

Original Research Paper

Evaluating the Impact of Design Changes in Remote Sensing Satellites Using Design Structure Matrix

Mohammad Sayanjali*

Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 22 October 2024

Revised 22 February 2025

Accepted 03 March 2025

Available Online 16 April 2025

Keywords:

Design structure matrix (DSM)

Remote sensing satellite

System changes

Conceptual design

Change management

ABSTRACT

Designing complex systems, especially in the space industry, is accompanied by challenges such as changes in components and their interactions. This article aims to facilitate the design of complex systems by introducing and examining the design structure matrix (DSM). The design structure matrix, by analyzing the relationships between components, helps improve the speed of design and implement optimal changes in systems. This article discusses the features and analyses of this matrix, as well as its limitations and challenges. Two matrices are developed for a remote sensing satellite under study. The first matrix is designed to examine the influence of each component on the design of other components. In this matrix, all components are listed along both the rows and columns (meaning it's a square matrix), and if one component affects the design of another, this influence is indicated in the matrix. These effects are determined by the design team of each subsystem. Furthermore, both direct and indirect effects are considered in the formation of this matrix, and the calculation method is detailed in this paper. The second matrix examines the relationships between different components. These relationships include electrical, mechanical, data, or thermal connections, which are identified based on design blueprints and represented in the matrix. A matrix is also developed to assess the impact of each component on the design of other components, and efforts have been made to make this matrix practical by examining and weighting the effects of components on each other. With the help of these two matrices, the impact of changing one component (adding, removing, or altering the design) on other components is examined. Additionally, for better analysis, a case study is conducted. In this case study, the impact of adding a star sensor to the considered satellite is investigated and required technical changes for supporting on extra star sensor, such as data interface and power line or mechanical interface have been investigated. The defined matrices increase the design speed for more technical and precise analyses and provide the expert with the tool to apply changes in the system in less time and without creating excessive design cycles.

* Corresponding Author's E-mail: msayanjali@gmail.com**How to Cite this Article:**M. Sayanjali, "Evaluating the impact of design changes in remote sensing satellites using design structure matrix," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 24-40, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1505>.**COPYRIGHTS**© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر تغییرات طراحی در ماهواره‌های سنجشی با استفاده از ماتریس ساختار طراحی

محمد سینجلی* 

استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت ۰۱ آبان ۱۴۰۳
بازنگری ۰۴ اسفند ۱۴۰۳
پذیرش ۱۳ اسفند ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۷ فروردین ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

ماتریس طراحی (DSM)
ماهواره سنجشی
تغییرات سیستم
طراحی مفهومی
مدیریت تغییرات

طراحی سیستم‌های پیچیده، به‌ویژه در صنعت فضایی، با چالش‌هایی مانند ایجاد تغییر در اجزا و تأثیر متقابل آن‌ها همراه است. این مقاله با هدف تسهیل طراحی سیستم‌های پیچیده به معرفی و بررسی ماتریس طراحی (DSM) می‌پردازد. ماتریس ساختار طراحی با بررسی ارتباطات بین اجزاء، به بهبود سرعت طراحی و انجام تغییرات بهینه در سیستم‌ها کمک می‌کند. در این مقاله به ویژگی‌ها و تحلیل‌های این ماتریس اشاره شده و محدودیت‌ها و چالش‌های آن را بیان می‌کند. سپس به کمک همین روش، دو ماتریس برای ماهواره سنجشی مورد مطالعه ترسیم می‌شود. ماتریس اول برای بررسی تأثیر هر جزء بر طراحی جزء دیگر می‌باشد. در این ماتریس تمامی اجزا در طول و عرض ماتریس قرار می‌گیرند (یعنی ماتریس مربعی) و در صورتی که یک جزء در طراحی جزء دیگر تأثیرگذار باشد، در ماتریس این تأثیر را نمایش می‌دهیم. این تأثیرات توسط تیم طراحی هر زیرسیستم تعیین می‌شود. همچنین تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم در تشکیل این ماتریس لحاظ شده‌است که در این مقاله نحوه محاسبه آن تشریح شده‌است. در ماتریس دوم، ارتباطات بین اجزاء مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. این ارتباطات شامل ارتباط الکتریکی، مکانیکی، داده‌ای یا حرارتی می‌باشد که با توجه به نقشه‌های طراحی این ارتباطات مشخص شده و در ماتریس مورد نظر نمایش داده می‌شود. که یک ماتریس برای بررسی تأثیر هر جزء در طراحی سایر اجزاء ترسیم شده که با توجه به بررسی‌های انجام شده و وزن‌دهی به تأثیرات اجزاء بر یکدیگر سعی در کاربردی شدن این ماتریس شده‌است. به کمک این دو ماتریس تأثیر تغییر یک جزء (اضافه شدن، حذف و یا تغییر در طراحی) بر سایر اجزاء مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین برای بررسی بهتر، یک مطالعه‌ی موردی انجام شده‌است. در این مطالعه موردی، تأثیر اضافه کردن یک سنسور ستاره بر روی ماهواره مورد نظر بررسی شده‌است و تغییرات مورد نیاز به‌منظور پشتیبانی از یک سنسور ستاره دیگر همانند تامین خط تغذیه، خط ارتباطی و غیره نمایش داده شده‌است. ماتریس‌های تعریف شده، سرعت طراحی را برای بررسی‌های فنی‌تر و دقیق‌تر افزایش می‌دهد و به فرد خبره این ابزار را ارائه می‌دهد که در زمان کمتر و بدون ایجاد چرخه‌های طراحی بیش از حد، تغییرات را در سیستم اعمال نماید.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: msayanjali@gmail.com

How to Cite this Article:

M. Sayanjali, "Evaluating the impact of design changes in remote sensing satellites using design structure matrix," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 24-40, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1505>.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



اختصارات

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| چرخ عکس‌العمل | Reaction Wheel (RW) |
| جستجوی اولیه عرضی | Breadth-first Search (BFS) |
| تست مغناطیسی | Magnetic Test (MT) |
| فرمان و مدیریت داده‌ها | Command and Data Handling (C&DH) |

مقدمه

ماتریس ساختار طراحی¹ DSM به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در مدیریت سیستم‌ها و طراحی سیستم‌های پیچیده به‌شمار می‌رود. این ابزار به تحلیل و شناسایی وابستگی‌ها و تعاملات بین عناصر مختلف یک سیستم کمک می‌کند و به طراحان امکان می‌دهد تا ایده‌های خود را به گونه‌ای سازمان‌دهی کنند که کارایی بهتری داشته باشند.

کاربردهای ماتریس DSM

ماتریس DSM دارای کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف از جمله مهندسی نرم‌افزار، طراحی محصول، و مدیریت پروژه است. برای مثال، در صنایع خودروسازی، ماتریس DSM به طراحان کمک می‌کند تا وابستگی‌های اجزا را شناسایی کرده و تغییرات را به‌صورت مؤثری مدیریت کنند. استفاده از این ماتریس در فرآیندهای طراحی می‌تواند منجر به کارایی بیشتر و کاهش زمان‌های تولید شود [۱].

مزیت کلیدی ماتریس DSM نسبت به سایر روش‌های مدیریت طراحی، توانایی آن در ارائه یک نمای کلی از پیچیدگی‌های سیستم است. برخلاف روش‌های سنتی مانند نمودارهای گانت^۲ یا شبکه‌ای، که تمرکز بیشتری بر زمان‌بندی دارند، ماتریس DSM می‌تواند به شناسایی سریع و ساده‌تری از وابستگی‌های سیستمی کمک کند و از طریق تحلیل تغییرات، خطرات و مشکلات پنهان را شناسایی کند. برونینگ^۳ بیان می‌کند که استفاده از ماتریس DSM نتیجه‌گیری در مورد تأثیر تغییرات را ساده‌تر می‌کند و به طراحان اجازه می‌دهد که به‌طور مؤثرتر در فرایند طراحی مشارکت کنند [۱].

ماتریس‌های ساختار طراحی می‌توانند به‌عنوان یک ابزار مدل‌سازی دینامیک سیستم کیفی مفید برای سیستم‌های پیچیده با عناصر تعاملی فراوان باشند [۲]. ماتریس ساختار طراحی (DSM) با ارائه دیدی واضح از وابستگی‌ها، بهینه‌سازی فعالیت‌ها و پشتیبانی از مدل‌سازی چند سطحی، به مدیریت و بهبود فرآیندهای پیچیده طراحی،

به‌ویژه در ساختارهای مدولار، کمک می‌کند. این روش با کاهش دوباره‌کاری، صرفه‌جویی در زمان و هزینه، و افزایش قابلیت پیش‌بینی، کارایی و کیفیت پروژه‌ها را ارتقا می‌دهد [۳].

صنعت هوافضا: در صنعت هوافضا، ماتریس DSM به مهندسان این امکان را می‌دهد که پیچیدگی‌های طراحی را مدیریت کرده و تأثیرات تغییرات بر روی سیستم‌های مختلف را پیگیری کنند. برونینگ و اسپنجر^۴ مثال‌هایی از کاربرد موفق ماتریس DSM در پروژه‌های فضایی ارائه می‌دهند. به‌عنوان یک نمونه، در پروژه طراحی فضاپیماهای جدید، مهندسان با کمک DSM توانستند وابستگی‌های مختلف بین اجزای فضاپیما را شناسایی کرده و در مراحل اولیه طراحی، مشکلات را حل کنند [۴].

مهندسی نرم‌افزار: یکی از کاربردهای مهم ماتریس ساختار وابستگی (DSM) در مهندسی نرم‌افزار، کمک به تحلیل و مدیریت معمارانه سیستم‌های نرم‌افزاری پیچیده است. توانایی نمایش وابستگی‌ها میان ماژول‌های مختلف را به‌صورت روشی منسجم و بصری دارد. با استفاده از DSM، توسعه‌دهندگان می‌توانند معماری سیستم را به‌طور دقیق‌تری مدل‌سازی کرده و مشکلات مربوط به وابستگی‌های ماژول‌ها را شناسایی کنند. این رویکرد علاوه بر تسهیل فرآیند شناسایی و رفع وابستگی‌های زیاد و ناخواسته، امکان تنظیم و اعمال قواعد طراحی معماری مانند لایه‌بندی و اجزاسازی را فراهم می‌کند [۵].

بررسی تأثیر تغییرات با استفاده از ماتریس DSM: با شناسایی وابستگی‌ها و روابط میان اجزاء مختلف، DSM به ما این امکان را می‌دهد که به‌طور دقیقی مسیرهای انتشار تغییر و تأثیر آن‌ها بر اجزاء سیستم را ارزیابی کنیم. به‌ویژه، در پژوهش‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های جستجو مانند جستجوی اولیه عرضی (BFS) و روش‌های کمی‌سازی مثل نرخ تغییر شبکه و نرخ بزرگ‌نمایی تغییر، به ما در درک بهتر نفوذ تغییرات بر اجزاء کمک کرده و به طراحان این امکان را می‌دهد که مناسب‌ترین مسیرهای تغییر را انتخاب کنند و هزینه‌های ناشی از تغییرات را کاهش دهند. این موضوع در مطالعات قبلی نیز به تفصیل مطرح شده است [۶].

کاربردهای ماتریس DSM در پروژه‌های فضایی

شناسایی وابستگی‌ها و بهبود همکاری در طراحی ماهواره‌ها و کاوشگرهای فضایی، شناخت وابستگی‌های بین زیرسیستم‌ها و اجزا امری حیاتی است. به‌عنوان مثال، در طراحی یک کاوشگر، می‌توان با استفاده از ماتریس DSM، تأثیرات تغییرات در یک زیرسیستم را بر روی زیرسیستم‌های دیگر کشف کرد. برونینگ و اسپنجر تأکید می‌کنند که،

3. Browning (2021)
4. Eppinger (2018)

1. Design Structure Matrix
2. Gantt Chart

مزایای استفاده از ماتریس DSM

- تحلیل سریع وابستگی‌ها: ماتریس DSM به طراحان این امکان را می‌دهد که به سرعت وابستگی‌های موجود بین اجزا و زیرسیستم‌ها را شناسایی کنند و از طریق آن، به پیش‌بینی نتایج تغییرات بپردازند.
- کاهش ریسک: با فراهم کردن بینش‌های واضح درباره وابستگی‌های طراحی، ماتریس DSM در کاهش ریسک‌های ناشی از تغییرات در تولید و طراحی بسیار مؤثر است.

اجزای ماتریس DSM

ماتریس DSM یک ابزار ریاضی است که برای نمایش وابستگی‌های بین سیستم‌ها و اجزا استفاده می‌شود. اجزای اصلی آن شامل عناصری مانند زیرسیستم‌ها، اجزاء یا وظایف می‌باشد که به صورت سطرها و ستون‌ها در یک ماتریس نمایش داده می‌شوند. هر عنصر موجود در ماتریس نشان‌دهنده یک زیرسیستم و یا جزئی از سیستم کلی است و مقادیر داخل ماتریس نشان‌دهنده نوع و شدت وابستگی بین اجزاء می‌باشد. به‌طور کلی، ماتریس DSM به طراحان کمک می‌کند تا تعاملات بین اجزاء را به وضوح تجزیه و تحلیل کنند و وابستگی‌های مهم را شناسایی نمایند [۱].

اصول ترسیم ماتریس DSM

برای ترسیم ماتریس DSM، ابتدا لازم است که تمام اجزای سیستم شناسایی شوند و در یک لیست قرار گیرند. سپس این اجزا در سطرها و ستون‌های ماتریس قرار داده می‌شوند. در نهایت، وابستگی‌ها بین اجزا با استفاده از نمادهایی مانند ۰ و ۱ داخل ماتریس نمایش داده می‌شود. بسته به نیاز و هدف مطالعه، تعریف متفاوتی از وابستگی را می‌توان بیان نمود. مثلاً اگر هدف بررسی ارتباطات الکتریکی بین اجزاء باشد، جزئی که از جزء دیگر جریان الکتریکی می‌گیرد وابستگی نسبت به آن جزء دارد (در ماتریس با عدد ۱ یا تیک یا ضربدر، با توجه به راهنمای ماتریس مشخص می‌شود)، یا اگر هدف بررسی ارتباطات فیزیکی باشد، هر جزئی که به جزء دیگر متصل باشد یا توسط جزء دیگر محدود شده باشد در طراحی به آن جزء وابسته است. حتی می‌توان همزمان چند وابستگی را در کنار هم در یک ماتریس نمایش داد (الکتریکی، انتقال داده، انتقال حرارت، فیزیکی، طراحی و غیره). به‌طور مثال، اگر اجزای ۱ و ۲ وابسته باشند، مقدار ورودی در مکان (۱، ۲) برابر با ۱ است و در غیر این صورت، این مقدار برابر با ۰ خواهد بود. این ساز و کار به طراحان این امکان را می‌دهد که ارتباطات بین اجزاء را به سادگی مشاهده کنند [۱].

استفاده از ماتریس DSM در پروژه‌های فضایی می‌تواند به شفافیت در وابستگی‌ها و بهبود همکاری بین تیم‌های مختلف کمک کند [۴]. مدیریت تغییرات: تغییرات در پروژه‌های فضایی می‌تواند به سرعت به پیامدهای غیرمنتظره منجر شود. ماتریس DSM به مدیران پروژه امکان می‌دهد تا تأثیر تغییرات را بر روی کل سیستم تخمین بزنند و سریع‌تر تصمیم‌گیری کنند. استفاده از ماتریس DSM می‌تواند به کاهش زمان و هزینه‌های ناشی از تغییرات در طراحی کمک کند.

مثال‌های واقعی از کاربرد در صنعت فضایی

طراحی ماهواره‌ها: استفاده از ماتریس طراحی ساختاری (DSM) در پروژه‌های ماهواره‌ای، به مهندسان کمک می‌کند تا وابستگی‌ها و تعاملات پیچیده بین اجزای مختلف این سیستم‌ها را شناسایی کنند. در مقاله‌ای که توسط جینتین^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است، به کاربردهای ماتریس DSM در طراحی سیستم‌های فضایی اشاره شده و نشان می‌دهد که چگونه این ابزار می‌تواند به شناسایی زودهنگام مشکلات، بهینه‌سازی فرآیند طراحی و بهبود ارتباطات تیمی کمک کند. با استفاده از DSM، مهندسان قادرند به بهینه‌سازی تعاملات بین سیستم‌های قدرت، ارتباطات و کنترل رفتاری بپردازند و در نتیجه، کارایی و قابلیت اطمینان طراحی‌های خود را افزایش دهند [۷].

روش ماتریس ساختار طراحی (DSM) ثابت کرده است که ابزاری قدرتمند برای مدیریت پیچیدگی طراحی سیستم، به‌ویژه در زمینه مأموریت‌های ماهواره‌ای است. همانطور که توسط چیت‌ساز و عفت‌منش‌نیک در سال ۲۰۲۳ نشان داده شده است، روش DSM با ارائه یک نمایش بصری از وابستگی‌های متقابل بین اجزا و زیرسیستم‌های مختلف، فرآیند طراحی را ساده می‌کند. در مطالعه آن‌ها در مورد طراحی ماهواره مکعبی، DSM برای شناسایی و کمی‌سازی تعاملات بین اجزای کلیدی مانند تیم IPT، باس، محموله و حسگر EO/AI مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد نه تنها درک بهتری از پارامترهای طراحی را تسهیل کرد، بلکه به شناسایی تعارضات و وابستگی‌های بالقوه در مراحل اولیه فرآیند طراحی نیز کمک کرد. با اعمال روش DSM، این مطالعه توانست فرآیند طراحی را ساده‌تر کند، دوباره کاری را کاهش دهد و اطمینان حاصل کند که همه زیرسیستم‌ها به‌طور یکپارچه با هم کار می‌کنند. این امر DSM را به ابزاری ارزشمند برای ارزیابی تأثیر تغییرات طراحی در ماهواره‌های سنجشی از دور تبدیل می‌کند، جایی که حتی تغییرات جزئی می‌توانند پیامدهای قابل توجهی بر عملکرد کلی سیستم داشته باشند [۸].

ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای طراحی است. با استفاده از DSM می‌توان وابستگی‌ها و تعاملات بین وظایف مختلف طراحی را به‌طور دقیق شناسایی و نمایش داد. مطالعه اخیر نشان می‌دهد که با استفاده از مدل‌سازی بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی عدد صحیح می‌توان DSM را به‌نحوی پارتیشن‌بندی کرد که تعداد تکرارها در فرآیند طراحی به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کند. این روش به خصوص در فرآیندهایی با تعداد زیاد وظایف و تعاملات بین آن‌ها، به‌طور قابل توجهی در زمان و هزینه طراحی صرفه‌جویی می‌کند [۹].

• شناسایی مشکلات پنهان: استفاده از ماتریس DSM به طراحان کمک می‌کند تا وابستگی‌های پنهان بین اجزای سیستم را شناسایی کنند. این امر به‌خصوص در سیستم‌های فضایی، که پیچیدگی و تنوع اجزای آن بسیار زیاد است، اهمیت زیادی دارد. با استفاده از DSM می‌توانیم پیش از مراحل نهایی طراحی، مشکلات و چالش‌های پنهان را شناسایی و برطرف کنیم و از بروز خطاها و تاخیرهای احتمالی در آینده جلوگیری کنیم [۱۰].

چالش‌ها و محدودیت‌های ماتریس DSM

• نیاز به داده‌های دقیق: یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در استفاده از ماتریس DSM، نیاز به داده‌های دقیق و قابل اعتماد است. هنگامی که وابستگی‌ها به درستی شناسایی و ثبت نشوند، ماتریس می‌تواند منجر به تجزیه و تحلیل نادرست و تصمیم‌گیری‌های ناپخته شود. برای مثال، در پروژه‌های فضایی، عدم دقت در شناسایی وابستگی‌ها ممکن است باعث ایجاد مشکلات فنی در مراحل بعدی طراحی شود. پاپالامبروس^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ تأکید می‌کنند که دقت در جمع‌آوری داده‌ها پیش‌نیاز استفاده مؤثر از ماتریس DSM است [۱۰].

• پیچیدگی‌های تعاملات: با وجود توانایی‌های بالای ماتریس DSM در تجزیه و تحلیل سیستم‌های پیچیده، یکی از محدودیت‌های آن عدم توانایی در مدل‌سازی تعاملاتی است که به‌صورت غیرخطی و پیچیده در یک سیستم وجود دارند. به‌عبارتی، وابستگی‌هایی که تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارند و تعاملات پیچیده‌ای با یکدیگر دارند، ممکن است به‌طور کافی در این نوع ماتریس منعکس نشوند. برونینگ و اسپنجر به این نکته اشاره کرده‌اند که این محدودیت می‌تواند اثرات منفی بر تصمیم‌گیری‌ها داشته باشد [۴].

• محدودیت‌های زمانی و منابع: تحلیل ماتریس DSM به زمان و منابع زیادی نیاز دارد. جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد ماتریس ممکن

وابستگی هر جزء یا زیرسیستم، می‌تواند توسط کارشناس و طراح همان زیرسیستم تشخیص داده شود و پس از جمع‌آوری این اطلاعات از زیرسیستم‌ها در یک ماتریس که همان ماتریس DSM می‌باشد جمع‌آوری گردد. در صورتی‌که برای این وابستگی‌ها نمره‌ای در نظر گرفته شده‌باشد، یعنی صرفاً صفر و یک نباشد، این نمره توسط کارشناس هر زیرسیستم اختصاص داده می‌شود و در نهایت این نمره‌ها توسط کارشناس سیستم بررسی شده و نمره‌دهی نهایی در ماتریس DSM قرار می‌گیرد.

انواع ماتریس DSM

ماتریس DSM به چند نوع مختلف تقسیم‌بندی می‌شود:

- ماتریس‌های ورودی و خروجی: نمایش ارتباطات درستی که بین اجزاء وجود دارند.
- ماتریس‌های وابستگی: نشان‌دهنده نوع و شدت وابستگی بین اجزاء.
- ماتریس‌های چرخشی: که می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای مدیریت تغییرات در پروژه‌ها استفاده شوند. این تنوع در انواع ماتریس به طراحان گزینه‌های بیشتری برای تحلیل و بهبود سیستم‌ها ارائه می‌دهد [۶].

تحلیل‌های ممکن از ماتریس DSM

- شناسایی وابستگی‌ها: تحلیل ماتریس DSM به طراحان این امکان را می‌دهد که وابستگی‌های میان اجزاء مختلف یک سیستم را شناسایی کنند. به‌عنوان مثال، در طراحی یک ماهواره، مهندسان می‌توانند با استفاده از این ماتریس وابستگی‌ها بین اجزای مختلف نظیر سیستم قدرت، سیستم ارتباطات و سیستم کنترلی را تحلیل کنند. این شناسایی وابستگی‌ها می‌تواند به بهبود همکاری بین تیم‌های مختلف و همچنین جلوگیری از تکرار کارها منجر شود.
- تحلیل تأثیر تغییرات: ماتریس DSM به طراحان این امکان را می‌دهد که تأثیر تغییرات در یک جزء خاص بر روی سایر اجزاء را پیش‌بینی کنند. برای مثال، اگر تغییراتی در طراحی ساختار یک کاوشگر فضایی اعمال شود، تحلیل ماتریس DSM می‌تواند به مهندسان کمک کند تا بفهمند این تغییرات چه تأثیری بر روی سیستم حرکتی یا سیستم قدرت خواهند داشت. این نوع تحلیل می‌تواند به پیشگیری از بروز مشکلات بزرگ و غیرمنتظره در مراحل پایانی طراحی کمک کند. برونینگ و اسپنجر در تحقیقات خود به اهمیت این تحلیل در مدیریت پروژه‌های فضایی اشاره کرده‌اند [۴].
- بهینه‌سازی فرآیند طراحی: ماتریس ساختار طراحی (DSM) یک

کارشناس سیستم گردآوری شده و بررسی می‌گردند تا با استانداردسازی این نمرات و وارد کردن آن‌ها به ماتریس طراحی، یک نمای کلی از تأثیرات طراحی نمایش داده شود.

در این ماتریس تمامی اجزا و شاخصه‌ها، هم در سطر و هم در ستون اول قرار داده شده‌اند. برای دیدن اجزایی که در طراحی یک جزء تأثیر دارند، کفایت جزء مورد نظر را در ردیف اول پیدا کرده و به صورت عمودی به سمت پایین حرکت کرده و شاهد اجزا و شاخصه‌های تأثیر گذار در طراحی المان مورد نظر بود.

برای مثال برای چرخ‌های عکس‌العملی به صورت شکل ۲ تأثیر اجزا و شاخصه‌های مختلف بر روی در طراحی این جزء مشاهده می‌گردد.

همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، در طراحی چرخ‌های عکس‌العملی، شاخصه‌های طراحی مانند وزن کل ماهواره، هندسه ماهواره، ارتفاع پروازی، مدار، مدل پایداری، دقت و پایداری نشانه‌رویی با ضرایب نشان‌دهنده شده تأثیر مستقیم دارند. همچنین بین اجزاء، جزء گشتاور دهنده مغناطیسی (MT) نیز بر روی آن تأثیر می‌گذارد.

با مشاهده اجزاء به صورت افقی در ماتریس معرفی شده، می‌توان به تأثیر آن جزء بر روی سایر اجزاء و همچنین بر روی شاخصه‌های طراحی ماهواره مشاهده نمود. شکل ۳ نشان‌دهنده تأثیر چرخ‌های عکس‌العملی در طراحی ماهواره می‌باشد.

با توجه به شکل ۳ چرخ‌های عکس‌العملی بر روی طراحی گشتاور دهنده مغناطیسی، حسگر حرارتی، صفحات اشاره شده و بورد فرمان تأثیر مستقیم با ضرایب تعیین شده دارد. همچنین بر روی وزن کلی ماهواره و توان مصرفی کل ماهواره تأثیر دارد.

تأثیر اجزاء بر یکدیگر

هر جزء در سیستم، در اثر تغییر در بقیه اجزا (شامل اضافه کردن جزئی دیگر، حذف آن یا تغییر در آن) میزانی تأثیر می‌گیرد، یعنی اگر سه جزء تغییر کنند و خواسته شود تا تأثیر اعمال شده بر جزء چهارم (که در ابتدا دستخوش تغییر نبوده) بررسی گردد، باید تأثیر هر کدام از این سه جزء تغییر یافته بر روی جزء چهارم اندازه‌گیری شود و در نهایت با هم جمع شود. رابطه ۱ نشان‌دهنده تأثیر کلی (Impact Total) گذاشته شده بر روی جزء X می‌باشد. در رابطه ۱، n تعداد اجزای تغییر یافته می‌باشد. متغیرهای موجود در رابطه ۱ در شکل ۴ نمایش داده شده‌است.

$$TI_X = \sum_{i=1}^n TI_{iX} \quad (1)$$

است نیاز به همکاری از تیم‌های مختلف داشته باشد که این موضوع در پروژه‌های بزرگ می‌تواند چالش برانگیز باشد. به‌ویژه در پروژه‌های صنعتی که زمان و هزینه‌ها بسیار حائز اهمیت‌اند، ممکن است تیم‌ها از تحلیل دقیق DSM صرف‌نظر کنند. سیج^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ نشان می‌دهند که این محدودیت می‌تواند به مشکلات مدیریتی و تأخیر در پروژه‌ها منجر شود [۹].

چالش در تفسیر نتایج: تفسیر نتایج حاصل از ماتریس DSM می‌تواند چالش برانگیز باشد. توصیف روابط و وابستگی‌ها به صورت کمی و کیفی ممکن است به درک اشتباه منجر شود. با توجه به ماهیت پیچیده سیستم‌ها، ممکن است بسته به زمینه‌های مختلف، تفسیر نتایج متفاوت باشد [۱۰].

مدل‌های DSM موفق معیارهای زیر را دارند:

- مدل‌ها هدف مشخصی دارند (نه مدل‌سازی به خاطر مدل‌سازی).
- مدل‌ها از مقدار مناسبی از جزئیات برای هدف مورد نظر استفاده می‌کنند.
- مدل‌سازان به دانش یا تخصص کافی در مورد سیستم دسترسی دارند.
- DSM به‌عنوان یک "مدل زنده" حفظ می‌شود، و به‌طور مداوم آن را با ترکیب دانش جدید به محض در دسترس بودن، بهبود می‌بخشد.
- داشتن یک مدل DSM اغلب باعث ظهور دانش نهفته می‌شود.

برای پروژه ماهواره سنجشی پیش‌رو، دو ماتریس رسم شده‌است. یک ماتریس طراحی (تأثیر اجزاء بر طراحی سایر اجزاء) و یک ماتریس ارتباطات که برای بررسی و نمایش ارتباطات فیزیکی، الکتریکی، داده‌ای و انتقال جرم می‌باشد. به کمک این دو ماتریس، می‌توان تأثیر تغییر هر جزء را بر سایر اجزاء به تصویر کشید.

ماتریس طراحی ماهواره سنجشی

برای بررسی تأثیر اجزاء مختلف سیستم در ماتریس ساخته شده، دو دسته کلی قرار گرفته شده‌است که دسته اول اجزاء زیر سیستم‌ها و دسته دوم شاخصه‌های مربوط به شرایط و کلیت سیستم (مانند وزن کل، توان مصرفی کل، ارتفاع پروازی و غیره) می‌باشد. برای وزن‌دهی به تأثیر هر جزء یا شاخصه بر جزء دیگر، با توجه به میزان تأثیر از عدد ۱ تا عدد ۵ نمره‌دهی شده‌است. ماتریس ساخته شده در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. برای به‌دست آوردن این نمرات از نظر کارشناسان استفاده می‌گردد. در ابتدا هر زیرسیستم و اجزاء تشکیل دهنده آن توسط گروه طراحی همان زیر سیستم‌ها بررسی می‌گردد و با توجه به اسناد طراحی هر زیرسیستم نمره‌دهی می‌شود. سپس این نمرات توسط

| RW | | | |
|----|--|-----------------------------|------------------|
| | | | |
| | | Solar panel | power |
| | | Battery | |
| | | Electronic | |
| | | RW | ACS |
| | | MT | |
| 3 | | Magnetometers | |
| | | Star tracker | |
| | | Sun tracker | |
| | | Gyros MEMS | |
| | | ODS | |
| | | GPS + Patch Antenna | |
| | | MT-driver | |
| | | Telemetry Transmitter | |
| | | Telecommand Receiver | |
| | | Antena + base | |
| | | Switch | |
| | | S_ODS | |
| | | Diplexer | |
| | | VHF | |
| | | UHF | Propulsion |
| | | Pro_board | |
| | | Tank+R+S+V | |
| | | Thrusters | TCS |
| | | Heaters | |
| 3 | | Thermometer | Structure |
| | | Ring | |
| | | Main Structure | |
| | | X+ Plate | |
| | | X- Plate | |
| 5 | | Y+ Plate | |
| | | Y- Plate | |
| | | Z+ Plate | Payload |
| | | Z- Plate | |
| | | Ms Optic | |
| | | SWIR | |
| | | TIR | Band X & Exciter |
| | | Antenna-T2 | |
| | | Payload TT | C&DH |
| 2 | | C&DH | |
| | | SADA | Mission scenario |
| 1 | | Total Weight | |
| 4 | | Total Power | |
| | | Geometry | |
| | | height | |
| | | Orbit | |
| | | Stability type | |
| | | Pointing accuracy | |
| | | Pointing accuracy stability | |
| | | Mission scenario | |

شکل ۳- تأثیر چرخ‌های عکس‌العملی بر روی طراحی سایر اجزاء ماهواره.

Fig. 3. The effect of reaction wheels on the design of other components of the satellite.

| | | RW |
|--|-----------------------------|----|
| | | 4 |
| | Solar panel | 1 |
| | Battery | 2 |
| | Electronic | 3 |
| | RW | 4 |
| | MT | 5 |
| | Magnetometers | 6 |
| | Star tracker | 7 |
| | Sun tracker | 8 |
| | Gyros MEMS | 9 |
| | ODS | 10 |
| | GPS + Patch Antenna | 11 |
| | MT-Driver | 12 |
| | Telemetry Transmitter | 13 |
| | Telecommand Receiver | 14 |
| | Antena + base | 15 |
| | Switch | 16 |
| | S_ODS | 17 |
| | Diplexer | 18 |
| | VHF | 19 |
| | UHF | 20 |
| | Pro_board | 21 |
| | Tank+R+S+V | 22 |
| | Thrusters | 23 |
| | Heaters | 24 |
| | Thermometer | 25 |
| | Ring | 26 |
| | Main Structure | 27 |
| | X+ Plate | 28 |
| | X- Plate | 29 |
| | Y+ Plate | 30 |
| | Y- Plate | 31 |
| | Z+ Plate | 32 |
| | Z- Plate | 33 |
| | Ms Optic | 34 |
| | SWIR | 35 |
| | TIR | 36 |
| | Antenna-T2 | 37 |
| | Payload TT | 38 |
| | C&DH | 39 |
| | SADA | 40 |
| | Total Weight | 41 |
| | Total Power | 42 |
| | Geometry | 43 |
| | height | 44 |
| | Orbit | 45 |
| | Stability type | 46 |
| | Pointing accuracy | 47 |
| | Pointing accuracy stability | 48 |
| | Mission Scenario | 49 |

شکل ۲- تأثیر اجزا و شاخصه‌های طراحی بر روی طراحی چرخ‌های عکس‌العملی.

Fig. 2. The effect of components and design indicators on the design of reaction wheels.

طرفی این شاخصه‌ها، خود در طراحی برخی از اجزاء تاثیر مستقیم دارند. در نتیجه با تغییر در طراحی یک زیر سیستم تاثیر غیرمستقیم و صرفاً بابت تاثیر آن جز بر روی شاخصه‌های طراحی سیستم بر روی اجزاء دیگر می‌گذارد. یعنی اثر غیرمستقیم اعمال شده از تغییر جزء Y بر روی جزء X در دو مرحله صورت می‌گیرد. ابتدا تاثیر تغییر جزء Y بر روی شاخصه‌ها (یا Zi که در ستون‌های انتهایی سمت راست ماتریس را تشکیل می‌دهند) از روی ماتریس خوانده می‌شود (DI_{YZ_i}) سپس تاثیر مستقیم Zi بر روی جزء تحت بررسی یعنی X از ردیف‌های انتهایی ماتریس خوانده می‌شود (DI_{Z_iX}). در انتها این دو وزن در هم ضرب شده و برای متعادل شدن حاصل و پیشگیری از سنگین تر شدن تاثیر غیرمستقیم نسبت به مستقیم، بر ۵ تقسیم می‌شوند.

$$II_{YX} = DI_{YZ_i} \times DI_{Z_iX} \times \frac{1}{5} \quad (۳)$$

حال برای درک بهتر با یک مثال، تاثیرات اعمال شده بر یک جزء محاسبه می‌شود (جدول ۱).

در این مسئله خواسته می‌شود تا تغییر چرخ‌های عکس‌العمل (RW) مورد بررسی قرار گیرد و وزن تاثیر بر روی سایر اجزاء محاسبه گردد.

جدول ۱- تاثیرات مستقیم چرخ‌های عکس‌العملی بر سایر اجزاء

Table 1. The direct impact of reaction wheels on other components

| | |
|---|---------------------------|
| 1 | $DI_{RW,MT} = 3$ |
| 2 | $DI_{RW,Thermometer} = 3$ |
| 3 | $DI_{RW,Y+plate} = 5$ |
| 4 | $DI_{RW,C\&DH} = 2$ |
| 5 | $DI_{RW,TotalWeight} = 1$ |
| 6 | $DI_{RW,TotalPower} = 3$ |

ابتدا با توجه به شکل ۳ تاثیر مستقیم چرخ‌های عکس‌العمل بر سایر اجزا وزن‌دهی می‌شود.

با توجه به ردیف ۵ و ۶ دیده می‌شود که این جزء تاثیر مستقیم بر روی دو شاخصه طراحی دارد. در نتیجه به بررسی تاثیرات غیر مستقیم این جزء می‌پردازیم. یعنی باید تاثیر مستقیم وزن کلی (Total Weight) و توان کلی (Total Power) بر سایر اجزا محاسبه گردد. به زبان ساده‌تر چرخ‌های عکس‌العملی بر روی وزن و توان تاثیر می‌گذارند و از طرفی تغییر وزن و توان کل نیز بر اجزاء دیگری تاثیر می‌گذارند. با توجه به شکل ۴ تاثیر وزن کلی بر اجزاء خوانده می‌شود.

| | | | |
|---------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
| Total Weight | | | |
| | 1 | Solar panel | power |
| | 2 | Battery | |
| | 3 | Electronic | |
| | 2 | RW | ACS |
| | 2 | MT | |
| | | Magnetometers | |
| | | Star tracker | |
| | | Sun tracker | |
| | | Gyros MEMS | |
| | | ODS | |
| | | GPS + Patch Antenna | |
| | | MT-driver | |
| | | Telemetry Transmitter | |
| | | Telecommand Receiver | |
| | | Antena + base | |
| | | Switch | |
| | | S_ODS | |
| | | Diplexer | |
| | | VHF | |
| | | UHF | |
| | | Pro_board | Propulsion |
| | 2 | Tank+R+S+V | |
| | 2 | Thrusters | |
| | | Heaters | TCS |
| | | Thermometer | |
| | | Ring | Structure |
| | 3 | Main Structure | |
| | | X+ Plate | |
| | | X- Plate | |
| | | Y+ Plate | |
| | | Y- Plate | |
| | | Z+ Plate | |
| | | Z- Plate | |
| | | Ms Optic | Payload |
| | | SWIR | |
| | | TIR | |
| | | Antenna-T2 | Band X & Exciter |
| | | Payload TT | |
| | | C&DH | C&DH |
| | | SADA | |
| | | Total Weight | |
| | | Total Power | |
| | | Geometry | |
| | | height | |
| | | Orbit | |
| | | Stability type | |
| | | Pointing accuracy | |
| | | Pointing accuracy stability | |
| | Mission scenario | | |

شکل ۴- تاثیر وزن کلی بر روی سایر اجزاء ماهواره.

Fig. 4. The impact of total weight on other components of the satellite.

تاثیر غیر مستقیم در طراحی

با توجه به ماتریس طراحی معرفی شده، هر جزء با وزنی مشخص، بر روی شاخصه‌های طراحی (در سمت راست ماتریس) تاثیر می‌گذارد. از

جدول ۵- تأثیرات کلی چرخ‌های عکس‌العملی بر سایر اجزاء.

Table 5. Total impact of reaction wheels on other components.

| Row | Impact component | Indirect Impact |
|-----|------------------|-----------------------------------------|
| 1 | MT | $TI_{RW,MT} = 3 + 0.4 = 3.4$ |
| 2 | Tank | $TI_{RW,Tank} = 0 + 0.4 = 0.4$ |
| 3 | Thruster | $TI_{RW,Thruster} = 0 + 0.4 = 0.4$ |
| 4 | MainStructure | $TI_{RW,MainStructure} = 0 + 0.6 = 0.6$ |
| 5 | Solar panel | $TI_{RW,SolarPanel} = 0 + 3 = 3$ |
| 6 | Battery | $TI_{RW,Battery} = 0 + 3 = 3$ |
| 7 | Electronic | $TI_{RW,Electronic} = 0 + 3 = 3$ |
| 8 | Thermometer | $TI_{RW,Thermometer} = 3 + 0 = 3$ |
| 9 | Y+Plate | $TI_{RW,Y+plate} = 5 + 0 = 5$ |
| 10 | C&DH | $TI_{RW,C\&DH} = 2 + 0 = 2$ |

در صورتی که چند جزء همزمان تغییر پیدا کردند (به‌جای یک جزئی که مانند مثال قبل بررسی گردید) در این صورت هر جزء جداگانه بررسی می‌شود و تأثیرش بر سایر اجزاء بررسی می‌گردد و سپس آن‌هایی که مشترک هستند با هم جمع می‌شود.

همان‌طور که در جداول مشاهده می‌شود، تغییر چرخ عکس‌العملی به‌طور مستقیم بر روی مخزن یا رانشگرها ندارد و در صورت در نظر نگرفتن تأثیرات غیرمستقیم، نادیده گرفته می‌شوند. ولی به واسطه تأثیر چرخ‌ها بر وزن کل و توان مصرفی ماهواره، به‌طور غیر مستقیم بر روی طراحی مخزن و رانشگرها نیز تأثیر می‌گذارد. البته اینکه این تأثیر منجر به تغییر در طراحی سایر اجزاء شود یا خیر، بستگی به بررسی طراحان دارد و ممکن است این تأثیرات ناچیز باشد. در واقع این ماتریس به اولویت بندی بررسی اجزاء پس از اعمال تغییر کمک می‌کند.

نحوه وزن دهی تأثیر وزن کلی و توان کلی ماهواره بر اجزاء

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، تغییر وزن و توان کلی ماهواره بر طراحی برخی اجزاء تأثیر مستقیم دارد. برای مثال با افزایش توان مصرفی کلی (به‌دلیل تغییر در اجزاء مصرف‌کننده) نیاز به تولید توان بیشتری می‌باشد و همچنین ذخیره توان الکتریکی نیز باید افزایش یابد در نتیجه در طراحی باتری‌ها و پنل‌ها باید بررسی مجدد صورت پذیرد [۱۱]. ولی افزایش توان کلی تأثیر مستقیمی در طراحی آنتن‌ها یا حسگرها ندارد. به کمک اسناد طراحی و بررسی ورودی‌های محاسبات مربوط به طراحی هر جزء (برای بررسی اینکه در روند طراحی آن جزء، آیا وزن ماهواره یا توان مصرفی ماهواره لحاظ می‌شود یا خیر) و نظر کارشناس گروه سیستم و مشورت با فرد خبره هر گروه (زیرسیستم) می‌توان این تأثیرات را تشخیص داد و نمره‌دهی نمود. در نظر گرفته شود که وزن کلی و توان

جدول ۲- تأثیرات مستقیم وزن کلی بر سایر اجزاء.

Table 2. The direct impact of total weight on other components.

| | |
|---|--------------------------------------|
| 1 | $DI_{TotalWeight,RW} = 2$ |
| 2 | $DI_{TotalWeight,MT} = 2$ |
| 3 | $DI_{TotalWeight,Tank} = 2$ |
| 4 | $DI_{TotalWeight,Thruster} = 2$ |
| 5 | $DI_{TotalWeight,MainStructure} = 3$ |

جدول ۳- تأثیرات مستقیم توان کلی بر سایر اجزاء.

Table 3. The direct impact of total power on other components.

| | |
|---|----------------------------------|
| 1 | $DI_{TotalPower,SolarPanel} = 5$ |
| 2 | $DI_{TotalPower,Battery} = 5$ |
| 3 | $DI_{TotalPower,Electronic} = 5$ |

در نتیجه با توجه به رابطه ۳، تأثیرات غیرمستقیم به شرح جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴- تأثیرات غیرمستقیم چرخ‌های عکس‌العملی بر سایر اجزاء.

Table 4. Indirect impact of reaction wheels on other components.

| Row | Impact component | Indirect Impact |
|-----|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | MT | $II_{RW,MT} = DI_{RW,TotalWeight} \times DI_{TotalWeight,MT} \times \frac{1}{5} = 1 \times 2 \times \frac{1}{5} = 0.4$ |
| 2 | TanK | $II_{RW,Tank} = 1 \times 2 \times \frac{1}{5} = 0.4$ |
| 3 | Thruster | $II_{RW,Thruster} = 1 \times 2 \times \frac{1}{5} = 0.4$ |
| 4 | MainStru cture | $II_{RW,MainStructure} = 1 \times 3 \times \frac{1}{5} = 0.6$ |
| 5 | Salar Panet | $II_{RW,SolarPanel} = 3 \times 5 \times \frac{1}{5} = 3$ |
| 6 | Battery | $II_{RW,Battery} = 3 \times 5 \times \frac{1}{5} = 3$ |
| 7 | Electronic | $II_{RW,Electronic} = 3 \times 5 \times \frac{1}{5} = 3$ |

همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، در ردیف ۲، ۳ و ۴ تأثیر غیرمستقیم مخزن و رانشگرها و شاسی اصلی (با اینکه تأثیر مستقیمی نداشتند) ولی با ضرب تأثیر چرخ‌ها بر وزن و تأثیر وزن بر رانشگرها میتوان تأثیر غیرمستقیم تغییر چرخ‌ها بر رانشگرها را دید.

حال با جمع تأثیر مستقیم و غیرمستقیم می‌توان تأثیر کلی را برای

هر جزء به‌دست آورد.

نحوه وزن دهی تاثیر اجزاء بر وزن کلی ماهواره

هر جزء سهمی در وزن کلی ماهواره دارد و با توجه به این سهم، تعیین می‌گردد که چه میزان تاثیر بر وزن کلی ماهواره داشته باشد. پس از مشخص شدن سهم هر جزء، به آن‌ها نمره (بین ۰ تا ۵) داده می‌شود. جدول ۶ نشان‌دهنده سهم و نمره هر جزء می‌باشد.

در ابتدا پس از وزن‌دهی مشخص شد که به دلیل وزن بالای برخی از زیرسیستم‌ها (اجزاء) نمره‌دهی به صورتی می‌شود که عمده نمرات صفر می‌شود و در واقع وزن آن اجزا (اجزاء بسیار سنگین‌تر نسبت به سایر اجزاء) نقش داده پرت را دارد. لذا قبل از گرد کرده نمرات ابتدا در ۱.۵ ضرب گردیده‌اند و نمراتی که از ۵ بالاتر شده‌اند، ۵ گذاشته شده‌است.

جدول ۶- سهم و تاثیر اجزاء بر وزن کل.

Table 6. The contribution and impact of components on the total weight.

| Components | MASS | R MASS | Impact Mass [0-5] | Round Impact Mass [0-5] |
|-----------------------|-------|--------|-------------------|-------------------------|
| Solar panel | 5926 | 4.52% | 1.93 | 2 |
| Battery | 5259 | 4.01% | 1.71 | 2 |
| Electronic | 5800 | 4.43% | 1.89 | 2 |
| RW | 3650 | 2.79% | 1.19 | 1 |
| MT | 2000 | 1.53% | 0.65 | 1 |
| Magnetometers | 120 | 0.09% | 0.04 | 0 |
| Star tracker | 1500 | 1.15% | 0.49 | 0 |
| Sun tracker | 66 | 0.05% | 0.02 | 0 |
| Gyros MEMS | 1815 | 1.39% | 0.59 | 1 |
| ODS | | 0.00% | 0.00 | 0 |
| GPS + Patch Antenna | 1670 | 1.27% | 0.54 | 1 |
| MT-Driver | 484 | 0.37% | 0.16 | 0 |
| Telemetry Transmitter | 587 | 0.45% | 0.19 | 0 |
| Telecommand Receiver | 576 | 0.44% | 0.19 | 0 |
| Antena + base | 950 | 0.73% | 0.31 | 0 |
| Switch | 100 | 0.08% | 0.03 | 0 |
| S_ODS | 452 | 0.35% | 0.15 | 0 |
| Diplexer | 0 | 0.00% | 0.00 | 0 |
| VHF | 178 | 0.14% | 0.06 | 0 |
| UHF | 48 | 0.04% | 0.02 | 0 |
| Pro board | 1000 | 0.76% | 0.33 | 0 |
| Tank+R+S+V | 20000 | 15.27% | 6.52 | 5 |
| Thrusters | 2000 | 1.53% | 0.65 | 1 |
| Heaters | 400 | 0.31% | 0.13 | 0 |
| Thermometer | 200 | 0.15% | 0.07 | 0 |
| Ring | 4687 | 3.58% | 1.53 | 2 |
| Main Structure | 23000 | 17.56% | 7.50 | 5 |
| X+ Plate | 3000 | 2.29% | 0.98 | 1 |
| X- Plate | 3102 | 2.37% | 1.01 | 1 |
| Y+ Plate | 2476 | 1.89% | 0.81 | 1 |
| Y- Plate | 2476 | 1.89% | 0.81 | 1 |
| Z+ Plate | 2479 | 1.89% | 0.81 | 1 |
| Z- Plate | 2055 | 1.57% | 0.67 | 1 |
| Ms Optic | 7854 | 6.00% | 2.56 | 3 |
| SWIR | 1783 | 1.36% | 0.58 | 1 |
| TIR | 2129 | 1.63% | 0.69 | 1 |
| Antenna-T2 | 400 | 0.31% | 0.13 | 0 |
| Payload TT | 1600 | 1.22% | 0.52 | 1 |
| C&DH | 4311 | 3.29% | 1.41 | 1 |

کلی، متغیرهایی نیستند که بخواهیم صرفاً تاثیر تغییر آن‌ها را بررسی کنیم، بلکه یک واسطه هستند تا تاثیر غیرمستقیم اجزاء را ببینیم. وقتی از مستقیم صحبت می‌کنیم، یعنی در طراحی آن جزء و در محاسبات آن، به‌طور مستقیم وزن ماهواره اعمال شده‌باشد.

| Total Power | | | |
|-------------|-----------------------------|-------|--|
| 1 | Solar panel | power | |
| 2 | Battery | | |
| 3 | Electronic | | |
| 4 | RW | | |
| 5 | MT | | |
| 6 | Magnetometers | | |
| 7 | Star tracker | | |
| 8 | Sun tracker | | |
| 9 | Gyros MEMS | | |
| 10 | ODS | | |
| 11 | GPS + Patch Antenna | | |
| 12 | MT-driver | | |
| 13 | Telemetry Transmitter | | |
| 14 | Telecommand Receiver | | |
| 15 | Antena + base | | |
| 16 | Switch | | |
| 17 | S_ODS | | |
| 18 | Diplexer | | |
| 19 | VHF | | |
| 20 | UHF | | |
| 21 | Pro_board | | |
| 22 | Tank+R+S+V | | |
| 23 | Thrusters | | |
| 24 | Heaters | | |
| 25 | Thermometer | | |
| 26 | Ring | | |
| 27 | Main Structure | | |
| 28 | X+ Plate | | |
| 29 | X- Plate | | |
| 30 | Y+ Plate | | |
| 31 | Y- Plate | | |
| 32 | Z+ Plate | | |
| 33 | Z- Plate | | |
| 34 | Ms Optic | | |
| 35 | SWIR | | |
| 36 | TIR | | |
| 37 | Antenna-T2 | | |
| 38 | Payload TT | | |
| 39 | C&DH | | |
| 40 | SADA | | |
| 41 | Total Weight | | |
| 42 | Total Power | | |
| 43 | Geometry | | |
| 44 | height | | |
| 45 | Orbit | | |
| 46 | Stability type | | |
| 47 | Pointing accuracy | | |
| 48 | Pointing accuracy stability | | |
| 49 | Mission scenario | | |

شکل ۵- تاثیر توان کلی بر روی سایر اجزاء ماهواره.

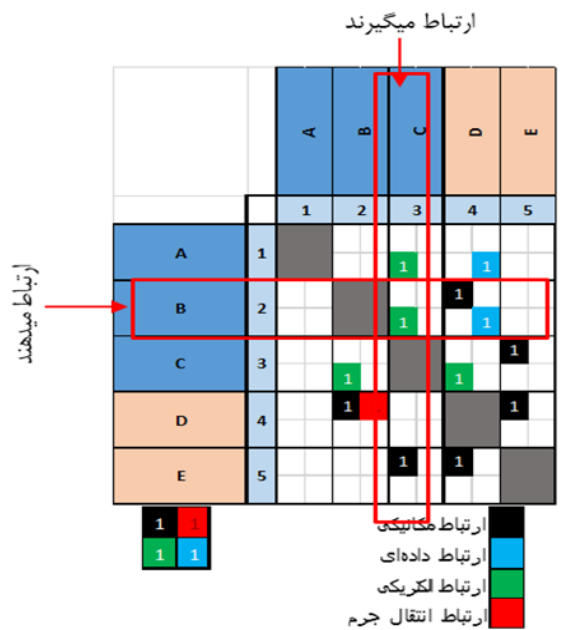
Fig. 5. The impact of total Power on other components of the satellite.

ماتریس ارتباطات

برای درک بهتر ارتباطات بین اجزاء، از ماتریس DSM استفاده نموده و ارتباطات هر جزء با جزء دیگر نمایش داده می‌شود. این ارتباطات شامل چهار نوع ارتباط می‌شود که به شرح زیر می‌باشد:

- ارتباط فیزیکی: در این نوع ارتباط، یک جزء با جزئی دیگر برخورد فیزیکی دارد یعنی دو جزء به نحوی بهم متصل می‌باشد. این ارتباط در ماتریس ارتباطات مورد نظر با رنگ مشکی نمایش داده شده است.
- ارتباط الکتریکی: هر جزء که مصرف توان الکتریکی دارد، برق مصرفی خود را از جزء دیگری می‌گیرد، این ارتباط در ماتریس ارتباطات مورد نظر با رنگ سبز نمایش داده شده است.
- ارتباط داده‌ای: برخی اجزاء حاوی اطلاعاتی هستند که نیاز است تا به جزء دیگر فرستاده شوند یا برای اجرای سناریوهای تعیین شده برای ماهواره باید به آن اجزاء فرمان‌هایی ارسال گردد، در کل هرگونه ارتباطی که در آن فرمان یا داده منتقل شود به عنوان ارتباط داده‌ای تلقی می‌شود. این ارتباط در ماتریس ارتباطات مورد نظر با رنگ آبی نمایش داده شده است.
- ارتباط انتقال جرم: برخی از اجزاء ممکن است برای تحقق وظایف خود نیاز به انتقاد ماده به جزء دیگری داشته باشند. این نوع ارتباط در ماتریس ارتباطات مورد نظر با رنگ قرمز نمایش داده شده است.

در شکل ۶ نحوه نمایش ارتباطات معرفی گردیده است.



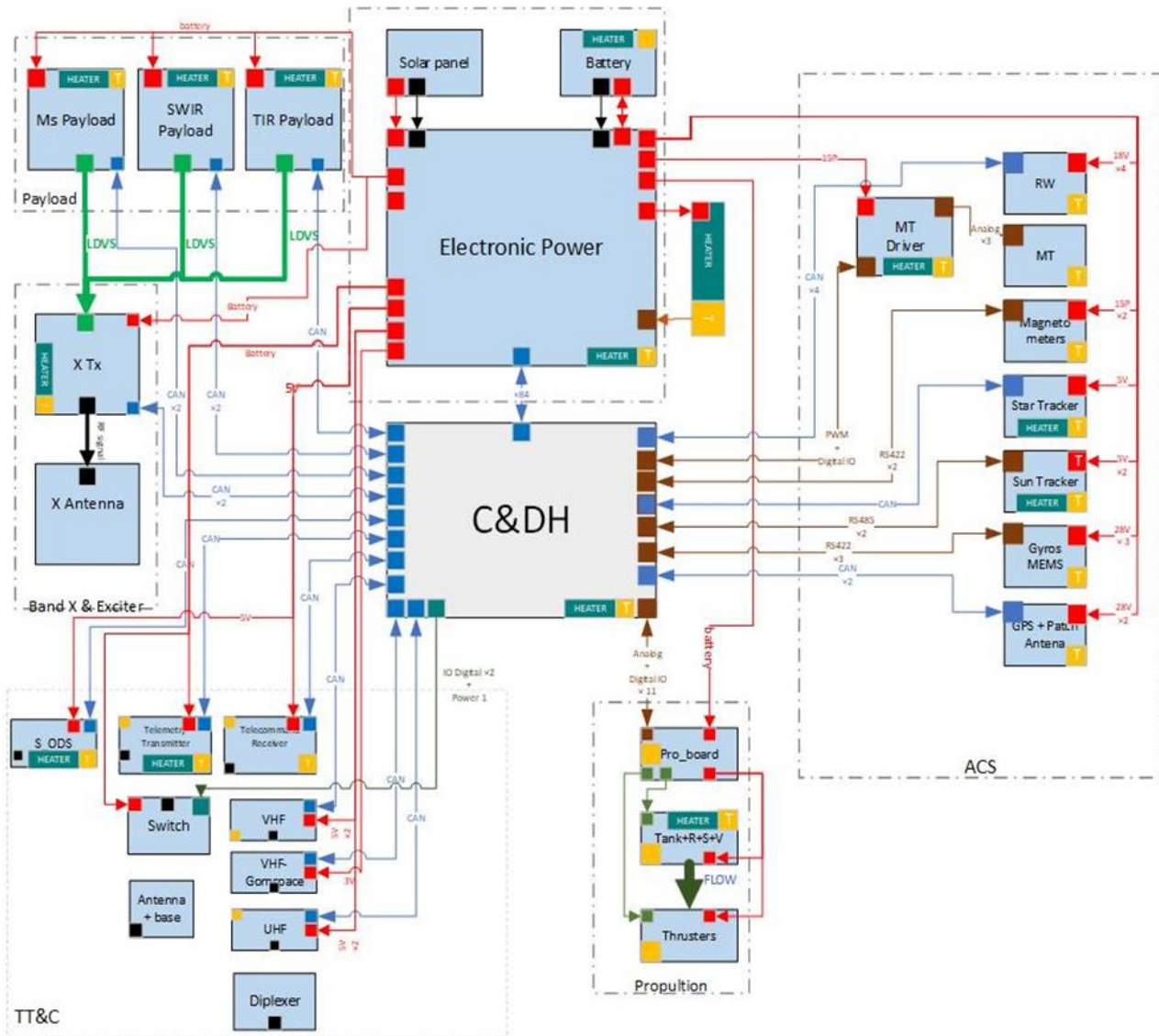
شکل ۶- ماتریس ارتباطات.

Fig. 6. Communication matrix.

جدول ۷- سهم و تأثیر اجزاء بر توان مصرفی کل.

Table 7. The contribution and impact of components on the total power consumption.

| | Power [W] | Average Power [W] | R Power [%] | R Average Power [%] | Impact Power [0-5] | Round Impact Power [0-5] |
|-----------------------|-----------|-------------------|-------------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| Solar panel | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Battery | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Electronic | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| RW | 24 | 18 | 5.92% | 23.80% | 4.15 | 4 |
| MT | 4.3 | 4.3 | 1.06% | 5.69% | 0.968 | 1 |
| Magnetometers | 0.6 | 0.6 | 0.15% | 0.79% | 0.135 | 0 |
| Star tracker | 1.5 | 0.3 | 0.37% | 0.40% | 0.088 | 0 |
| Sun tracker | 0.8 | 0.52 | 0.20% | 0.69% | 0.122 | 0 |
| Gyros MEMS | 15 | 5 | 3.70% | 6.61% | 1.292 | 1 |
| ODS | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| GPS + Patch Antenna | 4 | 2 | 0.99% | 2.64% | 0.483 | 0 |
| MT-Driver | 4.3 | 4.3 | 1.06% | 5.69% | 0.968 | 1 |
| Telemetry Transmitter | 14 | 1.4 | 3.45% | 1.85% | 0.525 | 1 |
| Telecommand Receive | 2.5 | 2.5 | 0.62% | 3.31% | 0.563 | 1 |
| Antena + base | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Switch | 2.8 | 0 | 0.69% | 0.00% | 0.047 | 0 |
| S_ODS | 4.5 | 4.5 | 1.11% | 5.95% | 1.013 | 1 |
| Diplexer | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| VHF | 14.35 | 6 | 3.54% | 7.93% | 1.489 | 1 |
| UHF | 5 | 2.5 | 1.23% | 3.31% | 0.604 | 1 |
| Pro_board | 40 | 0 | 9.86% | 0.00% | 0.667 | 1 |
| Tank+R+S+V | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Thrusters | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Heaters | 51 | 6.8 | 12.57% | 8.99% | 2.267 | 2 |
| Thermometer | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Ring | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Main Structure | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| X+ Plate | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| X- Plate | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Y+ Plate | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Y- Plate | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Z+ Plate | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Z- Plate | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Ms Optic | 40 | 2 | 9.86% | 2.64% | 1.083 | 1 |
| SWIR | 20 | 1 | 4.93% | 1.32% | 0.542 | 1 |
| TIR | 24 | 1.2 | 5.92% | 1.59% | 0.65 | 1 |
| Antenna-T2 | - | - | 0.00% | 0.00% | 0 | 0 |
| Payload TT | 75 | 7.5 | 18.48% | 9.92% | 2.813 | 3 |
| C&DH | 11.75 | 9.25 | 2.90% | 12.23% | 2.123 | 2 |



شکل ۸- شکل شماتیک ارتباطات ماهواره سنجشی

Fig. 8. Schematic figure of remote sensing satellite.

برای مثال، ممکن است دو جزء اضافه گردد و یک جزء تغییر کند و یک جزء نیز حذف شود و همگی آن‌ها حسگر دما دارند. لذا دو حسگر باید اضافه گردد و یک حسگر حذف گردد (معمولاً با تغییر جزء تغییری در تعداد حسگر لحاظ نمی‌شود ولی به این تغییر اشاره می‌شود تا در بررسی‌ها لحاظ گردد).

برای هیترها از آنجا که با اضافه شدن آن‌ها باید یک خط جریان نیز برای تأمین انرژی الکتریکی هیتر اضافه گردد، لذا این اضافه شدن خط جریان با اضافه شدن خط جریان ناشی از اضافه شدن خود جزء جمع می‌گردد. یعنی با اضافه شدن یک جزء که هیتر دارد، دو خط جریان به سیستم اضافه می‌گردد.

تأثیر تغییرات بر اجزاء زیرسیستم کنترل حرارت

برخی از اجزاء سیستم، دارای حسگر دما و هیتر می‌باشند. لذا با تغییر در جزء باید در نظر گرفت که احتمال تغییر در تعداد حسگرها یا هیترها خواهد بود. برای در نظر گرفتن این امر، تغییرات به سه دسته زیر تقسیم‌بندی شده‌اند:

- اضافه کردن: زمانی که تصمیم به بیشتر کردن تعداد موجود از یکی از اجزاء باشد.
- تغییر دادن: زمانی که تصمیم به این است که جزء دوباره طراحی شود و با مدل پیشنهادی متفاوتی جایگزین گردد.
- حذف کردن: زمانی که تصمیم بر حذف یک جزء می‌باشد.

جدول ۸- اجزاء دارای حسگر حرارتی و هیتر.

مطالعه موردی اضافه شدن یک حسگر ستاره

در این مطالعه فرض می‌گردد که یک حسگر ستاره، به سیستم اضافه گردد. لذا هر دو ماتریس طراحی و ارتباطات مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تغییراتی که بر اجزاء دیگر اعمال شده‌است مشخص گردد.

تغییرات طراحی

با توجه به ماتریس طراحی شکل ۱، اجزاء تحت تاثیر مشخص شده و وزن تغییر اعمال شده به آن‌ها نشان داده می‌شود.

درصد تاثیر ناشی از این تغییر در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. تاثیر بر صفحه X+ مشخص است و با اضافه شدن یک حسگر، باید محل نصب آن و اتصالات به صفحه مربوطه اضافه گردد.

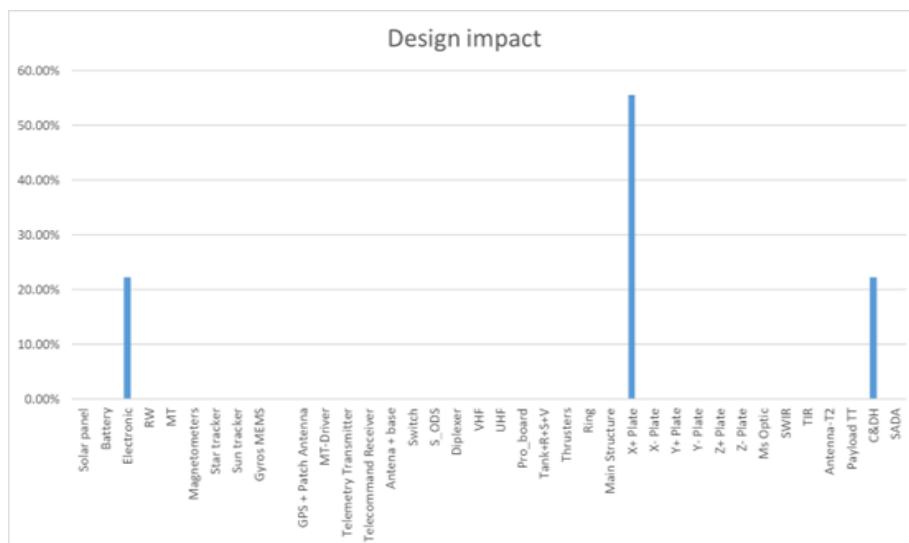
برای تاثیر بر برد الکترونیکی همانطور که در بررسی تاثیرات غیرمستقیم گفته شد وزن تاثیر حسگر ستاره بر توان مصرفی کل صفر می‌باشد لذا نباید تاثیری بر بخش توان (پنل‌ها، باتری و برد توان) داشته باشد. ولی در شکل ۹ مشخص است که تاثیر داشته، و این تاثیر به دلیل اضافه شدن خط جریان برای خود حسگر و همچنین برای هیتر آن می‌باشد.

تاثیر بر روی C&DH نیز از بابت اضافه شدن داده‌های حسگر به برد فرمان می‌باشد که باید تاثیر آن (هم برای پردازش اطلاعات هم کانکشن اضافه شده) به صورت تخصصی‌تر مورد بررسی قرار گیرد.

درصدهای اعلام شده در شکل ۹ صرفاً جهت نرمال‌سازی نتایج به دست آمده (وزن‌ها) در بازه صفر تا صد می‌باشد.

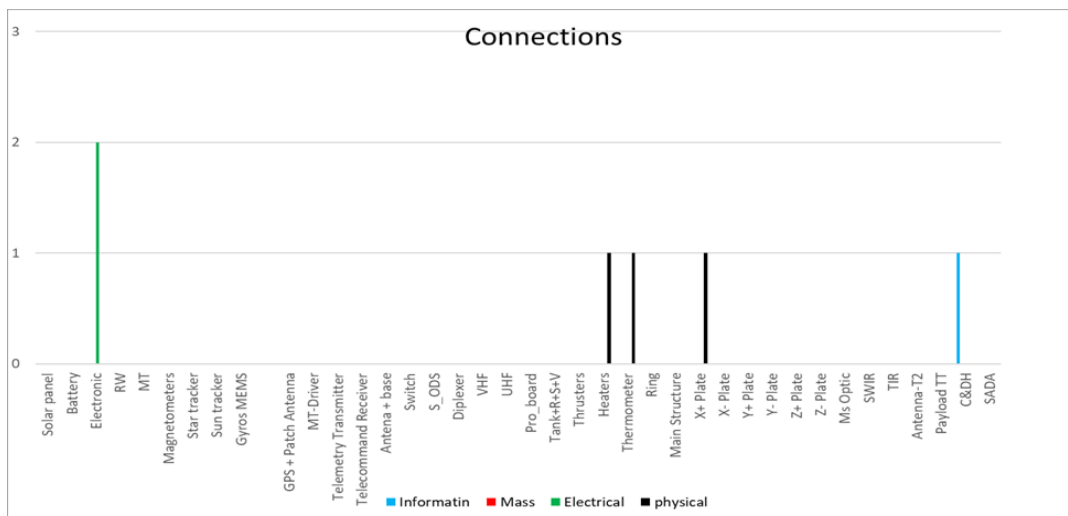
Table 8. Components with thermal sensors and heaters.

| Thermal | | |
|--------------|--------|--------|
| Component | Heater | Sensor |
| Electronic | 1 | 1 |
| C&DH | 1 | 1 |
| RW | 0 | 1 |
| MT | 0 | 1 |
| MM | 0 | 1 |
| Star Tracker | 1 | 1 |
| Sun Tracker | 2 | 2 |
| Gyro | 0 | 1 |
| GPS | 0 | 1 |
| MT Driver | 1 | 1 |
| Battery | 2 | 2 |
| Pro_board | 0 | 1 |
| Tank+R+S+V | 2 | 2 |
| Thrusters | 0 | 1 |
| MS Payload | 2 | 2 |
| SWIR Payload | 1 | 1 |
| TIR Payload | 1 | 1 |
| X TX | 1 | 1 |
| S_ODS | 1 | 1 |
| TT | 1 | 1 |
| TR | 0 | 1 |
| VHF | 0 | 1 |
| VHF-Gomspace | 0 | 1 |
| UHF | 0 | 1 |



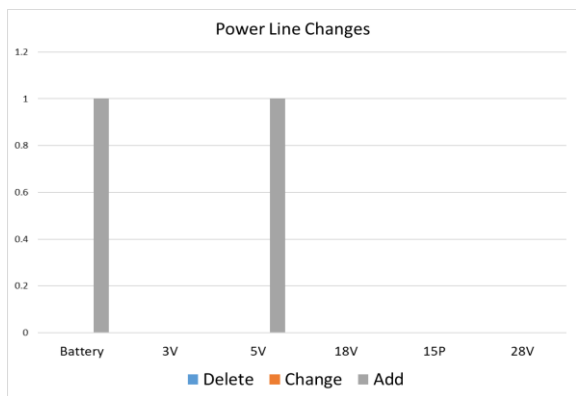
شکل ۹- تاثیر ناشی از اضافه شدن یک حسگر ستاره بر سایر اجزاء.

Fig. 9. The effect of adding a star sensor on other components.



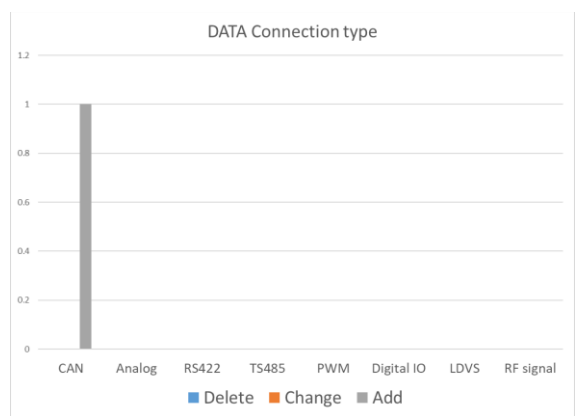
شکل ۱۰- تأثیر ناشی از اضافه شدن یک حسگر ستاره در ارتباطات.

Fig. 10. Impact of addition a star sensor in the communications.



شکل ۱۱- تعداد و ولتاژ خطوط الکتریکی تغییر یافته.

Fig. 11. The number and voltage of the changed electrical lines.



شکل ۱۲- تعداد و نوع ارتباطات دیتایی تغییر یافته.

Fig. 12. Number and type of the changed data connections.

تغییرات در ماتریس ارتباطات

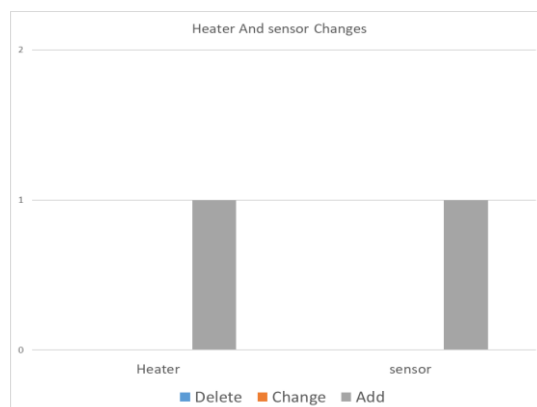
با توجه به شکل ۷ که ماتریس ارتباطات ماهواره پارس ۱ را نشان می‌دهد، ارتباطاتی که در اثر اضافه شدن یک حسگر ستاره تحت تأثیر قرار می‌گیرند به‌دست می‌آید. با توجه به شکل ۱۰ دو عدد ارتباط الکتریکی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که با بررسی بیشتر مشخص گردید یک ارتباط برای تأمین برق حسگر و دیگری برای تأمین برق هیتر اضافه شده است.

ولتاژ خطوط جریان اضافه شده در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱، یک خط ۵ ولت (برای حسگر ستاره) و یک خط با ولتاژ باتری (برای هیتر) اضافه می‌گردد. همچنین ارتباط فیزیکی با صفحه X+ که حسگر روی آن نصب می‌شود و اتصال فیزیکی با حسگر دما و هیتر گزارش شده است. برای ارتباطات داده‌ای یک ارتباط یافت شده که با بورد فرمان C&DH می‌باشد. نوع ارتباطات اضافه شده نیز در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد.

با توجه به شکل ۱۲ مشخص می‌گردد که یک ارتباط از نوع CAN به سیستم اضافه گردیده، که با توجه به شکل ۱۰، این ارتباط مربوط به C&DH می‌باشد. همچنین برای بررسی تعداد حسگر دما و هیتر، شکل ۱۳ نشان می‌دهد که یک حسگر و یک هیتر اضافه می‌شود.

Buildings, vol. 13, no. 9, 2023, Art. no. 2330, <https://doi.org/10.3390/buildings13092330>.

- [4] M. Danilovic and T. R. Browning, "Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices," *International Journal of Project Management*, vol. 25, no. 3, pp. 300-314, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>.
- [5] N. Sangal, E. Jordan, V. Sinha, and D. Jackson, "Using dependency models to manage complex software architecture," in *20th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications*, San Diego, USA, 2005, pp. 167-176, <https://doi.org/10.1145/1094855.1094915>.
- [6] T. Assawarungsri and N. Janthong, "An integration matrix for investigating the impact of design changes in mechatronic products," *Designs*, vol. 7, no. 1, 2023, Art. no. 16, <https://doi.org/10.3390/designs7010016>.
- [7] J. Tran, M. Stowe, M. Plattner, and M. Zimmermann, "Using the design structure matrix for space system design," in *21st International DSM Conference (DSM 2019)*, Monterey, California, 2019, pp. 1-10, <https://doi.org/10.35199/dsm2019.17>.
- [8] N. Chitsaz and M. Efatmaneshnik, "Design structure matrix for design assurance and management: The case of CubeSats," in *International Systems Conference (SysCon)*, Vancouver, BC, Canada, 2023, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/SysCon53073.2023.10131105>.
- [9] T. Boudouh and O. Grunder, "A new algorithm for the optimization of the design process using the design structure matrix," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 760, pp. 39-44, 2015, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.760.39>.
- [10] B. Shekar, R. Venkataram, and B. Satish, "Managing complexity in aircraft design using design structure matrix," *Concurrent Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 283-294, 2011, <https://doi.org/10.1177/1063293X11426461>.
- [11] H. Naseh, F. J. Amleshi, A. Mahmoodi, N. M. Bdizi, and M. R. Bakhtiari, "Multi-objective optimization of satellite power supply subsystem based on mass and power production," *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 231-244, 2023.



شکل ۱۳ - حسگر دما و هیتر تغییر یافته.

Fig. 13. Changed temperature sensor and heater.

نتیجه گیری

با بررسی ماتریس DSM و پیاده سازی دو ماتریس طراحی و ارتباطات برای ماهواره سنجشی از پیش طراحی شده، با لحاظ کردن یک یا چند تغییر در اجزاء، تمام تاثیرات تحمیل شده به سایر اجزاء مشخص گردید و اجزائی که نیاز به بازبینی در طراحی دارن معرفی شدند. همچنین ارتباطاتی که در اثر این تغییرات نیاز به بررسی یا حذف یا افزایش تعداد و نوع آن را دارند مشخص می شود و بستر را برای ادامه مسیر طراحی فراهم می کند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده است.

مراجع

- [1] S. D. Eppinger and T. R. Browning, *Design Structure Matrix Methods And Applications*. MIT Press, 2012.
- [2] R. R. Qureshi, D. N. Ford, and C. M. Wolf, "Descriptive design structure matrices for improved system dynamics qualitative modeling," *System Dynamics Review*, vol. 40, no. 4, 2024, Art. no. e1764, <https://doi.org/10.1002/sdr.1764>.
- [3] Y. Wang, S. Bian, L. Dong, and H. Li, "Multiresolution modeling of a modular building design process based on design structure matrix,"