

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/337909336>

Reliability and Sensitivity Evaluation of an AUV through Fault Tree Model with Uncertainty Consideration

Article in *Journal of Marine Science and Technology* · December 2019

CITATION

1

READS

201

4 authors:



Koorosh Aslansefat
University of Hull

74 PUBLICATIONS 471 CITATIONS

SEE PROFILE



Gholam Reza Latif-Shabgahi
Shahid Beheshti University

72 PUBLICATIONS 624 CITATIONS

SEE PROFILE



Mojtaba Kamarlouei
Technical University of Lisbon

48 PUBLICATIONS 479 CITATIONS

SEE PROFILE



Mehrdad Mohammadi
Power and Water University of Technology

8 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

SEE PROFILE

ارزیابی قابلیت اطمینان و حساسیت ربات زیرآبی خودمختار از روی مدل درخت عیب آن با لحاظ عدم قطعیت‌ها

چکیده

وقوع عیب و به تبع آن از دست دادن ربات زیرآبی خودمختار گاه‌ها خسارات غیرقابل جبرانی را به صاحبان آن‌ها وارد می‌کند. شناخت و دسته‌بندی این عیوب اطلاعاتی مفید برای طراحان ربات زیرآبی به منظور تعیین گلوگاه‌های سیستم و رفع آن‌ها ارائه می‌کند. این مقاله انواع عیوب اساسی در ربات زیرآبی خودمختار را شناسایی و دسته‌بندی کرده و از روی توپولوژی سیستم، درخت عیب ربات زیرآبی را که برای شناسایی مسیرهای بحرانی، تشخیص اجزای بانفوذ در از کارافتادگی سیستم و شناسایی گلوگاه‌های آن به کار می‌رود، می‌سازد. آنگاه قابلیت اطمینان ربات زیرآبی را از روی درخت عیب آن در حضور/عدم حضور "عدم قطعیت‌ها" ارزیابی کرده و حساسیت رویداد از کارافتادن کامل ربات زیرآبی را نسبت به تغییرات احتمال وقوع عیب در اجزای آن از روش جدیدی محاسبه می‌کند. قابلیت اطمینان ربات زیرآبی خودمختار با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مذکور به کمک منطق فازی محاسبه‌شده و بدین ترتیب تخمین واقعی‌تری از قابلیت اطمینان ربات به دست آمده است. با استفاده از نتایج حاصل از بخش اول کار، می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را در هر بازه زمانی دلخواه ارزیابی کرد و زمان تعمیرات پیشگیرانه و پیشبینانه را تعیین کرد. با استفاده از نتایج حاصل از ارزیابی حساسیت هم می‌توان تأثیر هر کدام از زیرسیستم‌ها و اجزا را در خرابی سیستم مشخص کرده و بهینه ترین روش را برای افزایش قابلیت اطمینان شناسایی کرد.

واژگان کلیدی

ربات زیرآبی خودمختار، احتمال خرابی، حساسیت، درخت عیب، قابلیت اطمینان، منطق فازی

۱- مقدمه

کاربردهای فراوان در حوزه‌های مختلف نظیر صنایع نظامی، اقیانوس‌شناسی، و نفت ربات‌های زیرآبی خودمختار را در رأس مهم‌ترین ابزارهای تحقیقاتی در محیط دریا قرار داده است. از یک طرف استفاده گسترده از ربات‌های زیرآبی خودمختار در صنایع مختلف منجر به پیچیده‌تر شدن ساختار آن‌ها شده و از طرفی دیگر کار کردن در شرایط کاری دشوار نظیر مواجهه با مین‌های دریایی، مواد آلاینده و زیر لایه‌های یخی باعث سخت‌تر شدن طراحی، هدایت و کنترل آن‌ها گشته است. سیر تحولات ربات‌های زیرآبی خودمختار از نیمه دوم قرن بیستم آغاز شد و در دهه هفتاد میلادی، تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد ربات‌های زیرآبی خودمختار در پروژه‌های مختلف انجام شد. اما تعداد پروژه‌های موفق اندک و مشکلات فراوان بود [۱].

در دهه هشتاد میلادی، توسعه صنعت انفورماتیک و رباتیک منجر به استفاده از کامپیوترهای کم‌مصرف در ربات‌های زیرآبی خودمختار شد که راه را برای به‌کارگیری الگوریتم‌های هوشمند کنترل و به‌کارگیری بینایی ماشین در این ربات‌ها باز کرد. در دهه نود میلادی، رشد فناوری در ربات‌های زیرآبی خودمختار برای اولین بار ساخت سیستم‌های کاربردی با قابلیت انجام مأموریت‌های از پیش تعریف‌شده را ممکن ساخت. قرن بیست و یکم تا به امروز را می‌توان زمان رشد کاربردهای تجاری ربات‌های زیرآبی خودمختار دانست که قابلیت‌های کسب درآمد سرشار آن‌ها و امکان سرمایه‌گذاری جهت توسعه این ربات‌ها را فراهم ساخته است. امروزه شاهد توسعه ربات‌های زیرآبی خودمختار زیستی نیز هستیم که تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است [۲].

تاکنون انواع مختلفی از ربات‌های زیرآبی خودمختار با کاربردهای مختلف ساخته شده است و مطالعات آماری انجام‌شده نشان می‌دهد که ۱۰ تا ۲۵ درصد این ربات‌ها در مأموریت‌های مختلف دچار عیب می‌شوند که بخش عمده‌ای از این عیوب منجر به خرابی و گم‌شدن ربات زیرآبی می‌گردد [۳]. در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان و کاهش احتمال ریسک در ربات‌های زیرآبی خودمختار موردتوجه بیشتر طراحان قرار گرفته است. به‌طور کلی می‌توان عیوب سیستم

را به سه دسته کلی عیوب "دائمی و آنی"^۱، عیوب "موقت و متناوب"^۲ و "افزایشی و بدوی"^۳ (عیوبی که یک انحراف کوچک به وجود آورده و باگذشت زمان افزایش می‌یابد) دسته‌بندی کرد [۴]. شناخت ماهیت عیوب اولین گام در جهت طراحی سیستم‌های خودمختار مطمئن با قابلیت تحمل‌پذیری خطا می‌باشد [۵]. یک زیرسطحی خودمختار مطمئن، اولاً بایستی قابل اطمینان و تحمل‌پذیر خطا طراحی شود و ثانیاً قابلیت اطمینان آن به روش سیستماتیکی ارزیابی گردد. لذا قبل از ادامه دو مفهوم "قابلیت اطمینان" و "درخت عیب" به‌صورت گذرا تعریف می‌شوند [۶، ۷].

۱-۱- قابلیت اطمینان و درخت عیب

قابلیت اطمینان سیستم در هر لحظه از زمان برابر است با احتمال درست کار کردن سیستم تا آن لحظه به‌شرط آنکه از لحظه راه‌اندازی سالم کار کرده باشد. قابلیت اطمینان در ربات‌های زیرآبی خودمختار به دو صورت کلی بیان می‌شود؛ قابلیت اطمینان لحظه‌ای (که با ارزیابی لحظه‌ای خرابی اجزای سیستم تعریف می‌شود) و قابلیت اطمینان نسبت به مسافت (که با ارزیابی احتمال از دست دادن ربات زیرآبی نسبت به فاصله آن از کشتی حامی به دست می‌آید). همچنین در برخی مقالات مسئله قابلیت اطمینان برای دو منظور گم‌شدن (از دست دادن ربات زیرآبی) و لغو مأموریت یا انجام نادرست مأموریت تعریف‌شده است. برای ارزیابی قابلیت اطمینان روش‌های متعددی وجود دارد. درخت عیب یک روش سیستماتیک و متعارف برای این منظور است که در چهار دهه قبل، در مقیاس وسیعی استفاده شده است. درخت عیب دیاگرامی سلسله مراتبی است که راه‌های معیوب شدن سیستم را به تصویر می‌کشد، دیاگرام دروازه‌های راه‌های مختلف ترکیب المان‌های معیوب شده (رویدادهای پایه) را برای اینکه منجر به وقوع عیب نامطلوبی (رویداد نهایی) در سیستم شود، بیان می‌کند. رویدادهای پایه با گیت‌هایی با یکدیگر مرتبط شده و رویدادهای سطوح بعدی را می‌سازند [۸، ۹]. درخت عیب دینامیکی امکان ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌هایی که دارای اولویت، رزرو، وابستگی عملیاتی، تعمیر، بازیابی و پیکره‌بندی مجدد هستند را فراهم می‌کند [۱۰، ۱۱].

³ Incipient¹ Abrupt² Intermittent

۲-۱- منطق فازی

در بیشتر مدل‌های درخت عیب برای ارزیابی قابلیت اطمینان، نرخ خرابی رویدادهای درخت را قطعی در نظر گرفته شده و عدم قطعیت وقوع آن‌ها در محاسبات ملحوظ نمی‌شود. منطق فازی راهکاری برای اعمال عدم قطعیت‌ها در محاسبات است. در این مقاله نرخ خرابی رویدادهای پایه شناسایی شده برای اجزای ربات خودمختار، فازی در نظر گرفته می‌شود که به صورت $\mu_{BE} = \{\mu_L, \mu_M, \mu_H\}$ تعریف شده و هر مؤلفه در این مجموعه از توابع عضویت مثلثی تبعیت می‌کند. تابع عضویت خروجی هر گیت نیز شبیه تابع عضویت رویدادهای پایه تعریف می‌شود. کار هر گیت با یک ماتریس قانون سه در سه توصیف می‌شود و در نهایت دی فازی کردن بر مبنای روش Larsen/Mirror صورت می‌گیرد.

۳-۱- حساسیت

در مواردی که در رفتار اجزا و پارامترهای سیستم‌ها عدم قطعیت وجود دارد، تحلیل حساسیت اهمیت خود را نشان می‌دهد. هدف اصلی تحلیل حساسیت درخت عیب این است که بتوان تأثیر تغییرات پارامترهای رویدادهای پایه را روی تغییرات رویداد نهایی نامطلوب (به عبارت دیگر روی قابلیت اطمینان سیستم) و در حالت کلی روی رویدادهای سطح بالاتر بررسی کرد. از این رو در تحقیقات اخیر بررسی سیستماتیک حساسیت و به کارگیری مدل حساسیت درخت عیب، چه در زیرسیستم‌های معمولی و یا زیرسیستم‌های حیاتی یک سیستم مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۲، ۱۳].

۴-۱- بررسی و مطالعه تاریخیچه تحقیق

برای اولین بار در سال ۱۹۹۹ روش‌های افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی ربات‌های زیرآبی خودمختار بررسی و در طراحی آن‌ها دولا به محافظتی برای حصول این دو ویژگی پیشنهاد شد. لایه "بحرانی"، ربات زیرآبی را از وضعیت بحرانی نجات داده و در لایه "جلوگیری کننده" در صورت بروز مشکلات در سیستم‌های ربات زیرآبی فرمان لازم را برای نجات آن قبل از رسیدن به وضعیت بحرانی صادر می‌کند [۱۴]. در سال ۲۰۰۰ مرجع [۱۵] عیوب محتمل در ربات‌های زیرآبی را بررسی و شناسایی کرد و یک دیگرام منطقی برای عیوب ربات زیرآبی ارائه نمود. مرجع [۱۶] در سال ۲۰۰۲ بازرسی و نگهداری انواع سیستم‌های رانش در

ربات‌های زیرآبی خودمختار را بررسی و احتمالات خرابی سیستم‌های انرژی را به عنوان عامل اصلی برق‌رسانی به سیستم رانش محاسبه نمود. مرجع [۱۷] در سال ۲۰۰۴ بر روی افزایش قابلیت اطمینان یک ربات زیرآبی خودمختار به نام Dorado تمرکز کرد و عیوب رخ داده در ربات زیرآبی مورد نظر برای زمان‌های کاری از یک ساعت تا ۳۰۰ ساعت بررسی نمود. در این وضعیت ربات زیرآبی از لحاظ شرایط کاری بسته به آسیب وارده به سیستم آن در یکی از پنج حالت عدم توانایی در انجام عملیات، قادر به انجام عملیات، بحرانی و قادر به انجام عملیات غیر بحرانی، قادر به انجام عملیات نیمه بحرانی و قادر به انجام عملیات بسیار بحرانی قرار می‌گیرد. در سال ۲۰۰۶ یک گروه از دانشگاه Southampton انگلستان بر روی علت از دست دادن ربات زیرآبی AUTOSUB2 در آب‌های منطقه پوشیده از یخ Fimbulisem مطالعاتی را انجام دادند [۱۸]. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که علت اصلی از دست دادن ربات زیرآبی وجود مشکل در کامپیوتر داخلی و نیز مشکل سیستم انرژی آن بوده است. همچنین در این سال برنامه‌ای برای بازرسی و تشخیص خرابی در ربات‌های زیرآبی خودمختار و ربات‌های زیرآبی کابلی ارائه گردید [۱۹]. البته آن‌ها در تحقیقی که در سال ۲۰۰۱ انجام داده بودند قابلیت اطمینان و عوامل منجر به بروز عیب در ربات زیرآبی AUTOSUB2 را بررسی کرده بودند [۲۰]. مرجع [۲۱] با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ارتباط پیچیده در تشخیص عیب سیستم ربات زیرآبی خودمختار به معرفی یک روش بر اساس شبکه‌های بیزین (BN) پرداخته است که در آن یک مکانیزم استنتاجی بر اساس شبکه‌های بیزین به عنوان ابزاری در تشخیص عیب و روشی برای بهینه‌سازی استراتژی تشخیص عیب به کار برده شده است. در سال ۲۰۰۶ مرجع [۲۲] روشی را برای تشخیص عیب ربات خودمختار زیرآبی بر مبنای درخت عیب پیشنهاد و آن را پیاده‌سازی کرده است. این مرجع تأثیر استفاده از رزرو گرم را بر روی افزایش قابلیت اطمینان ربات مورد ارزیابی قرار داده است. در سال ۲۰۰۷ مرجع [۲۳] درخت عیبی برای نرم‌افزار کنترل کننده در یک ربات زیرآبی خودمختار ارائه و به صورت تحلیلی تأثیر هر گره در این درخت را بررسی و راهکاری برای افزایش ایمنی آن ارائه داد. یک گروه تحقیقاتی از دانشگاه Southampton انگلستان در سال ۲۰۰۸ بار دیگر به تحقیق بر روی عیوب رایج ربات زیرآبی خودمختار پرداختند. در این تحقیق چهار محیط دریایی مدنظر قرار گرفت که شامل

دریای آزاد، محیط نزدیک به ساحل، دریای دارای قطعات یخ و دریایی که سطح آن با یخ پوشیده شده می‌شد. هدف اصلی این گروه تخمین احتمال از دست دادن ربات زیرآبی در هر یک از این چهار محیط بود. در این تحقیق یک ربات زیرآبی خودمختار برای انجام پژوهش‌های گروهی از دانشمندان عضو انجمن تحقیقات محیط دریا مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع شصت و سه عیب شناسایی و احتمال آن‌ها تخمین زده شد [۳]. مرجع [۲۴] با در نظر گرفتن مراحل ساخت و بررسی اتصالات میان اجزای ربات زیرآبی AUTOSUB2 روش‌هایی جهت کاهش احتمال از دست دادن این ربات ارائه نموده است. سپس بحث مدیریت ریسک و تعیین احتمال خرابی اجزای ربات بازگو نموده و با استفاده از توزیع ویبال قابلیت اطمینان ربات زیرآبی خودمختار را نسبت به فاصله ربات از کشتی حامی ارزیابی کرده است. در سال ۲۰۰۹ یک گروه پژوهشی ابتدا درخت عیب یک ربات زیرآبی را ارائه و به موازات آن به تحلیل قابلیت اطمینان ربات زیرآبی خودمختار بر پایه درخت عیب فازی پرداخته و عدم قطعیت در نرخ خرابی اجزا را لحاظ کردند [۲۵، ۲۶]. آن‌ها برای ربات زیرآبی خودمختار و سیستم حرکتی آن، یک بلوک دیگرام قابلیت اطمینان را ترسیم کرده و از این طریق به محاسبه قابلیت اطمینان سیستم پرداخته‌اند [۲۷]. مرجع [۲۸] کار خود را بر روی قابلیت اطمینان سیستم حرکتی و سیستم کنترل ربات زیرآبی خودمختار متمرکز کرده است. مرجع [۲۹] قابلیت اطمینان نرم‌افزار مورد استفاده در یک ربات زیرآبی خودمختار را به کمک روش تجزیه تحلیل مدهای خرابی (FMEA) مورد ارزیابی قرار داده است. در سال ۲۰۱۰ گروه کاری دانشگاه Southampton انگلستان در ادامه تحقیقات قبلی خود به آنالیز ریسک در ربات‌های زیرآبی خودمختاری که در شرایط سخت دریایی کار می‌کنند، پرداخت. در این آنالیز آن‌ها یک فرمول‌بندی عددی برای تخمین واریانس و محدوده اطمینان آن ارائه کرده و به محاسبه احتمال سالم ماندن ربات زیرآبی AUTOSUB3 در مجموعه‌ای از عملیات مشخص پرداختند [۳۰]. در سال ۲۰۱۳ مرجع [۳۱] درخت عیب یک ربات زیرآبی خودمختار با قابلیت کار در عمق ۴۵۰۰ را ترسیم و به بررسی قابلیت اطمینان و میانگین زمان تا خرابی آن پرداخته است. در این تحقیق برای ۳۸ قطعه و زیرسیستم از ربات زیرآبی احتمال خرابی ارائه داده است. در همان سال تحقیقی دیگر در زمینه

قابلیت اطمینان سیستم‌های مکانیکی برای یک ربات زیرآبی خودمختار انجام شده و حالت‌های خرابی و پارامترهایی نظیر تشدید، ظرفیت بحرانی قطعات مورد ارزیابی قرار گرفته است [۳۲].

هیچ‌کدام از تحقیقات مذکور راهکاری برای محاسبه حساسیت زیرسیستم‌های ربات زیرآبی خودمختار در قبال تغییرات اجزای آن ارائه نکرده و عدم قطعیت در ورودی‌های پایه را در محاسبات قابلیت اطمینان تحلیل نکرده‌اند. دسته‌بندی‌های ارائه‌شده برای عیوب ربات نوعاً موردی بوده و ناکامل هستند. این مقاله دسته‌بندی کاملی از عیوب ربات‌های زیرآبی خودمختار را بر اساس ماهیت خرابی و زیرسیستم‌های آن ارائه کرده و با لحاظ عدم قطعیت در رخ دادن این عیوب، یک درخت عیب فازی برای آن پیشنهاد و قابلیت اطمینان و حساسیت سیستم را محاسبه می‌کند. سازمان‌دهی مقاله به‌صورت زیر است:

در بخش دوم عیوب یک ربات زیرآبی خودمختار بر اساس زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده آن دسته‌بندی شده و نحوه تأثیرگذاری عیوب اجزا و زیرسیستم‌ها بر روی خرابی کلی سیستم تشریح می‌گردد. بخش سوم به ساخت درخت عیب ربات زیرآبی و ارزیابی قابلیت اطمینان ربات زیرآبی می‌پردازد. در بخش چهارم روش سیستماتیک ارزیابی حساسیت در قالب چند مثال از زیرسیستم‌های ربات زیرآبی تشریح می‌شود. و در پایان نتایج به‌دست‌آمده جمع‌بندی می‌شوند.

۲- بررسی عیوب در زیرسیستم‌های ربات زیرآبی خودمختار

این بخش عیوب اجزای زیرسیستم‌های یک ربات زیرآبی خودمختار را از نظر ماهیت خرابی مورد شناسایی قرار می‌دهد.

۲-۱- بررسی عیوب در سیستم ناوبری

در بسیاری از ربات‌های زیرآبی خودمختار از فیلتر کالمن برای ناوبری استفاده می‌شود، این سیستم اطلاعات مکان، سرعت و شتاب در سه راستا را با استفاده از سیستم اینرسی و جایرو سنجش نموده و با کمک سنسورهای نظیر سنسور عمق، سرعت‌سنج داپلر و مواردی از این دست، خطا و انحراف را کمینه می‌کند [۳۳]. خرابی سیستم اینرسی و جایرو در این سیستم از نوع "دائمی و آنی" می‌باشد. این در

۲-۳- عیوب سیستم حرکتی

ربات‌های زیرآبی خودمختار از لحاظ سیستم حرکتی به انواع مختلفی نظیر تک موتوره، چند موتوره، زیستی و گلایدی دسته‌بندی می‌شوند [۳۵، ۳۶]. این مقاله ربات‌های زیرآبی خودمختار با سیستم حرکتی چند موتوره را مورد بررسی قرار داده است. مطابق با جدول ۳ سیستم حرکتی در ربات‌های زیرآبی خودمختار شامل یک سیستم پیشران و تعدادی ترانستر اصلی و فرعی می‌باشد. سیستم پیشران شامل پروانه، شفت و سکان بوده و تمامی خرابی‌ها در این سیستم از نوع "دائمی و آنی" می‌باشد. وقوع عیب در این سیستم موجب فلج شدن ربات و عدم امکان حرکت می‌شود.

جدول ۳- عوامل خرابی در سیستم حرکتی

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|-------------|----------------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی سیستم ترانستر اصلی |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم ترانستر کمکی |
| دائمی و آنی | خرابی پروانه و سیستم انتقال قدرت |
| دائمی و آنی | خرابی سنسور زاویه سکان |
| دائمی و آنی | شکستن سکان |

۲-۴- عیوب سیستم غوص و صعود

ربات‌های زیرآبی خودمختاری که از نوع معلق هستند عموماً از سیستم حرکتی پویا استفاده می‌کنند اما دیگر انواع این ربات‌ها به منظور تغییر عمق از سیستم غوص و صعود بهره می‌جویند که شامل باله‌های کوچک در طرفین و مخزن بالاست است. خرابی‌های محتمل این سیستم در جدول ۴ ذکر شده است. لازم به ذکر است که عیوب این سیستم از نوع "دائمی و آنی" می‌باشند.

جدول ۴- عوامل خرابی در سیستم غوص و صعود

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|-------------|------------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی پمپ بالاست |
| دائمی و آنی | گیرکردن باله در زاویه‌ای خاص |
| دائمی و آنی | خرابی سنسور زاویه باله |

۲-۵- عیوب سیستم تأمین انرژی

از آنجایی که اغلب ربات‌های زیرآبی به صورت الکتریکی طراحی می‌گردند، خرابی سیستم تأمین انرژی می‌تواند باعث از کار افتادن تمام زیرسیستم‌های ربات گردد و لذا می‌توان از آن به عنوان گلوگاه خرابی ربات یاد کرد. جدول

حالی است که خرابی سنسورها از نوع "افزایشی و بدوی" بوده و با گذشت زمان تأثیر خود را با ایجاد انحراف روی سیستم اصلی نشان می‌دهند. ربات زیرآبی خودمختار تنها روی سطح آب می‌تواند از GPS بهره‌مند شود و به همین دلیل عیوب این سیستم به صورت "موقت و متناوب" در سیستم ظاهر می‌شود. به طور کلی خرابی سیستم ناوبری موجب انحراف از مسیر و گم شدن ربات زیرآبی خودمختار می‌گردد. برخی از عیوب و عوامل خرابی مهم این سیستم در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- عوامل خرابی در سیستم ناوبری

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|----------------|------------------------------------|
| افزایشی و بدوی | خرابی سنسور عمق |
| افزایشی و بدوی | خرابی سیستم DVL |
| افزایشی و بدوی | خرابی سیستم سنجش ارتفاع |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم جایرو (Gyro) |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم ناوبری اینرسی (INS) |
| موقت و متناوب | خرابی سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) |

۲-۲- عیوب سیستم کامپیوتری کنترل، هدایت

یک ربات زیرآبی به وسیله یک سیستم کنترل توزیع شده خودمختار و هوشمند هدایت شده و عمدتاً از سه کامپیوتر مدیریت عملیات (برای مسیریابی و مانور)، کنترل کننده مرکزی (هماهنگی میان کامپیوتر مدیریت عملیات و کنترل از طریق شبکه) تشکیل شده است. خرابی کامپیوترها و شبکه ارتباطی آن‌ها به صورت "دائمی و آنی" تأثیر خود را در سیستم نشان داده و موجب از دست رفتن ربات زیرآبی می‌شود [۳۴]. قرار گرفتن ربات زیرآبی در شرایط پیش‌بینی نشده از عیوب متناوبی است که در سیستم کامپیوتری ربات رخ می‌دهد. جدول ۲ عوامل خرابی در سیستم کامپیوتری کنترل و هدایت را نمایش می‌دهد.

جدول ۲- عوامل خرابی در سیستم کامپیوتری کنترل و هدایت

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|---------------|------------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی کامپیوتر مدیریت عملیات |
| دائمی و آنی | خرابی کامپیوتر کنترل |
| دائمی و آنی | خرابی کامپیوتر مرکزی |
| دائمی و آنی | خرابی شبکه کنترل |
| موقت و متناوب | ایجاد شرایط پیش‌بینی نشده |

سیستم را نمایش می‌دهد، خرابی این سیستم‌ها از نوع "دائمی و آنی" بوده و موجب برخورد ربات زیرآبی با موانع زیر آب، بستر دریا و یا شناورهای روی سطح می‌گردد. در برخی از منابع مانند [۲۴] به جای خرابی این سیستم‌ها احتمال برخورد و تصادف با موانع و بستر دریا داده می‌شود و می‌توان آن‌ها را با احتمال خرابی‌های زیر جایگزین نمود.

جدول ۷- عوامل خرابی در سیستم مقابله با برخورد

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|-------------|------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی سیستم سنار دماغه |
| دائمی و آنی | خرابی دوربین |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم تأمین نور |

۲-۸- خرابی سیستم پایش و ایمنی

سیستم پایش در اکثر ربات‌های زیرآبی به سه سیستم ایمنی برای تشخیص دسته‌بندی می‌شوند (جدول ۸)، سیستم‌های پایش جریان و ولتاژ وظیفه پایش ولتاژ و نقاط و مسیرهای بحرانی در زیرسیستم‌های بحرانی ربات را بر عهده داشته و سیستم تشخیص نشت آب به داخل، با بردن سریع ربات به سطح آب از غرق شدن آن جلوگیری می‌کند. عیوب این سیستم‌ها ماهیت "دائمی و آنی" دارند.

جدول ۸- عوامل خرابی در سیستم تشخیص امنیت

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|-------------|------------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی سیستم پایش مداوم جریان |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم تشخیص نشتی آب |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم تشخیص ولتاژ |

۲-۹- عیوب سیستم اضطراری

برای مواقع اضطراری سیستمی متشکل از چند وزنه، جداکننده مغناطیسی و دمنده فشار مطابق جدول ۹ در ربات زیرآبی قرار داده شده است تا از غرق شدن آن جلوگیری کند. بدیهی است که عیوب این سیستم در مواقع ضروری موجب غرق شدن ربات می‌گردد. عیوب این سیستم از نوع "دائمی و آنی" می‌باشند.

جدول ۹- عوامل خرابی در سیستم اضطراری

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|-------------|-----------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی سیستم دمنده فشار بالا |
| دائمی و آنی | اضطراری ۱ خرابی سیستم |
| | اضطراری ۲ اضطراری |

۵ عیوب سیستم تأمین انرژی را نشان می‌دهد. در این سیستم خرابی باتری و سیستم اندازه‌گیری و کنترل شارژ باتری از نوع "دائمی و آنی" است. این در حالی است که عیوبی نظیر اتصال کوتاه و خرابی درایور موتور از نوع "افزایشی و بدوی" بوده و مصرف جریان بالا از نوع متناوب است که در زمان استارت و شروع به کار سیستم پیشرانش و در حالت خرابی سیستم حفاظتی مربوطه اتفاق می‌افتد.

جدول ۵- عوامل خرابی سیستم تأمین انرژی

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|----------------|---------------------------------|
| دائمی و آنی | خرابی باتری |
| دائمی و آنی | خرابی در اندازه‌گیری شارژ باتری |
| افزایشی و بدوی | اتصال کوتاه و دشارژ باتری |
| افزایشی و بدوی | خرابی درایور موتور |
| موقت و متناوب | مصرف جریان بالا در لحظه استارت |

۲-۶- عیوب سیستم ارتباطی

ربات‌های زیرآبی خودمختار معمولاً برای ارتباط با نزدیک‌ترین ایستگاه یا کشتی حامی از سیستم‌های آکوستیکی زیرآبی یا سیستم ماهواره‌ای استفاده می‌کنند. از آنجایی که نقش این ارتباط کم کردن خطا در انجام عملیات است، وجود عیب به صورت تدریجی موجب گم‌شدن و از دست دادن ربات می‌شود. عیب سیستم ماهواره‌ای به دلیل آنکه تنها روی آب کار می‌کند به صورت "موقت و متناوب" در سیستم ظاهر می‌شود. همان‌طور که در جدول ۶ قابل مشاهده است خرابی مودم ارتباطی و یا ترانسپوندر سنار باعث معیوب شدن سیستم ارتباط آکوستیکی و خرابی سیستم ارتباط با ماهواره باعث قطع ارتباط با ایستگاه تحقیقاتی می‌گردد. خرابی مودم ماهیت "افزایشی و بدوی" دارد.

جدول ۶- عوامل خرابی در سیستم ارتباطی

| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|----------------|-------------------------------|
| افزایشی و بدوی | خرابی مودم ارتباط آکوستیکی |
| افزایشی و بدوی | خرابی ترانسپوندر سنار |
| موقت و متناوب | خرابی سیستم ارتباط ماهواره‌ای |

۲-۷- عیوب سیستم مقابله با برخورد

سیستم‌های تشخیص مانع به دو صورت صوتی و مبتنی بر پردازش تصویر وجود دارند. جدول ۷ عیوب این

نظر گرفت. از این رو در این مقاله فرض شده است که ماهیت عیوب در نرخ خرابی رویدادهای پایه آن منعکس می‌باشد.

۳- ارزیابی قابلیت اطمینان ربات زیرآبی

در این بخش از روی عیوب زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده ربات زیرآبی درخت عیب رسم شده و قابلیت اطمینان سیستم به دو صورت محاسبه می‌شود. در محاسبه اول قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در رویدادهای پایه محاسبه می‌شود و در محاسبه دیگر، عدم قطعیت منظور شده و درخت عیب به صورت فازی حل می‌شود. در ترسیم درخت عیب یک ربات زیرآبی خودمختار فرضیات زیر ملحوظ می‌شود:

- نرخ خرابی رویدادهای پایه از توزیع نمایی تبعیت می‌کند.
 - اجزای سیستم در لحظه شروع به کار سالم هستند.
 - امکان وقوع بیش یک عیب در هر لحظه از زمان وجود ندارد.
 - تعمیر اجزای سیستم در حین مأموریت مقدور نیست.
- جدول ۱۱ لیستی از کلیه رویدادهای پایه سیستم را به همراه نام اختصاری آن‌ها (BE، ستون اول از سمت چپ)، نام رویداد (ستون دوم از سمت چپ)، نرخ خرابی برحسب خرابی در ساعت (FR، ستون سوم از سمت چپ)، مقدار عدم قطعیت فازی هر رویداد (FU، ستون چهارم از سمت چپ)، احتمال خرابی هر رویداد ($P(BE)$ ، ستون پنجم از سمت چپ)، اهمیت نسبی هر رویداد در تأثیرگذاری بر رویداد TOP درخت (BEI، ستون دوم از سمت راست) را نشان می‌دهد. برخی اطلاعات این جدول از مراجع و منابع در دسترس جمع‌آوری شده و برخی دیگر نظیر BEI و $P(BE)$ محاسبه شده‌اند.

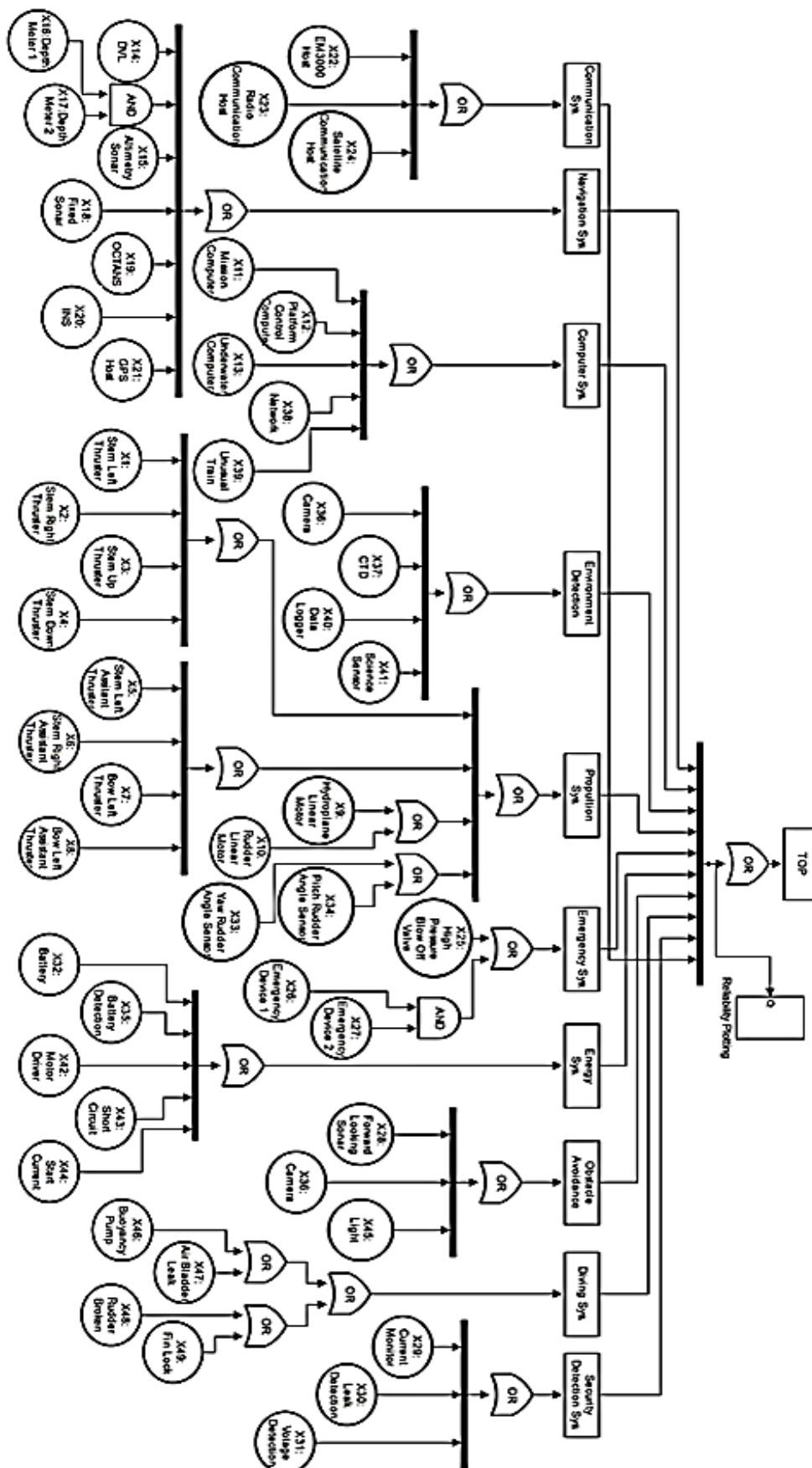
۲-۱۰- عیوب سیستم شناسایی محیط

ربات‌های زیرآبی عموماً از سنسورهای مختلفی برای شناسایی محیط بهره می‌گیرند که علاوه بر جمع‌آوری اطلاعات، می‌توانند به عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری در کنترل و تعادل ربات زیرآبی استفاده شوند، دوربین که روی دماغه ربات نصب می‌شود، برای ثبت تصاویر و تشخیص بویه‌های راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنسور CTD برای اندازه‌گیری رسانایی، دما و عمق آب به کار می‌رود و از اطلاعات آن می‌توان برای کنترل و حفظ تعادل بین وزن و شناور بهره برد. خرابی CTD در کاربرد ثبت اطلاعات "دائمی و آنی" بوده و در کاربرد تعیین میزان آبیگری مخزن بالاست از نوع "افزایشی و بدوی" محسوب می‌شود. خرابی سنسورها و دوربین از نوع "افزایشی و بدوی" و خرابی سیستم ثبت اطلاعات از نوع "دائمی و آنی" است. عیوب مذکور در جدول ۱۰ آورده شده‌اند [۳۷].

جدول ۱۰: عوامل خرابی در سیستم شناسایی محیط

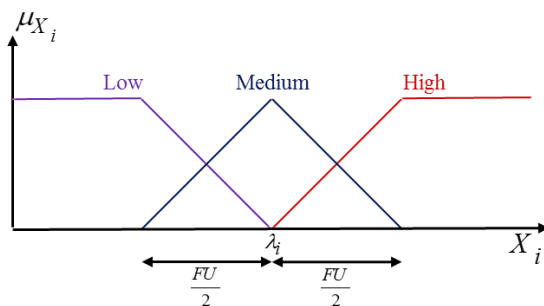
| ماهیت خرابی | نوع خرابی |
|------------------------------|----------------------|
| افزایشی و بدوی | خرابی دوربین |
| افزایشی و بدوی / دائمی و آنی | خرابی سیستم CTD |
| افزایشی و بدوی | خرابی سنسورهای علمی |
| دائمی و آنی | خرابی سیستم ثبت داده |

تئوری درخت عیب درواقع یک نگاه احتمالاتی به مقوله عیب در سیستم‌ها می‌باشد. دو ماهیت خرابی "افزایشی" و "دائمی" تفاوتی در مدلسازی توسط درخت عیب ندارند. اما عیوب "موقت و متناوب" نیازمند توصیف رویدادهای پایه به نسبت پیچیده‌تری هستند. در این مقاله فرض می‌شود که مدت وقوع عیوب موقت تا حدی است که در طول زمان ارزیابی درخت عیب، بتوان آن‌ها را مانند عیوب دائمی در



شکل ۱- درخت عیب ربات زیرآبی خودمختار (ترسیم شده در Simulink)

درآورده شده است [۳۸]. شکل زیر، به عنوان مثال، فازی شده رویداد X_1 را با مجموعه $\mu_{X_i} = \{Low, Medium, High\}$ نشان می‌دهد.

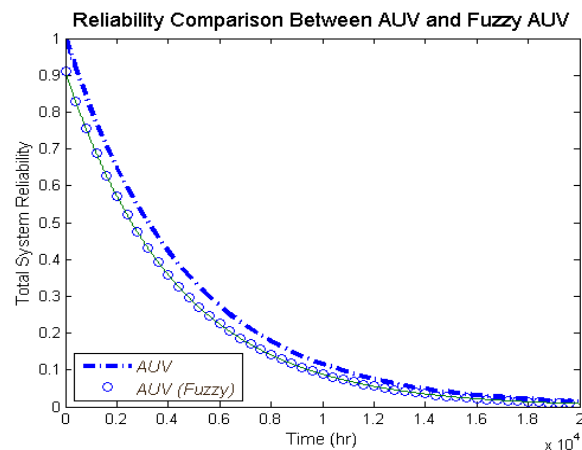


شکل ۳- نرخ خرابی فازی شده برای رویداد i ام

به روش مشابه کلیه رویدادهای درخت به یک عدد فازی تبدیل می‌شود. آنگاه رویدادهایی که به یک گیت وارد می‌شوند بر اساس ماتریس قوانین آن گیت و با استفاده از قانون max-min پردازش شده و خروجی فازی آن گیت را تولید می‌کنند. مجدداً خروجی‌های فازی گیت‌ها بر مبنای توپولوژی درخت با یکدیگر ترکیب شده و خروجی‌های گیت‌های لایه بالاتر را می‌سازند. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که خروجی بالاترین گیت درخت به صورت یک عدد فازی به دست آید. این عدد فازی را با قانون Larsen/ Mirror فازی می‌کنیم تا احتمال رویداد TOP به دست آید. قابلیت اطمینان از روی این احتمال به سادگی حساب می‌شود $(R(t) = 1 - P_{TOP}(t))$. نتیجه حاصله برای بازه زمانی دو سال به صورت منحنی دایره دار در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها در محاسبات، مقدار پایین‌تری برای قابلیت اطمینان حاصل می‌شود که به واقعیت نزدیک‌تر است. دیاگرام شکل ۱ نشان می‌دهد که در کلیه زمان‌ها قابلیت اطمینان سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت رویدادهای پایه کمتر از حالتی است که در آن رویدادها قطعی فرض می‌شوند. چون در عمل در هنگام بهره‌برداری، تکیه کردن بر حد بالای قابلیت اطمینان سیستم مخاطره انگیز بوده و لذا ممکن است موجب فریب خوردن بهره‌بردار سیستم شود، لذا استفاده از درخت عیب فازی جهت یافتن مقدار واقعی‌تری برای قابلیت اطمینان سیستم ضروری به نظر می‌رسد.

در حالت واقعی و در بدترین شرایط که سیستم تحت تعمیر قرار نگیرد حداقل به مدت ۲۰۰۰ ساعت با قابلیت اطمینان حدود ۷۹ درصد و به مدت ۴۰۰۰ ساعت با قابلیت اطمینان

این درخت به صورت استاتیکی در نظر گرفته شده و عواملی نظیر ترتیب، اولویت، وابستگی و رزرو در آن لحاظ نمی‌گردد. درخت عیب ربات زیرآبی (که در محیط Simulink پیاده‌سازی و اجرا شده است) در **Error! Reference source not found.** منحنی قابلیت اطمینان سیستم از روی این درخت با توجه به جدول ۱۱ برای بازه زمانی دو سال به صورت خط‌چین در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲- قابلیت اطمینان حاصل از حل درخت عیب سیستم

در محاسبه قابلیت اطمینان رویداد TOP در درخت عیب از روی احتمال خرابی رویدادهای پایه (P_1, P_2, \dots) از دو رابطه زیر استفاده شده است.

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1} (1 - P_i) \quad (1)$$

$$P_{AND} = \prod_{i=1} P_i \quad (2)$$

بدین ترتیب احتمال محاسبه شده برای TOP دقیق‌تر از محاسبه آن از روی کاتست‌های درخت است. این محاسبات توسط برنامه‌ای که در محیط MATLAB به صورت مجموعه‌ای از s-functionها نوشته شده است، برای بازه زمانی دو سال انجام شده و نتیجه حاصله در شکل ۱ به صورت یک منحنی با خط‌چین نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود قابلیت اطمینان سیستم با گذر زمان کاهش می‌یابد. در قدم بعدی عدم قطعیت رویدادهای پایه در محاسبات درخت وارد می‌شود. برای هر رویداد پایه عدم قطعیت را به صورت یک بازه در نظر گرفته (ستون چهارم جدول ۱۱ - FU) و آن رویداد به شکل یک عدد فازی

$$BEI = \frac{P(BE)}{P(TOP)} \quad (3)$$

که در این رابطه BE معرف رویداد پایه و P(BE) نشانگر احتمال رویداد پایه، TOP معرف رویداد نامطلوب موردنظر درخت عیب و P(TOP) نشانگر احتمال وقوع آن است. ستون پنجم جدول ۱۱ مقادیر احتمال کلیه رویدادهای پایه درخت را نشان می‌دهد و ستون ششم این جدول مقادیر BEI (اهمیت نسبی رویدادهای پایه) کلیه رویدادهای پایه را که بر مبنای رابطه (۳) محاسبه شده‌اند، نشان می‌دهد.

۵۰ درصد کار می‌کند. در عمل این مقادیر قابل قبول نیستند و طراحان بایستی برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم استراتژی‌هایی نظیر تعمیر آنلاین، اعمال افزونگی در سطوح مختلف (سخت‌افزار و نرم‌افزار) سیستم و استفاده از اجزای باکیفیت و مطمئن را به کار گیرند. از جمله ویژگی‌های درخت عیب آن است که می‌توان از روی آن گلوگاه‌های خرابی را تعیین نمود. این مقاله محاسبه BEI را برای این منظور ارائه می‌کند. به کمک رابطه (۳) می‌توان تأثیر هر رویداد پایه بر خرابی کل سیستم را بیان نمود [۷].

جدول ۱۱- مقادیر نرخ خراب و عدم قطعیت در ربات زیرآبی خودمختار [۳، ۲۰، ۲۵، ۲۶] ۴

| BE | Component Failure | FR (10 ⁻⁶) | FU (10 ⁻⁷) | P(BE) | BEI |
|-----|--------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------|----------|
| X1 | Stem Left Main Thruster Failure | $\lambda_1 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X2 | Stem Right Main Thruster Failure | $\lambda_2 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X3 | Stem Up Main Thruster Failure | $\lambda_3 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X4 | Stem Down Main Thruster Failure | $\lambda_4 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X5 | Stem Left Assistant Thruster Failure | $\lambda_5 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X6 | Stem Right Main Thruster Failure | $\lambda_6 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X7 | Bow Left Main Thruster Failure | $\lambda_7 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X8 | Bow Left Assistant | $\lambda_8 = 6$ | 2.52 | 0.8869204 | 66.46386 |
| X9 | Hydroplane Liner Motor Failure | $\lambda_9 = 5.5$ | 4.32 | 0.8958341 | 67.13183 |
| X10 | Ruder Linear Motor Failure | $\lambda_{10} = 5.5$ | 5.38 | 0.8958341 | 67.13183 |
| X11 | Mission Management Computer Failure | $\lambda_{11} = 14$ | 1.02 | 0.7557837 | 56.63676 |
| X12 | Platform Control Computer Failure | $\lambda_{12} = 13.5$ | 1.12 | 0.7633794 | 57.20597 |
| X13 | Underwater Computer Failure | $\lambda_{13} = 10$ | 1.18 | 0.8187307 | 61.35387 |
| X14 | DVL Failure | $\lambda_{14} = 3$ | 4.32 | 0.9417645 | 70.57375 |
| X15 | Altimetry Sonar Failure | $\lambda_{15} = 1.5$ | 4.56 | 0.9704455 | 72.72304 |
| X16 | Depth Meter 1 Failure | $\lambda_{16} = 3$ | 1.62 | 0.9940179 | 74.48951 |
| X17 | Depth Meter 2 failure | $\lambda_{17} = 3$ | 1.62 | 0.9940179 | 74.48951 |
| X18 | Fixed Sonar Failure | $\lambda_{18} = 1.5$ | 5.58 | 0.9704455 | 72.72304 |
| X19 | OCTANS Failure | $\lambda_{19} = 5$ | 4.48 | 0.9048374 | 67.80652 |
| X20 | Inertial Navigator Failure | $\lambda_{20} = 0.8$ | 4.12 | 0.9841273 | 73.74833 |
| X21 | GPS Host Computer Failure | $\lambda_{21} = 8.5$ | 2.12 | 0.8436648 | 63.22238 |
| X22 | EM3000 Host Computer Failure | $\lambda_{22} = 8.6$ | 1.23 | 0.8419791 | 63.09606 |
| X23 | Radio Communication Host Computer F. | $\lambda_{23} = 4.6$ | 3.32 | 0.9121051 | 68.35114 |
| X24 | Satellite Communication Failure | $\lambda_{24} = 5$ | 4.39 | 0.9048374 | 67.80652 |
| X25 | High Pressure BlowOff Valve Failure | $\lambda_{25} = 2.5$ | 3.32 | 0.9512294 | 71.28303 |

۴ به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان توسط درخت عیب نرخ خرابی و عدم قطعیت اندازه‌گیری آن از آزمایشات عملی و تجربی بدست آورده می‌شود که در این مقاله دو مورد مذکور (ستون سوم و چهارم) اکثراً از مراجع یادشده گرفته شده‌اند.

| | | | | | |
|------------|-----------------------------------|-----------------------|------|-----------|----------|
| X26 | Emergency Device 1 Failure | $\lambda_{26} = 1.2$ | 5.18 | 0.9762857 | 73.16069 |
| X27 | Emergency Device 2 Failure | $\lambda_{27} = 1.2$ | 5.18 | 0.9762857 | 73.16069 |
| X28 | Forward Looking Sonar Failure | $\lambda_{28} = 1.5$ | 2.23 | 0.9704455 | 72.72304 |
| X29 | Current Monitor Failure | $\lambda_{29} = 6$ | 3.32 | 0.8780954 | 65.80253 |
| X30 | Leak Detection Failure | $\lambda_{30} = 7.5$ | 2.12 | 0.8607079 | 64.49955 |
| X31 | Voltage Detection Failure | $\lambda_{31} = 6$ | 2.52 | 0.8780954 | 65.80253 |
| X32 | Battery failure | $\lambda_{32} = 9.6$ | 4.48 | 0.8253068 | 61.84667 |
| X33 | Yaw Rudder Angel Sensor Failure | $\lambda_{33} = 1.8$ | 1.62 | 0.9646402 | 72.28801 |
| X34 | Pitch Rudder Angel Sensor Failure | $\lambda_{34} = 1.8$ | 1.62 | 0.9646402 | 72.28801 |
| X35 | Battery Detection Failure | $\lambda_{35} = 7.5$ | 1.12 | 0.8607079 | 64.49955 |
| X36 | Camera Failure | $\lambda_{36} = 0.1$ | 0.25 | 0.9980019 | 74.78806 |
| X37 | CTD Failure | $\lambda_{37} = 0.2$ | 0.33 | 0.9960079 | 74.63864 |
| X38 | Network Failure | $\lambda_{38} = 5.4$ | 2.73 | 0.8963717 | 67.17212 |
| X39 | Unusual Terrain and Impact | $\lambda_{39} = 0.5$ | 4.86 | 0.9886647 | 74.08835 |
| X40 | Data Logger | $\lambda_{40} = 1.8$ | 1.02 | 0.9644473 | 72.27356 |
| X41 | Science Sensor | $\lambda_{41} = 3.6$ | 0.33 | 0.9301587 | 69.70404 |
| X42 | Motor Driver Failure | $\lambda_{42} = 4.3$ | 2.96 | 0.9168604 | 68.7075 |
| X43 | Short Circuit | $\lambda_{43} = 4.3$ | 2.87 | 0.9168604 | 68.7075 |
| X44 | In-rush Current Protector Failure | $\lambda_{44} = 5.4$ | 2.87 | 0.8961925 | 67.15869 |
| X45 | Light System Failure | $\lambda_{45} = 0.02$ | 0.25 | 0.9996000 | 74.90782 |
| X46 | Buoyancy pump | $\lambda_{46} = 5.4$ | 2.52 | 0.8970891 | 67.22588 |
| X47 | Rudder broken | $\lambda_{47} = 0.9$ | 5.38 | 0.9819646 | 73.58626 |
| X48 | Fin locked at angles | $\lambda_{48} = 0.9$ | 4.32 | 0.9819646 | 73.58626 |

۴- تحلیل حساسیت

این بخش ابتدا با ذکر مثالی از سیستم شناسایی محیط، روابط نظری موردنیاز برای محاسبه حساسیت را بیان نموده و سپس به عنوان نمونه برای دو سیستم "غوص و صعود" و "ناوبری"، حساسیت را ارائه می کند.

۴-۱- محاسبه نظری حساسیت

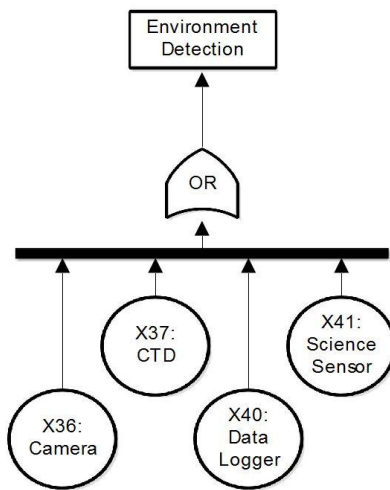
به طور کلی حساسیت پارامتر Y_i به پارامتر X_i به صورت رابطه (۴) تعریف می گردد. که در آن Y_i خروجی سیستم (در درخت عیب احتمال رویداد Top به عنوان خروجی در نظر گرفته می شود) و X_i ورودی سیستم (در درخت عیب احتمال رویدادهای پایه به عنوان رویداد پایه در نظر گرفته می شود) می باشد.

$$S_{X_i}(Y_j) = \frac{\partial Y_j}{\partial X_i} \left(\frac{X_i}{Y_j} \right) \quad (۴)$$

مراجع [۱۲، ۱۳] چگونگی محاسبه حساسیت رویداد TOP را درازای تغییرات هرکدام از رویدادهای پایه تشریح کرده اند. چون این مقاله از روش مزبور در تحلیل حساسیت استفاده خواهد کرد، لذا خلاصه ای از روش فوق برای یک مثال نمونه ذکر می شود.

درخت عیب مثال موردنظر در شکل ۴ آورده شده است که مربوط به یک سیستم شناسایی محیط است. ابتدا لازم است بردارهای ورودی و خروجی تشکیل شوند، در یک درخت عیب احتمال رویدادهای پایه به عنوان ورودی و احتمال هر یک از گیت ها به عنوان خروجی در نظر گرفته می شود. در این مثال بردار ورودی و خروجی به ترتیب در روابط (۵) و (۶) آورده شده اند. از آنجایی که در این مثال تنها یک گیت وجود دارد در نتیجه بردار خروجی فقط یک درایه خواهد داشت.

$$X^T = [P_{36}, P_{37}, P_{40}, P_{41}] \quad (۵)$$

$$Y^T = [P_{Env}] \quad (6)$$


شکل ۴ - درخت عیب سیستم شناسایی محیط

جدول ۱۲- حساسیت سیستم شناسایی محیط به رویدادهای

| پایه | | | |
|--------|-----------|--------|-----------|
| رویداد | حساسیت | رویداد | حساسیت |
| پایه | | پایه | |
| X36 | ۰,۰۱۱۰۱۱۶ | X40 | ۰,۰۴۳۳۱۷۴ |
| X37 | ۰,۰۱۱۹۲۸۷ | X41 | ۰,۱۸۴۵۹۳۳ |

۴-۲- محاسبه حساسیت زیرسیستم‌های

انتخاب‌شده از ربات زیرآبی

پس از تشکیل بردارهای ورودی و خروجی بایستی ماتریس اولیه برای ارزیابی حساسیت از روی درخت عیب تشکیل گردد (رابطه ۹)). لذا بایستی گام‌های زیر در تشکیل این ماتریس لحاظ گردد.

- از درایه متناظر هر گیت با خودش برابر یک قرار داده شود.
- ارتباط هر گیت با گیت دیگر با علامت منفی و ارتباط هر گیت با رویداد پایه با علامت مثبت در نظر گرفته شود.
- مقدار درایه از گیت به رویداد پایه یا گیت دیگر برابر مقدار K است که این مقدار برای گیت AND برابر یک و برای گیت OR به کمک رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد.

$$P_{Env} \left[\begin{array}{c|cccc} P_{Env} & P_{36} & P_{37} & P_{40} & P_{41} \\ 1 & K_{36} & K_{37} & K_{40} & K_{41} \end{array} \right] \quad (9)$$

$$K_{OR} = \frac{P_j}{P} \prod_{i \neq j} (1 - P_i) \quad (1 \cdot)$$

ماتریس به دست آمده در رابطه ۹ را به دو ماتریس A و B تقسیم نموده که در آن ماتریس A مربوط به تناظر میان گیت‌ها با یکدیگر بوده و ماتریس B بیانگر تناظر بین گیت‌ها و رویدادهای پایه است. پس از تشکیل دو ماتریس مذکور به کمک رابطه (۱۱) می‌توان ماتریس حساسیت را به دست آورد. سطر اول این ماتریس به تعداد رویدادهای پایه درایه دارد که هر درایه بیانگر حساسیت خروجی نسبت به رویداد خاصی است.

$$S = \text{diag}(Y)A^{-1}B(\text{diag}(X))^{-1} \quad (11)$$

همان‌طور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود حساسیت خرابی سیستم تشخیص محیط برای هر یک از اجزای آن بیان‌شده است. در این سیستم بیشترین مقدار حساسیت مربوط به سنسورهای علمی و کمترین آن مربوط به ثبت‌کننده داده است. به کمک این ارزیابی می‌توان گفت که در سیستم شناسایی محیط، افزایش قابلیت اطمینان در سنسورهای مورد استفاده نقش بیشتری در افزایش قابلیت

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

ارزیابی قابلیت اطمینان یکی از ارکان اصلی در طراحی یک ربات زیرآبی می‌باشد. این مقاله ضمن ارائه یک دسته‌بندی جدید از عیوب ربات زیرآبی خودمختار به مدل‌سازی و ساخت درخت عیب این نوع ربات پرداخت که نسبت به کارهای گذشته جامعیت بیشتری دارد. همچنین به کمک درخت عیب فازی، عدم قطعیت نرخ‌های خرابی مدل‌سازی شده و ضرورت آن تشریح گردید. علاوه بر آن این مقاله با استفاده از یک روش سیستماتیک و جبری به ارزیابی حساسیت خرابی رویداد نهایی نسبت به رویدادهای پایه پرداخت که به کمک آن می‌توان راه‌های مقرون‌به‌صرفه در بهبود قابلیت اطمینان را شناسایی و نسبت به تقویت آن اقدام نمود. تحلیل‌های کیفی ارائه‌شده در این مقاله دید خوبی به بهره‌برداران و طراحان این ربات‌ها به جهت به‌کارگیری هرچه بهتر در صنعت دریایی کشور را می‌دهد.

۶- تشکر و قدردانی

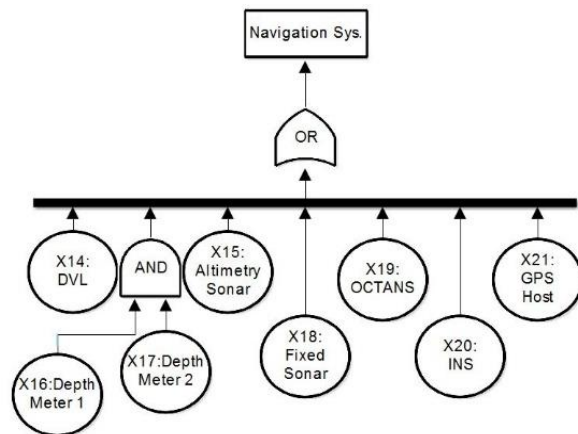
در تجزیه و تحلیل عیوب از نظرات جناب آقای دکتر حسین موسوی‌زادگان عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده گردیده است و نویسندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی از ایشان را دارند.

۷- اختصارات

- 1- AUV: Autonomous Underwater Vehicle
- 2- BE: Basic Event
- 3- BEI: Basic Event Importance
- 4- FMEA: Failure Mode and Effect Analysis
- 5- FR: Failure Rate
- 6- FU: Fuzzy Uncertainty
- 7- FTA: Fault Tree Analysis
- 8- PF: Probability of Failure
- 9- S: Sensitivity

مراجع

1. Yuh, J., Marani, R., G., B. (2011) Applications of Marine Robotic Vehicles. *Journal of Intel Serv Robotics* 4(1), 221-231.
2. Blidberg, D. R. (2001) The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV): A Brief Summary. In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea.
3. Brito, M. P., Griffiths, G., Trembranis, A. (2008) *Eliciting Expert Judgment on the Probability of*

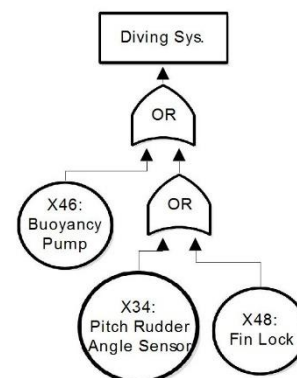


شکل ۵- درخت عیب زیرسیستم ناوبری

جدول ۱۳- حساسیت سیستم ناوبری به رویدادهای پایه

| رویداد پایه | حساسیت | رویداد پایه | حساسیت |
|-------------|------------|-------------|-------------|
| X14 | ۰,۰۰۰۰۰۰۹ | X18 | ۰,۰۰۰۰۰۰۲ |
| X15 | ۰,۰۰۰۰۰۰۲ | X19 | ۰,۰۰۰۰۰۰۴۸ |
| X16 | ۴,۶۸۶۶۴۷۰۹ | X20 | ۰,۰۰۰۰۰۰۱۶ |
| X17 | ۴,۶۸۶۶۴۷۰۹ | X21 | ۰,۰۰۰۰۰۷۹۴۸ |

شکل ۶ درخت عیب زیرسیستم غوص و صعود را نمایش می‌دهد. به کمک روابط حساسیت مقادیر حساسیت این دیاگرام در جدول ۱۴ ارائه‌شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین حساسیت مربوط به پمپ سیستم بالاست و کمترین حساسیت در این زیرسیستم مربوط به گیرکردن باله‌ها است.



شکل ۶- درخت عیب زیرسیستم غوص و صعود

جدول ۱۴- حساسیت سیستم ناوبری به رویدادهای پایه

| رویداد پایه | حساسیت | رویداد پایه | حساسیت |
|-------------|-------------|-------------|------------|
| X34 | ۰,۰۰۶۲۵۹۱۰۴ | X48 | ۰,۰۰۳۰۶۶۱۹ |
| X46 | ۰,۱۱۴۷۵۹۳۱۸ | | |

- Vehicle - Dorado. In : *MTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, Kobe, Japan, vol. 2.
18. Strutt, JE. (2006) *Report of the Inquiry Into the Loss of Autosub2 Under the Fimbulisen.*, Southampton.
 19. Antonelli, G. (2006) Fault detection/tolerance strategies for AUVs and ROVs. In : *Underwater Robots – 2nd Edition* 2. Springer Berlin Heidelberg, Berlin 79-91.
 20. Griffiths, G., Millard, NW., Mcphail, S. D., Stevenson, P., Challenor, P. G. (2001) On the Reliability of the Autosub Autonomous Underwater Vehicles. *International Journal of the Society for Underwater Technology* 25(4), 175-184.
 21. Shi, C., Zhang, R., Yang, G. (2006) Fault Diagnosis of AUV Based on Bayesian Networks. In : *International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences*, Hanzhou, Zhejiang.
 22. Ting, S. C. (2006) *Research on Reliability of AUV Intelligent Decision System.*, Harbin, China.
 23. Needham, DM., Jones, SA. (2007) A Software Fault Tree Key Node Metric. *Journal of Systems and Software* 80(9), 1530–1540.
 24. Griffiths, G., Trembanis, A. (2007) Towards a Risk Management Process for Autonomous Underwater Vehicle. In : *Masterclass in AUV Technology for Polar Scienc.* Society for Underwater Technology, Southampton 103-118.
 25. Bian, X., Mou, C., Yan, Z., Xu, J. (2009) Reliability Analysis of AUV Based on Fuzzy Fault Tree. In : *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun.
 26. Bian, X., Mou, C., Yan, Z., Xu, J. (2009) Simulation Model and Fault Tree Analysis for AUV. In : *International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun.
 27. Bian, X. (2009) *Research on the Reliability for AUV Based on Fault Tree.*, Harbin, China.
 28. Xiao, L. (2009) *Research on Motion Control and Reliability of Mini Underwater Vehicles.*, Harbin, China.
 29. Zuo, Y. (2009) *Research on Software Reliability and Fault Diagnosis for AUV.*, Harbin, China.
 30. Brito, M. P., Griffiths, G., Challenor, P. (2010) Risk Analysis for Autonomous Underwater Vehicle Operations in Extreme Environments. *Society for Risk Analysis* 30(12), 1771-1788.
 31. Xu, H., Li, G., Liu, J. (2013) Reliability Analysis of an Autonomous Underwater Vehicle Using Fault Tree. In : *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Yinchuan.
 32. Hu, Z., Yang, Y., Lin, Y. (2013) Failure Analysis for the Mechanical System of Autonomous Underwater Vehicles. In : *International Loss of an AUV Operating in Four Environments.*, Southampton.
 4. Isermann, R. (2005) Model-based Fault-detection and Diagnosis–Status and Applications. *Annual Reviews in control* 29 (1), 71-85.
 5. Akmal, M., Yusoff, M., Arshad, M. R. (2012) Active Fault Tolerant Control of a Remotely Operated Vehicle Propulsion System. *Procedia Engineering* 41(1), 622-628.
 6. Dubrova, E., (2012), *Fault-Tolerant Design*, New York Heidelberg Dordrecht London: Springer
 7. Limnios, N. (2010), *Fault Trees*, John Wiley & Sons.
 8. Lee, WS., Grosh, DL., Tillman, FA., Lie, CH. (1985) Fault Tree Analysis, Methods, and Applications - A Review. *IEEE Transactions on Reliability* 34 (3), 194 - 203.
 9. Clifton, E. (1999) Fault Tree Analysis - A History. In : *17th International Systems Safety Conference*, Orlando.
 10. Bechta Dugan, J., Bavuso, S. J., Boyd, MA. (1990) Fault Trees and Sequence Dependencies. In : *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Los Angeles.
 11. Raiteri, DC., Franceschinis, G., Iacono, M., Vittorini, V. (2004) Repairable Fault Tree for the Automatic Evaluation of Repair Policies. In : *International Conference on Dependable Systems and Networks*, Florence, Italy.
 12. László, P. (2011) Sensitivity Investigation of Fault Tree Analysis with Matrix-Algebraic Method. *Theory and Applications of Mathematics & Computer Science* 1 (1), 35-44.
 13. Aslansefat, K., Latif-Shabgahi, G. and Zaferanchi, S. (2014), A Systematic Method Sensitivity Analysis of Module Failure in NMR Architecture Based on Fault Tree, in *9th Maintenance Conference*, Tehran, Iran, 2014 (In Persian).
 14. Alberto, O., Julian, P. (1999) Improving the safety of AUVs. In : *OCEANS '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*, Seattle, WA.
 15. Madsen, HØ., Christensen, P., Lauridsen, K. (2000) Securing the Operational Reliability of an Autonomous Mini-Submarine. *Reliability Engineering & System Safety* 68 (1), 7–16.
 16. Winchester, C., Govar, J., Banner, J., Squires, T., Smith, PH. (2002) A Survey of Available Underwater Electronic Propulsion Technologies and Implications for Platform System Safety. In : *IEEE Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, West Bethesda.
 17. Podder, TK., Sibenac, M., Thomas, H., Kirkwood, WJ., Bellingham, JG. (2004) Reliability Growth of Autonomous Underwater

36. Alam, K., Ray, T. and Anavatti, S.G., (2014) A Brief Taxonomy of Autonomous Underwater Vehicle Design Literature, *Ocean Engineering*, 88 (4), 627–630.
37. He, B., Yao, K., Li, B., Ren, C., Luo, J. (2009) Design and Reliability Analysis of Data Logging and Management System for AUV. In : *International Conference on Information Engineering*, Taiyuan, Shanxi.
38. Mahmood, Y. A., Ahmadi, A., Verma, A. K., Srividya, A., & Kumar, U., (2013), Fuzzy Fault Tree Analysis: A Review of Concept and Application, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 4(1), 19-32.
33. Jalving, B., Gade, K., Hagen, OK., Vestgard, K. (2003) A Toolbox of Aiding Techniques for the HUGIN AUV Integrated Inertial Navigation System. In : *IEEE OCEANS*, San Diego, CA, USA.
34. Valavanis, KP., Gracanin, D., Matijasevic, M., Kolluru, R., Demetriou, GA. (1997) Control Architectures for Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Control Systems* 17(6), 48 - 64.
35. Aslansefat, K. and Latif-Shabgahi, G. (2013), A Novel Classification for Underwater Robots, in *5th Offshore Industries Conference*, Tehran, Iran, 2013 (In Persian).

Reliability and Sensitivity Evaluation of an AUV through Fault Tree Model with Uncertainty Consideration

Abstract

The occurrence of faults, and consequently the loss of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) may create catastrophic outcomes to their owners. Identification of these faults and their classification provide useful information result in the detection of system bottlenecks in the design process. This paper examines the basic faults of AUVs, and studies the failure probability of their components and subsystems. The paper is then builds up the fault tree model of the AUV from its identified faults and structural TOPology to highlight its critical paths, critical sub-systems, components importance, and cut-set importance values. The reliability of the AUV is then calculated from its fault tree model in the absence/presence of uncertainty associated with the failure probability of basic events. Fuzzy approach is used for handling the uncertainties. The sensitivity of the vehicle failure to the variation of the failure probability of system components is also calculated by using an innovative way.

Keywords

Autonomous Underwater Vehicle, Fault Tree, Probability of Failure, Reliability, Sensitivity, Fuzzy Logic