

Original Research

Electric Power Subsystem Modeling of a Remote Sensing Satellite Based on Multi-Input and Output Fuzzy Systems

Morteza Ramezani^{1*}

¹Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Enghelab Islami, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.28.2020

Revised: 11.07.2020

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Satellite conceptual design
Fuzzy systems
Multi-input and multi-output fuzzy
Remote sensing satellite
Electric power subsystem (EPS)

***Corresponding Author:**

Morteza Ramezani

Email: m-ramezani@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Modeling and analysis of systems, particularly in complex systems with noise and uncertainty in behavior recognition and decision making of systems, is of vital importance. In this article, such system problems were solved to the greatest degree possible based on fuzzy theory. This fuzzy system has four input variables and two output variables. Since the fuzzy rules were obtained from an experienced expert in Electric Power Subsystem (EPS) design, the results were expected to be more practical and logical in comparison with the real behavior of the subsystem. The proposed fuzzy system can model the qualitative data of an expert. The simulated results had suitable accuracy in conceptual design compared with the practical data of remote sensing satellites. The results also showed that fuzzy systems can be used effectively to design the EPS of a remote sensing satellite.

مدل‌سازی زیرسیستم تأمین توان ماهواره سنجش از دور بر پایه سیستم‌های فازی چند ورودی-چند خروجی

مرتضی رضانی^{*}

۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰</p>	<p>از دیرباز، مسئله مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌ها خصوصاً در سیستم‌های پیچیده با دینامیک بالا همراه با نویز و عدم قطعیت در شناخت رفتار سیستم‌ها و تصمیم‌گیری، بسیار بااهمیت می‌باشد. در طراحی سیستم فازی مورد نظر از چهار متغیر به‌عنوان ورودی و دو متغیر به‌عنوان خروجی استفاده می‌شود. قوانین فازی بر مبنای تجربه فرد خبره در طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره سنجش از دور ارائه می‌گردد؛ لذا انتظار می‌رود نتایج عملی و منطقی‌تری بر اساس رفتار واقعی سیستم به‌دست آید. طراحی سیستم فازی پیشنهادی توانایی مدل‌کردن اطلاعات کیفی یک طراح خبره را نیز داراست. نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده در طراحی مفهومی دارای دقت مناسبی در مقایسه با داده‌های تجربی ماهواره‌های سنجش از دور می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های فازی می‌توانند برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی یک ماهواره سنجش از دور به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند.</p>
<p>کلید واژگان: طراحی مفهومی ماهواره سیستم‌های فازی فازی چند ورودی- چند خروجی ماهواره سنجش از دور زیرسیستم تأمین توان</p>	
<p>[*] نویسنده مسئول: مرتضی رضانی پست الکترونیکی: m-ramezani@tvu.ac.ir</p>	

مقدمه

طراحی ماهواره، یکی از فرایندهای تکراری با پیچیدگی بالاست. علت اصلی این پیچیدگی، وجود متغیرها و پارامترهای زیاد و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر می‌باشد [۱-۴]. این موضوع در مرحله طراحی مفهومی از مراحل دیگر طراحی بیشتر نمود پیدا می‌کند. اهمیت پرداختن به مرحله طراحی مفهومی به عنوان اولین و مؤثرترین قدم در طراحی یک سیستم فضایی، کاملاً قابل درک است. از طرفی، به‌دست آوردن یک فرمول کلی که بتوان با آن طراحی مفهومی را با سرعت و بازده قابل قبول تخمین زد، وجود ندارد؛ بنابراین این ایده استفاده از روش فازی که می‌تواند روش تفکر انسانی را اجرا کند می‌تواند به کیفیت و سرعت طراحی مفهومی محصولات هوافضا و به‌ویژه ماهواره کمک شایانی کند. یکی از زیرسیستم‌های اصلی در به انجام رسیدن مأموریت یک ماهواره، زیرسیستم تأمین توان ماهواره می‌باشد. در طراحی زیرسیستم تأمین توان، پارامترهای بسیاری وجود دارند که در این بین به‌دست آوردن اندازه و توان تولیدی آرایه‌های خورشیدی نقش به‌سزایی در سایزینگ این زیرسیستم را دارا می‌باشند.

سیستم‌های فازی یک محاسبات ریاضی مفهومی را برای تبدیل فرایندهای واقعی دانش بشری ارائه می‌کنند. این روشی است که برای ساختن دانش تجربی با در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده می‌شود. تئوری مجموعه‌های فازی را اولین بار لطفی‌زاده^۱ در سال ۱۹۶۵ ارائه کرد. رفتار چنین سیستم‌هایی از طریق قوانین فازی به‌صورت اگر-آن‌گاه و با استفاده از متغیرهای زبانی قابل تشریح می‌باشد. سازوکار استنتاج فازی، شامل چهار مرحله است که عبارتند از: فازی‌ساز^۲، پایگاه داده و پایگاه قواعد، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌ساز^۳ [۵].

منطق فازی، روشی بسیار مؤثر برای طراحی و کنترل سیستم‌های پیچیده است که از تجربه انسانی برای تهیه قوانین حاکم استفاده می‌کنند. این روش دارای امتیازات بسیاری از قبیل سادگی اجرا و عدم نیاز به مدل ریاضی برای طراحی است. بسته به طبیعت پیچیده طراحی زیرسیستم تأمین توان ماهواره، این روش دارای بازده بالایی برای شبیه‌سازی این نوع طراحی می‌باشد و لذا دارای پیشینه تحقیق بسیاری در علوم مختلف از قبیل پزشکی، شیمیایی، مهندسی برق، مکانیک و البته هوافضا می‌باشد. چنگ و همکارانش (۲۰۰۹) [۶] با استفاده از روش فازی یک کنترلر زیرسیستم کنترل وضعیت ماهواره طراحی کردند که نتایج نشان‌دهنده کوتاه‌تر شدن زمان هم‌گرایی و پایین‌تر آمدن خطای حالت پایدار بدون محاسبات پیچیده است. در تحقیق عزیزی ارومیه همکارانش (۲۰۱۳) [۷] که به طراحی مفهومی در حوزه هوایی مرتبط می‌شود از روش فازی با تعداد ۵۹ قانون و سیستم استنتاج مددانی استفاده شده و نتایج با میزان حداکثر خطای ۲۰/۹ درصد ارائه شده است. منتظری و سفری (۲۰۱۱) [۸] یک متدولوژی برای طراحی کنترلر سوخت موتور توربین گاز به‌منظور برآوردن الزامات عملکرد و قیود ایمنی توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهند که این نظریه یک عملکرد تراست قابل قبول و حفاظت موتور در برابر سرعت‌های بالای موتور، درجه حرارت بالا و ضریب در کمپرسور را ارائه می‌دهد. شاهی آشتیانی و ملائک (۲۰۰۸) [۹] نشان دادند که چگونه یک ابزار تصمیم‌گیری می‌تواند بر مبنای منطق فازی توسعه یابد. تمایل اصلی این کار در نمایش قابلیت ارتجاعی و قدرت سیستم‌های منطق فازی به‌عنوان ابزاری در طراحی اولیه هواپیما می‌باشد. شاهی آشتیانی و ملائک، نتایج را بر اساس قوانین موتور استنتاج مددانی در توافق بهتری نسبت به طرح‌های واقعی موجود در کلاس سیستم‌های حمل‌ونقل با مسافت بلند می‌دانند. نوایی و همکارانش [۱۰-۱۱] به کنترل تلاطم سوخت در یک ماهواره در طول مانور مداری می‌پردازد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ اقدام به طراحی کنترلر

1- Lotfi Zadeh
2- Fuzzification
3- Defuzzification
4- Particle swarm optimization algorithm

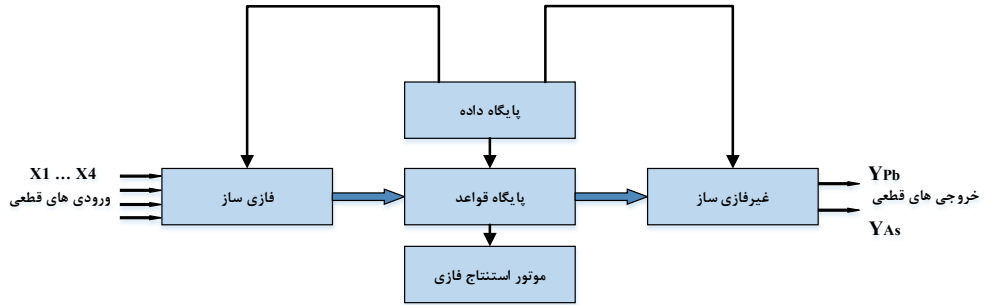
فازی کرده است. نوایی و همکارانش (۲۰۱۸) [۱۲] برای طراحی یک کنترلر PD کواترنیون به منظور کنترل وضعیت ماهواره از روش فازی برای دینامیک غیرخطی استفاده کردند. ویلامووسکی و لی [۱۳] یک کنترلر منطق فازی برای ردیابی نقطه ماکزیمم توان سیستم فتوولتائیک خورشیدی تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف را طراحی کردند. طاهرپناه و منهاج (۲۰۰۷) [۱۴] همان منطق را برای ردیابی نقطه ماکزیمم توان پنل‌های خورشیدی برای یک ماهواره LEO به کار بردند. مینگلیانگ و همکاران (۲۰۱۹) [۱۵] با استفاده از منطق فازی تکاملی به تشخیص عیوب داده‌ای در زیرسیستم توان یک ماهواره اقدام کردند. میرشمس و همکاران [۱۶] نیز از سیستم عصبی- فازی برای مدل‌سازی طراحی آرایه‌های خورشیدی در مرحله طراحی مفهومی اقدام کردند. دبیری و صفری [۱۷] برای برنامه‌ریزی‌های آموزشی و تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره و معصوم‌نژاد و همکاران [۱۸] به منظور تخمین مسیر حرکت یک جرتقیل سقفی از روش فازی استفاده کرده‌اند. از تلفیق ساختارهای فازی با شبکه‌های عصبی، شبکه‌های عصبی- فازی حاصل می‌شوند که برای شناسایی سیستم‌ها، طراحی کنترلرها و موارد متنوع دیگر به کار برده شده‌اند [۱۹-۲۲].

مدل‌سازی طراحی ماهواره یا زیرسیستم‌های ماهواره بر مبنای منطق فازی یا عصبی- فازی تا به حال در هیچ مرجعی ارائه نشده است و هدف اصلی این مقاله، نشان دادن میزان تأثیر و سرعت بخشیدن با دقت مطمئن‌تر روش فازی در طراحی مفهومی زیرسیستم تأمین توان یک ماهواره سنجش از دور می‌باشد. این ابزار در راستای انتخاب و طراحی مناسب از قوانین نوشته‌شده توسط طراح خبره استفاده می‌کند. برای ارزش‌گذاری، از اجرای این روش در پنج ماهواره سنجش از دور بهره گرفته می‌شود و با داده‌های تجربی ماهواره‌ها مقایسه صورت می‌پذیرد.

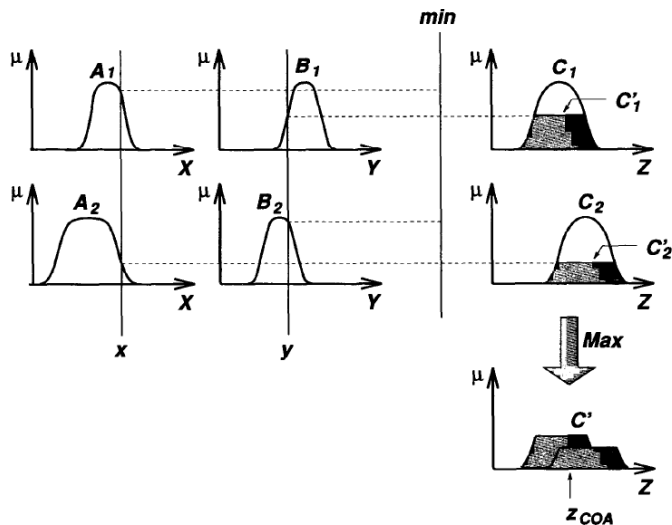
ساختار مفهومی سیستم فازی

هنگام طراحی مفهومی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی یک ماهواره، پارامترهای بسیاری مدنظر قرار می‌گیرند. این پارامترها در بین مصالحات مختلف انجام گرفته سیستمی و زیرسیستمی به یکپارچگی و انسجام طراحی، منجر می‌گردند. رسیدن به یک طرح یکپارچه، مستلزم دارا بودن تجربه کاری و صرف زمان در حل محاسبات پیچیده است. با استفاده از روش فازی می‌توان تجربه را با در نظر گرفتن جامعیت پارامترها/داده‌ها به حل مسئله اعمال کرد و در زمان کوتاه‌تری به جواب مسئله هم‌گرا شد. باید توجه داشت که هراندازه داده‌های سیستم فازی بیشتر باشند، به همان اندازه، طراحی، از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود. از طرفی، بیشتر بودن تعداد داده‌ها به بالاتر رفتن زمان محاسباتی و تعداد قواعد حاکم منجر می‌گردد؛ لذا با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل سرعت و دقت موردنظر می‌توان با در نظر گرفتن تجربه، تعداد متغیرها و میزان مؤثر بودن آنها را مشخص کرد.

ساختار کلی سیستم فازی با بخش‌های مرتبط در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل پنج بخش فازی‌ساز، پایگاه داده، پایگاه قواعد، موتور استنتاج فازی و غیرفازی‌ساز می‌باشد. بخش اول موجب می‌گردد تا متغیرهای ورودی به متغیرهای فازی یا غیرقطعی تبدیل گردند و بخش قواعد شامل کلیه قوانینی است که ارتباط متغیرهای زبانی را به یکدیگر و تولید قواعد موجب می‌گردد. بخش موتور استنتاج می‌تواند از روش‌های استنتاج مددانی یا تاکاگی- سوگینو که دو تا از معروف‌ترین موتورهای استنتاج فازی هستند، برای نگاشت بخش اگر قواعد، به آن‌گاه آنها استفاده کند. در نهایت، بخش غیرفازی‌ساز موجب تبدیل مقادیر فازی خروجی به متغیرهای قطعی در خروجی می‌گردد. این‌ها مراحل اصلی یک سیستم فازی را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق، از موتور استنتاج ضرب مددانی به دلیل سادگی محاسبات استفاده شده است [۷].



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم فازی با موتور استنتاج ضرب ممدانی



شکل ۲. نمایش موتور استنتاج مینیمم ممدانی [۷]

موتور استنتاج ممدانی، از عملگرهای حداقل و حداکثر برای ترکیب قوانین منطقی AND و OR استفاده می‌کند. این موتور استنتاج، برای اولین بار در کنترل مجموعه دیگ و موتور بخار، توسط برخی از قوانین زبانی به دست آمده از تجربه، توسعه داده شد. نحوه اجرای یک موتور استنتاج مینیمم ممدانی با دو قانون برای حالتی که تحت تأثیر دو ورودی X و Y قرار گرفته و خروجی قطعی فازی Z حاصل شده، در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۳].

در حالت کلی می‌توان مزایای سیستم‌های فازی را قابلیت بیان عدم قطعیت‌های ذاتی دانش بشری و سیستم‌ها را با استفاده از متغیرهای زبانی، تعامل ساده و مفهومی متخصصان یک حوزه با مهندسان طراح سیستم، تفسیر ساده با مفهوم منطقی نتایج به علت ارائه قوانین طبیعی، قابلیت تعمیم دانش فرد خبره از طریق اضافه کردن قوانین جدید یا اصلاح قوانین موجود، پایداری نسبی در برابر اغتشاشات احتمالی در سیستم و قابلیت توسعه برای سیستم‌های چندمتغیره، طبق تحقیق حاضر و معایب

سیستم‌های فازی را ناتوان در عمومیت بخشیدن یا به عبارت دیگر پاسخ دادن تنها به آنچه به عنوان قانون آن نوشته می‌شود و مشکل در سیستم‌های با ابعاد بالا که تفسیرپذیری را کاهش یا به طور قطعی از دست می‌دهد، در نظر گرفت.

طراحی سیستم فازی برای زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره

زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره، یکی از اصلی‌ترین زیرسیستم‌ها در طراحی یک ماهواره سنجش از دور می‌باشد. این زیرسیستم از چهار بخش اصلی تأمین توان، ذخیره انرژی، کنترل و تنظیم توان و توزیع توان تشکیل می‌شود. در طراحی مفهومی این زیرسیستم، تأکید بیشتر بر طراحی معماری و راه‌اندازهای مأموریت ماهواره می‌باشد. وظایف اصلی این زیرسیستم در یک ماهواره سنجش از دور را به طور خلاصه می‌توان تأمین پیوسته توان الکتریکی ماهواره در طول کل مأموریت، کنترل و توزیع توان الکتریکی ماهواره، تأمین الزامات توان در حالت‌های حداکثر و میانگین مصرف و حفاظت محموله ماهواره در برابر واماندگی‌های ناشی از توان الکتریکی و تغییرات ولتاژ بیان کرد.

با توجه به موارد بالا و منبع [۱]، الزامات اصلی به دست آمده از مأموریت ماهواره شامل توان مصرفی، اطلاعات مداری (شامل شیب و ارتفاع مداری) و طول عمر ماهواره است که منجر به به دست آوردن نوع، اندازه و توان تولیدی آرایه‌های خورشیدی در مراحل اولیه طراحی می‌باشد. البته برای واضح‌تر گردیدن ارتباط زیرسیستم تأمین توان ماهواره با دیگر زیرسیستم‌ها جدول ۱ بیانگر مصالحات مختلف این زیرسیستم با دیگر زیرسیستم‌هاست. برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره ابتدا نیاز است که متغیرهای اصلی با در نظر گرفتن تجربه طراح و طراحی کلاسیک موجود [۱] مشخص شوند. جدول ۲ بیانگر متغیرهای ورودی و خروجی زیرسیستم تأمین توان در یک ماهواره سنجش از دور می‌باشد. این متغیرها در مرحله مرور الزامات سیستم مشخص و ثابت می‌گردند. مدل‌سازی برخی از متغیرها مانند شرایط محیطی و نیازمندی‌های ولتاژ به مواردی فراتر از یک یا چند متغیر وابسته هستند و لذا خود نیازمند به مدل‌سازی مستقلی می‌باشند که هدف این مقاله نیست. در این متغیرها/پارامترها هدف، ثابت کردن و تعیین اولیه آنها برای وارد شدن به مرحله بعدی طراحی می‌باشد. بیان این نکته ضروری است که هر چند متغیری مانند مدت زمان خورشیدگرفتگی به ارتفاع مداری وابسته است اما در مدل‌سازی طراحی سیستمی می‌توان ثابت فرض کردن مقدار اولیه هر یک از این متغیرها را به عنوان متغیر مستقل ارائه شده از طرف مأموریت ماهواره در نظر گرفت. در این مقاله از چهار متغیر ورودی و دو متغیر خروجی برای طراحی زیرسیستم بر مبنای سیستم فازی استفاده شده است که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

پس از اتخاذ متغیرهای ورودی و خروجی زیرسیستم، باید برای این متغیرها با استفاده از تجربیات یک طراح خیره، مبادرت به انتخاب محدوده متغیرها، تعیین توابع تعلق فازی و نوع آنها و سپس تولید قواعد فازی بر اساس موتور استنتاج کرد.

محدوده در نظر گرفته شده برای هر یک از متغیرهای طراحی در قالب جدول ۴ نشان داده شده است. این محدوده‌ها با استفاده از پورتال مشاهده زمین [۲۴] طوری انتخاب شده‌اند که تقریباً بیشتر ماهواره‌های سنجش از دور را پوشش می‌دهند.

جدول ۱. مصالحتات زیرسیستم تأمین توان ماهواره با دیگر زیرسیستمها

زیرسیستم	ورودی به زیرسیستم توان	خروجی از زیرسیستم توان
الکترونیک محموله	توان موردنیاز سطوح ولتاژ موردنیاز حفاظت‌های مورد نظر	مشخصه‌های ولتاژی باس ملاحظات EMC
مخابرات محموله	توان موردنیاز سطوح ولتاژ موردنیاز اثر سایه‌اندازی حفاظت‌های موردنظر	مشخصه‌های ولتاژی باس ملاحظات EMC
حرارت	توان موردنیاز هیترها و روند کنترل آن‌ها سطوح ولتاژ موردنیاز تحلیل حرارتی آرایه‌های خورشیدی	مشخصه‌های ولتاژی باس محدوده‌های دمایی عملکرد اجزای زیرسیستم توان تلفات حرارتی اجزای زیرسیستم توان
پردازش	توان مورد نیاز محدودیت‌ها/ سیگنال‌های کنترلی نوع پردازش (متمرکز/گسسته)	مشخصه‌های ولتاژی باس الگوریتم‌های مدیریت/ جایگزینی توان نوع و تعداد سیگنال‌های مونیتورشونده
کنترل وضعیت و موقعیت	توان مورد نیاز سطوح ولتاژ مورد نیاز نوع پایداری الزامات نشانه روی مدهای عملیاتی	مشخصه‌های ولتاژی باس
سازه	شکل و ابعاد ماهواره	نیاز به مکانیزم‌های بازشونده نیاز به مکانیزم‌های دنبال‌کننده خورشید وزن و ابعاد پانل‌ها، باتری و اجزای الکترونیکی ملاحظات اثر سایه‌اندازی چیدمان قطعات ملاحظات EMC
TT&C	توان مورد نیاز سطوح ولتاژ مورد نیاز اثر سایه‌اندازی حفاظت‌های موردنظر	مشخصه‌های ولتاژی باس ملاحظات EMC

با توجه به پراکندگی زیاد اعداد متغیرها، برای مدل‌سازی فازی طراحی زیرسیستم، تمامی آنها بین محدوده [۰، ۱] نرمالیزه شده‌اند. پس از تعیین محدوده، باید رفتار متغیرهای ورودی و خروجی را در قالب توابع تعلق سیستم فازی مشخص کرد. رفتار این توابع، تأثیر بسیار زیادی بر نتایج کار خواهند داشت؛ بنابراین ابتدا فراوانی کاربرد آنها تعیین و سپس به مدل‌سازی توابع اقدام شده است. توابع تعلق مجموعه‌های فازی ورودی، توابع گاوسی مطابق با اشکال مندرج در ضمیمه (۱) استفاده شده است.

جدول ۲. متغیرهای ورودی و خروجی طراحی زیرسیستم تأمین توان در مرحله مرور الزامات سیستم

خروجی های زیرسیستم توان	ورودی های زیرسیستم توان
ابعاد پانل ها	مدار (ارتفاع، مدت زمان خورشیدگرفتنی، شیب مداری)
نوع سلول های خورشیدی	طول عمر ماهواره
سایزینگ باتری ها	شرایط محیطی
توان تولیدی	الزامات انتخاب قطعات
معماری زیرسیستم	(پروفایل) توان مصرفی ماهواره
ولتاژهای قابل تأمین	نیازمندی های ولتاژ
	محدودیت های ابعادی
	محدودیت های فناوری

جدول ۳. متغیرهای انتخاب شده برای طراحی زیرسیستم تأمین توان و واحدهای در نظر گرفته شده

واحد	علامت به کار گرفته شده	نام متغیر	
km	H	ارتفاع مداری (کیلومتر)	متغیرهای ورودی
°	i	شیب مداری (درجه)	
year	L	طول عمر (سال)	
watt	Pe	توان مصرفی (وات)	متغیرهای خروجی
m ²	As	ابعاد آرایه خورشیدی (مترمربع)	
watt	Pb	توان تولیدی (وات)	

جدول ۴. محدوده انتخاب شده برای متغیرهای طراحی

محدوده ورودی های زیرسیستم توان	محدوده خروجی های زیرسیستم توان
ابعاد پانل ها	مدار (ارتفاع)
$As = [4, 65]$	$H = [400, 1000]$
توان تولیدی	مدار (شیب مداری)
$Pb = [50, 8000]$	$i = [96, 100]$
	طول عمر ماهواره
	$L = [0, 10]$
	توان مصرفی ماهواره
	$Pe = [500, 7000]$

برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی ماهواره سنجش از دور، از مدل ممدانی و بلوک دیاگرام پیشنهادی شکل ۳ استفاده شده است. مطابق با بلوک دیاگرام نشان داده شده، سیستم فازی چند ورودی - چند خروجی بر مبنای قواعد به فرم زیر اجرا شده است:

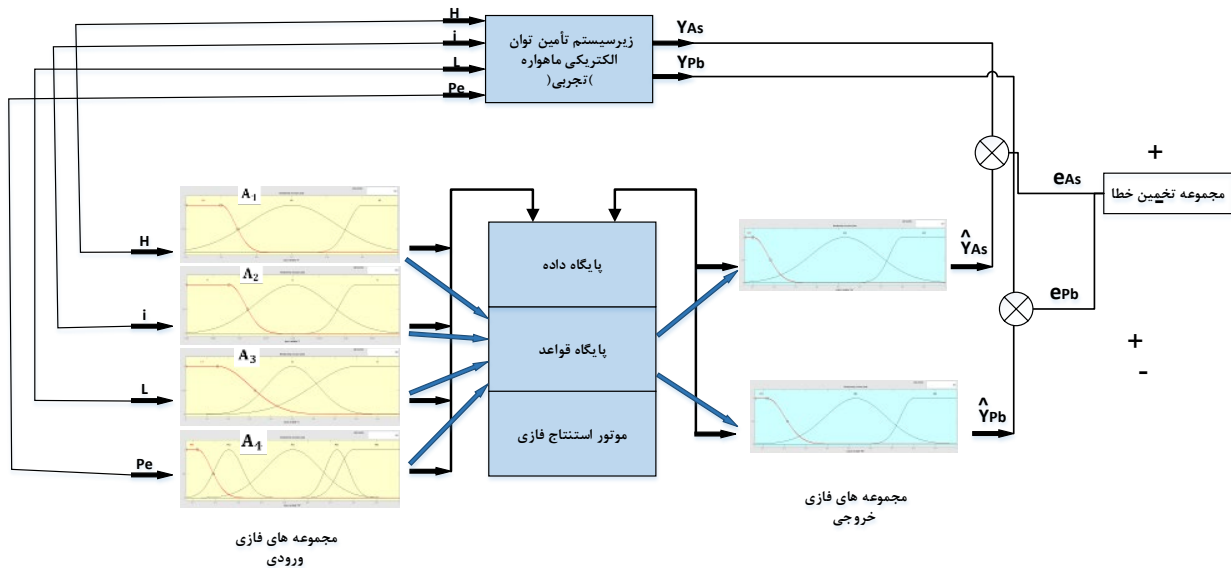
$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^l \text{ and } x_3 \text{ is } A_3^l \text{ and } x_4 \text{ is } A_4^l \text{ Then } y_j \text{ is } B_j^l R_l \quad (1)$$

که R_l بیانگر قانون l -ام $(l = 1, 2, \dots, m_1, m_2)$ ، x_i بیانگر متغیرهای ورودی $(i = 1, \dots, 4)$ ، y_j بیانگر متغیرهای خروجی $(j = 1, 2)$ و A_i^l و B_j^l بیانگر توابع تعلق مرتبط با متغیرهای به ترتیب شامل ورودی و خروجی می‌باشند. خروجی قطعی سیستم فازی با توجه به فرمول (۱) به صورت زیر می‌باشند:

$$y_1 = y_{As} = \frac{\sum_{l=1}^{m_1} \bar{y}_1^l \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i^l}}{\sum_{l=1}^{135} \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i^l}} \quad (2)$$

$$y_2 = y_{Pb} = \frac{\sum_{l=1}^{m_2} \bar{y}_2^l \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i^l}}{\sum_{l=1}^{135} \prod_{i=1}^4 \mu(x_i)_{A_i^l}} \quad (3)$$

تعداد قواعد به کارگرفته شده برای طراحی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی مشتمل بر $(m_1, m_2=135)$ ۱۳۵ قانون یا وزن‌های یکسان است (مطابق شکل (۳) نشان دهنده تعداد توابع تعلق ورودی می‌باشند) که بر مبنای تجربیات طراح زیرسیستم تأمین توان استخراج شده‌اند. همچنین برای اجرای سیستم فازی، از موتور استنتاج مددانی و جعبه ابزار فازی نرم‌افزار متلب^۱ استفاده شده است.



شکل ۳. بلوک دیاگرام پیشنهادی طراحی زیرسیستم تأمین توان سیستم فازی بر اساس فازی ساز و غیرفازی ساز مددانی

شبیه‌سازی و نتایج

نتایج به دست آمده از طراحی با مشخصات عملی پنج ماهواره سنجش از دور با مأموریت‌های عملیاتی معروف، مقایسه شده‌اند. داده‌های تجربی در نظر گرفته شده برای این ماهواره‌ها [۲۴] در قالب جدول (۵) لیست شده‌اند.

1- MATLAB Fuzzy Toolbox

همان‌طور که از جدول ۶ ملاحظه می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی علاوه بر سرعت بسیار بالا در به‌دست آوردن نتایج، دارای دقت خوبی در مقایسه با داده‌های تجربی می‌باشند و این موضوع، بیانگر مناسب بودن سیستم در طراحی زیرسیستم تأمین توان ماهواره است. شکل‌های ۴ و ۵ مبین ابعاد آرایه خورشیدی و توان تولیدی در ابتدای مأموریت برای زیرسیستم تأمین توان می‌باشد. درصد خطا در هر یک از ماهواره‌ها و میانگین خطای مربوط به هر کدام از متغیرهای خروجی در جدول ۷ آورده شده است. با توجه به اینکه این طراحی در فاز مفهومی می‌باشد، میانگین ۱۲/۰۵ درصد برای ابعاد آرایه خورشیدی و ۹/۳ درصد برای توان تولیدی آغاز مأموریت، نشان از دقت خوب این طراحی دارد.

جدول ۵. داده‌های تجربی ماهواره‌های سنجش از دور

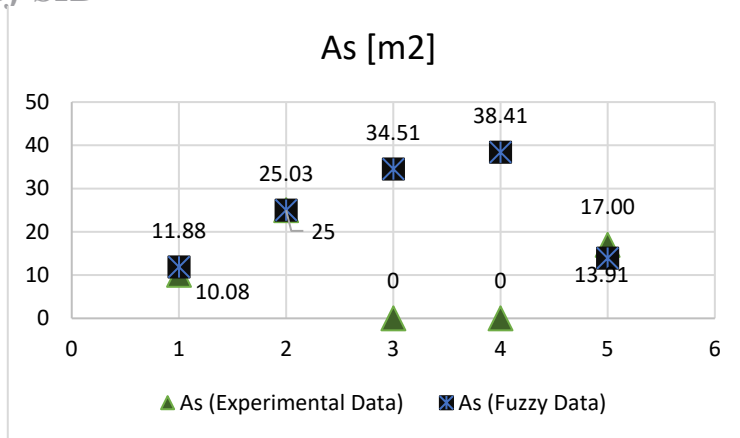
نام ماهواره					متغیرها
Landsat-7	Aura	GOSAT	Spot-4	Resourcesat-2	
۷۰۵	۷۰۵	۶۶۶	۸۳۲	۸۱۷	ارتفاع
۹۸.۲	۹۸.۲	۹۸.۰۶	۹۸.۷	۹۸.۷۲	شیب مداری
۷	۶	۵	۵	۵	طول عمر
۱۵۵۰	۴۶۰۰	۳۸۰۰	۲۲۰۰	۱۲۵۰	توان مصرفی
۱۷	۴۰-۵۶	۲۵-۳۶	۲۵	۱۰۰۰۸	ابعاد آرایه خورشیدی
۱۹۵۳.۳۳	۵۶۰۸.۵۷	۴۴۸۲.۵۹	۲۵۹۵.۱۸	۱۴۷۴.۵۴	توان تولیدی

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی طراحی زیرسیستم تأمین توان با مدل‌سازی سیستم‌های فازی

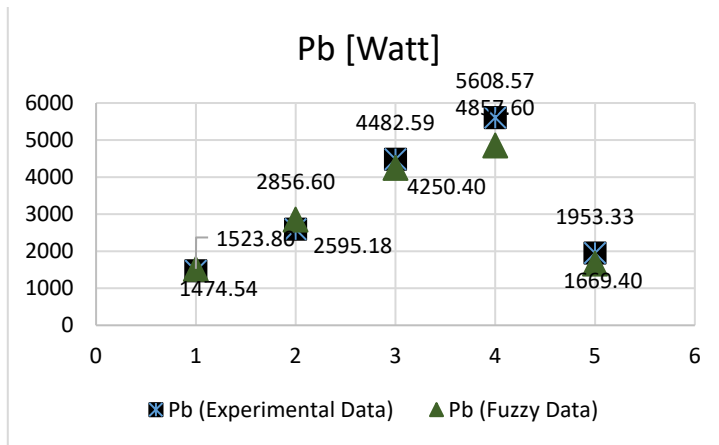
نام ماهواره					متغیرهای ورودی و خروجی
Landsat-7	Aura	GOSAT	Spot-4	Resourcesat-2	
۱۳.۹۱	۳۸.۴۱	۳۴.۵۱	۲۵.۰۳	۱۱.۸۸	ابعاد آرایه خورشیدی
۱۶۶۹.۴	۴۸۵۷.۶	۴۲۵۰.۴	۲۸۵۶.۶	۱۵۲۳.۸	توان تولیدی

جدول ۷. درصد خطای نسبی متغیرهای خروجی

درصد خطا	
توان تولیدی	ابعاد آرایه خورشیدی
۳.۳۴	۱۷.۸۶
۱۰.۰۷	۰.۱۲
۵.۱۸	۱۸.۱۸
۱۳.۳۹	
۱۴.۵۴	
میانگین	
۹.۳	۱۲.۰۵



شکل ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از طراحی متغیر سطح آرایه‌های خورشیدی زیرسیستم توان با داده‌های تجربی



شکل ۵. مقایسه نتایج به دست آمده از طراحی متغیر توان تولیدی زیرسیستم توان با داده‌های تجربی

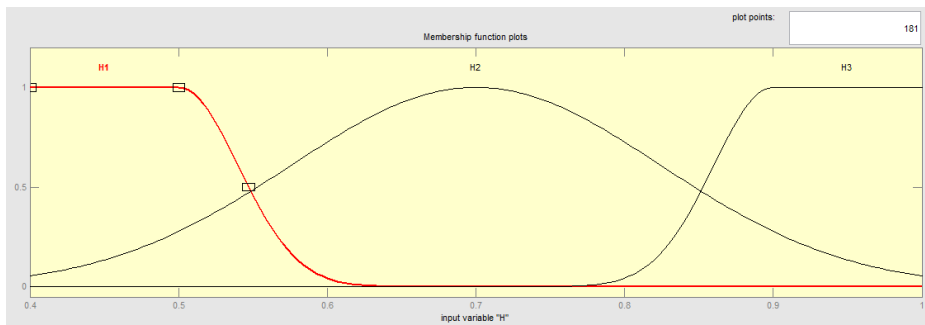
نتیجه گیری

در این مقاله، به کاربرد مفهومی و توان تخمین سیستم‌های فازی براساس سیستم فازی ممدانی با موتور استنتاج ضرب چندورودی- چند خروجی، به طراحی مفهومی زیرسیستم تأمین توان الکتریکی یک ماهواره سنجش از دور پرداخته شده است. با استفاده از تجربیات طراح خبره، قواعد حاکم برای روش فازی استخراج گردید و توابع تعلق متغیرهای ورودی و خروجی نیز براساس بازه و فراوانی کاربرد آنها تعریف شد. مقایسه نتایج به دست آمده از این روش با داده‌های تجربی پنج ماهواره نشان داد که این روش، انطباق خوبی با داده‌های تجربی دارد و می‌تواند از سیستم‌های فازی که قابلیت تخمین مناسبی دارند برای سرعت بخشیدن به فرایند طراحی مفهومی استفاده کرد.

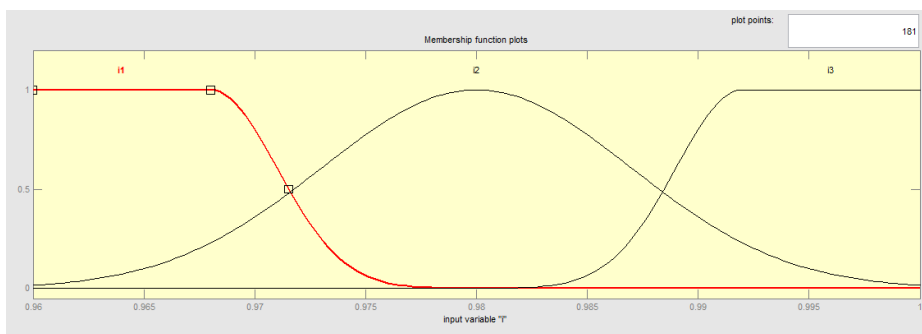
Reference

1. Wertz, J. R., Everett, D.F., Puschell, J.J.(2011), *Space Mission Engineering: The New SMAD*, Microcosm Press.
2. Pisacane, V. L.(2005), *Fundamentals of Space Systems*, Oxford University Press.
3. Ley, W., Wittmann, K., Hallmann, W.(2008), *Handbook of Space Technology*, John Wiley and Sons.
4. Larson, W. J., Kirkpatrick, D., Sellers, J. J., Thomas, L. D., Verma, D.(2009), *Applied Space Systems Engineering*, Space Technology Series.
5. Wang, L.X.(1997), *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice Hall International Inc.
6. Cheng C., Shu, S., Cheng, P.(2009), *Attitude control of a satellite using fuzzy controllers*, Expert Systems with Applications, 36, 6613-6620.
7. Azizi Oroumich, M.A., Malaek, M.B., Ashrafizaadeh, M., Taheri, S.M.(April-May 2013), *Aircraft design cycle time reduction using artificial intelligence*, Vol.26(1), 244-258.
8. Montazeri-Gh, M., Safari, A.(2011), *Tuning of fuzzy fuel controller for aero-engine thrust regulation and safety considerations using genetic algorithm*, Aerospace Science and Technology, 15, 183-192.
9. Shahi Ashtiani, M.A., Malaek, S.M.B.(2008), *Optimum selection of 'number of seats/cargo volume' for transport in uncertain business environment*, AIAA Journal of Aircraft, 45, 98-105.
10. Navvabi M., Davoodi A., Rehanolu M.(2020), *Optimum fuzzy sliding mode control of fuel sloshing in a spacecraft using PSO algorithm*, ACTA ASTRONAUTICA, Vol.167, pp.331-342.
11. Navvabi M., Davoodi A.(2018), *Fuzzy Control of Fuel Sloshing in a Spacecraft*, In 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems
12. Navvabi M., Rajabalifardi M.(2018), *Quaternion Based Fuzzy Gain Scheduled PD Law for Spacecraft Attitude Control*, In 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems.
13. Wilamowski B.M., Xiangli L.(2002), *Fuzzy system based maximum power point tracking for PV system*, IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, 5-8 Nov.
14. Taherbaneh M, Menhaj M.B.(2007), *A Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracker for Body Mounted Solar Panels in LEO Satellites*, 2007 IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 6-11 May.
15. Mingliang S., Baolong Z., Ruoming A., Huimin S., Shengzhong X., Zhenhua Y.(2019), *Data-driven fault diagnosis of satellite power system using fuzzy Bayes risk and SVM*, Aerospace Science and Technology, Volume 84, Pages 1092-1105.
16. Mirshams M., Teshnehlab M., Ramezani M.(2018), *Modeling the solar array design of remote sensing satellites based on adaptive neuro-fuzzy inference system*, Journal of Space Science Technology, Vol.1, No.1 36, 1-8 (in Persian).
17. Dabiri M., Safari B.(2016), *Application of Integrated Intuitive Fuzzy Hierarchy Process (IFAHP) method in prioritizing new disciplines in each region in the Technical and Vocational University of Iran*, Quarterly Journal of Technical and Vocational University Karafan, Vol.13, No.40, 63-75 (in Persian).
18. Masoumnejad M., Yastibalaghi A., Narimanzade N.(2020), *Estimate the travel path of an overhead crane using a fuzzy UHF filter*, Quarterly Journal of Technical and Vocational University Karafan, Vol.17, No.1, 123-142 (in Persian).
19. W. Wang, F. Ismail, A.F. Golnaraghi(2004), *A neuro-fuzzy approach to gear system monitoring*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems 12 (5), 710-723
20. Marza, D. Seyyedi, L.F. Capretz(2008), *Estimation development time of software projects using a neuro fuzzy approach*, World Academy of Science, Engineering and Technology 22, 575-579.
21. A.V. Topalov, E. Kayacan, Y. Oniz, O. Kaynak(2009), *Adaptive neuro-fuzzy control with sliding mode learning algorithm: application to antilock braking system*, 7th Asian Control Conference, Hong Kong, China, pp. 784-789.
22. U. Farooq, M.S. Khan, K. Ahmed, M.A. Saeed, S. Abbas(2011), *Autonomous system controller for vehicles using neuro-fuzzy*, International Journal of Scientific & Engineering Research 2 (6).
23. Jang, J-S. R., Sun, C-T., Mizutani, E.(1997), *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall International Inc.
24. <https://eoportal.org/web/eoportalsatellite-missions>.

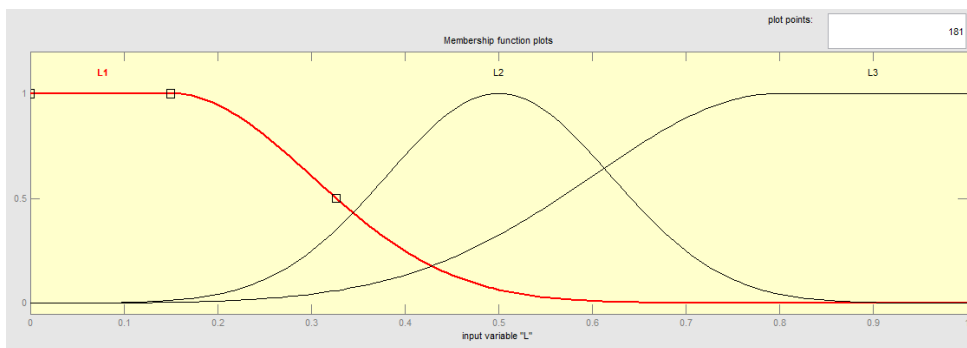
ضمیمه ۱- توابع تعلق متغیرهای زبانی ورودی و خروجی



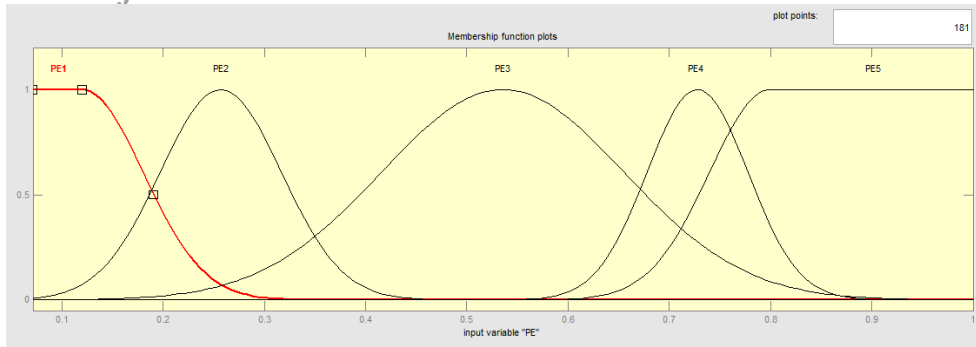
متغیر زبانی ورودی **H**



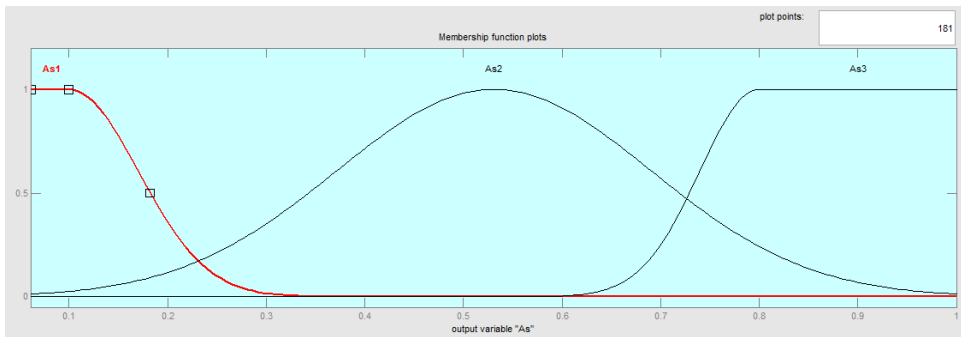
متغیر زبانی ورودی **i**



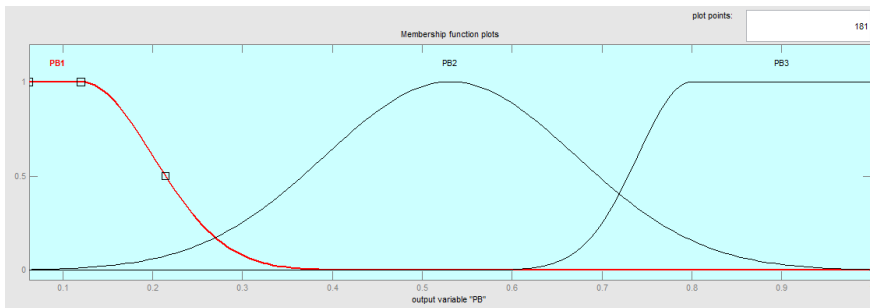
متغیر زبانی ورودی **L**



متغیر زبانی ورودی Pe



متغیر زبانی خروجی As



متغیر زبانی خروجی Pb