

## تحلیل و شناسایی عیب یک ربات موازی کابلی به کمک روش بانداگراف

علیرضا علیخانی<sup>۱</sup>

۱-دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران، aalikhani@ari.ac.ir

### چکیده

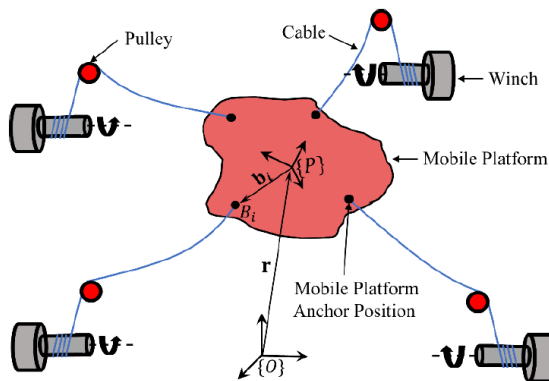
در این مقاله به کمک روش بانداگراف به تحلیل و شناسایی خرابی یک ربات موازی کابلی پرداخته می‌شود. این ربات به عنوان یک سیستم مکترونیک پیشرفته از قسمت‌های مختلف مکانیکی، الکتریکی، الکترونیکی و نرم‌افزاری تشکیل شده است. روش بانداگراف به عنوان یک روش سیستماتیک در مدلسازی و استخراج معادلات حاکم، قابلیت مناسبی در تولید رابطه افزونگی تحلیلی داشته و امکان عیب‌یابی بر اساس این افزونگی را ایجاد می‌نماید. لذا به کمک روش بانداگراف، یک سیستم شناسایی عیب مدل مینا توسعه داده شده و برای این نوع ربات توسعه داده خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: مدل مینا، شناسایی خرابی، ربات موازی کابلی، روش بانداگراف

### مقدمه

ربات‌های کابلی یکی از انواع ربات‌های موازی هستند که در دو دهه اخیر مورد توجه جدی صنایع مختلف قرار گرفته‌اند [1]. قابلیت بکارگیری اینگونه ربات‌ها در فضای کاری بزرگ و نسبت بالای "بار به وزن" از مزایای اینگونه ربات‌ها به حساب می‌آیند (شکل ۱). ولی وجود کابل به عنوان یکی از عناصر اصلی اینگونه ربات‌ها و خرابی‌های ناشی از آن و یا عملگرهای متصل به آنها، در عمل دغدغه ایمنی و قابلیت اطمینان آن‌را بیش از پیش نمایان می‌نماید. لذا طراحی سامانه شناسایی عیب جهت پیشگیری از عیوب و یا استفاده از آن در طراحی کنترل تحمل‌پذیر عیب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با توجه به ساختار ربات‌های کابلی که یک سامانه مکترونیک به حساب می‌آید، استفاده از روش‌هایی مانند بانداگراف که قابلیت بسیار خوبی در مدلسازی و تحلیل اینگونه سیستم‌ها را دارند مناسب می‌باشد. روش بانداگراف یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی است که در آن حوزه‌های مختلف انرژی می‌توانند به راحتی با یکدیگر ارتباط داشته

باشند. در این روش از اصل بقای انرژی استفاده شده و براساس آن معادلات حالت استخراج می‌گردد.



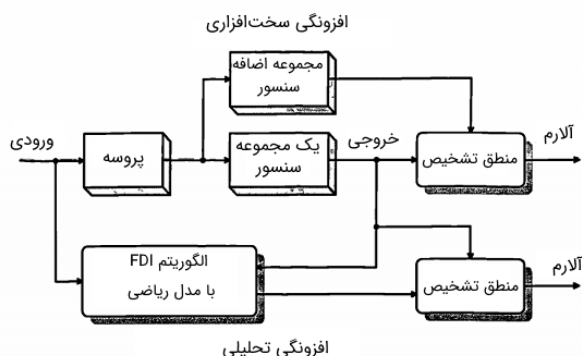
شکل ۱: شماتیک کلی یک ربات کابلی [2]

این روش اولین بار در سال ۱۹۶۶ توسط پاینتر<sup>۱</sup> و به منظور مدلسازی و استخراج معادلات حالت معرفی شد، اما بعدها توسط شاگردش کارنوپ<sup>۲</sup> برای سیستم‌هایی که در حوزه‌های مختلف انرژی (الکتریکی، شیمیایی، مکانیکی، سیالاتی و ترمودینامیکی ...) سر و کار دارند توسعه

<sup>۱</sup>karnopp

<sup>۲</sup>paynter

سخت افزاری را دارا است. شکل ۲ تفاوت مفاهیم افزونگی تحلیلی و افزونگی سخت افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تفاوت مفاهیم افزونگی تحلیلی و سخت افزاری

در الگوریتم افزونگی تحلیلی، تفاوت نتیجه تولید شده از چک کردن تطابق متغیرهای مختلف با عنوان سیگنال مانده یاد می‌شود. سیگنال مانده در حالتی که سیستم در شرایط عادی کار می‌کند، برابر با صفر است و هنگامی که عیبی در سیستم اتفاق افتد، مقداری غیرصفر پیدا خواهد کرد. خاصیت صفر و غیرصفر بودن سیگنال مانده برای تشخیص وقوع و یا عدم وقوع عیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزونگی تحلیلی از مدل ریاضی پروسه تحت نظارت استفاده می‌کند به همین دلیل به عنوان یک روش تشخیص عیب بر اساس مدل پروسه شناخته می‌شود. از روش باندگراف هم بصورت کیفی و هم بصورت کمی می‌توان برای شناسایی عیب استفاده نمود [3]. در این مقاله برای تولید افزونگی تحلیلی که یک روش کمی به حساب می‌آید از باندگراف استفاده خواهد شد.

### معرفی روش باندگراف

روش باندگراف یک روش مدلسازی سیستم‌های دینامیکی است که انرژی سیستم‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهد و از روی آن مدل ترسیمی (گرافیکی) را به نمایش می‌گذارد. روش‌های بلوک دیاگرامی صرفاً ساختار محاسباتی مدل را در بر می‌گیرند در حالی که روش باندگراف به عنوان یک روش مدرن، پیشرفته و قوی، هر دو ساختار محاسباتی و توپولوژیکی سیستم‌های دینامیکی را بیان می‌کند. این روش بر روی محدوده وسیعی از سیستم‌های دینامیکی پیچیده و ترکیبی بویژه سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی و نیز سیستم‌های شیمیایی، سیالاتی ترمودینامیکی، اکولوژیکی، مغناطیسی و ... قابل اعمال می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان مدلسازی، شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل و ارزیابی این گونه سیستم‌های پیچیده و با مقیاس بزرگ را سریع، راحت و مقاوم انجام داد. با توجه به ساختار روش باندگراف، آن را یک متدولوژی مدلسازی می‌شناسند و لذا می‌توان مدلسازی را به

داده شد. در سال ۲۰۰۰ دانشمندی به نام‌های داهین<sup>۱</sup> و تانگی<sup>۲</sup> به بررسی تعیین کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری در روش باندگراف پرداختند. در دو دهه اخیر پژوهش‌ها در حوزه استفاده از روش باندگراف در تشخیص عیب شروع شده است [3] و همچنان در حال توسعه و گسترش می‌باشد [5-1].

در این مقاله نیز به بررسی یک ربات موازی کابلی و طراحی سامانه شناسایی عیب به کمک روش باندگراف پرداخته خواهد شد. در ادامه پس از بیان کلیاتی در خصوص روش‌های شناسایی عیب به معرفی مکانیزم مورد نظر و مدلسازی آن به کمک روش باندگراف پرداخته و سپس به کمک ساختار پیشنهادی مبتنی بر روش باندگراف به شناسایی عیب‌های در نظر گرفته شده پرداخته خواهد شد.

### روش شناسایی عیب

در یک دسته بندی کلی و رایج می‌توان انواع شناسایی را به روش‌های مدل مبنای کمی، مدل مبنای کیفی و بر مبنای تاریخچه فرایند تقسیم بندی کرد.

یک روش سنتی برای تشخیص عیب، مبتنی بر افزونگی (Redundancy) سخت افزار (فیزیکی/موازی) است که از راه‌های چندگانه‌ای از سنسورها، عملگرها و کامپیوترها و نرم افزارها برای اندازه‌گیری و یا کنترل یک متغیر مشخص استفاده می‌کند. معمولاً یک سیستم رای گیری به سیستم افزونگی سخت افزار برای اتخاذ تصمیم در صورت وقوع عیب اضافه خواهد شد و محل آن احتمالاً در میان اجزای سیستم افزونگی است.

استفاده از افزونگی چندگانه یکی از روش‌های رایج تشخیص عیب است که به عنوان مثال در سیستم کنترل پرواز و یا در راکتورهای هسته‌ای از آن استفاده می‌شود. مشکلات عمده روش افزونگی سخت افزار، وجود تجهیزات اضافه و هزینه نگهداری و بنابراین نیاز به فضای بیشتر برای جای‌دهی تجهیزات است.

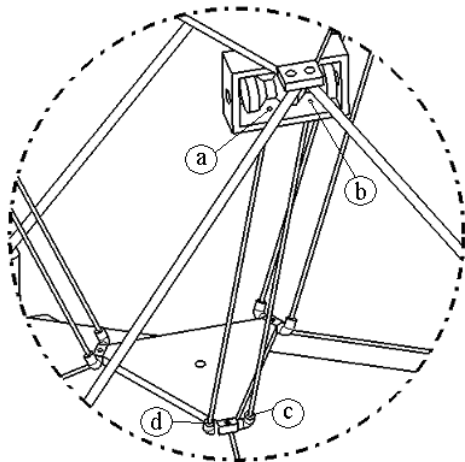
از نقطه نظر تضاد بین قابلیت اطمینان و هزینه اضافه کردن تجهیزات جدید، استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده غیرمشابه برای چک کردن متقابل داده‌ها نسبت به تکثیر تکی سخت‌افزارها، معقول‌تر به نظر می‌رسد. این موضوع با عنوان افزونگی تحلیلی شناخته می‌شود که در آن از ارتباط تحلیلی افزونگی بین متغیرهای مختلف اندازه‌گیری شده از پلانیت تحت نظارت (نظیر ورودی به خروجی، خروجی به خروجی، ورودی به ورودی) استفاده می‌کند.

هیچ گونه سخت افزار اضافی در یک الگوریتم افزونگی تحلیلی استفاده نمی‌شود، زیرا هیچ گونه تجهیزات اضافه‌ای لازم نیست، از این رو افزونگی تحلیلی پتانسیل قابلیت اطمینان بیشتری، نسبت به افزونگی

<sup>۲</sup>tanguy

dauhin<sup>۱</sup>

تامین کشش مورد نیاز در کابل‌های فوقانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کابل‌های پایینی مشابه کابل‌های فوقانی پس از عبور از سوراخ هدایت کننده که بر روی قاب قرقره قرار دارند بر روی قرقره تائیده می‌شوند. جهت و مقدار برآیند نیروی کابل‌های پایینی مرتبط با موقعیت مجری نهایی و مقدار نیروی داخلی کابل‌ها است.



شکل ۴: نمایش متوازی الاضلاع  $abcd$

معادل مکانیزم فوق در صورتی که به جای کابل‌ها از رابط‌های صلب استفاده شود مکانیزمی خواهد بود که در آن به جای جفت کابل‌های فوقانی از سیلندر استفاده شده که در ابتدا و انتهای آنها مفاصل ساچمه‌ای به کار گرفته شده‌اند. این سیلندرها جابجایی یکسان ایجاد می‌نمایند تا قید مساوی بودن طول کابل‌ها را ارضا نمایند. این مکانیزم معادل مشابه ربات دلتا [7] خواهد بود و لذا می‌توان اثبات نمود که این مکانیزم نیز فقط سه درجه آزادی انتقالی دارد. در نتیجه مجموعه فوقانی ربات زمانی که کابل‌ها تحت کشش باشند یک مکانیزم سه درجه آزادی خواهد بود. از آنجایی که ربات هیچگونه دورانی ندارد برخورد کابل‌ها در این مکانیزم اتفاق نمی‌افتد.

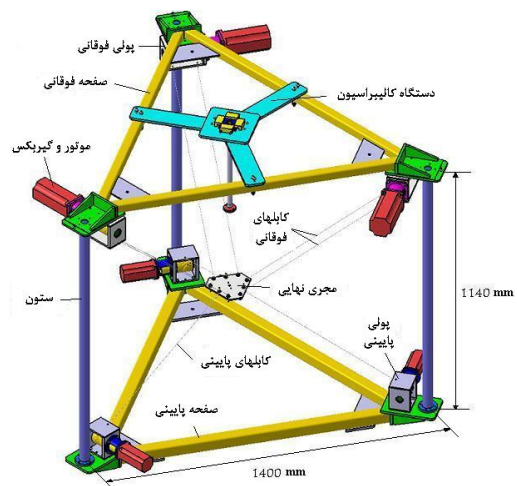
### معادلات حاکم و صحنه‌گذاری آن‌ها

معادلات سینماتیک و دینامیک ربات کابلی LCDR در مرجع [8] به کمک روش نیوتن-اولیتر ارائه شده‌اند. در این مقاله به کمک روش باندگراف که یک روش گرافیکی ساختار یافته است و در عین حال قوانین بقای انرژی را ارضا می‌نماید به مدلسازی ربات کابلی پرداخته می‌شود. این روش برای مدلسازی زیرسیستم‌های مختلف مانند سنسورها، عملگرها و سیستم کنترل که در حوزه‌های مختلف انرژی قرار دارند به صورت یکپارچه بسیار مناسب می‌باشد. در این قسمت به توسعه مدل تقریبی و در عین حال قابل محاسبه برای دینامیک معکوس ربات موازی کابلی پیشنهاد شده که بتواند در محاسبات بلادرنگ مورد استفاده قرار گیرد پرداخته خواهد شد.

صورت فرآیندی انجام داد. علاوه بر فرآیند مدلسازی، فرآیند تحلیل و یافتن معادلات حالت سیستم نیز از قابلیت‌های این روش است. یکی از ویژگی‌های مهم این روش با توجه به ساختار گرافیکی آن، نمایش جریان توان در کل مدل می‌باشد و این به دلیل این است که مدل باندگراف در واقع تعیین کننده جریان توان اجزا سیستم می‌باشد. برای اطلاع جامع از این روش منابع بسیار مناسبی مانند [6] در اختیار می‌باشند.

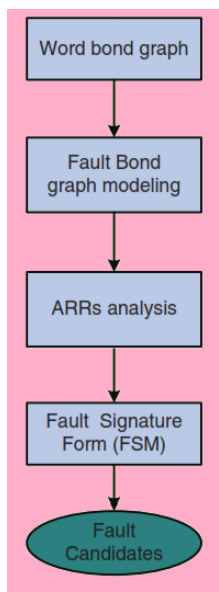
### معرفی مکانیزم ربات موازی کابلی و اجزای آن

مکانیزم مورد بحث در این مقاله یک ربات کابلی به نام LCDR است که از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است (شکل ۳). قسمت اول، سازه ربات است که دارای دو صفحه مثلثی شکل بالایی و پایینی بوده که توسط پایه‌ها به هم متصل شده‌اند. قسمت دوم، مجری نهایی است که یک صفحه مثلثی شکل مشابه صفحات مثلثی بالایی و پایینی بوده ولی از آن‌ها کوچکتر است. قسمت سوم، مجموعه ۶ عدد کابل‌های فوقانی است. این کابل‌ها دویبه دو با هم موازی بوده و هر یک از جفت کابل‌ها یک راس مجری نهایی را به یک قرقره که زیر صفحه فوقانی وصل شده اند متصل می‌نمایند. هر یک از کابل‌ها از یک سوراخ هدایت کننده مخصوص به خود که بر روی قاب قرقره قرار دارند عبور داده می‌شوند. همچنین هر یک از این قرقره‌ها به همراه یک سرو موتور برای کنترل طول کابل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳: ربات کابلی LCDR

وضعیت قرارگیری قرقره‌ها به گونه‌ای است که همراه با کابل‌ها و مجری نهایی سه متوازی الاضلاع  $abcd$ ، تشکیل می‌دهند (شکل ۴). خطوط  $ad$  و  $bc$  با یکدیگر موازی و مساوی می‌باشند لذا خطوط  $ab$  و  $cd$  نیز با یکدیگر موازی و مساوی می‌باشند. قسمت چهارم این مکانیزم مجموعه کابل‌های پایینی است که شامل سه کابل است که مجری نهایی را به صفحه پایینی سازه متصل می‌نمایند. این کابل‌ها به منظور



شکل ۸: الگوریتم شناسایی عیب به کمک روش باندگراف

همانطور که در شکل ۸ نیز نشان داده شده است، پس از ارائه مدل باندگراف، روابط افزونگی تحلیلی برای سیستم مورد نظر بدست آورده می شود و بعد از آن به تشکیل ماتریس علامت عیب پرداخته خواهد شد و به کمک آن کاندیدای خرابی و محل آن بدست خواهد آمد.

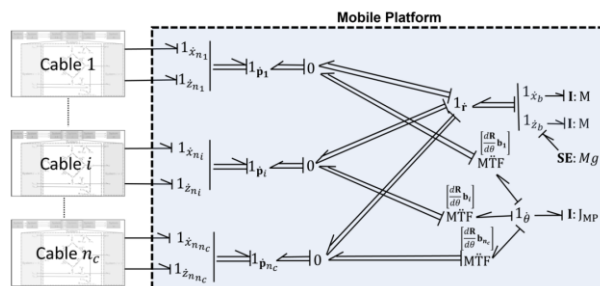
در روش باندگراف متغیرهای شناخته شده به چند دسته تقسیم می شوند؛ منابع  $(Se, Sf)$ ، منابع مدوله شده  $(MSe, MSf)$ ، مقادیر اندازه گیری شده از سنسورها  $(De, Df)$ ، پارامترها و ورودی های سیستم  $(u, X)$ . بنابراین رابطه افزونگی تحلیلی به صورت زیر قابل بیان خواهد بود [3]:

$$ARR: f(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, u, X) = 0 \quad (1)$$

در استخراج معادلات افزونگی همانند بدست آوردن معادلات حالت از خواص شاخص علیت استفاده خواهد شد. اما بایستی توجه داشت هنگامی که از باندگراف رفتاری جهت استخراج معادلات حالت استفاده می شود، مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسورها، به عنوان خروجی سیستم عمل می کنند. بنابراین در این حالت، شاخص های علیت برای سنسورهای اندازه گیری تلاش، به صورت شکل ۹-الف نشان داده می شود. درحالی که وقتی از باندگراف برای جایابی عیب استفاده می شود، مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسورها، به عنوان ورودی سیستم عمل کرده و متناسب با آن، مکان شاخص های علیت نیز تغییر خواهد یافت (۹-ب). همچنین چون در سنسورها مصرف انرژی ناچیز است، بنابراین در شکل ۹-ب مقدار جریان در باند ۴ صفر است یعنی:

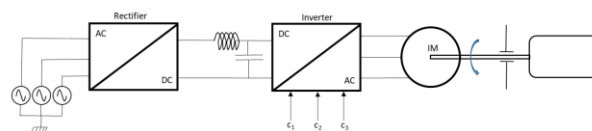
$$f_4 = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^3 f_i = 0 \quad (2)$$

همانطور که در تشریح ربات بیان شد، مجری نهایی که یک صفحه است و ابزارهای کار به آن متصل می شوند، توسط  $n$  کابل کنترل می شود. لذا مدل باندگراف آن مطابق با شکل ۵ می باشد.



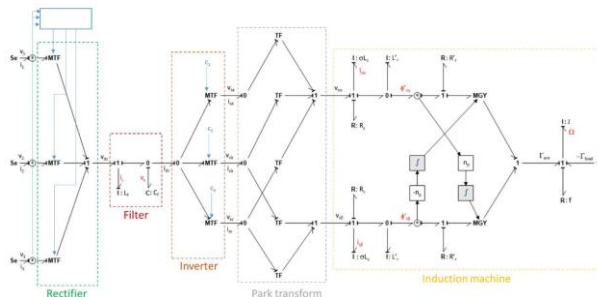
شکل ۵: مدل باندگراف ربات کابلی [2]

کنترل طول و کشش کابل ها نیز توسط کاراندازهایی انجام می شود که از سروموتور و گیربکس و پولی تشکیل شده اند و دارای ساختار مکترونیک مطابق با شکل ۶ می باشند.



شکل ۶: نمایش ساختار کاراندازه های ربات که به هریک از قرقره ها متصل می شوند [9]

لذا مدل باندگراف این کاراندازه ها مطابق با شکل زیر می تواند باشد:



شکل ۷: مدل باندگراف کاراندازه های ربات کابلی [9]

با ترکیب مدل های بدست آمده مدل کلی ربات بدست خواهد آمد.

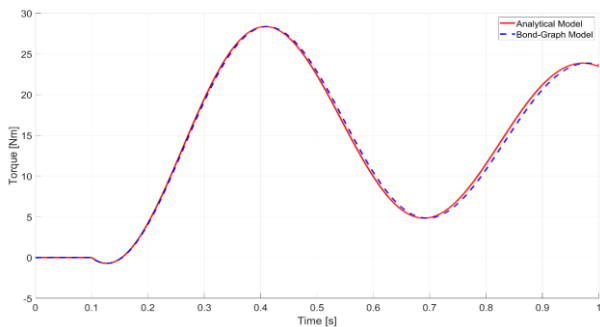
### شناسایی عیب مبتنی بر روش باندگراف

در این بخش به بیان طراحی یک نظاره گر بر اساس روش باندگراف پرداخته خواهد شد.

## نتایج شبیه سازی

## مقایسه نتایج رفتار دینامیکی

در اولین قدم ابتدا نتایج مدلسازی بدست آمده از روش نیوتن-اویلر که در مرجع آورده شده است و مدل بدست آمده از روش باندگراف با همان پارامترهای تعریف شده به بررسی صحت عملکرد مدل بدست آمده می پردازیم. نتایج برای یک مسیر تعریف شده مطابق با شکل ۱۰ است. خطای ناچیز بین دو روش گویای دقت مدل بدست آمده و صحت عملکرد آن است.



شکل ۱۰: مقایسه گشتاور اعمالی بر اساس روش تحلیلی نیوتن-اویلر و روش باندگراف

۱. روابط افزونگی و ماتریس علامت عیب برای یک مجموعه کارانداز و کابل متصل به آن بر اساس مدل باندگراف توسعه داده شده و مباحث فوق معادلات افزونگی و خطای مانده به قرار زیر بدست آورده می شوند:

$$ARR_1: \frac{r}{R} \left( E - \frac{L}{r} \frac{d}{dt} \left( b_1 \omega + J_1 \frac{d\omega}{dt} + s \left( m \frac{dv_2}{dt} + b_2 v_2 \right) \right) - r \omega \right) - b_1 \omega - J_1 \frac{d\omega}{dt} - s \left( m \frac{dv_2}{dt} + b_2 v_2 \right) = 0$$

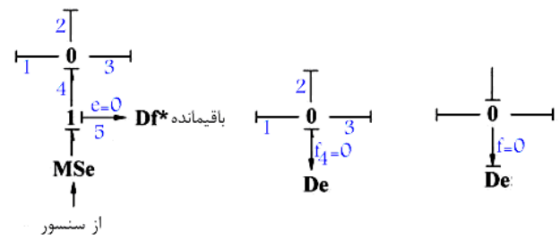
$$ARR_2: k \int (s \omega - v_2) dt - m \frac{dv_2}{dt} - b_2 v_2 = 0 \quad (5)$$

و ماتریس علامت عیب نیز به قرار زیر میباشد:

جدول ۱: ماتریس علامت عیب

Components	Residuals			
	R1	R2	Mb	Ib
Motor	1	0	1	0
GearBox	1	1	1	0
winch	1	1	1	0
Cable	1	0	1	0

با توجه مقادیر جدول ۱، شناسایی وجود خرابی در المانهای هریک از مجموعه موتور، گیربکس، وینچ و کابل قابل انجام است ولی تعیین محل خرابی اینکه این خرابی ناشی از کدام یک از آن ها است با توجه به مدل ارائه شده وجود ندارد. اما تعیین اینکه کدام یک از مجموعه های فوقانی دچار خرابی شده است نیاز به توسعه مدل باندگراف و ماتریس علامت خرابی دارد که در این مقاله به آن پرداخته نشده است.



شکل ۹: الف: سنسور سعی ب: سنسور سعی در حالت معکوس شده ج: سنسور مجازی برای تعیین باقی مانده [10]

لذا می توان از این مفهوم برای تعریف سنسور مجازی که مقدار باقیمانده را محاسبه می کند استفاده نمود. سنسورهای مجازی، سنسورهایی هستند که ماهیت محاسباتی داشته و آنها را با علامت ستاره نمایش می دهیم (شکل ۹-ج). در حالت ایده آل که سیستم در شرایط ایده آل کار می کند، مقدار اندازه گیری شده توسط سنسور مجازی، برابر صفر است. ولی در حالتی که در سیستم عیبی ظاهر شود، خروجی آن ها یک باقیمانده خواهند داشت. بنابراین در شکل ۹-ج روابط افزونگی از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$ARR = f_5 = f_4 = 0 \rightarrow ARR = \sum_{i=1}^3 f_i = 0 \quad (3)$$

پس از بدست آوردن معادلات افزونگی، جهت آشکارسازی و جایابی عیب نیاز به تشکیل ماتریس علامت عیب FSM است [11]. ماتریس علامت عیب یک ماتریس با اعضای صفر و یک است که در صورت وجود پارامتر Xi در معادله افزونگی ARRj، درایه jz ام یک شده و در غیر اینصورت صفر خواهد بود:

$$S_{ji} = \begin{cases} 1 & : i \text{ th } ARR \text{ sensitive to faults in } j \text{ th component} \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases}$$

ماتریس S منطقی را برای جداسازی عیب زمانی که عیبی در سیستم شناسایی می شود، فراهم می آورد. هر المانی علامت مخصوص به خود را داشته و در صورت یکتا بودن این ماتریس امکان جداسازی عیب براحتی وجود خواهد داشت.

همراه با S یک "بردار انسجام" نیز تولید می شود که آن نیز از اعداد صفر و یک تشکیل شده و از قانون زیر تبعیت می کند:

$$C_i = \begin{cases} 1 & : \text{if } |r_i| > \varepsilon_i \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

یعنی در صورت بزرگتر بودن مانده خطا از یک مقدار آستانه که انتخاب آن باید بهینه باشد، مقدار یک شده و نشان دهنده بروز خطا است. و اگر از مقدار آستانه تعریف شده کمتر باشد، خطایی شناسایی نشده است. با مقایسه بردار C با سطرهاى ماتریس FSM خطا جایابی می شود.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به کمک روش بانداگراف که یک روش مبتنی بر ترسیم جریان انرژی است، به تولید روابط افزونگی و خطای مانده یک ربات کابلی که دارای شش سروموتور و ۹ کابل به همراه یک صفحه متحرک است پرداخته شد. با تشکیل ماتریس علامت عیب و ماتریس انسجام امکان جایابی عیب فراهم شد.

با توجه به مکانیزه بودن مدلسازی و همچنین قابلیت بکارگیری در سیستم‌های دارای حوزه‌های انرژی مختلف، استفاده از این روش به عنوان یکی از روش‌های مدل مینا (هم بصورت کمی و هم بصورت کیفی) پیشنهاد می‌شود. ترکیب این روش با روش‌های دیگر داده-مینا امکان بالابردن کارایی و کاهش محدودیت‌های مانیتورینگ را فراهم می‌آورد. همچنین پیش بینی می‌شود استفاده از این روش در طراحی سامانه‌های تشخیص و شناسایی و تخمین عیب کنترل‌های هوشمند برخط بسیار مفید باشد.

## مراجع

- [3] A.K. Samantaray and B.O. Bouamama, Model-based Process Supervision A Bond Graph Approach, Springer-Verlag London, 2008.
- [4] Borutzky, W. (2009). Bond graph model-based fault detection using residual sinks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 223(3), 337–352.
- [5] Borutzky, W. , Bond Graph Modelling for Control, Fault Diagnosis and Failure Prognosis, Springer Nature Switzerland, 2021,
- [6] J. A. Tenreiro Machado and Vitor M. R. Cunha, An Introduction to Bond Graph Modeling with Applications, CRC Press, 2021.
- [7] S. Behzadipour and A. khajepour, " A New Cable-Based Parallel Robot with Three Degrees of Freedom", Multibody System Dynamics (2005) 13: 371–383
- [8] ع. علیخانی، ع. صدوق ونینی، آ. الستی و س. بهزادی‌پور، " ارائه و تحلیل یک مکانیزم جدید برای ربات‌های موازی کابلی بزرگ با سه درجه آزادی انتقالی"، نشریه مهندسی مکانیک ایران « (پیاپی ۱۴)، بهار ۱۳۸۸ شماره ۱.
- [9] Baptiste Trajin, Paul-Etienne Vidal, Frédéric Rotella, " Bond graph modeling for the simulation of an electromechanical chain", International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'2018), Jul 2018, Bordeaux, France. pp.616-623.
- [10] ا. صانعی، " آشکارسازی و جایابی عیب مقاوم به عدم قطعیت برای سیستم‌های تراکم‌پذیر به روش بانداگراف"، مجله کنترل، ۱۳۹۲ پاییز شماره ۳، جلد ۷، صفحه 41-52.
- [11] K. Medjaher, " A bond graph model-based fault detection and isolation", pp.503-512, 2011. hal-00635549.
- [1] Andreas Pott, Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application, Springer Cham, 2018.
- [2] I. Chawla, P. Mani Pathak and A. Kumar Samantaray, " COMPREHENSIVE DYNAMIC MODEL OF A CABLE-DRIVEN PARALLEL ROBOT USING THE BOND GRAPH APPROACH", Simulation Series (2021), 53(3): 181-191.