



محاسبه قابلیت اطمینان و دسترس پذیری سیستم پیل سوختی متانولی با رویکرد زنجیره مارکوف

حمیدرضا سراج^۱، عاطفه عباسپور^۱، حسین یوسفی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

* صندوق پستی تهران، ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، Hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

پیل سوختی یکی از جدیدترین فناوری‌های تولید انرژی پاک است که علاقمندی به استفاده از آن رو به افزایش می‌باشد. از آنجایی که قابلیت اطمینان و دسترس پذیری از جمله شاخص‌های مهم در ارزیابی عملکرد سیستم و تجهیزات مختلف می‌باشد، در این مقاله قابلیت اطمینان و دسترس پذیری سیستم پیل سوختی متانولی مستقیم با توجه به رویکرد زنجیره مارکوف محاسبه شده است. به این منظور پس از تعیین نرخ خرابی هر یک از قطعات این سیستم، قابلیت اطمینان مجموعه به صورت تابعی از زمان محاسبه شده است. همچنین نتایج استفاده از زنجیره مارکوف و شبیه‌سازی در نرم افزار RAM commander نیز نشان می‌دهد که سیستم پیل سوختی متانولی بیش از ۹۹ درصد مواقع در دسترس است. در انتها با بررسی‌های انجام گرفته مشخص شد که این سیستم ۹۶ درصد مواقع با تمام ظرفیت، بیش از ۳ درصد مواقع نیمه ظرفیت و به احتمال کمتر از ۱ درصد غیرفعال است.

کلیدواژه‌گان: قابلیت اطمینان، دسترس‌پذیری، زنجیره مارکوف، پیل سوختی

Calculation the reliability and availability of a Methanol fuel cell system with the Markov chain approach

HamidReza Seraj¹, Atefeh Abbaspour¹, Hossein Yousefi^{2*}

1-, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, Hosseinyousefi@ut.ac.ir

Received: October 2018 Accepted: November 2018

Abstract

The fuel cell system is one of the leading clean energy technologies which the interests in its applications are increasing. Since reliability and availability are important indicators to evaluate systems and equipment performance, in this paper reliability and availability of the direct methanol fuel cell is calculated based on the Markov chain approach. For this purpose, after determining the failure rate of each component of the system, the reliability is calculated as a function of time. Also, the Markov chain and simulation in the RAM commander software results indicate that the direct methanol fuel cell is available more than 99 percent of the time. Finally, it was found that the system was 96 percent of the time at full capacity, more than 3 percent at half capacity and less than 1 percent inactive.

Keywords: reliability, availability, Markov chain, fuel cell



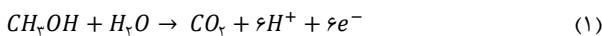
۱- مقدمه

نیز روش‌هایی جهت بهبود عملکرد الکتریکی و قابلیت اطمینان پیل سوختی ارائه کرده‌اند.

در این مقاله پس از بررسی مختصر مکانیزم عملکرد پیل سوختی متانولی مستقیم، قابلیت اطمینان این سیستم با توجه به نرخ خرابی اجزاء آن و با استفاده از توزیع نمایی به صورت تابعی از زمان محاسبه شده است. همچنین پس از پیاده‌سازی این سیستم در نرم افزار RAM commander، میزان دسترس‌پذیری سیستم با رویکرد زنجیره مارکوف به‌دست آمده است. در انتها نیز احتمالات حدی هر یک از حالت‌های تمام‌ظرفیت، نیمه‌ظرفیت و از کار افتادگی پیل سوختی محاسبه شده است.

۲- سیستم پیل سوختی

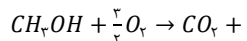
پیل سوختی اساساً و سیله‌ای است که سوخت (مانند هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، بنزین و...) و اکسیدان (مانند هوا و اکسیژن) را به برق، آب و حرارت تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر مشابه یک باتری است با این تفاوت که نیاز به شارژ ندارد. همچنین تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل تأمین شود، سیستم کار خواهد کرد. پیل سوختی شامل الکترودهای کاتد و آند است. این الکترودها با یک لایه‌ی الکترولیت جامد یا مایع، از هم جدا می‌شوند. سوخت و اکسید کننده به ترتیب به الکترودهای آند و کاتد تزریق می‌شوند. در آند، واکنش اکسایش (فرآیندی که در آن، ماده الکترون از دست می‌دهد) و در کاتد، واکنش کاهش (فرآیندی که در طی آن الکترون به ماده منتقل می‌شود) صورت می‌گیرد. الکترولیت به کار رفته در پیل متانول مانند پیل سوختی پلیمری، غشایی از جنس پلیمر و بیشتر پرفلورو سولفونیک اسید می‌باشد. الکترودها با پایه کربنی ساخته می‌شوند و در لایه کاتالیستی کاتد از پلاتین استفاده می‌شود. در این نوع پیل سوختی محلول متانول وارد محفظه آند شده و پس از نفوذ از لایه‌ی گازی، در سطح کاتالیست واکنش داده و طبق رابطه (۱) یون هیدروژن و الکترون به همراه دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود [۱۰].



پروتون‌ها از طریق الکترولیت و الکترون‌ها از طریق مدار خارجی به کاتد می‌رسند. در سطح لایه کاتالیستی کاتد، با اکسیژن ورودی از محفظه کاتد طبق رابطه (۲) واکنش الکتروشیمیایی داده و آب تولید می‌شود [۱۰].



واکنش کلی پیل، در رابطه (۳) مشخص شده است [۹]:



شامل سه زیرسیستم اصلی است (شکل ۱):

(۱) مخزن سوخت: این مخزن، یک سیستم بزرگ ذخیره متانول است که شامل بخش ذخیره‌سازی و شیر اطمینان می‌باشد.

منابع انرژی در جهان برای مقاصدی از جمله حمل‌ونقل، تولید الکتریسیته، گرمایش منازل و فعالیت‌های صنعتی به کار می‌روند. امروزه حدود ۸۰ درصد از این انرژی اولیه به وسیله سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود [۱]. از آنجایی که سوخت‌های فسیلی از عمده منابع تولید کننده گازهای گلخانه‌ای هستند، بنابراین برای پیاده‌سازی سیاست‌های مبتنی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دولت‌ها، نیاز به منابع انرژی با قابلیت اطمینان بالا، پاک و دسترس‌پذیر احساس می‌شود. هیدروژن به عنوان سوختی پاک، می‌تواند بخشی از نیاز حمل‌ونقل به سوخت را تأمین کند. با کاربرد هیدروژن به عنوان پیل سوختی در وسایل نقلیه می‌توان مصرف سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن انتشار گازهای گلخانه‌ای را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. بر اساس تحقیقات انجام شده در ایالات متحده آمریکا اگر فقط ۲۲ درصد اتومبیل‌ها به پیل سوختی مجهز شوند، روزانه معادل حدود ۳ میلیون بشکه در مصرف انرژی این کشور صرفه‌جویی می‌شود [۲]. با این مقایسه ساده می‌توان دریافت که علاقه‌مندی به استفاده از پیل‌های سوختی به سرعت رو به افزایش است. در میان انواع آن، پیل سوختی متانولی مستقیم یک فناوری نوظهور است که دارای مزیت‌هایی از جمله چگالی قدرت بالا، دما و فشار عملکرد پایین و سادگی ساختار می‌باشد [۳].

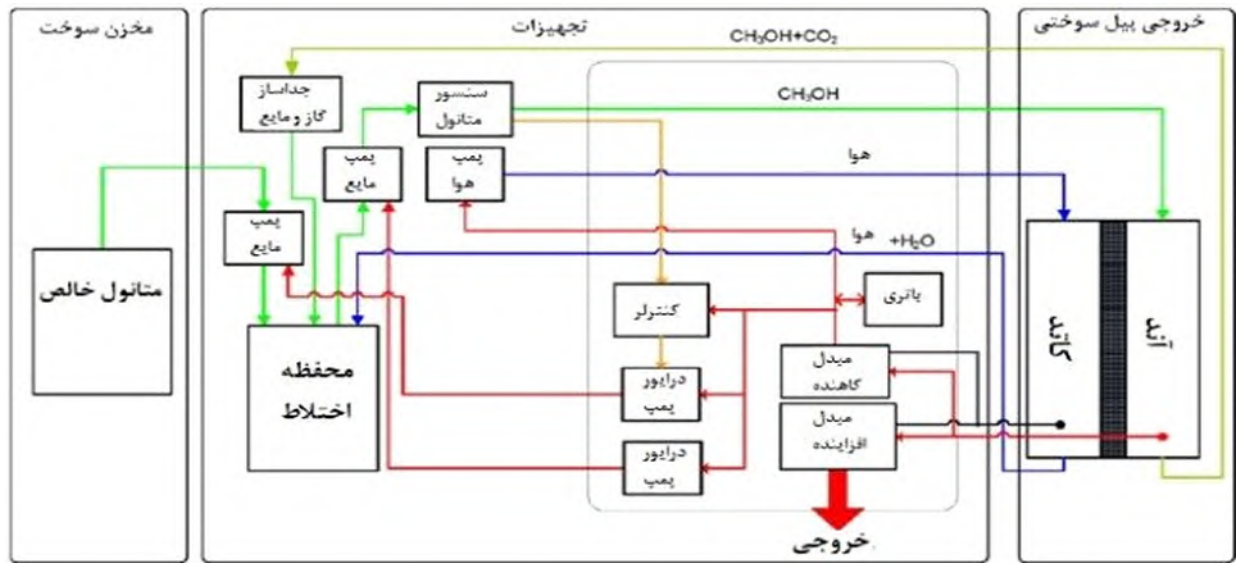
از جمله تحلیل‌هایی که همواره می‌توان بر روی سیستم‌های مختلف پیاده کرد، تحلیل قابلیت اطمینان و محاسبه دسترس‌پذیری سیستم است. تحلیل قابلیت اطمینان و ارائه مدل مناسب برای بیان ارتباط بین اجزاء مختلف سیستم، از اهمیت فراوانی برخوردار است. قابلیت اطمینان بر اساس احتمال وقوع خرابی تعریف می‌شود. در واقع می‌بایست ابتدا اجزای سیستم شناخته شود و خرابی‌های محتمل برای هر یک از اجزا شناسایی گردد. پس از این که نرخ وقوع خرابی در کل سیستم محاسبه شد، می‌توان احتمال کارکرد سیستم را در چارچوب محدودیت‌هایش به دست آورد. در همین زمینه، مطالعاتی در رابطه با تحلیل قابلیت اطمینان پیل سوختی انجام شده است. آیدینلی و همکاران [۴] پژوهشی در زمینه ارزیابی قابلیت اطمینان پیل سوختی با قطعات و سیستم غیر قابل تعمیر انجام دادند. آن‌ها در این مقاله از مدل توزیع نمایی برای تخمین نرخ خرابی و قابلیت اطمینان قطعات سیستم استفاده کردند. تانریون و همکاران [۵] بر روی مدلسازی قابلیت اطمینان غشاء پروتونی در پیل سوختی کار کردند. همچنین وایتلی و همکاران [۶] تحقیقاتی بر روی قابلیت اطمینان غشاء پیل سوختی با استفاده از تکنیک شبکه‌های پتری انجام داده‌اند. در مقالات دیگری روش‌های کمی و کیفی برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم پیل سوختی متانولی مستقیم ارائه شده است [۷، ۸]. این روش‌ها شامل تحلیل درخت خطا با تمرکز بر چهار دلیل اصلی نقص در عملکرد سیستم، همچنین آنالیز عوامل شکست و آثار آن با هدف شناسایی حالت‌های خرابی، شدت اثر و نرخ وقوع آن‌ها می‌باشند. البربر و همکاران [۹]



^۱Fuel tank

^۲Fault Tree
^۳FMEA

۲) دستگاه‌ها! این بخش توسط مخزن سوخت تغذیه می شود و شامل تمام تجهیزات فرآیندی که مورد نیاز سیستم است می باشد. این تجهیزات



شکل ۱ نمای کامل سیستم پیل سوختی متانولی [۸]

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (7)$$

مقدار نهایی قابلیت اطمینان سیستم $R_S(t)$ برای حالتی که تمام اجزا به صورت متوالی قرار دارند از حاصلضرب قابلیت اطمینان تک تک اجزا بدست می آید. برای سیستم پیل سوختی متانولی که مجموعاً ۱۲ عضو وجود دارد قابلیت اطمینان کل از فرمول (۸) بدست می آید.

$$R_S(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_{11}(t) \times R_{12}(t) \quad (8)$$

در رابطه (۸) اجزای ۱ تا ۱۲ به ترتیب عبارتند از:

۱. مخزن سوخت
۲. مدل کاهنده (buck)
۳. درایور پمپ ۱
۴. پمپ مایع ۱
۵. جدا ساز گاز و مایع
۶. پمپ هوا
۷. محفظه اختلاط
۸. درایور پمپ ۲
۹. پمپ مایع ۲
۱۰. کنترل حساسیت
۱۱. سنسور متانول
۱۲. خروجی پیل سوختی

به این ترتیب با استفاده از فرمول (۶) قابلیت اطمینان اجزا محاسبه گردیده و سپس قابلیت اطمینان کل بدست می آید. همچنین مقادیر نرخ خرابی در جدول ۱ آورده شده و زمان در نظر گرفته شده نیز، ۵۰۰۰ ساعت فرض می شود. در شکل ۳ و ۴ تغییرات قابلیت اطمینان برای تک تک اجزا و سپس برای کل

عبارتند از پمپ ها، مخلوط کن، جدا ساز و کمپرسور، و همچنین تجهیزات کمکی مانند خطوط لوله، اتصالات الکتریکی، سنسورها و کنترلرها. ۳) خروجی پیل سوختی! این بخش منبع قدرت سیستم است که از انرژی شیمیایی آزاد شده انحلال متانول برق تولید می کند.

۳- محاسبات قابلیت اطمینان

برای تحلیل قابلیت اطمینان سیستم، ابتدا بلوک دیاگرام سیستم کلی در شکل ۲ رسم شده است. در این شکل تمام تجهیزات به صورت سری در نظر گرفته شده اند. همچنین فرض بر این است که تجهیزات سیستم عملکرد نرمال داشته باشند و مقادیر نرخ خرابی در طول مدت عملکرد ثابت باشند. در این صورت از توزیع نمایی برای مدل کردن نرخ خرابی سیستم استفاده می شود. یکی از مزایای تابع نمایی این است که در صورتی که نرخ خرابی ثابت باقی بماند این تابع نسبت به عمر قطعات مستقل می باشد [۱۱]. فرمول های (۴) و (۵) نشان دهنده تابع توزیع احتمالی $f(t)$ و تابع توزیع تجمعی $F(t)$ برای توزیع نمایی می باشند [۱۱].

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5)$$

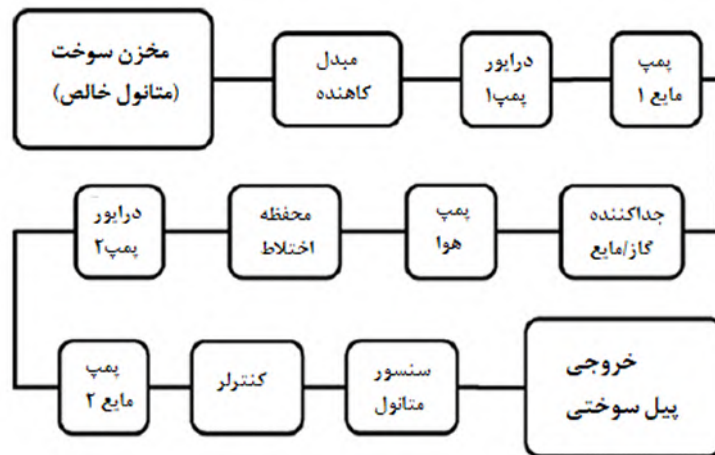
بنابراین قابلیت اطمینان $R(t)$ را می توان به صورت فرمول (۶) بدست آورد.

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

همچنین تابع نرخ خرابی $h(t)$ در فرمول (۷) نشان داده شده است [۱۱] و به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که نرخ خرابی λ در توزیع نمایی مقدار ثابتی است.

سیستم در بازه زمانی عملکرد ۰ تا ۵۰۰۰ ساعت نشان داده شده است.





شکل ۲. بلوک دیاگرام سیستم پیل سوختی متانولی [۸]

جدول ۱. نرخ خرابی اجزا سیستم [۱۲]

اجزا	نرخ خرابی (λ)
مخزن سوخت	$5/42 \times 10^{-8}$
مبدل کاهنده (buck)	$1/11 \times 10^{-6}$
دراپور پمپ ۱	$1/93 \times 10^{-6}$
پمپ مایع ۱	$1/22 \times 10^{-7}$
جدا ساز گاز و مایع	$6/96 \times 10^{-7}$
پمپ هوا	$3/63 \times 10^{-7}$
محفظه اختلاط	$1/38 \times 10^{-6}$
دراپور پمپ ۲	$1/93 \times 10^{-6}$
پمپ مایع ۲	$1/22 \times 10^{-7}$
کنترل حساسیت	$1/16 \times 10^{-6}$
سنسور متانول	$3/31 \times 10^{-6}$
خروجی پیل سوختی	$7/78 \times 10^{-6}$

فضای حالت استفاده می‌شود و در آن همه‌ی حالت‌های ممکن برای سیستم و طرق تغییر هر حالت همراه با آهنگ تغییر آن ارائه می‌شود [۱۱]. عملکرد سیستم پیل سوختی متانولی مستقیم به دو عامل وابسته است: (۱) تغذیه هوا به سمت کاتد (۲) تغذیه متانول به سمت آنود. سایر اجزاء در واقع وظیفه تامین متانول و هوای مورد نیاز در سیستم را دارند. برای مثال، تغذیه اکسیژن مورد نیاز از طریق پمپ‌های هوا انجام می‌شود و انرژی مورد نیاز این پمپ‌ها هنگام عملکرد از طریق باتری و مبدل کاهنده (BUCK) تامین می‌شود. به همین شکل تغذیه متانول با غلظت مناسب بر عهده سنسور متانول می‌باشد.

بنابراین، با توجه به توضیحات ارائه شده، ماتریس انتقال این سیستم در رابطه (۹) مشخص شده است.

$$M = \begin{bmatrix} -\lambda_2 - \lambda_1 & \mu_2 & \mu_4 & \mu_1 & \mu_3 \\ \lambda_2 & -\lambda_4 - \mu_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_4 & -\mu_4 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & 0 & 0 & -\lambda_3 - \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_3 & -\mu_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

در ماتریس انتقال، حالت‌های ۱ تا ۴ به ترتیب نشان دهنده تغذیه نامناسب هوا، غلظت نامناسب متانول، عدم تغذیه هوا و عدم تغذیه متانول هستند. همچنین نرخ خرابی و تعمیر هر یک از حالت‌های سیستم با توجه به نرخ تعمیر و خرابی تجهیزات مربوطه، مطابق جدول ۲ محاسبه شده است. سپس با توجه به ماتریس انتقال سیستم، فضای حالت مدل مارکوف در نرم‌افزار RAM commander پیاده سازی شده است (شکل ۵). با توجه به شیوه سازی انجام شده توسط نرم افزار مقادیر دسترس پذیری، $MTBF$ ، $MTTR$ ، $MTTF$ در جدول ۳ مشخص شده‌اند. همچنین احتمالات حدی هر یک از حالت‌های

۴- محاسبه دسترس پذیری سیستم با رویکرد زنجیره مارکوف

از جمله تحلیل‌هایی که می‌توان بر روی سیستم‌های مختلف پیاده کرد، تحلیل دسترس‌پذیری سیستم می‌باشد. احتمال دسترس‌پذیری از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌ها و تجهیزات می‌باشد. با در اختیار داشتن دسترس‌پذیری سیستم اساساً نتایج دقیق تحلیل سیستم‌ها، متفاوت با حالت معمول خود خواهد شد. در این بخش برای محاسبه دسترس‌پذیری سیستم، مدل زنجیره مارکوف استخراج شده است.

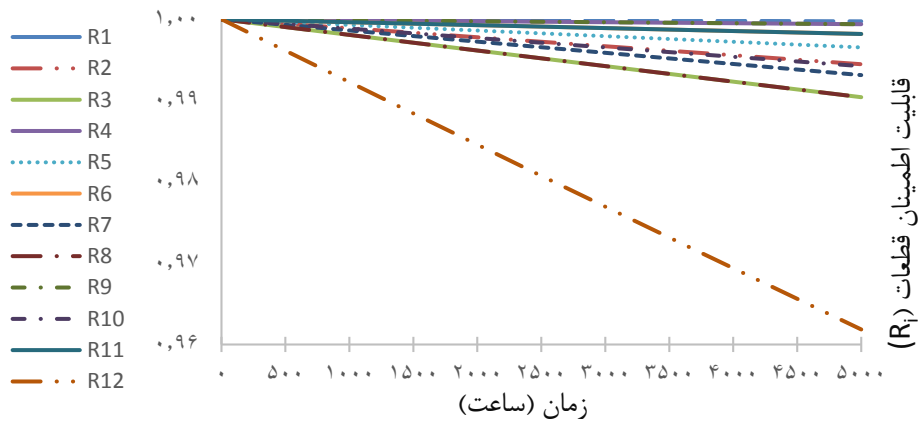
روش مارکوف برای مدل‌سازی رفتار اتفاقی سیستم‌هایی قابل استفاده است که به طور پیوسته و یا ناپیوسته نسبت به زمان و یا در فضای حالت در تغییر هستند. همچنین رفتار سیستم‌های مذکور باید نمایانگر فقدان حافظه باشد. یکی از روش‌های تحلیل زنجیره مارکوف، روش فضای حالت است. به منظور تسهیل در تحلیل فرایندهای پیوسته و ناپیوسته مارکوف از نمودار

¹Mean Time Between Failures

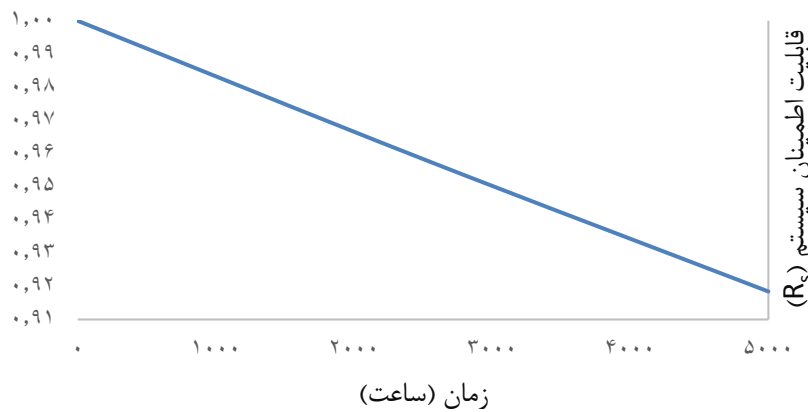
²Mean Time To Failure
³Mean Time To Repair



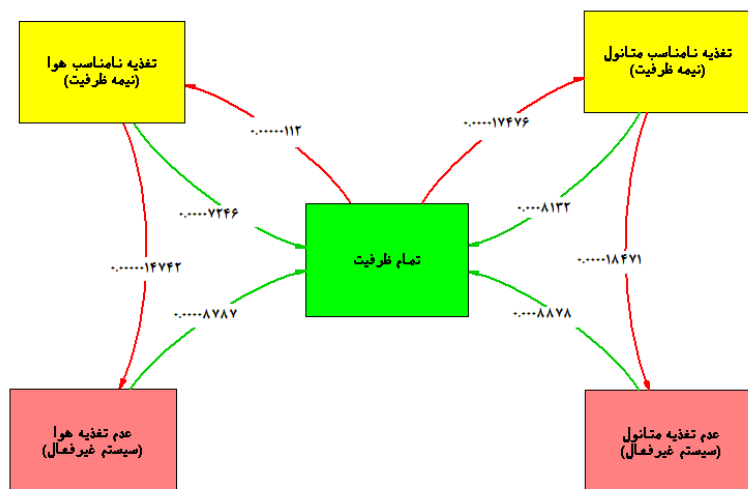
تمام ظرفیت، نیمه ظرفیت و عدم فعالیت سیستم مطابق جدول ۴ به دست آمده است.



شکل ۳ تغییرات قابلیت اطمینان اجزای پیل سوختی طی ۵۰۰۰ ساعت عملکرد



شکل ۴ تغییرات قابلیت اطمینان سیستم پیل سوختی در طول ۵۰۰۰ ساعت عملکرد



شکل ۵ مدل مارکوف سیستم پیل سوختی متانولی نرم افزار RAM commander



جدول ۲ نرخ خرابی و تعمیر حالت‌های سیستم

حالت‌های سیستم	نرخ خرابی (λ)	نرخ تعمیر (μ)
۱	$1/112 \times 10^{-6}$	$7/246 \times 10^{-5}$
۲	$1/7476 \times 10^{-6}$	$8/132 \times 10^{-4}$
۳	$1/4742 \times 10^{-6}$	$8/787 \times 10^{-5}$
۴	$1/7471 \times 10^{-5}$	$8/878 \times 10^{-4}$

زنجیره مارکوف، میزان دسترس پذیری سیستم ۰/۹۹۹۳ به دست آمد. همچنین احتمالات حدی هر یک از وضعیت‌های تمام ظرفیت، نیمه ظرفیت و از کار افتاده به ترتیب معادل ۰/۹۶۴۵۷، ۰/۰۳۴۷۶ و ۰/۰۰۰۶۶ محاسبه شد.

۶- منابع

- [1] EIA, U., *Energy Information Administration (2016) International Energy Outlook 2016*. 2016.
- [2] Ehsani, M., et al., *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. 2018: CRC press.
- [3] Dicks, A. and D.A.J. Rand, *Fuel cell systems explained*. 2018: Wiley Online Library.
- [4] Aydinli, G., N. Sisworahardjo, and M. Alam. *Reliability and sensitivity analysis of low power portable direct methanol fuel cell*. in *EUROCON, 2007. The International Conference on "Computer as a Tool"*. 2007. IEEE.
- [5] Tanrioven, M. and M. Alam, *Reliability modeling and analysis of stand-alone PEM fuel cell power plants*. *Renewable Energy*, 2006. 31(7): p. 915-933.
- [6] Whiteley, M., et al., *Advanced reliability analysis of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells using Petri-Net analysis and fuel cell modelling techniques*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015. 40(35): p. 11550-11558.
- [7] Deodath, R., J. Jhingoorie, and C. Riverol, *Direct methanol fuel cell system reliability analysis*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017. 42(16): p. 12032-12045.
- [8] Sisworahardjo, N., M. Alam, and G. Aydinli, *Reliability and availability analysis of low power portable direct methanol fuel cells*. *Journal of power sources*, 2008. 177(2): p. 412-418.
- [9] Albarbar, A. and M. Alrweq, *Effective Technique for Improving Electrical Performance and Reliability of Fuel Cells*. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2017. 8(4): p. 1868-1875.
- [10] Schultz, T., *Experimental and model-based analysis of the steady-state and dynamic operating behaviour of the direct methanol fuel cell (DMFC)*. 2004, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [11] Billinton, R. and R.N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*. 1992: Springer.
- [12] AGENCY, I.A.E., *Survey of Ranges of Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment*. IAEA TECDOC Series. 1989, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.

جدول ۳ شاخص‌های دسترس پذیری سیستم

شاخص	مقدار
دسترس پذیری	۰/۹۹۹۳۳۵
MTBF (ساعت)	۲۵۲۶۸۴۵
MTTF (ساعت)	۲۵۲۵۱۶۵
MTTR (ساعت)	۱۶۸۰

جدول ۴ احتمالات حدی وضعیت‌های مختلف سیستم

وضعیت	احتمال
تمام ظرفیت	۰/۹۶۴۵۷
تغذیه نامناسب متانول - نیمه ظرفیت)	۰/۰۲۰۲۷
تغذیه نامناسب هوا - نیمه ظرفیت)	۰/۰۱۴۴۹
عدم تغذیه متانول - (سیستم غیرفعال)	۰/۰۰۰۴۲
عدم تغذیه هوا - (سیستم غیر فعال)	۰/۰۰۰۲۴

۵- نتیجه گیری

یکی از تحلیل‌هایی که همواره می‌توان بر روی سیستم‌های مختلف پیاده کرد، تحلیل قابلیت اطمینان و محاسبه دسترس پذیری سیستم است. تحلیل قابلیت اطمینان و ارائه مدل مناسب برای بیان ارتباط بین اجزاء مختلف سیستم، از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این مقاله پس از بررسی عملکرد پیل سوختی متانولی مستقیم، بلوک دیاگرام سیستم برای ارزیابی قابلیت اطمینان ترسیم شد. برای مدل کردن قابلیت اطمینان سیستم، با توجه به نرخ خرابی هر یک از اجزاء در طول فرآیند، از توزیع نمایی استفاده و در انتها قابلیت اطمینان سیستم به صورت تابعی از زمان مشخص شد. پس از پیاده‌سازی این سیستم طبق مدل

