طراحی و آنالیز چیدمان تراسترهای گیمبالی برای کنترل وضعیت سه محوره یک ماهواره

فرهاد فانی صابری [۱] ، مهدی زندیه [۲]

۱استادیار پژوهشکده علوم و فناوری فضا ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، f.sabery@aut.ac.ir

۲کارشناسی ارشد برق- کنترل ، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات بروجرد

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۱۵

چکیده

تراسترهای عکس‌العملی به منظور کنترل وضعیت فضاپیماها بسیار مورد توجه قرار می‌گیرند، زیرا علیرغم پیچیدگی تحلیل، تقریباً می‌توانند هر سطح گشتاوری را تأمین کنند. در این راستا کنترل مناسب یک فضاپیما با استفاده از تراسترها به چیدمان صحیح و کارآمد آن‌ها روی بدنه ماهواره بستگی دارد و بهینه سازی مصرف سوخت و افزایش قابلیت اطمینان دو موضوع مهم در طراحی چیدمان تراسترها می‌باشد. برای تولید گشتاورهای مختلف حول سه محور ماهواره و بالا بردن قابلیت اطمینان به تعداد زیادی تراستر ثابت نیاز است که از نظر مصرف سوخت و محدودیت جرم و توان به صرفه نمی‌باشد. در این مقاله به منظور حل این مشکل ، استفاده از تراسترهای گیمبالی پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از تراسترهای گیمبالی بوسیله عنصر متحرک دو محوره می‌توان با دو، سه و چهار تراستر کل فضای کاری گشتاور حول سه محور را پوشش داد و کنترل وضعیت سه محوره یک فضاپیما را انجام داد. در این مقاله پس از معرفی تراسترهای گیمبالی و بررسی ساختار آنها، مزایای آنها نسبت به تراسترهای ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس چیدمانهای مختلف تراسترهای گیمبالی طراحی و پوشش فضای کاری آنها مورد بررسی و آنالیز قرار خواهد گرفت. در نهایت چیدمان مناسب از نظر پوشش فضای کاری ، جهت کنترل وضعیت سه محوره یک ماهواره انتخاب شده است.

کلیدواژه:

تراستر عکس العملی گیمبالی ، طراحی چیدمان، کنترل وضعیت سه محوره، ماهواره، فضای کاری

مقدمه

کنترل وضعیت ماهواره به کمک عملگرهای مختلفی انجام می‌گیرد. از جمله این عملگرها چرخهای عکس‌العملی، ژایرو ممانهای کنترلی، تراسترهای عکس‌العملی و گشتاوردهنده‌های مغناطیسی می‌باشند. تراسترهای عکس‌العملی بدلیل قابلیت تولید گشتاورهای بزرگ مورد نیاز در کنترل وضعیت ماهواره‌ها در حضور تغییرات مداری به میزان قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

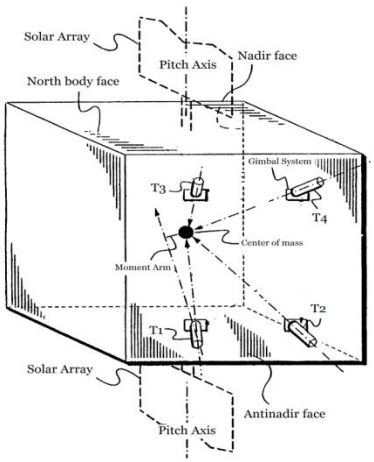
سطح گشتاوری که یک تراستر حول یک محور ماهواره می‌تواند اعمال کند، به سطح تراست تراستر و طول بازوی گشتاور حول آن محور وابسته است. این بدان معناست که استفاده صحیح از تراسترها اساساً به موقعیت آنها بر روی ماهواره و همچنین زاویه نصب آنها نسبت به محورهای بدنه ماهواره بستگی دارد. در مواردی ممکن است گشتاورهای مختلفی حول سه محور اصلی بدنه ماهواره نیاز باشد، بنابراین موقعیت تراسترها و جهتشان باید قبل از برپایی فیزیکی نهایی سیستم پیشرانش به دقت مورد بررسی قرار گیرد. چیدمان تراسترها از عواملی نظیر موقعیت حسگرهای نوری، صفحات خورشیدی، آنتن‌ها و... تحت تاثیر قرار می‌گیرند[۱].

در مرجع [۱] دو ساختار شش تراستری و چهار تراستری ثابت معرفی شده و عملکرد آنها مورد ارزیابی قرا گرفته است. با استفاده از شش تراستر با توجه به ثابت بودن تراسترها، هر تراستر فقط در یک جهت گشتاور تولید می‌کند و این باعث افزایش مصرف سوخت می‌شود. علاوه بر این از تراسترهای اضافی به جهت بالابردن قابلیت اطمینان استفاده شده است و همین موضوع سبب افزایش مصرف سوخت و افزایش وزن ماهواره خواهد شد. در حالت چهار تراستری با توجه به کاهش تراسترها مصرف سوخت کاهش پیدا می‌کند اما افزایش سرعت خطی در جهات مطلوب بدنی مقدور نمی‌باشد.

در سالهای اخیر تحقیقات بسیاری در زمینه چیدمان عملگرها جهت کنترل وضعیت فضاپیماها به ثبت رسیده است که در قالب طرحهایی برای بهینه سازی مصرف سوخت ارائه شده‌اند[۲و۳]. در

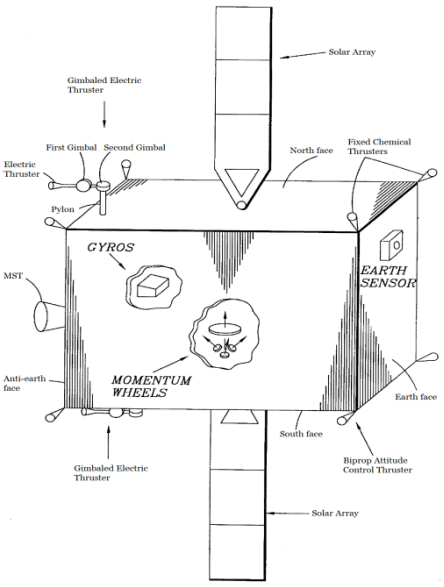
طرح‌های دیگری استفاده از تراستر گیمبالی پیشنهاد شده است[۴]. سیستم گیمبال به تراستر این اجازه را می‌دهد که به جهت دلخواه دوران کند و گشتاور مناسب را در راستای مطلوب تولید کند.

در مرجع [۵]یک چیدمان چهار تراستری گیمبالی معرفی شده است(شکل ۱). در این روش چهار تراستر بصورت قطری روی وجه مخالف زمین قرار گرفته‌اند. این تراسترها بصورت جفت می‌باشند به گونه‌ای که هر یک از دو تراستر شمالی بشکل قطری یک تراستر وابسته جنوبی دارد. هر تراستر یک سیستم گیمبال دارد که باعث چرخش تراستر و در نتیجه تغییر زاویه نیروی تراست آن می‌شود. وظیفه اصلی تراسترها در این چیدمان حفظ مدار ماهواره و باربرداری اندازه حرکت می‌باشد. در این چیدمان تولید گشتاور در همه جهات مقدور نمی‌باشد، به قسمی که با توجه به شکل۱ ایجاد گشتاور در راستای مخالف زمین امکانپذیر نیست و برای کنترل وضعیت کامل نیازمند ادوات دیگری می‌باشد.



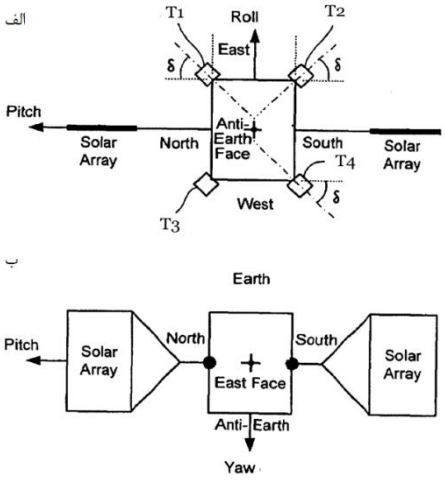
شکل۱. بدنه ماهواره با چهار تراستر

در مرجع [۶]مدلی از ماهواره معرفی شده است که در آن دو تراستر الکتریکی با I_{sp} (ضربه مشخصه) بالا استفاده شده است (شکل۲). این دو تراستر مجهز به سیستم گیمبال دو محوره هستند که می‌تواند تراسترها را به دو جهت حرکت دهد. وظیفه اصلی این دو تراستر کنترل وضعیت و نیز حفظ مدار شمالی/جنوبی ماهواره می‌باشد. علاوه بر این دو تراستر، تعدادی چرخهای عکس العملی و ۸ عدد تراستر ثابت در گوشه‌ها وجود دارد. این تراسترهای ثابت عموماً برای حفظ مدار شرقی/غربی استفاده می‌شوند و چرخهای عکس العملی وظیفه جهت دهی و هدایت ماهواره را بر عهده دارند. در واقع این مدل ساختاری ترکیبی از تراستر و چرخهای اندازه حرکت برای کنترل وضعیت و موقعیت ماهواره است. یکی از مزایای این چیدمان موقعیت قرارگیری آنها روی بدنه ماهواره است بگونه‌ای که دود حاصل از آنها روی صفحات خورشیدی را نپوشاند و مزاحم ادوات مخابراتی نشود. مشکل اصلی استفاده از این مدل تعداد بالای تراسترهای ثابت استفاده شده در آن است و این باعث افزایش مصرف سوخت می‌شود.



شکل۲. مدل ماهواره با دو تراستر گیمبال و ۸ تراستر ثابت

در مرجع [۷]مدلی با چهار تراستر گیمبالی معرفی شده است (شکل۳). در این مدل تراسترها در محل تقاطع صفحات شمالی و جنوبی با صفحات شرقی و غربی و بطور قرینه نسبت به مرکز جرم قرار گرفته‌اند. تراسترها روی پلت فرم‌های گیمبال تک محوره قرار گرفته‌اند بطوریکه می‌توانند با چرخش راستای بردار تراستشان را تغییر دهند. در این مدل وظیفه اصلی تراسترها حفظ مدار شمالی/جنوبی و شرقی/غربی است. در عمل با توجه به چیدمان تراسترها در این مدل، ایجاد گشتاور حول همه محورها امکانپذیر نیست و به ادوات دیگری نظیر چرخهای عکس‌العملی و یا تراسترهای ثابت اضافی نیاز است.



شکل۳. دو نما از محل قرارگیری تراستر در چیدمان چهار تراستری

اگرچه استفاده از تراسترهای اضافی موجب افزایش دقت وضعیت می شود، اما با وجود امکان کاهش مصرف سوخت با الگوریتم کنترل مناسب، سبب افزایش وزن ماهواره خواهد شد. از این رو باید مدلی ارائه کرد که هم بتواند به خوبی وظیفه کنترل وضعیت را انجام دهد و هم در مصرف سوخت صرفه جویی شده و وزن ماهواره نیز کاهش یابد. از طرفی، دیگر بحث مطرح در این زمینه، قابلیت اطمینان زیر سیستم کنترل وضعیت با استفاده از تراستر می‌باشد. این موضوع باید بطور دقیق بررسی شود و اینکه با معیوب شدن هر کدام از تراسترها و یا سیستم گیمبال در تراسترهای گیمبالی بر گشتاورهای تولیدی در راستاهای مختلف چه اثری گذاشته می‌شود.

در این مقاله ابتدا در بخش بعد به معرفی تراسترهای گیمبالی و بیان مزایای آنها در مقایسه با تراسترهای ثابت و بیان اساس عملکرد آنها پرداخته شده است. سپس چیدمان‌های مختلف و پوشش فضای گشتاوری توسط تراسترها بررسی شده‌اند. در بخش بعد به بررسی و ارزیابی شایستگی چیدمانهای مختلف پرداخته شده و در بخش بعد چیدمان مناسب انتخاب شده و نتایج شبیه‌سازی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌اند.

تراسترهای گیمبالی

گیمبال یک سیستم چرخشی حول یک محور می‌باشد و به سیستم گیمبال تک محوره معروف است. این سیستم از یک موتور پله‌ای با زاویه خروجی کوچک در حدود ۰/۰۶۲۵ درجه به همراه کاهنده سرعت درایو هارمونیک و یک عضو چرخشی بزرگ تشکیل شده است [۸]. امروزه مکانیزم‌هایی برای تولید این سیستم‌ها به کار می‌رود تا بر طول عمر آنها افزوده شده و از خوردگی و ساییدگی جلوگیری شود.

در برخی کاربردها نیاز است که حرکت در دو بعد و حول دو محور عمود برهم انجام شود. بدین منظور سیستم گیمبال با دو محور ساخته شده است. سیستم گیمبال دو محوره از ترکیب دو سیستم گیمبال تک محوره که به صورت عمود برهم قرار دارند، تشکیل شده است. این گیمبال ها طوری طراحی می‌شوند که چرخش حول هر کدام از محورها به راحتی انجام شود و زاویه‌های فراز[1] و آزیموث[2] دلخواه به سهولت ایجاد گردد.

از ویژگی‌های سیستم گیمبال دو محوره چرخش ۳۶۰ درجه‌ای زاویه آزیموث با گیمبال افقی و چرخش ۱۸۰ درجه‌ای زاویه فراز با گیمبال عمودی می‌باشد که کل فضای کروی اطرافش را پوشش می‌دهد [۸]. لذا با فرض قرارگرفتن تراستر گیمبالی دو محوره بر روی عنصر متحرک بالایی سیستم گیمبال، می‌تواند نیروی کافی در راستای مطلوب را به ماهواره وارد کند و وضعیت و موقعیت ماهواره را کنترل نماید. سیستم گیمبال دو محوره در شکل(۴) مشاهده می‌شود.

شکل ۴. الف)یک نمونه سیستم گیمبال دو محوره[۸]، ب)جهت چرخش گیمبال‌ها

هر مکانیزم گیمبال، از یک گیمبال اولیه تشکیل شده است که حرکتی محوری حول محور موازی با پیچ دارد. همچنین یک گیمبال ثانویه دارد که به گیمبال اولیه متصل است و برای حرکت محوری حول محور موازی با محور رول در نظر گرفته شده است. بوسیله این مکانیزم گیمبال دو محوره تراستر می‌تواند به منظور مانورهای مختلف وضعیت تغییرات زوایای آزیموث و فراز مناسب برای جهت اعمال تراست را ایجاد کند. در ادامه این موضوع بسیار مهم نشان داده خواهد شد که برای پوشش فضای کاری به ازای هر تراستر گیمبالی تک محوره در سیستم گیمبال، در مقایسه با سیستم تراستری ثابت، حداقل دو تراستر ثابت نیاز است و به ازای هرتراستر گیمبالی دو محوره، حداقل سه تراستر ثابت مورد نیاز است[۹] (شکل۵-الف). برای بررسی این موضوع، فضای کاری که یک تراستر گیمبالی دو محوره در سیستم تراستر گیمبالی پوشش می‌دهد با سه تراستر ثابت در شکل۵-ب مقایسه شده‌است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، برای پوشش فضاهایی که سیستم تراستر گیمبالی پوشش داده است، حداقل به سه تراستر ثابت نیاز است. در جدول۱ مقایسه بین مزایا و معایب سیستم تراسترهای گیمبالی و ثابت خلاصه شده است.

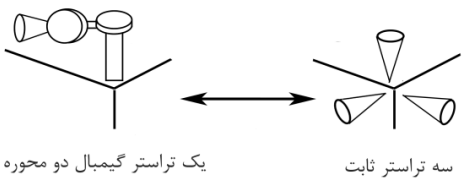
جدول ۱. مقایسه تراسترهای گیمبالی و ثابت

	مزایا	معایب
گیمبالی	- تعداد کم تراستر مورد نیاز - مصرف سوخت کمتر با بکارگیری الگوریتم کنترل و چیمان مناسب - در دسترس بودن سطح بیشتری از ماهواره - عدم دودزایی بر ادوات دیگر نظیر صفحات خورشیدی و .... با چیدمان مناسب	- مصرف توان الکتریکی بالاتر در موتورهای پله‌ای با افزایش تعداد آنها - احتمال فرسوگی سیستم گیمبال و موتورهای پله‌ای با تغییر مکرر زوایا - پیچیدگی تحلیل

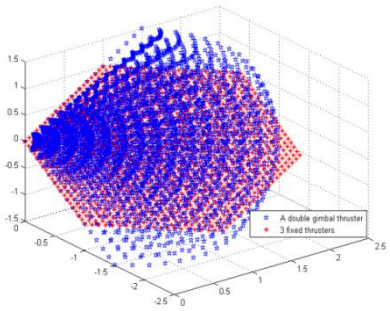
1 Elevation
2 Azimuth

ثابت	- تحلیل آسانتر	- تعداد بیشتر تراستر مورد نیاز - مصرف سوخت بالاتر - اشغال کردن سطح بیشتری از بدنه ماهواره و ایجاد محدودیت برای دیگر ادوات

همانطور که مشاهده می‌شود، تراسترهای گیمبالی علیرغم پیچیدگی تحلیل مزایای بسیاری دارند که می‌توان بر آنها تکیه کرد. در صورتی که در چیدمان تراسترهای ثابت محدودیت‌های بیشتری ایجاد می‌شود. همچنین سیستم تراسترهای گیمبالی قابلیت اطمینان بالاتری دارند. بدین معنی که اگر سیستم گیمبال تراسترها معیوب شود، با چیدمان مناسب می‌توان توسط تراسترهای دیگر این کمبود را جبران کرد. این مزایا می‌تواند دلیلی بر ترجیح استفاده از تراستر گیمبالی بر تراسترهای ثابت باشد.



الف:



ب:

شکل۵. الف) نحوه قرارگیری تراسترها، ب) مقایسه فضای کاری پوشش داده شده توسط تراسترها

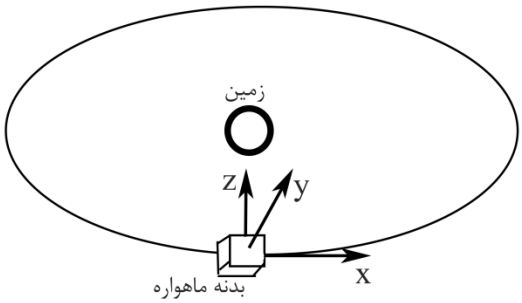
برای مقایسه وزن سیستم تراستری گیمبال با مجموعه تراسترهای ثابت باید به این نکته توجه داشت که سیستم‌های گیمبالی که امروزه برای کاربردهای مختلف ساخته می‌شوند، توانایی تحمل بارها با وزن‌های مختلفی را دارند. بطور مثال یک سیستم گیمبال ساخته شده توسط شرکت MOOG، وزنی کمتر از ۱۱ پوند (۴/۵ کیلوگرم) دارد و توانایی تحمل باری ۵۰ پوندی (۲۳ کیلوگرمی) را دارد. بنابراین با توجه به اینکه وزن هر تراستر کنترل وضعیت به عنوان بار یک سیستم گیمبالی حدود ۵۰۰ گرم می‌باشد، نیازی به استفاده از سیستم گیمبالی با وزن بالا نمی‌باشد و با ساخت یک سیستم گیمبالی با وزن بسیار پایین (در حدود وزن خود تراستر) می‌توان یک سیستم تراستر گیمبالی با وزن پایین به منظور کنترل وضعیت ماهواره ایجاد کرد که در مقایسه با مجموعه تراسترهای ثابت از وزن کمتری برخوردار است. بطور مثال یک سیستم تراستری ثابت با ۸ تراستر ثابت حدود ۴ کیلوگرم وزن دارد اما سیستم تراستر گیمبالی با دو تراستر گیمبالی حدود ۳ کیلوگرم یا کمتر وزن خواهد داشت. (جدول ۲)

جدول ۲. مقایسه وزنی تراسترهای گیمبالی و ثابت

	تعداد	وزن واحد(کیلوگرم)	وزن کل(کیلوگرم)
ثابت	۸	۰/۵	۴
گیمبال	۲	گیمبال ۱و تراستر ۰/۵	۳

طراحی چیدمان‌های مختلف با استفاده از تراسترهای گیمبالی

در این بخش چیدمان‌های مختلف با دو، سه و چهار تراستر گیمبالی جهت پوشش فضای کاری به منظور کنترل سه محوره یک ماهواره بررسی می‌شود. در این ساختارها از تراسترها با مکانیزم گیمبال دو محوره استفاده شده است. در این ساختارها همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، محور x هم راستای مدار ماهواره و عمود بر صفحات شرقی/غربی و محور y عمود بر صفحات شمالی/جنوبی ومحور z به سوی مرکز جرم زمین قرار دارند. همچنین صفحات خورشیدی در صفحات شمالی و جنوبی واقع شده‌اند.

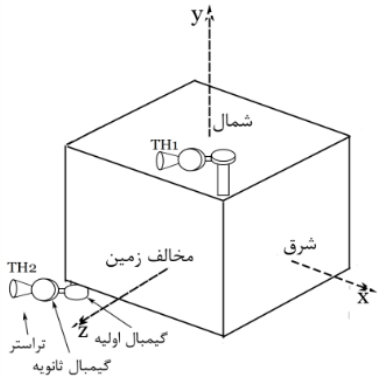


شکل۶. موقعیت ماهواره در فضا

چیدمان دو تراستری

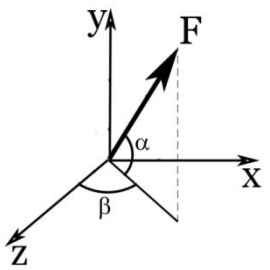
در این ساختار از دو تراستر گیمبال TH_1 و TH_2 استفاده شده است که در دو صفحه شمالی و جنوبی قرار گرفته‌اند(شکل۷). هر کدام از این دو تراستر در گوشه های صفحات شمالی و جنوبی به در

سمت مخالف زمین به صورت قرینه نسبت به مرکز جرم ماهواره قرار دارند.



شکل۷. موقعیت قرارگیری تراستر در چیدمان دو تراستری

سیستم گیمبال مورد استفاده در این تراسترها دارای دو گیمبال عمودی با زاویه فراز α و گیمبال افقی با زاویه آزیموث β می‌باشد(شکل۸). محور گیمبال افقی هم راستای محور y و محور گیمبال عمودی در ابتدا هم راستای محورx است که با تغییر در گیمبال افقی ممکن است محور گیمبال عمودی دیگر هم راستای محورx نباشد. در این چیدمان زاویه های فراز و آزیموث دو تراستر بصورت مستقل از یکدیگر قابل کنترل است.

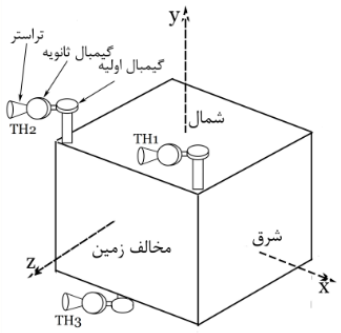


(آزیموث)β (فراز) و αشکل۸. جهت های چرخش تراستر و زوایای

چیدمان سه تراستری

در این ساختار از سه تراستر گیمبال TH_1، TH_2 و TH_3 استفاده شده است که در دو صفحه شمالی و جنوبی قرار گرفته‌اند(شکل۹). دو تراستر در صفحه شمالی و یک تراستر در صفحه جنوبی هستند. دو تراستر صفحه شمالی در گوشه های آن و تراستر جنوبی در وسط وجه جنوبی و نزدیک وجه مخالف زمین قرار دارند.

سیستم گیمبال مورد استفاده در این تراسترها همانند حالت قبل دارای دو گیمبال عمودی با زاویه فراز α و گیمبال افقی با زاویه آزیموث β می‌باشد.



شکل۹. موقعیت قرارگیری تراستر در چیدمان سه تراستری

چیدمان چهار تراستری با تراسترهای مجزا

در این حالت همانند موارد قبل از سیستم گیمبال دو محوره استفاده شده است. ترتیب قرارگرفتن تراسترها بصورت چهار تراستر در گوشه‌های صفحات شمالی و جنوبی قرار گرفته‌اند (شکل۱۰). در این چیدمان، کنترل زوایای آزیموث و فراز هر تراستر به صورت مجزا صورت می‌گیرد. با استفاده از این چیدمان می‌توان گشتاورهای مختلفی حول مرکز جرم ماهواره ایجاد کرد.

معادلات مؤلفه‌های نیروی تولید شده توسط تراسترها در همه ساختارها بصورت زیر است:

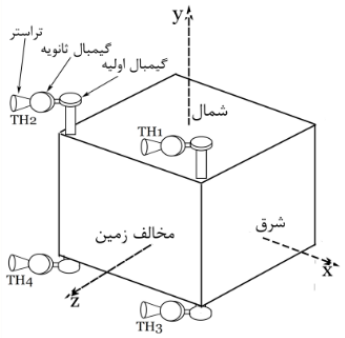
$$F_i = [F_{xi} \quad F_{yi} \quad F_{zi}]$$
$$\begin{cases} F_{xi} = f_i \cos\alpha_i \sin\beta_i \\ F_{yi} = f_i \sin\alpha_i \\ F_{zi} = f_i \cos\alpha_i \cos\beta_i \end{cases}$$
(۱)

که $i = 1, \ldots, N$ تعداد تراسترها و f_i سطح تراست هر یک از آنهاست.

اگر r_i بازوهای گشتاور نیروهای تراسترها نسبت به مرکز جرم ماهواره باشند، برای گشتاور کل حول مرکز جرم داریم:

$$T_i = r_i \times F_i$$
$$T = \sum_{i=1}^{N} T_i$$
(۲)

که T_i گشتاور حاصل از تراستر i ام و T گشتاور کل حول مرکز جرم و N تعداد تراسترها می باشد.



شکل۱۰. موقعیت قرارگیری تراستر در چیدمان چهار تراستری

چیدمان ۴ تراستری بصورت جفت تراستری

همانند سه حالت قبل در این ساختار سیستم گیمبال دو محوره مشابه استفاده شده است. در این ساختار به جای استفاده از تراسترهای مجزا از جفت تراسترها استفاده می‌شود به این معنی که زاویه‌های آزیموث و فراز در هر جفت تراستر به صورت یکسان تغییر می‌کند. هر جفت تراستر یک تراستر شمالی TH_1 و TH_2 و یک تراستر جنوبی TH_3 و TH_4 دارد(شکل ۱۰). بنابراین چهار تراستر در گوشه‌های صفحات شمالی و جنوبی به صورت دو به دو قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر کنترل تراسترها به صورت جفت تراستری وابسته به یکدیگر است. برای مثال هر سیگنال کنترلی که به تراسترگیمبال۱اعمال شود، همین سیگنال به تراستر گیمبال ۳ نیز اعمال می‌شود و تغییر زوایای آزیموث و فراز یکسان خواهد بود. این ساختار در دو بخش بررسی می‌شود. ابتدا با زاویه آزیموث یکسان و هم جهت برای هر جفت تراستر و دیگری با زاویه آزیموث یکسان و غیر هم جهت برای هر جفت تراستر.

معادلات مؤلفه های نیروی تولید شده توسط تراسترها بصورت زیر است:

$$F_i = [F_{xi} \quad F_{yi} \quad F_{zi}]$$

برای جفت تراستر اول :

$$\begin{cases} F_{xi} = f_i \cos\alpha_1 \sin\beta_1 \\ F_{yi} = f_i \sin\alpha_1 \\ F_{zi} = f_i \cos\alpha_1 \cos\beta_1 \end{cases} \quad i = 1,3$$

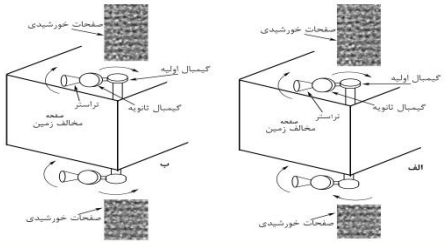
برای جفت تراستر دوم :

$$\begin{cases} F_{xi} = f_i \cos\alpha_2 \sin\beta_2 \\ F_{yi} = f_i \sin\alpha_2 \\ F_{zi} = f_i \cos\alpha_2 \cos\beta_2 \end{cases} \quad i = 2,4 \qquad (۳)$$

برای گشتاور کل حول مرکز جرم داریم:

$$T_i = r_i \times F_i$$
$$T = \sum_{i=1}^{4} T_i$$
(۴)

در حالتی که زاویه آزیموث در جفت تراسترها خلاف جهت هم باشند، تغییری که در معادلات بالا ایجاد می‌شود، تبدیل β_1 و β_2 به $-\beta_1$ و $-\beta_2$ در تراسترهای سوم و چهارم می‌باشد که در صفحه جنوبی قرار دارند و به عبارتی تراسترهای ثانویه جفت تراسترها می‌باشند (شکل ۱۱).



شکل۱۱ . الف) آزیموث هم جهت، ب) آزیموث غیرهم جهت

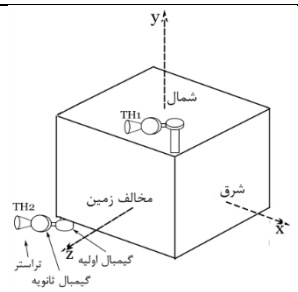
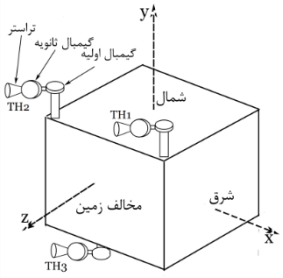
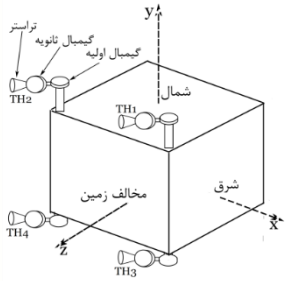
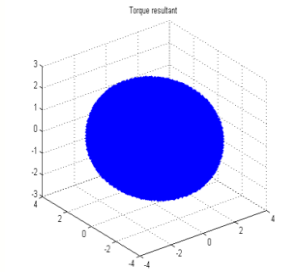
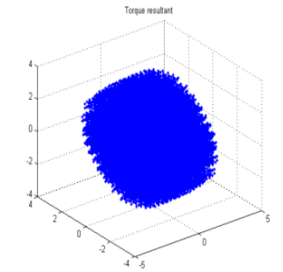
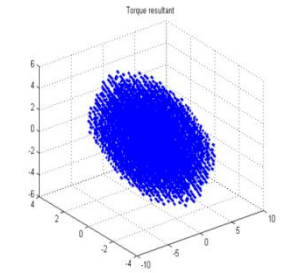
در ساختارهای فوق، گشتاورهای مختلفی حول مرکز جرم و محورهای مختصات بدنی ماهواره ایجاد می‌شود. برای بررسی پوشش فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم ساختارهای معرفی شده، شبیه‌سازی گشتاورهای کل(T) تولید شده حول مرکز جرم با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده **است**. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. از نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که همه ساختارهای معرفی شده، کل فضای حول مرکز جرم را پوشش می‌دهند. این بدان معناست که گشتاور کنترلی در تمام راستاها امکانپذیر است و لذا کنترل سه محور ماهواره میسر خواهد شد.

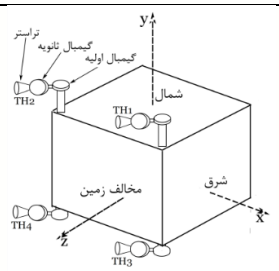
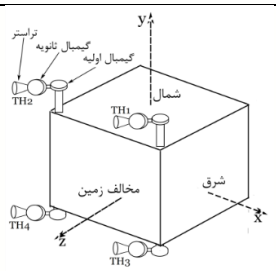
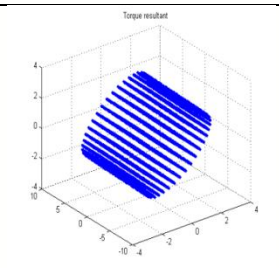
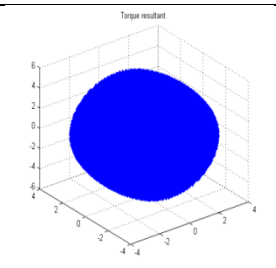
شایستگی چیدمان

در بخش قبل مشاهده شد همه چیدمان های مطرح شده در پوشش فضای کاری گشتاورها موفق عمل کرده‌اند. این بدان معناست که با این چیدمان‌ها می‌توان گشتاورهای مختلفی در همه جهت‌های قابل کنترل ایجاد کرد. اصولاً بررسی فضای کاری گشتاورهای کنترلی این امکان را برای طراح فراهم می‌کند تا شایستگی چیدمان تراسترها را بررسی کند. معیار شایستگی چیدمان بر اساس قابلیت اطمینان آن، ادامه یافتن کنترل ماهواره با وجود معیوب شدن تعدادی از تراسترها می‌باشد. اختلاف ساختارهای فوق نیز بر پایه شایستگی آنهاست. برای بررسی این مسأله، فرض بر این است که یک یا تعدادی از تراسترها یا جفت تراسترها و یا سیستم گیمبال آنها معیوب شوند و از کار بیفتند. این به معنی آن است که تراستر هیچ گشتاوری نتواند تولید کند. برای چیدمان‌های مختلف شبیه‌سازی انجام شده است. برای شبیه سازی فرض بر نرمال بودن اندازه ها قرار داده شده است. سطح تراست را برای همه تراسترها ۱ و اندازه بازوهای گشتاور نیز در هر کدام از راستاهای x و y و z ، ۱ در نظر گرفته شده است. از جدول ۴ مشاهده می‌شود برای چیدمان دو تراستری با از دست رفتن یک تراستر به میزان قابل توجهی از فضای کاری (جهت های قابل کنترل) از دست داده می‌شود و کنترل وضعیت سه محوره ماهواره با یک تراستر باقیمانده با مشکل مواجه خواهد شد. از این رو، ساختار دو تراستری علیرغم مصرف کمتر سوخت، قابلیت اطمینان بسیار پایینی دارد.

جدول ۵ ساختار سه تراستری را نشان می دهد. با از دست رفتن هر یک از تراسترها بخشی از فضا از دست می رود. با توجه به شکل های به دست آمده می توان دریافت که از دست رفتن تراستر جنوبی تأثیر کمتری بر میزان گشتاورهای تولید شده حول مرکز جرم دارد و از دست رفتن هر یک از تراسترهای شمالی بخش‌های بسیار بیشتری از فضا از دست می‌رود. اگر در این ساختار دو تراستر از دست برود به مانند حالت قبل با یک تراستر عملاً کنترل وضعیت سه محوره با مشکل مواجه خواهد شد.

جدول۳: فضای کاری گشتاورها در ساختارهای مختلف

۲ تراستری	۳ تراستری	۴ تراستری مجزا
		
		
کنترل مجزا هر تراستر	کنترل مجزا هر تراستر	کنترل مجزا هر تراستر

۴ تراستری جفت	۴ تراستری جفت
	
	
کنترل وابسته تراسترهای شمالی و جنوبی با زاویه آزیموث هم جهت	کنترل وابسته تراسترهای شمالی و جنوبی با زاویه آزیموث غیرهم‌جهت

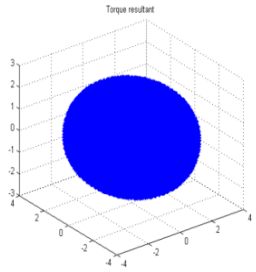
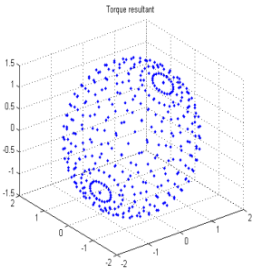
جدول ۶ ساختار چهار تراستری را نشان می‌دهد که در این ساختار زاویه آزیموث یکسان و هم جهت برای هر جفت تراستر است. با از دست رفتن هر یک از تراسترها میزان کمی از گشتاورهای تولیدی کاهش پیدا می‌کند. در این حالت تراستر دیگر با اعمال گشتاور اضافی باید کمبود تراستر معیوب جفتش را جبران کند. به هر حال وجود دو جفت تراستر بر قابلیت اطمینان ساختار افزوده خواهد شد. اما اگر با از بین رفتن یک تراستر جفت آن نیز دچار مشکل شود و از کار بیفتد، میزان بسیار قابل توجهی از میزان و جهت گشتاورهای تولیدی کم می‌شود و این به معنی بروز مشکل اساسی در کنترل ماهواره است. در حالتی که دو تراستر معیوب از هر کدام از جفت‌ها باشد یعنی دو تراستر شمالی یا جنوبی از کار بیفتند، ماهواره همچنان با دو تراستر کنترل خواهد شد.

جدول ۷ ساختار چهار تراستری را نشان می‌دهد که در این ساختار زاویه آزیموث یکسان و غیر هم جهت برای هر جفت تراستر است. همانند حالت قبل با از دست رفتن تراسترها بخش‌هایی از اندازه و جهت فضای کاری گشتاورها از دست می رود با این تفاوت که اندازه گشتاور تولید شده در این حالت کمتر از حالت قبل می‌باشد و این به معنی افزایش مصرف سوخت برای تراستر می‌باشد.

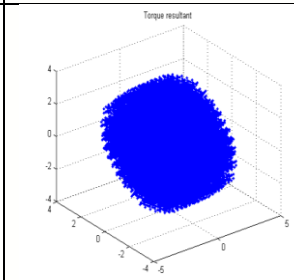
جدول ۸ ساختار چهار تراستری با تراسترهای مجزا را نشان می‌دهد.به جهت وجود سیگنال کنترل مجزا برای هریک از تراسترها و ایجاد نیرو در تمام جهات مختلف توسط تراسترها، با ازدست رفتن هرکدام از تراسترها کنترل همچنان پابرجاست و تنها با تغییر در سطح تراست می‌توان گشتاورهای مطلوب را به دست آورد. در واقع این ساختار از لحاظ قابلیت اطمینان بهترین شرایط را دارا می‌باشد. اگر دو تراستر معیوب شوند، کنترل وضعیت ماهواره همچنان با دو تراستر باقیمانده انجام می‌شود.

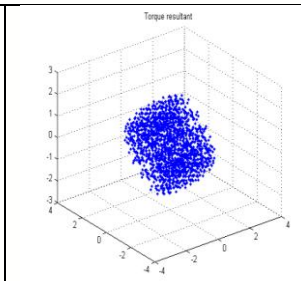
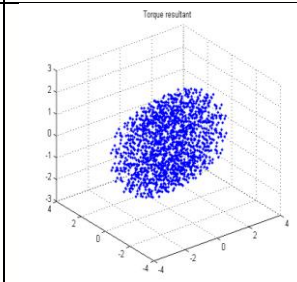
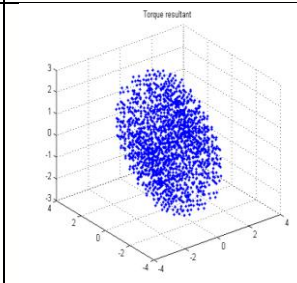
در تمام این جداول هر چه فضای کاری در شکل ها کمرنگ شده است به معنای کاهش پوشش فضای گشتاوری است. در مقایسه با تراسترهای ثابت، استفاده از ۲ تا ۴ تراستر گیمبالی به میزان قابل ملاحظه‌ای در مصرف سوخت و توان مصرفی تراسترها صرفه‌جویی می‌شود.

جدول شماره ۴. فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم در ساختار دو تراستری

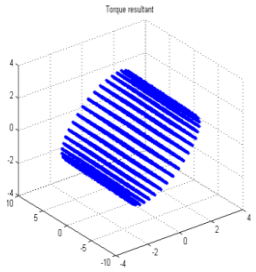
ساختار	گشتاورهای تولیدی حول مرکز جرم	قیود زاویه
ساختار ۲ تراستری		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل
ساختار ۲ تراستری درصورت خراب شدن تراستر TH_2جنوبی		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل

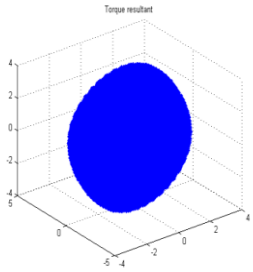
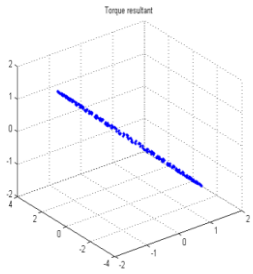
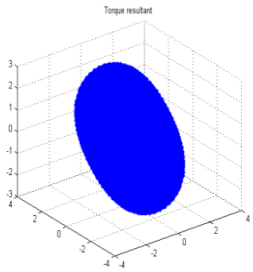
جدول شماره ۵. فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم در ساختار سه تراستری

ساختار	گشتاورهای تولیدی حول مرکز جرم	قیود زاویه
ساختار ۳ تراستری		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل

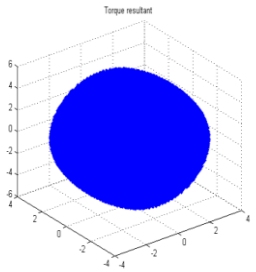
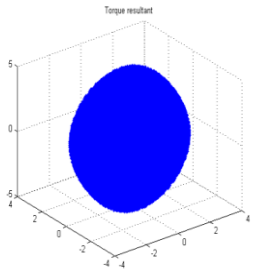
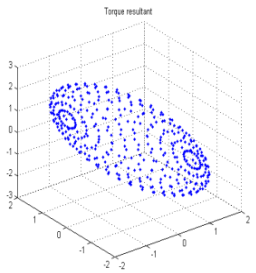
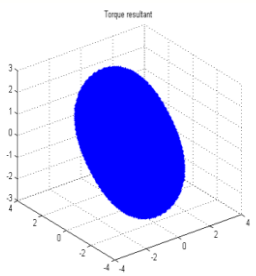
ساختار ۳ تراستری در صورت خراب شدن تراستر TH_1		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها مستقل
ساختار ۳ تراستری در صورت خراب شدن تراستر TH_2		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها مستقل
ساختار ۳ تراستری در صورت خراب شدن تراستر TH_3		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها مستقل

جدول شماره ۶. فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم در ساختار چهار تراستری با جفت تراسترهای با زاویه آزیموث هم جهت

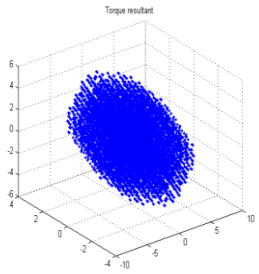
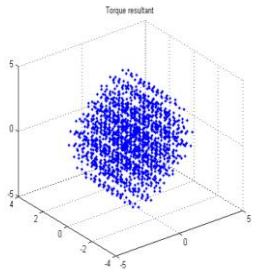
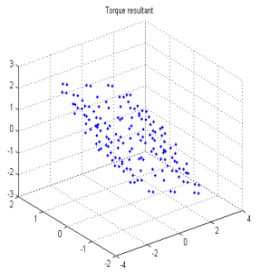
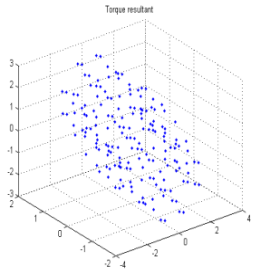
ساختار	گشتاورهای تولیدی حول مرکز جرم	قیود زاویه
ساختار ۴ تراستری		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی

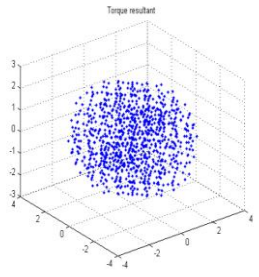
ساختار ۴ تراستری در صورت خراب شدن تراستر TH_4		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی
ساختار۴ تراستری در صورت خراب شدن جفت تراستر شرقی TH_1 و TH_3		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی
ساختار۴ تراستری در صورت خراب شدن جفت تراستر جنوبی TH_3 و TH_4		آزیموث : $180\pm$ فراز : $90\pm$ کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی

جدول شماره ۷. فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم در ساختار چهار تراستری با جفت تراسترهای با زاویه آزیموث غیرهم جهت

ساختار	گشتاورهای تولیدی حول مرکز جرم	قید زاویه
ساختار ۴ تراستری		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی
ساختار ۴ تراستری در صورت خراب شدن تراستر TH_4		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی
ساختار۴ تراستری در صورت خراب شدن جفت تراستر TH_1وTH_3شرقی		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی
ساختار۴ تراستری در صورت خراب شدن جفت تراستر TH_3وTH_4جنوبی		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها وابسته به صورت جفت تراستر شمالی و جنوبی

جدول شماره ۸. فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم در ساختار چهار تراستری با تراسترهای مجزا

ساختار	گشتاورهای تولیدی حول مرکز جرم	قید زاویه
ساختار ۴ تراستری مستقل		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل
ساختار ۴ تراستری در صورت خراب شدن TH_4تراستر		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل
ساختار۴ تراستری در صورت خراب شدن ۲ تراستر TH_1و TH_3شرقی		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل
ساختار ۴ تراستری در صورت خراب شدن ۲ تراستر TH_3وTH_4جنوبی		آزیموث : ± 180 فراز : ± 90 کنترل تراسترها مستقل

ساختار ۴ تراستری در صورت خراب شدن ۲ تراستر قطری TH_2وTH_3		آزیموث : ±180 فراز : ±90 کنترل تراسترها مستقل

انتخاب ساختار

در بخش قبل مشاهده شد که بطور کلی همه چیدمان‌های معرفی شده در پوشش فضای کاری موفق عمل می‌کنند. با این وجود اختلاف اساسی بین آنها در پوشش فضای کاری زمانی است که یک تراستر یا بیشتر از گردونه کنترل خارج شده و به علل مختلف نتواند گشتاور مورد نیاز را تأمین کنند.

در این بخش مسأله از زاویه دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به فرض داشتن یک گشتاور کنترلی نمونه با اندازه واحد در مرکز جرم ماهواره، میزان گشتاور تولید شده توسط هر تراستر در هر یک از چیدمان‌ها محاسبه می‌شود. سپس در هر یک از چیدمان‌ها زمانی که تراستر یا تراسترهایی معیوب شوند، تأثیر عدم تولید گشتاور توسط آنها بر گشتاور نمونه و گشتاور تولید شده توسط تراسترهای دیگر نشان داده می‌شود.

برای تنظیم زوایای α و β هر تراستر برای تولید یک گشتاور نمونه، حالات مختلفی ممکن است اتفاق بیفتد. اما همه این حالات بهینه نیستند. برخی از این حالت‌ها زمانی که قیودی بر زوایای α و β سیستم گیمبال اعمال شود، حذف می‌شوند. همچنین حالتی باید در نظر گرفته شود که مصرف سوخت کمتری را موجب شود و میزان نیروی تراست کمتری احتیاج داشته باشد. در نتیجه می‌توان با کمی دقت، بهترین و بهینه ترین حالت را بدست آورد. نتایج و زوایای بدست آمده در جداول ۹-۱۲برای چیدمان‌های مختلف بیان شده است.

جدول شماره ۹. میزان گشتاور تولیدی توسط تراسترها و تأثیر معیوب شدن تراسترها بر گشتاور کل در حالت سه تراستری با کنترل مجزا

	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.4260	30	90	0.4	1
T_2	0.6772	30	90	0.4	
T_3	0.2	0	0	0.2	

TH_1 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_2	1.0158	30	90	0.6	1.002
T_3	0.2646	-30	90	0.2	

TH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.9164	-30	30	0.6	0.916
T_3	0	-30	30	0	

TH_3 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.9013	10	90	0.7	0.971
T_2	0.12	-15	45	0.2	

جدول شماره ۱۰: میزان گشتاور تولیدی توسط تراسترها و تأثیر معیوب شدن تراسترها بر گشتاور کل در حالت چهار تراستری با کنترل مجزا

	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.6389	-30	0	0.6	1
T_2	0.5657	0	90	0.4	
T_3	0.5657	0	90	0.4	
T_4	0.6389	30	0	0.6	

TH_1 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_2	2.3701	-30	0	1.4	1
T_3	2.3701	-30	0	1.4	
T_4	1.1314	0	90	0.8	

TH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	1.4908	-30	0	1.4	1
T_3	1.1314	0	90	0.8	
T_4	1.4908	30	0	1.4	

TH_3 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.3386	30	0	0.2	1
T_2	1.1314	0	90	0.8	
T_4	0.3386	-30	0	0.2	

TH_4 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	1.1314	0	90	0.8	1
T_2	0.2130	-30	0	0.2	
T_3	0.2130	30	0	0.2	

TH_1وTH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_3	1.4908	0	-60	1.4	1.02
T_4	1.6752	30	81	1.9	

TH_4وTH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.9899	0	90	0.7	1
T_3	0.1414	0	90	0.1	

TH_3وTH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.9899	0	90	0.7	1
T_4	0.1414	0	90	0.1	

جدول شماره ۱۱: میزان گشتاور تولیدی توسط تراسترها و تأثیر معیوب شدن تراسترها بر گشتاور کل در حالت چهار تراستری با کنترل وابسته و جفت تراستر با زاویه آزیموث هم جهت

	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.5657	0	0	0.4	1
T_2	0.2	0	45	0.2	
T_3	0.5657	0	0	0.4	
T_4	0.8	0	45	0.8	

TH_4 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0	0	45	0	1.04
T_2	0	0	45	0	
T_3	1.0392	0	45	0.6	

جفت TH_4 و TH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0	0	45	0	1.04
T_3	1.0319	0	45	0.6	

جدول شماره ۱۲: میزان گشتاور تولیدی توسط تراسترها و تأثیر معیوب شدن تراسترها بر گشتاور کل در حالت چهار تراستری با کنترل وابسته و جفت تراستر با زاویه آزیموث غیر هم جهت

	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1	0.3464	0	45	0.2	1
T_2	0.4	0	45	0.4	
T_3	0.6	0	-45	0.6	
T_4	0.3464	0	-45	0.2	

	TH_4 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1		0	0	45	0	1
T_2		0.6	0	45	0.6	
T_3		0.8	0	-45	0.8	

	جفت TH_4 و TH_2 معیوب	$T_{i_{Nm}}$	$\alpha_{i_{deg}}$	$\beta_{i_{deg}}$	f_{i_N}	T_{Nm} کل
T_1		0.6325	-15	90	0.4	1.001
T_3		0.6325	-15	-90	0.4	

با توجه به جداول بالا ، مشخص است که دقت عملکرد تولید گشتاور در حالت چهار تراستری با کنترل مجزا از سایر چیدمان ها بالاتر است و حتی با از دست دادن دو تراستر برقراری کنترل وضعیت با دقت مطلوبی امکانپذیر است.

نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش، بررسی و آنالیز آرایش‌های تراسترهای یک ماهواره سه محوره می‌باشد. همه آرایش های معرفی شده در این مقاله، از تراسترهای متحرک دو محوره استفاده می‌کنند. چرخش سیستم گیمبال به تراستر این اجازه را می‌دهد که نیروی لازم را در جهت مطلوب به ماهواره وارد کند. همه این آرایش‌ها از نظر پوشش فضای کاری گشتاورهای حول مرکز جرم ماهواره موفق عمل می‌کنند. با این وجود، در حالت استفاده از دو تراستر سوخت کمتری مصرف خواهد شد. اما این تا زمانی امکانپذیر است که هیچ کدام از تراسترها به علت‌های مختلف از چرخه‌ی کنترل خارج نشوند. در صورت معیوب شدن یک تراستر و یا سیستم گیمبال آن، کنترل وضعیت ماهواره با مشکل مواجه خواهد شد. از این رو برای بالا بردن قابلیت اطمینان از ساختارهای سه و چهار تراستری استفاده می‌شود. بهترین حالت استفاده از چهار تراستر مجزا می‌باشد زیرا حتی با معیوب شدن دو تراستر کنترل همچنان ادامه پیدا می‌کند. ذکر این نکته ضروریست که انتخاب ساختار مناسب، بستگی به شرایط مأموریت فضایی مورد نظر دارد.

مراجع

[۱] مارسل جی سیدی، دینامیک و کنترل فضاپیما، ترجمه رضا اسماعیل پور، ۱۳۹۰

[2] Zuliana I, Renuganth V, “A study of reaction wheel configurations for a 3-axis satellite attitude control”, Advances in Space Research, 2009, pp. 750-759

[3] Sung-Moon Yoo, Sangjin Lee b, Chandeok Park , Sang-Young Park, “Spacecraft fuel-optimal and balancing maneuvers for a class of formation reconfiguration problems”, Advances in Space Research,2013

[4] Richard Q, Laguna N, Calif, “Spacecraft Attitude Control With Gimbaled Thrusters”, United States Patent, 2000

[5] Anzel. B. M, Noyola. R. A, Ho. Yiu-Hung M, “Fuel Efficient Methods for Satellite Stationkeeping and Momentum Dumping”, European Patent Specification, 2004

[6] Daryl K. H, Walter S. G, Richard M. M, “Multiple Usage Thruster Mounting Configuration”, United States Patent, 2000

[7] Glogowski M. J, “Gimbaled Ion Thruster Arrangement for High Efficiency Stationkeeping”, United States Patent, 2003

[8] Spacecraft Mechanisms Product Catalog, Moog Company

[9] Pablo A. Servidia, “Control allocation for gimballed/fixed thrusters” , Acta Astronautica, 2009, pp 587-594