توسعهٔ طراحی سیستمی یک ماهوارهٔ مکعبی با استفاده از روش ماتریس ساختار طراحی

امیررضا کوثری[1]، مهدی فکور[2]، شیدوش وکیلی‌پور[3]، وحید بهلوری[4]

۱ استادیار دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، kosari_a@ut.ac.ir

۲ استادیار دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۳ استادیار دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۴ کارشناس ارشد مکاترونیک، دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۲

چکیده

هدف این مقاله توسعهٔ فرایند طراحی سیستمی ماهواره است. برای این منظور از روش ماتریس ساختار طراحی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای طراحی و تحلیل سیستم‌های پیچیده استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های روش ماتریس ساختار طراحی در مواجهه با سیستمی پیچیده با پارامترهای متنوع، از این روش برای نمایش وابستگی‌های بین پارامترهای طراحی ماهواره و ارائهٔ فرایند طراحی در سطح سیستمی استفاده شده است. بر اساس این روش، ماهواره به زیرسیستم‌ها و اجزای کوچک‌تری تجزیه و پارامترهای اثرگذار در طراحی، با انتخاب هر جزء در سطوح مختلف الزامات، مشخصات مأموریت، سیستم و زیرسیستم استخراج و ارتباط بین این پارامترها شناسایی شده است. نهایتاً این ارتباطات به‌صورت کیفی بیان و فرایند طراحی به‌سازی می‌شود. این روش در خصوص طراحی مفهومی یک ماهوارهٔ مکعبی که نوع جدیدی از پیکوماهواره‌هاست انجام شده است. در این رهگذر ۱۳۵ پارامتر طراحی شناسایی و تأثیر هر یک از آنها بر هم و بر فرایند طراحی در قالب ماتریس پی‌ریزی شده، شناسایی شده است. با مقایسهٔ کیفی نتایج این روش با دیگر روش‌ها، مزایایی چون سادگی، فشردگی، اختصار، قابلیت تجزیه و تحلیل و کمی‌سازی روابط مشخص می‌شود.

واژگان کلیدی

ماتریس ساختار طراحی، طراحی سیستمی، ماهوارهٔ مکعبی، پارامترهای طراحی

۱. مقدمه

با رشد روزافزون دانش و فناوری، سیستم‌ها و دستگاه‌های جدید صنعتی همچون فضاپیماها و هواپیماها ملزومات و پیچیدگی‌های خاصی پیدا کرده‌اند؛ به‌طوری‌که باید دانش و تخصص‌های متنوعی را جهت طراحی و ساخت یک سیستم صنعتی جدید در کنار هم قرار داد و به هم‌زبانی قابل تعریف میان بخش‌های مختلف دست یافت. بنابراین ضرورت استفاده از روش‌های سیستمی در طراحی و پیشبرد

یک پروژهٔ صنعتی محرز و مشخص است. سیستمی‌بودن فرایند طراحی براساس الزامات و نیازهای کاربر و الزامات بالادستی و پارامترهای فراوان در طراحی یک وسیلهٔ امروزی سبب ابداع روش‌ها و ابزارهای متنوع جهت تحلیل و ایجاد ساختار طراحی سیستمی برمبنای نمایش وابستگی بین پارامترهای طراحی در حوزهٔ فضایی شده و مورد استفاده قرار گرفته است. از جملهٔ این ابزارها و روش‌ها می‌توان به ابزارهای اس. دی. تی.[۱]، ام. یو. سَت[۲]، اسکالس[۳] و اس. ایی. ام.[۴] که برای توسعهٔ طراحی فضاپیما ارائه شده‌اند اشاره کرد [۱-۳]. همچنین می‌توان به روش‌های نمایش روابط بین پارامترها همچون روش گراف، روش درختی، مدل آی. دی. ایی. اف.[۵]، مدل طراحی اصولی[۶] و روش ماتریس ساختار طراحی[۷] اشاره کرد.

ماهواره‌ها سیستم‌های پیچیده‌اند؛ سیستم‌هایی که در طراحی آنها پارامترهای فراوانی اثرگذارند. تغییر یکی از این پارامتر علاوه بر تغییر فرایند طراحی، سایر پارامترها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. تعداد پارامترهای طراحی ماهواره در سطوح مختلف، از طراحی مفهومی تا طراحی دقیق، بیشتر و وابستگی‌های پارامترها جزئی‌تر شده است. این در حالی است که ابزارهای طراحی سیستمی ماهواره، با وجود مزایای فراوان، نمی‌توانند دیدگاهی صحیح در مورد نحوهٔ ارتباط پارامترهای طراحی و همچنین روند طراحی در اختیار طراح قرار دهند. لذا چنانچه طراح بخواهد یک ورودی را عوض کند، قادر نخواهد بود تأثیر این تغییر را در سایر پارامترها پایش کند [۵]. بنابراین برای رفع این نقص و با توجه به وجود پارامترهای فراوان در طراحی یک ماهواره و لزوم استفاده از روش‌های سیستمی و با توجه به مزایای روش ماتریس ساختار طراحی، این روش برای توسعهٔ فرایند طراحی سیستمی ماهواره انتخاب و روی یک نمونه ماهوارهٔ مکعبی اجرا شده است تا طراح سیستم بتواند تأثیر پارامترهای مختلف طراحی یک ماهوارهٔ مکعبی را بر یکدیگر در نظر بگیرد و به‌سمت طراحی مطلوب پیش برود.

در راستای نیل به فرایند طراحی سیستمی با روش ماتریس ساختار طراحی، ابتدا ابزارهای پیشین و روش‌های ساختاری بیان و مقایسه‌ای میان این روش‌ها انجام شده است. سپس طراحی ماهواره‌های مکعبی ارائه شده و در ادامه با شناسایی پارامترهای طراحی و شناسایی وابستگی بین پارامترها، ماتریس طراحی پی‌ریزی می‌شود و سیکل‌های طراحی سیستمی شکل می‌گیرد. نهایتاً با به‌سازی حلقه‌های طراحی سیستمی به‌وسیلهٔ الگوریتم‌های خوشه‌بندی[۸]، حلقه‌های طراحی ماهوارهٔ مکعبی ایجاد می‌شود و فرایند طراحی سیستمی بهینه شکل می‌گیرد و طراحی سیستمی ماهوارهٔ مکعبی بر این مبنا توسعه می‌یابد.

در پایان، نتایج و مزایای استفاده از این روش نسبت به سایر روش‌ها، توسعهٔ طراحی سیستمی و همچنین پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

۲. تاریخچه

در سال‌های اخیر، ابزارهایی جهت کمک به طراحی سیستمی ماهواره‌ها توسعه یافته‌اند. مثلاً در سال ۱۹۹۸ م ابزار اس. دی. تی. برای طراحی مفهومی فضاپیما ارائه شد. این ابزار با در نظر گرفتن ورودی‌هایی شبیه نوع مأموریت و مدار و اطلاعات از زیرسیستم‌ها، بودجه‌بندی‌های سیستمی و زیرسیستمی را ارائه می‌نماید. از جمله معایب این ابزار عدم ایجاد دید طراحی به طراح از جهت تأثیرگذاری پارامترهای طراحی بر یکدیگر می‌باشد. ام. یو. سَت نیز ابزار دیگری برای توسعهٔ طراحی سیستمی ماهواره است که در سال ۲۰۰۰ م براساس مدل‌های منتج‌شده از بانک دادهٔ ماهواره‌ها بنا شد. در این ابزار با توجه به داده‌هایی از ماهواره‌های موجود، مدل و ارتباط میان پارامترهای طراحی ایجاد می‌شود و بر این اساس در طراحی ماهوارهٔ جدید از این مدل استفاده می‌شود [۳]. اس. ایی. ام. ابزار دیگری است که برای توسعهٔ طراحی سیستمی ماهواره در سال ۲۰۰۹ م ارائه شد. در این روش از یک بانک داده برای تخمین روابط بین پارامترها و یک محیط گرافیکی استفاده می‌شود. این ابزار نسبت به ام. یو. سَت کامل‌تر است و طراحی در سطح زیرسیستمی را نیز در نظر می‌گیرد [۲]. ابزار اسکالس نیز در سال ۲۰۰۹ م برای طراحی مفهومی براساس مدل تخمین زده شده از بانک داده پی‌ریزی شد. این ابزار برای ماهواره‌های کلاس نانو و میکرو طراحی شده است [۱].

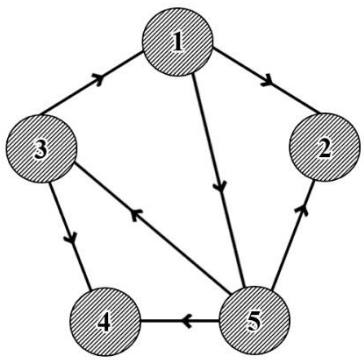
۳. شرح مسئله

وجود پارامترهای فراوان در طراحی سیستم پیچیده‌ای چون یک ماهواره، که طراحی آن متأثر از تقابل و تعامل پارامترهای گوناگون از جمله پارامترهای پرتابگر، نیاز مشتری، نوع مأموریت، نوع محموله، شرایط محیطی، پارامترهای زیرسیستم‌های مختلف و سایر پارامترهاست، چالشی بر سر راه طراحی است. این مسئله که فرایند طراحی از کدام پارامتر شروع شود و کدام پارامترها ابتدا تعیین شوند، همچنین اینکه تغییر یک پارامتر، چه تأثیری بر سایر پارامترها دارد

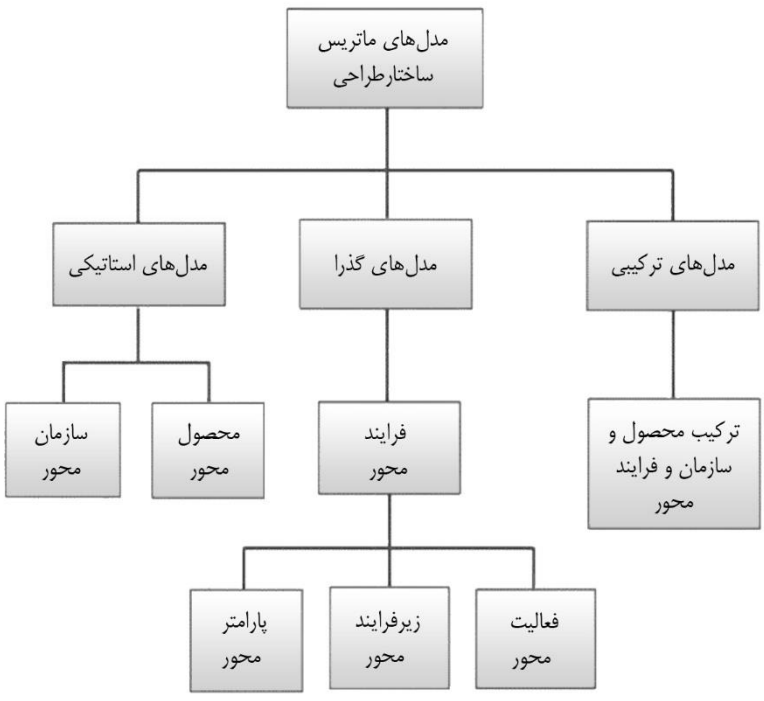
و طراحی سیستم را به چه صورت تحت تأثیر قرار می‌دهد، چالش دیگری برای طراحان است. پارامترهای وابسته به هم که در فرایند طراحی یک سیکل بسته و کوپل را ایجاد می‌کنند، چالش دیگری بر سر راه طراحی ماهواره است. ابزارهای ابداع‌شده برای تسهیل فرایند طراحی ماهواره، بر اساس بانک داده یا بر مبنای مدل و تخمین تهیه شده است. عیب اصلی این روش‌ها عدم ایجاد دیدگاه مناسب برای طراح، برای دانستن نحوهٔ ایجاد ارتباط بین پارامترهای طراحی است؛ به‌طوری‌که طراح سیستم با این روش‌ها نمی‌تواند تأثیر تغییر یک پارامتر را بر سایر پارامترها و نتیجهٔ طراحی دنبال کند و این مسئله همان عیب روش‌های گذشته است. لذا در این مقاله با استفاده از روشی ساختاری به نام ماتریس ساختار طراحی، ابزاری جدید در اختیار طراحان ماهواره برای رفع این مشکل قرار می‌گیرد. این روش برای ماهوارهٔ مکعبی انجام شده است.

۴. روش‌های نمایش ساختار سیستم

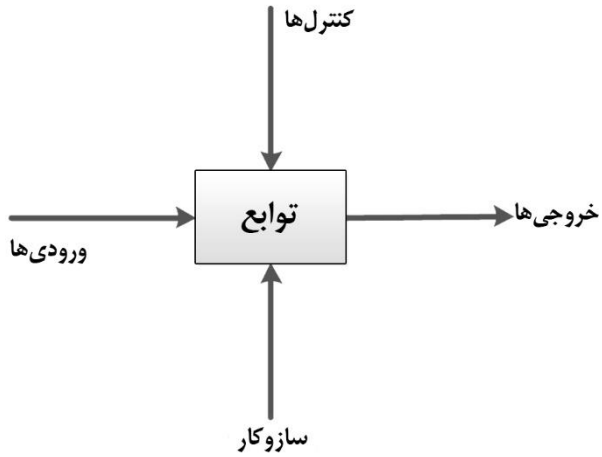
از جمله ساده‌ترین ابزارهای نمایش ارتباط پارامترهای یک سیستم گراف است که نظریهٔ آن توسط لئونهارت ائولر[۹] (لئونارد اویلر[۱۰])، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان شهیر سوئیسی، مطرح شد. از ویژگی‌های گراف‌ها توانایی نمایش روابط اجزای سیستم است، اما این مدل قادر نیست روابط سلسله‌مراتبی میان اجزای سیستم را نمایش دهد. در قسمت الف از شکل ۱ نمونه‌ای از یک سیستم با ساختار گراف شامل پنج عنصر و نحوهٔ وابستگی آنها نمایش داده شده است [۶].



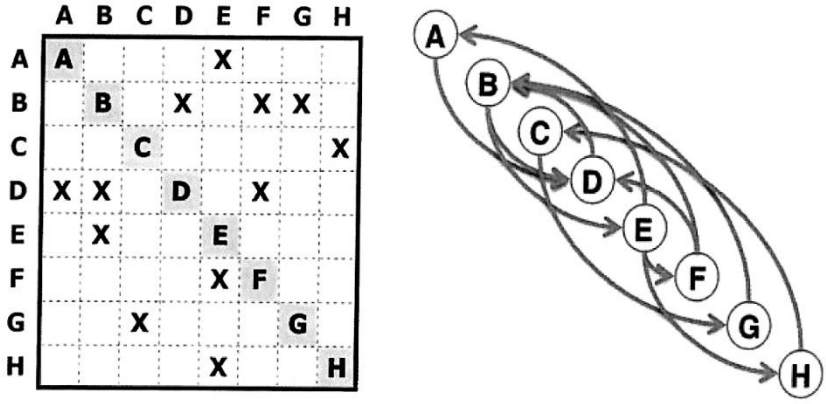
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱. روش‌های نمایش ساختار سیستم

از جمله روش‌های نمایش رفتار پایای سیستم‌ها، استفاده از مدلسازی آی. دی. ایی. اف. است. دو عنصر که در هر صفحهٔ آی. دی. ایی. اف. وجود دارد عبارت‌اند از تابع و جریان مواد، انرژی و اطلاعات. تابع، یک ورودی را دریافت و خروجی را به بیرون منتقل می‌کند. کنترل‌هایی که فرایند انتقال تابع را انجام می‌دهند، از بالا وارد تابع شده و سازوکارهای یک تابع، که منابع فیزیکی اجراکنندهٔ تابع هستند، از پایین وارد می‌شوند و در نهایت خروجی‌ها از سمت راست خارج می‌شوند. این مدل تمامی ویژگی‌های درخت‌ها و گراف‌ها را دارد، همچنین قدرت مدلسازی و تحلیلی بیشتری نسبت به این مدل‌ها دارد؛ با این‌وجود، چون این مدل ذاتاً یک ابزار نمایشی است تا یک مدل ریاضی، نتایج تحلیلی یک مدل ریاضی را ندارد. پیچیدگی بیش از حد آن در سیستم‌های بزرگ نیز از جمله معایب آن است [۷]. در قسمت ج از شکل ۱ یک نمونه از مدل آی. دی. ایی. اف. نمایش داده شده است. در روش ماتریس طراحی اصولی، نظریهٔ طراحی شامل حرکت از آنچه می‌خواهد به‌دست آید و چطور می‌توان به آن رسید، می‌باشد. بر اساس این نظریه، طراحی از چهار دامنهٔ مشتری، عملکردی، فیزیکی و فرایندی تشکیل شده است [۸]. طراحی در این مدل، نگاشت رسیدن از یک دامنه به دامنهٔ دیگر با روابط ریاضی است [۹]. ماتریس ساختار طراحی ابزاری برای مدلسازی یک سیستم و نمایش وابستگی‌های عناصر سیستم است. این روش علاوه بر مدلسازی، جهت نمایش و تحلیل یک سیستم پیچیده و روابط اجزای درونی آنها به شکلی ساده و مختصر به‌کار می‌رود. ماتریس ساختار طراحی از منظر ریاضی ماتریسی است نمایش‌دهندهٔ یک گراف جهت‌دار و از این جهت روشی مناسب برای تحلیل کمی و کیفی سیستم‌هاست [۱۰]. این روش در سال ۱۹۸۱ م توسط دان استوارد[11] در دانشگاه کلیفورنیا[12] پایه‌ریزی شد [۱۱]. در سال ۱۹۸۹ م گروهی از استادان و دانشجویان مؤسسهٔ فناوری مساچوستس[13] دربارهٔ این روش، پژوهش‌هایی انجام دادند و نهایتاً

روشی مدون و سیستمی ارائه کردند [۱۱]. این روش توسط شرکت‌هایی چون ناسا[۱۴] [۱۲]، جنرال موتورز[۱۵]، بوئینگ[۱۶] و اینتل[۱۷] استفاده شده و همچنین در طراحی سیستم کنترل اتومبیل شرکت فورد[۱۸] [۱۳]، طراحی موتور جت هواپیما شرکت پرات اند ویتنی[۱۹]، طراحی سیستم پرینتر دیجیتال شرکت زیراکس[۲۰]، طراحی دوربین شرکت کدک[۲۱] نیز استفاده شده است. امروزه نیز از این روش در حوزهٔ طراحی مهندسی و سیستمی استفاده می‌شود. به‌طور خلاصه برای نمایش تعاملات، وابستگی‌ها و روابط اجزای یک سیستم و حلقه‌های طراحی از این روش استفاده می‌شود [۶، ۱۱].

ماتریس ساختار طراحی، برای مدلسازی یک سیستم به چهار ساختار اصلی تقسیم می‌شوند: ساختار اول بر مبنای مدل‌کردن فعالیت‌های گروهی[۲۲] است. ساختار دوم بر مبنای مدل‌کردن اجزای و قطعات فیزیکی پایه‌ریزی شده، ساختار سوم بر مبنای مدل فعالیت‌های سازمانی بوده و ساختار چهارم بر مبنای مدل پارامترها[۲۳] بنا می‌شود. در این مقاله از مدل پارامترمحور استفاده شده است. در قسمت د از شکل ۱ نمونه‌ای از یک ماتریس ساختار طراحی برای نمایش یک سیستم نمایش داده شده است. این سیستم از هشت پارامتر طراحی تشکیل شده است. ارتباط کیفی پارامترها نیز در این ماتریس مشخص شده است [۱۰، ۱۴].

از میان سایر ابزارهای نمایش پارامترهای سیستم، روش ماتریس ساختار طراحی به‌دلیل مزایایی چون فشردگی و اختصار در نمایش پارامترهای فراوان [۱۱]، قابلیت تجزیه و تحلیل [۱۰]، سادگی و قابلیت درک [۸] و قابلیت بهینه‌سازی و به‌سازی سیکل‌های طراحی [۱۵]، برای توسعهٔ طراحی سیستمی ماهوارهٔ مکعبی انتخاب شده است.

۵. ماهواره‌های مکعبی

ایده اولیهٔ ماهواره‌های مکعبی یا ماهواره‌های دانشجویی در سال ۱۹۹۹ م توسط دو تن از استادان دانشگاه‌های کلیفورنیا و استنفورد ارائه شده است. این ایده ابتدا به‌منظور آشنایی دانشجویان و همچنین آموزش مهندسان صنعت هوافضا ارائه شد. اما در ادامه با توجه به کوچک‌سازی قطعات مکانیکی و الکترونیکی و همچنین سهولت ساخت و هزینهٔ کم پرتاب، برای کاربردهای عملیاتی‌تر مورد توجه قرار گرفت [۱۶]. مأموریت‌های این نوع از ماهواره‌ها معمولاً سنجش پارامترهای جوی، تصویربرداری از سطح زمین، آزمایش برخی پدیده‌های فیزیکی و کارهای تحقیقاتی است. این کلاس از ماهواره‌ها شبیه هر سیستم دیگری استاندارد و الزامات خاصی دارد که در ادامه چند مورد بیان شده است [۱۷].

ماهواره‌های مکعبی از نظر ابعاد جزء دستهٔ پیکو ماهواره‌ها محسوب می‌شوند. ابعاد آنها نیز مکعبی به اضلاع ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب است [۱۸]. جرم استاندارد این ماهواره‌ها ۱/۳۳ کیلوگرم می‌باشد و از نظر مداری، در مدار کم‌ارتفاع قرار می‌گیرند. طول عمر مداری این ماهواره‌ها نیز از یک ماه تا یک سال است [۱۷].

اولین سری از ماهواره‌های مکعبی در سال ۲۰۰۳ م از روسیه به فضا پرتاب شدند [۱۹]. در سال ۲۰۱۲ اما، حدود ۷۵ ماهوارهٔ مکعبی در مدار زمین قرار گرفتند. ویژگی‌هایی چون قیمت کم، سادگی، سرعت و سهولت ساخت سبب افزایش استفاده از این نوع ماهواره‌ها شده است. به‌عنوان نمونه امروزه فعالیت بین‌المللی کیو. بی. ۵۰[۲۴] به‌منظور انجام تحقیقات در مورد لایهٔ ترموسفر جو زمین با استفاده از این نوع ماهواره‌ها آغاز شده است. در این فعالیت بین‌المللی از ایدهٔ منظومه ماهواره‌ای به‌منظور شبکه‌کردن ماهواره‌های مکعبی استفاده می‌شود [۲۰].

۵-۱. طراحی سیستمی ماهواره

طراحی یک سیستم فضایی، فرایندی از بالا به پایین است که با طراحی مفهومی سیستم آغاز می‌شود؛ با طراحی زیرسیستم‌ها و اجزای آنها ادامه می‌یابد و با طراحی اجزای کوچک و قطعات جزء خاتمه می‌یابد. این فرایند پله به پله در فازهای مختلف مأموریت انجام می‌شود و فصل مشترک بین اجزاء در هر سطح از این فرایند مورد توجه قرار می‌گیرد. ساخت سیستم از طرف دیگر، از پایین به بالا صورت می‌گیرد و ابتدا در سطح قطعات و اجزای کوچک زیرسیستم‌ها انجام می‌شود. پس از اتمام ساخت قطعات و بررسی و ارزیابی آنها، ساخت وارد سطح زیرسیستم‌ها و پس از آن کل سیستم می‌شود. این فرایند مطابق منحنی مشهور وی.[۲۵] انجام می‌شود [۲۱].

در مرحلهٔ طراحی مفهومی ماهوارهٔ مکعبی، پارامترهای سیستمی و زیرسیستمی زیادی با هم تعامل دارند و بر یکدیگر اثر می‌گذارند، لذا شناسایی پارامترهای اثرگذار بر فرایند طراحی مفهومی و شناسایی تأثیر پارامترها بر هم، وقتی تعداد پارامترها زیاد است، از چالش‌های پیش‌روی مهندسان طراح می‌باشد که در این قسمت با استفاده از روش ماتریس ساختار طراحی پس از شناسایی

پارامترها و شناسایی ارتباط بین پارامترها، به حل این چالش و ارائهٔ فرایند بهینهٔ طراحی سیستمی پرداخته می‌شود. لذا جهت نیل به این دو گام‌های زیر انجام شده است [۱۰، ۱۱]:

۱. شناسایی پارامترهای سیستمی متناسب با مأموریت ماهواره
۲. تجزیهٔ سیستم به بخش‌های جزئی‌تر
۳. شناسایی عوامل مختلف و تأثیرگذار بر طراحی هر بخش
۴. مشخص‌نمودن نوع وابستگی عوامل وابسته نسبت به هم
۵. تشکیل ماتریس ساختار طراحی، جایگذاری عوامل و مشخص‌کردن وابستگی‌ها
۶. به‌دست‌آوردن حلقه‌ها و فرایندهای طراحی
۷. به‌سازی و دسته‌بندی عناصر ماتریس به‌منظور دست‌یافتن به روند بهینهٔ طراحی

۵-۲. تشکیل ماتریس ساختار طراحی برای ماهوارهٔ مکعبی

ابتدا پارامترهای سطح سیستم ماهواره شناسایی شده است. در این طراحی فرض شده است مأموریت ماهواره تصویربرداری است. برخی از پارامترهای شناسایی‌شده در سطح سیستم مطابق زیر هستند.

۱. نیاز مشتری
۲. طول عمر
۳. ارتفاع مداری
۴. زاویهٔ میل مداری
۵. وضوح تصویر
۶. ابعاد تصویر
۷. ارتفاع تحویلی پرتابگر
۸. دقت تحویلی پرتابگر
۹. زمان قرارگرفتن در مدار
۱۰. محل ایستگاه زمینی
۱۱. جرم ماهواره
۱۲. ابعاد ماهواره
۱۳. ممان اینرسی‌های ماهواره
۱۴. توان الکتریکی ماهواره
۱۵. قابلیت اطمینان ماهواره
۱۶. زمان روشنایی و سایه
۱۷. پیکربندی و شکل ماهواره

در گام بعد، ماهواره به زیرسیستم‌ها و بخش‌های کوچک‌تری تجزیه می‌شود. این زیرسیستم‌ها و بخش‌ها عبارت‌اند از زیرسیستم‌های کامپیوتر و مدیریت داده، سازه و سازوکار، مخابرات، توان الکتریکی، محموله، تعیین و کنترل وضعیت و کنترل حرارت. مرحلهٔ سوم شناسایی عوامل اثرگذار بر هر بخش است که این مرحله برای همهٔ زیرسیستم‌ها انجام شده است، اما برای جلوگیری از گستردگی مطالب و محدودیت فضا در این مقاله، فقط پارامترهای طراحی زیرسیستم توان الکتریکی به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. اجزای اصلی زیرسیستم توان الکتریکی عبارت‌اند از:

۱. صفحات خورشیدی
۲. باتری‌ها
۳. تنظیم‌کننده‌ها و توزیع‌کننده‌های توان

اجزای مذکور بالا، بخش‌های کلی زیرسیستم توان است که برای شناسایی پارامترهای طراحی در گام چهارم باید پارامترهای مؤثر در طراحی این اجزاء مشخص شده و سپس وابستگی این پارامترها نسبت به هم و همچنین نسبت به سایر پارامترهای سایر قسمت‌ها مثل پارامترهای سیستم و زیرسیستم‌های دیگر مشخص شود. عوامل تأثیرگذار بر آرایه‌های خورشیدی در قالب سه دستهٔ زیر تقسیم‌بندی شده است.

۱. پارامترهای فیزیکی
۲. پارامترهای عملکردی
۳. پارامترهای محیطی

هرکدام از این دسته پارامترها خود به پارامترهای ریزتری وابسته‌اند که برای آرایه‌های خورشیدی، باتری‌ها و تنظیم‌کننده‌ها و توزیع‌کننده‌های توان پارامترهای زیر شناسایی شده است:

۱. آرایه‌های خورشیدی
۲. پارامترهای فیزیکی شامل جرم، جنس، ابعاد و ممان اینرسی
۳. پارامترهای عملکردی شامل سطح ولتاژ و سطح توان
۴. پارامترهای محیطی شامل دمای کاری و مقدار تشعشعات مغناطیسی
۵. باتری‌ها
۶. پارامترهای فیزیکی شامل فناوری باتری، جرم، ابعاد و ممان اینرسی

۷. پارامترهای عملکردی شامل نرخ حرارت تولیدی، رسانایی گرمایی، مصرف توان، فناوری ساخت باتری، توان و ولتاژ تخلیه، عمق تخلیه[۲۶]، ظرفیت و عمر
۸. پارامترهای محیطی شامل دمای کاری
۹. تنظیم‌کننده‌ها و توزیع‌کننده‌های توان
۱۰. پارامترهای فیزیکی شامل جرم، ممان اینرسی و پیکربندی
۱۱. پارامترهای عملکردی شامل گرمای تولیدی، جرم سیم-بندی، سطح ولتاژ تنظیمی و نوع کنترل

هر کدام از عوامل فوق بر طراحی زیرسیستم توان و به‌دنبال آن بر طراحی کل سیستم تأثیر دارند. در مرحلهٔ بعد، برای تشکیل ماتریس ساختار طراحی ابتدا یک ماتریس مربعی به تعداد عوامل تشکیل داده، سپس عوامل را در اولین سطر عمودی و افقی قرار داده و وابستگی‌های ساختاری این عوامل نسبت به‌هم مشخص می‌شوند. تشخیص وابستگی و ارتباط بین پارامترهای شناسایی‌شده جهت رسیدن به طراحی بهینه، بسیار حائز اهمیت است. لذا برای به‌دست آوردن ارتباط بین این پارامترها باید فرایند طراحی مرور شود. همناگونه که قبلاً هم ذکر شد، برای جلوگیری از افزایش بیش از حد مقاله، تنها فرایند مربوط به زیرسیستم توان الکتریکی ذکر می‌شود. فرایند طراحی زیرسیستم توان الکتریکی از مراجع معتبر ۱۸ و ۲۱ استخراج شده و به‌صورت شکل ۲ به‌دست آمده است. از فرایند طراحی شکل ۲ ارتباطات بین پارامترهای طراحی زیرسیستم توان الکتریکی به‌صورت جدول ۱ استخراج شده است. حال با قراردادن وابستگی‌های این پارامترها در ماتریس شکل ۳، ماتریس ساختار طراحی برای زیرسیستم توان الکتریکی کامل می‌شود. این عملیات برای همهٔ زیرسیستم‌ها انجام شده است تا نهایتاً ماتریس ساختار طراحی شکل ۴ به‌دست آید [۲۱].

ملاحظه می‌شود برای یک جزء از زیرسیستم توان الکتریکی، ارتباطات و پارامترهای وابستهٔ زیادی وجود دارد که بر یکدیگر تأثیرگذارند. در این مرحله به‌وضوح مزیت استفاده روش ماتریس ساختار طراحی مشاهده می‌شود [۱۹].

۶. بررسی و تحلیل نتایج

قسمت‌هایی از ماتریس ساختار طراحی پی‌ریزی شده برای ماهوارهٔ مکعبی در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل ستون‌های عمودی و افقی پارامترهای طراحی هستند. هر پارامتر در محور عمودی ممکن است به چند پارامتر در محور افقی وابسته باشد که این وابستگی در قالب ماتریس مشخص شده است. در شکل ۴، نمای کلی‌تری از ماتریس ساختار طراحی پی‌ریزی شده ارائه شده که شامل ۱۳۵ پارامتر طراحی است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برخی از پارامترها به‌صورت دو به دو به یکدیگر وابسته یا اصطلاحاً کوپل هستند؛ یعنی در فرایند طراحی، یک حلقهٔ طراحی ایجاد کرده‌اند. همچنین از منظر فرایند طراحی، برخی از پارامترها متوقف بر پارامترهای بعد از خود هستند که این مسئله از نظر طراحی چالش‌برانگیز است. لذا دو مسئله و چالش وجود دارد: مسئلهٔ اول کوپل‌های به‌وجود آمده در فرایند طراحی و مسئلهٔ دوم وابستگی برخی از پارمترها به پارامتر قبل از خود (که هنوز تعیین نشده است) در فرایند طراحی.

در این مقاله برای رفع دو مشکل مذکور، دسته‌بندی (خوشه‌بندی) ماتریس پی‌ریزی شده انجام شده که در شکل ۵ مشاهده می‌شود. این مرحله به‌منظور جداکردن مجموعه پارامترهای وابسته به‌هم و به‌سازی (بهینه‌سازی) فرایند طراحی ماهوارهٔ مکعبی انجام می‌گردد. معمولاً این دسته‌بندی‌ها توسط نرم‌افزارهای مربوطه به دسته‌بندی، شبیه نرم‌افزار دی. اس. ام. ماتریکس[۲۷] و کوانتوم ایکس. ال.[۲۸] انجام می‌گردد. در این مقاله، از نرم‌افزار کوانتوم ایکس. ال. جهت دسته‌بندی و به‌سازی استفاده شده است. با انجام عملیات دسته‌بندی، ماتریس ۱۳۵ پارامتری طراحی عملاً تبدیل به ۳۰ دسته پارامتر می‌شود؛ به‌طوری‌که به‌لحاظ طراحی این ۳۰ دسته پارامتر از هم متمایز بوده و می‌توانند هر کدام به‌صورت جدا طراحی شوند و یک سیکل طراحی جدا را تشکیل داده‌اند.

همچنان‌که در شکل ۵ بخشی از ماتریس ساختار طراحی به‌سازی‌شده نمایش داده شده است، این ماتریس تقریباً بالامثلثی شده، اگرچه در برخی از قسمت‌ها این اتفاق نیفتاده و بین پارامترها کوپل وجود دارد. در شکل ۶ قسمتی از ماتریس ساختار طراحی نهایی و به‌سازی‌شده ارائه شده است. در این شکل مشخص است که در برخی سطوح ماتریس بالامثلثی نبوده و کوپل و وابستگی دوطرفه در فرایند طراحی وجود دارد. بنابراین با این دسته‌بندی و فرایند به‌سازی‌شده، طراح سیستم می‌تواند با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در سطح سیستم، برنامه‌ریزی مناسب جهت بهینه‌کردن منابع انسانی و زمان انجام پروژه داشته باشد [۲۲].

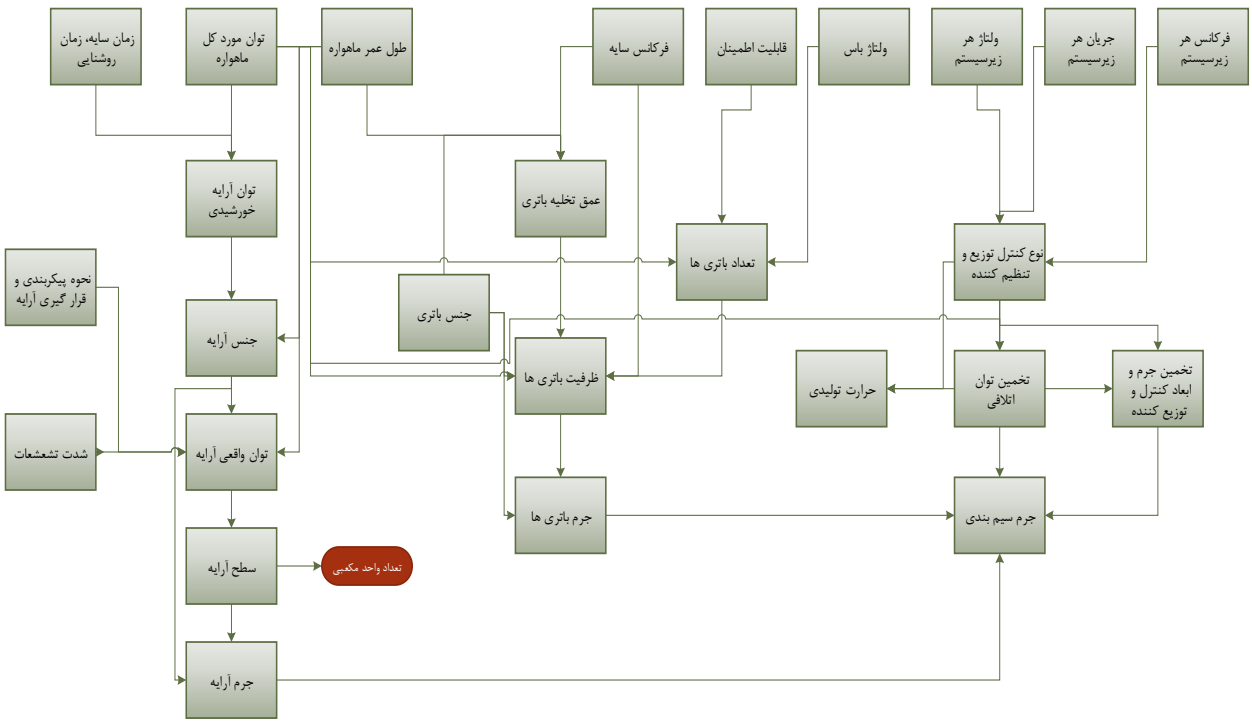
جدول ۱. پارامترهای اثرگذار بر پارامترهای طراحی زیرسیستم توان الکتریکی

بخش	پارامتر	پارامترهای اثرگذار
آرایهٔ خورشیدی	جرم	سطح آرایه، جنس آرایه
	سطح آرایه	توان واقعی آرایه
	توان واقعی آرایه	شدت تشعشعات، توان کل، جنس آرایه، نحوهٔ پیکربندی، طول عمر
	جنس آرایه	توان کل، طول عمر، توان آرایه
	توان آرایه	توان کل، زمان سایه و روشنایی
	ممان اینرسی آرایه	جرم، سطح آرایه
باتری	جرم	ظرفیت، جنس
	ظرفیت	تعداد باتری، فرکانس سایه، عمق تخلیه، طول عمر ماهواره، توان کل ماهواره
	عمق تخلیه	فرکانس سایه، طول عمر ماهواره، جنس باتری
	تعداد باتری	قابلیت اطمینان، ولتاژ باس، طول عمر، توان کل
	ممان اینرسی	جرم باتری، ابعاد باتری
	نرخ حرارت تولیدی	جنس، ظرفیت
	جنس باتری	طول عمر، فرکانس سایه
تنظیم کننده و توزیع کنندهٔ توان	جرم، ابعاد	تخمین نوع کنترل، تخمین توان اتلافی
	توان اتلافی	نوع کنترل، توان کل
	نوع کنترل	فرکانس، جریان، ولتاژ هر زیرسیستم
	ممان اینرسی	جرم، ابعاد
	جرم سیم بندی	جرم زیرسیستم توان
	گرمای تولیدی	توان اتلافی، نوع کنترل

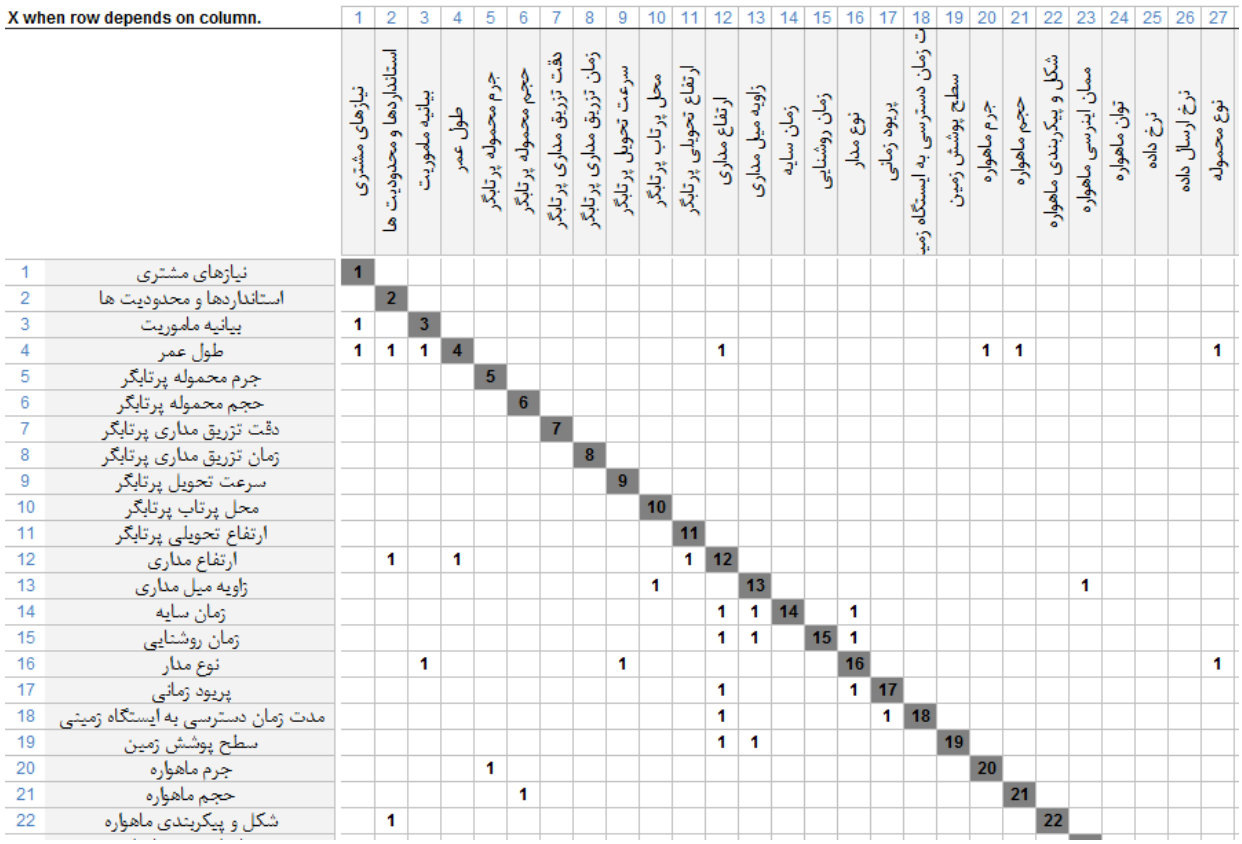
۷. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله مسئلهٔ توسعهٔ فرایند طراحی سیستمی یک ماهوارهٔ مکعبی و پارامترهای طراحی آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این راستا جهت شناسایی پارامترهای طراحی و به‌سازی فرایند طراحی، از روش ماتریس ساختار طراحی که ابزاری توانمند جهت شناسایی و طبقه‌بندی فرایندهایی نظیر طراحی مفهومی است استفاده شد و نشان داده شد که چگونه می‌توان به یک نظم و چارچوب و هم‌زبانی بین اجزاء و پارامترها در فرایند طراحی سیستمی رسید. در این روش پس از شناسایی پارامترهای سطح سیستم، با تجزیهٔ سیستم ماهوارهٔ مکعبی به زیرسیستم‌ها و عناصر جزئی‌تر، تعداد ۱۳۵ پارامتر اثرگذار در طراحی شناسایی شده و نوع وابستگی و ارتباط این پارامترها نسبت به‌هم، با توجه به فرایند متداول طراحی شناسایی شد و ماتریس ساختار طراحی ماهوارهٔ مکعبی ارائه گردید.

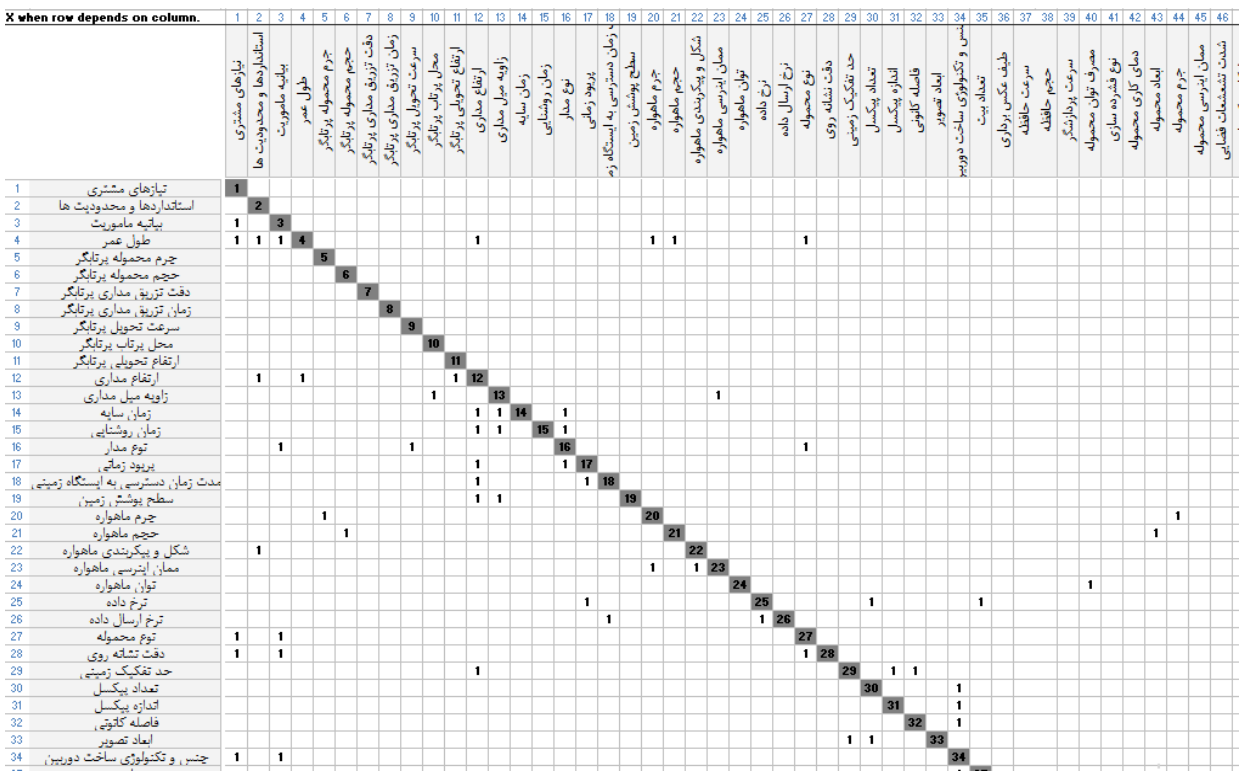
به‌منظور ارائهٔ فرایند بهینهٔ طراحی، پس از تشکیل ماتریس، عمل دسته‌بندی و خوشه‌بندی به‌منظور به‌سازی و بهینه‌سازی فرایند طراحی انجام و نهایتاً ۱۳۵ پارامتر طراحی به ۳۰ سطح و سیکل طراحی تقسیم شد. طراح سیستم با در نظر داشتن این ماتریس می‌تواند اثر هر پارامتر طراحی را بر سایر پارامترها در نظر بگیرد و فرایند طراحی بهینه را مطابق این ماتریس به‌سازی‌شده دنبال کند. بنابراین با استفاده از این روش، فرایند طراحی سیستمی ماهواره توسعه یافته و طراح با این ابزار و ماتریس می‌تواند تسلط و درک کامل‌تری بر پارامترها و فرایند طراحی داشته باشد. با توجه به نتایج حاصل از اعمال این روش برای طراحی یک ماهوارهٔ مکعبی مشخص شد که به‌کارگیری این روش سبب سادگی طراحی، شناخت نحوهٔ تأثیر پارامترها بر هم، جلوگیری از پیچیدگی طراحی، افزایش سرعت روند طراحی و قابلیت تجزیه و تحلیل و قابلیت به‌سازی سیکل‌های طراحی می‌شود. کمی‌سازی ارتباط بین پارامترها با هدف شناسایی درجهٔ وابستگی‌های بین پارامترها، قابلیت اولویت‌بندی و بهبود الگوریتم بهینه‌سازی فرایند طراحی، از جمله مزایای مهم این روش است که می‌تواند در تحقیقات آتی پژوهشگران مورد بررسی قرار گیرد.



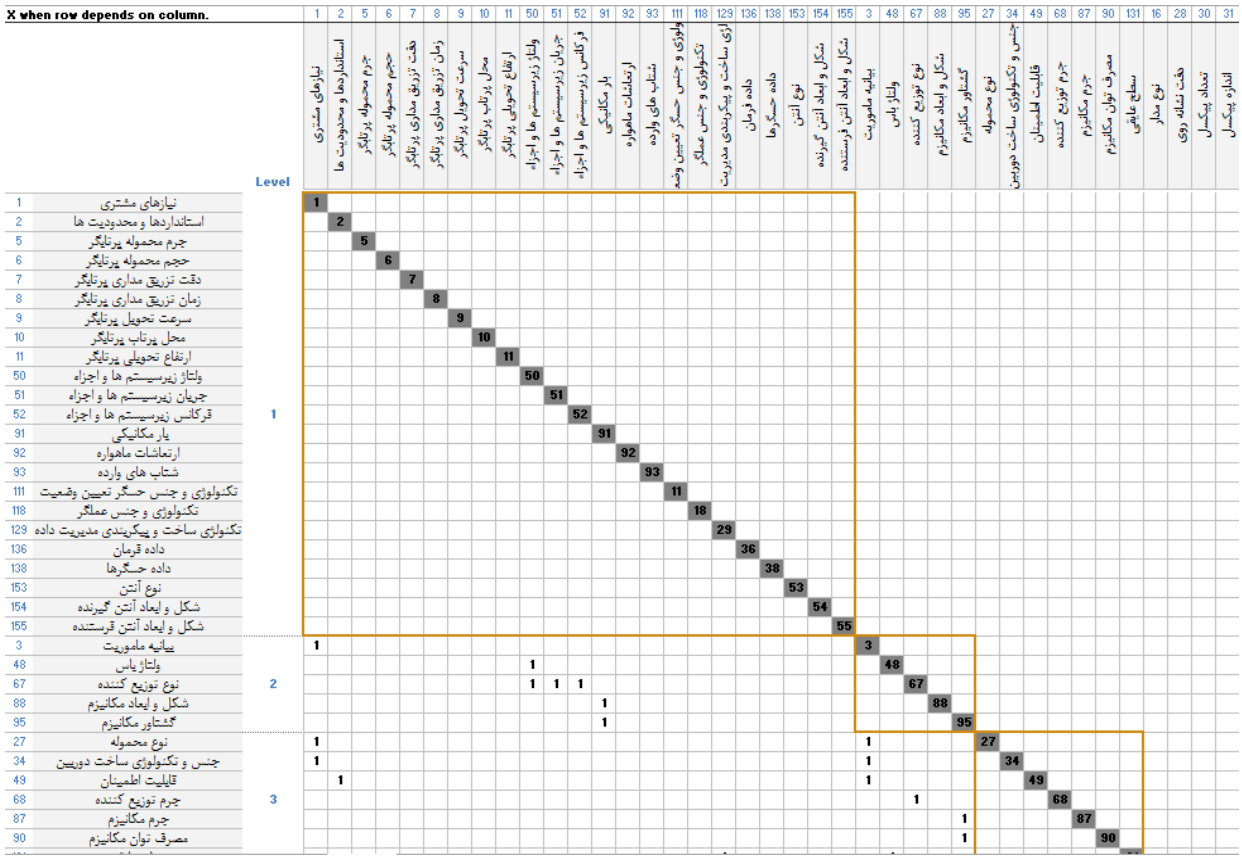
شکل ۲. فرایند طراحی زیرسیستم توان الکتریکی ماهوارهٔ مکعبی



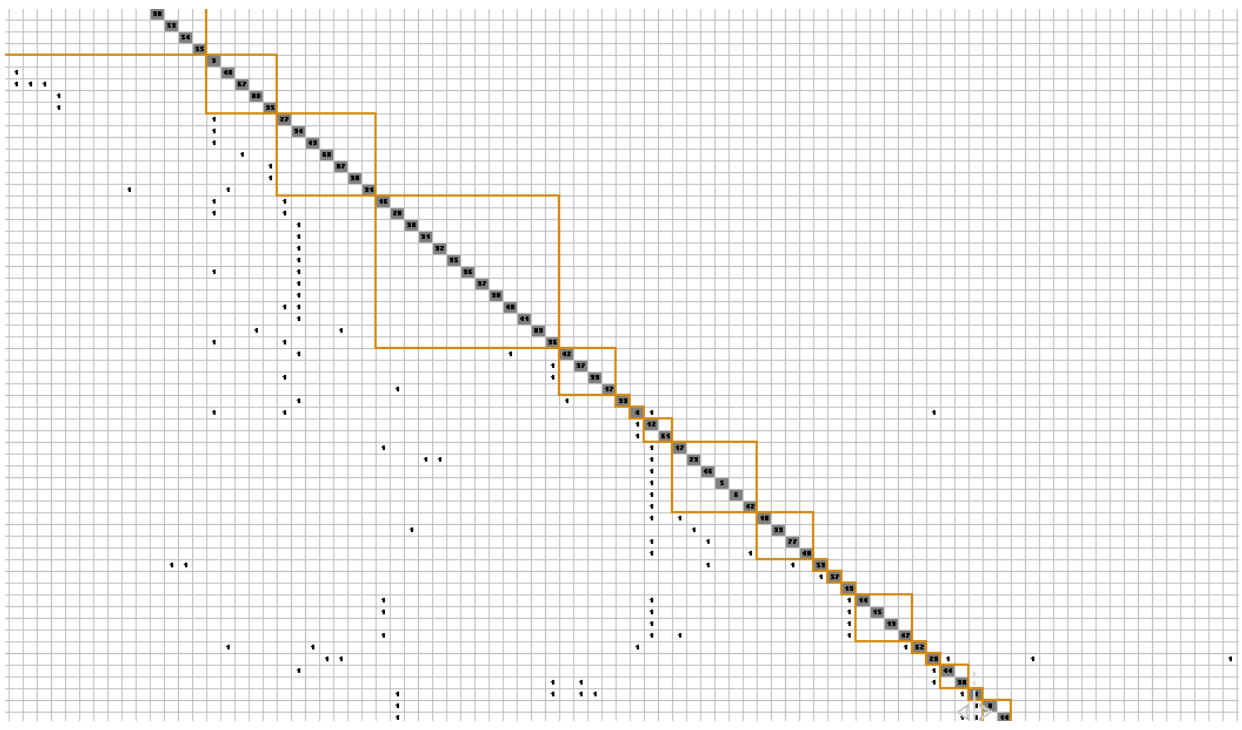
شکل ۳. قسمتی از ماتریس ساختار طراحی تشکیل‌شدهٔ اولیه برای ماهوارهٔ مکعبی



شکل ۴. ماتریس ساختار طراحی تشکیل‌شده اولیه برای ماهوارهٔ مکعبی



شکل ۵. قسمتی از دسته‌بندی و به‌سازی ماتریس ساختار طراحی ماهوارهٔ مکعبی



شکل ۶. دسته‌بندی و به‌سازی ماتریس ساختار طراحی ماهوارهٔ مکعبی

۸. مآخذ

[1] Aas, C., et al. "SCALES; A System Level Tool for Conceptual Design of Nano-and Microsatellites", *Proceedings of the 7th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation*, Berlin, Germany, 2009.

[2] Ridolfi, G., E. Mooij, S. Corpino, "A system engineering tool for the design of satellite subsystems", *Proceedings of the AIAA MST Conference*, 2009.

[3] Wilke, M., O. Quirmbach, M. Schiffner, E. Igenbergs, "MuSSat; A Tool for Satellite Design in Concept Design Centers", In Systems engineering-a key to competitive advantage for all industries: proceedings of the 2nd European Systems Engineering Conference.

[4] Sage, A. P., W. B. Rouse, *Handbook of systems engineering and management*, John Wiley & Sons, 2009.

[۵] بهلوری، وحید. "طراحی سیستمی یک ماهوارۀ مکعبی با استفاده از روش ماتریس ساختار طراحی"، پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.

[6] Arney, D. C., A. W. Wilhite. "Modeling Space System Architectures with Graph Theory." *Journal of Spacecraft and Rockets*, 51(5), 2014, pp. 1413-1429.

[7] Dorador, J. M., R. I. Young. "Application of IDEF0, IDEF3 and UML methodologies in the creation of information models." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *13*(5), 2000, pp. 430-445.

[8] Browning, T. R. "Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions." *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 48(3), 2001, pp. 292-306.

[9] Whitcomb, C. A., J. J. Szatkowski. "Concept level naval surface combatant design in the axiomatic approach to design framework", *In Proceedings of ICAD*.

[10] Yassine, A. "An introduction to modeling and analyzing complex product development processes using the design structure matrix (DSM) method." *Urbana*, 2004.

[11] Eppinger, S. D., T. R. Browning. *Design structure matrix methods and applications*, MIT press, 2012.

[12] Spear, A. T. J. "Mars Pathfinder's lessons learned from the Mars Pathfinder Project Manager's perspective and the future road." *Acta astronautica*, 1999.

[13] Krishnan, V., S. D. Eppinger, D. E. Whitney. "A model-based framework to overlap product development activities." *Management science* 43(4), 1997, pp. 437-451.

[14] Danilovic, M., T. R. Browning. "Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices." *International Journal of Project Management* 25(3), 2007, pp. 300-314.

[15] Kusiak, A. "Interface structure matrix for analysis of products and processes", 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Sydney, 2008.

[16] Puig-Suari, J., C. Turner, W. Ahlgren. "Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class PicoSatellite." *Aerospace Conference, IEEE Proceedings*, 2001.

[17] The CubeSat Program, California Polytechnic State University. *Cubesat design specification* rev. 12. Munakata, R., 2009.

[18] Ley, W., K. Wittmann, W. Hallmann. *Handbook of space technology*, John Wiley & Sons, 2009.

[19] Toorian, A., K. Diaz, S. Lee. "The cubesat approach to space access", *Aerospace Conference, IEEE*, 2008, pp. 1-14.

[20] Gill, E., P. Sundaramoorthy, J. Bouwmeester, B. Sanders. "Formation Flying to Enhance the QB50 Space Network." *Proceedings of the 4 Symposium, Funchal, Portugal*, 2010.

[21] Larson, W. J., J. R. Wertz, *Space mission analysis and design*, Microcosm, Inc., Torrance, CA (US), 1992.

[22] Uma Maheswari, J., K. Varghese, T. Sridharan. "Application of dependency structure matrix for activity sequencing in concurrent engineering projects." *Journal of construction engineering and management*, *132*(5), 2006, pp. 482-490.

پی‌نوشت

1. system design tool (SDT)
2. MuSSat
3. system level tool for conceptual design (SCALES)
4. system engineering module (SEM)
5. IDEF
6. axiomatic design
7 design structure matrix method
8. clustering
9. Leonhard Euler (1707 – 1783)
۱۰. گاهی در برخی از آثار فارسی دیده می‌شود که نام این دانشمند سوئیسی به اشتباه لئونارد اویلر تلفظ شده است. حال آنکه ثبت و ضبط نام این دانشمند به‌صورت لئونهارت ائولر صحیح می‌باشد [ویراستار].
11. Professor Don Steward
12. California State University (Cal State or CSU), http://www.calstate.edu (accessed October 01, 2015)
13. Massachusetts Institute of Technology (MIT), http://web.mit.edu (accessed October 02, 2015)
14. National Aeronautics and Space Administration, http://www.nasa.gov (accessed October 02, 2015)
15. General Motors Company, http://www.gm.com (accessed October 05, 2015)
16. Boeing Company, http://www.boeing.com (accessed October 03, 2015)
17. Intel Corporation, http://www.intel.com (accessed October 01, 2015)
18. Ford Motor Company (commonly referred to as simply Ford), http://www.ford.com (accessed October 02, 2015)
19. Pratt & Whitney, http://www.pw.utc.com (accessed October 03, 2015)
20. Xerox Corporation, http://www.xerox.com (accessed October 01, 2015)
21. Eastman Kodak Company, http://www.kodak.com (accessed 01, 2015)
22. team base
23. parameter base
24. QB50
25. V curve
26. depth of discharged
27. DSM matrix
28. Quantum XL