

ارزیابی و تحلیل عملکرد یک بالانس نیرویی در تونل باد از دید قابلیت اطمینان

محمدرضا حسنی آهانگر ^۱	مهدی دهقان ^۲	خداداد واحدی ^۳
دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران	دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیر کبیر	گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه امام حسین (ع)

چکیده

بالانس، یکی از مناسب‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری در تونل باد است که پل‌های کرنش سنج نصب شده بر روی آن کرنش‌های اعمال شده را با دقت مطلوبی اندازه‌گیری می‌کند. سیستم‌های بالانس به دلیل نوع وظیفه و کاربرد از سیستم‌های حساس است، لذا دقت قابلیت اتکا پذیری و ایمنی از خصوصیات تفکیک‌ناپذیر آن است. اینگونه سیستم‌ها بایستی بتوانند مأموریت محول شده را حتی در صورت بروز خطا به درستی انجام داده و خطا را تحمل کنند. در این مقاله، ساختار بالانس و انواع خطاهای تأثیرگذار بر روی آن در تونل باد مورد تجزیه و تحلیل واقع شده است، نرخ خرابی هر یک از اجزای بالانس، از قبیل کرنش‌سنج‌ها، سازه بالانس و منبع تغذیه، براساس مستندات فنی شرکت‌های سازنده و با انجام آزمایش‌های خستگی ارزیابی و محاسبه شده است. با مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم بالانس، تأثیر هر یک از اجزاء بر روی قابلیت اطمینان بالانس بررسی و با ارائه مدل مارکوف قابلیت اطمینان سیستم بالانس تحلیل و محاسبه شده است. نتایج بدست آمده از این بررسی و تحلیل نشان می‌دهد که کوتاه بودن مدت زمان آزمایش تونل باد تأثیر به‌سزایی در میزان قابلیت اطمینان سیستم دارد. این امر نقش عمده‌ای در افزایش دقت و صحت نتایج بدست آمده از مدل مورد آزمون در تونل باد و کاهش هزینه‌های انجام آزمون را به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: بالانس، کرنش‌سنج، قابلیت اتکا پذیری، قابلیت اطمینان، تحمل پذیری خطا

Analysis and Evaluation of a Wind Tunnel Balance with Reliability Considerations

M.R. Hassani Ahangar	M. Dehghan	Kh. Vahedi
Computer Eng. Department Iran Science and Tech. Univ.	Computer Eng. Department Amirkabir Univ. of Tech.	Mech. Eng. Gorup, Eng. Department, Imam Hossein Univ.

ABSTRACT

Balance strain gauge bridges should operate with a high accuracy level and therefore the system of balance is considered as a precise device. Several significant matters, like safety, dependability, and reliability are involved in designing precise devices. Therefore, the fault tolerance property of balance systems is very important. The structure of a balance system and all types of errors affecting its operation are analyzed in this work. Then, the failure rate of balance components, such as balance structure, strain gauges, and power supply, are estimated using manufacturer technical documents or by doing field tests. Finally, the effect, of each component on the reliability of the system is investigated and the system reliability is calculated using a proposed Markov model. Simulation results show that shortening the duration time of experiments in the wind tunnel leads to system reliability improvement and experiment cost reduction.

Key Words: Wind Tunnel Balance, Strain Gauge, Dependability, Reliability, Fault Tolerant

۱- دانشجوی دکترا

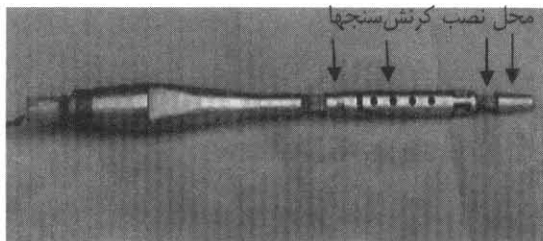
۲- استادیار

۳- استادیار: vahedi1710@yahoo.com

اتکاپذیری سیستم و تعاریف لازم در پیوست مقاله آمده است.

۲- دستگاه بالانس

دستگاه بالانس وسیله‌ای است، که نیروها و لنگرهای موردنیاز را برای یک مدل مشابه جسم متحرک، در تونل باد اندازه‌گیری می‌نماید. شکل (۱) یک نمونه بالانس شش مؤلفه استاتیکی را نشان می‌دهد. سیستم اندازه‌گیری بالانس، با استفاده از قوانین حاکم بر عملکرد کرنش‌سنج‌ها عمل می‌کند. در واقع کرنش‌سنج^۲ یک مقاومت الکتریکی از جنس فلز یا نیمه‌هادی است که تغییر طول در آن باعث تغییر مقاومت می‌شود. رابطه بین تغییر مقاومت و کرنش، با بررسی فاکتورهایی که در مقاومت مؤثر است، محاسبه می‌شود. کرنش‌سنج‌ها با یک چسب مناسب روی سطوحی که تحت تنش و کرنش قرار می‌گیرند، در جهت مناسب و در قالب یک پل وتسون چسبانده می‌شود [۵ و ۶].



شکل ۱- یک نمونه بالانس شش مؤلفه استاتیکی.

شکل (۲- الف) سمت راست نحوه نصب کرنش‌سنج‌ها روی قطعه‌ای از نمای جلو و شکل سمت چپ نمای از بالا را نشان می‌دهد. دو کرنش‌سنج R_1 و R_4 روی سطح تحت کشش و دو کرنش‌سنج R_2 و R_3 روی سطح تحت فشار یک عضو که لنگر خمشی به آن اعمال شده، نصب شده‌اند. شکل (۲- ب) سمت چپ نمای از بالای نصب کرنش‌سنج واقعی را روی بالانس نشان داده و شکل سمت راست پل الکتریکی معادل کرنش‌سنج‌های معادل یک مؤلفه را نشان می‌دهد. با تغذیه این پل به وسیله یک منبع تغذیه ثابت (DC)، پل، ابتدا در حالت تعادل قرار دارد. پس از اعمال تنش یا کرنش، مقدار مقاومت کرنش‌سنج‌ها تغییر پیدا

۱- مقدمه

سیستم‌های تونل باد از حدود یک قرن پیش مورد استفاده طراحان سیستم‌های هوافضا قرار گرفته‌اند. بررسی حرکت یک جسم پرنده، اعم از هواپیما یا موشک در داخل اتمسفر بحث بسیار پیچیده‌ای است، که به سختی می‌توان مدل ریاضی آن را دقیقاً بیان کرد. بنابراین، در بسیاری از مواقع این جریان می‌بایستی داخل تونل باد شبیه‌سازی و پارامترهای نیرو و لنگر مورد نظر طراح اندازه‌گیری شود. دانستن این نیروها و لنگرها در بهینه‌سازی شکل موشک، هواپیما، اتومبیل و سایر وسایل متحرکی که نسبت به هوا سرعت نسبی دارند، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است [۱]. لذا دستگاهی که بتواند نیروها و لنگرها را (در هر یک از سه بعد) با دقت مناسب اندازه‌گیری کند، در آیرودینامیک کاربرد زیادی دارد. مرسوم‌ترین و بهترین روش برای این امر، استفاده از دستگاه بالانس است. این دستگاه نیروها و لنگرهای وارد شده بر مدل را از هم جدا کرده و آنها را با دقت مطلوب اندازه‌گیری می‌کند [۱ و ۲]. یکی از مهم‌ترین ابزار در مدیریت مهندسی سیستم‌های نظامی مطالعات قابلیت اطمینان^۱ بوده و موفقیت آنها در انجام وظیفه محوله در به کارگیری صحیح این روش‌هاست. مبحث قابلیت اطمینان از دیرباز در طراحی و ساخت سیستم‌های مختلف مدنظر بوده است، ولی با گسترده‌گی فناوری و پیچیدگی لوازم در دهه‌های اخیر، به عنوان یک فناوری پویا در صنایع استراتژیک مطرح گردید [۳ و ۴]. برای محاسبه و ارزیابی قابلیت اطمینان، عمدتاً از دو روش پیشگویی و تخمین سود جسته می‌شود. در شیوه پیش‌گویی با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و اطلاعات اجزای تشکیل‌دهنده و نیز عملکرد سیستم، قابلیت اطمینان سیستم پیش‌گویی می‌شود و در شیوه تخمین با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های عمر و مدل‌سازی خرابی، قابلیت اطمینان سیستم تخمین و ارزیابی دقیق می‌شود [۴]. در این مقاله در سیستم بالانس با استفاده از روش پیش‌گویی، یعنی مدل‌سازی ریاضی و اطلاعات اجزای تشکیل‌دهنده، پارامترهای قابلیت اطمینان بالانس محاسبه شده است. مفاهیم اصلی ارزیابی قابلیت

2 - Strain Gauge

1 - Reliability

۳- منابع خطای یک بالانس

برای اندازه‌گیری نیرو و گشتاور از بالانس استفاده می‌شود. مکانیزم انجام این کار بدین شکل است، که هنگام وارد آمدن نیرو و گشتاور به مدلی متصل به بالانس، تغییر شکلهایی الاستیک در قسمت‌های مختلف بالانس متناسب با نیرو یا گشتاور بوجود می‌آید. این تغییر شکل‌ها به کمک کرنش‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. خطاهایی که در یک بالانس ظاهر می‌شود به چهار گونه تقسیم‌بندی می‌شوند [۵، ۶].

- الف) خطاهایی که در سازه بالانس ایجاد می‌شوند.
- ب) خطاهایی که در کرنش‌سنج‌ها بوجود می‌آیند.
- ج) خطای فاکتورهای انسانی (Human Factor).
- د) خطای عوامل محیطی (Environmental Effects).

۳-۱- خطاهای سازه‌ای

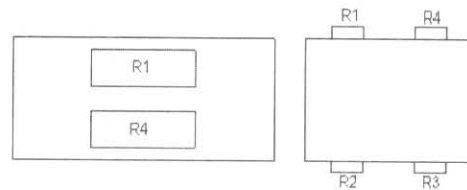
یک بالانس باید به نحوی طراحی شود، که تغییر شکل ایجاد شده در اثر یک نیرو یا گشتاور تنها در یک نقطه یا نقاط خاص ایجاد شود و این امکان وجود داشته باشد که نیروها و گشتاورها به طور مستقل اندازه‌گیری شوند [۵]. اما در عمل دستیابی به این استقلال امکان‌پذیر نیست و نیروها و گشتاورها روی اجزای مربوط به هم اثر می‌گذارند و این مطلب باعث غیرخطی شدن و ایجاد خطا در حین کالیبراسیون می‌شود. سازه بالانس و همچنین، محل نصب کرنش‌سنج‌ها باید به گونه‌ای تعیین شود تا پاسخ بالانس به نیروها و گشتاورها، خطی بوده و مؤلفه‌ها روی همدیگر بی‌تأثیر باشند.

۳-۲- خطاهای ایجاد شده در کرنش‌سنج‌ها

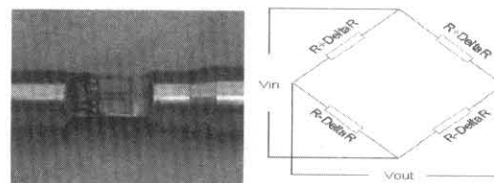
کرنش‌سنج یک حس‌کننده است، که در نقاطی که کرنش باید اندازه‌گیری شود، چسبانده می‌شود تا در اثر تغییر طول ایجاد شده در سیم‌های آن مقاومت کرنش‌سنج متناسب با آن تغییر یافته و کرنش حاصل اندازه‌گیری شود. خطاهایی که در کرنش‌سنج‌ها ظاهر می‌شود، به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ۱- خطای کرنش‌سنج،
- ۲- خطای موادی که در نصب کرنش‌سنج به سازه استفاده می‌شود،

کرده که در خروجی پل به صورت تغییر ولتاژ ظاهر می‌شود. با استفاده از این تغییر ولتاژ بدست آمده می‌توان مقدار کرنش و تنش موجود در سطح را بدست آورد [۶، ۷].



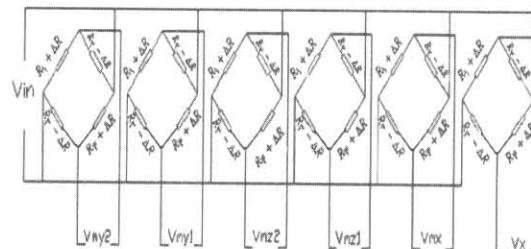
(الف)



(ب)

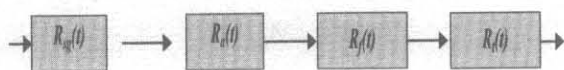
شکل ۲- چگونگی قرارگیری کرنش‌سنج‌ها روی سطح بالانس.

دستگاه بالانس قادر به تفکیک سه نیروی افقی (F_x)، نیروی عمودی (F_y)، نیروی جانبی (F_z) و سه لنگر در جهت محور افقی (M_x)، محور عمودی (M_y)، محور جانبی (M_z) در محدوده‌های تعریف شده برای آن است [۲، ۵]. پس نیاز به ترکیب شش پل الکتریکی (معادل آنچه در شکل (۲) نشان داده شده است، می‌باشد که این قالب در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۳- شمای کلی مدار پل‌های یک بالانس شش مؤلفه.

هر یک از قسمت‌ها می‌تواند منجر به خرابی کل سیستم شود. بنابراین، قابلیت اطمینان کل سیستم بستگی به قابلیت اطمینان هر یک از قسمت‌ها خواهد داشت. با توجه به اینکه بالانس بررسی شده، یک بالانس شش مولفه استاتیکی است (یعنی سه مؤلفه نیرو و سه مؤلفه لنگر را اندازه‌گیری می‌کند) دارای شش پل کرنش‌سنج است، که به وسیله یک منبع تغذیه ثابت مناسب شش (۶) ولت تغذیه می‌شود. عملکرد کرنش‌سنج، سازه محل نصب، مواد لازم برای چسباندن و خطوط انتقال به لحاظ تأثیر خرابی روی یکدیگر به صورت سری است. شکل (۴) دیاگرام بخش‌های تشکیل‌دهنده آن را از لحاظ خرابی نشان می‌دهد. البته پل‌های کرنش‌سنج مستقل از یکدیگر بوده و به لحاظ تأثیر خرابی روی هم، آنها را به صورت موازی در نظر می‌گیریم. در نهایت آنها با منبع تغذیه به صورت سری قرار دارند. شکل (۵) بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD)^۱، یک بالانس شش مولفه را به همراه منبع تغذیه پل‌های کرنش‌سنج آن نشان می‌دهد.



شکل ۴- بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان $R_{ij}(t)$.

در شکل فوق، $R_{ij}(t)$ قابلیت اطمینان کرنش‌سنج i ام از پل j ام بالانس است و سایر پارامترها عبارتند از:

$R_{sg}(t)$: قابلیت اطمینان کرنش‌سنج

$R_a(t)$: قابلیت اطمینان چسب

$R_f(t)$: قابلیت اطمینان سازه

$R_t(t)$: قابلیت اطمینان خطوط انتقال

$R_{su}(t)$: قابلیت اطمینان منبع تغذیه

$R_{ij}(t)$: قابلیت اطمینان کرنش‌سنج i ام از پل j ام

$R_j(t)$: قابلیت اطمینان معادل پل j ام

۳- خطای منبع تغذیه پلهای کرنش‌سنج.

۴- خطای کانکتور و خطوط انتقال سرهای کرنش‌سنج‌ها. این تأثیرات نامطلوب می‌بایستی به نحوی بر طرف شود. استفاده از کرنش‌سنج و سایر موارد مورد استفاده، حساس و با دقت و قابلیت اطمینان بالا از روش‌های کاستن این خطاهاست.

۳-۳- خطای فاکتورهای انسانی

در کاربری هر نوع سیستم، ناگزیر به کاربری به وسیله انسان هستیم. کاربری بالانس به هنگام نصب در تونل‌باد و اخذ داده از آن تا حد زیادی بستگی به اپراتور و وضعیت جسمی و روحی او دارد، که باید تأثیر آن را در محاسبات قابلیت اطمینان در نظر گرفت. نکته مهم این است، که با توجه به اثرگذاری مستقیم کاربر بر روی تمام اجزای سیستم، می‌توان همواره مقدار ثابتی را برای آن بدون استفاده از روابط در نظر گرفت.

۳-۴- تأثیرات محیطی

خطای محیطی آن گونه از عواملی است که پارامترهای دائمی فرض شده برای شرایط اتمسفر را متأثر می‌کند. این پارامترها به طور مشخص شامل فشار محیط، دمای محیط، رطوبت محیط، سر و صدا، تشعشع و غیره است. مثلاً تغییرات هوا از منابع خطایی است که باعث تغییرات نامطلوب در سازه می‌شود.

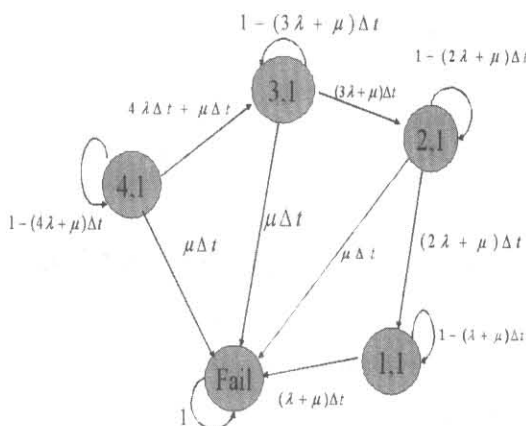
این مطلب یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار بر روی قابلیت اطمینان بالانس که طول زمان بر روی مشخصه‌های زیرمجموعه‌های آن تأثیر می‌گذارد. البته واضح است که عوامل ذکر شده فاکتوری را به روابط اضافه یا از آن کم نمی‌کند، بلکه با تأثیر بر عملکرد سیستم‌ها در محیط‌های یادشده باعث افزایش یا کاهش توانایی و قابلیت اطمینان خواهد شد.

۴- مدل‌سازی سیستم بالانس از دید قابلیت

اطمینان

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی بیان شد، یک سیستم بالانس از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است. خرابی

تغذیه است و عدد چهار هم ترکیب سالم پل‌های کرنش‌سنج را نشان می‌دهد. درحین کار سیستم بسته به خرابی‌های هر یک از اجزاء، حالت‌های مختلفی پیش خواهد آمد که در شکل (۶) نشان داده شده است.



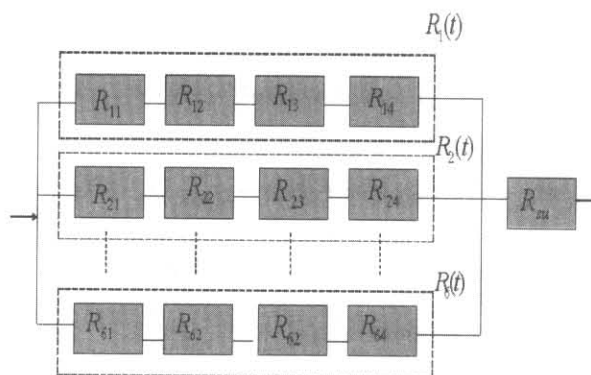
شکل ۶- مدل مارکوف سیستم بالانس.

روابط حاکم بر مدل مارکوف برای بدست آوردن قابلیت اطمینان بالانس به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 P_4(t + \Delta t) &= (1 - (4\lambda + \mu)\Delta t) P_4(t), \\
 P_3(t + \Delta t) &= (1 - (3\lambda + \mu)\Delta t) P_3(t) \\
 &\quad + 4\lambda\Delta t P_4(t), \\
 P_2(t + \Delta t) &= (1 - (2\lambda + \mu)\Delta t) P_2(t) \\
 &\quad + 3\lambda\Delta t P_3(t), \\
 P_1(t + \Delta t) &= (1 - (\lambda + \mu)\Delta t) P_1(t) \\
 &\quad + 2\lambda\Delta t P_2(t), \\
 P_f(t + \Delta t) &= \mu\Delta t P_4(t) + \mu\Delta t P_3(t) \\
 &\quad + \mu\Delta t P_2(t) + (\lambda + \mu) P_1(t).
 \end{aligned}$$

براساس معادلات فوق و شرایط اولیه $P_1(0) = 0$, $P_2(0) = 0$, $P_3(0) = 0$ و $P_4(0) = 1$ احتمال قرار گرفتن سیستم در هر یک از حالت‌های فوق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 P_4(s) &= e^{-(4\lambda + \mu)t}, \\
 P_3(t) &= -4e^{-(4\lambda + \mu)t} + 4e^{-(3\lambda + \mu)t},
 \end{aligned}$$



شکل ۵- بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان (RBD) بالانس شش مولفه.

۴-۱- محاسبات قابلیت اطمینان بالانس

با توجه به روابط اجزای سری و موازی که در بخش‌های قبل ارائه شده است و شکل‌های (۴) و (۵)، قابلیت اطمینان کل بالانس $R'(t)$ و به همراه منبع تغذیه $R(t)$ برابر است با:

$$R_{ij}(t) = R_{sg}(t) \cdot R_n(t) \cdot R_f(t) \cdot R_t(t), \quad (1)$$

$\forall i=1, \dots, 6; \forall j=1, \dots, 4$

$$R_i(t) = \prod_{j=1}^4 R_{ij}(t) \quad \forall i=1, \dots, 6, \quad (2)$$

$$R'(t) = 1 - \prod_{i=1}^6 (1 - R_i(t)), \quad (3)$$

$$R(t) = R'(t) * R_{su}(t). \quad (4)$$

۴-۲- مدل مارکوف سیستم بالانس

اگر λ را نرخ خرابی کرنش‌سنج و μ را نرخ خرابی منبع تغذیه در نظر بگیریم، مدل مارکوف سیستم بالانس را می‌توان به صورت شکل (۶) رسم کرد و تحلیل‌های مختلف قابلیت اطمینان سیستم، قابلیت دسترسی و ... را برای آن ارائه داد. هر حالت در مدل مارکوف سیستم به صورت زوج مرتب (i, j) مشخص شده است، که i بیانگر تعداد پل‌های سالم و j بیانگر سالم بودن منبع تغذیه است. همان‌طور که در شکل مشخص است ابتدا با توجه به روابط حاکم بر بالانس و سالم بودن تمام اجزاء، سیستم در حالت (۴و۱) قرار دارد، که یک نشان‌دهنده سالم بودن منبع

۵-۲- قابلیت اطمینان سازه

با توجه به اینکه ماکزیمم نیروی وارد شده به بالانس در بالاترین زاویه حمله و عدد ماخ در تونل باد برابر با ۴۵ کیلوگرم است، برای حصول اطمینان بیشتر نسبت به این سازه (که آلیاژی نزدیک به فولاد ST-۴۱۳۰ است) ماکزیمم نیرو ۵۰ کیلوگرم را وارد کرده‌ایم. برای بدست آوردن منحنی خستگی^۱ در محدوده $30 \leq f \leq 50$ ، در فرکانس ۸ هرتز و شرایط دما و رطوبت محیط، به سازه بالانس نیرو وارد کرده که چگونگی تکرار و افزایش نیرو در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- میزان نیروی اعمالی به بالانس برای بدست آوردن منحنی خستگی.

ردیف	طول عمر (N _F) به سیکل	تنش (σ) به kib/in ²	نیرو (F) به kg
۱	۳,۰۰۰,۰۰۰	۴۹/۸	۳۰
۲	۱,۲۰۰,۰۰۰	۴۹/۸	۳۰
۳	۴۰۰,۰۰۰	۵۵/۹۸	۳۵
۴	۱۵۰,۰۰۰	۵۵/۹۸	۳۵
۵	۲۰۰,۰۰۰	۶۳/۹۷	۴۰
۶	۶۰,۰۰۰	۶۳/۹۷	۴۰
۷	۴۰,۰۰۰	۷۱/۹۰	۴۵
۸	۶۰,۰۰۰	۷۱/۹۰	۴۵
۹	۴۵,۰۰۰	۷۹/۹۶	۵۰
۱۰	۳۰,۰۰۰	۷۹/۹۶	۵۰

در این جدول، براساس رابطه (۶) تنش خمشی (σ) محل نصب کرنش سنج به ازای نیروهای مختلف محاسبه شده است.

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad (6)$$

در رابطه فوق، M گشتاور خمشی بوده و برابر با نیرو ضربدر فاصله نوک بالانس تا محل نصب کرنش سنج است. I ممان اینرسی مقطع و C فاصله مرکز مقطع تا مرکز محل نصب کرنش سنج است. شکل (۸) نمودار خستگی این آلیاژ را به همراه نمودار خستگی استاندارد ST-4130 نشان می‌دهد [۹]. براساس این منحنی نرخ خرابی

1 - Fatigue

$$P_2(t) = \frac{6}{\lambda} e^{-(4\lambda+\mu)t} + \frac{6}{\lambda} e^{-(2\lambda+\mu)t} - \frac{12}{\lambda} e^{-(3\lambda+\mu)t}$$

$$P_1(t) = \frac{24}{(10\lambda+4\mu)} e^{-(\lambda+\mu)t} + \frac{24}{(10\lambda+4\mu)} e^{-(4\lambda+\mu)t}$$

$$- \frac{24}{(10\lambda+4\mu)} e^{-(2\lambda+\mu)t} - \frac{24}{(10\lambda+4\mu)} e^{-(3\lambda+\mu)t}$$

در نهایت، قابلیت اطمینان سیستم از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

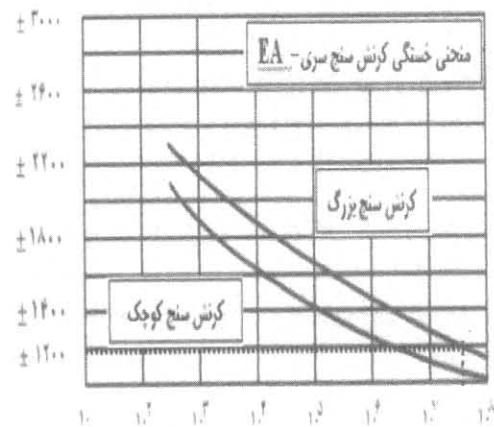
$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t). \quad (5)$$

۵-۳- ارزیابی مدل قابلیت اطمینان بالانس

همان‌طور که قبلاً بیان شد، سیستم بالانس از تعدادی جزء یا زیرمجموعه تشکیل شده است. در مطالعات قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان دو جزء کرنش سنج و سازه این مجموعه اهمیت بیشتری دارد. در ادامه چگونگی بدست آوردن آنها ارائه می‌شود.

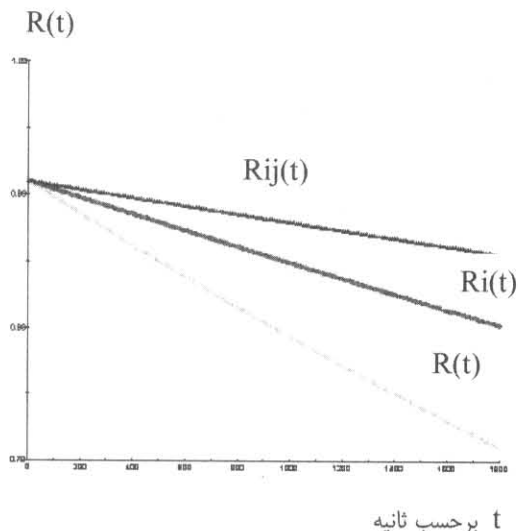
۵-۱- قابلیت اطمینان کرنش سنج

در این بالانس از کرنش‌سنج‌های بزرگ سری EA شرکت مؤرمنتز (Measurements) استفاده شده است [۱۰]. با توجه به میزان ماکزیمم تنش وارده روی کرنش‌سنج‌ها در بدترین شرایط بالانس، از روی نمودار طول عمر استاندارد این کرنش‌سنج‌ها که در شکل (۷) آمده است، نرخ خرابی آن را محاسبه کرده‌ایم. نتیجه محاسبات در جدول (۲) آمده است.



شکل ۷- نمودار طول عمر کرنش‌سنج سری EA [۹]

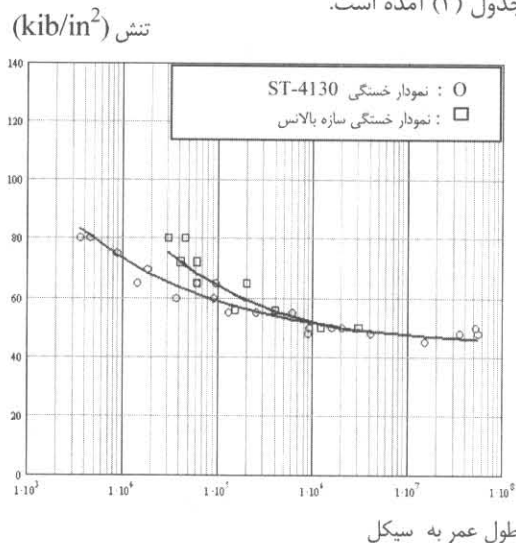
نمودار قابلیت اطمینان اجزای سیستم بالانس براساس پارامترهای جدول (۲) به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار sharpe [۱۱] در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۹- قابلیت اطمینان کرنش‌سنج $(R_{ij}(t))$ ، پل معادل کرنش‌سنج $(R_i(t))$ ، بالانس $(R(t))$.

با دقت در منحنی قابلیت اطمینان سیستم $(R(t))$ می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب حداکثر مدت زمان مأموریت (آزمایش در تونل باد) تأثیر به‌سزایی در قابلیت اطمینان سیستم دارد. مثلاً اگر مدت زمان آزمایش بیش از ۱۸۰۰ ثانیه (معادل نیم ساعت) باشد، قابلیت اطمینان سیستم به مقدار ۰/۷ کاهش یافته، که این مقدار افت در حد خطای مجاز نیست. منطقی به نظر می‌رسد تا در هر مأموریت تعداد آزمایش‌ها را کاهش داد تا با کاهش مدت زمان مأموریت، قابلیت اطمینان سیستم در حد قابل قبول باشد. از سوی دیگر نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان سیستم به مراتب از قابلیت اطمینان کرنش‌سنج‌ها و آرایش پل‌های کرنش‌سنج کمتر است و این به علت پائین بودن قابلیت اطمینان منبع تغذیه است، که از لحاظ قابلیت اطمینان به صورت سری با پل‌های کرنش‌سنج رفتار می‌کند. در نتیجه لازم است تا برای افزایش مدت زمان مأموریت از منبع تغذیه با قابلیت اطمینان بالاتر سود جست.

ماکزیمم و قابلیت اطمینان سازه محاسبه شده که در جدول (۲) آمده است.



شکل ۸- نمودار خستگی آلیاژ به همراه نمودار استاندارد خستگی فولاد ST-4130.

جدول ۲- نرخ خرابی قطعات بالانس.

ردیف	عنوان	نرخ خرابی λ برای بالانس و μ برای منبع تغذیه (به سیکل)
۱	کرنش‌سنج	2.5×10^{-8}
۲	سازه	10^{-5}
۳	کانکتور	2.1×10^{-5}
۴	منبع تغذیه	6.3×10^{-5}

متوسط زمان تا شکست اجزای تشکیل‌دهنده بالانس با جای‌گذاری پارامترهای جدول (۲) در روابط (۷) و (۴-۱)، محاسبه و در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- نرخ خرابی بالانس.

ردیف	عنوان	MTTF به سیکل
۱	یک کرنش‌سنج به همراه سازه و ...	۳۲۲۳۲/۱
۲	معادل یک پل	۱۴۴۳۸
۳	بالانس	۸۰۵۸
۴	بالانس + منبع تغذیه	۵۳۴۴/۷

5. Edwards, A.T., "Comparison of Strain Gauge and Fiber Optic Sensors on a Sting Balance in a Supersonic Wind Tunnel", MSc. Thesis, Virginia Univ., 2000.
6. Carlson, B.A. and Gisser, D.G. "Resistive Circuits, Electrical Eng. Concepts and Applications", 2nd Ed., Addison-Wesley, New York, 1990.
7. Lapriey, C. "Dependability: Basic Concepts and Terminology", Dependable Computing and Fault-Tolerant System Series, Vol. 5, Springer-Verlog, 1992.
8. Pullum, L. "Software Fault-Tolerance Techniques and Implementation", John Wiley, London, 2001.
9. DOD, Mil-HDBK-217F, "Electronics Reliability Design Handbook", 1984.
10. www.vishay.com/company/brands/measurements-group/.
11. Trivedi, K. "Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Application", 2nd Ed., Wiley-Interscience, 2002.

پیوست: قابلیت اتکاپذیری و اطمینان سیستم

۱- قابلیت اتکاپذیری و تحمل پذیری خطا

کیفیت ارائه یک سرویس در سیستمها و اعتماد به سرویسی که آن سیستم ارائه می‌دهد، قابلیت اتکاپذیری^۱ نام دارد [۳]. تکنیک‌های تحمل‌پذیری خطا به عنوان مهمترین ابزار و روش برای ایجاد و توسعه قابلیت اتکاپذیری سیستم‌های مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل (۱۰) جایگاه این بحث را در طبقه‌بندی مباحث اتکاپذیری نشان می‌دهد [۳]. تکنیک‌های تحمل‌پذیری خطا می‌توانند شرایطی را فراهم کنند که سیستم حتی در صورت بروز خطا بتواند به وظیفه خود عمل کند. راه اضافه کردن قابلیت تحمل‌پذیری خطا به سیستم، افزونگی است که خود به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شود [۴]:

- ۱- افزونگی سخت‌افزار
- ۲- افزونگی نرم‌افزار
- ۳- افزونگی اطلاعات
- ۴- افزونگی زمان

۶- نتیجه‌گیری

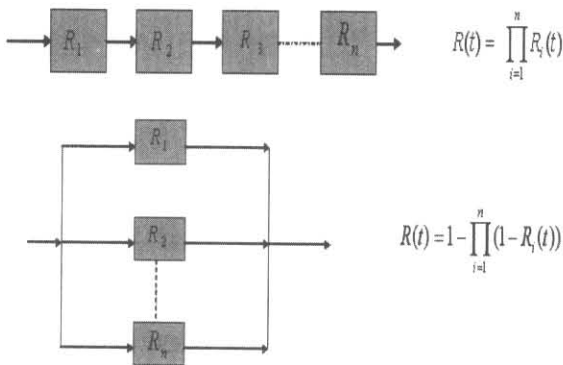
از آنجاکه آزمون‌های تونل‌باد فرآیندی پیچیده، طولانی مدت، پرهزینه و دارای خطرات جانبی (صدای زیاد، مخازن پرفشار و ...) است. این فرآیند باید با نهایت دقت، ایمنی و قابلیت اطمینان بالا انجام گیرد تا از تکرار انجام آزمون‌ها جلوگیری شود. این مقاله، به بررسی و تحلیل ساختار بالانس و منابع خطای آن پرداخته است. بالانس از دید قابلیت اطمینان مدل‌سازی شده و براساس پارامتر قابلیت اطمینان اجزای تشکیل‌دهنده آن مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته و عملکرد آن در طی مدت زمان سی دقیقه شبیه‌سازی شده است. نتیجه مهمی که از این ارزیابی بدست آمده نشان داده است که به دلیل افت شدید قابلیت اطمینان حس‌گرهای نیرو و گشتاور در اثر گذشت زمان، داده‌های آزمون‌های تونل‌باد در ابتدا و انتهای آزمون از یک ضریب قطعیت قابل قبول برخوردار نبوده و سبب بوجود آمدن تحلیل‌های ناصحیح روی مدل مورد آزمون شده و احتمال بوجود آمدن خسارات جبران‌ناپذیر مالی و جانی را به همراه دارد. این امر نقش عمده‌ای در کاهش اعتبار و اعتماد صنایع به تونل‌باد خواهد داشت. به همین دلیل آزمون اجسام پرنده در حد امکان باید سریع‌تر به پایان رسیده و نهایتاً از پانزده دقیقه طولانی‌تر نگردد، که این امر مستلزم داشتن سیستم‌های اندازه‌گیری و اخذ اطلاعات مناسب با قابلیت اطمینان بالا است.

مراجع

1. Harper, J.J. and Pope, A. "Low Speed Wind Tunnel Testing", Third Edition, John Wiley, New York, 1999.
2. Volluz, R.J., "Handbook of Supersonic Aerodynamics, Section 20, Wind Tunnel Instrumentation and Operation", NAVORD Report 1488, Vol. 6, 1991.
3. Avizienis, A. and Laprie, J.C., "Dependable Computing: From Concepts to Design Diversity", IEEE J., Vol. 74, No.5, pp. 629-638, 1986.
4. Liberato, F., Melhem, R. and Mosse, D. "Tolerance to Multiple Transient Faults for Aperiodic Tasks in Hard Real-time Systems", IEEE Trans. on Computers, Vol. 49, No. 9, 2000.

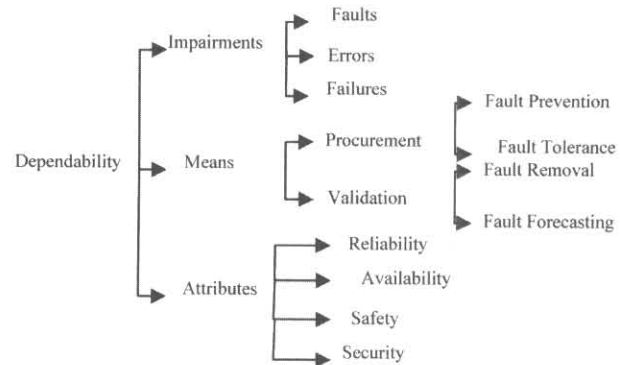
۳- قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان مشخصه‌ای است که کارایی یک سیستم را از لحاظ عمر مفید آن بیان می‌کند [۴]. با معلوم بودن قابلیت اطمینان می‌توان به این سؤال پاسخ داد که «با چه احتمالی یک سیستم در فاصله بین دو سرویس به خوبی کار خواهد کرد؟» با توجه به این تعریف، چهار موضوع عمده احتمال، پیوستگی عملکرد، زمان و شرایط عملکرد را در آن خواهیم یافت. این موضوعات نقش اساسی در قابلیت اطمینان داشته و در محاسبات مربوط به قابلیت اطمینان تأثیرگذار هستند [۷]. باید توجه داشت که بر خلاف سایر مشخصه‌های سیستم، که به طور آبی قابل اندازه‌گیری می‌باشند، قابلیت اطمینان را باید با جمع‌آوری داده‌های آماری که از چندین سیستم مشابه و در طول زمان جمع‌آوری شده‌اند، مشخص کرد. به همین دلیل جمع‌آوری این اطلاعات بار اقتصادی نسبتاً زیادی را تحمیل می‌کنند [۴]. در تحلیل سیستم و ترسیم روابط بین زیر مجموعه‌های آن حالت‌های مختلفی پیش خواهد آمد که در نهایت به صورت ترکیبی از دو حالت ارتباط سری زیر مجموعه‌ها و ارتباط موازی زیرمجموعه‌ها تبدیل خواهد شد. شکل (۱۲) شبیه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌های سری و موازی را نشان می‌دهد [۴ و ۸].



شکل ۱۲- قابلیت اطمینان سیستم در حالت‌های سری و موازی.

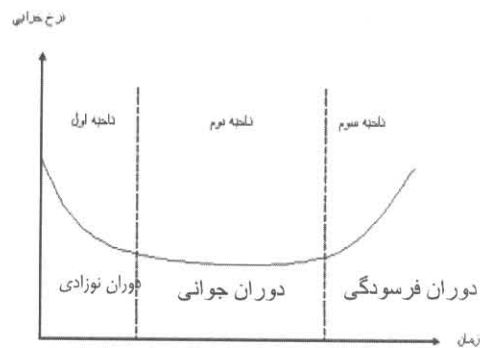
پارامتر مترادف قابلیت اطمینان، متوسط زمان تا شکست، (Mean Time To Failure) MTTF است. رابطه زیر این مطلب را نشان می‌دهد:



شکل ۱۰- قابلیت اتکاپذیری و مباحث مرتبط به آن [۳].

۲- دسته‌بندی خرابی‌ها

خرابی هر سیستمی ناشی از خرابی زیر سیستم‌ها و یا قطعات آن سیستم است. ارزیابی کامل قابلیت اطمینان مستلزم تخمین سه گروه مختلف خرابی است که شامل خرابی‌های اولیه، خرابی‌های دوره عمر مفید و خرابی‌های دوران فرسودگی است [۴]. علت بالابودن نرخ خرابی در زمان‌های ابتدایی به علت وجود اشکالاتی در زمان نصب و مونتاژ و یا وجود قطعات ضعیف است که در شروع کار سیستم، خود را نشان می‌دهند. البته عدم آشنایی کاربر به سیستم نیز می‌تواند باعث بالا رفتن نرخ خرابی باشد. از طرف دیگر، خرابی سیستم می‌تواند به علت سپری شدن عمر مفید قطعات تشکیل دهنده سیستم باشد. قسمت مهم، منحنی که شایسته توجه است، قسمتی است که در آن نرخ خرابی به حداقل خود رسیده و تقریباً ثابت است. در اغلب سیستم‌ها نرخ خرابی مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود و به وسیله کارخانه‌های سازنده ارائه می‌شود.



شکل ۱۱- دوره‌های مختلف خرابی یک سیستم.

$$MTTF = E(R(t)) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (7)$$

متداولترین تابع قابلیت اطمینان، تابع نمایی به صورت رابطه (۸)، که در آن λ نرخ شکست است. در این صورت رابطه (۹) نیز برقرار خواهد بود [۳ و ۸].

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$