجود در آب، آستانه ۵٪ در نظر گرفته شده است یعنی $\lambda_2 = 5\%$. مطابق مشخصات فنی دستگاه و همچنین تجربیات قبلی، در صورت عدم حضور تنش در سیستم، این فیلتر هر ۲ سال یکبار یعنی هر ۱۷۲۸۰ ساعت از کار افتاده و تعویض خواهد شد. لذا سیستم را تحت حالت های مختلف تنش که فراوانی بیشتری دارد قرار داده و اطلاعات

میزان خرابی آن استخراج و در نهایت از طریق ورود داده های خرابی در نرم افزار Minitab، مقادیر ثابت مربوط به مدل های آرنیوس و ایرینگ محاسبه شده و پس از آن، عوامل شتاب دهنده خرابی محاسبه می گردد و در نهایت، مدل بیان شده نهایی و قابل به کارگیری می شود.

۱-۴- تابع توزیع احتمال خرابی داده ها

اولین گام در شروع انجام تجزیه و تحلیل داده ها، تعیین تابع چگالی احتمالی طول عمر داده های موجود می باشد زیرا باقی محاسبات متناسب با نوع تابع توزیع احتمال خرابی انجام خواهد شد. با توجه به اینکه این مقاله در خصوص تجهیزات با خرابی تدریجی ای می باشد که خرابی آنها از تابع توزیع خرابی نمایی تبعیت می نماید، ابتدا بررسی می گردد که داده های مربوط به زمان تا خرابی تجهیز در همه حالتها، شرایط و تنش های مختلف، از این تابع توزیع تبعیت نماید. جهت انجام این امر با استفاده از نرم افزار Minitab، تست نکویی برازش برای داده ها استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. در این مثال عددی، سه نوع نمونه گیری انجام شده و موجود می باشد که ضروریست در خصوص هر کدام از آنها، بررسی و تابع توزیع احتمال خرابی تعیین گردد. ۱- داده های زمان تا خرابی که مربوط به حضور فقط تنش اول یعنی دمای بالا در سیستم می باشد که در جدول شماره ۲ ارائه شده است، ۲- داده های مربوط به خرابی سیستم زمانی که فقط تنش دوم یعنی درصد بالای ناخالصی آب در سیستم حضور دارد. داده های تحت این شرایط نیز در جدول ۲ ارائه شده است. و ۳- داده های زمان تا خرابی سیستم برای زمانی که هر دو تنش در سیستم حاضر هستند. این داده ها در جدول های ۳ و ۴ نمایش داده شده اند.

۲-۴- محاسبه عامل شتاب دهنده در حالت های سوم و چهارم مدل

در حالت سوم و چهارم مدل، تنها یک تنش در سیستم معنا دار می باشد. لذا طول عمر سیستم در زمان حضور تنش های مختلف، از رابطه $t = ke^C/T$ محاسبه می شود. در این رابطه، C و k، مقادیر ثابتی هستند که ضروریست از طریق انجام رگرسیون در داده های زمان تا خرابی سیستم (داده های جدول ۲) برآورد گردد. از این رو ابتدا این رابطه از طریق لگاریتم طبیعی به حالت خطی تبدیل می شود یعنی $\ln(t) = \ln(k) + \frac{C}{T}$. سپس با استفاده از رابطه خطی شده و با ورود داده های ذریبط در نرم افزار Minitab و استفاده از این نرم افزار، مقادیر C و k محاسبه می شود.

جدول ۲: داده های زمان تا خرابی مربوط به حضور تنش اول و تنش دوم در سیستم

داده های زمان تا خرابی وضعیت ۳ مدل (حضور تنش اول)			داده های زمان تا خرابی وضعیت ۴ مدل (حضور تنش دوم)		
$Y_{1k} = 30$	$Y_{1k} = 45$	$Y_{1k} = 60$	$Y_{2k} = 7\%$	$Y_{2k} = 11\%$	$Y_{2k} = 21\%$
2877.5	2069.8	7156.7	1358.1	6908.6	3322.4
9410.4	1766.1	2876.0	1935.1	10527.7	1666.7
6935.1	1606.8	2187.2	16658.7	3185.5	297.9
8323.3	2827.0	1391.3	15272.1	4287.8	602.7
9390.7	26930.9	13092.5	1883.3	1726.5	1186.4
10594.7	16589.2	275.1	17308.4	12762.2	1374.6
20234.3	11419.0	1853.1	3751.9	5972.8	4141.2
3055.8	5218.8	6757.7	21829.6	346.7	3171.8
11826.1	19290.8	14661.3	2512.8	12845.0	953.9
10160.3	11293.0	5119.5	20496.8	1212.2	5916.9
43333.1	23897.0	1626.6	11434.9	15202.6	2189.6
14458.2	5305.2	864.1	15144.8	28340.5	2698.4
2954.3	6149.8	4546.4	16141.9	3607.1	1478.3
11456.3	17289.5	3885.8	19230.7	11288.9	131.9
909.5	1334.5	574.1	5225.2	1023.1	9360.1
9985.4	7338.8	5610.7	10954.8	17664.6	2266.0
26054.0	437.0	54.7	8151.5	2536.7	975.2
26656.1	2247.4	4400.3	38337.9	4753.1	3449.6
4480.0	9728.8	978.2	14874.5	24582.5	917.4
39078.0	6497.7	14151.0	498.1	18969.2	3340.5
978.6	15712.2	7408.8	44347.1	2462.5	832.3
10138.2	1368.4	9462.5	2580.7	3102.3	3408.7
16121.0	2432.7	8405.4	7531.2	7469.0	8162.4
18052.6	293.8	1838.9	18650.6	1394.4	368.5
31344.8	1122.0	331.6	9599.6	7524.4	531.8
61654.4	6056.3	1039.3	5854.7	1662.8	299.8
25670.5	16362.7	846.9	39807.9	4132.2	3049.2
22351.1	4134.0	4482.1	20563.2	15540.3	1269.8
5474.6	20855.3	1716.2	6885.2	2773.9	231.3
553.1	15448.0	1637.4	24773.8	3688.1	5682.5
1686.7	5637.7	11137.3	3544.1	15483.9	3341.2
1774.8	3662.0	1365.6	11138.9	1384.7	7877.7
3965.9	6577.1	1973.0	10612.7	5267.3	3139.0
6280.5	864.0	4014.6	1478.5	10251.7	440.4
12888.2	7900.3	2208.2	7350.4	8690.4	5933.4
5065.1	389.3	10440.6	10520.2	4116.4	1064.2
26530.7	9329.0	1295.2	25418.8	5317.9	10951.8
1760.8	7114.9	5397.7	4934.4	92.8	40.8
7475.4	4984.8	3550.5	182.7	134.4	2413.1
166.4	11747.1	3669.0	611.2	3471.1	2635.5

d=-17263.8

می باشد.

همچنین با استناد به خروجی گزارش نرم افزار مشاهده می شود اندازه P-value برای داده های زمان تا خرابی حالت پنجم مدل عدد ۰,۲۳۶ بدست آمده است که قابل قبول می باشد. علاوه بر این اندازه شاخص F عدد ۱,۳۹ بوده که قابل پذیرش است. لذا اعداد بدست آمده در خصوص مقادیر ثابت مربوط به مدل ایرینگ موجه و قابل استناد است.

بنابراین رابطه طول عمر سیستم برحسب تنش های درجه حرارت (T) و درصد املاح موجود در آب (S) با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه می گردد:

$$t = aT^{\alpha} e^{b/T} [c + (\frac{d}{T})^S] = e^{91.1} T^{-14.4} e^{153.1/T} [45.4 + (\frac{-17263.8}{T})^S]$$

۳-۴- محاسبه عامل شتاب دهنده در حالت پنجم

در حالت پنجم مدل، فرض بر آن است که اثر هر دو عامل در شتاب یافتن فرآیند زوال معنا دار باشد. در این حالت به منظور برآورد ضریب شتاب دهنده، از عبارت ۱۰ پس از عملیات خطی سازی به کمک لگاریتم طبیعی به کمک رگرسیون استفاده خواهد شد. گزارش نتایج محاسبات انجام شده بوسیله نرم افزار در شکل شماره ۱ ارائه شده است. همانطور که در گزارش محاسبات نرم افزار مشاهده می شود، اعداد بدست آمده برای ضرایب ثابت مدل

$$Lna=91.1 \rightarrow a=e^{91.1}$$

$$\alpha=-14.4$$

$$b=153.1$$

$$c=45.4$$

$$t_{\text{median}} = \frac{\text{Ln}2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (15)$$

و در تابع توزیع نمایی $Mean = \frac{1}{\lambda}$ ، بنابراین از طریق میانگین داده های زمان تا خرابی در درجه حرارت های مختلف و میزان های متفاوت املاح موجود در آب، $\frac{1}{\lambda}$ محاسبه می شود.

لذا در زمانی که درجه حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد و درصد املاح موجود در آب ۰.۵٪ است که وضعیت عملیاتی یا وضعیت نرمال می باشد، مرکزیت یا میانه طول عمر برابر است با:

$$t_{(25, 5\%)} = e^{91.1} * 293^{-14.4} * e^{153.1/293} * e^{[45.4 + (\frac{-17263.8}{293})] * 0.05} = 9420.083 \text{ ساعت}$$

در توزیع نمایی، رابطه مرکزیت با پارامتر توزیع برابر است با:

جدول ۳: داده های زمان تا خرابی مربوط به حضور هردو تنش بصورت همزمان در سیستم (دمای ۳۰ و ۴۵ درجه)

داده های زمان تا خرابی وضعیت ۵ مدل (حضور هر دو تنش)

Y _{1k} =30 Y _{2k} =7%		Y _{1k} =30 Y _{2k} =11%		Y _{1k} =30 Y _{2k} =21%		Y _{1k} =45 Y _{2k} =7%		Y _{1k} =45 Y _{2k} =11%		Y _{1k} =45 Y _{2k} =21%	
22952.5	12104.4	6576.4	5497.9	902.18	275.59	279.2	1731.9	13246.2	5689.6	128.07	1212.91
545.3	13375.8	34509.5	8720.6	2150.41	6440.10	5550.8	235.6	2269.0	1356.6	609.17	2336.34
5283.1	117.3	7844.5	24606.6	5064.89	788.00	3013.1	5727.5	8323.2	10088.6	422.18	2463.07
1555.5	3451.6	9182.5	8179.8	359.38	813.91	852.8	2244.6	2507.4	3744.2	884.79	2209.48
9635.1	3910.8	7777.4	1384.2	3125.85	540.73	4543.7	1422.5	14020.2	21570.2	2823.24	509.02
8343.7	54195.4	2091.5	10789.1	112.27	3558.07	10467.9	1262.9	1303.1	1969.9	79.25	5092.00
12281.8	229.0	435.7	9733.0	1987.32	3818.97	41825.4	16244.3	2920.5	12165.2	6023.25	20.08
9239.0	8638.3	390.9	2178.3	1663.53	6211.23	6717.4	13414.2	7709.0	19096.0	2700.27	472.71
20192.3	10363.1	440.5	13261.7	1178.34	30.96	787.0	15686.2	389.9	108.5	998.94	444.29
35653.0	2177.3	17602.1	6832.1	188.92	3743.37	2011.3	9158.5	6563.6	7614.1	4334.57	3355.83
1038.7	48423.9	5523.1	2076.9	3670.37	4027.65	5183.0	7791.7	4200.7	2230.7	1480.86	701.62
6832.6	13967.6	1149.3	5144.3	2017.67	2762.20	6197.1	953.7	2075.3	1000.7	1000.16	185.34
4991.6	8077.7	1796.5	10447.8	5191.66	648.13	2137.4	7918.5	6506.4	2031.7	4226.10	2620.39
7654.1	10562.6	1629.9	4256.6	7836.83	2120.09	2808.7	8748.8	866.2	12419.8	421.09	1220.20
2392.4	2935.5	1051.6	2229.0	219.34	1217.42	2326.4	17090.9	533.5	7896.4	949.09	2548.51
2507.0	1280.9	4519.7	5512.4	345.30	1191.25	7996.5	1286.2	2551.7	7447.6	2338.24	4880.16
2396.2	17178.2	2336.3	1803.4	1206.22	643.10	2392.3	14.6	2868.1	5394.2	3507.89	1982.01
20891.2	2822.7	380.7	3881.1	1198.00	1013.84	3611.6	2492.3	5796.4	1509.6	2419.42	1443.15
16040.1	16041.9	2615.7	744.6	6736.55	8481.42	768.9	5393.2	7599.2	4164.0	1203.89	568.21
6807.7	3778.1	22136.6	1104.7	2350.51	660.17	4544.6	11810.7	3001.8	10350.4	1526.71	1592.77
18528.4	9992.5	5514.3	1685.8	662.91	8348.50	11125.3	12862.8	242.4	904.8	4128.51	40.69
7024.6	421.4	7582.1	1404.6	1198.09	1071.92	10048.6	25552.5	1465.6	19181.7	1298.44	1784.21
22796.3	2854.4	528.8	5815.1	3872.71	607.99	468.8	2727.1	4040.5	1379.5	1246.37	5140.85
25208.4	6910.2	11900.7	2977.8	1424.16	937.54	10816.0	9509.6	2171.1	929.8	4112.13	2275.13
8163.3	11513.3	1679.2	9547.8	110.91	3076.99	4301.3	386.2	32.9	4814.9	316.89	288.87
3581.4	2668.6	3542.2	3836.8	1949.94	2625.62	5332.2	13469.9	9851.2	10708.5	53.44	598.71
21276.7	6835.5	637.2	6428.6	766.11	1885.48	24276.4	1788.6	2009.2	514.5	173.92	762.47
10392.6	4587.9	8691.7	3303.3	69.97	2678.19	3019.5	2825.0	571.4	2826.2	2701.67	7093.32
860.5	8905.0	117.9	1137.6	2989.92	113.06	7702.6	14260.7	5088.1	5836.6	6455.96	4639.37
23432.5	27959.9	15792.6	6293.8	1819.55	1435.56	10747.8	219.2	1268.4	1501.5	1056.88	568.47
7282.4	9899.9	10877.8	6993.3	2672.81	838.36	3998.5	694.2	6131.8	5280.6	1260.26	916.43
19935.0	13622.8	9519.1	2660.2	5314.46	528.77	5591.4	271.4	5577.6	6234.9	1384.30	2902.80
1474.7	8712.6	2911.3	2507.2	2732.48	930.68	3440.8	1353.0	13182.0	409.9	163.93	2190.57
14047.2	46351.0	3018.1	166.2	2718.92	311.42	8128.8	2418.3	7709.8	3472.6	501.29	3534.24
5985.8	3130.6	5670.3	4161.4	1406.72	90.05	4342.2	21543.6	5315.8	4190.0	938.42	706.34

جدول ۴: داده های زمان تا خرابی مربوط به حضور هردو تنش بصورت همزمان در سیستم (دمای ۶۰ درجه)

داده های زمان تا خرابی وضعیت ۵ مدل					
$Y_{1k} = 60$ $Y_{2k} = 7\%$		$Y_{1k} = 60$ $Y_{2k} = 11\%$		$Y_{1k} = 60$ $Y_{2k} = 21\%$	
3119.6	123.9	2991.1	808.2	6948.05	885.34
2294.8	290.0	16038.0	309.2	6678.38	654.99
1878.9	3696.4	469.3	3028.5	350.03	296.12
10284.6	8522.0	1472.2	1491.7	1591.94	5725.52
723.9	12600.9	1343.8	5777.6	970.95	1024.11
10885.4	672.0	3758.3	4365.2	1235.65	2535.21
4350.6	652.1	1463.5	5414.0	673.32	1314.32
1208.8	4230.1	45.5	405.2	825.46	816.33
3227.5	11832.6	631.8	306.8	21.93	966.67
1973.9	1477.3	418.5	431.2	262.88	436.15
5261.7	416.2	813.3	1907.7	4172.49	135.91
341.7	8635.1	669.2	3678.5	2169.45	2018.57
3009.0	2963.5	1180.0	3260.0	2219.71	1353.68
3792.3	1639.3	4583.8	2288.3	233.24	2203.89
7383.2	4602.3	2609.3	3690.8	56.01	139.40
18199.2	2662.3	95.4	2782.6	2215.06	270.08
4847.5	3018.8	2371.7	2030.7	2616.53	707.07
4135.7	938.7	1393.9	2461.3	4681.91	3309.15
4109.2	5899.5	1731.1	1646.8	984.33	737.03
2351.7	977.2	1413.8	1231.6	3170.31	434.59
7877.4	6028.5	1499.2	554.0	2045.77	1935.54
1507.9	4887.4	1188.7	3006.9	3312.94	663.74
194.6	5049.9	5415.1	1325.4	2403.63	929.73
233.5	1010.1	3129.6	2805.9	1750.89	3450.75
3414.5	1223.6	1637.5	190.3	2626.93	243.00
16689.1	8432.0	534.4	7028.6	125.62	772.46
2994.1	3710.5	3597.0	3452.7	552.92	1046.92
1124.4	363.6	3261.8	1838.2	29.28	220.31
6126.0	2210.8	673.4	5929.6	491.18	1412.59
2308.2	4051.6	3895.4	167.5	2918.92	2351.27
7273.2	2735.2	6483.8	243.3	3806.95	122.16
1544.2	2220.0	94.4	281.7	630.00	2365.86
9757.1	471.6	1962.7	4131.4	945.29	1525.00
37.8	702.1	2263.1	8676.1	2033.26	468.00
1852.3	5172.8	7983.5	14161.1	1272.61	701.58

جدول ۵: نتایج تست نکویی برازش در خصوص داده های زمان تا خرابی در قالب شاخص های AD و P-Value

ترتیب وضعیت سیستم	وضعیت تنش ها (دما برحسب درجه سانتیگراد و املاح آب برحسب درصد)	میانگین زمان خرابی سیستم برحسب ساعت	شاخص های تست نکویی برازش	
			AD	P-Value
۳	$Y_{1k}=30$	۱۳۳۰۳	۰,۱۳۴	۰,۹۹۴
	$Y_{1k}=45$	۸۰۳۱	۰,۲۴۳	۰,۸۹۸
	$Y_{1k}=60$	۴۳۵۷	۰,۲۳۶	۰,۹۰۸
۴	$Y_{2k}=7\%$	۱۲۴۸۵	۰,۳۰۶	۰,۸۰۹
	$Y_{2k}=11\%$	۷۲۹۳	۰,۲۰۱	۰,۹۵۳
	$Y_{2k}=21\%$	۲۷۷۸	۰,۲۱۶	۰,۹۳۵
۵	$Y_{1k}=30$	۱۱۲۱۷	۰,۲۴۵	۰,۸۹۹
	$Y_{2k}=7\%$			
	$Y_{1k}=30$	۵۷۹۰	۰,۱۹۷	۰,۹۵۸
	$Y_{2k}=11\%$			
	$Y_{1k}=30$	۲۱۶۷	۰,۱۷۲	۰,۹۸۷
	$Y_{2k}=21\%$			
	$Y_{1k}=45$	۶۶۸۴	۰,۲۱۲	۰,۹۴۲
	$Y_{2k}=7\%$			
	$Y_{1k}=45$	۵۲۲۸	۰,۲۰۶	۰,۹۴۹
	$Y_{2k}=11\%$			
	$Y_{1k}=45$	۱۹۰۲	۰,۲۱۹	۰,۹۳۳
	$Y_{2k}=21\%$			
$Y_{1k}=60$	۴۰۰۶	۰,۱۲۷	۰,۹۹۵	
$Y_{2k}=7\%$				
$Y_{1k}=60$	۲۷۱۷	۰,۲۳۴	۰,۹۱۳	
$Y_{2k}=11\%$				
$Y_{1k}=60$	۱۵۸۹	۰,۱۹۳	۰,۹۶۲	
$Y_{2k}=21\%$				

Equation

$$\ln t_0 = 91.1193 - 14.3751 * \ln T + 153.103 * '1/T' + (45.397 - 17263.8 * '1/T') * S$$

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	SE Estimate
Lna	91.1	48.55
g	-14.4	7.22
b	153.1	2387.34
c	45.4	20.73
d	-17263.8	6609.27

$$\ln t_0 = Lna + g * \ln T + b * '1/T' + (c + d * '1/T') * S$$

Lack of Fit

Source	DF	SS	MS	F	P
Error	625	927.523	1.48404		
Lack of Fit	4	8.229	2.05737	1.39	0.236
Pure Error	621	919.294	1.48034		

Summary

Iterations	2
Final SSE	927.523
DFE	625
MSE	1.48404
S	1.21821

شکل ۱: نتایج برآورد پارامترهای مدل آیرینگ در حالت پنجم

$$t_{med(30,11\%)} = 5790 * 0.693 = 4012.47$$

لذا خواهیم داشت:

$$t_{med(30,7\%)} = 11217 * 0.693 = 7773.381$$

جدول ۶: عوامل شتاب دهنده در شرایط مختلف تنش در سیستم

شماره	وضعیت تنش ها	میانگین زمان خرابی (ساعت)	مقدار ضریب شتاب دهنده
۳	$Y_{1k}=30$	۱۳۳۰۳	۱,۰۲
	$Y_{1k}=45$	۸۰۳۱	۱,۷۰
	$Y_{1k}=60$	۴۳۵۷	۳,۱۴
۴	$Y_{2k}=7\%$	۱۲۴۸۵	۱,۹۱
	$Y_{2k}=11\%$	۷۲۹۳	۳,۲۸
	$Y_{2k}=21\%$	۲۷۷۸	۸,۶۱
۵	$Y_{1k}=30$	۱۱۲۱۷	۱,۲۱
	$Y_{2k}=7\%$		
	$Y_{1k}=30$	۵۷۹۰	۲,۳۴۷
	$Y_{2k}=11\%$		
	$Y_{1k}=30$	۲۱۶۷	۶,۲۷
	$Y_{2k}=21\%$		
	$Y_{1k}=45$	۶۶۸۴	۲,۰۳۳
	$Y_{2k}=7\%$		
	$Y_{1k}=45$	۵۲۲۸	۲,۶۰۰
	$Y_{2k}=11\%$		
	$Y_{1k}=45$	۱۹۰۲	۷,۱۴
	$Y_{2k}=21\%$		
	$Y_{1k}=60$	۴۰۰۶	۳,۳۹۳
	$Y_{2k}=7\%$		
	$Y_{1k}=60$	۲۷۱۷	۵,۰۰۳
	$Y_{2k}=11\%$		
	$Y_{1k}=60$	۱۵۸۹	۸,۵۵۴
	$Y_{2k}=21\%$		

می‌شود. از طریق بررسی وضعیت نگاشت شده در نمودار کنترل چند متغیره T^2 مشخص می‌گردد آیا تنش‌ها تحت کنترل هستند یا خیر و همچنین در صورت خارج از کنترل بودن نمودار کنترل، با بررسی گزارش ارایه شده بوسیله نرم‌افزار، مشخص می‌شود که کدام تنش‌ها خارج از کنترل می‌باشند و سپس تعیین می‌شود از کدام قسمت از مدل جهت تخمین باقی مانده عمر مفید استفاده شود. جهت روشن شدن نحوه استفاده از این نمودار کنترل در محاسبات، از وضعیت تجهیز مورد بررسی در این فصل، طی زمانهای مختلف بازرسی صورت پذیرفته و پس از ۱۰۰ بار نمونه برداری، داده‌های زیربط در جدول شماره ۷ ثبت شده است. در صورتیکه با این داده‌ها نمودار کنترل پایه را طراحی نماییم نتیجه نمودار کنترل شکل ۲ خواهد بود. همانطور که از نتایج میزان شدت تنش‌ها بر می‌آید هم اکنون سیستم در حالت دوم مدل قرار دارد یعنی نمودار تحت کنترل می‌باشد و تنش‌ها از آستانه حداکثری خود کمتر هستند و تغییر معناداری در خرابی سیستم ایجاد نمی‌گردد.

$$t_{med(30,21\%)} = 2167 * 0.693 = 1501.731$$

$$t_{med(45,7\%)} = 6684 * 0.693 = 4632.012$$

$$t_{med(45,11\%)} = 5228 * 0.693 = 3623.004$$

$$t_{med(45,21\%)} = 1902 * 0.693 = 1318.086$$

$$t_{med(60,7\%)} = 4006 * 0.693 = 2776.158$$

$$t_{med(60,11\%)} = 2717 * 0.693 = 1882.881$$

$$t_{med(60,21\%)} = 1589 * 0.693 = 1101.177$$

لذا جهت محاسبه AF خواهیم داشت:

$$AF_{(30,7\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(30,7\%)}} = \frac{9420.083}{7773.381} = 1.21$$

$$AF_{(30,11\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(30,11\%)}} = \frac{9420.083}{4012.47} = 2.347$$

$$AF_{(30,21\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(30,21\%)}} = \frac{9420.083}{1501.731} = 6.27$$

$$AF_{(45,7\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(45,7\%)}} = \frac{9420.083}{4632.012} = 2.033$$

$$AF_{(45,11\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(45,11\%)}} = \frac{9420.083}{3623.004} = 2.600$$

$$AF_{(45,21\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(45,21\%)}} = \frac{9420.083}{1318.086} = 7.14$$

$$AF_{(60,7\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(60,7\%)}} = \frac{9420.083}{2776.158} = 3.393$$

$$AF_{(60,11\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(60,11\%)}} = \frac{9420.083}{1882.881} = 5.003$$

$$AF_{(60,21\%)} = \frac{t_{med(25,5\%)}}{t_{med(60,21\%)}} = \frac{9420.083}{1101.177} = 8.554$$

تمامی عوامل شتاب دهنده که در وضعیت‌های مختلف سیستم محاسبه شده است جمع بندی شده و در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

۴-۴- پایش وضعیت تنش‌های محیطی

همانطور که در فصل سوم بیان شد، جهت محاسبه باقیمانده عمر مفید تجهیز، ابتدا از وضعیت کنونی سیستم بازرسی به عمل می‌آید. سپس در صورتیکه مشخص شود سیستم هنوز در حال کار می‌باشد، از شدت تنش‌های موجود در سیستم نمونه برداری انجام شده و در نمودار کنترل طراحی شده نگاشت

جدول شماره ۷: نتایج ۱۰۰ بار نمونه برداری از وضعیت تنش سیستم در حال کار

شماره نمونه	درجه حرارت				درصد املاح			
	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
۱	۲۲,۶۷	۲۸,۳۴	۲۷,۹۴	۲۲,۸۵	۴,۰۴	۷,۲۷	۵,۸۴	۴,۲۱
۲	۲۶,۰۳	۲۱,۶۲	۲۷,۲۹	۲۰,۹۳	۲,۹۲	۶,۰۴	۵,۸۰	۵,۹۸
۳	۲۲,۷۶	۲۷,۵۵	۲۷,۵۲	۲۴,۵۰	۴,۸۴	۳,۶۰	۲,۰۵	۴,۷۷
۴	۲۶,۵۰	۳۱,۸۲	۱۹,۵۲	۲۹,۵۰	۷,۵۷	۸,۳۰	۴,۲۵	۴,۵۸
۵	۱۹,۳۱	۲۵,۴۷	۲۵,۷۵	۲۲,۵۰	۴,۲۳	۴,۴۶	۷,۸۷	۴,۵۰
۶	۲۳,۸۶	۲۵,۸۳	۲۷,۹۴	۲۶,۱۰	۲,۸۱	۵,۰۸	۵,۸۷	۵,۹۷
۷	۲۳,۰۶	۲۳,۴۸	۲۳,۲۴	۲۸,۰۰	۷,۰۴	۵,۱۳	۸,۱۴	۴,۸۶
۸	۲۸,۰۱	۲۵,۹۰	۲۴,۹۵	۲۷,۱۰	۳,۹۵	۶,۱۷	۳,۲۵	۴,۹۱
۹	۲۶,۵۷	۲۴,۵۲	۲۳,۵۷	۲۶,۲۶	۵,۱۷	۴,۸۴	۲,۰۱	۲,۸۴
۱۰	۲۵,۹۱	۲۵,۱۳	۲۵,۱۲	۲۲,۶۰	۷,۶۳	۲,۱۶	۷,۴۴	۴,۷۱
۱۱	۲۵,۸۶	۲۶,۴۸	۲۵,۷۰	۲۷,۹۰	۶,۰۹	۵,۴۶	۵,۸۵	۴,۵۵
۱۲	۲۲,۷۵	۲۷,۰۷	۲۶,۱۰	۲۷,۳۰	۴,۶۱	۳,۶۸	۶,۳۷	۲,۲۲
۱۳	۳۰,۵۰	۲۵,۴۲	۲۴,۴۰	۲۶,۸۰	۵,۶۶	۴,۷۲	۵,۲۳	۷,۴۱
۱۴	۲۱,۸۴	۲۶,۳۶	۲۴,۹۰	۲۶,۵۰	۲,۷۳	۵,۷۹	۵,۶۳	۷,۰۲
۱۵	۲۷,۹۹	۲۶,۹۴	۲۴,۹۶	۲۵,۷۵	۴,۲۶	۴,۶۶	۵,۱۳	۵,۱۷
۱۶	۲۸,۲۶	۲۶,۵۷	۱۵,۷۰	۲۴,۷۵	۶,۸۰	۴۰,۴۱	۴,۶۲	۲,۷۳
۱۷	۲۴,۶۹	۲۸,۴۰	۲۸,۰۰	۲۶,۵۰	۷,۳۱	۴,۷۴	۵,۵۰	۷,۷۳
۱۸	۱۹,۴۱	۲۰,۷۷	۳,۱۰	۲۰,۰۰	۴,۴۴	۵,۳۰	۵,۵۶	۳,۵۳
۱۹	۲۷,۳۶	۲۷,۵۶	۲۴,۴۰	۲۵,۲۰	۳,۶۹	۵,۹۰	۴,۲۶	۶,۴۷
۲۰	۲۳,۵۰	۲۲,۶۷	۲۶,۴۰	۱۸,۷۰	۶,۳۰	۶,۲۴	۶,۹۰	۵,۱۴
۲۱	۲۵,۰۳	۲۳,۳۱	۲۴,۹۰	۲۷,۰۰	۳,۱۴	۶,۵۳	۱,۹۲	۵,۱۴
۲۲	۲۶,۰۹	۲۵,۷۴	۲۳,۲۰	۳۱,۹۰	۳,۴۰	۶,۶۲	۴,۳۱	۷,۰۵
۲۳	۲۱,۸۹	۲۴,۵۴	۲۶,۶۰	۲۴,۵۰	۵,۹۵	۴,۶۵	۵,۳۵	۴,۸۲
۲۴	۲۲,۵۰	۲۳,۷۲	۲۶,۲۰	۲۵,۳۰	۲,۵۷	۳,۹۵	۷,۳۷	۵,۹۰
۲۵	۲۸,۷۵	۲۳,۲۵	۲۴,۶۵	۲۵,۳۰	۴,۲۷	۶,۹۹	۶,۰۰	۵,۵۰

به عنوان نمونه نتیجه ۱۰ بار نمونه گیری از سیستم در حال

کار در جدول شماره ۸ ارائه شده است.

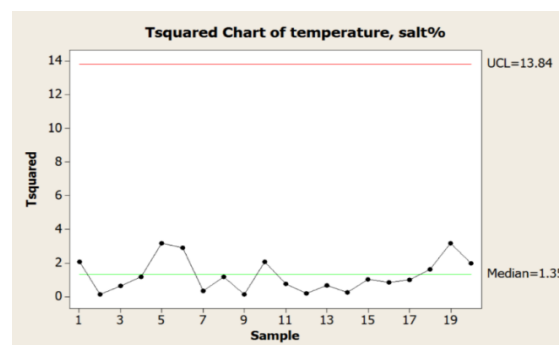
جدول ۸: نتیجه ۱۰ بار نمونه گیری از تنش های سیستم

شماره نمونه	درجه حرارت	درصد املاح
۱	۲۶,۵۰	۴,۰۲
۲	۲۷,۹	۳,۹۰
۳	۳۰,۰۲	۵,۵۰
۴	۲۸,۰۵	۶,۰۰
۵	۲۹,۵۰	۷,۵۰
۶	۳۱,۵۰	۵,۰۰
۷	۳۳,۵۰	۷,۲۰
۸	۳۵,۲۰	۹,۲۰
۹	۳۳,۰۰	۱۰,۱۰
۱۰	۳۲,۰۰	۹,۵۰

مجددا این اعداد را در نمودار کنترل نگاشت نموده و نتیجه را

تحلیل می نماییم. نتیجه نگاشت در شکل ۳ ارائه شده است.

پس از طراحی نمودار کنترل پایه، جهت محاسبه باقی مانده عمر مفید تجهیز مورد بررسی در تحقیق، تجهیز مورد بازرسی قرار می گیرد و پس از مشاهده در حال کار بودن آن، از وضعیت تنش ها نمونه برداری انجام می شود و نتایج آن در نمودار کنترل نگاشت می شوند و وضعیت کنونی تجهیز مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۳: نمودار کنترل که با استفاده از ۱۰۰ بار نمونه برداری تنش

های سیستم رسم شده است

با بررسی های فوق با توجه به اینکه نتیجه، بالاتر رفتن هردو تنش از آستانه خود می باشد، مشخص می شود که جهت انجام محاسبات باید از قسمت پنجم مدل استفاده شود. با توجه به اینکه هیچکدام از درجه حرارتها از ۳۵ بالاتر نرفته و همچنین تمامی اعداد بدست آمده برای درصد املاح موجود در آب زیر ۱۱ می باشد و میانگین آنها ۶٫۸ می باشد، لذا در قسمت پنجم مدل، بجای عامل شتاب دهنده یا $F_{A_1A_2}$ از جدول ۵ عدد ۱٫۲۱ جایگزین می شود. در نهایت جهت تعیین باقی مانده عمر مفید، از عبارت ۱۳، قابلیت اطمینان سیستم محاسبه شده و با استفاده از عبارت ۱۶ میانگین باقی مانده سیستم محاسبه می شود.

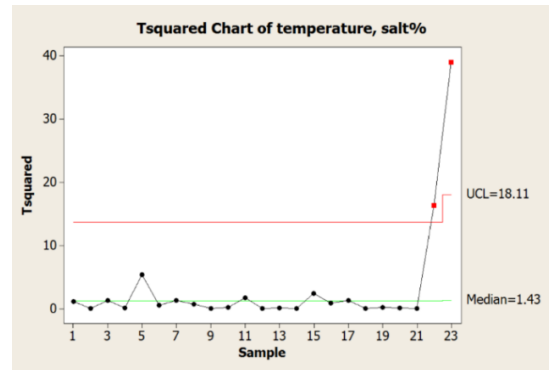
$$MRL(t)=\mu(t)=\int_0^{\infty} R(x|t)=\frac{1}{x} \int_t^{\infty} R(x) dx \quad (16)$$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی برآورد متوسط باقی مانده عمر مفید تجهیزات با خرابی تدریجی در حضور دو عامل همبسته تنش زا که فرآیند خرابی را تشدید می کنند، مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی از نمودار کنترل دو متغیره هاتلینگ برای پایش عوامل شتاب دهنده خرابی استفاده کرده است. با توجه به حضور دو عامل در هر لحظه از زمان وضعیت تجهیز در شرایط چهار گانه، زوال طبیعی، زوال شتاب یافته بر اساس تشدید نرخ خرابی متأثر از اثر عامل اول، زوال شتاب یافته بر اساس تشدید نرخ خرابی متأثر از اثر عامل دوم و زوال شتاب یافته بر اساس تشدید نرخ خرابی متأثر از اثر همزمان تاثیر عامل های اول و دوم خواهد بود. با توجه به اینکه تغییر عوامل شتاب تنها منجر به افزایش نرخ خرابی بدون تغییر در تابع چگالی خرابی می شوند لذا ضرایب افزایش پارامترهای این توابع چگالی به کمک میانه تابع چگالی و مدل های تسریع کننده ایرینگ برآورد شد. مهم ترین دستاورد های حاصل از تحقیق حاضر را می توان در الگوی پایش عوامل تنش محیطی، و محاسبه قابلیت اطمینان سیستم و برآورد میانگین باقیمانده طول عمر در شرایط مختلف معرفی کرد. جهت توسعه و ادامه پژوهش می توان در تحقیق های بعدی اثر تنش های همبسته پیوسته و گسسته را دنبال کرد. همچنین این تحقیق قابلیت دارد تا بر روی سایر الگوهای خرابی غیر نمائی نیز توسعه یابد. بدیهی است در این حالت اثر معنی دار عوامل تنش بر روی پارامتر شکل ناچیز تلقی می گردد.

۶- مراجع

[1]Wang H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research*,139:469-489.



شکل ۳: نگاهش نتایج ۱۰ بار نمونه گیری در شرایطی که تنش ها از حالت نرمال بیشتر بوده در نمودار کنترل

همانطور که در تصویر ۳ مشاهده می شود نمودار خارج از کنترل می باشد. به منظور تعیین اینکه کدام تنش در سیستم خارج از کنترل می باشد، پس از رسم نمودار کنترل، جهت بررسی نتیجه، به پنجره Session در نرم افزار minitab مراجعه و گزارش را بررسی می نماییم. نمونه ای از این گزارش در تصویر ۴ ارائه شده است. همانطور که در شکل شماره ۴ مشخص شده است، هردو تنش دما و املاح موجود در آب در نمونه گیری های شماره ۲۲ و ۲۳ از حد آستانه خود یعنی ۲۵ درجه سانتیگراد و ۵٪ بیشتر هستند.

Test Results for Tsquared Chart of temperature, salt%

	Point	Variable	P-Value
Greater Than UCL	22	salt%	0.0001
	23	temperature	0.0001
		salt%	0.0003

* WARNING * If graph is updated with new data, the results above may no longer be correct.

شکل ۴: گزارش ارایه شده در نرم افزار minitab در خصوص وضعیت خارج از کنترل بودن تنش ها

بدیهی است چنانچه در این گزارش مشخص شود فقط تنش درجه حرارت خارج از کنترل است، جهت محاسبات از قسمت سوم مدل و چنانچه مشخص شود فقط تنش درصد املاح خارج از کنترل است (مانند نمونه ۲۲)، از قسمت چهارم مدل جهت محاسبات باقی مانده عمر مفید استفاده می شود. اندازه P-Value مورد اشاره در این تحلیل نشان می دهد در صورتیکه سیستم به دلیل این تنش خارج از کنترل در نظر گرفته شود، میزان خطای نوع اول یعنی اینکه این تنش تحت کنترل باشد ولیکن به اشتباه خارج از کنترل در نظر گرفته شود چقدر است. به عنوان نمونه در صورتیکه در نمونه برداری شماره ۲۳، نمودار را به دلیل درجه حرارت بالاتر از آستانه خود خارج از کنترل فرض نماییم، خطای نوع اول ۰٫۰۰۰۱ و در صورتیکه به دلیل بالا بودن درصد املاح موجود در آب نمودار را خارج از کنترل در نظر بگیریم، خطای نوع اول ۰٫۰۰۰۳ را پذیرفته ایم.

- [10] Pecht MG. (208). Prognostics and health management of electronics, Hoboken: John Wiley & Sons Inc, p. 1–9.
- [11] Si XS., Wang W., Hu CH, Zhou DH.(2011). Remaining useful life estimation—a review on the statistical data-driven approaches. *Eur Journal of the Operational Research*, 213(1), 1–14.
- [12] Hu, C., Zhou, Z., Zhang, J., & Si, X. (2015). A survey on life prediction of equipment. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(1), 25-33
- [13] Cassady, CR., Bowden, RO., Liew, L., & Pohl, EA.(2000). Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation. *IIE Trans*, 32, 471–8.
- [14] Ben-Daya, M., & Rahim, MA. (2000). Effect of maintenance on the economic design of x-control chart. *European Journal of Operational Research*, 120, 131–43.
- [15] Linderman, K., McKone-Sweet, KE., & Anderson, JC. (2005). An integrated systems approach to process control and maintenance. *European Journal of Operational Research*, 164, 324–40.
- [16] Deloux, E., B.Castanier, & C.Berenguer. (2009). Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 418-431.
- [17] Mehr afrooz, Z., & Noorossana, R. (2011). An integrated model based on statistical process control and maintenance. *Computers & Industrial engineering*, 61, 1245-1255.
- [2] Jardine, A.K.S., Lin, D., Banjevic, D., 2006. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems*
- [3] Elwany, A.H., Gebraeel, N.Z., 2008. Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. *IIE Transactions* 40, 629–639.
- [4] Wang, W., Hussian, B., 2009. Plant residual time modelling based on observed variables in oil samples. *Journal of the Operational Research Society* 60, 789–769
- [5] Kim, K.O., Kuo, W., 2009. Optimal burn-in for maximizing reliability of repairable non-series systems. *European Journal of Operational Research* 193, 140–151.
- [6] Elsayed, A.(2012). *Reliability Engineering*. John Wiley & Sons
- [7] Xiao-sheng, s., Wenbin, w., Chang-Hua, H., & Dong-Hua, Z. (2011). Remaining useful life estimation- A review on the statistical data driven approaches, *European Journal of Operational Research*, 213, 1-14.
- [8] E Deloux., B Castanier., and C Be´renguer. (2008). Maintenance policy for a deteriorating system evolving in a stressful environment, 222, 613-622
- [9] Dodson, B. (2006). *Accelerated testing-A Practitioner’s Guide to Accelerated and Reliability Testing*. United States of America: SAE international.

-
- 1 - Condition-based maintenance
 2 - Residual useful life
 3 - Deterioration
 4 - Reliability
 5 - Accelerated life testing
 6. Model based method
 7. Data driven method
 8. Monitoring data-based methods
 9. Indirectly monitoring data-based methods
 10. Statistics-based methods
 11. Artificial intelligence-based methods
 12. Statistical process control
 13. HotellingT²