

تحلیل اطلاعات آماری و مدل‌سازی قابلیت اطمینان ملخ بالگرد با در نظر گرفتن حالت‌های چندگانه‌ی واماندگی

امیررضا شاهانی* (استاد)

معصومه بابایی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی هندی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوری ۳ - ۳۱، شماره‌ی ۲، ص. ۴۱-۴۵

با توجه به تحلیل‌های آماری محدود قابلیت اطمینان قطعات بالگرد در مراجع فنی، تحلیل قابلیت اطمینان ۳۳۸ ملخ بالگرد ۲۰۵ در شرایط پروازی بین سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ انجام شده است. با انجام تحلیل آماری، قابلیت اطمینان ملخ بالگرد که دارای حالت‌های چندگانه‌ی واماندگی است، استخراج شده است. توابع قابلیت اطمینان با روش تخمین کاپلان - میر محاسبه شده و پس از استخراج بازه‌های اطمینان برای نتایج غیرپارامتریک، به کمک دو روش حداکثر احتمال و نموداری، توزیع وایبول سه پارامتری به دست آمده است. همچنین توابع تجمع خرابی حالت‌های واماندگی با روش تخمین نلسون - آلن استخراج شده است. یکی از نتایج مهم این است که قابلیت اطمینان این ملخ‌ها دارای توزیع وایبول سه پارامتری و آهنگ واماندگی فزاینده با زمان است. در نهایت، با توجه به نمودار توابع جمع‌ی خرابی مربوط به هر حالت واماندگی مشخص شد که حالت واماندگی ۱ که مربوط به ارتعاشات بیش از حد است، بیشترین تأثیر را در واماندگی ملخ‌ها داشته است.

واژگان کلیدی: قابلیت اطمینان، ملخ بالگرد ۲۰۵، تحلیل آماری، حالت‌های

چندگانه‌ی واماندگی، توزیع وایبول سه پارامتری.

shahani@kntu.ac.ir
m.babaei@sina.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

بین قابلیت اطمینان و عمر این عضوها را منتشر کرده است.^[۳] همچنین در سال ۲۰۰۹ با تحلیل اطلاعات آماری و مدل‌سازی قابلیت اطمینان ۱۵۸۴ ماهواره، نهایتاً سهم زیرسیستم‌های مختلف این ماهواره‌ها در واماندگی آن‌ها مشخص شد.^[۴] گاهی ممکن است قطعه‌ی دارای یک زمان واماندگی مشخص باشد، اما حالت‌های واماندگی مختلفی داشته باشد. اغلب حالت‌های واماندگی، دلایل واماندگی، حالت‌های چندگانه‌ی واماندگی یا حالت‌های رقابتی^۴ نیز نامیده می‌شوند.^[۴] تاکنون تلاش‌های زیادی با در نظر گرفتن حالت‌های چندگانه‌ی واماندگی برای تحلیل قابلیت اطمینان صورت گرفته است.^[۵-۷]

در این نوشتار، اطلاعات واماندگی ۳۳۸ ملخ بالگرد ۲۰۵ در شرایط پروازی بین سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۰ گردآوری شده که این ملخ‌ها ۴۱ حالت واماندگی مختلف دارند. تحلیل غیرپارامتریک قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن همه‌ی حالت‌های واماندگی انجام شده، که در این حالت اطلاعات واماندگی از نوع اطلاعات کامل است. توابع قابلیت اطمینان به کمک روش تخمین کاپلان - میر محاسبه شده^[۸] و بازه‌های اطمینان برای نتایج قابلیت اطمینان غیرپارامتریک نیز استخراج شده است.^[۹،۱۰] توابع جمع‌ی خرابی مربوط به هر حالت واماندگی^۵ نیز به کمک روش تخمین نلسون - آلن استخراج شده است.^[۱۱-۱۴]

قابلیت اطمینان از مشخصه‌های ذاتی هر محصول یا سیستم، و یکی از پارامترهای طراحی، ساخت و بهره‌برداری است که طی فرایندهای مربوطه همواره باید به‌عنوان یک معیار مهم مورد توجه و کنترل قرار گیرد. بنا بر این برای حصول این امر، کمیت‌سنجی قابلیت اطمینان ضرورت می‌یابد. قابلیت اطمینان یک محصول عبارت است از احتمال عملکرد رضایت‌بخش و مطلوب آن محصول تحت شرایط کاری مشخص در مدت زمان معین.^[۱] در نتیجه با در دست داشتن تابع قابلیت اطمینان می‌توان احتمال این که قطعه‌ی مورد نظر در طول عمر مشخصی دچار واماندگی^۱ شود را به دست آورد. قابلیت اطمینان را می‌توان به روش‌های مختلفی کمی کرد که یکی از آن‌ها تحلیل اطلاعات آماری است. روش‌های مربوط به تحلیل‌های آماری و اطلاعات زمان عمر^۲ از حدود سال ۱۹۷۰ آغاز و به سرعت گسترش یافته‌اند.^[۲]

در مراجع فنی اطلاعات واماندگی و تحلیل‌های آماری محدودی در مورد قابلیت اطمینان قطعات بالگرد وجود دارد. شرکت بل آمریکا به کمک روش تداخل تشش - استحکام^۳ قابلیت اطمینان بعضی از اجزای بالگرد OH-58D را استخراج و رابطه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۷/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۱، پذیرش ۱۳۹۳/۴/۲۱

جدول ۱. نمونه‌ی اطلاعات آماری گردآوری شده برای تحلیل قابلیت اطمینان ملخ بالگرد ۲۰۵.

شماره‌ی ملخ	تاریخ واماندگی	حالت واماندگی	زمان پروازی موفق (ساعت)
۱۵۵۹۲ - ۸۲	۵۴/۱۰/۹	ایجاد ترک	۶۰۳
۱۸۷۸۸ - ۸۲	۷۱/۱۰/۵	ایجاد نامیزی	۱۶۰۵
۱۴۴۷ - ۸۲	۸۱/۱۲/۳	ارتعاشات بیش از حد	۱۴۸۵
۲۵۴۰۶ - ۸۲	۸۹/۶/۱۷	حالت واماندگی کامل*	۲۱۲۶

* scrapping

در بخش دوم مقاله، اطلاعات آماری ارائه شده از سوی صنعت توصیف شده است. با توجه به اطلاعات آماری تحلیل‌های غیر پارامتریک^۶ و پارامتریک قابلیت اطمینان انجام و در نهایت توابع قابلیت اطمینان برحسب ساعت‌های پروازی موفق استخراج شده است. همچنین این توابع به کمک توزیع وایبول سه پارامتری به دست آمده و در آخر نتایج حاصله از تحلیل‌های صورت گرفته بیان شده است.

۲. توصیف اطلاعات آماری

در این نوشتار برای انجام تحلیل مورد نظر از اطلاعات جمع‌آوری شده توسط صنعت بالگرد (پنجا) استفاده شده است. اطلاعات ارائه شده از سوی صنعت، اطلاعات کامل^۷ در مورد واماندگی ملخ‌های بالگرد ۲۰۵، علت هریک از آن‌ها، و نیز زمان‌های پروازی موفق تا قبل از رخداد هریک از واماندگی‌ها مربوط به سال ۱۳۵۳ تا آخر سال ۱۳۹۰ است. نمونه‌ی اطلاعات استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. اطلاعات استخراج شده برای هریک از ملخ‌ها عبارت‌اند از: ۱. زمان‌های پروازی موفق؛ ۲. زمان‌های واماندگی در صورت رخداد آن‌ها؛ ۳. حالت واماندگی مربوط به هریک از زمان‌های واماندگی.

۳. قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد

در این قسمت برای انجام تحلیل غیر پارامتریک، اطلاعات آماری با تمام حالت‌های واماندگی مد نظر قرار گرفته است. یکی از این حالت‌های واماندگی به از کار افتادن کامل ملخ بالگرد (حالت از کار افتادگی کامل^۸) منجر می‌شود و بقیه حالت‌ها باعث می‌شوند که ملخ‌ها نیازمند تعمیر باشند و پس از تعمیر دوباره به چرخه کاری بازمی‌گردند.

۱.۳. اطلاعات کامل و روش تخمین کاپلان - میر

با در نظر گرفتن همه‌ی حالت‌های واماندگی، اطلاعات آماری از نوع اطلاعات کامل است و در آن اطلاعات از دست‌رفته^۹ وجود ندارد. در این حالت، ملخ‌ها به حالات مختلف دچار واماندگی می‌شوند. حالت‌های واماندگی را دلایل واماندگی نیز می‌نامند. ملخ‌های مورد نظر ۴۱ حالت واماندگی مختلف دارند که حالت واماندگی کامل باعث از کار افتادگی کامل می‌شود و بقیه‌ی حالت‌ها باعث می‌شوند که ملخ‌ها نیازمند تعمیر باشند که پس از تعمیر دوباره به چرخه کاری بازمی‌گردند.

با توجه به تعریف قابلیت اطمینان و در نظر گرفتن اولین زمان برای همه‌ی حالت‌های واماندگی، تابع قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ($\hat{R}(t)$) با نادیده گرفتن

حالت واماندگی مربوط به هریک از زمان‌های واماندگی به کمک رابطه‌ی کاپلان - میر (رابطه‌ی ۱) تخمین زده می‌شود:^[۸]

$$\hat{R}(t) = \prod_{\text{all } i \text{ such that } t_{(i)} \leq t} \frac{n_i - d_i}{n_i} \quad (1)$$

که در آن $t_{(i)}$ زمان واماندگی i ، n_i تعداد قطعات سالم قبل از زمان $t_{(i)}$ و d_i تعداد قطعات دچار واماندگی شده در زمان $t_{(i)}$ است. تابع $\hat{R}(t)$ تابعی پله‌یی است که در زمان $t = 0$ برابر ۱ است و پس از هر زمان $t_{(i)}$ به اندازه‌ی $(n_i - d_i)/n_i$ کاهش می‌یابد. همچنین برای تخمین توابع خرابی تجمعی برای هر حالت واماندگی از روش نلسون - آلن (NA) استفاده شده است.^[۱۲-۱۱] نحوه‌ی استخراج رابطه‌ی تخمین نلسون - آلن در منابع موجود^[۱۲-۱۱] ذکر شده است. رابطه‌ی تخمین (NA) برای تابع خرابی تجمعی با در نظر گرفتن حالت‌های واماندگی برای حالت واماندگی z در رابطه‌ی ۲ آمده است:

$$\hat{\Lambda}_j(t) = \sum_{\text{all } i \text{ such that } t_{(i)} \leq t} \frac{\delta_{ij}}{n_i}; \quad j = 1, \dots, k \quad (2)$$

که در آن $t_{(i)}$ زمان واماندگی i ، n_i تعداد قطعات سالم قبل از زمان $t_{(i)}$ و k تعداد کل حالت‌های واماندگی است.

۲.۳. تحلیل بازه‌های اطمینان^{۱۰}

روش تخمین کاپلان - میر (رابطه‌ی ۱) برآوردی با حداکثر احتمال^{۱۱} را ارائه می‌دهد اما میزان پراکندگی اطراف $\hat{R}(t)$ را مشخص نمی‌کند. میزان این پراکندگی با توجه به مقدار واریانس و انحراف معیار $\hat{R}(t)$ تخمین زده شده که برای استخراج حدود بالا و پایین بازه‌های اطمینان ۹۵٪ کاربرد دارد، به دست می‌آید که با احتمال ۹۵٪ قابلیت اطمینان واقعی بین دو حد محاسبه شده قرار می‌گیرد. مقدار واریانس قابلیت اطمینان به کمک گرین وود و از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$\hat{var}[R(t_i)] \equiv \sigma^2(t_i) = [\hat{R}(t_i)]^2 \sum_{j \leq i} \frac{d_j}{n_j(n_j - d_j)} \quad (3)$$

مقدار بازه‌های اطمینان نیز به کمک رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

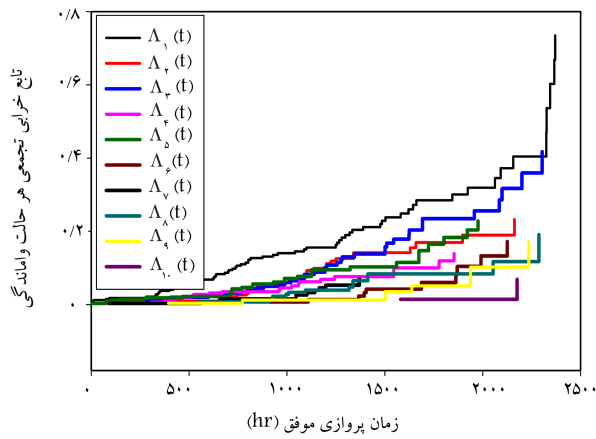
$$R_{95\%} = \hat{R}(t_i) \pm 1.96 \sigma(t_i) \quad (4)$$

جزئیات بیشتر در مورد این روابط در منابع موجود^[۱۰،۹] در دسترس است.

۳.۳. نمودارهای تخمین غیر پارامتریک قابلیت اطمینان ملخ بالگرد

با توجه به توضیحات داده شده در مورد روش تخمین کاپلان - میر، بازه‌های اطمینان و روش تخمین نلسون - آلن برای تخمین توابع خرابی تجمعی مربوط به هر حالت واماندگی، اطلاعات آماری مربوط به ۳۳۸ ملخ بالگرد مورد تحلیل قرار گرفته است. به کمک روش تخمین کاپلان - میر (رابطه‌ی ۱) نمودار مربوط به قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد به دست آمده است. همچنین با به کارگیری روابط ۳ و ۴ بازه‌های اطمینان ۹۵٪ نیز محاسبه شده‌اند. نمودار قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد با در نظر گرفتن همه‌ی حالت‌های واماندگی همراه با بازه‌های اطمینان ۹۵٪ در شکل ۱ نمایش داده شده است. مقادیر محاسبه شده برای $\hat{R}(t)$ و بازه‌های اطمینان برای ۱۵ زمان اول واماندگی در جدول ۲ آمده است.

همچنین به کمک روش تخمین نلسون - آلن (رابطه‌ی ۲) نمودار توابع خرابی تجمعی هر حالت واماندگی به دست آمده است. نمودار مربوط به ۱۰ حالت واماندگی



شکل ۲. نمودار غیر پارامتریک تابع واماندگی تجمعی برای حالت‌های مختلف واماندگی.



شکل ۳. حالت واماندگی لایه لایه شدن ملخ بالگرد.

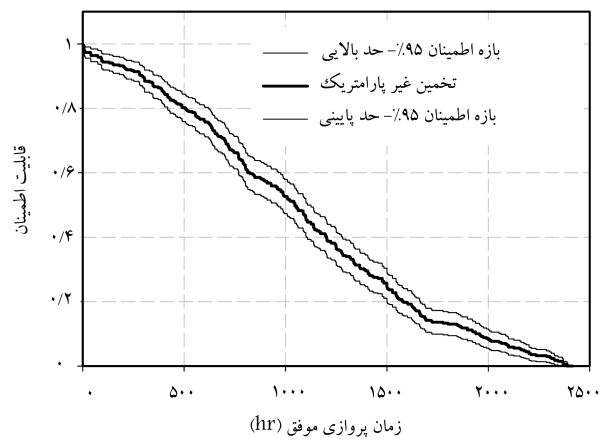
۴. قابلیت اطمینان پارامتریک ملخ بالگرد

نمودارهای غیر پارامتریک به دست آمده برای تابع قابلیت اطمینان به روش تخمین کاپلان - میر، و تابع خرابی تجمعی برای حالت‌های مختلف واماندگی به روش نلسون - آلن توصیف خوبی از نوع تغییرات اطلاعات زمان عمر هستند. اما برای به دست آوردن مدل ریاضی تابع قابلیت اطمینان باید از روش‌های پارامتریک استفاده کرد. روش‌های پارامتریک مختلفی برای برازش یک منحنی مناسب بر منحنی غیر پارامتریک وجود دارد که ما به دو روش گراف‌های احتمال یا تخمین نموداری^{۱۴} و روش تخمین بیشترین احتمال (MLE) پرداخته‌ایم. همچنین به کمک روش‌های آزمون برازش منحنی^{۱۵} نشان داده شده است که توزیع سه پارامتری بهترین توزیع برای توصیف قابلیت اطمینان ملخ بالگرد برحسب عمر است.

۱.۴. گراف‌های احتمال یا تخمین نموداری

روش نموداری به عنوان روش گراف‌های احتمال نیز شناخته می‌شود. از این روش برای نشان دادن این که توزیع وایبول سه پارامتری بهترین توزیع جهت توصیف اطلاعات آماری مورد نظر است، استفاده شده است. روش گراف‌های احتمال از یک روش ساده برای برازش یک توزیع پارامتریک بر اطلاعات غیر پارامتریک استفاده می‌کند. در این روش رابطه‌ی بین قابلیت اطمینان و زمان در توزیع آماری در نظر گرفته، آن را به یک رابطه‌ی خطی تبدیل کرده به عنوان مثال توزیع وایبول دو پارامتری در نظر بگیرد:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (5)$$

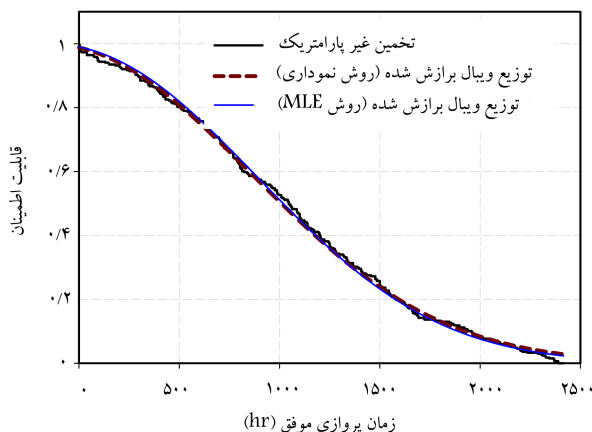


شکل ۱. قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد ۲۰۵ با بازه‌های اطمینان ۹۵٪ برای کل حالت‌های واماندگی.

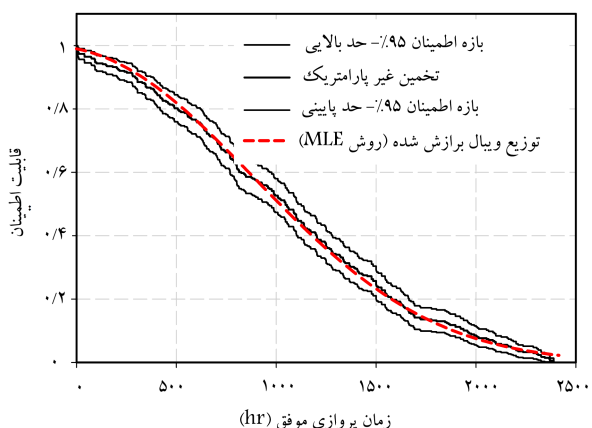
جدول ۲. مقادیر غیر پارامتریک قابلیت اطمینان و بازه‌های اطمینان با در نظر گرفتن همه‌ی حالت‌های واماندگی.

بازه‌ی اطمینان ۹۵٪		$\hat{R}(t)$	تعداد واماندگی	زمان واماندگی (ساعت)
حد بالا	حد پایین			
۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۹۱۲۵۱	۰٫۹۹۷۰۴۱	۱	۳
۱٫۰۰۰۰۰	۰٫۹۸۵۹۰۷	۰٫۹۹۴۰۸۳	۱	۴
۰٫۹۹۹۶۹	۰٫۹۷۶۶۳۷	۰٫۹۸۸۱۶۶	۲	۶
۰٫۹۹۹۶۳	۰٫۹۶۸۱۷۱	۰٫۹۸۲۲۴۹	۲	۷
۰٫۹۹۴۴۷	۰٫۹۶۴۱۰۸	۰٫۹۷۹۲۹۰	۱	۱۰
۰٫۹۹۲۵۴	۰٫۹۶۰۱۲۵	۰٫۹۷۶۳۳۱	۱	۱۲
۰٫۹۹۰۵۴	۰٫۹۵۶۲۱۰	۰٫۹۷۳۳۷۳	۱	۳۹
۰٫۹۸۸۴۸	۰٫۹۵۲۳۵۰	۰٫۹۷۰۴۱۴	۱	۴۰
۰٫۹۸۴۲۲	۰٫۹۴۴۷۷۰	۰٫۹۶۴۴۹۷	۲	۷۳
۰٫۹۸۲۰۴	۰٫۹۴۱۰۳۷	۰٫۹۶۱۵۳۸	۱	۷۵
۰٫۹۷۹۸۲	۰٫۹۳۷۳۳۷	۰٫۹۵۸۵۸۰	۱	۹۰
۰٫۹۷۷۵۸	۰٫۹۳۳۶۶۷	۰٫۹۵۵۶۲۱	۱	۹۳
۰٫۹۷۰۶۸	۰٫۹۲۲۸۰۸	۰٫۹۴۶۷۴۶	۳	۱۰۰
۰٫۹۶۸۳۴	۰٫۹۱۹۲۳۲	۰٫۹۴۳۷۸۷	۱	۱۳۱
۰٫۹۶۵۹۸	۰٫۹۱۵۶۷۵	۰٫۹۴۰۸۲۸	۱	۱۴۷

که بیش از ۵ بار اتفاق افتاده‌اند در شکل ۲ نمایش داده شده است. چنان که از نمودارها مشخص است حالت واماندگی ۱ بیشترین تأثیر را در واماندگی این نوع ملخ در کل زمان‌های کاری و سپس حالت واماندگی ۳ بیشترین تأثیر را داشته است. این دو حالت را باید به عنوان دو حالت واماندگی مهم در طراحی این نوع ملخ در نظر داشت. پس از این دو حالت مهم‌ترین حالت‌های واماندگی حالت‌های ۲ و ۵ هستند. البته بعد از زمان‌های ۲۰۰۰ ساعت، حالت ۱۷ هم جزء حالت‌های مهم است. شیب نمودارها در شکل ۲ تخمینی از توابع آهنگ خرابی^{۱۲} $\lambda(t)$ برای حالت‌های مختلف واماندگی است. یکی از حالت‌های مهم واماندگی این نوع ملخ‌ها لایه‌لایه شدن^{۱۳} آن‌ها است که در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵. نمودار تابع قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد ۲۰۵ و توزیع پارامتریک وایبول به دست آمده از دو روش حداقل مربعات و MLE.



شکل ۶. نمودار تابع قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد ۲۰۵ با بازه‌های اطمینان ۹۵٪ و توزیع پارامتریک وایبول به دست آمده از روش MLE.

که در آن f تابع چگالی احتمال^{۲۱}، R تابع قابلیت اطمینان مدل انتخاب شده، و c_i حالت‌های مختلف واماندگی است. اگر t_i زمان واماندگی باشد آنگاه $\delta_i = 1$ ، و اگر t_i زمان از دست رفته باشد آنگاه $\delta_i = 0$ است.

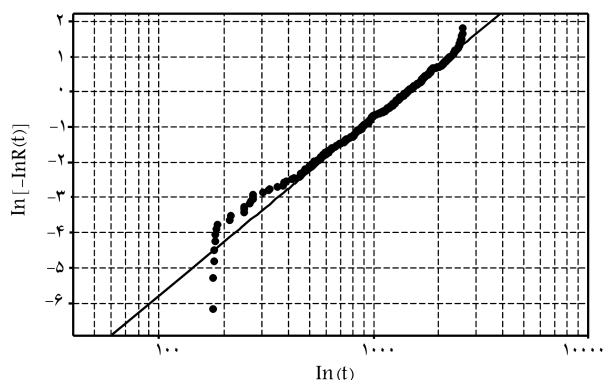
با توجه به توضیحات داده شده، پس از در نظر گرفتن توزیع‌های آماری مختلف، از جمله توزیع وایبول دو پارامتری، وایبول سه پارامتری، نرمال، و لگنرمال و انجام آزمون برازش منحنی اندرسون - دارلینگ^{۲۲} مشخص شد که بهترین توزیع، توزیع وایبول سه پارامتری است. نمودار تابع قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد ۲۰۵ و توزیع پارامتریک وایبول به دست آمده از دو روش حداقل مربعات و MLE در شکل ۵ نمایش داده شده است.

تابع قابلیت اطمینان به دست آمده به کمک روش تخمین MLE و براساس توزیع وایبول سه پارامتری در رابطه‌ی ۸ آمده است:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t + 174.83}{1409.73}\right)^{2.187}\right] \quad (8)$$

در شکل ۶ نمودار تابع قابلیت اطمینان غیر پارامتریک ملخ بالگرد ۲۰۵ با بازه‌های اطمینان ۹۵٪ و توزیع پارامتریک وایبول حاصل از روش MLE نشان داده شده است.

یکی از نتایج مهم به دست آمده این است که ملخ بالگرد ۲۰۵ دارای آهنگ



شکل ۷. نمودار احتمال وایبول اطلاعات آماری با در نظر گرفتن همه حالت‌های واماندگی.

با گرفتن دو بار لگاریتم طبیعی از دو طرف رابطه‌ی ۵ داریم:

$$\ln[-\ln R(t)] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\theta) \quad (6)$$

رابطه‌ی ۶ دقیقاً معادل رابطه‌ی ۵ است. حال با در دست داشتن تابع غیر پارامتریک $\hat{R}(T_i)$ در زمان‌های مختلف t_i ، با رسم نمودار $\ln[-\ln \hat{R}(t_i)]$ برحسب $\ln(t_i)$ اگر توزیع وایبول دو پارامتری انتخاب شده توزیع مناسبی باشد، اطلاعات رسم شده باید از یک خط راست پیروی کنند. به علاوه، با برازش یک خط راست به روش حداقل مربعات^{۱۶} بر اطلاعات رسم شده، به کمک شیب و محل تقاطع آن با محور y می‌توان پارامترهای توزیع وایبول را تخمین زد چرا که شیب این خط پارامتر β و محل تقاطع آن با محور y پارامتر مقیاس^{۱۸} θ است.

با توجه به توضیحات داده شده، پس از در نظر گرفتن توزیع‌های آماری مختلف از جمله توزیع وایبول دو پارامتری، وایبول سه پارامتری، نرمال، و لگنرمال و انجام آزمون برازش منحنی ضریب تصحیح پی‌یرسون^{۱۹} مشخص شد که بهترین توزیع، توزیع وایبول سه پارامتری است. نمودار احتمال وایبول اطلاعات آماری مورد نظر در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۲.۴. روش تخمین بیشترین احتمال (MLE)

مدل پارامتری که روش تخمین MLE ارائه می‌دهد نسبت به روش نموداری از دقت بیشتری برخوردار است. در این روش ابتدا فرمول‌بندی تابع احتمال^{۲۰} L ضرورت می‌یابد که با توجه به پارامترهای مسئله تعیین می‌شود. مرحله‌ی دوم بهینه‌کردن تابع مورد نظر با گرفتن مشتق‌های جزئی نسبت به پارامترهای مسئله است که می‌توان به روش تحلیلی یا روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی نقاط اکسترمم تابع را محاسبه کرد. برای فرمول‌بندی تابع احتمال یک فرض اولیه برای تابع توزیع اطلاعات مسئله مورد نیاز است و معمولاً از همان تابع توزیعی که به عنوان بهترین مدل پارامتریک در روش نموداری به دست آمده است به عنوان فرض اولیه استفاده می‌شود. در واقع با اکسترمم‌کردن این تابع پارامترهای مجهول مدل انتخاب شده را می‌توان به دست آورد.^{۲۱} وقتی اطلاعات زمان عمر براساس حالت‌های مختلف واماندگی در دست باشد تابع L باید بر این اساس به دست بیاید. با فرض این که تعداد کل اطلاعات جامعه آماری برابر n باشد، تابع L چنین نمایش داده می‌شود:

$$L = \prod_{i=1}^n f_{c_i}^{\delta_i}(t_i) R^{1-\delta_i}(t_i) \quad (7)$$

ملخ بالگرد انجام شده است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته نشان داده شده است که توزیع وایبول سه پارامتری بهترین توزیع آماری برای توصیف قابلیت اطمینان ملخ بالگرد ۲۰۵ است. پارامترهای این توزیع به کمک روش حداکثر احتمال محاسبه شده است. یکی از نتایج مهم به دست آمده این است که ملخ بالگرد ۲۰۵ دارای تابع قابلیت اطمینان با توزیع وایبول سه پارامتری بوده و همچنین دارای آهنگ و اماندگی فزاینده با زمان است بدین معنی که در دوره‌ی فرسایش قرار دارد و عمر میانگین این نوع ملخ در این دوره می‌تواند به مراتب کوچک‌تر از دوره‌ی عمر مفید آن باشد. با در اختیار داشتن توزیع مناسب از نتایج، می‌توان احتمال و اماندگی و قابلیت اطمینان این نوع ملخ‌ها را به‌ازای ساعت‌های پروازی مختلف تعیین نمود. در نهایت، با توجه به نمودار توابع جمععی خرابی مربوط به هر حالت و اماندگی مشخص شد که حالت و اماندگی ۱ که مربوط به ارتعاشات بیش از حد^{۲۴} است، بیشترین تأثیر را در و اماندگی این نوع ملخ‌ها داشته است.

واماندگی فزاینده با زمان ($\beta > 1$) است بدین معنا که در دوره‌ی فرسایش^{۲۳} قرار دارد، و عمر میانگین این نوع ملخ در این دوره می‌تواند به مراتب کوچک‌تر از دوره‌ی عمر مفید آن باشد.^[۱۵]

۵. نتیجه‌گیری

قابلیت اطمینان مشخصه‌ی ذاتی هر محصول یا سیستم و یکی از پارامترهای طراحی، ساخت و بهره‌برداری است که طی فرایندهای مربوطه همواره باید به‌عنوان یک معیار مهم مورد توجه و کنترل قرار گیرد. برای حصول این امر، کمیت‌سنجی قابلیت اطمینان ضرورت می‌یابد. در مراجع فنی اطلاعات و اماندگی و تحلیل‌های آماری محدودی در مورد قابلیت اطمینان قطعات بالگرد وجود دارد. در این نوشتار به‌منظور از بین بردن این کمبود، تحلیل غیرپارامتریک قابلیت اطمینان

پانویس‌ها

1. failure
2. lifetime data
3. stress-strength
4. competing risks
5. cumulative mode-specific hazard functions
6. nonparametric analysis
7. complete data
8. scrapped Mode
9. censored data
10. confidence intervals
11. maximum likelihood estimation
12. failure rate function
13. delamination
14. probability plots or graphical estimation
15. goodness of fit test
16. least square method
17. shape parameter
18. scale parameter
19. pearson correlation coefficient
20. likelihood function
21. probability density function
22. Anderson-Darling
23. wear out time
24. excessive vibration

منابع (References)

1. Dai, S.H. and Wang, M.O., *Reliability Analysis in Engineering Applications*, New York, Van Nostrand Reinhold, pp. 1-3 (1923).
2. Lawless, J.F., *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, New York, Wiley, Second Edition (2003).
3. Bell Helicopter Textron Report 460-930-212, Model OH-58D Helicopter Fatigue Substantiation of the Dynamic

Components of the Model OH-58D Helicopter (1998).

4. Castet, J.F. and Saleh, J.H. "Satellite and satellite sub-systems reliability: Statistical data analysis and modeling", *Reliability Engineering and System Safety*, **94**, pp. 1718-1728 (2009).
5. Williams, J.S. and Lagakos, S.W. "Models for censored survival analysis: A coone class of variable-sum models", *Biometrika*, **65**, pp. 181-189 (1978).
6. Crowder, M.J. *Classical Competing Risks*, Boca Raton, Chapman & Hall/CRC (2001).
7. Ghilagaber, G. "Analysis of survival data with multiple causes of failure", *Quality and Quantity*, **32**, pp. 297-324 (1998).
8. Meier, P. and Kaplan, E.L. "Nonparametric estimation from incomplete observations", *Journal of the American Statistical Association*, **53**(282), pp. 457-81 (1958).
9. Phillips, M.J. and Ansell, J.I., *Practical Methods for Reliability Data Analysis*, Oxford, Clarendon Press (1994).
10. Escobar, L.A. and Meeker, W.O., *Statistical Methods for Reliability Data*, New York, Wiley (1998).
11. Nelson, W.B. "Hazard plotting for incomplete failure data", *J. Qual. Technol.*, **1**, pp. 27-52 (1969).
12. Aalen, O. "Nonparametric estimation of partial transition probabilities in multiple decrement models", *Ann. Stat.*, **6**, pp. 534-545 (1978a).
13. Aalen, O. "Nonparametric inference for a family of counting processes", *Ann. Stat.*, **6**, pp. 701-726 (1978b).
14. Aalen, O. "Nonparametric inference in connection with multiple models", *Scand. J. Stat.*, **3**, pp. 15-27 (1976).
15. Bilonon, R. and Ronald, N., *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, Plenum Press (1992).