

Journal of Space Science and Technology

JSS T

Vol.17, No. 4, 2024

Print ISSN: 2008-4560

Online ISSN: 2423-4516

Enhanced Radiation Tolerance of a Remote Interface Unit Using Commercial-off-the-Shelf Components for Space Applications	1
Reza Omid and Azam Eidi	
Design of an S-Band Diplexer for Telemetry and Telecommand Subsystems in LEO Satellites	14
Behzad Ahmadi, Razieh Narimani, and Elham Hosseini	
Compact Dual-Band Wearable Antenna for Wireless Body Area Network Applications	28
Farzad Mohajeri and Maryam Darabi	
Technology Development of a High-Power Low-Cost Waveguide Switch for Satellite Transponder Applications	40
Elham Sharifi Moghaddam, Mohsen Shafeghati, and Behzad Ahmadi	
The Impact of Simulated Microgravity on Mice with Breast Cancer	49
Morteza Alemi, Firooz Samadi, Alireza Madjidansari, and Zahra Hajebrahim	
Effect of Low Atmospheric Pressure on the Growth and Antioxidant Defense Response of <i>Dunaliella Salina</i>	56
Halimeh Hassanpour	
Introducing the Conceptual Design Process of the Armita Lunar Rover Based on ECSS	65
Amirhossein Adami, Zahra Pourjabari, Mohammad Azhdari, Seyed Ali Saadatdar, Haniyeh Eshaghnia, Kazem Gholipour, Seyed Mohammad Mir Mohammadi, and Alireza Ahangarani Farahani	



**Journal of
Space Science and Technology**

Vol. 17, No. 4, 2024

Indexed in:

DOAJ, ISC, EBSCO, ...

Publisher: IAS

Director-in-Charge: M. Navabi, PhD.

Editor-in-Chief: R. Ebrahimi, PhD.

Deputy Editor: M. Azimi, PhD

Address: No. 1, Mohandes St., Darya Blv.
Tehran, I.R. Iran

Tel: +98(21) 88366030

Website: <https://jsstpub.com>

E-Mail: jsst@jsstpub.com

International E-Mail: info1@jsstpub.com

Print ISSN: 2008 - 4560

Online ISSN: 2423 - 4516

International Editorial Board

Andon Dimitrov Lazarov, Professor, Information Technology Department, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Bulgaria

Mohamed Himdi, Professor, Institute of Electronics and Digital Technologies, University of Rennes 1, France

Helmi Zulhaidi Mohd Shafri, Associate Professor, Department of Civil Engineering, University Putra Malaysia, Malaysia

Hajar Binti Ja'afar, Associate Professor, School of Electrical Engineering, MARA Technological University, Malaysia

Nicola Luigi Bragazzi, Professor, University of Parma, Italy

Samir Ladaci, Professor, Department of Automatics and Control Engineering, National Polytechnic School of Algiers, Algeria

Syed Amer Mahmood, Professor, Department of Space Science, University of the Punjab, Pakistan

Mahmoud Najafi, Professor, Department of Mathematical Sciences, Kent State University, USA

Editorial Board

Mohsen Bahrami, Professor, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran

Hossein Bolandi, Professor, Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran

Mohammad Farshchi, Professor, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Iran

S. Mostafa Hoseinalipour, Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran

Mansour Kabganian, Professor, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran

Mehran Mirshams, Professor, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Iran

M. Navabi, Associate Professor, Faculty of New Technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Iran

S. Hossein Pourtakdoust, Professor, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Iran

Jafar Roshanian, Professor, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Iran

Mohammad Homayoune Sadr, Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Iran

Mohammad Taeibi-Rahni, Professor, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Iran

Mohammad Tahaye Abadi, Associate Professor, Aerospace Research Institute, Iran

Advisory Board

Mohammad Hassan Entezari, Scientist, Iranian Research Organization for Science and Technology

Hamid Fazeli, Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology

Ali Akbar Golroo, Lecturer, Aerospace Research Institute

Abolghasem Naghash, Associate Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology

S. Mostafa Safavi Homami, Professor, Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology

Saeed Shakhesi, Associate Professor, Iranian Space Research Center

Table of Contents

Enhanced Radiation Tolerance of a Remote Interface Unit Using Commercial-off-the-Shelf Components for Space Applications	1
Reza Omid and Azam Eidi	
Design of an S-Band Diplexer for Telemetry and Telecommand Subsystems in LEO Satellites.....	14
Behzad Ahmadi, Razieh Narimani, and Elham Hosseini	
Compact Dual-Band Wearable Antenna for Wireless Body Area Network Applications.....	28
Farzad Mohajeri and Maryam Darabi	
Technology Development of a High-Power Low-Cost Waveguide Switch for Satellite Transponder Applications	40
Elham Sharifi Moghaddam, Mohsen Shafeghati, and Behzad Ahmadi	
The Impact of Simulated Microgravity on Mice with Breast Cancer	49
Morteza Alemi, Firooz Samadi, Alireza Madjidansari, and Zahra Hajebrahimi	
Effect of Low Atmospheric Pressure on the Growth and Antioxidant Defense Response of <i>Dunaliella Salina</i>	56
Halimeh Hassanpour	
Introducing the Conceptual Design Process of the Armita Lunar Rover Based on ECSS	65
Amirhossein Adami, Zahra Pourjabari, Mohammad Azhdari, Seyed Ali Saadatdar, Haniyeh Eshaghnia, Kazem Gholipour, Seyed Mohammad Mir Mohammadi, and Alireza Ahangarani Farahani	

Original Research Paper

Enhanced Radiation Tolerance of a Remote Interface Unit Using Commercial-off-the-Shelf Components for Space Applications

Reza Omidi^{1*}  and Azam Eidi²

1. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2. Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 02 August 2024

Revised 23 September 2024

Accepted 23 September 2024

Available Online 19 October 2024

Keywords:

Space radiation

Cobalt-60 test

Total ionization dose

Radiation hardening

TT&C subsystems

RIU unit

ABSTRACT

The radiation hardness of satellite subsystems, particularly their susceptibility to total ionizing dose (*TID*), presents a significant challenge in space mission design. This study introduces an innovative approach to enhancing the radiation tolerance of a *remote interface unit (RIU)* by leveraging commercial off-the-shelf (*COTS*) components in conjunction with a strategic integration of hardware and software solutions. Experimental irradiation results demonstrate that this approach successfully increased the *RIU's* radiation tolerance from 20 krad to over 60 krad—a significant achievement given that geostationary satellite simulations estimate a cumulative radiation dose of approximately 50 krad over a five-year mission. Furthermore, comprehensive performance evaluations confirm that the radiation-hardened *RIU* maintains stable and acceptable functionality under high radiation exposure. All proposed solutions were experimentally validated using Co-60 irradiation, and the results indicate that the *TID*-hardened *RIU* can serve as a viable alternative to specialized space-grade components in specific applications. This novel approach reduces satellite development costs and time-to-market and enhances design flexibility. The methodologies presented in this study hold significant potential for adoption in other satellite subsystems, such as *on-board data handling (OBDH)* units and *telemetry, tracking, and command (TT&C)* systems, thereby contributing to the advancement of more reliable space technologies.

*Corresponding Author's E-mail: rezaomidi@znu.ac.ir

How to Cite this Article:

R. Omidi and A. Eidi, "Enhanced radiation tolerance of a remote interface unit using commercial-off-the-shelf components for space applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-13, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1495>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



طراحی، ساخت و تست یک واحد رابط راه دور با تاب آوری بالا برای کاربردهای فضایی: رویکردی مبتنی بر قطعات تجاری

رضا امیدی^{*۱} و اعظم عیدی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه ارتباطات ماهواره‌ای، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاب آوری زیرسیستم‌های ماهواره‌ای در برابر تشعشعات فضایی، به‌ویژه دوز یونیزاسیون جمعی (TID)، یکی از چالش‌های اصلی در طراحی مأموریت‌های فضایی است. در این مقاله، رویکردهای نوآورانه برای افزایش تاب آوری یک واحد رابط راه دور (RIU) با استفاده از قطعات تجاری ارائه شده است. با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از راه‌کارهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، تاب آوری RIU از ۲۰ کیلو راد به بیش از ۶۰ کیلو راد افزایش یافته است. شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌ها برای ماهواره ژئو نشان می‌دهد که دوز تابشی جمعی مورد انتظار برای مأموریت ۵ ساله حدود ۵۰ کیلو راد است. نتایج حاصل از پرتودهی در سایت بر روی RIU مقاوم‌سازی شده نشان می‌دهد که این واحد قادر به تحمل این سطح از تابش بوده و عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. همه راه‌کارهای پیشنهادی به‌صورت تجربی و تحت تابش کبالت ۶۰ ارزیابی شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که RIU مقاوم شده در برابر آسیب TID می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای قطعات رده فضایی در برخی کاربردها مورد استفاده قرار گیرد. ایده‌های مطرح شده در این مقاله می‌تواند در سایر زیرسیستم‌های ماهواره‌ای مانند OBDH یا TT&C نیز اعمال شود.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ مرداد ۱۴۰۳
بازنگری ۰۲ مهر ۱۴۰۳
پذیرش ۰۲ مهر ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۸ مهر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

تشعشعات فضایی
تست کبالت ۶۰
دوز یونیزاسیون جمعی
افزایش تاب آوری
زیرسیستم TT&C
واحد RIU

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezaomidi@znu.ac.ir

How to Cite this Article:

R. Omidi and A. Eidi, "Enhanced radiation tolerance of a remote interface unit using commercial-off-the-shelf components for space applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-13, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1495>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



علائم و اختصارات

TID	Total Ionizing Dose
SPENVIS	Space Environment Information System
ESA	European Space Agency
OMERE	Orbit-MEchanical Radiation Environment
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
GEO	Geostationary Earth Orbit

مقدمه

محیط فضا با چالش‌های متعددی از جمله خلاء، تغییرات دمایی شدید و تشعشعات فضایی پرنرژی روبرو است. از میان این چالش‌ها، دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب‌کننده قطعات الکترونیکی محسوب می‌شود. تشعشعات فضایی با برهم‌کنش با مواد نیمه‌رسانا، باعث ایجاد نقص‌های ساختاری و تغییر در خواص الکتریکی آن‌ها شده و در نهایت منجر به اختلال در عملکرد مدارهای الکترونیکی، کاهش عمر مفید قطعات و حتی از کار افتادن کامل سیستم می‌شود [۱]. اثرات TID بر قطعات الکترونیکی بسیار متنوع بوده و شامل پدیده‌هایی مانند ایجاد بارهای سطحی، تغییر در آستانه ولتاژ ترانزیستورها، افزایش جریان نشتی و کاهش بهره تقویت‌کننده‌ها می‌شود. این اثرات می‌تواند به صورت تدریجی و با گذشت زمان رخ دهد و در نهایت منجر به کاهش قابلیت اطمینان و عملکرد سیستم شود [۲، ۳]. با توجه به اهمیت حفظ عملکرد ماهواره‌ها در طول عمر مأموریت، یافتن راه‌کارهای موثر برای مقاوم‌سازی قطعات الکترونیکی در برابر TID از جمله مهم‌ترین چالش‌های مهندسی فضایی است. در این پژوهش، با بررسی دقیق نحوه آسیب‌رسانی TID به مدار دیجیتال مبتنی بر میکروکنترلر، روش‌های مختلف مقاوم‌سازی و بهینه‌سازی طراحی مدارها برای کاهش تأثیرات مخرب تشعشعات ارائه خواهد شد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فناوری‌های مختلفی برای کاهش اثرات TID بر قطعات الکترونیکی توسعه یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به طراحی مدارهای مقاوم در برابر تشعشعات، استفاده از مواد نیمه‌رسانا با تحمل‌پذیری بالاتر در برابر تشعشعات و به‌کارگیری راه‌کارهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای تشخیص و تصحیح خطاهای ناشی از تشعشعات فضایی اشاره کرد [۴-۷].

در این پژوهش، با بهره‌گیری از آخرین دستاوردهای علمی در زمینه مهندسی فضایی و الکترونیک، رویکردهای نوآورانه برای مقاوم‌سازی مدارهای دیجیتال برابر TID ارائه خواهد شد. نتایج این

پژوهش می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان و عمر مفید ماهواره‌ها و سایر سیستم‌های فضایی منجر شود. محیط فضا از نظر تشعشعات فضایی تا حدود بسیار زیادی شناخته شده است و نرم‌افزارهای مختلفی برای ارزیابی شرایط ماهواره یا فضاپیما در تراز مدار مورد نظر قابل استفاده می‌باشد. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به SPENVIS که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) توسعه یافته و برای محاسبه طیف انرژی ذرات و دوز جذب شده در مدارهای مختلف استفاده می‌شود، اشاره کرد. همچنین نرم‌افزار GEANT4 یک ابزار شبیه‌سازی تعاملی ذرات است که به‌طور گسترده در فیزیک انرژی بالا و مهندسی هسته‌ای به‌کار می‌رود و در شبیه‌سازی عبور ذرات از مواد و برهم‌کنش آن‌ها با ماده نیز کاربرد دارد. نرم‌افزارهای دیگری مانند OMERE نیز برای محاسبه محیط تشعشعی در مدارهای مختلف توسعه یافته‌اند. با استفاده از این نرم‌افزارها، مهندسان می‌توانند دوز جذب شده توسط قطعات الکترونیکی، اثر تشعشعات بر سلول‌های خورشیدی و سایر اجزای ماهواره را پیش‌بینی کرده و اقدامات لازم برای محافظت از آن‌ها را انجام دهند [۸].

ماهواره‌ها، صرف‌نظر از اینکه در مدار پایین (LEO)، متوسط (MEO) یا زمین‌آهنگ (GEO) قرار داشته باشند، به‌طور مداوم تحت تشعشعات فضایی قرار دارند. این تشعشعات، از ذرات پرنرژی خورشیدی تا ذرات محبوس شده در کمربندهای وان آلن، می‌توانند به مدارهای الکترونیکی، سلول‌های خورشیدی و دیگر اجزای حیاتی ماهواره‌ها آسیب جدی وارد کنند. شدت و نوع این آسیب به مدار ماهواره و نوع تشعشع بستگی دارد. ماهواره‌های LEO بیشتر در معرض شراره‌های خورشیدی هستند، ماهواره‌های MEO با چالش ذرات پرنرژی کمربندهای وان آلن روبرو هستند و ماهواره‌های GEO نیز به‌طور مداوم در معرض جریان ذرات پرنرژی باد خورشیدی قرار دارند. این ذرات می‌توانند به تدریج اجزای حساس ماهواره‌ها و سامانه‌های فضایی آسیب رسانده و عملکرد آن‌ها را کاهش دهند. به همین دلیل، مهندسان فضایی با طراحی دقیق و استفاده از مواد مقاوم در برابر تشعشع، تلاش می‌کنند تا عمر مفید ماهواره‌ها و سامانه‌های فضایی در تمام مدارها را افزایش داده و عملکرد پایدار آن‌ها را تضمین کنند. تشعشعات فضایی با هر ماهیتی، نشات گرفته از هر منبع یا چشمه‌ای، با هر اسمی، با هر انرژی یا توانی که باشند در نهایت یک‌سری اثراتی بر سامانه‌های فضایی خواهد داشت که غالباً معطوف به بخش‌های الکترونیکی ماهواره می‌باشد. در مراجع علمی و استانداردهای فضایی اثرات تشعشع که برای طراحی سامانه‌های فضایی باید در نظر گرفته شوند، در سه دسته قرار می‌گیرند: تخریب ناشی از TID، تخریب ناشی از TNID یا 1 NIEL یا 2 DDD و 3 SEE [۹]. در این بین تأثیرات SEE و TID بیشتر مورد توجه هستند و استانداردهای

پیشین، اهمیت نتایج این پژوهش در زمینه مهندسی فضایی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مروری بر روش‌های مقاوم‌سازی در برابر TID

برخورد پرتوها یا ذرات بیرون جو زمین به بخش‌های الکترونیکی ماهواره به زبان بسیار ساده از نظر فیزیکی دو حالت اثرگذاری دارد. حالت اول زمانی است که ذره به دلیل داشتن انرژی بالا یا سنگین بودن در مسیر حرکت خود پلاسمايي از زوج الکترون و حفره ایجاد کند. حال اگر این پلاسما در میدان الکتریکی واقع شده باشد، یک جریان لحظه‌ای به وجود می‌آید که این جریان لحظه‌ای اثرات بزرگ و در مقیاس قابل درک در پی خواهد داشت؛ مثلاً به‌طور ناخواسته یک بیت حافظه از صفر به یک تغییر وضعیت می‌دهد. به این دسته اثرات رخداد یکتا (SEE) می‌گویند. همه ذرات یا پرتوها قادر به ایجاد چنین جریان لحظه‌ای بزرگی نیستند یا به احتمالاً در ناحیه دارای میدان الکتریکی واقع نمی‌شوند. اما، گاهی برخورد پرتو یا ذرات محیط بیرون جو زمین یک‌سری نقص‌هایی در بلور یا نیمه‌هادی ایجاد می‌کند. این نقص‌ها در همان لحظه یا همان روز یا همان ماه اثر خود را نشان نمی‌دهد. بلکه به‌مرور زمان و با گذشت چند ماه به تدریج تعداد این نقص‌ها به حدی می‌رسد که عملکرد تراشه مختل می‌شود. این نقص‌ها قابل بازیابی یا اصلاح نیستند و رفته‌رفته در تراشه جمع می‌شود به همین خاطر نام دوز یونیزاسیون جمع‌شونده یا تجمعی به آنها اطلاق می‌شود [۱۳، ۱۲].

برای افزایش تاب‌آوری نسبت به اثرات SEE تا حدودی روش‌های مداری معقول و مطلوب وجود دارد [۱۶-۱۴]. اما در رابطه با اثر TID صرفاً باید به افزایش حفاظت اکتفا کرد یا به فکر تغییر بلور یا نیمه‌هادی به‌کار رفته در ساخت تراشه بود [۷-۲]. با توجه به پیچیدگی فناوری ساخت تراشه‌ها و محدودیت‌های دسترسی به فرآیند تولید آن‌ها، اعمال تغییرات اساسی در ساختار داخلی تراشه‌ها به‌منظور افزایش مقاومت در برابر تشعشعات، خارج از حیطه کنترل بسیاری از سازمان‌ها و پژوهشگاه‌ها است. لذا، تمرکز اصلی باید بر روی روش‌های حفاظت خارجی قطعات الکترونیکی قرار گیرد.

با این حال، رویکردهای سنتی حفاظت‌سازی با چالش‌های جدی مواجه هستند. افزایش ضخامت پوشش‌های محافظ مانند آلومینیوم، به‌منظور کاهش اثرات تشعشعات، به‌طور مستقیم منجر به افزایش جرم کلی سامانه فضایی و در نتیجه کاهش قابلیت‌های مانوری آن می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از مواد با چگالی بالاتر مانند سرب، اگر چه می‌تواند حفاظت بهتری را فراهم آورد، اما به دلیل افزایش چشمگیر جرم، عملاً قابل اجرا نیست. علاوه بر این، استفاده از مواد ترکیبی چندلایه [۱۸، ۱۷]

تست برای SEE و TID وجود دارد [۱۱، ۱۰]. در رابطه با افزایش تاب‌آوری در برابر SEE بسیار نوشته شده است و کارهای زیادی در این زمینه انجام شده است. اما در رابطه با اثرات TID با توجه به ماهیت فیزیکی آن، روش‌های مقاوم‌سازی کمتر قابل استفاده است. صرفاً تغییر فناوری ساخت تراشه‌ها و افزایش یا بهبود حفاظت‌گذاری در برابر این اثر در سال‌های گذشته مورد توجه بوده است. اما در این مقاله ایده‌های عملی برای افزایش تاب‌آوری در برابر این اثر مطرح و تبیین شده است. سپس نتایج کسب شده در پرتودهی با منبع کبالت ۶۰ گزارش می‌گردد؛ نتایج پرتودهی در سایت اتمی نشان‌دهنده کارایی ایده‌های مطرح شده در این مقاله می‌باشد. ایده‌هایی که صرفاً با استفاده از قطعات تجاری، بدون تحمیل هزینه مهندسی از جمله زمان اجراء هزینه مالی، افزایش وزن سامانه فضایی، افزایش توان مصرفی در یک پروژه فضایی قابل تحقق می‌باشد. روش‌های پیشین از جمله افزایش ضخامت حفاظت‌گذاری باعث افزایش وزن سامانه می‌شود، همچنین روش‌هایی مانند استفاده از نسخه پشتیبان نیز علاوه بر وزن سامانه، توان مصرفی بالاتری را تحمیل خواهند کرد. نوآوری‌ها و دستاوردهای مهم این مقاله در زمینه مقاوم‌سازی در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی به‌طور خلاصه عبارتند از:

۱. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی ایده استفاده از حفاظت‌گذاری موضعی.
۲. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی یک نمونه ساده از حفاظت‌گذاری چند لایه.
۳. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی ایده استفاده از کلیدزنی پویا.
۴. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی ایده غربالگری، شناسایی و جایگزینی قطعات حساس در برابر TID.
۵. ارزیابی تأثیر پرتودهی مستقیم و معکوس (پشت و روی برد).
۶. ارزیابی تأثیر حجم برنامه میکروکنترلر بر میزان تاب‌آوری نسبت به TID.

پس از مقدمه‌ای مختصر، در ادامه به بررسی جامع اثرات دوز یونیزاسیون تجمعی بر قطعات الکترونیکی، به‌ویژه واحد RIU¹ که هدف اصلی مطالعه حاضر است، پرداخته شده است. همچنین، شیوه‌های آسیب‌رسانی TID و چالش‌های ناشی از آن در محیط فضایی تشریح خواهد شد. سپس، روش‌های مختلف مقاوم‌سازی واحد RIU در برابر اثرات مخرب تشعشعات، مورد ارزیابی قرار گرفته و روش پیشنهادی این پژوهش معرفی خواهد شد. در بخش آزمایش‌ها، جزئیات آزمایش‌های پرتودهی انجام شده بر روی واحد RIU، شامل شرایط پرتودهی، دوزهای اعمال شده و روش‌های اندازه‌گیری، ارائه خواهد شد. در نهایت، نتایج حاصل از پرتودهی‌ها به‌طور جامع تحلیل شده و ضمن مقایسه با مطالعات

در انرژی و توانایی نفوذ آن‌ها در مواد است. به دلیل انرژی بالاتر و جرم بیشتر، پروتون‌ها توانایی نفوذ بیشتری در مواد، از جمله آلومینیوم که معمولاً در ساختار سامانه‌های فضایی استفاده می‌شود، دارند. در نتیجه، پروتون‌ها می‌توانند به عمق بیشتری از سامانه نفوذ کرده و آسیب‌های بیشتری را ایجاد کنند. الکترون‌ها به دلیل انرژی کمتر و جرم بسیار کم‌تر، توانایی نفوذ کمتری در مواد دارند. بسیاری از الکترون‌ها در لایه‌های بیرونی سازه متوقف شده و انرژی خود را از دست می‌دهند. همچنین باید توجه داشت که استفاده از چشمه کبالت ۶۰ برای شبیه‌سازی تأثیر ذرات باردار، به‌ویژه الکترون‌ها، دارای محدودیت‌هایی است. طیف انرژی ذرات گاما از چشمه کبالت ۶۰ با طیف انرژی ذرات باردار در محیط فضایی متفاوت است و این تفاوت می‌تواند بر نتایج شبیه‌سازی تأثیر گذار باشد. با این حال، استاندارد ESA استفاده از چشمه کبالت ۶۰ را به دلیل سهولت دسترسی و هزینه کمتر، به‌عنوان یک روش استاندارد برای ارزیابی تأثیر TID پیشنهاد می‌کند [۱۱]. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر تأثیر ذرات باردار، می‌توان از شتاب‌دهنده‌های ذرات استفاده کرد. در بحث نوع حفاظ نیز باید یادآور شد که برای کاهش اثرات تابش ترمزی، از موادی استفاده می‌شود که الکترون‌ها را به راحتی جذب کرده و باعث کاهش سرعت آن‌ها شوند. مواد سبک با چگالی کم مانند آلومینیوم، انتخاب‌های مناسبی برای این منظور هستند. این مواد به دلیل چگالی کم، احتمال وقوع برهم‌کنش‌های الکترون-الکترون را افزایش می‌دهند و در نتیجه، الکترون‌ها انرژی خود را سریع‌تر از دست می‌دهند. اما سرب به دلیل چگالی بسیار بالا، توانایی جذب بالایی پروتوهای گاما را دارد. اتم‌های سرب دارای تعداد زیادی الکترون هستند که با برهم‌کنش با فوتون‌های گاما، انرژی آن‌ها را جذب کرده و باعث کاهش شدت پرتو می‌شوند.

جدول ۱- مشخصات ماموریت مفروض برای شبیه‌سازی در محیط SPENVIS.

Table 1. Assumed mission specifications for simulation in SPENVIS environment.

Modeling Specifications	
1 jun 2023	Launch Time
2020 to 2031	Solar Cycle
2024	Solar Cycle Maximum
۵ سال	Mission Duration
GEO	Orbit
IGE-2006(upper flux)	Trapped Electron Model
AP8-MAX	Trapped Proton Model
ESP	Solar Proton Model
GCR_ISO (Solar minimum)	Galactic Cosmic Ray Model

نیز با چالش‌هایی همچون پیچیدگی فرآیند تولید و عدم وجود مطالعات جامع در این زمینه هنوز نیازمند مطالعات و تحقیقات بیشتری است تا در سامانه‌های فضایی کاربردی شود.

شبیه‌سازی محیط تشعشعات فضایی و برآورد میزان TID در ماموریت مفروض

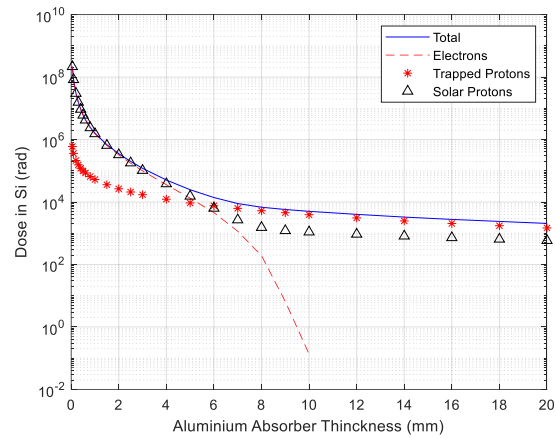
دوز یونیزاسیون تجمعی یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های فضایی است. میزان TID که یک سامانه فضایی در طول ماموریت خود تجربه می‌کند، به عوامل متعددی از جمله تراز مدار، مدت زمان ماموریت، فعالیت خورشیدی، جنس و ضخامت پوشش‌های محافظ بستگی دارد. برای تخمین تقریبی دوز TID دریافتی توسط یک سامانه فضایی، می‌توان از نرم‌افزارهای تخصصی مانند SPENVIS استفاده کرد. این نرم‌افزارها با در نظر گرفتن مدل‌های محیط فضایی و پارامترهای مدار، امکان محاسبه دوز تابشی را فراهم می‌آورند. به‌عنوان یک برآورد کلی، ماهواره‌های با تراز مدار پایین و عمر کوتاه‌تر، معمولاً دوز TID کمتری را تجربه می‌کنند. برای مثال، ماهواره‌هایی با تراز مدار پایین (LEO) و عمر کمتر از سه سال، با در نظر گرفتن پوشش محافظ آلومینیومی به ضخامت دو میلی‌متر، معمولاً دوز TID کمتر از ۵ کیلوارد را دریافت می‌کنند. با افزایش ارتفاع مدار و مدت زمان ماموریت، دوز TID به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای ماموریت‌های طولانی‌مدت و ترازهای مدار بالا، مانند ماموریت‌های بین‌سیاره‌ای، دوز TID می‌تواند به صدها کیلوارد یا حتی مگا راد برسد. مقاومت قطعات الکترونیکی در برابر TID به نوع ماده نیمه‌رسانا، فرآیند ساخت و طراحی مدار بستگی دارد. قطعات فضایی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در برابر دوزهای بالای TID مقاوم‌تر باشند. با این حال، حتی قطعات فضایی نیز دارای محدودیت‌هایی در تحمل دوز تابشی می‌باشند. برای شبیه‌سازی ابتدا مشخصات اولیه مطابق جدول ۱ را برای محاسبات مربوط به آسیب‌های پرتویی TID، DD و SEE در یک ماموریت ۵ ساله در مدار GEO در طول جغرافیایی ۸۱ درجه شرقی آورده شده، در نظر می‌گیریم. نتایج شبیه‌سازی به‌طور کامل در شکل ۱ آمده است همچنین بخشی از نتایج به‌صورت عددی برای مشاهده آسان‌تر و برای ضخامت‌های معقول سازه آلومینیومی در جدول ۲ نشان داده شده است. اگر ضخامت سازه حدود ۲ میلی‌متر و ضخامت باکس را نیز ۲ میلی‌متر در نظر بگیریم، مجموع ضخامت حفاظ ۴ میلی‌متر باید در نظر گرفته شود. مطابق شبیه‌سازی TID کل حدود ۵۰ کیلوارد برای دوره ماموریت خواهد بود.

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی در محیط SPENVIS نشان می‌دهد، ذرات باردار موجود در محیط فضایی، تأثیرات متفاوتی بر روی سامانه‌های فضایی دارند. یکی از دلایل اصلی تفاوت تأثیر الکترون‌ها و پروتون‌ها، تفاوت

دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) است. مقادیر TID اعلام شده در مراجع و استانداردها اغلب به عنوان یک میانگین برای طیف گسترده‌ای از قطعات و فناوری‌های مختلف ارائه می‌شوند. بنابراین، این مقادیر لزوماً نشان دهنده مقاومت دقیق قطعاتی که در یک طراحی خاص استفاده می‌شوند، نیستند. علاوه بر این، عوامل دیگری مانند نرخ دوز، نقطه کار قطعه در سیستم و شرایط محیطی نیز بر مقاومت قطعات در برابر TID تأثیر گذار هستند. به منظور اطمینان از عملکرد صحیح سامانه فضایی در طول ماموریت، مفهوم ضریب طراحی ایمنی^۱ (RDM) معرفی شده است [۲۰، ۱۹]. ضریب RDM به عنوان نسبت دوز TID که یک قطعه می‌تواند تحمل کند به دوز TID پیش‌بینی شده برای ماموریت تعریف می‌شود. مقدار RDM بالا نشان‌دهنده حاشیه ایمنی بیشتری برای سامانه فضایی در برابر اثرات مخرب TID است. مقدار ایده‌آل برای RDM معمولاً ۱۰ در نظر گرفته می‌شود، به این معنی که قطعات باید قادر به تحمل ده برابر دوز TID پیش‌بینی شده برای ماموریت باشند. با این حال، دستیابی به چنین مقدار RDM بالایی ممکن است از نظر هزینه و پیچیدگی طراحی، چالش‌برانگیز باشد. استانداردهای جدیدتر [۱۹] شرایط آسان‌تری دارند و حتی تحت شرایطی RDM را حتی می‌توان یک در نظر گرفت. در این پژوهش مقدار RDM برابر یک در نظر گرفته شده است.

واحد RIU یا C&M مورد مطالعه

تجهیزی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، به‌طور معمول با دو نام مختلف در ماهواره‌ها و فضاپیماها شناخته می‌شود و هدف از این مطالعه، افزایش تاب‌آوری آن در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی بوده است. در برخی سیستم‌های فضایی به عنوان واحد کنترل مانتورینگ محلی (C&M) و در برخی به عنوان واحد راه دور محلی (RIU) از آن یاد می‌شود. این واحد در محل قرار گرفته در سامانه فضایی، به عنوان واسط بین زیرسیستم تحت کنترل و پایش خود و زیرسیستم TT&C یا OBDH عمل می‌کند. دستورات ارسال شده از TT&C یا OBDH را در زیرسیستم تحت فرمان خود اعمال یا اجرا می‌کند. همچنین داده‌های خانه‌داری^۲ را از زیرسیستم تحت نظر خود جمع‌آوری و تحویل TT&C یا OBDH ماهواره می‌دهد. علاوه بر این یک سری الگوریتم‌های کنترلی یا پردازش‌های لازم برای سیستم هدف نیز در این واحد ممکن است انجام شود. به عنوان نمونه RIU یا C&M محلی مورد بحث در این مقاله موظف است از طریق باس CAN با OBDH ماهواره تبادل داده و دستور داشته باشد. همچنین یک سری الگوریتم‌ها مانند الگوریتم مدیریت خطا و الگوریتم مدیریت مخابراتی به صورت خودکار یا دستی را در زیرسیستم مخابراتی تحت کنترل و پایش خود به اجرا بگذارد.



شکل ۱- نتایج شبیه‌سازی میزان دوز یونیزاسیون تجمعی بر حسب ضخامت حفاظ آلومینیوم.

Fig. 1. Simulated results of total ionizing dose as a function of aluminum shield thickness.

جدول ۲- بخشی از نتایج نمودار شکل ۱ به صورت عددی.

Table 2. Part of the data from figure 1, presented numerically.

Thickness of aluminum (mm)	Total ionizing dose (rad)
0.05	2.17E+08
0.10	8.33E+07
0.20	3.03E+07
0.30	1.58E+07
0.40	9.43E+06
0.50	6.14E+06
0.60	4.29E+06
0.80	2.45E+06
1.00	1.59E+06
1.50	6.87E+05
2.00	3.53E+05
2.50	1.99E+05
3.00	1.20E+05
4.00	5.06E+04

اما نکته بعدی میزان تاب‌آوری قطعات در برابر TID است. که با شبیه‌سازی قابل ارزیابی نیست و نیاز به پرتودهی دارد. نتایج پرتودهی در بخش‌های آتی ارائه و بحث و بررسی خواهد شد. یکی از چالش‌های اصلی در طراحی سامانه‌های فضایی، ارزیابی مقاومت قطعات الکترونیکی در برابر

استفاده از سوکت‌های محافظتی برای تراشه‌ها به منظور بهبود تاب‌آوری در برابر TID مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل شماتیکی از برد مدار چاپی طراحی شده را نشان می‌دهد که در آن حفره‌های ایجاد شده است. حفره‌های موجود بر روی برد مدار چاپی معمولاً به دو منظور اصلی ایجاد می‌شوند: محل قرارگیری پیچ‌ها برای اتصال برد به سایر اجزا و محل عبور پایه‌های قطعات سوراخ‌دار^۱. با این حال، برخی حفره‌ها با هدف حفاظت از مدار در برابر آسیب‌های تشعشعات، طراحی شده‌اند. چنانچه در شکل قابل مشاهده است، در برخی موارد، حفره‌های حفاظتی در طراحی لحاظ شده‌اند اما پر نشده‌اند. دلایل اصلی این امر عبارت‌اند از: الف) ابعاد بسیار کوچک حفره‌ها؛ این حفره‌ها بسیار کوچک هستند و پر کردن آن‌ها متأسفانه باعث خرابی مدار می‌شود و نیازمند تجهیزات تخصصی است. ب) کاربرد حفره‌ها در قطعات غیرفعال: این حفره‌ها برای قطعات غیرفعال مانند خازن‌ها و مقاومت‌ها تعبیه شده‌اند که به دلیل ساختار ساده‌تر، کمتر در معرض آسیب‌های ناشی از تشعشعات TID قرار می‌گیرند. به همین دلایل، پر کردن این حفره‌ها در برخی موارد از اولویت خارج شده است. شایان ذکر است که حفره‌های ایجاد شده با آلیاژ قلع-سرب پوشش‌دهی شده‌اند. آلیاژ سرب و قلع به دلیل نقطه ذوب پایین، قابلیت لحیم‌کاری آسان با هویه و سازگاری با مواد تشکیل‌دهنده برد مدار چاپی، به‌عنوان لایه حفاظتی انتخاب شد. این آلیاژ به‌راحتی در دسترس بوده و می‌تواند حفره‌های ایجاد شده را به‌طور کامل پر کند.

اصل بنیادین روش پیشنهادی دوم، یعنی کلیدزنی پویا، بر پایه درک عمیق از سازوکار اثرگذاری دوز یونش تجمعی (TID) بر ساختار بلور تراشه است. به‌طور کلی، خاموش کردن دستگاه گاهی اوقات می‌تواند پاسخ تشعشع را بهبود بخشد [۲۲، ۲۱]. البته استثناهایی هم در این زمینه وجود دارد [۲۳]. با خاموش کردن دوره‌ای بخش‌هایی از مدار، فرصت کافی برای بازترکیب حامل‌های بار و ترمیم آسیب‌های ناشی از پرتوهای یونیزان فراهم می‌شود. این رویکرد، ضمن کاهش میزان دوز جذب شده توسط تراشه، از تجمع آسیب‌ها در طول زمان جلوگیری کرده و در نتیجه، پایداری عملکرد طولانی مدت مدار را تضمین می‌کند. شایان ذکر است که اجرای موفق این روش مستلزم طراحی دقیق مدارهای منطقی کنترل‌کننده و توسعه الگوریتم‌های بهینه برای تعیین زمان و مدت کلیدزنی است. به‌عبارت دیگر، کلیدزنی پویا صرفاً مستلزم تغییر در نحوه عملکرد مدار بوده و هزینه‌های تولید را افزایش نمی‌دهد. در شکل شمایی از ساختار دوگانه که غالباً در سیستم‌های افزونگی دوگانه سرد یا گرم^۲ دیده می‌شود، نشان داده شده است. در این ساختار دو برد کاملاً مشابه در کنار هم قرار می‌گیرند و به موازات هم یا به‌عنوان یکد یکدیگر به کار برده می‌شوند. اما در این پژوهش، به ازای هر یک کیلوراد پرتودهی (تقریباً هر یک ساعت) بین این دو بخش کلیدزنی انجام شده است، تا تاثیر کلیدزنی روشن و خاموش بودن متوالی بررسی گردد.

با توجه به کم بودن تعداد ورودی/خروجی‌ها و سرعت پردازش پایین بر حسب مصالحه‌های انجام شده، برای واحد RIU مورد نیاز در زیرسیستم مورد نظر، میکروکنترلر به‌عنوان پردازنده اصلی این واحد در نظر گرفته شده است. میکروکنترلر مورد استفاده دارای ماژول‌های لازم جهت تبادل داده با CAN اصلی و یکدک و همچنین مبدل آنالوگ به دیجیتال داخلی است. با توجه به وظایف تعریف شده برای واحد مورد مطالعه در این پژوهش، علاوه بر میکروکنترلر، یک سری رگولاتور تغذیه، فرستنده گیرنده CAN، فرستنده گیرنده دیفرانسیلی RS485، مبدل سطح ولتاژ، سنسور دمای دیجیتال و برخی تراشه‌های دیگر نیز در واحد قرار دارد. در طول تست پرتودهی نیز مؤلفه‌های زیر مدام پایش می‌گردد:

- جریان کشی کل تجهیز.
- ارتباط CAN (اصلی و یکدک).
- ارسال و دریافت با پروتکل SPI (روی خود تجهیز).
- سنسور دمای نصب شده روی برد.
- دو نمونه ولتاژ آنالوگ خوانده شده با ADC.
- چند ورودی خروجی دیجیتال (نوشتن و خواندن مقدار دیجیتال پایه‌ها).

راه کارهای پیشنهادی جهت افزایش تاب‌آوری TID

جهت ارتقای تاب‌آوری در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) در تراشه‌های یک سامانه فضایی، با فرض استفاده از قطعات تجاری و عدم دسترسی به قطعات فضایی، راه کارهای زیر در این مقاله پیشنهاد و کارایی آنها بر پرتودهی سنجیده می‌شود:

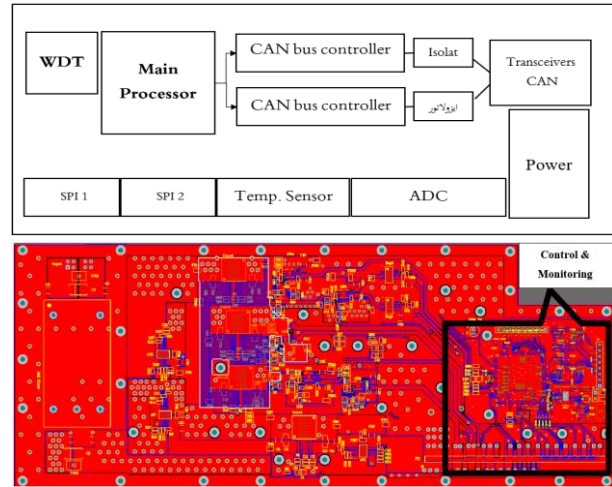
- حفاظت موضعی: اعمال پوشش‌های محافظتی بر روی نواحی بحرانی تراشه به منظور کاهش دوز جذب شده.
- کلیدزنی پویا: قطع و وصل کردن تغذیه تجهیز اصلی و تجهیز پشتیبان.
- غربالگری تراشه‌های ضعیف: شناسایی و حذف تراشه‌هایی که تاب‌آوری کمتری دارند پیش از بهره‌برداری.

برای ارزیابی کارایی روش حفاظت موضعی، رویکردی مبتنی بر ایجاد حفره‌های محافظتی در برد مدار چاپی و پوشش‌دهی آن‌ها با آلیاژ قلع و سرب اتخاذ شد. با تمرکز بر نواحی حساس تراشه و اجتناب از افزایش ضخامت کلی محافظ، تلاش شده است تا حداکثر میزان حفاظت با حداقل مواد مصرفی حاصل شود. به‌همین منظور، حفره‌هایی در برد مدار چاپی ایجاد و با آلیاژ مذکور پر شده است. لازم به‌ذکر است که در صنایع فضایی، روش‌های مشابه به ویژه

در رویکرد سوم، با هدف افزایش تاب‌آوری، شناسایی و جایگزینی قطعات با حساسیت بالاتر به TID در اولویت قرار گرفته است. این رویکرد مستلزم انجام تست‌های پرتودهی گسترده و تحلیل دقیق داده‌های حاصل از آن‌ها است. با این حال، تغییر در طراحی مدار و جایگزینی قطعات، چالش‌های مرتبط با زمان‌بندی پروژه و هزینه‌ها را به همراه دارد. لذا، اجرای این روش در مراحل اولیه طراحی سیستم فضایی ضروری است تا فرصت کافی برای اصلاح و بهبود طراحی فراهم شود. در این پژوهش، با توجه به ماهیت تحقیقاتی پروژه، دو مرحله تست پرتودهی با فاصله زمانی مناسب انجام شد تا امکان ارزیابی عملکرد قطعات، شناسایی نقاط ضعف و انجام اصلاحات لازم فراهم گردد. در مورد نمونه مطالعاتی این مقاله یعنی برد RIU یک سری تست اولیه انجام شده است و قطعه‌ای که کمترین مقاومت در برابر TID داشته شناسایی گردید. سپس برای تست‌های سری دوم یک قطعه جایگزین استفاده شد. نتایج پرتودهی این جایگزینی نیز در بخش آتی بحث و بررسی خواهد شد.

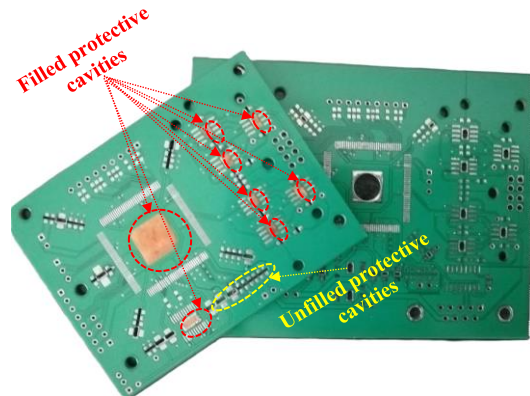
در این پژوهش، علاوه بر ارزیابی روش‌های پیشنهاد شده در این مقاله برای افزایش تاب‌آوری، موارد دیگری نیز به صورت پرتودهی بررسی و نتایج آن در این مقاله منعکس شده است. مورد اول بررسی تأثیر حجم نرم افزار (میزان استفاده از حافظه برنامه‌نویسی پردازنده) و فرکانس کاری پردازنده بر تاب‌آوری است. به این صورت که در این پژوهش دو نسخه مشابه از سخت‌افزار RIU، اما با حجم برنامه متفاوت و فرکانس کاری متفاوت نیز پرتودهی گردیده است. علاوه بر این در این پژوهش به بررسی تأثیر جهت تابش پرتو بر آسیب‌پذیری قطعات الکترونیکی نیز پرداخته شده است. این سؤال تحقیقاتی، با هدف شناخت بهتر رفتار قطعات الکترونیکی در محیط‌های پرتوزا و ارائه راه‌کارهای بهینه‌سازی حفاظت از آن‌ها، مطرح گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، اطلاعات ارزشمندی در خصوص تأثیر جهت تابش پرتو بر میزان آسیب‌پذیری قطعات ارائه داده و به غنی‌سازی دانش موجود در این حوزه کمک کرده است.

در بخش‌های پیش رو، به بررسی نتایج آزمایش‌های پرتودهی انجام شده بر روی نمونه‌های مجهز به راه‌کارهای پیشنهادی پرداخته می‌شود. با تحلیل داده‌های حاصل از این پرتودهی، کارایی هر یک از روش‌های حفاظت موضعی، کلیدزنی پویا و جایگزینی قطعات در افزایش تاب‌آوری مدار ارزیابی خواهد شد. همچنین، تأثیر جهت تابش پرتو بر آسیب‌پذیری قطعات و تأثیر جایگزینی قطعات بر عملکرد کلی مدار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با ارائه نتایج تجربی و تحلیل نتایج، به ارزیابی جامع روش‌های پیشنهادی پرداخته شده و بهترین راه‌کار برای افزایش تاب‌آوری مدار در برابر دوز یونش تجمعی (TID) پیشنهاد خواهد شد.



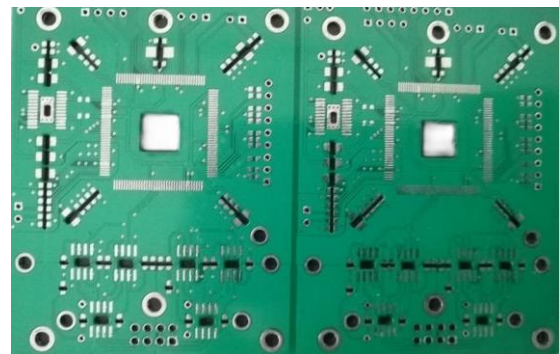
شکل ۲- بلوک دیاگرام عملکردی و شمای سخت افزار واحد RIU در پیکربندی نهایی محموله.

Fig. 2. Block diagram and hardware of the RIU unit in the final payload.



شکل ۳- برد مدار چاپی پیشنهادی حاوی حفره‌های محافظتی و تصویر نمونه پر شده حفره‌ها.

Fig. 3. Proposed printed circuit board with protective cavities and an image of the filled cavities as an example.



شکل ۴- شمایی از ساختار دوگانه از برد RIU جهت تست پرتودهی و ارزیابی اثر کلیدزنی.

Fig. 4. Schematic of a dual-RIU structure for radiation testing and switching evaluation.

پرتودهی: چالش‌ها، جزئیات و نتایج

یکی از چالش‌های اصلی در انجام پژوهش‌های مرتبط با تاب‌آوری قطعات الکترونیکی در برابر پرتوهای یونیزان، محدودیت‌های موجود در دسترسی به تجهیزات تست پرتودهی است. به ویژه در زمینه تست‌های دوز یونش تجمعی، امکانات موجود بسیار محدود و همراه با محدودیت‌هایی است. در این پژوهش، با توجه به محدودیت‌های موجود، از منابع کبالت ۶۰ موجود استفاده شده است. با این حال، این منابع با چالش‌هایی همچون ظرفیت محدود، ناهمگونی میدان پرتو و محدودیت‌های زمانی مواجه هستند.

- محدودیت‌های منابع کبالت ۶۰: منابع کبالت ۶۰ موجود عمدتاً در مراکز درمانی و سازمان انرژی اتمی مستقر هستند. استفاده از این منابع به دلیل اولویت‌های درمانی و محدودیت‌های دسترسی با چالش‌هایی همراه می‌باشد.

- ناهمگونی میدان پرتو: میدان پرتو در بسیاری از منابع کبالت ۶۰ موجود، یکنواخت نبوده و دارای شیب دوز است. این موضوع باعث ایجاد مشکلاتی در کنترل یکنواخت بودن دوز دریافتی توسط نمونه‌ها می‌شود.

- محدودیت‌های هندسی: ابعاد محفظه‌های پرتودهی در برخی موارد کوچک بوده و امکان قرارگیری نمونه‌های بزرگ از جمله تجهیز RIU را محدود می‌کند.

- محدودیت‌های زمانی: تخصیص زمان برای انجام آزمایش‌های پرتودهی در برخی موارد با محدودیت‌هایی همراه بود و باعث طولانی شدن فرایند آزمایش می‌گردد.

با توجه به چالش‌های فوق، برای انجام آزمایش‌های پرتودهی در این پژوهش، از منبع کبالت ۶۰ موجود در سایت انرژی اتمی کرج استفاده شده است. مطابق استاندارد پرتودهی و تست TID اژانس فضایی اروپا [۱۱]، پرتودهی سامانه فضایی مورد مطالعه در پنجره نرخ استاندارد (۰/۳۶ تا ۱۸۰ /krad(Si) ساعت) قابل انجام است. در این پژوهش، با تنظیم فاصله صفحه نصب تجهیز از منبع، آهنگ دوز به مقدار ۰/۹۸۹۶ کیلو راد در ساعت تنظیم گردیده است. صفحه نصب دارای ابعاد ۲۸×۲۸ سانتی‌متر مربع بوده که مطابق با استاندارد، عدم یکنواختی میدان تابش در آن کمتر از ۱۰٪ بود. ارزیابی صحت عملکردی نمونه‌ها نیز در هر ساعت (تقریباً در هر یک کیلو راد) انجام شده و نتایج ثبت شده است.

به منظور ارزیابی تاب‌آوری اولیه نمونه‌های RIU در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی، دو نمونه مشابه از نظر سخت‌افزار اما متفاوت از نظر نرم‌افزار (حجم برنامه و فرکانس کاری پردازنده) در شرایط استاندارد آزمایشگاه پرتودهی کرج تحت آزمایش قرار گرفتند. این آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای تست TID [۱۱] و با هدف تعیین حد تاب‌آوری

اولیه نمونه‌ها انجام شدند. هر دو نمونه در معرض دوز پرتوی قرار گرفتند. در دوز تقریبی ۲۰ و ۲۳ کیلو راد، افزایش ناگهانی جریان مصرفی و در نتیجه از دست رفتن عملکرد مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که حد تاب‌آوری اولیه نمونه‌ها در این محدوده قرار دارد. نتایج تجزیه و تحلیل این دو نمونه عبارت است از:

- تأثیر نقطه کار میکروکنترلر RIU: بررسی نتایج نشان می‌دهد که نقطه کار مدار، شامل حجم برنامه و فرکانس کاری، تأثیر قابل توجهی بر میزان تاب‌آوری دارد. نمونه‌ای که حجم نرم‌افزاری و فرکانس کاری بالاتری داشت، در دوز پایین‌تری دچار شکست شد.
- انتشار خرابی: پس از تجزیه و تحلیل نمونه‌های آسیب دیده، مشخص شد که خرابی یک قطعه خاص منجر به خرابی سایر قطعات شده است. این نتیجه منجر به پیشنهاد ایده غربالگری، شناسایی و تعویض قطعات حساس به TID گردید.

با تکیه بر نتایج حاصل از پرتودهی مرحله اول و با هدف ارزیابی اثربخشی روش‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی (حفاظت موضعی و کلیدزنی پویا، غربالگری و جایگزینی قطعه حساس نسبت به TID)، مرحله دوم آزمایش‌های پرتودهی برنامه‌ریزی و اجرا شد.

ساختار پرتودهی با منبع کبالت ۶۰ برای سری دوم در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشخص می‌باشد نمونه‌ها بر روی یک صفحه در فاصله مشخصی از چشمه قرار داده شده‌اند. با تنظیم سازه آسانسوری زیر برد می‌توان فاصله را کم و زیاد کرد. هر چه قدر فاصله نمونه‌ها از چشمه بیشتر شود، نرخ پرتودهی کاهش می‌یابد و با نزدیک کردن صفحه به چشمه آهنگ پرتودهی بیشتر می‌شود. به هر حال، چنانچه اشاره شده فاصله از چشمه به گونه‌ای تنظیم شده است که نرخ دوز حدود یک کیلو راد در ساعت باشد. از هر نمونه نیز زوج سیم برای تغذیه و یک زوج سیم برای ارتباط CAN خارج شده و به منبع تغذیه و لب‌تاب در بیرون از اتاق پرتودهی متصل شده است. قطع و وصل کردن تغذیه بردها و پایش عملکرد آنها به واسطه این سیم‌کشی‌ها انجام شده است. در تمام صفحه پرتودهی (۲۸ در ۲۸ سانتی‌متر مربع) با استفاده از دزیتر آهنگ دوز به صورت دوره‌ای اندازه‌گیری شده تا این اطمینان حاصل شود که در کل دوره پرتودهی (حدود ۶۰ ساعت متوالی) عدم یکنواختی از ۱۰٪ مجاز در استاندارد [۱۱] تجاوز نکند.

در پرتودهی یک تجهیز پیچیده مانند RIU، سطح تاب‌آوری با پایش دو عامل تعیین می‌شود. عامل اول و رایج عبارت است از میزان جریان کشی تجهیز در حین پرتودهی و عامل دوم صحت عملکردی تجهیز در طول پرتودهی می‌باشد. پایش جریان کشی عبارت است از ثبت میزان جریان مصرفی تجهیز در بازه‌های زمانی مشخص که این بازه زمانی برای این پژوهش در هر ساعت تقریباً معادل یک کیلو راد

جریان‌کشی و مشکل رگولاتور از کار افتاده‌اند و سایر بخش‌ها کارایی خود را بر اثر پرتودهی از دست نداده‌اند.

به‌طور خلاصه هر یک از نمونه‌ها در یک سطح مشخصی از پرتودهی بر اثر رشد نمایی جریان‌کشی کارایی خود را از دست داده‌اند این مقادیر عبارتند از: نمونه یک (بورد اصلی با پرتودهی در دو حالت مقابل و پشت) با سطح تاب‌آوری ۲۶/۵ کیلو راد؛ نمونه دو (بورد اصلی با پرتودهی از پشت با شیلد محلی حدود ۲ میلی‌متر پشت شده با قطع و سرب به اضافه یک ورق نازک آلومینیومی) با سطح تاب‌آوری ۲۶ کیلو راد؛ نمونه سه (بورد با کلیدزنی یا روشن/خاموش شدن متوالی) با سطح تاب‌آوری ۳۷ کیلو راد و در نهایت در رابطه با نمونه چهار (جایگزینی قطعه ضعیف)، حداقل تا حدود ۶۰ کیلو راد هیچ مشکلی در نمونه دیده نشد.

تحلیل نتایج آزمایش‌های مرحله دوم، دستاوردهای ارزشمندی را در مورد تأثیر روش‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی بر تاب‌آوری مدارها ارائه می‌دهد. نتایج تجزیه و تحلیل پرتودهی سری دوم عبارت است از:

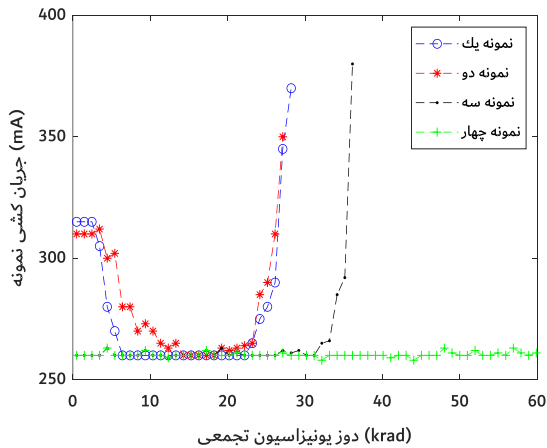
- تأثیر جهت تابش: آزمایش‌ها نشان داد که جهت تابش پرتو (از رو یا پشت) تأثیر قابل توجهی بر تاب‌آوری مدار ندارد.
- حفاظت موضعی: استفاده از لایه حفاظتی سرب و قلع به ضخامت ۲ میلی‌متر تأثیر قابل توجهی در افزایش تاب‌آوری مدار نداشت. بررسی‌های بیشتر نشان داد که روش‌های پیچیده‌تر حفاظتی مورد نیاز است. دلیل این موضوع ممکن است به اثر تابش‌ها یا ذرات ثانویه مرتبط باشد. یا ممکن است به دلیل تفاوت ماهیت و نحوه اثرگذاری کبالت ۶۰ با نحوه اثرگذاری TID فضایی که ناشی از تابش الکترون‌ها و یون‌های سبک می‌باشد، مرتبط باشد. دلیل استفاده از لایه حفاظتی سرب و قلع این بود که این آلیاژ قابل دسترس است و با حرارت هویه به راحتی حفره‌های ایجاد شده را پر می‌کند. همچنین با مواد به کار رفته در برد مدار چاپی سازگار می‌باشد.
- کلیدزنی پویا: روش کلیدزنی پویا با فرکانس ۵۰٪ (یک ساعت روشن و یک ساعت خاموش) منجر به افزایش قابل توجه تاب‌آوری شد. با این حال، بررسی تأثیر سایر فرکانس‌های کلیدزنی می‌تواند به بهینه‌سازی این روش کمک کند.
- جایگزینی قطعات بحرانی: جایگزینی قطعه بحرانی با قطعه‌ای با تاب‌آوری بالاتر، منجر به افزایش قابل توجه تاب‌آوری مدار تا ۶۰ کیلو راد شد.

در این پژوهش، چندین ایده عملی برای افزایش تاب‌آوری در برابر TID مطرح و ساختارهای خاصی از این ایده‌ها با پرتودهی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مخرب بودن پرتودهی و غیر قابل استفاده بودن نمونه‌های پرتودهی شده، تست حالت‌های مختلف هر یک از ایده‌های

پرتودهی می‌باشد. برای ممانعت از آسیب به سایر بخش‌های سامانه فضایی معمولاً زمانی که جریان تجهیز از یک درصد مشخص مثلاً ۲۰٪ جریان‌کشی نامی بیشتر می‌شود؛ تجهیز به‌عنوان تجهیز خراب شناسایی می‌گردد. در برخی تجهیزات ممکن است بدون افزایش محسوس در جریان‌کشی تجهیز، بخشی از توابع عملکردی را از دست ببرد؛ که در این حالت نیز میزان دوزی که باعث از دست رفتن بخشی از توابع تجهیز شده است را به‌عنوان سطح تاب‌آوری گزارش می‌شود. بر این اساس، در این مقاله نیز دو سری نمودار بر حسب میزان پرتودهی گزارش شده است. در شکل ۶ میزان جریان‌کشی نمونه‌ها بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی و در شکل عملکرد تابعی نمونه‌ها بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی نشان داده شده است. البته لازم به یادآوری است که تجهیز RIU، توابع عملکردی مختلفی دارد که در بخش قبلی به آن اشاره شد؛ اما برای جلوگیری از تکرار نمودارهای فاقد اطلاعات جدید، صرفاً عملکرد قرائت سنسور دما در این مقاله ارائه شده است.

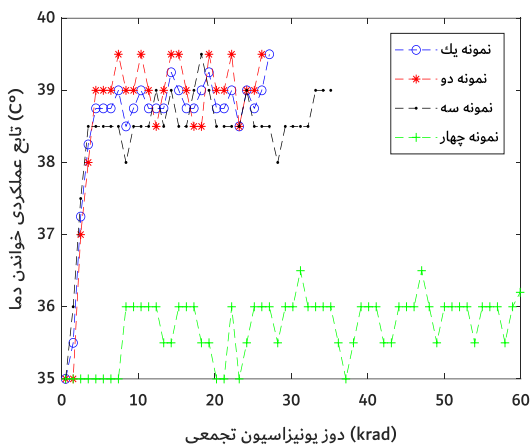
چنانچه اشاره شد در شکل ۶ میزان جریان‌کشی نمونه‌های تحت پرتودهی بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی نشان داده شده است. محور افقی میزان دوز تجمعی است که هر یک کیلو راد با توجه به آهنگ چشمه کبالت ۶۰ حدود یک ساعت پرتودهی می‌باشد. محور عمودی این نمودار نیز میزان جریان‌کشی نمونه‌ها بر حسب میلی‌آمپر را نشان می‌دهد. نمونه‌هایی که از قطعه تغذیه اولیه استفاده کرده‌اند، جریان‌کشی لحظه شروع آنها حدود ۳۱۵ میلی‌آمپر و برد با قطعه جدید تغذیه، جریان‌کشی لحظه شروع ۲۶۰ میلی‌آمپر دارد. در نمونه‌هایی که جریان‌کشی اولیه بالاتری دارند حدود ۶-۷ ساعت پس از پرتودهی کاهش ناگهانی جریان‌کشی ثبت شده است. همه این نمونه‌ها از یک رگولاتور مشابه استفاده کرده‌اند به همین دلیل رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. با افزایش مدت زمان پرتودهی اولین نشانه از افزایش نمایی جریان‌کشی در نمونه یک و نمونه دو پس از حدود ۲۶ ساعت پرتودهی مشاهده می‌شود. به دنبال این افزایش نمایی جریان‌کشی، ارزیابی عملکردی نیز نشان دهنده خرابی و عدم امکان تبادل داده با نمونه می‌باشد. این جریان‌کشی برای نمونه سه در دوز تجمعی بالاتر رخ داده است و برای نمونه چهار تا ۶۰ کیلو راد، یعنی حتی پس از ۶۰ ساعت پرتودهی مشکلی در جریان‌کشی مشاهده نشده است.

چنانچه اشاره شد، در شکل نیز دمای سنسور روی هر نمونه نمایش داده شده است. هدف از ارایه دمای خوانده شده اطمینان از صحت عملکرد تابعی نمونه در طول پرتودهی است. این نمودارها نشان می‌دهد که تا زمانی که جریان‌کشی نمونه در محدوده مورد انتظار باشد و حالت صعود نمایی رخ نداده است نمونه‌ها به درستی کار می‌کنند و توابع عملکردی لازم را فراهم می‌کنند. با کنار هم قرار دادن نتایج شکل ۶ و شکل می‌توان نتیجه گرفت در نمونه‌های مختلف RIU همگی بر اثر



شکل ۶- جریان کشی (میلی آمپر) نمونه‌های تحت پرتودهی بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی (کیلو راد).

Fig. 6. Current (mA) of irradiated samples vs. total dose (kRad).



شکل ۷- دمای خوانده شده از نمونه‌های تحت پرتودهی بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی (کیلو راد).

Fig. 7. Measured temperature of irradiated samples as a function of total ionization dose (kRad).

جمع بندی

در این پژوهش، با هدف افزایش تاب‌آوری مدارهای الکترونیکی در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) و با استفاده از قطعات تجاری، راه‌کارهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های پرتودهی نشان داد که نمونه اولیه، بدون اعمال هیچ‌گونه روش مقاوم‌سازی، تا دوز ۲۰ کیلو راد عملکرد خود را حفظ نمود. این نتیجه، حاکی از پتانسیل بالای قطعات تجاری در کاربردهای فضایی است. با توجه به نتایج اولیه، چند روش مقاوم‌سازی مختلف، شامل حفاظت موضعی، کلیدزنی پویا،

مطرح شده نیازمند مجموعه سخت‌افزار جدیدی است که هزینه بالایی دارد. بر این اساس، پوشش جامع همه حالت‌ها ممکن برای ایده‌ها در این پژوهش محقق نشد. در ادامه به کاستی‌ها و پرسش‌های باقی مانده در این پژوهش پرداخته شده است تا محققان در ادامه بتوانند این مسیر را تکمیل کنند. پیشنهادهای مطالعات آتی عبارت‌اند از: ۱- بهینه‌سازی روش حفاظت موضعی: در این پژوهش صرفاً تأثیر آلیاژ قلع و سرب برای پر کردن حفره‌های حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که می‌توان مواد یا آلیاژهای دیگری را نیز در تحقیقات مورد بررسی قرار داد. همچنین حفاظت موضعی در این پژوهش صرفاً از پشت برد انجام شده است. در تحقیقات آتی می‌توان حفاظت موضعی از دو سمت را نیز بررسی کرد. ۲- در این پژوهش کلیدزنی پویا صرفاً در بازه زمانی حدود یک ساعت یا هر یک کیلو راد انجام شده است. در تحقیقات آتی می‌توان این با بازه‌های زمانی مختلفی ارزیابی کرد. در طولانی‌ترین بازه زمانی می‌توان کلیدزنی را بعد از خرابی برد اول انجام داد که این حالت مشابه ایده استفاده از افزونگی سرد خواهد شد. ۳- ترکیب روش‌های مقاوم‌سازی: احتمالاً ترکیب روش‌های مختلف مقاوم‌سازی، مثلاً ترکیب ایده حفاظت موضعی و کلیدزنی پویا، ممکن است به افزایش بیشتر تاب‌آوری مدارها منجر شود، این کار نیز مستلزم پرتودهی‌ها، بررسی و تحلیل‌های جدیدی است. ۴- پرتودهی بالاتر از ۶۰ کیلو راد و تعیین میزان تاب‌آوری محصول RIU: چنانچه در نتایج مشهود می‌باشد، پرتودهی‌های انجام شده در این پژوهش به ۶۰ کیلو راد محدود شده است. پرتودهی باید در تحقیقات آتی برای سطوح بالاتر از ۶۰ کیلو راد انجام شود تا قطعه مستعد خرابی و سطح تاب‌آوری نهایی مشخص گردد.



شکل ۵- پیکربندی پرتودهی نمونه‌های سری دوم.

Fig. 5. Irradiation configuration of the second series samples.

- [6] Y. Zheng *et al.*, "Space radiation and plasma effects on satellites and aviation: Quantities and metrics for tracking performance of space weather environment models," *Space Weather*, vol. 17, no. 10, pp. 1384-1403, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018SW002042>.
- [7] M. Kumar, J. S. Ubhi, S. Basra, A. Chawla, and H. S. Jatana, "Total ionizing dose hardness analysis of transistors in commercial 180 nm CMOS technology," *Microelectronics Journal*, vol. 115, 2021, Art. no. 105182, <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105182>.
- [8] H. Evans, "Space environment basics & calculation methods," in *ESA Internal Course, EEE Component Radiation Hardness Assurance Tutorial, ESTEC*, 2016.
- [9] *Space Product Assurance*, ECSS-Q-ST-60-15C, European Cooperation For Space Standardization, ECSS Secretariat ESA-ESTEC, 2012.
- [10] "Single Event Effects Test Method and Guidelines," European Space Components Coordination, ESCC Basic Specification, no. 25100, 2014.
- [11] "Total Dose Steady-State Irradiation Test Method," European Space Components Coordination, ESCC, Basic Specification, no. 22900, 2016.
- [12] L. D. Edmonds, C. E. Barnes, and L. Z. Scheick, *An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics*, Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, Colifornia Institute Of Technology Pasadena, California, 2000.
- [13] R. D. Schrimpf and D. M. Fleetwood, *Radiation Effects and Soft Errors in Integrated Circuits and Electronic Devices*, World Scientific, 2004.
- [14] S. Shukla, Utkarsh, M. Azam, and K. C. Ray, "An efficient fault-tolerant instruction decoder for RISC-V based dual-core soft-processors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 70, no. 12, pp. 4816-4825, 2023, <https://doi.org/10.1109/TCSI.2023.3315604>.
- [15] R. Omid Gosheblagh and K. Mohammadi, "SEU rate and reliability analysis in leo satellites," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 1-9, 2012, (in Persian).
- [16] R. Omid Gosheblagh and K. Mohammadi, "Three-level management algorithm to increase the SEU emulation rate in DPR based emulators," *Journal of Electronic Testing*, vol. 30, pp. 739-749, 2014, <https://doi.org/10.1007/s10836-014-5489-x>.
- [17] A. Fetzer, M. Anger, P. Oleynik, and J. Praks, "Total ionising dose multilayer shielding optimisation for nanosatellites on geostationary transfer orbit," *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 1, pp. 831-845, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.10.028>.
- [18] H. Daneshvar, K. G. Milan, A. Sadr, S. H. Sedighy, S. Malekie, and A. Mosayebi, "Multilayer radiation

غربالگری قطعات و بازطراحی مدار، پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های پرتودهی بر روی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نشان داد که روش کلیدزنی پویا منجر به افزایش حدود ۵۰٪ تاب‌آوری مدار نسبت به حالت اولیه گردید. بازطراحی مدار با استفاده از قطعات جایگزین با تاب‌آوری بالاتر، منجر به افزایش بیش از سه برابری تاب‌آوری مدار تا ۶۰ کیلو راد گردید. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی مناسب و انتخاب دقیق قطعات، می‌توان تاب‌آوری مدارهای الکترونیکی در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. نتایج این پژوهش می‌تواند در طراحی و ساخت مدارهای الکترونیکی برای کاربردهای فضایی و سایر محیط‌های پرتوزا مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از کلیه همکارانی که در انجام آزمایش‌های پرتودهی این پژوهش مشارکت داشته‌اند، به‌ویژه از مسئول و کارشناسان محترم آزمایشگاه پرتودهی که با ارائه مشاوره‌های تخصصی و پشتیبانی فنی، نقش مؤثری در موفقیت این پژوهش ایفا نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] Y. Chi, C. Cai, and L. Cai, "Radiation effects of advanced electronic devices and circuits," *Electronics*, vol. 13, no. 6, 2024, Art. no. 1073, <https://doi.org/10.3390/electronics13061073>.
- [2] K. Ghordoyi Milan, A. Sadr, S. H. Sedighy, and H. Daneshvar, "Analysis, design and optimization of the multi layer radiation shielding of satellite electronic components," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 71-76, 2021, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2021.1246>.
- [3] Y. Sun *et al.*, "Investigation of total ionizing dose effects in 4H-SiC power MOSFET under gamma ray radiation," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 197, 2022, Art. no. 110219, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110219>.
- [4] M. Naito *et al.*, "Investigation of shielding material properties for effective space radiation protection," *Life Sciences in Space Research*, vol. 26, pp. 69-76, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.05.001>.
- [5] NASA Technical Reports Server (NTRS). [online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov>

- Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 2602-2608, 2005, <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.860709>.
- [22] J. S. Li *et al.*, "Reversible total ionizing dose effects in NiO/Ga₂O₃ heterojunction rectifiers," *ECS Transactions*, vol. 111, no. 2, 2023, Art. no. 35, <https://doi.org/10.1149/11102.0035ecst>.
- [23] M. Poizat, "TID total ionizing dose: Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications," in *15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, Moscow, Russia, 2015.
- shield for satellite electronic components protection," *Scientific Reports*, vol. 11, 2021, Art. no. 20657, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99739-2>.
- [19] "Space product assurance, Radiation, Hardness Assurance," ESA-TEC-QE/2009/22. Issue 1, 2009.
- [20] "Radiation Design Margin Requirement." NASA, Lesson number, 792, 1999. [Online]. Available: <https://llis.nasa.gov/lesson/792>
- [21] S. C. Witczak, R. C. Lacoce, J. V. Osborn, J. M. Hutson, and S. C. Moss, "Dose-rate sensitivity of modern nMOSFETs," *IEEE, Transactions on*

Original Research Paper

Design of an S-Band Diplexer for Telemetry and Telecommand Subsystems in LEO Satellites

Behzad Ahmadi*, Razieh Narimani , and Elham Hosseini 

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

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 01 May 2024

Revised 22 September 2024

Accepted 25 September 2024

Available Online 13 October 2024

Keywords:

Diplexer

LEO satellites

S-band

Telemetry and telecommand subsystem

Filter

ABSTRACT

This study investigates the design requirements for telemetry and telecommand subsystems in satellites operating in low Earth orbit (LEO) and outlines the specifications for a diplexer suited for the S-band frequency range. The analysis emphasizes the critical impact of transmitter signal leakage and noise floor levels on diplexer performance. The proposed diplexer incorporates two bandpass filters operating at distinct frequency bands, enabling simultaneous transmission and reception through a single antenna in two-way communication systems. One of the primary design challenges stems from satellites' limited power generation capabilities, necessitating a strong focus on minimizing power consumption across all subsystems. In this context, reducing power loss in the telemetry and telecommand subsystem is crucial, as the diplexer directly influences transmitter power consumption and receiver sensitivity. Therefore, achieving minimal transmission loss is a critical design objective, which requires employing high-quality factor (Q-factor) technologies in the design of the filters. While waveguides provide superior Q-factors, their large dimensions and high mass render them unsuitable for S-band applications in satellite systems. Similarly, due to sublayer losses, ceramic substrate technologies, such as microstrip and stripline, fall short of the required Q-factor. To overcome these limitations, this study introduces a diplexer designed using coaxial technology, which offers an optimal balance of high Q-factor, compact dimensions, and low mass. The designed diplexer achieves a return loss greater than 20 dB, a transmission loss of less than 0.5 dB, and an isolation exceeding 50 dB, meeting the stringent requirements of LEO satellite subsystems.

*Corresponding Author's E-mail: b.ahmadi@isrc.ac.ir**How to Cite this Article:**B. Ahmadi, R. Narimani, and E. Hosseini, "Design of an S-Band diplexer for telemetry and telecommand subsystems in LEO satellites," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 14-27, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1485>.**COPYRIGHTS**© 2024 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/).

طراحی دیپلکسر باند S برای زیرسیستم تله متری و تله کامند ماهواره های LEO

بهزاد احمدی^{۱*}، راضیه نریمانی^۲، و الهام حسینی^۳

۱ و ۳- استادیار، پژوهشکده سامانه های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۲- مربی، پژوهشکده سامانه های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله ضمن بررسی الزامات موجود در زیرسیستم تله متری و تله کامند یک ماهواره در مدار LEO، مشخصات مورد نیاز دیپلکسر جهت استفاده در این زیرسیستم در باند فرکانسی S استخراج شده و تاثیر نشت سیگنال فرستنده و کف نویز فرستنده بر روی مشخصات دیپلکسر، مورد مطالعه قرار گرفته است. دیپلکسر دارای دو فیلتر میان گذر با فرکانس های گذر متفاوت است که در سیستم های مخابراتی دوطرفه هم زمان، ارسال و دریافت را از طریق یک آنتن امکان پذیر می کند. به دلیل سختی تولید توان در ماهواره ها یکی از قیود اصلی طراحی مربوط به توان مصرفی هر زیرسیستم است و به همین دلیل تا حد امکان می بایست از اتلاف توان جلوگیری شود. از آن جا که در زیرسیستم تله متری و تله کامند وجود دیپلکسر هم در مسیر ارسال و هم در مسیر دریافت باعث تاثیر قابل توجه بر توان مصرفی فرستنده و حساسیت گیرنده می شود، الزام اولیه در طراحی این قطعه کمینه کردن تلف عبوری آن است که این مهم به معنای استفاده از فناوری هایی با ضریب کیفیت بالا در طراحی فیلتر است. استفاده از موجبرهای توخالی با وجود در اختیار گذاشتن ضریب کیفیت بسیار بالا، در باند S به دلیل ابعاد و جرم بالا مرسوم نیست. فناوری های مبتنی بر زیرلایه های سرمایی مانند مایکرواستریپ و استریپ لاین نیز به دلیل تلفات زیر لایه ها ضریب کیفیت مورد نیاز را برآورده نمی کند. با توجه به این مسائل، در این مقاله با استفاده از فناوری کابل های هم محور با سطح مقطع مربعی که هم ضریب کیفیت مناسب و هم ابعاد و جرم کمی دارند، طراحی دیپلکسر انجام شده است. دیپلکسر طراحی شده دارای تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 0.5 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB است.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۳
بازنگری ۰۱ مهر ۱۴۰۳
پذیرش ۰۴ مهر ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۲ مهر ۱۴۰۳

واژه های کلیدی:

دیپلکسر
ماهواره های LEO
باند S
زیرسیستم تله متری و تله کامند
فیلتر

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.ahmadi@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

B. Ahmadi, R. Narimani, and E. Hosseini, "Design of an S-Band diplexer for telemetry and telecommand subsystems in LEO satellites," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 14-27, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1485>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



علائم و اختصارات

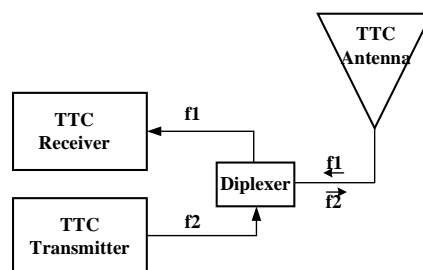
BPF	فیلتر میان گذر
Diplexer	دیپلکسر
LEO	مدار پایین زمین
LNA	تقویت کننده کم نویز
TT&C	زیرسیستم تله متری و تله کامند

مقدمه

مالتی پلکس‌های مایکروویوی با داشتن ویژگی‌های مهمی مانند انتخابی بودن باند فرکانسی، تحمل توان بالا و ایزولاسیون بالا، نقش مهمی در مخابرات ماهواره‌ای ایفا می‌کنند. یکی از کاربردی‌ترین آن‌ها، دیپلکسرها هستند. دیپلکسر یک باند فرکانسی را به دو زیرباند فرکانسی باریک‌تر تقسیم می‌کند و از دو فیلتر میان‌گذر با فرکانس‌های گذر متفاوت تشکیل شده است. در سیستم‌های مخابراتی دوطرفه هم‌زمان، ارسال و دریافت از طریق یک آنتن به کمک این تجهیزات امکان‌پذیر می‌شود.

در این قطعه که عموماً به شکل سه دهانه طراحی می‌شود، یک دهانه آن به‌عنوان دهانه مشترک در نظر گرفته شده و دو دهانه دیگر مربوط به فیلترهای میان‌گذر است [۶-۱]. اکثر دیپلکسرها طراحی شده بر اساس فیلترهای میان‌گذر با استفاده از خواص سلفی یا خازنی [۸، ۷] و یا تیغه‌های فلزی [۹، ۱۰] هستند.

زیرسیستم تله متری و تله کامند یک ماهواره LEO در باند فرکانسی S دارای یک فرستنده تله متری و یک گیرنده تله کامند است که با توجه به قوانین ITU باند ارسال داده‌های تله متری 2110-2025 MHz و باند دریافت کامند 2290-2200 MHz است. محدودیت جرم و ابعاد در ماهواره‌ها موجب تمایل طراحان در استفاده از یک آنتن برای ارسال و دریافت شده است و از آن‌جا که نوع این لینک ارتباطی، دوطرفه هم‌زمان است و هنگام ارسال داده‌های تله متری، باید امکان دریافت کامندهای زمینی در ماهواره نیز وجود داشته باشد، استفاده از دیپلکسر جهت اتصال فرستنده و گیرنده به آنتن ضروری است. بلوک دیاگرام این زیرسیستم و اتصالات مربوطه در شکل ۱ آمده است [۱۱].



شکل ۱- بلوک دیاگرام زیرسیستم تله متری و تله کامند [۱۱].

Fig. 1. TT&C subsystem block diagram [11].

گام نخست در طراحی، تعیین الزامات و مشخصات فنی مورد نیاز است. با توجه به پیشرفت ارتباطات فضایی در ماهواره‌های LEO، چالش‌های طراحی دیپلکسر در افت عبوری پایین، توان قابل تحمل بالا و ایزولاسیون محدود نشده و توجه به محدودیت‌های جرمی و ابعادی و تحمل شرایط محیطی سخت مانند شوک و لرزه بالا در کنار این مشخصات الکتریکی بسیار حائز اهمیت است [۱۲]. مطالعات بسیاری در خصوص ساختارهای مختلف دیپلکسر جهت استفاده در ماهواره و ایستگاه‌های زمینی در [۱۷-۱۳] انجام شده است.

در این مقاله ابتدا الزامات طراحی دیپلکسر تعیین شده و مشخصات مورد نیاز جهت طراحی به دست می‌آید. سپس با استفاده از فناوری خط انتقال کوآکسیال با سطح مقطع مربعی، طراحی دیپلکسرهایی جهت استفاده در زیرسیستم TT&C در باند S یک ماهواره LEO در فرکانس‌های مرکزی 2097 MHz و 2221 MHz ارائه شده است.

تعیین الزامات دیپلکسر

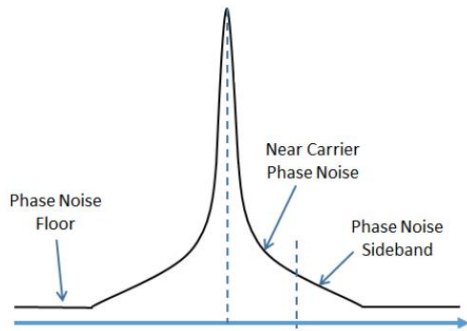
تعیین الزامات و مشخصات فنی هر قطعه در یک سیستم ماهواره‌ای گام اول برای ساخت و پیاده‌سازی آن به‌شمار می‌رود. در ماهواره‌ها به دلیل سختی تولید توان، یکی از اصلی‌ترین قیدهای طراحی مربوط به توان مصرفی هر زیرسیستم است. بنابراین بایستی تا حد امکان از اتلاف توان جلوگیری شود. در زیرسیستم تله متری و تله کامند وجود دیپلکسر هم در مسیر ارسال و هم در مسیر دریافت باعث تأثیر قابل توجه بر توان مصرفی فرستنده و حساسیت گیرنده می‌شود. از این‌رو الزام اولیه در طراحی این عنصر کمینه کردن تلف عبوری برای آن است. این امر باعث می‌شود توان تولید شده در فرستنده تله متری با کمترین تلف به آنتن منتقل شده و همچنین عدد نویز سیستم نیز پایین بماند.

محاسبه تلف عبوری مورد نیاز در یک سیستم بر اساس محاسبات بودجه لینک است که در این مقاله تلف عبوری بهتر از 1 dB به‌عنوان معیار طراحی در نظر گرفته شده است. پایین بودن این افت در یک فیلتر نیز به معنای استفاده از فناوری‌هایی با ضریب کیفیت بالا است. استفاده از موجبرهای توخالی هر چند که ضریب کیفیت بسیار بالا را در اختیار ما قرار می‌دهند، به دلیل ابعاد و وزن بالا در باند S مرسوم نیست [۳].

الزام مهم دیگری که در طراحی دیپلکسر بایستی در نظر گرفته شود مربوط به ایزولاسیون میان فرستنده و گیرنده است. در ادامه به محاسبات مورد نیاز برای تخمین میزان این الزام می‌پردازیم.

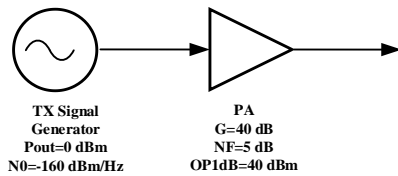
محاسبه ایزولاسیون مورد نیاز

همانطور که در بلوک دیاگرام شکل ۱ نشان داده شده است، فرستنده



شکل ۳- طیف سیگنال خروجی یک فرستنده.

Fig. 3. A typical transmitter output signal spectrum.



شکل ۴- بلوک دیاگرام یک فرستنده.

Fig. 4. A typical transmitter block diagram.

با توجه به بلوک دیاگرام فرستنده نشان داده شده در شکل ۴ و با در نظر گرفتن کف نویز تولید کننده سیگنال (-170 dBm/Hz)، با داشتن یک تقویت کننده توان با بهره 40 dB و عدد نویز 5 dB، کف نویز خروجی فرستنده در محدوده 125 dBm/Hz قرار خواهد گرفت.

یک گیرنده با عدد نویز 3 dB دارای کف نویز معادل 171 dBm/Hz در ورودی است. بنابراین برای این که فرستنده کاهش حساسیت قابل توجهی را بر گیرنده تحمیل نکند با در نظر گرفتن حاشیه 3 dB، ایزولاسیون دیپلکسر باید از 49 dB بیشتر باشد.

با قرار دادن یک فیلتر در خروجی تقویت کننده توان، می توان ایزولاسیون کمتری را در طراحی دیپلکسر در نظر گرفت ولی افزودن این فیلتر علاوه بر افزایش وزن باعث ایجاد تلفات عبوری در خروجی تقویت کننده توان شده و توصیه نمی شود.

در نهایت با در نظر گرفتن این دو شرط، و مقادیر فرض شده برای فرستنده و گیرنده تله متری و گیرنده تله کامند که از الزامات سیستمی به دست آمده بودند، الزام ایزولاسیون مورد نیاز دیپلکسر در سطح طراحی سیستمی 50 dB تعیین شد.

محاسبه مرتبه فیلترها

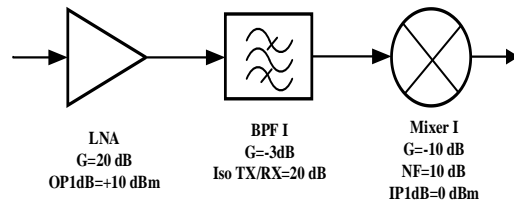
هر یک از کانال های دیپلکسر شامل یک فیلتر میان گذر است که تعیین مرتبه آن ها بر اساس ایزولاسیون مورد نیاز در دیپلکسر و تلف عبوری

و گیرنده از طریق دیپلکسر به یکدیگر و در نهایت به آنتن متصل شده اند.

در صورت امکان نشت سیگنال فرستنده به گیرنده در عملکرد آن اختلال از دو طریق ایجاد می شود:

- نشت سیگنال فرستنده در باند ارسال موجب اشباع طبقات ورودی گیرنده شود.
- نشت کف نویز فرستنده در باند دریافت به گیرنده، حساسیت آن را کاهش دهد.

شکل ۲ طبقه ورودی یک گیرنده را نشان می دهد. در صورت اتصال این گیرنده به دیپلکسری که کانال دیگر آن یک فرستنده 10 وات قرار دارد، و از آن جا که تقویت کننده های کم نویز ورودی گیرنده عموماً پهن باند هستند، نشتی سیگنال فرستنده وارد ورودی گیرنده می شود.

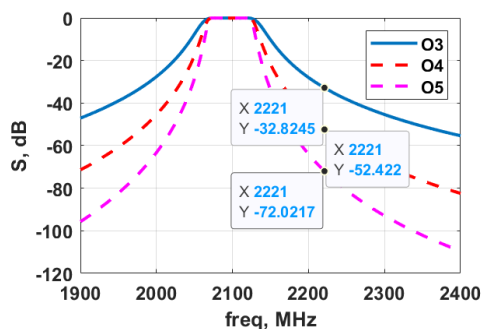


شکل ۲- طبقه ورودی یک گیرنده.

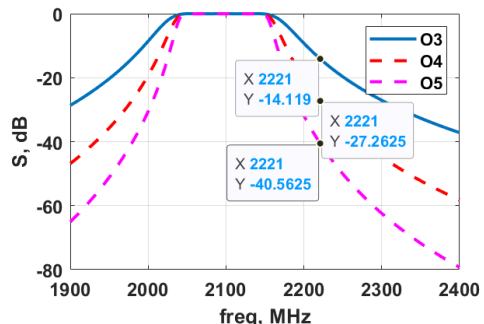
Fig. 2. A typical receiver front-end.

بر اساس مشخصات قطعات به کار رفته در شکل ۲، سیگنالی با سطح توان 10 dBm موجب اشباع گیرنده می شود. با داشتن توان سیگنال ارسالی (40dBm)، می توان الزام اولیه ایزولاسیون بین فرستنده و گیرنده یعنی 50 dB را به دست آورد.

در گام بعد نشت کف نویز و کاهش حساسیت گیرنده می بایست مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۲، فیلتر میان گذری که بعد از LNA قرار دارد، به ایزولاسیون بیشتر میان گیرنده و فرستنده کمک می کند؛ ولی در صورت نشت کف نویز از دیپلکسر، با توجه به این که این نویز در باند کاری گیرنده قرار دارد، این فیلتر دیگر کمکی به حل مشکل نکرده و این مسئله باید توسط دیپلکسر حل شود. شکل ۳ طیف سیگنال خروجی یک فرستنده را نشان می دهد. در فرکانس های نزدیک فرکانس حامل، نویز فاز زیاد بوده و با افزایش فاصله از حامل، کف نویز فرستنده را خواهیم داشت. از آن جا که عموماً در انتخاب فرکانس زیرسیستم TT&C، فاصله فرکانسی میان فرستنده و گیرنده زیاد در نظر گرفته می شود، فرکانس کاری گیرنده در محدوده کف نویز فرکانس کاری فرستنده قرار می گیرد.



(C)



(D)

شکل ۵- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه ۳ تا ۵ و پهنای باند الف) 10MHz، ب) 20MHz، ج) 50MHz، د) 100MHz.

Fig. 5. Frequency response of the 3 to 5 order filters and bandwidth a) 10MHz, b) 20MHz, c) 50MHz, d) 100MHz.

جدول ۱- ایزولاسیون فیلترهای شکل ۵.

Table 1. Isolation of filters presented in Fig.5.

O/BW(MHz)	10	20	50	100
3	75	57	32	14
4	105	84	52	27
5	142	112	72	40

جدول ۲- تلف عبوری فیلترهای شکل ۵.

Table 2. Insertion loss of filters presented in Fig.5.

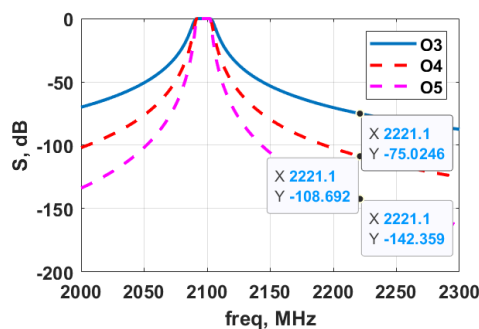
O/BW(MHz)	10	20	50	100
3	2.5	1.4	0.5	0.25
4	4.1	2.1	0.85	0.45
5	5.9	2.9	1.2	0.6

علاوه بر فیلترهای اشاره شده، دو روش دیگر نیز در طراحی فیلترها می‌تواند در نظر گرفته شود. دسته اول استفاده از فیلترهای دارای صفر انتقال

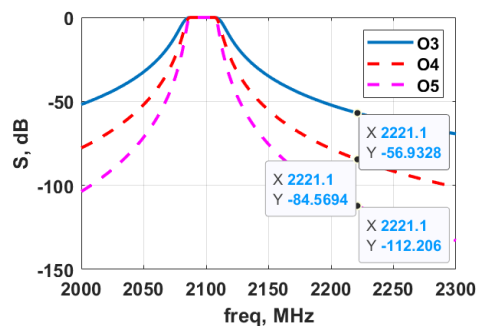
مورد قبول تعیین می‌شود. شکل ۵، پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه ۳ تا ۵ را برای پهنای باندهای مختلف نشان می‌دهد. و در جداول ۱ و ۲ جمع‌بندی این شبیه‌سازی‌ها از منظر ایزولاسیون و تلف عبوری بیان شده است. در جدول ۲ تلف عبوری برای فیلترهای با ضریب کیفیت رزانتور ۱۰۰۰ ارائه شده است. این ضریب کیفیت معادل با ساخت رزانتورها با فلزی مانند آلومینیوم است. در صورتی که از نقره برای پوشش آن استفاده کنیم می‌توان ضریب کیفیت بالاتری را نیز به دست آورد. اما مشکلات نگه داری نقره در محیط غیر خلا مانند اکسیداسیون آن باعث شده است که در این مقاله از آلومینیوم در شبیه‌سازی‌ها استفاده شود. محاسبات این بخش با کدهای نرم افزاری توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب و بر مبنای روش طراحی فیلترها با روش ماتریس تزویج ارائه شده در [۲] انجام شده است.

بررسی نتایج شبیه‌سازی فیلترها در کنار الزام ایزولاسیون و افت عبوری، درجه فیلتر مورد نیاز را تعیین خواهد کرد. از سوی دیگر با توجه به نرخ بیت لینک‌های TT&C، پهنای باندهای مورد نیاز در این لینک‌ها عموماً در حد چند کیلو یا چند صد کیلوهرتز است. از آنجایی که پیاده‌سازی عناصر فیزیکی مانند فیلترها با این پهنای باند در باند فرکانسی S مقدور نیست، در طراحی سخت‌افزار کمترین پهنای باند قابل پیاده‌سازی، در نظر گرفته می‌شود.

به‌عنوان مثال در صورت نیاز به ایزولاسیون بهتر از 50dB در کنار افت عبوری بهتر از 1dB، فیلتری با مرتبه ۴ و پهنای باند 50MHz مناسب است.



(A)



(B)

طراحی فیلترهای مایکروویو

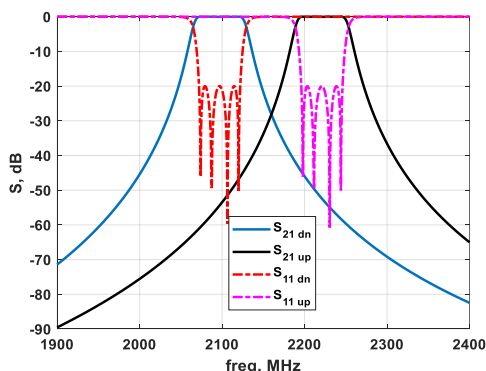
پس از تعیین الزامات و مشخصات دیپلکسر، گام نخست جهت طراحی و ساخت دیپلکسر، طراحی فیلترهای میان گذر آن است. روش طراحی و پیاده سازی فیلترها در این مقاله روش ماتریس تزویج است که در [۳] ارایه شده است. کدهای نرم افزاری مورد نیاز برای استفاده از این روش در نرم افزار متلب توسعه داده شده و محاسبه ماتریس ها با استفاده از این کدها صورت گرفته است. پاسخ های فرکانسی ارایه شده در این بخش نیز با استفاده از نرم افزار CST به دست آمده اند. در این روش ابتدا برای طراحی فیلتر بایستی ساختار آن انتخاب شود سپس ماتریس تزویج متناسب با آن فیلتر محاسبه می شود. هر یک از عناصر ماتریس تزویج نشان دهنده یک کمیت فیزیکی در فیلتر هستند. به عنوان مثال عناصر روی قطر اصلی نشان دهنده میزان انحراف فرکانس رزنانس رزنانس های فیلتر از فرکانس مرکزی فیلتر هستند. سایر عناصر نیز نشان دهنده میزان تزویج میان رزنانس های مختلف هستند. تزویج های مغناطیسی مقداری مثبت دارند و تزویج های الکتریکی دارای مقداری منفی هستند [۳]. مزیت طراحی با این روش قدرت بالای آن در مرحله تنظیم پاسخ فرکانسی فیلترها است. با استفاده از روش استخراج پارامتر [۳] می توان پاسخ های اولیه فیلترها را به خوبی تنظیم کرد و مراحل بهینه سازی را به کمترین حد رساند. در این روش برای بهینه سازی نیازی به استفاده از بهینه سازی های کور مانند الگوریتم های جستجوی کور و ژنتیک و غیره نیست [۴].

فیلترهای مرتبه ۴

ماتریس تزویج مورد نیاز فیلترهای مرتبه ۴ به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.035154 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.035154 & 0 & 0.91058 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.91058 & 0 & 0.699925 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.699925 & 0 & 0.91058 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.91058 & 0 & 1.035154 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.035154 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

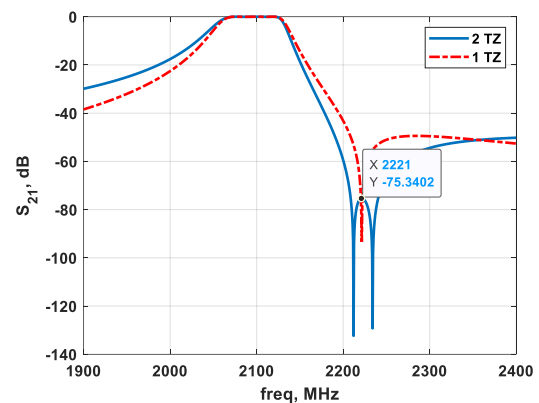
شکل ۸ پاسخ فرکانسی این ماتریس را نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود، این فیلترها الزامات مورد نیاز را برآورده می نمایند.



شکل ۸- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه چهار با پهنای باند 50MHz.

Fig. 8. Frequency response of the 4-order filter with 50MHz bandwidth.

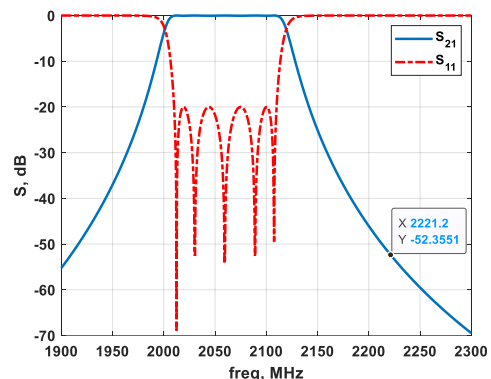
و دسته دوم استفاده از شیفت فرکانسی در پاسخ فیلترهای با پهنای باند بالاتر است. استفاده از صفحهای انتقال برای افزایش شیب ناحیه گذر فیلترها امری متداول است. شکل ۶ یک فیلتر مرتبه ۳ با پهنای باند 50MHz و یک و دو صفر انتقال را نشان داده است. بر اساس نتیجه مشاهده شده، در این نوع فیلتر همزمان الزام ایزولاسیون و تلف عبوری را برآورده می شود. هر چند استفاده از صفحهای انتقال نتایج را بهبود می بخشد، اما با توجه به مشکلات پیاده سازی و نیاز به فناوری بالاتر، در این مقاله به پیاده سازی آنها پرداخته نشده است ولی این فیلترها می توانند به عنوان پاسخی بالقوه در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۶- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه سه با یک و دو صفر انتقال و پهنای باند 50MHz.

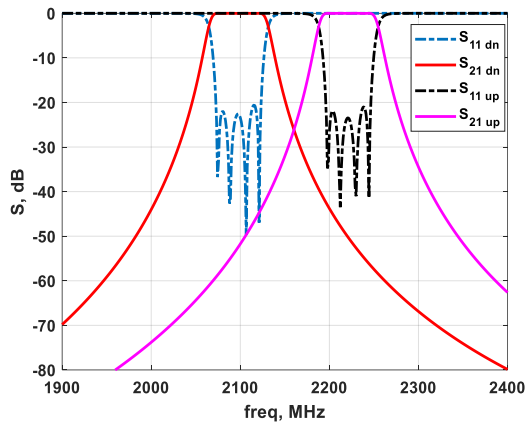
Fig. 6. Frequency response of the 3 order filters with one and two transmission zeros and 50MHz bandwidth.

برای داشتن تلف عبوری کمتر می توان از فیلترهایی با پهنای باند بیشتر استفاده کرده و الزام ایزولاسیون را با شیفت فرکانس مرکزی فیلتر برآورده نمود. شکل ۷ با تغییر فرکانس مرکزی یک فیلتر مرتبه ۵ با پهنای باند 100MHz را نشان می دهد که همزمان الزام ایزولاسیون و تلف عبوری را برآورده نموده است.

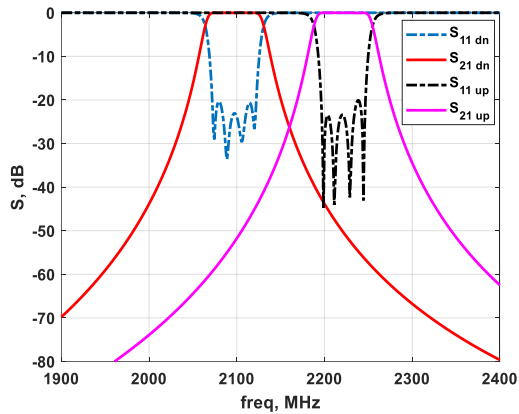


شکل ۷- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه پنج با پهنای باند 100MHz.

Fig. 7. Frequency response of the 5-order filter with 100MHz bandwidth.



(A)



(B)

شکل ۱۱- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۴ با پورت های (الف) دایروی و (ب) مربعی.

Fig. 11. Frequency response of 4 order filter with a) circular b) square coaxial ports.

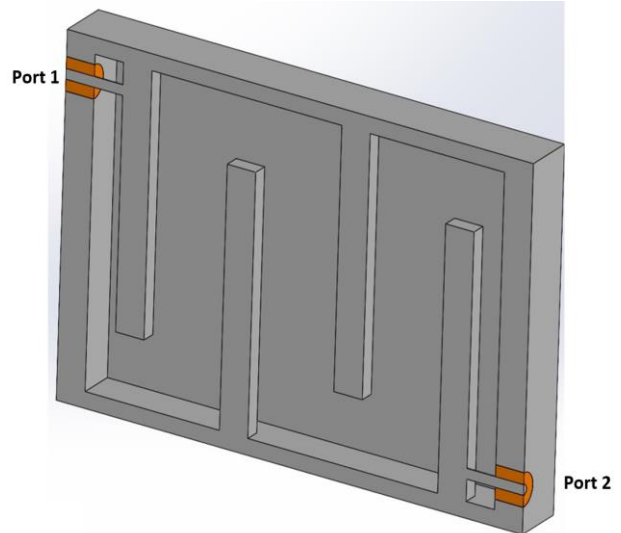
فیلترهای مرتبه ۵

دسته دیگر فیلترها که برای پیاده‌سازی دیپلکسر استفاده خواهیم کرد فیلترهای مرتبه ۵ شیفت یافته هستند. ماتریس تزویج مورد نیاز برای این فیلترها به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.07842 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.07842 & 0 & 0.928502 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.928502 & 0 & 0.662687 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.662687 & 0 & 0.662687 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.662687 & 0 & 0.928502 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.928502 & 0 & 1.07842 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.07842 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

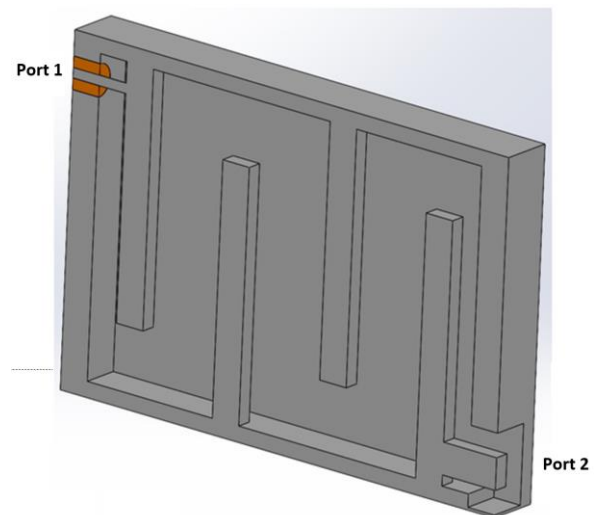
شکل ۱۲ پاسخ فرکانسی این ماتریس را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود، این فیلترها الزامات مورد نیاز را برآورده می‌نمایند.

همان طور که پیش تر هم اشاره شد، استفاده از تشدیدگرهای کواکسیال و فناوری کابل‌های هم‌محور به دلیل دارا بودن ضریب کیفیت مناسب و ابعاد و جرم پایین، در پیاده‌سازی فیلترها متداول است. جهت ماشین‌کاری راحت‌تر و دقیق‌تر نیز سطح مقطع مربعی برای این تشدیدگرها در نظر گرفته شده است. شکل ۹ نمای کلی این فیلترها را نشان داده است.



شکل ۹- نمای فیلتر مرتبه چهار با پورت‌های ورودی و خروجی کواکس دایروی.

Fig. 9. The 4-order filter with circular coaxial input and output ports.



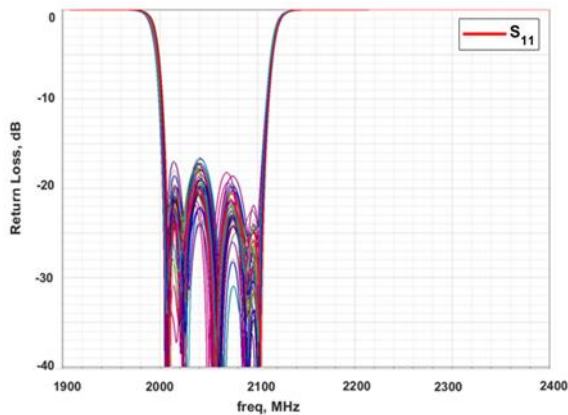
شکل ۱۰- نمای فیلتر مرتبه چهار با پورت ورودی مربعی و خروجی دایروی.

Fig. 10. The 4-order filter with square coaxial input and circular coaxial output ports.

تحلیل حساسیت

برای پیاده‌سازی و ساخت فیلترهایی که پیش‌تر اشاره شد، معمولاً از ماشین‌کاری بلوک‌های فلزی استفاده می‌شود که در حالت عادی، دقتی در حد ۵۰ میکرومتر و در حالت دقیق، دقتی در حد ۲۰ میکرومتر دارند. معمولاً برای بررسی خطاهای تصادفی ساخت از تحلیل حساسیت ساختار استفاده می‌شود. در این روش به ابعاد ساختار، خطاهایی با دامنه کنترل شده و به‌صورت تصادفی اعمال شده و پاسخ به‌دست آمده بررسی شده و در صورتی که پاسخ حساسیت بالایی به تolerانس اعمالی نداشته باشد می‌توان انتظار داشت که نتایج ساخت با نتایج شبیه‌سازی مطابقت قابل‌قبولی داشته باشد.

شکل زیر پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۵ شیفت یافته را با اعمال تolerانس‌های ساخت تا ۱۰۰ میکرومتر نشان داده‌است. در این شبیه‌سازی هر بار یکی از ابعاد به‌صورت تصادفی تغییر کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلف بازگشتی کماکان بهتر از ۱۷ dB است که نشان‌دهنده عدم حساسیت فیلتر به این میزان تolerانس در ساخت است. از آنجایی که سایر فیلترها نیز مشابه هستند می‌توان این نتیجه را به سایر فیلترها تعمیم داد و نیازی به بررسی حساسیت آن‌ها نیست.

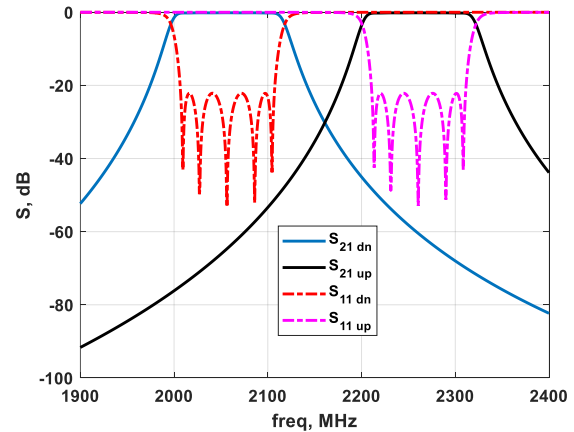


شکل ۱۴- تحلیل حساسیت فیلتر به تغییرات ابعادی تا ۱۰۰ میکرومتر.

Fig. 14. Sensitivity analysis of the 4-order filter.

طراحی دیپلکسر

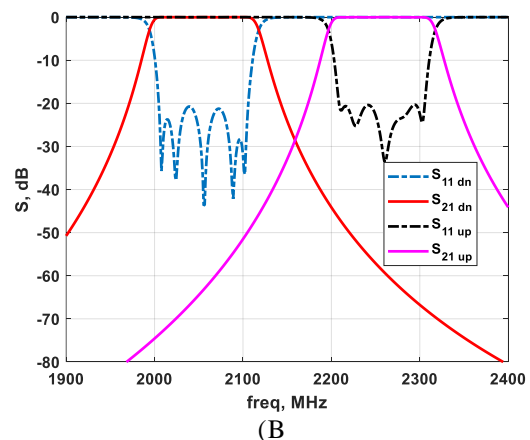
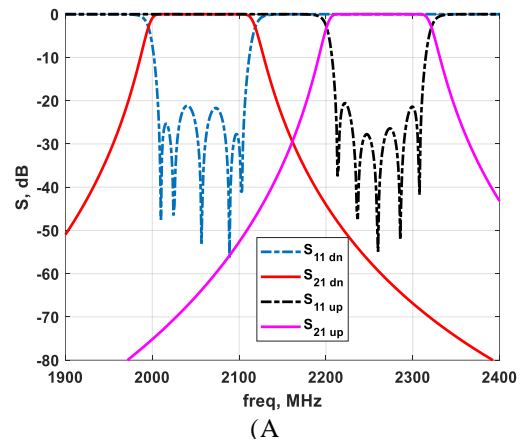
در طراحی دیپلکسر، دو فیلتر میان‌گذر در دو باند فرکانسی مختلف باید طوری کنار یکدیگر قرار گیرند که یا پاسخ فرکانسی فیلترها دچار کمترین تغییرات شود و یا بتوان با روشی تغییرات ناشی از کنار هم قرارگرفتن فیلترها را جبران نمود. در ادامه مقاله دو روش برای پیاده‌سازی دیپلکسر ارائه می‌شود. در روش اول تنها از فیلتر باند دریافت استفاده می‌شود و دیپلکسر با استفاده از مقسم‌های توان ۹۰ درجه‌ای طوری پیاده‌سازی می‌شود که سیگنال ارسالی با کمترین تلف به آنتن



شکل ۱۲- پاسخ فرکانسی فیلترهای مرتبه پنج با پهنای باند 100MHz و شیفت فرکانسی.

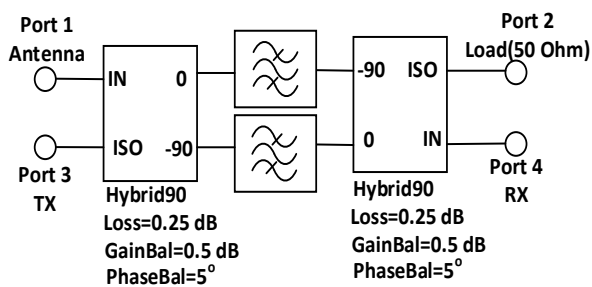
Fig. 12. Frequency response of the shifted frequency 5-order filter with 100MHz.

به منظور پیاده‌سازی این فیلتر، از تشدیدگرهای کوآکسیال با سطح مقطع مربعی استفاده می‌کنیم.



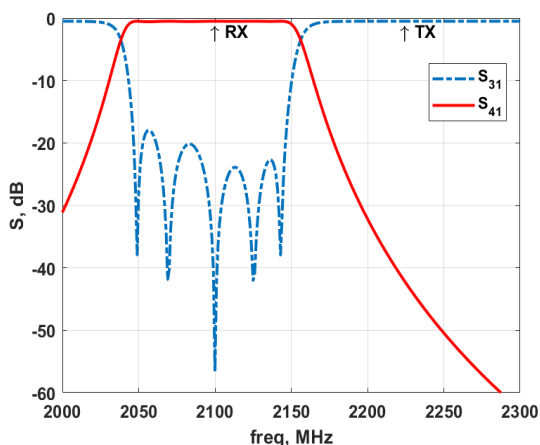
شکل ۱۳- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۵ با پورت‌های (الف) دایروی و (ب) مربعی.

Fig. 13. Frequency response of the 5-order filter with a) circular b) square coaxial ports.



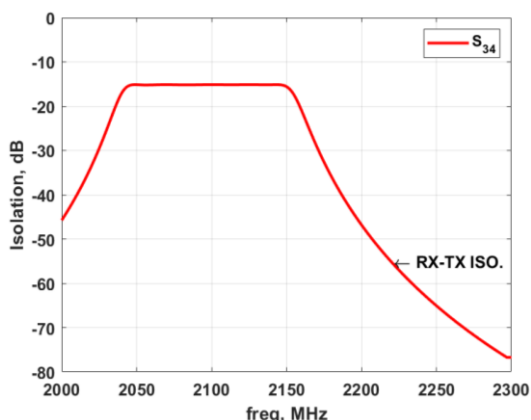
شکل ۱۶- نمای مداری دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان و فیلتر شکل ۱۴.

Fig. 16. The proposed combline diplexer using branch line power divider.



شکل ۱۷- پاسخ فرکانسی دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 17. Frequency response of the proposed combline diplexer using branch line power divider.



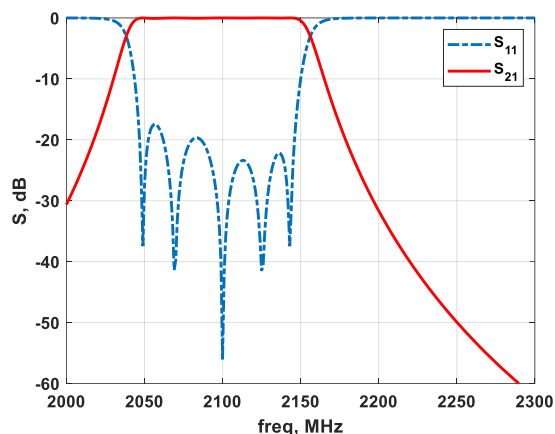
شکل ۱۸- ایزولاسیون دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 18. Isolation of the proposed combline diplexer using branch line power divider.

منتقل شود و از نشت آن به گیرنده جلوگیری می‌شود. این دیپلکسر، دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان نامگذاری شده است. دسته دیگر که متداول تر هستند استفاده از یک تی (T) در ورودی و اتصال فیلترها به آن است [۲۰-۱۸] و سپس با اضافه کردن خطوط تاخیری در ورودی فیلترها و تی، اثر فیلترها روی همدیگر جبران می‌شود. این دیپلکسر را دیپلکسر با تزویج ستاره‌ای می‌نامند.

دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان

این دیپلکسر به یک فیلتر در باند دریافت نیاز دارد و با توجه به ساختار این دیپلکسر، سیگنال گیرنده از طریق پاسخ انتقال همان فیلتر از آنتن دریافت می‌شود و سیگنال فرستنده از طریق پاسخ انعکاسی فیلتر به آنتن می‌رود. ایزولاسیون مورد نیاز بین فرستنده و گیرنده از طریق همان یک فیلتر ایجاد می‌گردد. شکل ۱۵ پاسخ یک فیلتر مرتبه ۵ در فرکانس دریافت را نشان می‌دهد که از آن برای پیاده‌سازی دیپلکسر استفاده شده است.



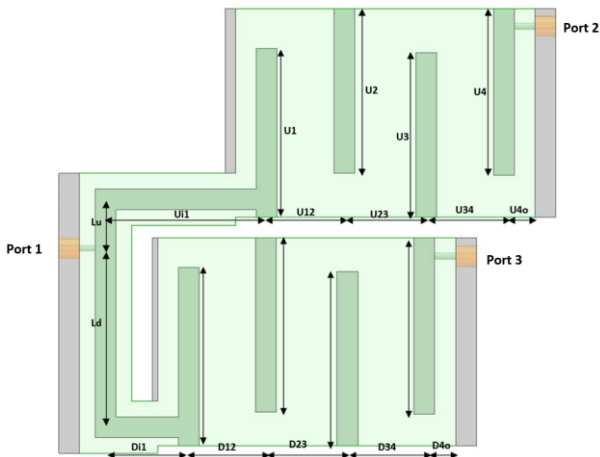
شکل ۱۵- پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۵ در فرکانس مرکزی گیرنده.

Fig. 15. Frequency response of the 5-order filter tuned to the center frequency of the receiver.

در شکل ۱۶ اتصال هیبریدها، فیلترها و دهانه‌های آنتن این دیپلکسر نشان داده شده است. در این شکل، در پورت شماره ۲، بار تطبیق قرار می‌گیرد. پورت شماره ۱ به آنتن متصل شده و پورت شماره ۳، فرستنده و پورت شماره ۴ به گیرنده متصل می‌شود. در شکل‌های ۱۷-۲۰ پاسخ فرکانسی این دیپلکسر نشان داده شده است که تلف بازگشتی بهتر از 20 dB و تلف عبوری کمتر از 1 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB دارد. این دیپلکسر هرچند طراحی و پیاده سازی ساده تری دارد اما به علت استفاده از هیبریدها، حجیم و سنگین است، بنابراین بهتر است از دیپلکسرهای ستاره‌ای برای ماهواره استفاده شود.

۱- دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار

در این بخش دیپلکسر نهایی با استفاده از فیلترهای مرتبه ۴ ارائه شده در بخش قبل مورد بررسی قرار می‌گیرد. شمای این دیپلکسر در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار این دیپلکسر کوچک و سبک است.



شکل ۲۱- نمای دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار به همراه پارامترهای طراحی آن.

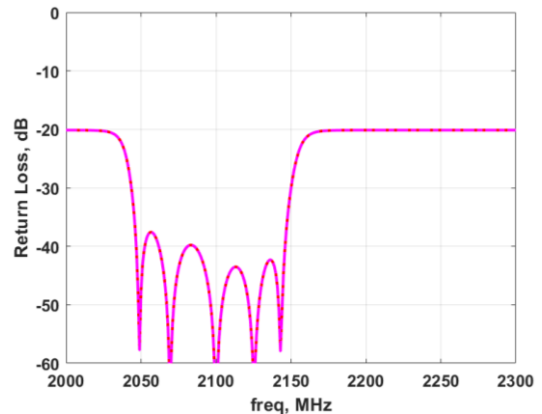
Fig. 21. The proposed 4 order combline diplexer using star junction.

در جدول ۳ ابعاد نهایی این دیپلکسر ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ نشان داده شده است تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 1 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB به دست آمده است.

جدول ۳- ابعاد نهایی دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

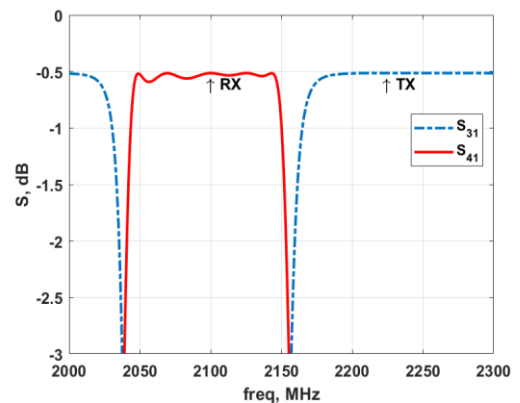
Table 3. Final dimension of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.

Dimension unit: Millimeter			
D1	31.24	U1	32.23
D2	33.39	U2	31.42
D3	33.52	U3	31.42
D4	33.93	U4	31.8
D12	14.65	U12	14.9
D23	15.71	U23	15.81
D34	14.8	U34	14.9
Di1	15.35	Ui1	29.7
D4o	3.5	U4o	5.35
Ld	34.24	Lu	8.86



شکل ۱۹- تلف بازگشتی دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 19. Return loss of the proposed combline diplexer using branch line power divider.

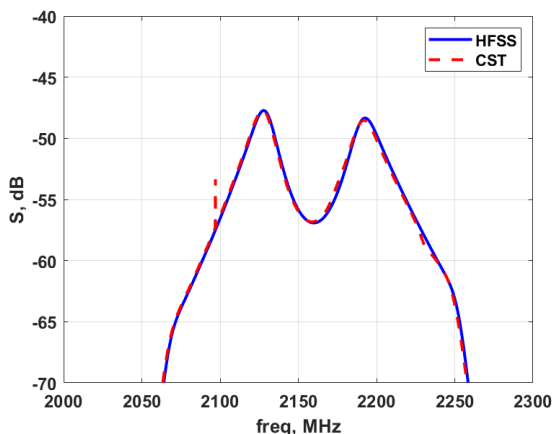


شکل ۲۰- تلف عبوری دیپلکسر خط شانهای با مقسم توان.

Fig. 20. Insertion loss of the proposed combline diplexer using branch line power divider.

دیپلکسر با تزویج ستاره‌ای

این دسته از دیپلکسرها که متداول تر هستند، با استفاده از یک تی (T) در ورودی و اتصال فیلترها به آن پیاده‌سازی می‌شوند. اضافه کردن خطوط تاخیری در ورودی فیلترها برای جبران‌سازی اثر فیلترها روی همدیگر مورد نیاز است. در ادامه دو دیپلکسر از این دسته ارائه شده است. روش طراحی دیپلکسرهای ارائه شده در این بخش به این صورت است که ابتدا فیلترهای مورد نیاز با استفاده از روش ماتریس تزویج [۴] طراحی و با استفاده از روش استخراج پارامتر [۳] تنظیم شده‌اند. سپس با کنار هم قرار دادن آن‌ها در ساختار دیپلکسر ابعاد اضافه شده به‌همراه برخی از ابعاد ورودی و خروجی فیلترها با استفاده از بهینه‌سازی نرم‌افزاری تنظیم می‌شوند. برای بهینه‌سازی از CST استفاده شده است و پاسخ نهایی برای مقایسه با HFSS نیز شبیه‌سازی شده است.

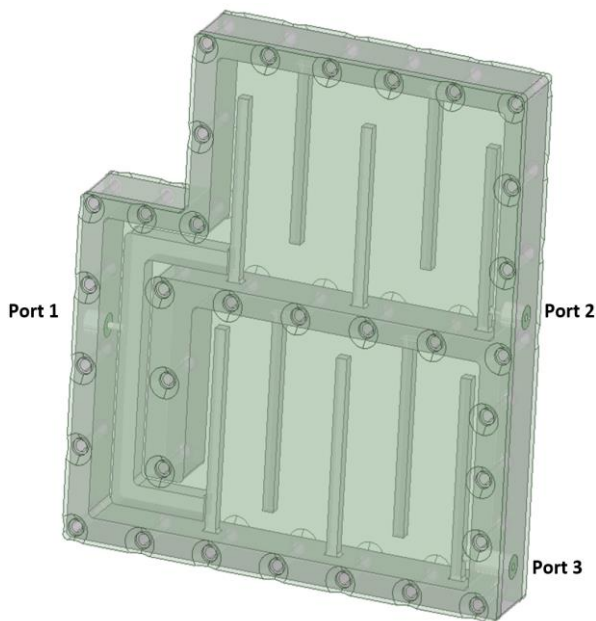


شکل ۲۵- ایزولاسیون دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 25. Isolation of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.

۲- دیپلکسر با فیلترهای مرتبه ۵

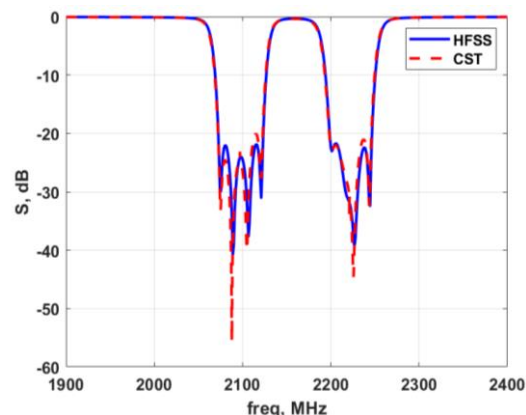
در این بخش دیپلکسر با استفاده از فیلترهای مرتبه ۵ شیفته یافته ارایه شده است. شمای این دیپلکسر در شکل ۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۲۶- نمای دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج

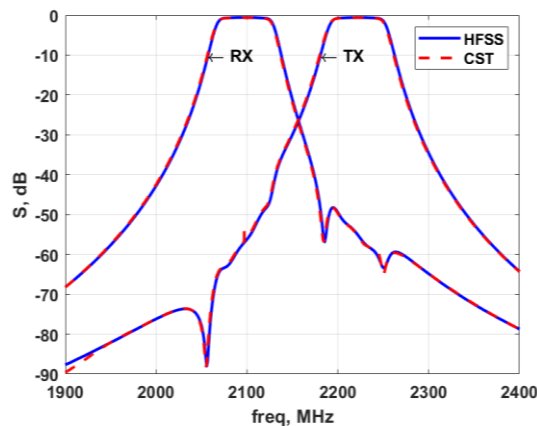
Fig. 26. The proposed 5-order combline diplexer using star junction.

ابعاد نهایی این دیپلکسر نیز در جدول ۴ ارایه شده است. همانطور که در شکل‌های ۲۷ تا ۳۰ نشان داده شده است تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 0.5 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB به دست آمده است.



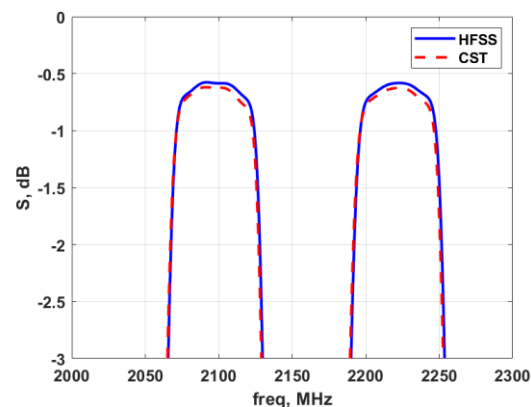
شکل ۲۲- تلف بازگشتی در دهانه مجموع دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 22. Input return loss of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.



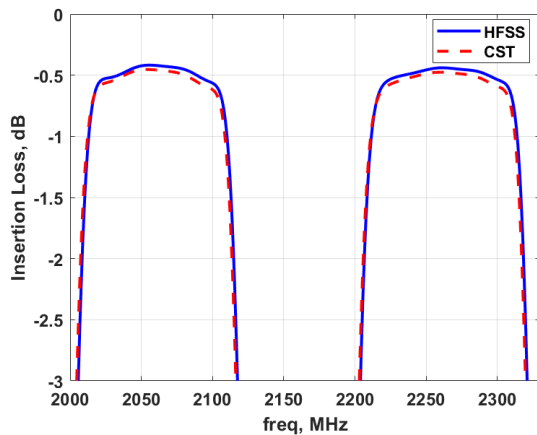
شکل ۲۳- پاسخ انتقال دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 23. Frequency response of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.



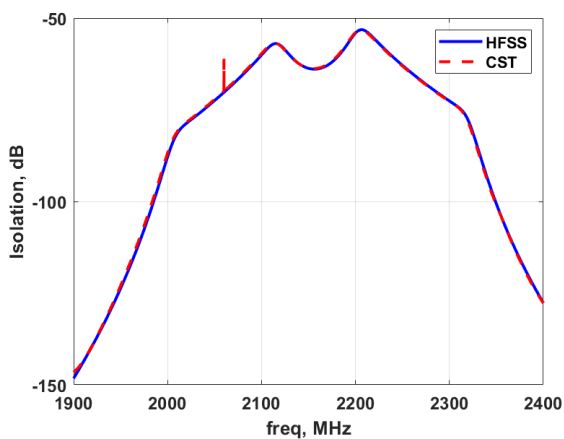
شکل ۲۴- تلف عبوری دیپلکسر با فیلترهای مرتبه چهار.

Fig. 24. Insertion loss of the proposed 4-order combline diplexer using star junction.



شکل ۲۹- تلف عبوری دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 29. Insertion loss of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.



شکل ۳۰- ایزولاسیون دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 30. Isolation of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.

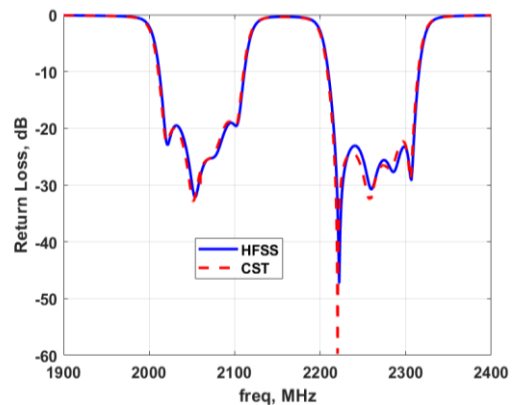
نتیجه گیری

دیپلکسر دارای دو فیلتر میان گذر با فرکانس‌های گذر متفاوت است که در سیستم‌های مخابراتی دوطرفه هم‌زمان، ارسال و دریافت را از طریق یک آنتن امکان‌پذیر می‌نماید و به علت محدودیت فضای موجود در ماهواره‌ها استفاده از آن‌ها به جهت کاهش تعداد آنتن مورد استفاده، رایج است. در این مقاله ابتدا الزامات موجود در زیرسیستم تله متری و تله کامند یک ماهواره در مدار LEO اشاره شده و مشخصات مورد نیاز دیپلکسر جهت استفاده در این زیرسیستم در باند فرکانسی S استخراج شده است. به دلیل محدودیت توان مصرفی ماهواره و اهمیت جلوگیری از اتلاف توان تولیدی، در طراحی این قطعه، تلف عبوری بسیار کم و استفاده از فناوری‌هایی با ضریب کیفیت بالا در طراحی فیلتر مورد توجه است. در این

جدول ۴- ابعاد نهایی دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

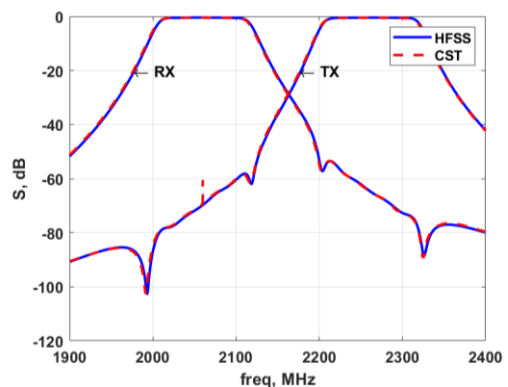
Table 4. Final dimension of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.

Dimension unit: Millimeter			
D1	35.14	U1	31.82
D2	34.21	U2	30.99
D3	34.22	U3	31
D4	34.21	U4	30.99
D5	34.96	U5	31.72
D12	12.74	U12	12.89
D23	13.76	U23	13.96
D34	13.76	U34	13.96
D45	12.64	U45	12.89
Di1	16.01	Ui1	33.02
D5o	4.03	U5o	5.02
Ld	36.3	Lu	11.12



شکل ۲۷- تلف بازگشتی در دهانه مجموع دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 27. Input return loss of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.



شکل ۲۸- پاسخ انتقال دیپلکسر با فیلترهای مرتبه پنج.

Fig. 28. Frequency response of the proposed 5-order combline diplexer using star junction.

plane T-junction and its application to waveguide diplexer design," in *German Microwave Conference-GEMIC*, Karlsruhe, Germany, 2006.

- [9] J. Dittloff and F. Arndt, "Computer-aided design of slit-coupled H-plane T-junction diplexers with E-plane metal-insert filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 36, no. 12, pp. 1833-1840, 1988, <https://doi.org/10.1109/22.17420>.
- [10] E. Ofli, R. Vahldieck, and S. Amari, "Novel E-plane filters and diplexers with elliptic response for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, pp. 843-851, 2005, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.842506>.
- [11] A. V. G. Subramanyam, D. Sivareddy, V. V. Srinivasan, and V. K. Hariharan, "Multipaction-free combline diplexer for deep space applications," in *International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, Bangalore, India, 2014, pp. 217-220, <https://doi.org/10.1109/IMaRC.2014.7039011>.
- [12] M. Fallahzadeh, B. Ahmadi, and A. Kheirdoost, "A low-profile interdigital diplexer for LEO satellites applications," in *31st International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, Iran, 2023, pp. 32-35, [10.1109/ICEE59167.2023.10334910](https://doi.org/10.1109/ICEE59167.2023.10334910).
- [13] K. Kobrin, V. Rudakov, V. Sledkov, L. Zimeng, and M. Manuilov, "A novel design of wideband diplexer for base station applications," in *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 148-151, <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792810>.
- [14] M. B. Manuilov and K. V. Kobrin, "Small-size waveguide diplexer based on E-plane quasi-planar filters," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 59, no. 4, pp. 301-309, 2016, <https://doi.org/10.1007/s11141-016-9698-2>.
- [15] K. Kobrin, V. Rudakov, and M. Manuilov, "Compact design of diplexer for base stations operating within frequency bands 2.3–2.4/2.49–2.69GHz," in *29th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2019)*, (ITM Web of Conferences), vol. 30, 2019, Art. no. 06002, <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193006002>.
- [16] F. Teberio, I. Arregui, P. Soto, M. A. G. Laso, V. E. Boria and M. Guglielmi, "High-performance compact diplexer for Ku/K-band satellite applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 10, pp. 3866-3876, 2017, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2691773>.
- [17] E. M. Eldesouki, Kh. M. Ibrahim, and A. M. Attiya, "Analysis and design of a diplexer for satellite communication system," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*

مقاله با استفاده از فناوری کابل‌های هم محور با سطح مقطع مربعی که هم ضریب کیفیت مناسب و هم ابعاد و جرم کمی دارند، دیپلکسری با تلف بازگشتی بهتر از 20 dB، تلف عبوری کمتر از 0.5 dB و ایزولاسیون بهتر از 50 dB طراحی شده است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] J. Uher, J. Bornemann, and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed Systems: Theory and CAD*, Artech House, 1993.
- [2] A. Morini and T. Rozzi, "Analysis of compact E-plane diplexers in rectangular waveguide," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 8, pp. 1834-1839, 1995, <https://doi.org/10.1109/22.402268>.
- [3] R. J. Cameron, C. M. Kudisa, and R. R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2018.
- [4] A. García Lampérez, S. Llorente Romano, M. Salazar Palma, and T. K. Sarkar, "Efficient electromagnetic optimization of microwave filters and multiplexers using rational models," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 2, pp. 508-521, 2004, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.822021>.
- [5] F. M. Vanin, D. Schmitt, and R. Levy, "Dimensional synthesis for wide-band waveguide filters and diplexers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 11, pp. 2488-2495, 2004, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.837146>.
- [6] U. Rosenberg, M. Knipp, and S. Amari, "Compact diplexer design using different E-plane triplets to serve contiguous passbands with high interband selectivity," in *European Microwave Conference*, Manchester, UK, 2006, pp. 133-136, <https://doi.org/10.1109/EUMC.2006.281218>.
- [7] J. M. Rebollar, J. R. Montejo Garai, and A. Ohoro, "Asymmetric H-plane T-junction for broadband diplexer applications," in *Antennas and Propagation Society International Symposium. Transmitting Waves of Progress to the Next Millennium. 2000 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (C)*, Salt Lake City, UT, USA, 2000, pp. 2032-2035 vol.4, <https://doi.org/10.1109/APS.2000.874892>.
- [8] J. Bornemann and M. Mokhtaari, "The bifurcated E-

- Theory and Techniques*, vol. 58, no. 12, pp. 3732–3741, 2010, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2086570>.
- [20] P. Zhao and K. L. Wu, "An iterative and analytical approach to optimal synthesis of a multiplexer with a star-junction," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 12, pp. 3362–3369, 2014, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2364222>.
- [18] G. Macchiarella and S. Tamiazzo, "Novel approach to the synthesis of microwave diplexers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4281–4290, 2006, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.885909>.
- [19] G. Macchiarella and S. Tamiazzo, "Synthesis of star-junction multiplexers," *IEEE Transactions on Microwave*

Original Research Paper

Compact Dual-Band Wearable Antenna for Wireless Body Area Network Applications

Farzad Mohajeri*  and Maryam Darabi

Department of Communications and Electronics Engineering, Faculty of Electronics and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 14 June 2024

Revised 29 August 2024

Accepted 09 September 2024

Available Online 18 September 2024

Keywords:

Microstrip antenna

Dual-band antenna

Wearable antenna

Wireless body area networks

Scientific absorption rate

ABSTRACT

This study introduces a compact, low-profile monopole antenna for wireless body area network (WBAN) applications. The proposed antenna is derived from a conventional microstrip rectangular patch design and operates in two industrial, scientific, and medical (ISM) frequency bands: 2.4 GHz (2.4–2.5 GHz) and 5.8 GHz (5.725–5.875 GHz). The antenna's overall dimensions are $16 \times 26 \times 0.8 \text{ mm}^3$ or $0.13\lambda_0 \times 0.212\lambda_0 \times 0.0065\lambda_0$, where λ_0 represents the free-space wavelength at 2.45 GHz. These dimensions ensure a compact and space-efficient design. The antenna achieves fractional bandwidths of 4.89% and 69.13% at 2.4 GHz and 5.8 GHz, respectively. The radiation pattern is omnidirectional at both frequency bands, with a maximum gain exceeding 4 dBi. The antenna's performance was further evaluated on a phantom model of chest tissue, demonstrating stable operation over body tissues. The specific absorption rate (SAR) at both frequency bands was also analyzed, confirming compliance with safety standards. The compact size and robust performance make the proposed antenna a promising candidate for integration into WBAN sensors and devices. All simulations were performed using CST Microwave Studio software.

*Corresponding Author's E-mail: mohajeri@shirazu.ac.ir**How to Cite this Article:**F. Mohajeri and M. Darabi, "Compact dual-band wearable antenna for wireless body area network applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 28-39, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1487>.**COPYRIGHTS**© 2024 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/).

آنتن پوشیدنی فشرده دوبانده جهت کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش

فرزاد مهاجری^{۱*} و مریم دارابی^۲

۱- استاد، گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در این مقاله یک آنتن تک قطبی فشرده و کوچک جهت کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش ارائه شده است. این آنتن بر پایه آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم به گونه‌ای طراحی شده تا در دو باند فرکانسی پزشکی، یعنی باندهای ۲/۴ (۲/۵-۲/۴) و ۵/۸ (۵/۷۲۵-۵/۸۷۵) گیگاهرتز عمل کند. ابعاد کلی این آنتن $۱۶ \times ۲۶ \times ۰/۸$ میلی‌متر مکعب یا $۰/۰۶۵\lambda_0 \times ۰/۲۱۲\lambda_0 \times ۰/۱۳\lambda_0$ بوده که در آن λ_0 طول موج در فضای آزاد و در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز بوده که بسیار کوچک و کم‌حجم است. همچنین، پهنای باند نسبی آنتن در باندهای فرکانسی ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز به ترتیب ۴/۸۹ و ۶۹/۱۳ درصد می‌باشد. همچنین آنتن پیشنهادی در هر دو باند فرکانسی یک الگوی تشعشی همه‌جهته را با بیشینه بهره بیش از ۴ dBi به دست می‌دهد. در این مقاله، عملکرد آنتن بر روی یک مدل فانتوم از قفسه سینه نیز مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که آنتن عملکردی با ثبات بر روی بافت بدن دارد. همچنین سطح آهنگ جذب ویژه در هر دو باند فرکانسی محاسبه شده است. با توجه به ابعاد بسیار کوچک و عملکرد مناسب آن، آنتن طراحی شده می‌تواند نامزد بسیار مناسبی برای دستگاه‌ها و سنسورهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش باشد. تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST صورت گرفته است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۵ خرداد ۱۴۰۳
بازنگری ۸ شهریور ۱۴۰۳
پذیرش ۱۹ شهریور ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۸ شهریور ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

آنتن مایکرواستریپ
آنتن دو بانده
آنتن پوشیدنی
شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش
آهنگ جذب ویژه

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mohajeri@shirazu.ac.ir

How to Cite this Article:

F. Mohajeri and M. Darabi, "Compact dual-band wearable antenna for wireless body area network applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 28-39, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1487>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



علائم و اختصارات

(DGS) Defected Ground Structure	صفحه زمین معیوب
(EBG) Electromagnetic band-gap	باند ممنوعه الکترومغناطیسی
(HBC) Human bond communications	ارتباط بدن انسان
(ISM) Industrial, Scientific and Medical	پزشکی علمی - صنعتی
Off-Body	خارج از بدن
On-Body	بر بدن
(SAR) Specific Absorption Rate	آهنگ جذب ویژه
(WBAN) Wireless Body Area Network	شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش

مقدمه

رشد سریع در حوزه حسگرهای فیزیولوژیک، مدارات مجتمع توان پایین و ارتباطات بی‌سیم، نسل جدیدی از شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ایجاد نمود که با عنوان شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش (WBAN) شناخته می‌شوند [۱]. در دو دهه اخیر توجه بسیاری به سمت سیستم‌های ارتباطی پوشیدنی خواه از نوع بر بدن یا خارج از بدن جلب شده است. به این ترتیب، شبکه‌های WBAN در گستره عظیمی از کاربردها در حوزه سینما، سرگرمی، ورزش، تشخیص حرکت و کاربردهای پزشکی از قبیل پایش و تشخیص به‌کار می‌روند. به عبارت بهتر، این شبکه‌ها آینده زندگی روزمره ما خواهند بود [۲].

در شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش، سه رده ارتباطی جهت دریافت اطلاعات از بدن و ارسال آن‌ها به مراکز و پایگاه‌های داده وجود دارد، که از جمله آن‌ها می‌توان به پروتکل‌های بلوتوث، ارتباط بدن انسان (HBC) و IEEE802.11 اشاره نمود [۳]. آنتن‌ها به‌عنوان یک وسیله فرستنده/گیرنده در ارتباطات چنین شبکه‌هایی نقشی اساسی را بر عهده دارند. لذا بنا بر آنچه که توضیح داده شد، آنتن‌های مورد استفاده در چنین شبکه‌هایی باید قادر به عملکرد در باندهای مختلف چون ۸۰۰-۲۲۰۰ مگاهرتز مخصوص شبکه‌های تلفن همراه، و باندهای ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز مخصوص ارتباطات شبکه باشند [۴].

در شبکه‌های WBAN، طراحی و ساخت یک آنتن با ابعاد کوچک، اشغال کمترین فضای ممکن و نیز داشتن عملکرد چندگانه یک چالش اساسی و مهم است. بنابراین آنتن‌های پوشیدنی مورد استفاده در شبکه‌های نزدیک به بدن باید به اندازه کافی کوچک و کم حجم بوده و نیز وزن کمی داشته باشند [۵]. به‌علاوه این آنتن‌ها باید دارای

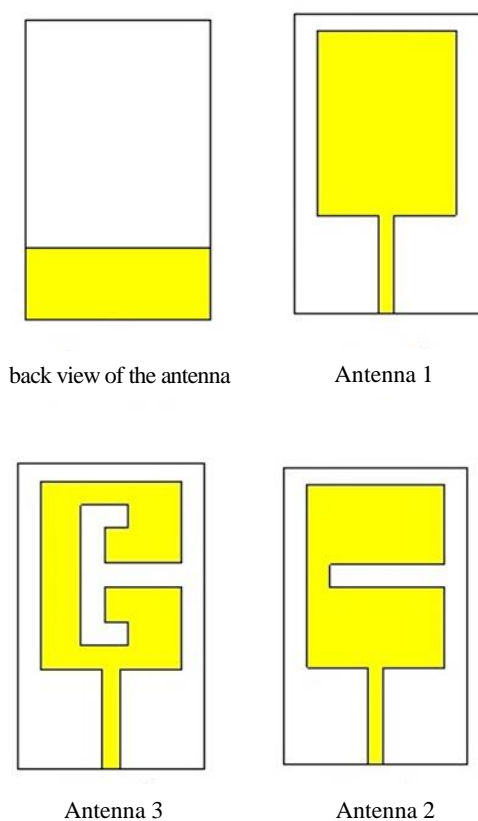
استقامت مکانیکی مناسب بوده و حتی‌الامکان قابل انعطاف هم باشند. به‌دلیل عملکرد در نزدیکی بدن انسان، که محیطی تلفدار برای امواج الکترومغناطیسی است، این آنتن‌ها باید عملکرد قابل قبولی را در نزدیکی بافت بدن به‌دست دهند [۶]. همچنین پر واضح است که ایمنی کاربران نیز باید حفظ شود، از این رو کمیت سطح آهنگ جذب ویژه (SAR) که نشان‌دهنده میزان ضرررسانی آنتن و دستگاه‌های مختلف در نزدیکی بدن است باید مطابق با استانداردهای بین‌المللی FCC و ICNIR باشد [۷،۸]. در سال‌های اخیر تکنیک‌های مختلفی جهت کوچک‌سازی آنتن و همزمان دستیابی به عملکرد مناسب، مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به مواردی چون استفاده از تکنیک صفحه زمین ناقص (PGS) [۹،۱۰]، تکنیک فراکتال کردن پیچ [۱۱،۱۲]، تکنیک صفحه زمین معیوب (DGS) [۱۳،۱۴]، فرامواد [۱۵-۱۷] و استفاده از ساختارهای باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG) [۱۸-۲۲]، اشاره نمود. دستیابی به یک آنتن پوشیدنی با عملکردی دو بانده در شبکه‌های بر بدن و خارج از بدن می‌تواند استفاده از آن‌ها را در کاربردهای گوناگون عملی نماید و از این رو پژوهش‌های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. تا کنون دستیابی به یک عملکرد دو بانده برای آنتن‌های پوشیدنی با استفاده از ایجاد شکاف‌های مناسب در پیچ [۲۳]، استفاده از المان‌های پارازیتیک [۲۴]، فرامواد [۲۵] و یا استفاده از pin‌های اتصال کوتاه [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله، یک آنتن پوشیدنی با ابعاد بسیار کوچک و حجم کم جهت عملکرد در دو باند فرکانسی ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز که مختص فعالیت‌های پزشکی علمی - صنعتی (ISM) پیشنهاد شده است. آنتن پیشنهادی به‌خوبی هر دو باند مذکور را پوشش داده و عملکرد بسیار مناسبی را از لحاظ پهنای باند، الگوی تشعشی، راندمان و بهره به‌دست داده است. ابعاد کلی آنتن پیشنهادی تنها $0.16 \times 0.26 \times 0.18 \lambda_0$ میلی‌مترمکعب یا $0.065 \lambda_0 \times 0.212 \lambda_0 \times 0.13 \lambda_0$ است که در آن λ_0 طول موج عملکردی در فضای آزاد و در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز است. در این طراحی از تکنیک صفحه زمین ناقص و تکنیک افزایش طول عبوری جریان سطحی پیچ جهت دستیابی به یک عملکرد دوبانده استفاده شده است. همچنین در این مقاله مطالعات پارامتری جهت بررسی رفتار آنتن در هر دو باند فرکانسی، با استفاده از نرم‌افزار CST صورت گرفته است. در نهایت عملکرد آنتن پیشنهادی بر روی یک نمونه فانتوم از بافت بدن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته که عملکرد با ثبات و قابل قبولی حاصل شده است. همچنین میزان SAR برای آنتن پیشنهادی در هر دو باند فرکانسی عملکرد محاسبه شده است. به این ترتیب با توجه به عملکرد مناسب، ابعاد کوچک و سادگی طراحی، آنتن پیشنهادی می‌تواند نامزد بسیار مناسبی جهت ارتباطات بر بدن و خارج از بدن باشد.

طراحی آنتن

طراحی اولیه از یک آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم آغاز شده است، که هندسه آن در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود. در این طراحی از زیر لایه راجرز RO4003 (ثابت دی‌الکتریک $3/55$ و تانژانت تلفی $0/0027$) با ضخامت $0/8$ میلی‌متر، و نیز از ورقه‌های مس با ضخامت 35 میکرومتر برای المان‌های هادی استفاده شده است. آنتن مایکرواستریپ مرسوم جهت داشتن عملکرد مناسب، باید ابعادی در حدود نصف طول موج در فرکانس تشدید را داشته باشد. این ابعاد برای استفاده در کاربردهای پوشیدنی و WBAN بسیار بزرگ خواهد بود و به همین دلیل جهت کوچک‌سازی آنتن از تکنیک افزایش طول عبوری جریان که در [۲۷] به تفصیل توضیح داده شده، استفاده می‌شود. ابعاد آنتن مایکرواستریپ مرسوم جهت داشتن عملکرد در فرکانس $2/45$ گیگاهرتز باند ISM با استفاده از فرمولاسیون‌های ارائه شده در [۲۸، ۲۹] محاسبه و توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز CST بهینه شده است. ابعاد حاصله برای آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم $62 \times 50 \times 0/8$ میلی‌متر مکعب می‌باشد. نمودار اندازه S_{11} آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همانطور که مشخص است آنتن با طولی نزدیک به نصف طول موج در فرکانس $2/45$ گیگاهرتز یک تشدید به میزان -13 دسی‌بل را به دست داده است.

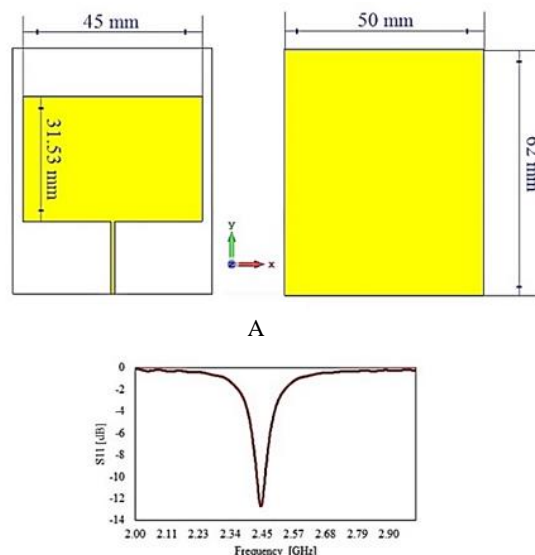
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود جهت طراحی آنتن پیشنهادی با ابعاد کوچک، از تکنیک صفحه زمین ناقص استفاده شده است. استفاده از این تکنیک همچنین با کاهش ضریب کیفیت آنتن، پهنای باند آن را نیز افزایش می‌دهد. در این طراحی جهت تغذیه آنتن به سادگی از یک خط مایکرواستریپ 50 اهمی استفاده شده است. مراحل طراحی آنتن پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود جهت افزایش طول عبوری جریان و در نتیجه افزایش طول الکتریکی پیچ از یک شکاف T شکل که 90 درجه چرخیده، استفاده شده است. به این ترتیب، بیش از 86% کاهش ابعاد در مقایسه با آنتن مایکرواستریپ مرسوم حاصل می‌شود. ابعاد کلی آنتن پیشنهادی تنها $16 \times 26 \times 0/8$ میلی‌متر مکعب یا $0/065 \lambda_0 \times 0/212 \lambda_0 \times 0/13 \lambda_0$ بوده که در آن λ_0 طول موج عملکردی در فضای آزاد و در فرکانس $2/45$ گیگاهرتز است.



شکل ۲- مراحل طراحی آنتن پیشنهادی.

Fig. 2. Design steps for the proposed antenna.

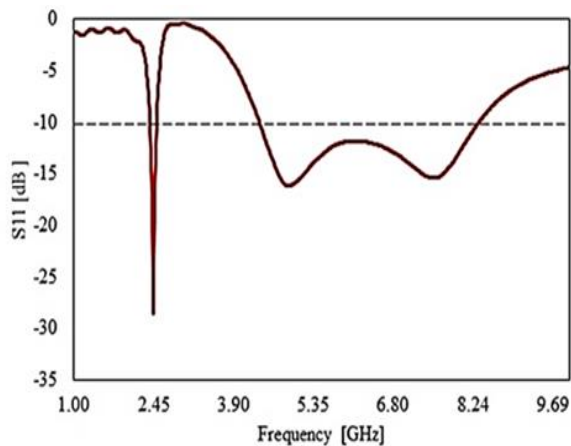
شکل ۳ نمودار اندازه S_{11} را برای مراحل مختلف طراحی نشان می‌دهد. همانطور که از این نمودار مشخص است با معرفی صفحه زمین ناقص، یعنی آنتن ۱، در حوالی فرکانس‌های ۴ و ۷ گیگاهرتز دو تشدید با



B

شکل ۱- (الف) هندسه آنتن مایکرواستریپ با پیچ مستطیلی مرسوم، (ب) نمودار اندازه S_{11} آنتن، استخراج شده از نرم‌افزار CST.

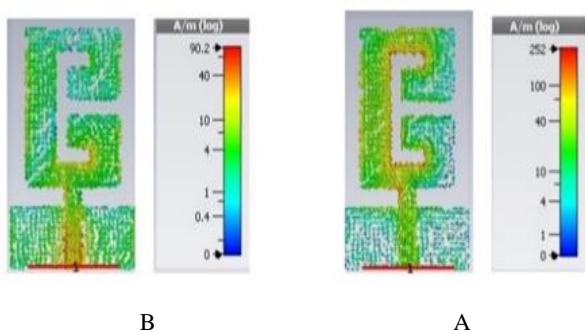
Fig. 1. (a) Conventional rectangular microstrip antenna, (b) magnitude of the antenna S_{11} , obtained by CST software.



شکل ۵- نمودار اندازه S₁₁ آنتن پیشنهادی.

Fig. 5. The magnitude of S₁₁ for the proposed antenna.

برای آن که دید بهتری از رفتار کلی ساختار حاصل شود، نحوه توزیع جریان سطحی برای هر دو باند فرکانسی استخراج شده است. شکل ۶- الف و ب توزیع جریان سطحی را به ترتیب برای دو فرکانس ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، بیشینه جریان در اطراف شکاف T شکل متمرکز شده است، از این رو شکاف T شکل در پیچ، بیشترین تأثیر را بر عملکرد در باند فرکانسی پایین‌تر (۲/۴ گیگاهرتز) دارد، حال آن که مطابق با شکل ۶-ب بیشینه جریان در اطراف خط تغذیه و نیز صفحه زمین ناقص متمرکز شده است، لذا برای باند فرکانسی بالاتر (۵/۸ گیگاهرتز)، صفحه زمین ناقص عامل تعیین‌کننده و تشدید و پهنای باند آنتن است.

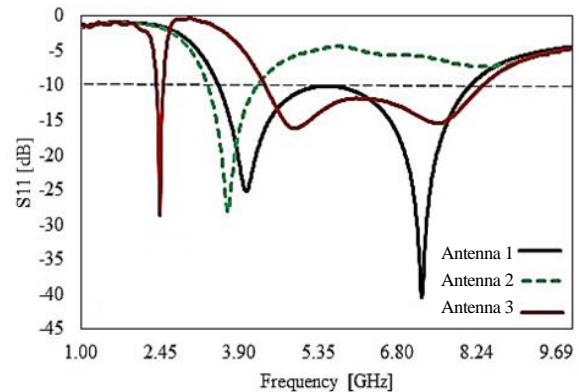


شکل ۶- توزیع چگالی جریان سطحی در فرکانس‌های: (الف) ۲/۴۵، (ب) ۵/۸ گیگاهرتز.

Fig. 6. Surface current density distribution at frequencies: (a) 2.45, (b) 5.8 GHz.

به جهت بررسی رفتار آنتن پیشنهادی در هر یک از باندهای فرکانسی، در ادامه یک مطالعه پارامتری صورت گرفته تا تأثیر هر

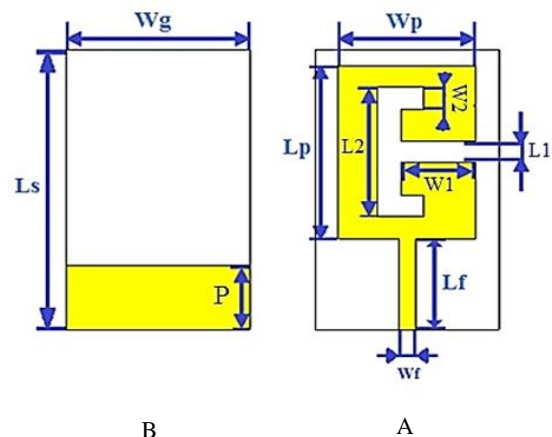
پهنای باند کمتر از ۱۰- دسی‌بل در حدود ۴/۶۱ گیگاهرتز (۳/۵۲ تا ۸/۱۳ گیگاهرتز) حاصل شده است. اما با معرفی شکاف T شکل در پیچ آنتن علاوه بر پوشش این ناحیه فرکانسی، یک عملکرد در باند ۲/۴ گیگاهرتز ISM را با فرکانس مرکزی ۲/۴۵ گیگاهرتز نیز به دست آمده است.



شکل ۳- مقایسه نمودار اندازه S₁₁ برای مراحل مختلف طراحی.

Fig. 3. Comparison of the magnitude of S₁₁ for the different steps of design.

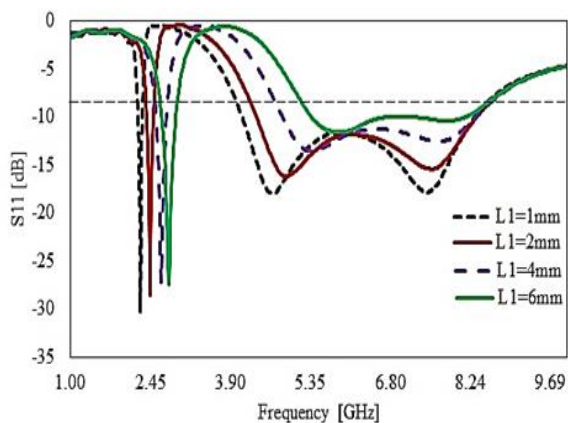
به این ترتیب با وجود صفحه زمین ناقص و نیز شکاف T شکل، یک عملکرد دو بانده حاصل شده است. هندسه نهایی آنتن پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با نمودار اندازه S₁₁ شکل ۵، آنتن پیشنهادی در باند فرکانسی ۲/۴ گیگاهرتز، محدوده فرکانسی ۲/۳۹ تا ۲/۵۱ گیگاهرتز را در برمی‌گیرد. همچنین در باند فرکانسی ۵/۸ گیگاهرتز نیز محدوده فرکانسی ۴/۳۶ تا ۸/۳۷ گیگاهرتز را شامل می‌شود. به این ترتیب آنتن پیشنهادی به خوبی هر دو باند ۲/۴ و ۵/۸ گیگاهرتز ISM را پوشش می‌دهد.



شکل ۴- هندسه نهایی آنتن پیشنهادی: (الف) نمای روبه‌رو، (ب) نمای پشت.

Fig. 4. Final geometry of the proposed antenna: (a) front view, (b) back view.

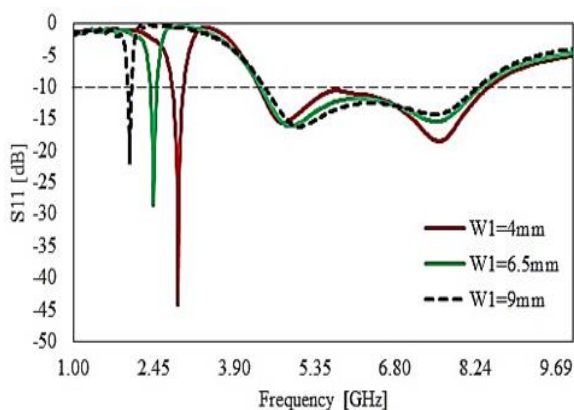
فرکانس تشدید به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شده‌است. از این‌رو این پارامتر باید به‌دقت انتخاب شود تا بهترین عملکرد را در هر دو باند فرکانسی به‌دست دهد.



شکل ۸- نمودار اندازه S_{11} برای تغییرات پارامتر L_1 .

Fig. 8. The magnitude of S_{11} for L_1 parameter changes.

مطابق با شکل ۹، مشاهده می‌شود که پارامتر W_1 ، پارامتری تعیین‌کننده برای باند فرکانسی پایین‌تر بوده و تغییرات آن تأثیر چندانی بر عملکرد در باند فرکانسی بالاتر ندارد. دیده می‌شود که با افزایش W_1 می‌توان عملکرد در فرکانس‌های پایین‌تر از ۲/۴۵ گیگاهرتز را به‌دست آورد.



شکل ۹- نمودار اندازه S_{11} برای تغییرات پارامتر W_1 .

Fig. 9. The magnitude of S_{11} for W_1 parameter changes.

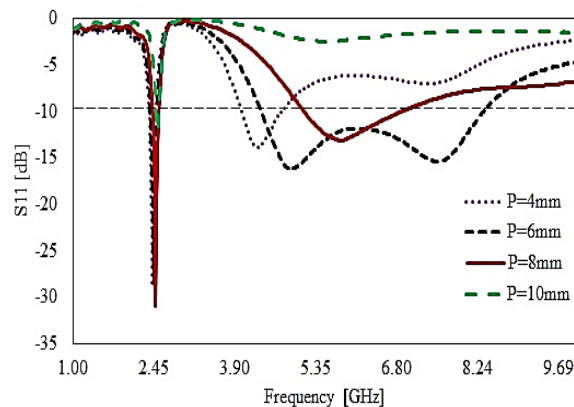
همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، پارامتر L_2 نیز تا حدی بر عملکرد آنتن خصوصاً در باند فرکانسی پایین‌تر اثرگذار بوده و می‌تواند جهت تنظیم فرکانس تشدید این باند فرکانسی در نظر گرفته شود.

یک از پارامترهای طراحی شکل ۴ بر عملکرد کلی آنتن مورد بررسی قرار گیرد.

مطالعه پارامتری

به‌منظور دستیابی به طرحی بهینه برای آنتن پوشیدنی پیشنهادی، یک مطالعه پارامتری بر روی ابعاد مختلف صورت گرفته است. در هر یک از مطالعات، با ثابت نگهداشتن سایر ابعاد، تنها یک پارامتر را تغییر داده و اثر آن بر عملکرد آنتن بررسی می‌شود.

همانطور که از شکل ۴ برمی‌آید، یکی از پارامترهای مؤثر در طراحی، طول صفحه زمین (P) می‌باشد. در شکل ۷ اثر تغییرات این پارامتر بر نمودار اندازه S_{11} نشان داده شده‌است. همانگونه که مشخص است، پارامتر P بر عملکرد آنتن در باند فرکانسی بالاتر (۵/۸ گیگاهرتز) اثرگذار بوده و تغییرات آن تأثیر چندانی بر باند فرکانسی پایین‌تر (۲/۴ گیگاهرتز) ندارد. با افزایش P تطبیق آنتن به‌شدت در این باند فرکانسی تخریب شده و با کاهش بیش از اندازه آن نیز، پهنای باند کوچک‌تر با یک فرکانس تشدید حاصل می‌شود. بنابراین برای P برابر با ۶ میلی‌متر بهترین عملکرد به‌دست آمده‌است.

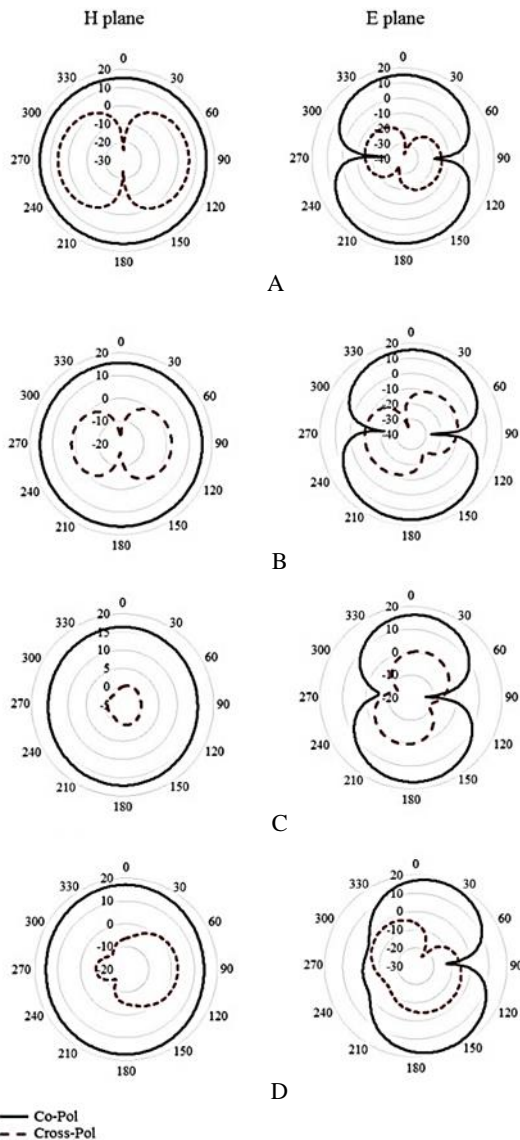


شکل ۷- نمودار اندازه S_{11} برای تغییرات پارامتر P .

Fig. 7. The magnitude of S_{11} for P parameter changes.

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در طراحی، ضخامت دسته شکاف T شکل یعنی پارامتر L_1 است. براساس شکل ۸ مشاهده می‌شود که این پارامتر در هر دو باند فرکانسی مؤثر بوده و لذا حالتی تنظیم‌کنندگی دارد. با کاهش L_1 پهنای باند عملکردی در باند فرکانسی بالاتر بیشتر شده و بالعکس پهنای باند کوچک‌تری در باند فرکانسی پایین‌تر حاصل شده‌است. با افزایش L_1 پهنای باند عملکردی در باند پایین‌تر بیشتر می‌شود گرچه

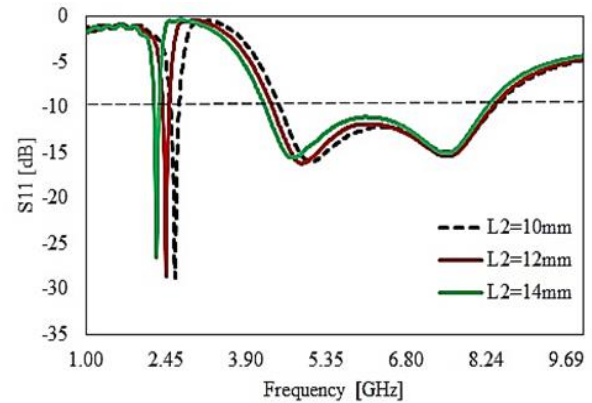
انگلیسی در صفحه E به دست آمده و همچنین ایزولاسیون خوبی بین سطوح پلاریزاسیون هم راستا و غیر هم راستا حاصل شده است.



شکل ۱۱- الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن پوشیدنی پیشنهادی در فرکانس‌های: (الف) ۲/۴۵، (ب) ۴/۳۷، (پ) ۵/۸، (ت) ۷/۵ گیگاهرتز.

Fig. 11. The two-dimensional radiation pattern for the proposed wearable antenna at frequencies: (a) 2.45, (b) 4.37, (c) 5.8, (d) 7.5 GHz.

راندمان کل برای آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز ۸۸/۱٪، و برای فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز نیز ۸۸/۴۲٪ به دست آمده است. منحنی تغییرات راندمان کل برحسب فرکانس در شکل ۱۲-الف ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود راندمان کل در سرتاسر هر دو باند فرکانسی تقریباً یکسان بوده و میزان آن بیشتر از ۸۰٪ است. بیشینه



شکل ۱۰- نمودار اندازه S_{11} برای تغییرات پارامتر L_2 .

Fig. 10. The magnitude of S_{11} for L_2 parameter changes.

به این ترتیب مشاهده شد که پارامترهای P و L_1 بر عملکرد آنتن در باند ۵/۸ گیگاهرتز اثر گذارند. همچنین پارامترهای L_1 و W_1 بر عملکرد در باند ۲/۴ گیگاهرتز اثر می‌گذارند. از این رو جهت داشتن بهینه‌ترین عملکرد در هر دو باند فرکانسی، در تعیین این پارامترها باید مصالحه‌ای صورت گیرد. مقادیر بهینه تمامی پارامترهای طراحی آنتن پیشنهادی در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- اندازه بهینه پارامترها برای آنتن پوشیدنی نهایی.

Table 1. Optimum sizing parameters for the final wearable antenna.

Parameter	Size[mm]	Parameter	Size[mm]
Ls	26	Wf	1.7
Ws	16	P	6
Lp	16	L1, W2	2
Wp	12	W1	6.5
Lf	8.5	L2	12

عملکرد در فضای آزاد

دستیابی به یک الگوی تشعشی همه جهته، به واسطه استفاده از صفحه زمین ناقص، کاملاً قابل انتظار بوده است. این الگوی تشعشی در سرتاسر هر دو باند فرکانسی یکسان بوده و ثابت حفظ شده است. الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های ۲/۴۵، ۴/۳۷، ۵/۸ و ۷/۵ گیگاهرتز در شکل‌های ۱۱-الف تا ت رسم شده است. همانگونه که مشخص است برای تمامی فرکانس‌های مذکور، یک الگوی تشعشی همه جهته در صفحه H، و یک الگوی تشعشی مانند هشت

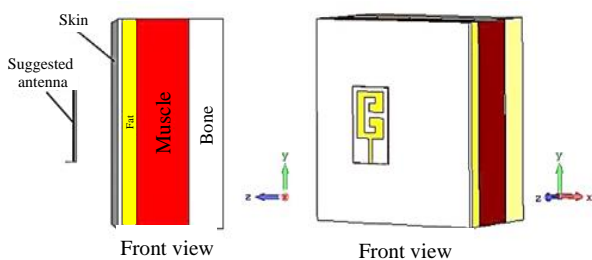
مورد استفاده در ساختار آنتن، فرکانس تشدید به سمت فرکانس‌های پایین جابه‌جا می‌شود. همچنین به‌واسطه رسانندگی و طبیعت تلفدار پوست انسان، بازتاب‌هایی از سطح آن رخ می‌دهد که خود سبب می‌شود آنتن از تنظیم فرکانس تشدید خود خارج شود [۳۰]. در این بخش از یک مدل فانتوم بافت قفسه سینه استفاده شده تا عملکرد آنتن پیشنهادی در نزدیکی بافت مورد بررسی قرار گیرد.

مدل قفسه سینه متشکل از استخوان، ماهیچه، چربی و پوست است که مشخصه‌های الکتریکی هریک شامل ثابت دی‌الکتریک و ضریب هدایت نسبی در فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۴ گیگاهرتز در جدول ۲ گزارش شده‌است [۳۱]. مدل قفسه سینه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که آنتن پیشنهادی بر روی آن و در فاصله ۱۵ میلیمتری از آن قرار گرفته است.

جدول ۲- خواص الکتریکی بافت [۳۱].

Table 2. Electrical properties of tissue [31].

Tissue	ϵ_r (2.45 GHz)	σ_r (2.45 GHz)	ϵ_r (5.4 GHz)	σ_r (5.4 GHz)
Bone	11.41	0.384	9.946	1.010
Muscle	52.79	1.705	49.27	4.266
Fat	5.28	0.102	5.010	0.254
Skin	38.06	1.440	35.61	3.218

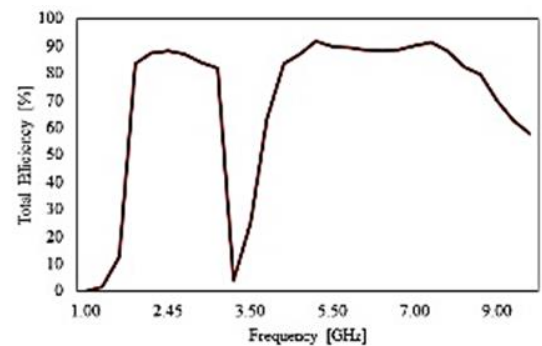


شکل ۱۳- قرارگیری آنتن پیشنهادی بر روی مدل فانتوم بافت قفسه سینه.

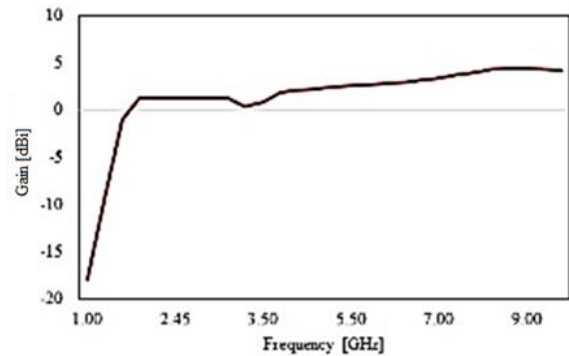
Fig. 13. Suggested antenna placement on chest tissue phantom model.

شکل ۱۴ مقایسه‌ای از نمودار اندازه S₁₁ آنتن در هنگام قرارگیری بر مدل بافت در فواصل ۸ و ۱۵ میلیمتری را با نتیجه حاصله از فضای آزاد نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هنگام قرارگیری آنتن در فواصل ۸ و ۱۵ میلیمتری بر روی مدل

راندمان کل، بیش از ۹۰٪ و در فرکانس ۷ گیگاهرتز حاصل شده‌است. منحنی تغییرات بهره برحسب فرکانس در شکل ۱۲-ب نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است میزان بهره در هر دو باند فرکانسی، در سرتاسر باند، حفظ شده و مقداری تقریباً ثابت دارد. میزان بیشینه بهره به‌دست آمده در باندهای عملکردی ۴/۳dBi است. در فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز میزان بهره به‌ترتیب ۱/۲۳dBi و ۲/۷۵dBi به‌دست آمده‌است. پس مشاهده می‌شود که با توجه به ابعاد کوچک و حجم کم آنتن پیشنهادی، عملکرد آن در هر دو باند فرکانسی بسیار مناسب بوده‌است و می‌تواند نامزد بسیار خوبی برای ارتباطات خارج از بدن در حوزه شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش باشد.



A



B

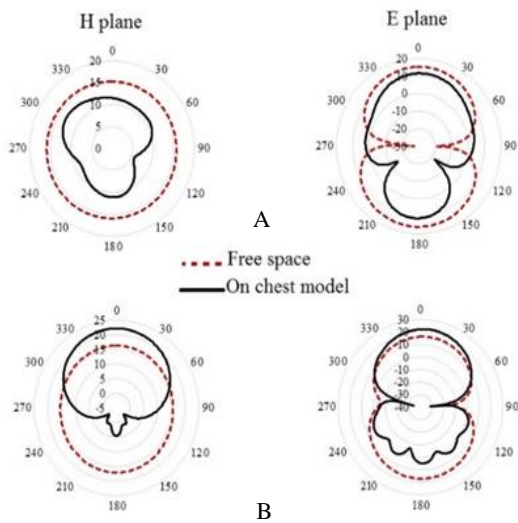
شکل ۱۲- منحنی تغییرات برحسب فرکانس برای: (الف) راندمان کل، (ب) بهره.

Fig. 12. Variations versus frequency for: (a) total efficiency, (b) gain.

عملکرد بر روی بدن

برای سیستم‌های آنتنی در شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش، داشتن عملکرد مناسب و قابل قبول در نزدیکی بدن امری ضروری است. بافت انسان به‌دلیل مشخصه‌های پیچیده از قبیل ثابت دی‌الکتریک بالا و طبیعت تلفدار خود، پارامترهای عملکردی آنتن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌دلیل ثابت دی‌الکتریک بالای بافت نسبت به زیرلایه‌های

با این حال مطابق با شکل ۱۵-ب مشاهده می‌شود که برای آنتن در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز و در صفحات E و H میزان تشعشعات عقبی تا حدود ۱۰ دسی‌بل نسبت به فضای آزاد کاهش یافته و همزمان میزان تشعشعات جلویی نیز تا حدود ۵ دسی‌بل افزایش یافته است. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که در فرکانس‌های بالاتر به دلیل طبیعت تلفدار بافت و نیز ثابت دی‌الکتریک بالا و افزایش رسانندگی در این فرکانس‌ها، بازتاب‌ها از سطح پوست بیشتر شده و لذا در عین کاهش تشعشعات عقبی، تشعشعات در نیم‌فضای جلویی نیز افزایش یافته است.

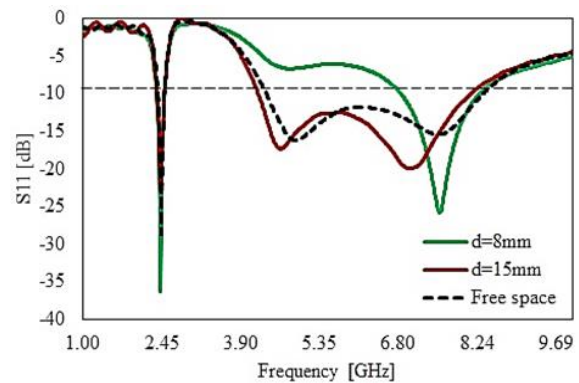


شکل ۱۵- مقایسه الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن در حالت قرارگیری بر مدل بافت با قرارگیری در فضای آزاد در فرکانس‌های: الف) ۲/۴۵ و ب) ۵/۸ گیگاهرتز.

Fig. 15. Comparison of the two-dimensional radiation pattern of the antenna in the state of placement on the tissue model with placement in free space at frequencies: (a) 2.45, (b) 5.8 GHz.

بهره آنتن پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز تنها ۰/۲۹dBi به دست آمده که نسبت به فضای آزاد کاهش چشمگیری داشته است، این مسئله به دلیل مکانیزم‌های جذب و بازتاب انرژی به دلیل اختلاف بسیار زیاد بین مشخصه‌های دی‌الکتریک هوا و بافت بدن است، گرچه مسئله در فرکانس‌های بالاتر متفاوت است. همانطور که توضیح داده شد به دلیل افزایش رسانندگی در فرکانس‌های بالاتر و غلبه مکانیزم بازتاب بر مکانیزم جذب، سمت‌گرایی آنتن افزایش یافته و لذا در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز بیشینه بهره ۷/۹۶dBi حاصل شده است. راندمان کل برای فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز به ترتیب میزان ۲۸/۱۳ و ۸۲/۴۱ درصد به دست آمده است. به این ترتیب مشاهده می‌شود که در فاصله ۱۵ میلیمتری از مدل بافت، عملکرد آنتن کاملاً با ثبات بوده و لذا آنتن پیشنهادی می‌تواند به خوبی در ارتباطات بر بدن در حوزه WBAN نیز مورد استفاده قرار گیرد.

بافت، در باند فرکانسی پایین‌تر عملکردی کاملاً مشابه با فضای آزاد حاصل شده است و آنتن در این باند در همان فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز تشدید می‌کند. با این حال زمانی که آنتن در فاصله ۸ میلیمتری از بافت قرار دارد، نمودار اندازه S₁₁ در باند فرکانسی بالاتر بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته است و تنها در حوالی ۷/۵ گیگاهرتز یک تشدید حاصل شده است. علت این امر طبیعت تلفدار بافت و نیز ثابت دی‌الکتریک بالای آن نسبت به زیرلایه مورد استفاده در آنتن در فرکانس‌های بالا است که در نتیجه بر عملکرد کلی آنتن و فرکانس تشدید آن اثر می‌گذارد، اگرچه در فاصله ۱۵ میلیمتری از بافت عملکرد تقریباً مشابهی با فضای آزاد حاصل شده است. به این ترتیب مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد آنتن در فاصله ۱۵ میلیمتری از مدل بافت کاملاً با ثبات بوده و لذا آنتن پیشنهادی می‌تواند به خوبی در دستگاه‌ها و سنسورهای WBAN مورد استفاده قرار گیرد.

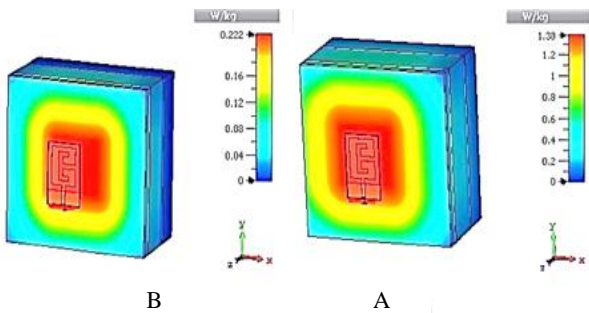


شکل ۱۴- مقایسه نمودار اندازه S₁₁ حاصله در فضای آزاد با حالت قرارگیری آنتن در فواصل مختلف از مدل بافت قفسه سینه.

Fig. 14. Comparison of the S₁₁ magnitude curves obtained in free space with the placement of the antenna at different distances from the chest tissue model.

در شکل ۱۵ الگوی تشعشی دو بُعدی آنتن در هنگام قرارگیری بر مدل بافت و در فاصله ۱۵ میلیمتری از آن، برای فرکانس‌های ۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز در هر دو صفحه E و H مشاهده می‌شود. چنانکه مشخص است، در هنگام قرارگیری آنتن بر بافت، الگوی تشعشی سمت گراتر شده و تشعشعات عقبی تا حدی تضعیف می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۵-الف مشاهده می‌شود در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز الگوی تشعشی در صفحه H، تا ۵ دسی‌بل نسبت به فضای آزاد تضعیف شده، گرچه این میزان تضعیف در صفحه E هم در تشعشعات عقبی حاصل شده است. این مسئله بدان معناست که تشعشعات عقبی توسط بدن جذب شده‌اند. از آنجا که فاصله مناسب ۱۵ میلیمتری بین آنتن و مدل بافت در نظر گرفته شده است میزان جذب تشعشعات عقبی توسط بدن مقداری کوچک است.

۲/۴۵ و ۵/۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشخص است، توان جذب شده در فرکانس‌های پایین‌تر به عمق بیشتری از بافت نفوذ کرده و میزان این نفوذ در فرکانس‌های بالاتر کمتر است. به این ترتیب آنتن پیشنهادی علاوه بر عملکرد بسیار مناسب در فضای آزاد و نیز کاملاً با ثبات بر روی بدن، عملکردی کاملاً ایمن را به دست داده است و لذا به خوبی می‌تواند در کاربردهای بر بدن نیز مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۶- توزیع توان جذب شده در نمونه بافت قفسه سینه در فرکانس‌های: (الف) ۲/۴۵، (ب) ۵/۸ گیگاهرتز.

Fig. 16. Distribution of absorbed power in the chest tissue sample at frequencies: (a) 2.45, (b) 5.8 GHz.

در جدول ۴ مقایسه‌ای از عملکرد آنتن پیشنهادی با برخی پژوهش‌های پیشین ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ابعاد آنتن پیشنهادی بسیار کوچک‌تر و کم حجم‌تر از ساختارهای ارائه شده جهت کاربردهای پوشیدنی پیشین بوده و در عین حال عملکرد بسیار مناسبی را نیز از لحاظ پهنای باند، راندمان و بهره ارائه می‌کند. به این ترتیب آنتن پیشنهادی نامزد بسیار مناسبی برای ارتباطات بر بدن و خارج از بدن در حوزه WBAN است.

ارزیابی میزان SAR

در ارتباطات بر بدن ایمن بودن دستگاه یا آنتن مورد نظر برای کاربر امری بسیار ضروری است. لذا در این بخش سطح SAR برای آنتن پیشنهادی مطابق با استاندارد ICNIRP برای مدل بافت قفسه سینه که در بخش پیشین توضیح داده شد، محاسبه شده است. همانطور که مشخص است آنتن پیشنهادی دارای یک الگوی تشعشعی همه جهته است و لذا استفاده از آن در فواصل بسیار نزدیک به بدن می‌تواند خطر آفرین باشد. اما طبق مطالعات، استفاده از آن در فاصله ۱۵ میلیمتری بی‌خطر است. در این مطالعه میزان SAR برای فاصله ۱۵ میلیمتری از نمونه بافت قفسه سینه، با توان‌های ورودی مختلف با استفاده از استاندارد IEEE C95.3 فراهم و در نرم‌افزار CST محاسبه و نتایج حاصله در جدول ۳ به صورت خلاصه گزارش شده است.

جدول ۳- محاسبه سطح SAR برای آنتن پیشنهادی برای توان‌های ورودی مختلف.

Table 3. Calculation of the SAR level for the proposed antenna for different input powers

input power	2.45 GHz		5.8 GHz	
	100 mW	500 mW	100 mW	500 mW
SAR	1.38	6.88	0.222	1.11

همانگونه که از این جدول مشخص است برای فاصله ۱۵ میلیمتری از مدل بافت بدن، میزان SAR در فرکانس ۵/۸ گیگاهرتز برای توان‌های ورودی مختلف بسیار کوچک‌تر از حد استاندارد ICNIRP بوده است. همچنین مطابق با مطالعات برای فرکانس‌های باند پایین‌تر اگر توان ورودی بیش از ۱۳۵ میلی‌وات نباشد، عملکرد کاملاً ایمنی به دست خواهد آمد. شکل ۱۶ توزیع توان جذب شده توسط بافت را در فرکانس‌های

جدول ۴- مقایسه آنتن پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین مرتبط.

Table 4. Comparison of the proposed antenna with previous related researches.

Reference	Dimensions [mm ³]	Operating frequency [GHz]	Relative bandwidth [%]	Efficiency [%]
[32]	64.6×53.7×3.94	5.8/2.4	5.1/4.9	85.6/72.8
[25]	50×74.69×4	5.3/2.45	-	-
[16]	60×60×2	5.8/2.4	49.11/46	-
[23]	40×40×1.6	5.4/2.45	41.48/29.79	-
[30]	88×95×10.2	2.4/0.402	4.16/0.99	-
[26]	70×70×2	3.5/2.38	7/4.1	59.2/63.3
This paper	16×26×0.8	5.8/2.4	69.13/4.89	88.42/88.1

نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن پوشیدنی کوچک و کم حجم با ابعاد کلی $۱۶ \times ۲۶ \times ۰/۸$ میلیمتر مکعب و عملکردی دو بانده برپایه زیرلایه راجرز RO4003 پیشنهاد شده است. علت انتخاب این زیرلایه صرفاً قیمت ارزان و در دسترس بودن آن است. آنتن پیشنهادی جهت عملکرد در دو باند فرکانسی $۲/۴$ و $۵/۸$ گیگاهرتز ISM طراحی شده و پهنای باند نسبی آنتن در باندهای فرکانسی $۲/۴$ و $۵/۸$ گیگاهرتز به ترتیب $۴/۸۹$ و $۶۹/۱۳$ درصد به دست آمده است. همچنین این آنتن یک الگوی تشعشعی همه جهته را در سرتاسر هر دو باند فرکانسی نشان می دهد. راندمان کل آنتن در فرکانس های $۲/۴۵$ و $۵/۸$ گیگاهرتز بیش از ۸۸% و بهره آنتن در فرکانس های $۲/۴۵$ و $۵/۸$ گیگاهرتز به ترتیب $۲/۷۶$ dB و $۱/۲۳$ dB به دست آمده است. میزان بیشینه بهره به دست آمده در باندهای عملکردی $۴/۳$ dB است. به علاوه عملکرد آنتن در نزدیکی مدل فانتوم بافت قفسه سینه مورد بررسی قرار گرفته و میزان SAR برای آنتن پیشنهادی در هر دو فرکانس $۲/۴۵$ و $۵/۸$ گیگاهرتز بسیار کوچک تر از حد استاندارد ICNIRP به دست آمده است. با توجه به عملکرد بسیار مناسب آنتن پیشنهادی، و نیز کوچک بودن ابعاد کلی آن، می تواند نامزد بسیار مناسبی برای کاربردهای WBAN باشد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- Conference, Loughborough, UK, 2008, pp. 132-136, <https://doi.org/10.1109/LAPC.2008.4516940>.
- [6] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "An overview of electromagnetic band-gap integrated wearable Antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 7641-7658, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2963997>.
- [7] *IEEE Standards for Safety Levels with Request to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 KHz to 300ghz*. IEEE C95.1-1991(Revision of ANSI C95.1-1982), Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1992.
- [8] *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)*, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Health Physics, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [9] A. Smida, A. Iqbal, A. J. Alazemi, M. I. Waly, R. Ghayoula, and S. Kim "Wideband wearable antenna for biomedical telemetry applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 15687-15694, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967413>.
- [10] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "Inverted e-shaped wearable textile antenna for medical applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35214-35222, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2847280>.
- [11] R. Jothi Chitra, V. Nagarajan, and D. Mukesh, "Design of wearable pentagonal fractal antenna for soldier location tracking," in *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP)*, Chennai, India, 2020, pp. 110-113, <https://doi.org/10.1109/ICCSPP48568.2020.9182179>.
- [12] A. Arif, M. Zubiar, M. Ali, M. U. Khan, and M. Q. Mehmood, "A compact, low-profile fractal antenna for wearable on-body WBAN applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 5, pp. 981-985, 2019, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906829>.
- [13] M. E. Gharbi, M. Martinez-Estrada, Raul Frenandez-Garcia, S. Ahyoud, and I. Gill "A novel ultra-wide band wearable antenna under different bending conditions for electronic-textile applications," *The Journal of the Textile Institute*, vol. 112, no. 3, pp. 437-443, 2020, <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1762326>.
- [14] A. ALI, S. N. Azemi, M. Jusoh, and T. Sabapathy, "Defected ground plane of wearable circular patch antenna," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 767, 1st International Symposium on Engineering and Technology (ISETech)*, Perlis, Malaysia, 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/767/1/012003>.
- [15] A. Ennajih, B. Nasiri, J. Zbitou, A. Errkik, and M. Latrach, "A wearable UHF RFID tag antenna-based metamaterial for biomedical applications," *Bulletin of Electrical Engineering and*
- [1] N. H. M. Rais, P. J. Soh, F. Malek, S. Ahmad, N. B. M. Hashim and P. S. Hall "A review of wearable antenna," in *Loughborough Antennas & Propagation Conference*, Loughborough, UK, 2009, pp. 225-228, <https://doi.org/10.1109/LAPC.2009.5352373>.
- [2] A. Tsohis, "Wearable antennas: design, connectivity, and evaluation measurement techniques," Ph.D. dissertation, Loughborough University Institutional Repository, UK, 2016.
- [3] R. Negra, I. Jemili, and A. Belghith, "Wireless body area networks: Applications and technologies," *Procedia Computer Science*, vol. 83, pp. 1274-1281, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.266>.
- [4] S. Zhu and R. Langley, "Dual-band wearable textile antenna on an EBG substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 926-935, 2009, <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2014527>.
- [5] J. C. G. Matthew, B. Pirollo, A. Tyler, and G. Pettitt, "Body wearable antennas for UHF/VHF", in *Loughborough Antennas and Propagation*

- Letters*, vol. 58, no. 8, pp. 1934-1937, 2016, <https://doi.org/10.1002/mop.29937>.
- [25] P. Rahmatian, M. Movahedi, and A. Ghafoorzadeh-Yazdi, "Dual-band dual-mode wearable antenna for on-off body communication based on metamaterial," in *26th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Mashhad, Iran, 2018, pp. 649-653, (in Persian) <https://doi.org/10.1109/ICEE.2018.8472524>.
- [26] H. Yang and X. Liu, "Wearable dual-band and dual-polarized textile antenna for on-and off-body communications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2324–2328, 2020, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3032540>.
- [27] J. Dong, Q. Li, and L. Deng, "Compact planar ultra-wideband antennas with 3.5/5.2/5.8 GHz triple band-notched characteristics for internet of things applications," *Sensors*, vol. 17, no. 2, 2017, Art. no. 349, <https://doi.org/10.3390/s17020349>.
- [28] D. Mathur, S. K. Bhatnagar, and V. Sahula, "Quick estimation of rectangular patch antenna dimensions based on equivalent design concept," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1469–1472, 2014, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2334362>.
- [29] M. Mathur, A. Vats, and A. Agarwal, "A new design formulae for feed line dimensions of the rectangular microstrip patch antenna by using equivalent design concept," in *International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, Noida, India, 2015, pp. 34-39, <https://doi.org/10.1109/ICSPCom.2015.7150629>.
- [30] A. Bouazizi, G. Zaibi, A. Iqbal, A. Basir, M. Samet, and A. Kochouri, "A dual-band case-printed planar inverted-F antenna design with independent resonance control for wearable short-range telemetric systems," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 8, 2019, Art. no. e.21781, <https://doi.org/10.1002/mmce.21781>.
- [31] A. Afridi, S. Ullah, S. Khan, A. Ahmed, A. H. Khalil, and M. Ahmad Tarar, "Design of dual band wearable antenna using metamaterials," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, vol. 47, no. 2, pp. 126-137, 2013, <https://doi.org/10.1080/08327823.2013.11689852>.
- [32] S. Agneessens and H. Rogier, "Compact half diamond dual-band textile HMSIW on-body antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 5, pp. 2374-2381, 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2308526>.
- Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 676-684, 2020, <https://doi.org/10.11591/eei.v9i2.1661>.
- [16] S. Roy and U. Chakraborty, "Metamaterial based dual wideband wearable antenna for wireless applications," *Wireless Personal Communications*, vol. 106, pp. 1117–1133, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06206-3>.
- [17] A. Sharifi and J. Khalilpour, "Patch antenna gain enhancement with meta-material split ring resonator radome," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 3, no. 3, pp. 39-43, 2015, (in Persian).
- [18] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Low-profile dual-band textile antenna with artificial magnetic conductor plane," *IEEE Transactions Antennas Propagation*, vol. 62, no. 12, pp. 6487-6490, 2014, <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2359194>.
- [19] H. Babaei, S. A. Gohari, and P. Mohamadi, "Design, simulation, fabrication and determining the equivalent circuit model of a reconfigurable RFSS unit cell filter for electromagnetic protection of space payload systems," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 71-82, 2023, (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1448>.
- [20] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "Highly efficient wearable CPW antenna enabled by EBG-FSS structure for medical body area network applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77529-77541, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883379>.
- [21] G. P. Gao, B. Hu, S. Wang, and C. Yang, "Wearable circular ring slot antenna with EBG structure for wireless body area network," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 17, no.3, pp. 434-437, 2018, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2794061>.
- [22] A. Y. I. Ashyap *et al.*, "Robust and efficient integrated antenna with EBG-DGS enabled wide bandwidth for wearable medical device applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56346-56358, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981867>.
- [23] O. A. Saraereh, "Microstrip wearable dual-band antenna design for on body wireless communications," in *4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Singapore, 2019, pp. 585-589, <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2019.8821765>.
- [24] M. G. Huang, Z. M. Xie, and X. Z. Lai, "A compact multiband PIFA for handheld RFID applications," *Microwave and Optical Technology*

Original Research Paper

Technology Development of a High-Power Low-Cost Waveguide Switch for Satellite Transponder Applications

Elham Sharifi Moghaddam* , Mohsen Shafeghati, and Behzad Ahmadi 

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

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 17 September 2024

Revised 04 December 2024

Accepted 08 December 2024

Available Online 24 December 2024

Keywords:

DPDT switch

Glide symmetric holey structure

Waveguide switch

Gap waveguide

Transponder

Ku band

High power

ABSTRACT

This article presents a double pole double throw (DPDT) waveguide switch in the *Ku* band with significantly lower manufacturing costs than competing switches. The switch structure consists of a fixed ring and a rotating cylinder at its center, separated by an unavoidable narrow air gap. An electromagnetic band gap (EBG) structure minimises leakage in this gap. Gap waveguide technology effectively mitigates leakage waves by incorporating a perfect magnetic conductor (PMC), restricting wave propagation within a specific frequency range. For cost-effective implementation of the EBG region, a glide-symmetric holey structure (GSHS) is proposed. This structure consists of two parallel perforated conductor plates with a narrow air gap, where the holes are arranged alternately in a triangular grid. In the proposed switch, the holes in the inner cylinder are offset from those in the outer ring by half a period, minimizing leakage effectively. Design and simulation results demonstrate that the switch achieves a transmission loss of 0.05 dB and a return loss of less than -35 dB at its ports. Additionally, the port isolation exceeds 80 dB, and the switch offers a relative bandwidth of more than 50%, outperforming similar designs.

*Corresponding Author's E-mail: e.sharifimoghadam@isrc.ac.ir**How to Cite this Article:**

E. Sharifi Moghaddam, M. Shafeghati, and B. Ahmadi, "Technology development of a high-power low-cost waveguide switch for satellite transponder applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 40-48, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1501>.

**COPYRIGHTS**

© 2024 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/).



توسعه فناوری یک سویچ موجبری توان بالای کم هزینه برای کاربرد در ترانسپوندر باند Ku ماهواره‌های مخابراتی

الهام شریفی مقدم^{۱*}  محسن شفقتی^۲، و بهزاد احمدی^۳ 

۱-۳- استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله یک سویچ موجبری دو ورودی-دو خروجی در باند Ku ابداع شده است که نسبت به سویچ‌های مشابه، ساخت آن بسیار کم هزینه‌تر است. ساختار سویچ موجبری متشکل از حلقه‌ای ثابت و یک استوانه چرخان در میان آن است، در نتیجه تشکیل یک فاصله هوایی بین این دو قسمت سویچ اجتناب‌ناپذیر است. برای محدود کردن نشتی موج از فاصله هوایی بین استوانه داخلی گردان و حلقه خارجی، از ساختار EBG جدیدی در سویچ پیشنهادی این مقاله استفاده شده است. فناوری موجبر شکاف‌دار یکی از روش‌هایی است که برای کاهش این موج نشتی استفاده می‌شود. در این روش با طراحی یک هادی مغناطیسی کامل (PMC) در ناحیه فاصله هوایی، انتشار موج در یک باند فرکانسی مشخص محدود می‌شود. راه‌حلی که در این مقاله برای پیاده‌سازی ناحیه محدود کننده انتشار موج پیشنهاد شده است، ساختار سوراخ‌دار متقارن است. چینش سوراخ‌ها در این ساختار به نحوی است که سوراخ‌های استوانه داخلی به نسبت حلقه خارجی به اندازه نصف دوره تناوب سوراخ‌ها شیف‌ت پیدا کرده‌اند. طبق نتایج طراحی و تحلیل، با استفاده از ساختار EBG پیشنهادی، میزان نشتی موج در فاصله هوایی به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و در نتیجه پارامترهای الکتریکی بهبود می‌یابند. نتایج طراحی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تلف عبوری سویچ طراحی شده کمتر از 0.05 dB و ضریب انعکاس پورت‌های آن کمتر از 35 dB- است. همچنین ایزولاسیون بین پورت‌ها بیشتر از 80 dB و پهنای باند نسبی این سویچ بیشتر از 50٪ به دست آمد که نسبت به سویچ‌های مشابه وضعیت بهتری دارد.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۷ شهریور ۱۴۰۳
بازنگری ۱۴ آذر ۱۴۰۳
پذیرش ۱۸ آذر ۱۴۰۳
اولین انتشار ۰۴ دی ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

سویچ دو ورودی-دو خروجی
ساختار سوراخ‌دار متقارن
سویچ موجبری
موجبر شکاف‌دار
ترانسپوندر
باند Ku
توان بالا

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: e.sharifimoghdam@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

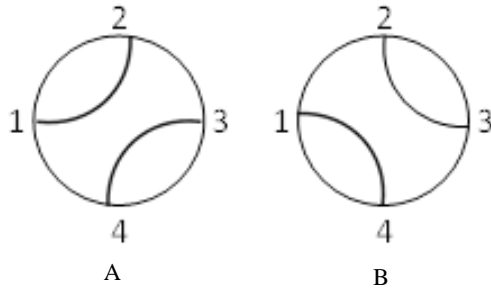
E. Sharifi Moghaddam, M. Shafeghati, and B. Ahmadi, "Technology development of a high-power low-cost waveguide switch for satellite transponder applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 40-48, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1501>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).





شکل ۱- سویچ DPDT: (الف) وضعیت ۱ و (ب) وضعیت ۲.

Fig. 1. DPDT switch: (a) first state, (b) second state.

در این گونه سویچ‌ها، به دلیل وجود قسمت چرخنده میانی، وجود فاصله هوایی بین قسمت چرخنده و ثابت اجتناب‌ناپذیر است. این فاصله موجب نشتی موج و افزایش تلف عبوری و همچنین باعث تداخل ناخواسته با ماژول‌های مخابراتی مجاور می‌گردد، لذا باید اثر این فاصله هوایی به نحوی خنثی شود. فناوری موج‌بر شکافدار [۳] یکی از روش‌های کاهش این موج نشتی است و در سویچ‌های موج‌بری نیز به کار رفته است [۴، ۵] در این روش با طراحی یک هادی مغناطیسی کامل (PMC) در ناحیه فاصله هوایی، انتشار موج در بازه فرکانسی خاصی محدود می‌شود (EBG) روشی که معمولاً برای پیاده‌سازی هادی کامل مغناطیسی استفاده می‌شود، سطحی پوشیده شده با برجستگی‌های میخ مانند است که با پرپود خاصی در کنار هم قرار گرفته‌اند [۴، ۵] ساخت سطح مذکور به دلیل نیاز به تراشکاری دقیق به ویژه در فرکانس‌های بالا بسیار گران است. راه‌کار دیگری که برای پیاده‌سازی ناحیه EBG پیشنهاد می‌شود، استفاده از ساختار سوراخ‌دار متقارن (GSHS) است که ساخت آن بسیار ارزان قیمت‌تر است [۶، ۷]

در این مقاله برای اولین بار در سویچ میکروویوی DPDT از تکنیک ساختار سوراخ‌دار متقارن استفاده شده‌است. در این طرح، سطوح چرخنده داخلی و استوانه بیرونی یک سویچ موج‌بری باند Ku را به صورت خاص و متقارنی سوراخ‌دار کرده و ناحیه EBG ایجاد نموده‌ایم. در بخشی از مقاله، فناوری موج‌بر شکافدار به صورت خلاصه توضیح داده شده و سپس یک سلول واحد از ساختار GSHS، طراحی و تحلیل شده‌است. در ادامه، یک ساختار کامل از سویچ DPDT موج‌بری که از تکنیک GSHS استفاده نموده است، طراحی و تحلیل شده‌است.

نقش سویچ موج‌بری در ترانسپوندر یک ماهواره

مخابراتی

ماهواره‌های مخابراتی نقش یک تکرارکننده یا رله فضایی را دارند که دیتای مورد نظر را از ایستگاه زمینی مرکزی یا کاربر دریافت کرده و پس از کاهش فرکانس و تقویت^۱، آن را به کاربران یا ایستگاه زمینی

علائم و اختصارات

DPDT	سویچ دو ورودی-دو خروجی Double Pole Double Through
PMC	هادی مغناطیسی کامل Perfect Magnetic Conductor
EBG	شکاف باند الکترومغناطیسی Electromagnetic Band Gap
GSHS	ساختار سوراخ‌دار متقارن Glide Symmetric Holey Structure
GW	موج‌بر شکاف‌دار Gap Waveguide

مقدمه

سویچ‌های میکروویوی وظیفه مسیریابی موج در مدارات میکروویوی را به عهده دارند. عمده‌ترین کاربرد سویچ‌های میکروویوی، انتخاب مسیر برای استفاده از المان‌های اصلی یا افزونه در ترانسپوندرهای ماهواره‌ای است. از کاربردهای دیگر این سویچ می‌توان به انتخاب یک یا چند فیلتر از یک بانک فیلتری، و انتخاب مسیر آنتنی مورد نظر (آنتن با پرتو همه جهته یا تک جهته) در زیرسیستم تله‌متری/تله‌کامند برای فازهای مختلف مأموریتی ماهواره اشاره نمود.

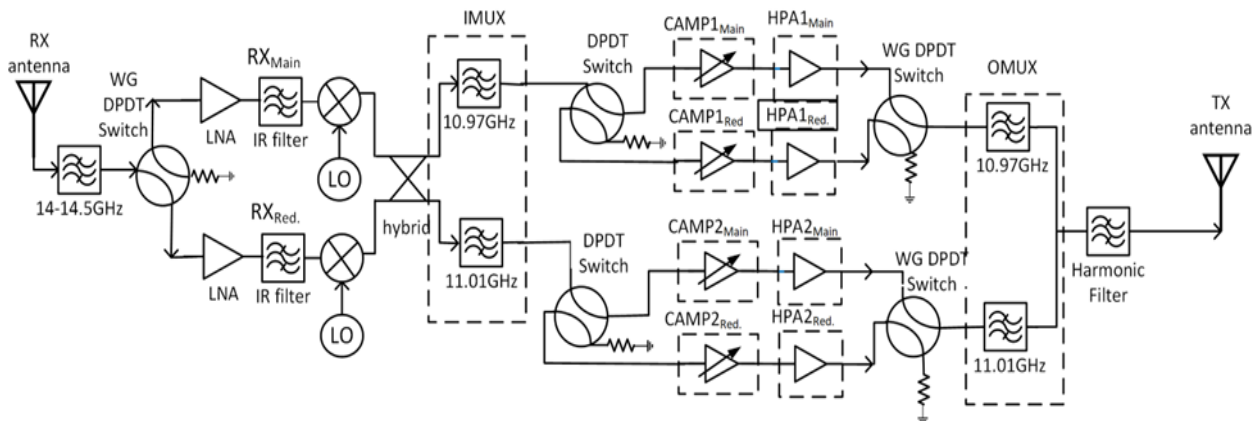
عملگرهای مختلفی از جمله الکترومکانیکی، فرتی، حالت جامد (PIN دیود، GaAs/FET) و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) برای کنترل سویچ‌های میکروویوی به کار گرفته می‌شوند که از لحاظ تحمل توان میکروویوی، تلف عبوری، ایزولاسیون و مدت زمان سویچ کردن با هم متفاوتند [۱، ۲]

سویچ‌های موج‌بری در رده الکترومکانیکی جای می‌گیرند و نسبت به انواع دیگر سویچ‌ها تحمل توان میکروویوی بالاتری دارند، تلف عبوری آن‌ها بسیار پایین است و خروجی‌های آن‌ها ایزولاسیون بالایی با هم دارند، لذا برای سویچینگ خروجی تقویت کننده‌های پر قدرت اصلی/افزونه مناسب هستند. یک سویچ چرخنده مکانیکی دو ورودی-دو خروجی (DPDT) از یک قسمت ثابت و یک قسمت چرخنده در وسط آن تشکیل شده‌است. با چرخش قسمت چرخنده میانی، مسیر انتقال سیگنال مطابق شکل ۱ تغییر می‌کند. در شکل ۱ (الف) مسیر بین پورت‌های ۱ و ۲ و همچنین بین پورت‌های ۳ و ۴ برقرار می‌شود. در شکل ۱ (ب) قسمت چرخنده میانی طوری قرار گرفته که مسیر موج میکروویوی بین پورت‌های ۲ و ۳ و همچنین ۱ و ۴ برقرار می‌شود.

۱- در مورد ترانسپوندر پردازشی regenerative، علاوه بر دریافت سیگنال و کاهش فرکانس و ارسال، استخراج داده، کانال‌بندی و مدولاسیون مجدد نیز صورت می‌گیرد.

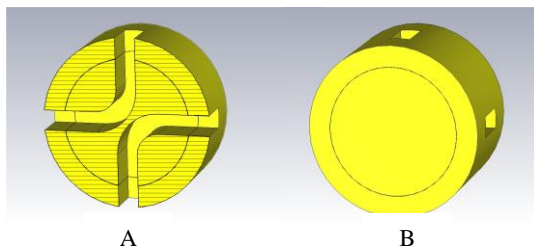
مطابق شکل ۲، یک افزونه برای گیرنده و یک افزونه برای بلوک های تقویت هر یک از کانال ها در نظر گرفته شده است. انتخاب بین بلوک های اصلی و افزونه توسط سویچ های ورودی و خروجی آن بلوک صورت می پذیرد. در خروجی تقویت کننده های پر قدرت و ورودی تقویت کننده کم نویز، نیاز به سویچ هایی با افت عبوری بسیار کم وجود دارد، لذا استفاده از سویچ های موج‌بری اجتناب پذیر است.

در ناحیه جغرافیایی دیگری ارسال می کنند. یکی از عناصر کلیدی محموله های مخابراتی، ترانسپوندر است که مطابق بلوک شکل ۲ اجزای اصلی آن شامل فیلتر ورودی، گیرنده، کاهنده فرکانس، مالتی پلکسر ورودی، تقویت کننده کانال، تقویت کننده پر قدرت، مالتی پلکسر و فیلتر خروجی است. برای افزایش قابلیت اطمینان محموله، باید برای هر یک از بلوک های آسیب پذیر محموله، افزونه ای در نظر گرفته شود.



شکل ۲- ترانسپوندر bentpipe باند Ku دو کاناله.

Fig. 2. Ku-band 2-channel bent pipe transponder.



شکل ۳- مدل شبیه سازی شده سویچ موج‌بری ساده DPDT: (الف) نمای از سویچ که به صورت عرضی برش داده شده، (ب) نمای سویچ کامل.

Fig. 3. The simulated model of a simple DPDT waveguide switch: (a) cross section view of the switch, (b) whole view of the switch.

طراحی EBG با استفاده از ساختار سوراخ دار مقارن

یک ساختار EBG با هدف ممانعت از انتشار موج در بازه فرکانسی خاصی طراحی و بهینه می شود و از المان هایی تشکیل شده که به صورت متناوب در کنار هم چیده شده اند [۸، ۹]. این ساختار، کاربرد گسترده ای در موج برهای شکاف دار دارد [۱۰-۱۲]. یکی از ساختارهای EBG معمول، از سطحی هادی پوشیده شده با برجستگی های میخی شکل متناوب تشکیل شده است [۱۳].

ساختار سویچ موج‌بری DPDT

ساختار سویچ DPDT مورد نظر در این مقاله از یک حلقه ثابت و یک استوانه چرخان در میان حلقه تشکیل شده است و به ناچار یک فاصله هوایی باریک بین این دو بخش سویچ وجود خواهد داشت. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، دو مسیر موج‌بری خم شده که هر یک به دو پورت ختم می شود در سویچ وجود دارد. با چرخش استوانه میانی مسیر موج تغییر می کند. وقتی استوانه چرخنده میانی در وضعیت ۱ قرار دارد، مسیر موج ۱ به ۲ و ۳ به ۴ است، و وقتی استوانه میانی چرخیده و در موقعیت ۲ قرار می گیرد، مسیر ۱ به ۴ و ۲ به ۳ برقرار می گردد. در این مسیرها، موج باید از فاصله هوایی مذکور نیز عبور کند، لذا مقداری از آن نشت می کند. به همین دلیل سویچ ساده مدل شده در شکل ۳ تمامی نیازمندی های الکتریکی یک سویچ موج‌بری را نمی تواند برآورده سازد. نتایج شبیه سازی یک سویچ موج‌بری ساده نشان داد که ضریب انعکاس پورت ها در فرکانس ۱۵-۱۰ GHz به ۶- dB نیز می رسد که عدد مطلوبی نیست.

راه کار مناسبی که برای رفع مشکل نشتی از فاصله هوایی ایجاد شده در مسیر موج‌بری پیشنهاد می شود، طراحی یک ناحیه محدود کننده انتشار موج در بازه فرکانسی مورد نظر (EBG) در فاصله هوایی مذکور است که در ادامه مقاله به آن خواهیم پرداخت.

[۶] نشان داد که مرکز باند توقف^۱ به دوره تناوب (ابعاد سلول واحد) بستگی دارد. با کاهش p ، فرکانس مرکزی باند توقف افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش r ، باند توقف به فرکانس‌های بالاتر انتقال می‌یابد. عمق سلول‌ها از حدی باید بیشتر باشد تا به پهنای باند توقف مورد نظر برسیم، البته بیشتر از این مقدار، پهنای باند توقف تغییر نمی‌کند. افزایش g پهنای باند توقف را کاهش می‌دهد، و برای مقادیر بزرگتر r/p اثر g کاهش می‌یابد.

در [۶] پارامترهای هندسی یک سلول GSHS در باند Ka بهینه شده‌است. در مقاله حاضر، مطابق جدول ۱، مقادیر اولیه پارامترهای هندسی GSHS بر اساس مقیاس کردن مقادیر مندرج در مرجع مذکور، به باند فرکانسی Ku (از مرکز باند توقف ۳۵ GHz به ۱۶ GHz)، در نظر گرفته شده و بعد از آن بهینه‌سازی پارامترها با هدف رسیدن به باند توقف ۲۲-۱۰ GHz صورت پذیرفت. پارامترهای بهینه‌سازی، h, g, r, p هستند. ساختار در نرم‌افزار CST MWS شبیه‌سازی و با استفاده از Eigenmode Solver تحلیل شده‌است. در این شبیه‌سازی از شرط مرزی پرودیگ استفاده شده‌است. بیشترین حساسیت به تغییر، روی پارامتر p (ابعاد سلول واحد) وجود داشت. لذا با کاهش p با پله‌های ۱ mm به باند توقف مورد نظر نزدیک شده و پس از آن با تیون کردن دقیق سایر پارامترها با پله‌های ۰/۱ mm، نتیجه مورد نظر حاصل شد.

با توجه به اینکه نیاز به تکرار زیادی برای بهینه‌سازی وجود نداشت و با چند بار تغییر پارامترها به نتیجه مطلوبی رسیدیم، روش بهینه‌سازی همان روش تکرار^۲ محسوب می‌شود. کلیه بهینه‌سازی‌ها در نرم‌افزار CST MWS صورت گرفت. مقادیر تیون شده نهایی پارامترهای هندسی سلول GSHS پس از این شبیه‌سازی‌ها و بهینه‌سازی در جدول ۱ درج شده‌اند.

نمودار پاشندگی EBG طراحی شده در شکل ۵ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشخص است GSHS طراحی شده، باند توقف مورد نظر را محقق کرده است.

جدول ۱- پارامترهای یک سلول GSHS طراحی شده.

Table 1. The unit cell parameters of the designed GSHS.

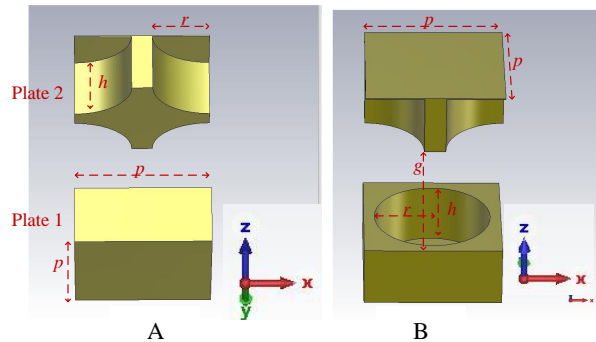
Parameter	First value (mm)	Tuned value (mm)
h	4.4	5
g	0.1	0.1
r	4.9	5
p	18	13

پیاده‌سازی این ساختار، بالاخص در فرکانس‌های بالا به دلیل نیاز به استفاده از ماشین CNC با ابزار بسیار دقیق، بسیار پرهزینه است. روش معمول دیگر برای طراحی EBG استفاده از ساختار قارچی است که از زیر لایه‌ای پوشیده شده از پچ‌های با چیدمان متناوب تشکیل شده‌است [۱۴]. این روش برای سطوح صاف کم‌هزینه است ولی برای سطوح انحنا دار روش گران قیمتی است.

ساختار GSHS جایگزین مناسبی برای روش‌های مذکور است [۶، ۱۵] و با توجه به اینکه سوییچ ساختار استوانه‌ای و منحنی دارد، بسیار کم هزینه‌تر از روش قارچی است. همچنین با توجه به ساده‌تر و ارزان قیمت‌تر بودن سوراخ‌کاری نسبت به ماشین‌کاری، نسبت به ساختار پوشیده از برجستگی‌های میخی شکل، بسیار کم هزینه‌تر است. به علاوه، فاصله تناوب سوراخ‌ها در GSHS از فاصله تناوب میخ‌ها بیشتر بوده و این موضوع ساخت را ساده‌تر می‌کند.

ساختار GSHS از دو صفحه هادی سوراخ‌دار موازی با هم تشکیل شده و فاصله هوایی باریکی بین آن‌ها وجود دارد. سوراخ‌ها متناوب هستند و در یک شبکه مثلثی چیده شده‌اند. سوراخ‌های صفحه دوم نسبت به صفحه اول به اندازه نصف دوره تناوب سوراخ‌کاری‌ها، چرخیده‌اند و شیفت پیدا کرده‌اند.

شکل ۴ سلول واحد ساختار GSHS را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، شیفت سوراخ‌ها در صفحه دوم در دو راستای x و y صورت گرفته است.

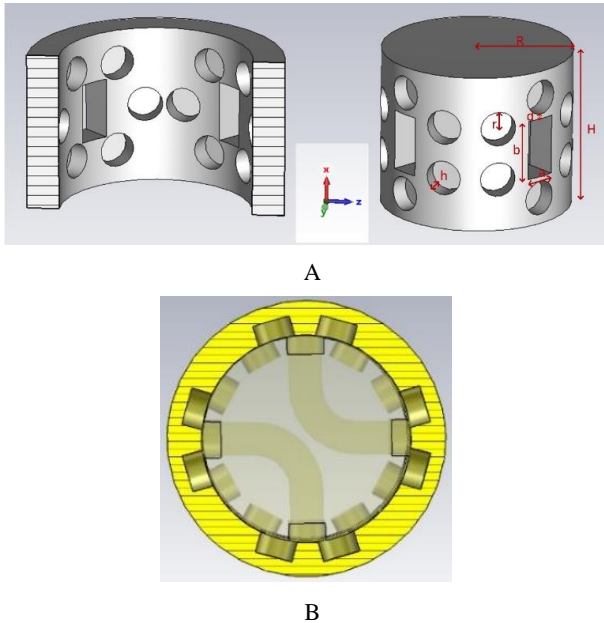


شکل ۴- سلول واحد ساختار GSHS: (الف) نمای که در آن یک چهارم سوراخ‌های صفحه بالایی دیده می‌شوند، (ب) نمای که در آن یک چهارم سوراخ‌های صفحه پایینی دیده می‌شوند.

Fig. 4. Unit cell of GSHS: (a) a quarter view of the upper side holes, (b) a quarter view of the lower side holes.

طراحی GSHS با تنظیم چهار پارامتر هندسی صورت می‌گیرد: عمق سوراخ‌ها (h)، فاصله هوایی بین دو لایه (g)، شعاع سوراخ‌ها (r)، و ابعاد سلول واحد (p). مطالعات در خصوص این پارامترها در

مقایسه ضریب انعکاس یک سویچ ساده و سویچی که با استفاده از تکنیک GSHS طراحی شده است در شکل ۸ آمده است. برای سویچ ساده، ضریب انعکاس در بعضی فرکانسها به بالاتر از -10 dB نیز می‌رسد. اما در سویچ بهینه شده با استفاده از تکنیک GSHS، ضریب انعکاس در بازه فرکانسی مورد نظر کمتر از -35 dB است که برای یک سویچ موجبری عدد ایده‌آلی است.



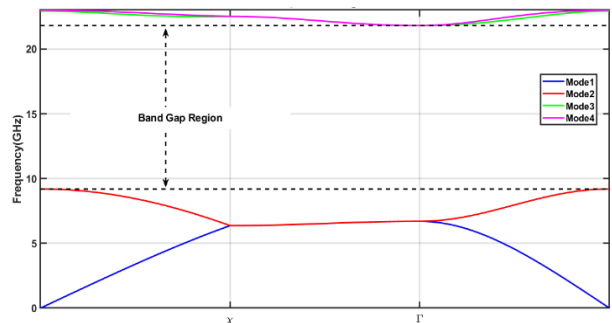
شکل ۶- سویچ DPDT موجبری با استفاده از تکنیک GSHS: (الف) استوانه گردان داخلی سویچ در سمت راست و حلقه بیرونی سویچ در سمت چپ، (ب) سطح مقطع سویچ.

Fig. 6. DPDT waveguide switch by using GSHS: (a) inner rotating cylinder of the switch in the right figure and outer ring of the switch in the left figure, (b) cross section of the switch.

جدول ۲- پارامترهای هندسی سویچ موجبری پیشنهاد شده.

Table 2. The geometrical parameters of the proposed switch.

Parameter	Value (mm)
h	5.5
g	0.1
r	5.5
p	13
R	30
d	1.5
a	19.05
b	9.52
H	50



شکل ۵- نمودار پاشندگی GSHS طراحی شده.

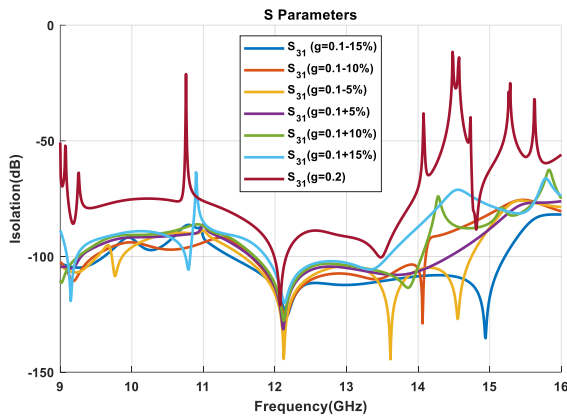
Fig. 5. Dispersion diagram of the designed GSHS.

سویچ موجبری DPDT با استفاده از GSHS طراحی شده

در این بخش از مقاله یک سویچ موجبری DPDT با استفاده از GSHS طراحی شده است. شکل ۵ ساختار شبیه‌سازی شده این سویچ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، در ساختار طراحی شده، چیدمان سوراخ‌ها دایروی است و مسیرهای موجبری با سوراخ‌ها احاطه شده‌اند [۱۵]. پارامترهای هندسی سویچ در شکل ۶ (الف) نشان داده شده‌اند. شکل ۶ (ب) سطح مقطع سویچ را نشان می‌دهد. صفحه برش موازی با صفحه $y-z$ است و 15 mm بالاتر از صفحه تقارن سویچ قرار گرفته است.

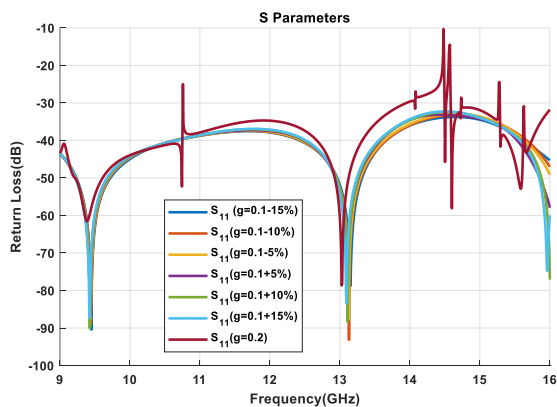
سویچ در نرم‌افزار CST-MWS مدل گشته است. از پارامترهای p, r, g, h مندرج در جدول ۱ به‌عنوان مقادیر اولیه سلول GSHS استفاده شده و مقادیر اولیه پارامترهای R و H نیز طوری انتخاب شدند که سویچ قابل ساخت بوده و در ضمن جرم زیادی نداشته باشد. پارامترهای a و b که ابعاد موجبر هستند و به فرکانس قطع موجبر مربوط هستند. بهینه‌سازی پارامتر d نیز با اولین مقداری که سویچ استحکام مکانیکی کافی را داشته باشد، شروع شد و تا رسیدن به نتیجه مطلوب، مقدار آن تغییر یافت. همانند بهینه‌سازی پارامترهای یک سلول GSHS در بخش قبل، برای کل سویچ نیز از روش تکرار استفاده شد و پارامترهای هندسی تا رسیدن به پاسخ بهینه مکرراً تغییر داده شدند. این پارامترها با هدف رسیدن به ماکزیمم پهنای باند و ایزولاسیون و همچنین کمترین مقدار ضریب انعکاس بهینه شدند. نتایج بهینه‌سازی سویچ در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نیز در نمودارهای شکل‌های ۷ تا ۱۰ رسم شده است.

شکل ۷ اثر استفاده از GSHS را روی یک سویچ موجبری ساده نشان می‌دهد. در این نتایج، بهبود قابل ملاحظه ایزولاسیون پورتهای سویچ پس از استفاده از ساختار GSHS مشهود است. این شکل نشان می‌دهد که ایزولاسیون پورتهای برای یک سویچ موجبری ساده قابل قبول نیست.



شکل ۹- اثر تolerانس ساخت روی ایزولاسیون سویچ طراحی شده با استفاده از تکنیک GSHS برای مقادیر مختلف فاصله هوایی.

Fig. 9. Effects of manufacturing tolerances (different air gaps) on the isolation of the designed GSHS switch.



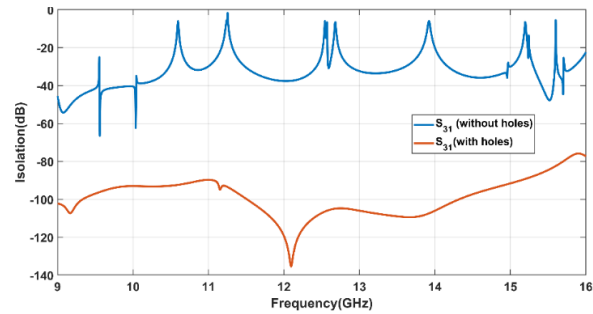
شکل ۱۰- اثر تolerانس ساخت و طول شکاف هوایی بر تلف بازگشتی سویچ طراحی شده.

Fig. 10. Effects of manufacturing tolerances (different air gaps) on the reflection coefficient.

محدوده توان

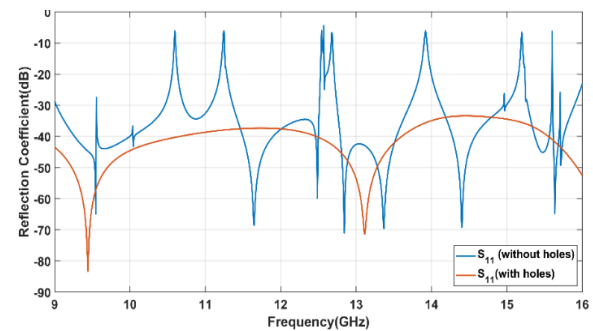
برای محاسبه محدوده توان قابل تحمل توسط سویچ طراحی شده، شبیه‌سازی دیگری در نرم‌افزار CST MWS با توان ورودی ۱ w در پورت انجام شد. در شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده و بیشینه میدان الکتریکی مشخص است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین دامنه میدان الکتریکی ۳۷۵۰ V/m است که در فاصله شکاف هوایی ایجاد شده است. با توجه به اینکه میدان شکست هوا ۳ Mv/m است ظرفیت توانی سویچ در هوا ۶۴۰ kw به دست می‌آید. برای محاسبه توان قابل حمل یک قطعه مایکروویو علاوه بر شکست الکتریکی در هوا معیارهای دیگری مانند میزان افزایش دمای قطعه نیز بایستی در نظر گرفته شوند. از این رو بهتر است قطعه تا توان‌های بسیار کمتری از توان شکست



شکل ۷- مقایسه ایزولاسیون بین پورت‌های سویچ موج‌بری ساده و سویچ با استفاده از GSHS در حالت خاموش.

Fig. 7. Comparing the isolation between ports in the simple waveguide switch with GSHS switch in off-state.



شکل ۸- مقایسه ضریب انعکاس سویچ ساده و سویچ با استفاده از GSHS.

Fig. 8. Comparing the reflection coefficient in the simple waveguide switch with GSHS switch.

تأثیر تolerانس ساخت روی پارامترهای الکتریکی

یکی از پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی عملکرد سویچ دارد، طول شکاف هوایی (g) است. در شبیه‌سازی‌های دیگری که انجام شد، اثر تolerانس ساخت و تغییر این پارامتر از مقدار نامی ۰/۱ mm تا ۰/۱ ± ۱۵٪ و همچنین تغییر آن به ۰/۲ mm، روی پارامترهای الکتریکی بررسی شد.

نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهند که با افزایش فاصله هوایی، ایزولاسیون کاهش می‌یابد. برای فاصله هوایی ۰/۲ mm ایزولاسیون در بعضی بازه‌های فرکانسی به ۲۰ dB نیز می‌رسد. ولی وقتی فاصله هوایی به ۰/۱ mm کاهش می‌یابد، ایزولاسیون پورت‌ها در بازه فرکانسی مورد نظر بیشتر از ۸۰ dB خواهد بود.

اثر تolerانس ساخت روی پارامتر تلف بازگشتی سویچ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر این تغییرات تا ۱۵٪ بر عملکرد سویچ ناچیز است. با تغییر مقدار g به ۰/۲ mm وضعیت تلف خروجی بدتر شده و در بعضی فرکانس‌ها به ۱۰ dB- نیز می‌رسد.

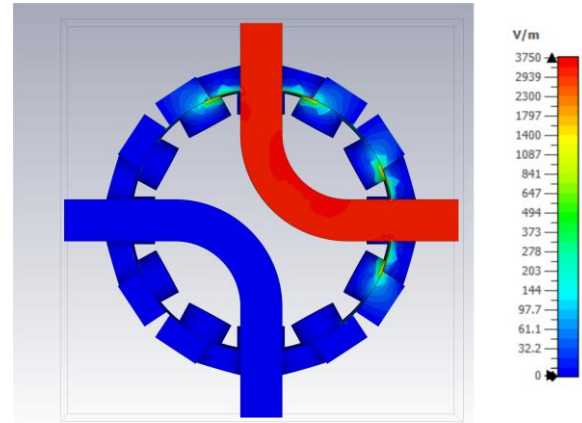
بحث و مقایسه

در این بخش از مقاله، سویچ موج‌بری طراحی شده با سویچ‌های طراحی شده در سه مرجع [۱۶، ۵، ۴] مقایسه می‌شود و نتایج این مقایسه در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

در مقایسه، هزینه ساخت سویچ‌های دیگر به دلیل نیاز به ماشین کاری دقیق بسیار بالاتر است. پهنای باند سویچ طراحی شده در این مقاله از کارهای دیگر بیشتر است. همچنین ایزولاسیون بین پورت‌های سویچ در وضعیت خاموش در طرح پیشنهاد شده در این مقاله به نسبت سویچ‌های طراحی شده در مراجع دیگر بیشتر است.

به دلیل هزینه ساخت کمتر و بهبود پارامترهای الکتریکی سویچ طراحی شده با استفاده از تکنیک GSHS، استفاده از این سویچ موج‌بری در ترانسپوندرهای Ku ماهواره‌ای پیشنهاد می‌شود.

الکتریکی (حدود یک‌دهم) مورد استفاده قرار گیرد. در ترانسپوندرهای مخابراتی توان اعمالی به سویچ در حد چند صد وات است که مقادیر فوق نشان دهنده عملکرد مناسب این سویچ در این کاربردها است.



شکل ۱۱- بیشینه میدان الکتریکی در سویچ برای توان ورودی یک وات در پورت ورودی.

Fig. 11. The maximum electric field in the switch for the input power of 1w.

جدول ۳- مقایسه پارامترهای سویچ طراحی شده با مراجع دیگر.

Table 3. Comparing the parameters of the designed switch with other references.

Parameter	Technology	Frequency band	Relative frequency band (%)	Reflection Coefficient (dB)	Isolation (dB)	Insertion loss (dB)	Manufacturing cost
[4]	Conductors covered by bed of nails	Ku-band (11-13.5GHz)	25	-30	60	0.1	High
[5]	Conductors covered by bed of nails	Ku-band (10.6-16GHz)	40	-20	75	0.1	High
[18]	Waveguide based on multiple short-circuit loads	Ku-band (13-14.5GHz)	10	-22	30	0.5	High
Present paper	Glide-symmetric holey structure	Ku-band (9-15GHz)	50	-35	80	0.05	Low

بهتری نسبت به سویچ‌های دیگری که از فناوری‌های دیگر استفاده می‌کنند، دارد. ایزولاسیون بین پورت‌های این سویچ بیشتر از ۸۰ dB، پهنای باند نسبی آن بیشتر از ۵۰٪ در باند Ku است. تلف عبوری سویچ کمتر از ۰/۰۵ dB و ضریب انعکاس آن کمتر از ۳۵- است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سویچ موج‌بری DPDT با استفاده از یک EBG جدید، پیشنهاد و طراحی شده‌است. ساختار EBG پیشنهاد شده در این مقاله به صورت سوراخ‌دار متقارن است و هیچگونه برجستگی که منجر به نیاز به تراشکاری دقیق و افزایش هزینه شود، روی آن وجود ندارد. نتایج طراحی و شبیه‌سازی نشان داد که سویچ ابداعی در این مقاله وضعیت ایزولاسیون، ضریب انعکاس و افت عبوری

مراجع

- link diplexer application," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 870–879, 2013, <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2012.2231140>.
- [10] B. Ahmadi and A. Banai, "Direct coupled resonator filters realized by gap waveguide technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 10, pp. 3445–3452, 2015, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2457916>.
- [11] B. Ahmadi and A. Banai, "Substrateless amplifier module realized by ridge gap waveguide technology for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 11, pp. 3623–3630, 2016, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2607177>.
- [12] B. Ahmadi and A. Banai, "Substrate-less oscillator module realized by gap waveguide technology for millimeter wave applications," in *47th European Microwave Conference (EuMC)*, Nuremberg, Germany, 2017, pp. 1116–1119, <https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231043>.
- [13] M. G. Silveirinha, C. A. Fernandes, and J. R. Costa, "Electromagnetic characterization of textured surfaces formed by metallic pins," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 2, pp. 405–415, 2008, <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.915442>.
- [14] E. Rajo Iglesias and P. S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 5, no. 3, pp. 282–289, 2011, <https://doi.org/10.1049/iet-map.2010.0073>.
- [15] M. Ebrahimpouri, A. A. Brazalez, L. Manholm, and O. Quevedo Teruel, "Using glide-symmetric holes to reduce leakage between waveguide flanges," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 6, pp. 473–475, 2018, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2824563>.
- [16] J. A. Ruiz Cruz, M. M. Fahmi, and R. R. Mansour, "Generalized multiport waveguide switches based on multiple short-circuit loads in power-divider junctions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 12, pp. 3347–3355, 2011, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2170089>.
- [1] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, and K. A. Jos, *RF MEMS & Their Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, <https://doi.org/10.1002/0470856602>.
- [2] L. A. Belov, S. M. Smolskiy, and V. N. Kochemarov, *Handbook of RF, Microwave & Millimeter Wave Components*, Artech house, 2012, <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS2010035>.
- [3] Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, and T. Zwick, *Handbook of Antenna Technologies*, Singapore: Springer, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-44-3>.
- [4] J. Tayebpour, B. Ahmadi, M. Fallahzadeh, O. Shekoofa, and A. Torabi, "A waveguide switch based on contactless gap waveguide technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, No. 12, pp. 771–774, 2019, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2950164>.
- [5] A. J. Alazemi, D. Zarifi, and A. Farahbakhsh, "A broadband contactless gap waveguide microwave switch for X- and Ku-bands applications," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 139, 2021, Art. no. 153929, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153929>.
- [6] M. Ebrahimpouri, O. Quevedo-Teruel, and E. Rajo-Iglesias, "Design guidelines for gap waveguide technology based on glide-symmetric holey structures," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27, no. 6, pp. 542–544, 2017, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2701308>.
- [7] M. Ebrahimpouri, E. Rajo-Iglesias, Z. Sipus, and O. Quevedo-Teruel, "Cost-effective gap waveguide technology based on glide-symmetric holey EBG structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 2, pp. 927–934, 2018, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2764091>.
- [8] E. Alfonso, A. U. Zaman, E. Pucci, and P. S. Kildal, "Gap waveguide components for millimetre-wave systems: Couplers, filters, antennas, MMIC packaging," in *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Nagoya, Japan 2012, pp. 243–246.
- [9] E. A. Alós, A. U. Zaman, and P. S. Kildal, "Ka-band gap waveguide coupled-resonator filter for radio

Original Research Paper**The Impact of Simulated Microgravity on Mice with Breast Cancer****Morteza Alemi^{1*}**, **Firooz Samadi²**, **Alireza Madjidansari³**, and **Zahra Hajebrahimi⁴**

1, 2. Department of Animal and Poultry Physiology, Breeding and Genetics, Faculty of Animal Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3. Quality of Life Research Group, Department of Integrative Oncology and Quality of Life, Motamed Cancer Institute Breast Cancer Research Center, ACECR, Tehran, Iran

4. Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 24 July 2024

Revised 12 August 2024

Accepted 27 August 2024

Available Online 18 September 2024

Keywords:

Breast cancer

Simulated microgravity

4T1 cell line

Mice

Tumor size

ABSTRACT

Exposure to microgravity induces significant changes in the morphology and biological properties of cancer cells. Globally, breast cancer is the most prevalent cancer among women and the fifth leading cause of cancer-related deaths. Increasing resistance to conventional cancer treatments has emerged as a critical challenge, prompting researchers to explore novel anti-cancer strategies to enhance cancer cell death. This study aimed to evaluate the response of breast cancer cells to simulated microgravity. In this experiment, 20 mice carrying the 4T1 breast cancer cell line were randomly divided into groups of 10. The experimental groups included a normal gravity condition and a simulated microgravity condition. Mice were tested over a 30-day period, during which tumor growth was measured every three days using a digital caliper. The number of casualties was recorded daily. At the end of the experiment, the mice were sacrificed, and the final tumor size was measured. The results demonstrated that simulated microgravity significantly inhibited tumor growth over the 30 days compared to the control group under normal gravity. Furthermore, the group exposed to simulated microgravity exhibited the highest survival rate, whereas the control group recorded the lowest. These findings suggest that simulated microgravity effectively reduces tumor progression and enhances survival in mice with breast cancer. Investigating cancer under microgravity conditions may offer valuable insights into the mechanisms underlying tumor progression and resistance, potentially leading to the development of novel treatment approaches.

*Corresponding Author's E-mail: m.alemi@gau.ac.ir**How to Cite this Article:**M.Alemi, F.Samadi, A.Madjidansari, and Z. Hajebrahimi, "The impact of simulated microgravity on mice with breast cancer," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 49-55, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1494>.**COPYRIGHTS**© 2024 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/).

تأثیر بی‌وزنی شبیه‌سازی شده بر روی موش‌های مبتلا به سرطان پستان

مرتضی عالمی^{۱*}، فیروز صمدی^۲، علیرضا مجیدانصاری^۳، و زهرا حاج‌ابراهیمی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه ژنتیک، اصلاح و فیزیولوژی دام و طیور، دانشکده علوم دامی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران
۲- استاد، گروه ژنتیک، اصلاح و فیزیولوژی دام و طیور، دانشکده علوم دامی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران
۳- استادیار، گروه پژوهشی طب فراگیر در سرطان، دپارتمان کیفیت زندگی و طب فراگیر، پژوهشکده معتمد جهاد دانشگاهی، تهران، ایران
۴- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

سلول‌های سرطانی زمانی که در معرض بی‌وزنی قرار می‌گیرند، دستخوش تغییرات چشمگیری در مورفولوژی و خواص بیولوژیکی می‌شوند. سرطان پستان شایع‌ترین سرطان در زنان و پنجمین عامل مرگ و میر ناشی از سرطان در دنیا است. با توجه به اینکه افزایش مقاومت سرطان‌ها نسبت به درمان‌های رایج به مسئله دردمساز تبدیل شده‌است، تلاش محققان برای کشف و شناسایی عوامل ضد سرطانی جدید که موجب افزایش میزان مرگ سلول‌های سرطانی گردد، رو به افزایش است. هدف از این مطالعه بررسی پاسخ سلول‌های سرطانی پستان به شرایط بی‌وزنی بود. در مطالعه حاضر ۲۰ موش حامل سرطان پستان رده سلولی 4T1 در دو گروه که هر گروه آن ده موش در آن قرار داده‌شده بود تقسیم شدند. گروه‌های آزمایشی شامل شرایط نرمال جاذبه (گروه شاهد) و بی‌وزنی شبیه‌سازی شده (بی‌وزنی) بودند که موش‌ها به مدت ۳۰ روز تحت آزمایش قرار گرفتند. در طی دوره آزمایش روند رشد تومور هر ۳ روز یک بار به وسیله کولیس دیجیتال مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. همچنین در طی دوره آزمایش میزان تلفات شمارش می‌گردید. در پایان دوره، بعد از کشتن موش‌ها سایز نهایی تومور اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمایش نشان داد که القا شرایط بی‌وزنی به‌طور معنی‌داری می‌تواند رشد تومور را بعد از ۳۰ روز کاهش دهد. همچنین القا بی‌وزنی روند رشد تومور را نسبت به گروه شاهد کاهش داد. در انتهای دوره آزمایش، موش‌های گروه القا بی‌وزنی شبیه‌سازی شده نسبت به گروه شاهد بیشترین زنده‌مانی را نشان دادند. کمترین تعداد موش‌های زنده در گروه شاهد مشاهده شد. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که القا بی‌وزنی می‌تواند منجر به کاهش رشد تومور و افزایش زنده‌مانی شود. مطالعه سرطان در شرایط بی‌وزنی ممکن است به ما در فهم بهتر مکانیسم اثر داروهای شیمی‌درمانی و کنترل بهتر این بیماری کمک نموده و به توسعه روش‌های درمانی جدید نیز کمک شایانی نماید.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۰۳ مرداد ۱۴۰۳
بازنگری ۲۲ مرداد ۱۴۰۳
پذیرش ۰۶ شهریور ۱۴۰۳
اولین انتشار ۲۸ شهریور ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

سرطان پستان
بی‌وزنی شبیه‌سازی شده
رده سلولی 4T1
موش
اندازه تومور

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.alemi@gau.ac.ir

How to Cite this Article:

M. Alemi, F. Samadi, A. Madjidansari, and Z. Hajebrahimi, "The impact of simulated microgravity on mice with breast cancer," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 49-55, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1494>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



حیات زمینی با بی‌وزنی، مکانیسم‌های جدیدی را می‌تواند آشکار کند که به تحقیقات زیستی کمک شایانی نماید [۵].

در مطالعات انجام شده نشان داده شده‌است که بی‌وزنی می‌تواند رشد، مهاجرت و توانایی تهاجم سلول‌های سرطانی روده، ریه و تیروئید را تغییر دهد و بنابراین می‌تواند ابزار جالبی برای تحقیقات سرطان محسوب گردد [۸-۶]. سلول‌های سرطانی خون و تیروئید که در معرض بی‌وزنی قرار می‌گیرند، دستخوش تغییرات چشمگیری در مورفولوژی و خواص بیولوژیکی می‌شوند که در نهایت منجر به آپوپتوز قابل توجه این سلول‌ها می‌شود [۹، ۱۰]. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که بی‌وزنی بر زنده ماندن و رشد سلول‌های سرطانی اثر منفی دارد. در مطالعه‌ای گزارش گردید که بی‌وزنی به‌طور قابل توجهی فعالیت سلول‌های سرطانی را کاهش داده و این تأثیر مستقیماً با مدت زمان بی‌وزنی رابطه داشت [۱۱]. بی‌وزنی می‌تواند توانایی سلول‌های سرطانی را برای متاستاز تحت تأثیر قرار دهد. توانایی تهاجمی سلول‌های سرطانی پستان از طریق کاهش بیان ماتریکس متالوپروتئیناز (MMP-9 و MMP-2) و وینکولین، تحت شرایط بی‌وزنی کاهش می‌یابد [۱۲]. کاهش بیان MMP-9 در سلول‌های سرطانی رده MDA-MB-231 ارتباط نزدیکی با کاهش توانایی مهاجرت یا متاستاز سلول‌های سرطانی تحت تأثیر بی‌وزنی دارد. القای بی‌وزنی می‌تواند یک راهکار درمان اضافی قدرتمند برای سلول‌های سرطانی و یک ابزار تعدیل‌کننده ایمنی برای توسعه ایمونوتراپی‌های جدید باشد و افق‌های جدیدی را برای درمان این بیماری بگشاید [۱۳، ۱۴].

مطالعات در زمینه اثر بی‌وزنی بر روی سرطان در موجود زنده یک بینش منحصر به فرد برای بررسی اثرات بیومکانیکی در زیست‌شناسی سرطان ارائه می‌دهد. تحقیقات بر روی اثر بی‌وزنی یک مدل قابل اعتماد برای توسعه راه‌های درمانی برای درمان سرطان ارائه می‌کند. همچنین برخی از جنبه‌های جالب توجه زیست‌شناسی سلولی را آشکار می‌کند. این تحقیقات می‌توانند در رویکردهای دیگر برای افزایش اثربخشی و دقت درمان‌های انواع سرطان و در نتیجه افزایش بقا و کیفیت زندگی برای بیماران مبتلا به سرطان پستان استفاده شوند.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی حیوانات مورد آزمایش و گروه‌های آزمایشی

این آزمایش با تاییدیه کمیته اخلاق دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (MO1398B/124/17) انجام شد. تعداد ۲۰ موش ماده نژاد BALB/c با میانگین سن ۴ الی ۶ هفته و متوسط وزنی ۲۰ تا ۲۵ گرم از موسسه تحقیقات واکسن و سرم‌سازی رازی واقع در شهرستان

علائم و اختصارات

Bcl-2	B-Cell Lymphoma 2
Bax	Bcl-2-associated protein x
Fas	Fas Cell Surface Death Receptor
FOXO3	forkhead box O3
MMP	Matrix metalloproteinase
MSCs	Mesenchymal stem cells
PTEN	Phosphatase and TENsin
PBS	Phosphate Buffered saline
RPMI	Roswell Park Memorial Institute
TNBC	Triple-negative Breast Cancer

مقدمه

سلول‌های بدن انسان به‌صورت پیوسته در حال رشد و تکثیر می‌باشند تا جایگزین سلول‌های قدیمی شوند. این روند تضمین‌کننده سلامت یک انسان می‌باشد ولی در برخی مواقع در روند رشد و تکثیر سلول‌ها اختلال ایجاد می‌گردد. بیماری سرطان ناشی از تقسیم غیرقابل کنترل سلول‌های بدن است که این رخداد در اثر تغییرات در سطح ژنی یا مولکولی سلول‌ها اتفاق می‌افتد. این سلول‌های غیرطبیعی به‌جای مردن، شروع به رشد و تقسیم مجدد می‌کنند. سرطان پستان شایع‌ترین سرطان در زنان و پنجمین عامل مرگ و میر ناشی از سرطان در دنیا است. در ایران نیز این سرطان، شایع‌ترین سرطان در بین زنان گزارش شده‌است [۱]. امروزه با توجه به اینکه افزایش مقاومت سرطان‌ها نسبت به درمان‌های رایج به مسئله در دسرسازی تبدیل شده‌است، تلاش محققان برای کشف و شناسایی عوامل ضد سرطانی جدید که موجب افزایش میزان مرگ سلول‌های سرطانی گردد، رو به افزایش است. همچنین یکی از مهم‌ترین معایب روش‌های رایج مورد استفاده در درمان انواع سرطان‌ها، عوارض جانبی مربوطه می‌باشند. بر این اساس، استفاده از روش‌های نوین با حداقل اثرات جانبی منفی مورد توجه محققین می‌باشد [۲، ۳]. از روش‌های جدیدی که به تازگی برای مطالعات سلولی و مولکولی به آن توجه زیادی شده‌است، استفاده از نیروهای بیوفیزیکی مانند نیروی جاذبه است. جاذبه نیرویی است که در همه‌جای زمین حضور دارد و موجودات روی زمین را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. فضانوردان تغییرات فیزیولوژیکی مختلفی را تحت شرایط بی‌وزنی نشان داده‌اند [۴]. گرانش زمین در طول میلیاردها سال تکامل روی زمین تقریباً ثابت بوده است. بنابراین، نحوه پاسخگویی موجودات زنده در مورد چگونگی واکنش به تغییرات نیرو در محدوده بی‌وزنی نامشخص می‌باشد. از این رو، این احتمال وجود دارد که سازگاری

۲ روز قبل از شروع القای بی‌وزنی با قفس خود سازگار شدند. این قفس به موش‌ها اجازه می‌دهد تا در قفس حرکت آزاد داشته باشند. دم موش‌ها با الکل تمیز شد و تمام پوست مرده یا کثیف برداشته شد. نوارکشی (کنزیوتیپ) به اندازه دم موش بریده شد. سپس چسب از بالای دم تا انتهای دم در دو طرف دم موش چسبانده شد و سپس ابتدا و انتهای چسب به آرامی با چسب دیگر چسبانده شد تا از جدا شدن آن از دم موش جلوگیری شود. چسب باید به اندازه‌ای سفت باشد تا نوار کششی از دم جدا نشده و همچنین به اندازه‌ای شل باشد تا گردش خون طبیعی را برای قسمت دم موش فراهم نماید. لازم به ذکر است که پای موش‌ها با کف قفس برخوردی نداشته و موش‌ها یک زاویه تقریباً ۳۰ درجه‌ای با محور قفس داشتند.

بعد از تأیید تشکیل تومورها، موش‌ها در قفس‌های مخصوص جهت القای بی‌وزنی شبیه‌سازی شده قرار گرفتند. وضعیت حیوانات به‌صورت روزانه شاهد می‌شد و ابعاد تومورها هر ۳ روز یک‌بار با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری می‌شد. حجم تومور با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$\text{اندازه تومور (mm}^3\text{)} = \frac{1}{2} \times \text{طول} \times (\text{عرض})^2$$

پس از ۳۰ روز، موش‌ها با کتامین و زایلازین کشته شدند. تومورها تشریح شده، وزن شدند و در محلول پارافرمالدهید ۴٪ ثابت و در پارافین جاسازی شدند تا برای آزمایشات بعدی آماده شوند.

آنالیز آماری

داده‌ها به‌صورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شده‌است و با تست Unpaired t test آنالیز گردید. برای رسم نمودار از برنامه GraphPad Prism (v.9) استفاده شد.

نتایج

شکل ۱ نشان می‌دهد که القای بی‌وزنی شبیه‌سازی شده به‌طور موثری سرعت رشد تومور را در مقایسه با گروه شاهد کاهش دادند. سایز تومور در روز اول آزمایش بین دو گروه آزمایشی نزدیکی نسبی با یکدیگر داشتند (10 ± 8 میلی‌متر مکعب). مطابق روش ذکر شده در اندازه‌گیری سایز تومور، هر ۳ روز سایز تومور در همه موش‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده‌است سایز تومور در گروه شاهد به‌صورت پیوسته در همه روزهای آزمایش یک روند افزایشی شدید را نشان داد ($P < 0.001$). بیشترین سایز تومور در انتهای دوره در گروه شاهد مشاهده گردید ($126/88$ میلی‌متر مکعب). همانطور که در شکل ۲ گزارش شده‌است موش‌هایی که در شرایط بی‌وزنی القایی قرار داشتند نسبت به تیمار

کرج خریداری گردید. موش‌های خریداری شده در ۲ گروه آزمایشی مجزا تقسیم شدند که هر گروه آزمایشی دارای ۱۰ موش بود. موش‌ها در شرایط استاندارد مطابق دستورالعمل نگهداری و مراقبت از حیوانات در دمای 2 ± 24 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 50 ± 10 درصد نگهداری شدند. موش‌ها تحت یک چرخه منظم ۱۲ ساعته نور/تاریکی قرار گرفتند. در طول آزمایش، موش‌ها به آب و غذا دسترسی آزاد داشتند. قفس‌های مخصوص جهت القای شرایط بی‌وزنی از پژوهشگاه هوا و فضای ایران تهیه گردید و موش‌ها مطابق دستورالعمل‌های موجود تحت شرایط بی‌وزنی قرار گرفتند. گروه‌های آزمایشی به‌شرح ذیل بود:

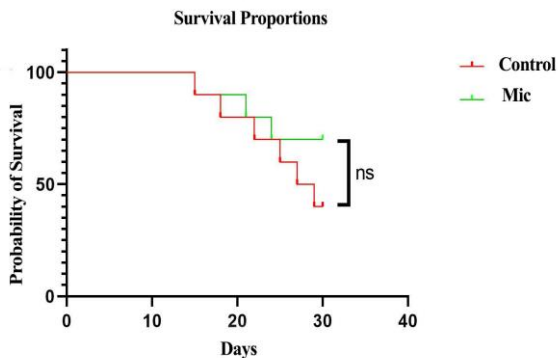
گروه ۱: موش‌های سرطانی شده با رده سلولی 4T1 (گروه شاهد).
گروه ۲: موش‌های سرطانی شده با رده سلولی 4T1 تحت شرایط بی‌وزنی القایی.

تهیه و کشت سلولی سرطان پستان رده 4T1

رده سلولی سرطان پستان موش (4T1) یک رده سلولی TNBC مشتق شده از بافت غدد پستانی سویه BALB/c موش است که از انستیتو پاستور تهران خریداری شد. برای کشت این سلول‌ها از محیط کشت RPMI1640 (سیگما، ایالات متحده آمریکا) استفاده شد. سلول‌ها در محیط کشت RPMI 1640 همراه با سرم جنین گاو ۱۰ درصد (سیگما، ایالات متحده آمریکا) و ۱۰۰ میکروگرم در میلی‌لیتر مخلوط آنتی‌بیوتیک حاوی پنی‌سیلین و استرپتومایسین (سیگما، ایالات متحده آمریکا) در فلاسک مخصوص قرار داده شدند و سپس در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور CO₂ ۵ درصد نگهداری گردیدند. زمانی که تراکم سلولی در فلاسک‌های مخصوص نگهداری سلول‌ها به ۸۰ الی ۸۵ درصد رسید سلول‌ها پاساژ شده و مجدداً در فلاسک‌های جدید جهت کشت قرار گرفتند. سلول‌ها بعد از کشت و آماده شدن و جهت رسیدن به تعداد مناسب جهت تزریق، تریپسینه شده و با بافر PBS شستشو داده شدند. پس از شمارش سلولی با استفاده از لام نئوبار، به‌میزان ۱۰^۶ سلول در ناحیه فلانک هر موش با استفاده از سرنگ انسولین تزریق گردید. ۷ روز پس از تزریق سلول‌های 4T1، توده‌های سرطانی در زیر پوست موش‌ها لمس و تشکیل توده سرطانی مورد تأیید قرار گرفت و سپس آزمایش در دو گروه شاهد و القای بی‌وزنی آغاز گردید.

القای بی‌وزنی شبیه‌سازی شده

برای القای بی‌وزنی شبیه‌سازی شده از روش گلوبوس و هولتون [۱۵] استفاده شد. اندازه قفس‌های مخصوص القای بی‌وزنی ۳۰/۵ سانتی‌متر عرض \times ۳۱/۷۵ سانتی‌متر عمق \times ۳۰/۵ سانتی‌متر ارتفاع بود. موش‌ها



شکل ۳- درصد زنده ماندن در موش‌های مورد آزمایش پس از ۳۰ روز قرارگیری در محیط بی‌وزنی شبیه‌سازی شده و گروه شاهد در شرایط جاذبه نرمال (ns: معنی‌دار نیست).

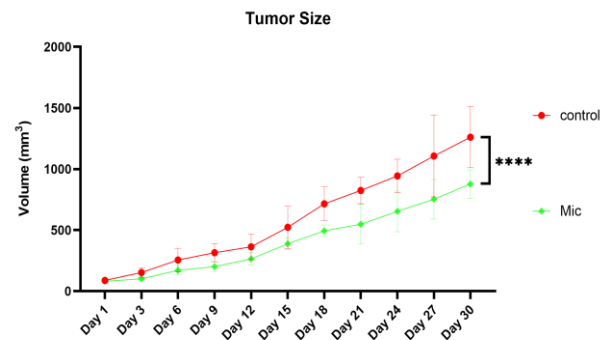
Fig. 3. The survival rate of the mice after 30 days of being placed in a simulated weightless environment and control group under normal gravity of 1G. (ns: not significant).

بحث

پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر بی‌وزنی بر روی موش‌های حامل سرطان پستان رده سلولی (4T1) در شرایط درون‌تنی، انجام شد. مدل حیوانی 4T1 سرطان پستان، شباهت زیادی به سرطان پستان انسان به ویژه از نظر متاستاز دارد، [۱۶]. بروز سرطان در بافت‌های دارای سرعت تکثیر بالا، نمود بیشتری دارد. به همین دلیل بافت پستان که در معرض تکثیر بیشتری قرار دارد مستعد بروز سرطان می‌باشد. این بیماری هر ساله منجر به مرگ و میر در بین زنان و مردان می‌شود. عوارض جانبی داروهای موجود و ایجاد مقاومت دارویی، یافتن تکنیک‌های جایگزین برای درمان سرطان پستان را امری مهم می‌سازد.

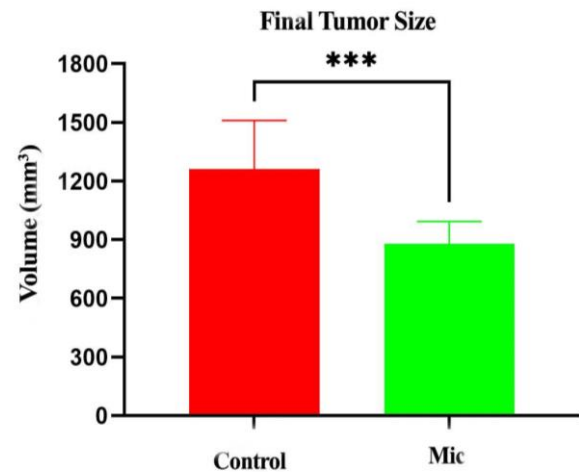
نتایج این مطالعه نشان داد بی‌وزنی بر روی رشد تومور و همچنین سایز تومور در موش‌های حامل تومور سرطان پستان تأثیر منفی می‌گذارد. گروه تحت تأثیر بی‌وزنی سایز تومور کمتری را نسبت به گروه شاهد نشان داد. این کاهش رشد تومور را می‌توان به افزایش آپوپتوز در شرایط بی‌وزنی نسبت داد. در مطالعه‌ای که توسط سوسان و کرافورد [۱۷] انجام گرفت افزایش آپوپتوز در شرایط بی‌وزنی گزارش گردید. آپوپتوز نامناسب، یک عامل کلیدی در بیماری‌های مختلف از جمله سرطان، ایسکمی قلب و مغز و بیماری‌های خودایمنی است [۱۸، ۱۹]. علاوه بر این، مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی عملکردهای مهمی در رشد، تمایز، مورفونز و هموستاز بافت دارد. این نوع مرگ سلولی قادر است زندگی و مرگ سلول‌ها را تعدیل کند و همچنین پتانسیل درمانی شناخته شده‌ای را در درمان سرطان پستان از خود نشان می‌دهد [۱۹، ۲۰]. لی و همکاران [۲۱] سلول‌های بنیادی مزانشیمی (MSCs) را در معرض

شاهد سایز تومور کمتری را در روز آخر آزمایش نشان دادند. سایز نهایی تومور برای گروه القای بی‌وزنی شبیه‌سازی شده (۸۷۷/۱۱۶ میلی متر مکعب) گزارش گردید که یک اختلاف معنی‌داری با گروه شاهد را نشان داد ($P < 0.001$) میزان بقاپذیری موش‌ها نیز در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). گروه شاهد کمترین میزان زنده ماندن را در مدت آزمایش نشان داد (۴ موش). تعداد ۷ موش در گروه القای بی‌وزنی شبیه‌سازی شده در انتهای آزمایش زنده ماندند.



شکل ۱- روند رشد تومور در طی روزهای آزمایش (****: $P < 0.0001$).

Fig. 1. Tumor growth process during the days of the experiment (****: $P < 0.001$).



شکل ۲- سایز نهایی تومور در رده سلولی 4T1 سرطان پستان پس از ۳۰ روز قرارگیری در محیط بی‌وزنی شبیه‌سازی شده و گروه شاهد در شرایط جاذبه نرمال یک جی (****: $P < 0.0001$).

Fig. 2. The final size of the tumor in the 4T1 breast cancer cell line after 30 days of being placed in a simulated weightless environment and control group under normal gravity of 1G. (****: $P < 0.001$).

همچنین مسیرهای سیگنالینگ درگیر در سرطان و ژن‌های دخیل در آن مورد مطالعه قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] World Health Organization, "Cancer" 2018. [Online]. Available: <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer>
- [2] K. D. Miller *et al.* "Cancer treatment and survivorship statistics, 2019," *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. Vol. 69, no. 5, pp. 363–385, 2019, <https://doi.org/10.3322/caac.21565>.
- [3] M. Zigler, A. Shir, and A. Levitzki, "Targeted cancer immunotherapy," *Current Opinion in Pharmacology*, vol. 13, no. 4, pp. 504–510, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.coph.2013.04.003>.
- [4] A. Winnard *et al.*, "Systematic review of countermeasures to minimise physiological changes and risk of injury to the lumbopelvic area following long-term microgravity," *Musculoskeletal Science and Practice*, vol. 27, pp. S5-S14, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.msksp.2016.12.009>.
- [5] B. Prasad *et al.*, "Influence of microgravity on apoptosis in cells, tissues, and other systems in vivo and in vitro," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, no. 24, 2020, Art. no. 9373, <https://doi.org/10.3390/ijms21249373>.
- [6] D. Chang *et al.*, "Simulated microgravity alters the metastatic potential of a human lung adenocarcinoma cell line," *Vitro Cellular & Developmental Biology–Animal*, vol. 49, pp. 170–177, 2013, <https://doi.org/10.1007/s11626-013-9581-9>.
- [7] B. Deng, R. Liu, X. Tian, Z. Han, and J. Chen, "Simulated microgravity inhibits the viability and migration of glioma via FAK/RhoA/Rock and FAK/Nek2 signaling," *Vitro Cellular & Developmental Biology–Animal*, vol. 55, pp. 260–271, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11626-019-00334-7>.
- [8] M. Krüger *et al.*, "Fighting thyroid cancer with microgravity research," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 10, 2019, Art. no. 2553, <https://doi.org/10.3390/ijms20102553>.
- [9] D. Grimm *et al.*, "Simulated microgravity alters differentiation and increases apoptosis in human follicular thyroid carcinoma cells," *FASEB Journal*, vol. 16, no. 6, pp. 604–606, 2002, <https://doi.org/10.1096/fj.01-0673fje>.

بی‌وزنی شبیه‌سازی شده قرار دادند و سپس آن‌ها را به‌عنوان واکسن ضد سرطان ریه به موش‌های لخت یا برهنه تزریق کردند. سلول‌های بنیادی مزانشیمی تحت تاثیر بی‌وزنی، میزان آپوپتوز را در بافت تومور ریه افزایش دادند. جساپ و همکاران [۲۲] گزارش کردند که بی‌وزنی القا، آپوپتوز را در سلول‌های سرطانی روده بزرگ افزایش می‌دهد. مرگ سلول‌های سرطانی اغلب به یک اسکلت سلولی ناکارآمد یا توقف چرخه سلولی ناشی از بی‌وزنی القا، نسبت داده می‌شود [۲۵–۲۳]. علاوه بر این، بیان غیرطبیعی پروتئین‌های مرتبط با آپوپتوز (p53، Fas، Bax، p21، و Bcl-2) و ژن‌های سرکوب‌کننده تومور (TP53، PTEN، FOXO3) در سلول‌های سرطانی پستان و مغز که افزایش آپوپتوز را نشان دادند، یافت شده است [۲۸–۲۶]. افزایش مکرر سرکوبگرهای تومور PTEN (فسفاتاز و تنسین هومولوگ) و p53 در شرایط بی‌وزنی می‌تواند باعث توقف چرخه سلولی شود. PTEN تعداد سلول‌های فاز G1 را افزایش داده و به‌طور همزمان تعداد سلول‌های فاز S را کاهش می‌دهد. این اقدامات از تکثیر کنترل نشده سلول‌های سرطانی روده جلوگیری می‌کند. در نتیجه افزایش PTEN منجر به القای آپوپتوز در سلول‌های سرطانی روده تحت تاثیر بی‌وزنی می‌شود [۲۳]. افزایش القای آپوپتوز در سلول‌های سرطانی منجر به مرگ این سلول‌ها می‌گردد که این فرآیند در کنترل رشد و جلوگیری از گسترش سلول‌های سرطانی نقش موثری را ایفا می‌نماید [۲۹].

در حالت بی‌وزنی بروز تغییرات در بدن امری شناخته شده است که این تغییرات بر روی سلامت و رشد موجودات تاثیرگذار می‌باشد. سیستم عصبی از جمله سیستم‌های بدن می‌باشد که از بی‌وزنی تاثیر می‌پذیرد. قرار گیری در شرایط بی‌وزنی می‌تواند پاسخ‌های عصبی را سرکوب نماید. از دیگر تغییرات قرارگیری در شرایط بی‌وزنی می‌توان به تغییر در تعادل مایعات و الکترولیت‌ها، کاهش تراکم مواد معدنی در استخوان، تحلیل عضلانی، افزایش درصد چربی بدن و کاهش فشار خون اشاره نمود [۳۰]. در مجموع، به‌نظر می‌رسد تصمیم‌گیری در مورد کاربرد درمانی بی‌وزنی سرطان خیلی زود است. با این حال، می‌توان نتیجه گرفت که بی‌وزنی ممکن است در کنار سایر روش‌های درمانی مانند شیمی‌درمانی و رادیوتراپی، تاثیر درمان را افزایش دهد [۳۱].

به‌طور کلی، مطالعه حاضر نشان داد که شرایط بی‌وزنی شبیه‌سازی شده برای یک دوره ۳۰ روزه می‌تواند منجر به کاهش اندازه تومور در موش‌های مبتلا به سرطان پستان رده سلولی 4T1 شود. در نتیجه می‌توان بیان داشت که استفاده از شرایط بی‌وزنی ممکن است از طریق افزایش آپوپتوز و کاهش مهاجم سلول‌های سرطانی منجر به کاهش رشد تومور و بهبود روند درمان شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده مدت زمان شبیه‌سازی بی‌وزنی کمتر یا بیشتر از مدت زمان این آزمایش باشد.

- microgravity," *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 485, no. 3, pp. 606–613, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.01.136>.
- [22] J. Jessup *et al.*, "Microgravity culture reduces apoptosis and increases the differentiation of a human colorectal carcinoma cell line," *Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal*, vol. 36, pp. 367-373, 2000.
- [23] R. P. Arun, D. Sivanesan, P. Vidyasekar, and R. S. Verma, "PTEN/FOXO3/AKT pathway regulates cell death and mediates morphogenetic differentiation of colorectal cancer cells under simulated microgravity," *Scientific Reports*, vol. 7, 2017, Art. no. 5952, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06416-4>.
- [24] N. Jiang *et al.*, "Effects of rotary cell culture system-simulated microgravity on the ultrastructure and biological behavior of human MDA-MB-231 breast cancer cells," *Precision. Radiation. Oncology*, vol. 3, no. 3, pp.87–93, 2019, <https://doi.org/10.1002/prof.1074>.
- [25] P. Vidyasekar *et al.*, "Genome wide expression profiling of cancer cell lines cultured in microgravity reveals significant dysregulation of cell cycle and microRNA gene networks," *PLoS ONE*, vol. 10, no. 8, 2015, Art. no. e0135958, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135958>.
- [26] S. Kopp *et al.*, "The role of NFκB in spheroid formation of human breast cancer cells cultured on the random positioning machine," *Scientific Reports*, vol. 8, 2018, Art. no. 921, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18556-8>.
- [27] M. G. Masiello *et al.*, "Phenotypic switch induced by simulated microgravity on MDA-MB-231 breast cancer cells," *BioMed. Research International*, vol. 2014, no. 1, 2014, Art. no. 652434, <https://doi.org/10.1155/2014/652434>.
- [28] J. Zhao *et al.*, "The influence of simulated microgravity on proliferation and apoptosis in U251 glioma cells," *Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal*, vol. 53, pp. 744–751, 2017, <https://doi.org/10.1007/s11626-017-0178-6>.
- [29] X. H. Yang, T. L. Sladek, X. Liu, B. R. Butler, C. J. Froelich, and A. D. Thor, "Reconstitution of caspase 3 sensitizes MCF-7 breast cancer cells to doxorubicin-and etoposide-induced apoptosis," *Cancer Research*, vol. 61, no. 1, 2001.
- [30] G. Clément and K. slenzka, *Fundamentals of Space Biology: Research on Cells, Animals, and Plants in Space*, New York: Springer, 2006.
- [31] R. Sahebi, M. Aghaei, S. Halvaei, A. Alizadeh, "The role of microgravity in cancer: A dual-edge sword," *Multidisciplinary Cancer Investigation*, vol. 1, no. 3, pp. 1-5, 2017.
- [10] A. A. Sokolovskaya, E. A. Korneeva, E. D. Virus, D V. Kolesov, A. A. Moskovtsev, and A. A. Kubatiev, "Inhibition of cell cycle progression, induction of apoptosis, and changes in surface markers of MEG-01 megakaryoblastic cells exposed to a random positioning machine," *Microgravity Science and Technology*, vol. 32, pp. 35–45, 2020, <https://doi.org/10.1007/s12217-019-09737-3>.
- [11] A. Dutta, "An out of the world approach for cancer treatment," *International Journal of Advanced Research*, vol. 8, no. 6, pp. 993–997, 2020, <https://doi.org/10.21474/ijar01%2F11180>.
- [12] A. Qian *et al.*, "Simulated weightlessness alters biological characteristics of human breast cancer cell line MCF-7," *Acta Astronautica*, vol. 63, no. 7-10, pp. 947–958, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.actastro.2008.01.024>.
- [13] A. Hekmat, M. Rabizadeh. M. Safavi, and Z. Hajebrahimi, "The comparison of the apoptosis effects of titanium dioxide nanoparticles into MDA-MB-231 cell line in microgravity and gravity conditions," *Nanomedicine Journal*, vol. 6, no. 2, pp.120–127, 2019, <https://doi.org/10.22038/nmj.2019.06.0006>.
- [14] D. Prasanth *et al.*, "Microgravity modulates effects of chemotherapeutic drugs on cancer cell migration," *Life*, vol. 10, no. 9, 2020, Art. no. 162. <https://doi.org/10.3390/life10090162>.
- [15] R. K. Globus and E. Morey Holton, "Hindlimb unloading: Rodent analog for microgravity," *Journal of Applied Physiology*, vol. 120, no. 10, pp. 1196–1206, 2016, <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00997.2015>.
- [16] v A. Fantozzi and G. Christofori, "Mouse models of breast cancer metastasis," *Breast Cancer Research*, vol. 8, 2006, Art. no. 212, <https://doi.org/10.1186/bcr1530>.
- [17] J. Susan and Y. Crawford, "Effects of microgravity on cell cytoskeleton and embryogenesis," *International Journal of Developmental Biology*, vol. 50, no. 2-3, pp. 183-191, 2006, <https://doi.org/10.1387/ijdb.052077sc>.
- [18] S. Elmore, "Apoptosis: A review of programmed cell death," *Toxicologic Pathology*, vol. 35, no. 4, pp. 495-516, 2007, <https://doi.org/10.1080/01926230701320337>.
- [19] J. Schoenberger, J. Bauer, J. Moosbauer, C. Eilles, and D. Grimm, "Innovative strategies in In vivo apoptosis imaging," *Current Medicinal Chemistry*, vol. 15, no. 2, pp. 187–194, 2008, <https://doi.org/10.2174/092986708783330647>.
- [20] D. Grimm, M. Wehland, J. Pietsch, M. Infanger, and J. Bauer, "Drugs interfering with apoptosis in breast cancer," *Current Pharmaceutical Design*, vol. 17, no. 3, pp. 272–283, 2011, <https://doi.org/10.2174/138161211795049723>.
- [21] J. Li, J. Chen, X. Li, and Y. Qian, "Vaccination efficacy with marrow mesenchymal stem cell against cancer was enhanced under simulated

Original Research Paper

Effect of Low Atmospheric Pressure on the Growth and Antioxidant Defense Response of *Dunaliella Salina*

Halimeh Hassanpour* 

Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**Received 16 April 2024
Revised 01 June 2024
Accepted 22 June 2024
Available Online 02 July 2024**Keywords:** β -Carotene
Low atmospheric pressure
Dunaliella salina
Growth
Superoxide dismutase**ABSTRACT**

Space explorations on Mars are compelling scientific endeavors that provide critical information on how to establish life on the planet. Designing a bioregenerative life support system capable of supplying food and oxygen is essential for long-duration human missions to Mars. The atmospheric pressure on the Martian surface is significantly lower than that on Earth, and the ability of photosynthesizing organisms to grow under such low atmospheric pressures is crucial for developing a life support system. *Dunaliella salina*, a unicellular microalga, is a rich source of the valuable metabolite β -carotene. This alga exhibits rapid growth, tolerance to environmental stress, and potential as a candidate for space studies. This study investigated the effect of low atmospheric pressure (860, 340, 160, and 80 mbar) on growth, chlorophyll pigments, and antioxidant enzyme responses in *D. salina*. The results demonstrated that growth, cell number, density, and chlorophyll content increased under 340 and 160 mbar pressures but significantly decreased at 80 mbar. Protein content increased by 32.1% at 340 mbar, declining at 80 mbar. Reduced growth under 80 mbar atmospheric pressure resulted in the high accumulation of carotenoid content (13.4 mg g^{-1}) and β -carotene (9.4 mg g^{-1}). Superoxide dismutase increased with decreasing atmospheric pressure, while catalase activity declined at 80 mbar. These findings suggest that the ability of *D. salina* to grow under varying atmospheric pressures is linked to alterations in cellular metabolism and enhanced antioxidant capacity.

*Corresponding Author's E-mail: hassanpour@ari.ac.ir**How to Cite this Article:**H. Hassanpour, "Effect of low atmospheric pressure on the growth and antioxidant defense response of *Dunaliella Salina*," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 56-64, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1483>.**COPYRIGHTS**© 2024 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/).

تأثیر کاهش فشار اتمسفری بر رشد و پاسخ دفاع آنتی‌اکسیدانی جلبک دونالیا سالینا

حلیمه حسن پور* 

دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۸ فروردین ۱۴۰۳
بازنگری ۱۲ خرداد ۱۴۰۳
پذیرش ۰۲ تیر ۱۴۰۳
اولین انتشار ۱۲ تیر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

بتا-کاروتن
کاهش فشار اتمسفری
دونالیا سالینا
رشد
سوپراکسید دیسموتاز

اکتشافات فضایی در مریخ از موضات علمی جذاب بوده و می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای استقرار حیات در این سیاره فراهم نماید. برای ارسال انسان به مریخ در ماموریت‌های طولانی مدت نیاز به طراحی سیستم پشتیبان حیات قابل‌بازایی برای تامین غذا و اکسیژن است. فشار اتمسفری سطح مریخ بسیار کمتر از سطح زمین است و قابلیت رشد موجودات فتوسنتز کننده در فشار اتمسفری پائین برای استقرار سیستم پشتیبان حیات اهمیت بسزایی دارد. دونالیا سالینا نوعی جلبک تک سلولی و غنی از متابولیت ارزشمند بتا-کاروتن است. این جلبک رشد سریعی داشته، مقاوم به تنش‌های محیطی بوده و می‌تواند به‌عنوان کاندیدی برای مطالعات فضایی باشد. در این مطالعه تأثیر فشار پائین اتمسفری (۰.۸۶، ۰.۳۴، ۰.۱۶ و ۰.۰۸ میلی‌بار) بر رشد، محتوای رنگیزهای کلروفیل و پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی جلبک دونالیا سالینا بررسی شد. نتایج نشان داد که رشد، تعداد، تراکم سلولی و محتوای کلروفیل در فشار ۰.۳۴ و ۰.۱۶ میلی‌بار افزایش یافت، ولی در فشار اتمسفری ۰.۰۸ میلی‌بار منجر به کاهش معنی‌دار این پارامترها شد. محتوای پروتئین در فشار اتمسفری ۰.۳۴ میلی‌بار ۳۲/۱ درصد افزایش یافت، ولی در ۰.۰۸ میلی‌بار مقدار آن کاهش یافت. کاهش رشد در فشار اتمسفری ۰.۰۸ میلی‌بار منجر به تجمع بالای محتوای کاروتنوئید (۱۳/۴ میلی‌گرم بر گرم) و بتاکاروتن (۹/۴ میلی‌گرم بر گرم) شد. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با کاهش فشار اتمسفری افزایش یافت، در حالی که فعالیت آنزیم کاتالاز در فشار ۰.۰۸ میلی‌بار کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد که قابلیت رشد سلول‌های جلبک تحت تغییر فشار اتمسفری مرتبط با تغییر متابولیسم سلولی و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی است.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hassanpour@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

H. Hassanpour, "Effect of low atmospheric pressure on the growth and antioxidant defense response of *Dunaliella Salina*," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 56-64, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1483>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



علائم و اختصارات

کاتالاز	Catalase (CAT)
گونه‌های اکسیژن فعال	Reactive Oxygen species (ROS)
سوپراکسید دیسموتاز	Superoxide Dismutase (SOD)
نیتروبلوتیرازولیوم	Nitro Blue tetrazolium (NBT)

مقدمه

اکتشافات فضایی انسان در مریخ یکی از جذاب‌ترین موضوعات علمی و فناوریانه در عصر حاضر بوده و اطلاعات ارزشمندی را برای کشف و چگونگی استقرار حیات در مریخ فراهم می‌کند. از طرفی، این مطالعات می‌تواند منجر به تسهیل توسعه تکنولوژی روی زمین و ارسال انسان به مریخ شود. تحقیقات اخیر و برنامه‌ریزی برای ارسال انسان به مریخ برای مأموریت‌های طولانی مدت فضایی نیازمند سیستم پشتیبان حیات با قابلیت بازیابی دارد. این سیستم مجموعه‌ای پیچیده از سیستم‌های مهندسی و زیستی بوده که شامل بازیابی آب، تولید غذا، اکسیژن و بازیافت زباله می‌باشد [۱]. از زمان آغاز سفرهای فضایی، جلبک‌ها به دلیل رشد سریع، به‌عنوان کاندید مناسبی برای سیستم پشتیبان حیات در نظر گرفته شده‌اند. شرایط رشد آسانی دارند و بیومس آن‌ها خوراکی و قابل هضم برای انسان است. در اواخر دهه ۱۹۶۰ بود که سیستم قابل بازیابی با استفاده از جلبک کلرلا برای اولین بار در آزمایشات زمینی برای جذب دی‌اکسیدکربن و آزادسازی اکسیژن مورد آزمایش قرار گرفت [۲]. سپس آزمایشات متعددی تاثیر تشعشعات، میکروگروایتی، خلاء، و تغییرات شدید دمایی را روی رشد جلبک‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که جلبک‌ها قابلیت زیادی برای بقا در شرایط پرتاب فضایی را دارند [۳].

فشار اتمسفری سطح مریخ از ۱ تا ۱۴ میلی‌بار متغیر است که وابسته به محل و فصل است. این مقدار در مقایسه با فشار اتمسفری سطح دریا (۱۰۱۳ میلی‌بار) بسیار پائین است [۴]. قابلیت رشد ارگانسیم‌های فتوسنتز کننده در فشار پایین اتمسفری به‌عنوان یک گام مهم برای استقرار سیستم پشتیبان حیات پیشرفته در مأموریت‌های طولانی مدت فضایی است. مطالعات اولیه کشت جلبک‌ها در فشار پایین اتمسفری از ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌بار نشان داد که فشار پائین اتمسفری اثر بازدارندگی روی رشد جلبک‌ها نداشته و حتی ممکن است رشد آن‌ها را کمی تحریک نماید. حتی تعدادی از جلبک‌ها متابولیسم بی‌هوازی را در شرایط اکسیژن پائین توسعه داده‌اند [۵]. تاکنون مطالعات محدود روی سیانوباکترها انجام شده و نتایج نشان

داده‌است که دارای پتانسیل رشد روی مریخ هستند. برای نمونه، رشد جلبک *Anabaena cylindrical* تحت فشار پائین و دی‌اکسیدکربن اتمسفری منجر به افزایش محتوای کربوهیدرات و کاهش محتوای پروتئین شد [۶].

جلبک‌ها موجوداتی با تنوع زیستی گوناگون و قابلیت سازگاری به شرایط خاص را دارند که آن‌ها را قادر به بقاء در شرایط محیطی سخت از جمله بیابان‌های گرم و سرد، زیستگاه‌های خیلی شور، محیط‌های حاوی فلزات سنگین و غیره می‌نماید [۷، ۸]. رشد موفق سیانوباکترها در فشار اتمسفری پائین‌تر از ۱۰۰ میلی‌بار گزارش شده است، اما جزئیات مربوط به دینامیک رشد هنوز آشکار نیست. از طرفی، تعداد مطالعات کمی اثر کاهش فشار اتمسفری را روی جلبک‌هایی با پتانسیل تغذیه‌ای بالا صورت گرفته‌است [۹]. *Dunaliella salina* از جلبک‌های تک سلولی، سبزرنگ، متعلق به رده کلروفیسه^۱، راسته ولوکالز^۲، تیره دونالیلاسه^۳ و یک منبع غنی از کاروتنوئید (بیشتر بتا-کاروتن) است. بیومس جلبک و رنگیزه عصاره‌گیری شده آن دارای کاربرد وسیع در صنایع غذایی، آرایشی، دارویی و سوخت زیستی است. رنگیزه ارزشمند بتا-کاروتن به‌عنوان پیش‌ساز ویتامین A و یک آنتی‌اکسیدان قوی است و مقدار آن در جلبک دونالیلا به ۱۴٪ وزن خشک می‌رسد [۱۰]. جلبک دونالیلا تحمل بالایی به شرایط تنش داشته و دارای قابلیت رشد در آب‌های شور و شیرین است. این جلبک می‌تواند در محدود وسیعی از شوری (از ۰/۵ تا ۵/۵ مولار) رشد نماید. جلبک دونالیلا به‌طور تجاری در چندین کشور نظیر استرالیا، چین، اسرائیل و هند کشت می‌شود و البته در کشورهای شیلی، اسپانیا، ایران و پرتغال نیز به‌صورت پایلوت کشت شده و به‌عنوان بهترین منبع بتاکاروتن و آنتی‌اکسیدان محسوب می‌شود. توانایی جلبک به سازگاری با تنش‌ها (اکسیداتیو و اسمزی) و همچنین عدم حضور دیواره سلولی سبب شده که این جلبک به‌عنوان منبع مناسبی برای تولید آنتی‌اکسیدان باشد. تاکنون چندین مطالعه در ارتباط با تاثیر شرایط تنش‌های محیطی بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی این جلبک صورت گرفته‌است. تاثیر نور و دمایی پائین بر دو سویه از جلبک دونالیلا نشان داد که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای اسکوربات تا ۱۵٪ و گلوکاتینون تا ۱۰۰٪ افزایش یافت [۱۱]. بر هم کنش نور شدید و کاهش نیتروژن سبب القای تولید کاروتنوئید در جلبک دونالیلا شد که در ارتباط با فعالیت بالای ایزوزیم آهن‌دار آنزیم سوپراکسید دیسموتاز بود [۱۲]. تنش شوری بالا منجر به بازدارندگی رشد در جلبک دونالیلا شد، اما تجمع بتاکاروتن را به‌طور معناداری افزایش داد [۱۳]. در ارتباط با تاثیر کاهش فشار اتمسفری بر

1. *Dunaliella Salina*
2. Chlorophyceae
3. Volvocales
4. Dunaliellaceae

گردید. پس از محاسبه وزن تر، نمونه‌ها در آون ۶۰ درجه قرار گرفت و پس از رسیدن به وزن ثابت، وزن خشک محاسبه شد. تعداد سلول‌ها نیز با استفاده از لام نئوبار به دست آمد. تراکم سلولی نیز با خواندن جذب سوسپانسیون سلولی در ۷۵۰ نانومتر به دست آمد.

بررسی رنگیزه های فتوسنتزی و کاروتنوئیدها

مقدار ۵۰ میلی‌گرم از وزن تر سلولی با استن ۱۰۰ درصد برای ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتیگراد عصاره‌گیری شد. بعد از سانتریفیوژ، جذب عصاره در طول موج‌های ۶۶۲، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر ثبت شد و محتوای کلوفیل a ، کلروفیل b و کاروتنوئید با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد [۱۷].

$$\text{Chla } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 11.75 \text{ A662} - 2.35 \text{ A645}$$

$$\text{Chlb } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 18.61 \text{ A645} - 3.96 \text{ A662}$$

$$\text{Car } (\mu\text{g mL}^{-1}) = (1000\text{A470} - 2.270 \text{ Chla} - 81.4 \text{ Chlb})/198$$

محتوای بتاکاروتن

۲۰ میلی‌گرم از وزن تر سلولی در ۳ میلی‌لیتر محلول هگزان/اتانول با نسبت ۱ به ۲ (حجمی/حجمی) به صورت سوسپانسیون در آمد و بعد از چندین بار ورتکس، سانتریفیوژ شد. جذب محلول رویی حاوی بتاکاروتن در ۴۵۰ نانومتر قرائت شد و محتوای بتاکاروتن با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد [۱۸].

$$\text{C } \beta\text{-car } (\mu\text{g ml}^{-1}) = 25.2 \times \text{A } 450$$

محتوای پروتئین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

محتوای پروتئین با استفاده از روش برادفورد سنجش شد [۱۹]. ۰/۱ گرم از وزن تر پلت سلولی در ۲ میلی‌لیتر بافر استخراج سرد Tris-HCl ۵۰ میلی‌مولار با pH ۶/۸ سائیده شد و سپس در سرعت $12000 \times \text{g}$ برای ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد سانتریفیوژ گردید. عصاره به دست آمده برای سنجش پروتئین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی استفاده شد. برای سنجش پروتئین، ۵ میلی‌لیتر از معرف برادفورد و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی مخلوط شد و برای ۲۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفت. سپس جذب در ۵۹۵ نانومتر قرائت شد و محتوای پروتئین با استفاده از نمودار رسم شده با استفاده از سرم آلبومین گاوی به عنوان استاندارد محاسبه شد.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) از طریق بازدارندگی احیای نیتروبلوترازولیوم (NBT) با روش Giannopolitis و Ries به دست آمد [۲۰]. برای تهیه مخلوط واکنش، ۲۰۰ میکرولیتر عصاره با

جلبک مطالعه اندکی صورت گرفته است. Cycil و همکاران (۲۰۲۱) گزارش نمودند که کاهش فشار اتمسفری تا ۱۶۰ میلی‌بار منجر به تحریک رشد جلبک‌های کلرلا و دونالیلا شد [۱۴]. مطالعه روی چند سویه کارنوباکتریوم ۱ نشان داد که کارنوباکتریوم‌ها قادر به رشد در شرایط کاهش فشار و بدون اکسیژن اتمسفری هستند [۱۵]. در ارتباط با تاثیر فشارهای پائین اتمسفری بر پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی جلبک دونالیلا و ارتباط آن با رشد جلبک دونالیلا تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در این مطالعه تاثیر کاهش فشار اتمسفری بر مکانیسم رشد از طریق بررسی آنزیم‌ها و متابولیت‌های آنتی‌اکسیدانی جلبک دونالیلا سالینا بررسی شد.

مواد و روش‌ها

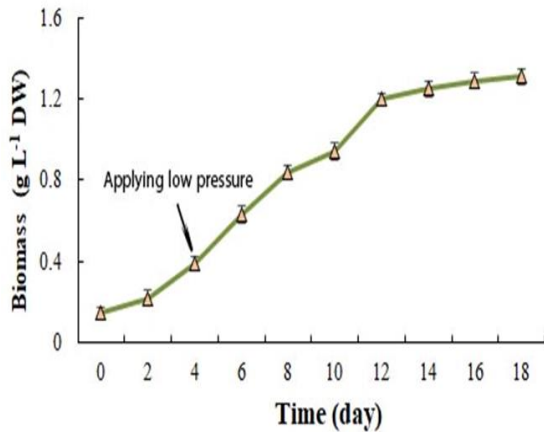
تهیه جلبک، شرایط کشت و اعمال فشار پائین اتمسفری

جلبک دونالیلا سالینا (*D. salina* M50030) از مرکز میکرو ارگانسیم‌های ایران خریداری شد و در محیط جانسون اصلاح شده با pH ۷/۵ کشت شد [۱۶]. جلبک‌ها در ظروف ارلن ۱۰۰ میلی‌لیتری در حجم محیط کشت ۲۵ میلی‌لیتر و تعداد سلول $2/3 \times 10^4$ کشت شدند و در دمای 25 ± 2 درجه، نور ال‌ای‌دی سفید با شدت ۲۵ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه روی شیکر قرار گرفت.

برای ایجاد کاهش فشار، از ابزار طراحی شده برای ایجاد کاهش فشار اتمسفری حاوی یک پمپ مکنده هوا استفاده شد. میزان فشار هوای درون ظرف با استفاده از مانومتر روی دستگاه قابل ارزیابی بود. سلول‌های جلبک در روز سوم واکنش در ابتدای فاز لگاریتمی رشد تحت شرایط کاهش فشار اتمسفری ۸۶۰، ۳۴۰، ۱۶۰ و ۸۰ میلی‌بار برای ۵ روز (از روز ۴ ام تا روز ۹ ام کشت) و هر روز برای یک ساعت قرار گرفتند. نمونه کنترل نیز در شرایط محیطی مشابه در بیرون از دستگاه قرار گرفت. فشار هوای محیط با استفاده از بارومتر (۸۶۰ میلی‌بار) تعیین شد. ارلن‌ها بعد از اعمال تیمار روی دستگاه شیکر با شرایط دمایی و نوری ذکر شده در بالا قرار گرفتند. نمونه‌ها در روز ۱۴ ام کشت (ابتدای فاز ثابت رشد) برای آنالیزهای رشد و بیوشیمیایی برداشت شدند. برای هر تیمار ۳ تکرار گذاشته شد و آزمایش ۲ بار تکرار شد.

بررسی رشد

رشد جلبک‌ها هر دو روز یک‌بار برای ۱۸ روز ارزیابی شد. سوسپانسیون سلولی پس از برداشت سانتریفیوژ (سرعت $4500 \times \text{g}$ برای ۵ دقیقه) شد و پلت‌های سلولی پس از دوبار شستشو با آب مقطر، دوباره سانتریفیوژ



شکل ۱- منحنی رشد جلبک دونالیلا سالینا بعد از ۱۸ روز از کشت.

Fig. 1. The growth curve of *D. salina* alga after 18 days of cultivation.

تاثیر فشار پائین اتمسفری بر رشد، تعداد سلول و محتوای کلروفیل

تعداد سلول‌های جلبک در فشار هوای محیط (شاهد) 106×0.45 در روز ۱۴ ام کشت بود. کاهش فشار اتمسفری تا ۱۶۰ میلی‌بار منجر به افزایش تعداد سلول‌ها شد و فشار اتمسفری خیلی پائین (۸۰ میلی‌بار) منجر به کاهش ۱۷/۷ درصدی تعداد سلول‌ها در مقایسه با نمونه شاهد شد. نتایج جذب سوسپانسیون سلولی در ۷۵۰ نانومتر نشان داد که بیشترین رشد سلول‌ها در فشار اتمسفری ۳۴۰ میلی‌بار بوده و با کاهش فشار اتمسفری تراکم سلولی نیز کاهش یافت (جدول ۱)

جدول ۱- تاثیر کاهش فشار اتمسفری بر تعداد و تراکم سلولی، رشد، محتوای کلروفیل *a* و *b*

Table 1. The effect of low atmospheric pressure on the cell number and concentration, growth, and chlorophyll *a* and *b* contents.

Pressure (mbar)	Cell number ($\times 10^6$)	Cell concentration (OD 750 nm)	Biomass ($g L^{-1} DW$)	Chlorophyll <i>a</i> ($\mu g g^{-1} FW$)	Chlorophyll <i>b</i> ($\mu g g^{-1} FW$)
860 ± 10	0.45 ± 0.075 c	0.12 ± 0.013 c	0.22 ± 0.15 c	24.9 ± 1.13 b	14.8 ± 0.78 b
340 ± 10	3.2 ± 0.081 a	0.31 ± 0.017 a	0.46 ± 0.23 a	34.6 ± 1.42 a	19.7 ± 1.03 a
160 ± 10	2.8 ± 0.093 b	0.26 ± 0.022 b	0.38 ± 0.29 ab	30.4 ± 1.87 ab	17.9 ± 0.65 a
80 ± 3	0.37 ± 0.71 cd	0.08 ± 0.011 d	0.15 ± 0.11 d	12.5 ± 2.36 c	10.3 ± 0.67 c

حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ است

داد. محتوای کلروفیل *a* و *b* با کاهش فشار اتمسفری تا ۱۶۰ میلی‌بار نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت ($P \leq 0.05$). بالاترین مقدار

محلول بافر فسفات (۵۰ میلی مولار با pH 7.5)، متیونین ۱۳ میلی‌مولار، ۰/۱ میلی‌مولار Na-EDTA، NBT ۷۵ میلی‌مولار و ریبوفلاوین ۵۷ میکرو مولار مخلوط شد و سپس جذب نمونه در ۵۶۰ نانومتر بعد از ۱۰ دقیقه قرائت شد. یک واحد آنزیمی معادل مقدار آنزیمی است که سبب بازدارندگی ۵۰ درصد احیای NBT می‌شود. برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، مخلوط واکنش حاوی ۱۵ میکرو لیتر عصاره آنزیمی، ۶۲۵ میکرو لیتر بافر پتاسیم فسفات (۵۰ میلی مولار با pH 7) و ۷۵ میکرو لیتر هیدروژن پراکسید (۳٪) آماده شد و فعالیت آنزیم در ۲۴۰ نانومتر قرائت گردید [۲۱].

آنالیز آماری

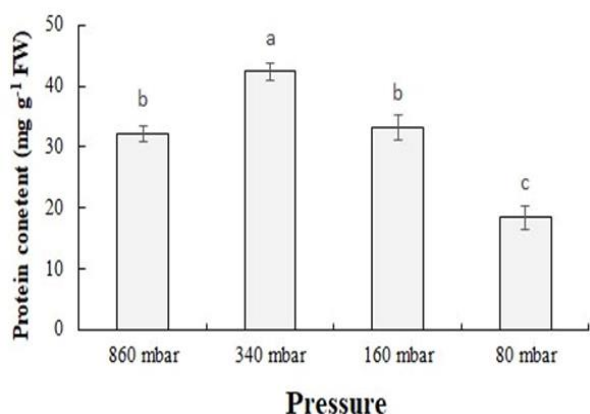
آنالیز آماری با روش ANOVA توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد. آزمایشات رشد با ۵ تکرار و آزمایشات بیوشیمیایی با ۴ تکرار برای هر تیمار انجام شد. اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌ها با روش دانکن در سطح $P \leq 0.05$ صورت گرفت.

نتایج

منحنی رشد جلبک دونالیلا سالینا

رشد جلبک پس از ۱۸ روز واکنش در محیط جدید نشان داد که در ۲ تا ۳ روز اول، جلبک‌ها در فاز تاخیری به سر می‌برند. سپس وارد فاز لگاریتمی رشد شده و تا روز ۱۳ ام ادامه دارد. در روزهای ۱۴ ام تا ۱۸ ام سلول‌ها وارد فاز ثابت رشد شده و تغییر رشد چندانی ندارند (شکل ۱).

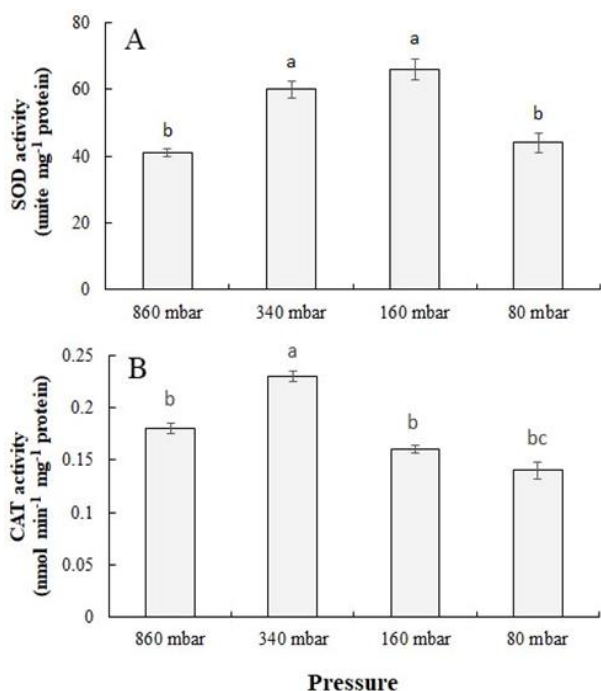
میزان بیومس سلولی در فشارهای اتمسفری ۳۴۰ و ۱۶۰ میلی‌بار به ترتیب افزایش ۲/۱ و ۱/۷ برابری را نسبت به نمونه شاهد نشان



شکل ۳- تأثیر فشارهای اتمسفری پائین بر محتوای پروتئین جلبک *Dunaliella salina*. حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ است.

Fig. 3. The effect of low atmospheric pressure on the protein content of *D. salina* alga. different letters indicate significance at $P \geq 0.05$ level.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز تغییر معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد یافت (شکل ۴). به طوری که با کاهش فشار اتمسفری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش یافت.



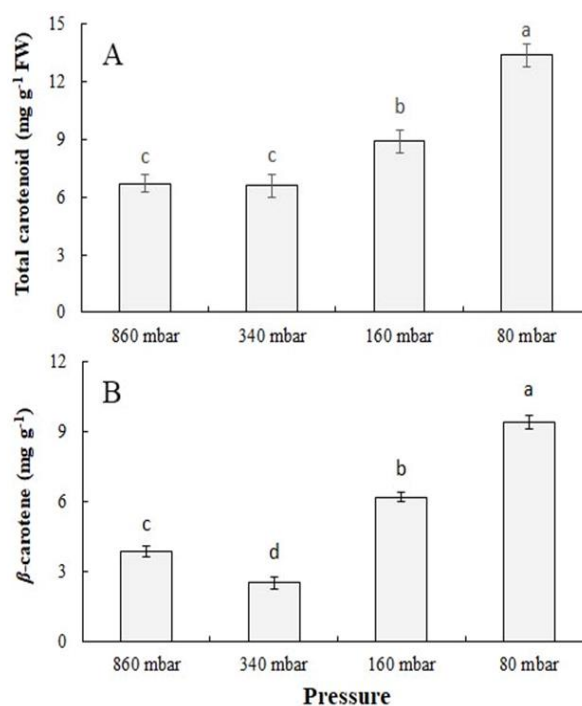
شکل ۴- تأثیر فشارهای اتمسفری پائین بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز (SOD، A) و کاتالاز (CAT، B) جلبک *Dunaliella salina*. حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ است.

Fig. 4. The effect of low atmospheric pressure on the antioxidant enzyme activity of superoxide dismutase (SOD, A) and catalase (CAT, B) of *D. salina* alga. different letters indicate significance at $P \geq 0.05$ level.

کلروفیل *a* و *b* در فشار ۳۴۰ میلی بار مشاهده شد که به ترتیب افزایش ۳۸/۹ و ۳۳/۱ درصد را نسبت به شاهد نشان داد (جدول ۱).

تأثیر فشار پائین اتمسفری بر محتوای کاروتنوئید و بتاکاروتن

محتوای کاروتنوئید و بتاکاروتن تحت فشار اتمسفری پائین تغییر معنی‌داری یافت. بیشترین محتوای کاروتنوئید (۱۳/۴ میلی گرم بر گرم) و بتا-کاروتن (۹/۴ میلی گرم بر گرم) در فشار اتمسفری ۸۰ میلی بار مشاهده شد که افزایش معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان داد ($P \leq 0.05$). در فشار اتمسفری ۴۳۰ میلی بار محتوای کاروتنوئید تغییر معنی‌داری را نشان نداد، ولی محتوای بتا-کاروتن کاهش ۳۵/۱ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد.



شکل ۲- تأثیر فشارهای اتمسفری پائین بر محتوای کاروتنوئید کل (A) و بتا-کاروتن (B) جلبک *Dunaliella salina*. حروف نامشابه بیانگر معنی‌داری در سطح $P \leq 0.05$ است.

Fig. 2. The effect of low atmospheric pressure on the total carotenoid (A), β-carotene (b) of *D. salina* alga. different letters indicate significance at $P \geq 0.05$ level.

تأثیر فشار پائین اتمسفری بر محتوای پروتئین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

محتوای پروتئین در فشار ۳۴۰ میلی بار افزایش ۳۲/۱ درصد را نسبت به شاهد نشان داد. اما با کاهش بیشتر فشار، محتوای پروتئین کاهش یافت. به طوری که در فشار ۸۰ میلی بار، محتوای پروتئین کاهش ۴۲/۶ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد (شکل ۳).

بیشترین فعالیت آنزیمی در فشارهای اتمسفری ۳۴۰ و ۱۶۰ میلی‌بار مشاهده شد که به ترتیب افزایش ۴۸/۷ و ۵۶/۹ درصدی را نسبت به شاهد نشان دادند. در فشار اتمسفری ۸۰ میلی‌بار نیز فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز کمی افزایش یافت، ولی نسبت به شاهد معنی‌دار نبود (شکل ۴A) فعالیت آنزیم کاتالاز در فشار ۳۴۰ میلی‌بار افزایش یافت، ولی با کاهش بیشتر فشار اتمسفری، فعالیت کاتالاز تغییر معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان نداد (شکل ۴B).

بحث

در این مطالعه، قابلیت رشد و پاسخ آنتی‌اکسیدانی سلول‌های جلبک دونالیلا سالیئا تحت فشارهای پائین اتمسفری مورد بررسی قرار گرفت. جلبک‌ها به‌عنوان منبع غنی از آمینواسیدها، پروتئین، ویتامین و متابولیت‌های آنتی‌اکسیدانی هستند و به دلیل رشد سریعی که دارند می‌توانند به‌عنوان غذای فضاورد و تولید اکسیژن در سیستم پشتیبان حیات و سفرهای فضایی طولانی مدت مورد استفاده قرار گیرند [۱، ۲]. نتایج منحنی رشد جلبک، سه فاز مختلف رشد از جمله فازهای تاخیری، لگاریتمی و ثابت را نشان داد (شکل ۱). به طوری که در سه روز اول، سلول‌ها رشد چندانی نداشتند و در فاز تاخیری بودند. در این فاز سلول‌ها آمادگی لازم را برای ورود به فاز تکثیر (فاز لگاریتمی) پیدا می‌کنند. فاز لگاریتمی تا روز سیزدهم ادامه یافت و سپس از روز چهاردهم سلول‌ها وارد فاز رشد ثابت شدند. تکثیر سلول‌ها در فاز ثابت کاهش یافته که می‌تواند به دلیل تجمع مواد سمی و کاهش مواد غذایی محیط باشد. در فاز ثابت رشد، مکانیسم‌های دفاعی سلول فعال شده و با تجمع متابولیت‌های ثانوی از سلول‌ها محافظت می‌کند [۲۲]. نتایج منحنی رشد جلبک دونالیلا پیشنهاد می‌کند که سلول‌های جلبک بایستی در روزهای ۱۲ ام تا ۱۳ ام واگشت شوند. تاثیر کاهش فشار اتمسفری بر پارامترهای رشد نشان داد که کاهش فشار اتمسفری تا ۱۶۰ میلی‌بار سبب القای بیومس، تعداد و تراکم سلولی شد. اما کاهش بیشتر فشار اتمسفری در ۸۰ میلی‌بار، پارامترهای رشد را کاهش داد (جدول ۱). بیشترین تعداد سلولی (3×10^6) و تراکم سلولی در فشار اتمسفری ۳۴۰ میلی‌بار مشاهده شد (جدول ۱). تاکنون گزارشات متفاوتی در ارتباط با تاثیر کاهش فشار اتمسفری بر پاسخ‌های رشد صورت گرفته است. Orcutt و همکاران (۱۹۷۰) گزارش نمودند که جلبک‌ها قابلیت رشد در کاهش فشار اتمسفری بین ۵۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌بار را دارند [۲۳]. Cyclic و همکاران (۲۰۲۱) بیان نمودند که در جلبک *Chloromonas bervispina*، رشد و تعداد سلولی با کاهش فشار اتمسفری محیط حتی در ۳۳۰ میلی‌بار کاهش یافت و بیشترین تعداد سلولی در شرایط محیطی نرمال (۶۷۰ میلی‌بار) مشاهده شد.

اما در جلبک‌های کلرلا و دونالیلا سویه UTEX LB 200، با کاهش فشار اتمسفری تعداد سلول‌ها افزایش یافت [۱۴]. Qin و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که کاهش فشار اتمسفری از ۱۰۰ به ۵۰ کیلوپاسکال منجر به کاهش رشد سیانو باکترهای *Anabaena flosaquae* و *Microcystis aeruginosa* شد، درحالی‌که تولید ترکیبات پلی‌مری خارج سلولی برای سازش به شرایط تنش افزایش یافت [۲۴]. Yang و همکاران (۲۰۱۶) گزارش نمودند که تعدادی از جلبک‌ها در شرایط کاهش اکسیژن می‌توانند متابولیسم بی‌هوازی را فعال نموده و رشد کنند [۲۵]. به نظر می‌رسد پاسخ‌های متفاوت رشد جلبک‌ها وابسته به نوع و سویه جلبک، سطح فشار اتمسفری و حتی مدت زمان اعمال کاهش فشار باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که جلبک دونالیلا سالیئا در شرایط فشار پائین اتمسفری با تغییر متابولیسم سلولی قابلیت رشد داشته و حتی در فشار خیلی پائین (۸۰ میلی‌بار) قابلیت رشد کم را حفظ می‌نماید.

رنگیزه کلروفیل از اجزای اصلی دستگاه فتوسنتزی گیاهان و جلبک‌ها بوده و در جذب نور نقش دارند. کلروفیل a در واکنش شیمیایی برداشت نوری دستگاه فتوسنتزی و کلروفیل b در پایداری پروتئین‌های کمپلکس برداشت نور نقش دارند [۲۶]. در این مطالعه محتوای رنگیزه‌های کلروفیل a و b با کاهش فشار اتمسفری ۱۶۰ میلی‌بار افزایش یافت، ولی در فشار ۸۰ میلی‌بار، محتوای کلروفیل کاهش یافت. از طرفی، محتوای رنگیزه‌های کاروتنوئید و بتاکاروتن، یک روند افزایشی را با کاهش فشار نشان دادند. تحقیقات Qin و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که فشار اتمسفری پائین (۵۰ کیلوپاسکال) منجر به کاهش محتوای کلروفیل در جلبک *Microcystis aeruginosa* شد، در حالی که نسبت کاروتنوئیدها به کلروفیل افزایش یافت [۲۴]. مطالعه روی کاهو نشان داد که کاهش فشار اتمسفری ۶۷ و ۳۳ کیلوپاسکال به ترتیب منجر به کاهش ۲۰ و ۳۸ درصد سطح برگ و کاهش ۶ و ۲۷ درصدی وزن تر ساقه شد، ولی محتوای آنتوسیانین نسبت به گیاهچه‌های شاهد یک روند افزایشی را نشان داد [۲۷]. کاهش میزان کلروفیل می‌تواند در ارتباط با تغییر نسبت کاروتنوئید به کلروفیل برای حفاظت فتوسیستم‌ها در برابر تنش باشد [۶].

به خوبی شناخته شده است که تنش‌های غیر زیستی منجر به تجمع انواع ترکیبات اکسیژن فعال (ROS) در سلول‌ها می‌شوند. این ترکیبات می‌توانند بر رشد سلول‌ها تاثیر گذارند و مسیرهای سیگنالینگ مرتبط با سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی را فعال نمایند. فعال شدن دفاع آنتی‌اکسیدانی منجر به خنثی‌سازی رادیکال آزاد و حفاظت از پروتئین‌ها، لیپیدها و DNA

مراجع

- [1] E. D. Revellame, R. Aguda, A. Chistoserdov, D. L. Fortela, R. A. Hernandez, and M. E. Zappi, "Microalgae cultivation for space exploration: assessing the potential for a new generation of waste to human life-support system for long duration space travel and planetary human habitation," *Algal Research*, vol. 55, 2021, Art. no. 102258, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102258>.
- [2] C. D. O. Rangel Yagui, E. D. G. Danesi, J. C. M. De Carvalho, and S. Sato, "Chlorophyll production from *Spirulina platensis*: Cultivation with urea addition by fed-batch process," *Bioresource Technology*, vol. 92, no. 2, pp. 133–141, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.09.002>.
- [3] G. Horneck *et al.*, "Humex, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part I: Lunar missions," *Advances in Space Research*, vol. 31, no. 11, pp. 2389–2401, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00568-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00568-4).
- [4] F. Forget, "The present and past climates of planet Mars," in *European Physical Journal Conferences*, (EPJ Web of Conferences), 2009, vol. 1, pp. 235–248, <https://doi.org/10.1140/epjconf/e2009-0924-9>.
- [5] L. Yang *et al.*, "Microalgae biotechnology as an attempt for bioregenerative life support systems: Problems and prospects," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 94, no. 10, pp. 3039–3048, 2019, <https://doi.org/10.1002/jctb.6159>.
- [6] C. Verseux, M. Baqué, K. Lehto, J. P. P. De Vera, L. J. Rothschild, and D. Billi, "Sustainable life support on Mars – the potential roles of cyanobacteria," *International Journal of Astrobiology*, vol. 15, Special Issue 1: Special Issue lunar, pp. 65–92, 2016, <https://doi.org/10.1017/S147355041500021X>.
- [7] L. A. Lewis and P. O. Lewis, "Unearthing the molecular phylogeny of desert soil green algae (Chlorophyta)," *Systematic Biology*, vol. 54, no. 6, pp. 936–947, 2005, <https://doi.org/10.1080/10635150500354852>.
- [8] I. Garbayo *et al.*, "Identification and physiological aspects of a novel carotenoid-enriched, metal-resistant microalga isolated from an acidic river in Huelva (Spain)," *Journal of Phycology*, vol. 48, no. 3, pp. 607–614, 2012, <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01160.x>.
- [9] T. Niederwieser, P. Kocielek, and D. Klaus, "A review of algal research in space," *Acta Astronautica*, vol. 146, pp. 359–367, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.03.026>.
- [10] U. K. Roy, B. V. Nielsen, and J. J. Milledge, "Antioxidant production in *Dunaliella*," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, 2021, Art. no. 3959, <https://doi.org/10.3390/app11093959>.

سلول از آسیب اکسیداتیو می‌شود [۲۸]. در این مطالعه، محتوای پروتئین در ۳۴۰ میلی‌بار افزایش یافت، ولی با کاهش بیشتر فشار اتمسفری محتوای آن کاهش یافت و کمترین مقدار در سلول‌های جلبک رشد یافته در فشار اتمسفری ۸۰ میلی‌بار مشاهده شد. پاسخ پروتئینی سلول‌ها مرتبط با رشد بود. از طرفی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پاسخ متفاوتی را نشان دادند. به‌طوری‌که آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز در ۳۶۰ میلی‌بار فعالیت آن‌ها افزایش یافت. ولی با کاهش بیشتر فشار اتمسفری، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش یافت، درحالی‌که آنزیم کاتالاز کاهش فعالیت را نشان داد. افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز می‌تواند بیانگر نقش مهم این آنزیم در جاروب نمودن رادیکال‌های سوپراکسید تحت کاهش فشار اتمسفری باشد. هیدروژن پراکسید توسط آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سایر آنزیم‌ها به ملکول آب تبدیل می‌شود [۲۹]. به‌علاوه، نتایج این پژوهش نشان داد که در فشار ۸۰ میلی‌بار، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، پارامترهای رشد و محتوای رنگیزه کلروفیل کاهش یافت، ولی محتوای کاروتنوئید و بتا-کاروتن افزایش یافت که می‌تواند در ارتباط با نقش حفاظت‌کنندگی کاروتنوئیدها از سیستم فتوسنتزی برای جاروب کردن رادیکال‌های آزاد برای حفظ حداقل رشد در شرایط فشار خیلی پائین اتمسفری باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، کاهش فشار اتمسفری تا ۱۶۰ میلی‌بار منجر به تحریک رشد و تعداد سلول جلبک دونالیلا سالیانا شد و افزایش رشد در ارتباط با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز بود. از طرفی کاهش خیلی زیاد فشار اتمسفری در ۸۰ میلی‌بار منجر به بازدارندگی و مرگ همه سلول‌ها نشد، بلکه رشد سلول‌ها کمتر از شاهد شد. در این شرایط سلول‌ها برای حفاظت از آسیب، سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی غیر آنزیمی را فعال نمود و سبب بیشترین تجمع محتوای کاروتنوئید و بتا-کاروتن شد. با توجه قابلیت تحمل بالای جلبک دونالیلا سالیانا به تغییر فشار اتمسفری، این جلبک می‌تواند کاندیدی برای مطالعات آنتی‌سیستم پشتیبان حیات باشد.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی مسئولین محترم پژوهشگاه هوافضا برای اجرای این پژوهش قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

- [20] C. N. Giannopolitis and S. K. Ries, "Superoxide dismutases II. purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings," *Journal Plant Physiology*, vol. 59, no. 2, pp. 315-318, 1977, <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.315>.
- [21] S. Jebara, M. Jebara, F. Limam, and M. E. Aouani, "Changes in ascorbate peroxidase, catalase, guaiacol peroxidase and superoxide dismutase activities in common bean (*Phaseolus vulgaris*) nodules under salt stress," *Journal of Plant Physiology*, vol. 162, no. 8, pp. 929-936, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.10.005>.
- [22] H. Hassanpour, "Potential impact of red-blue LED light on callus growth, cell viability, and secondary metabolism of *Hyoscyamus reticulatus*," *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, vol. 58, pp. 256-265, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11627-021-10232-x>.
- [23] D. M. Orcutt, B. Richardson, and R. D. Holden, "Effects of hypobaric and hyperbaric helium atmospheres on the growth of *Chlorella sorokiniana*," *Applied Microbiology*, vol. 19, no. 1, pp. 182-183, 1970, <https://doi.org/10.1128/am.19.1.182-183.1970>.
- [24] L. Qin, Q. Yu, W. Ai, Y. Tang, J. Ren, and S. Guo, "Response of cyanobacteria to low atmospheric pressure," *Life Sciences in Space Research*, vol. 3, pp. 55-62, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2014.09.001>.
- [25] J. Yang, L. Ma, H. Jiang, G. Wu, and H. Dong, "Salinity shapes microbial diversity and community structure in surface sediments of the Qinghai-Tibetan Lakes," *Scientific Reports*, vol. 6, 2016, Art. no. 25078, <https://doi.org/10.1038/srep25078>.
- [26] G. W. Stutte *et al.*, "Effect of reduced atmospheric pressure on growth and quality of two lettuce cultivars," *Life Sciences in Space Research*, vol. 34, pp. 37-44, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.06.001>.
- [27] H. Hassanpour, A. Eydi, and M. Hekmati, "Electromagnetic field improved nanoparticle impact on antioxidant activity and secondary metabolite production in *Anthemis gilanica* seedlings," *International Journal of Agronomy*, vol. 2021, no. 1, pp. 1-9, 2021, Art. no. 8730234, <https://doi.org/10.1155/2021/8730234>.
- [28] H. Hassanpour, "Antioxidant metabolism and oxidative damage in *Anthemis gilanica* cell line under fast clinorotation," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol. 150, pp. 709-719, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02324-2>.
- [29] R. Madhusudhan, T. Ishikawa, Y. Sawa, S. Shigeoka, and H. Shibata, "Post-transcriptional regulation of ascorbate peroxidase during light adaptation of *Euglena gracilis*," *Plant Science*, vol. 165, no. 1, pp. 233-238, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00164-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00164-X).
- [11] M. M. Haghjou, M. Shariati, and N. Smirnoff, "The effect of acute high light and low temperature stresses on the ascorbate-glutathione cycle and superoxide dismutase activity in two *Dunaliella salina* strains," *Physiologia Plantarum*, vol. 135, no. 3, pp. 272-280, 2009, <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01193.x>.
- [12] S. K. Saha, S. Moane, and P. Murray, "Effect of macro-and micro-nutrient limitation on superoxide dismutase activities and carotenoid levels in microalga *Dunaliella salina* CCAP 19/18," *Bioresource Technology*, vol. 147, pp. 23-28, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.022>.
- [13] M. Wu *et al.*, "Effects of different abiotic stresses on carotenoid and fatty acid metabolism in the green microalga *Dunaliella salina* Y6," *Annals of Microbiology*, vol. 70, 2020, Art. no. 48, <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01588-3>.
- [14] L. M. Cyclic *et al.*, "Investigating the growth of algae under low atmospheric pressures for potential food and oxygen production on Mars," *Frontiers in Microbiology*, vol. 12, 2021, Art. no. 12:733244, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.733244>.
- [15] W. L. Nicholson, K. Krivushin, D. Gilichinsky, and A. C. Schuerger, "Growth of *Carnobacterium* spp. from permafrost under low pressure, temperature, and anoxic atmosphere has implications for Earth microbes on Mars," *Proceedings of the National Academy of Sciences(PNAS)*, vol. 110, no. 2, pp. 666-671, 2012, <https://doi.org/10.1073/pnas.1209793110>.
- [16] H. Lv, X. Cui, F. Wahid, F. Xia, C. Zhong, and S. Jia, "Analysis of the physiological and molecular responses of *Dunaliella salina* to macronutrient deprivation," *PLOS One*, vol. 11, no. 3, 2016, Art. no. e0152226, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152226>.
- [17] H. K. Lichtenthaler and C. Buschmann, "Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy," *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, vol. 1, no. 1, 2001, Art. no. F4.3.1-F4.3.8, <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>.
- [18] M. H. Morowvat and Y. Ghasemi, "Culture medium optimization for enhanced β -carotene and biomass production by *Dunaliella salina* in mixotrophic culture," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 7, pp. 217-223, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.06.008>.
- [19] M. M. Bradford, "A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding," *Analytical Biochemistry*, vol. 72, no. 1-2, pp. 248-254, 1976, [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).

Technical Note

Introducing the Conceptual Design Process of the Armita Lunar Rover Based on ECSS

Amirhossein Adami* , Zahra Pourjabari, Mohammad Azhdari, Seyed Ali Saadatdar, Haniyeh Eshaghnia, Kazem Gholipour, Seyed Mohammad Mir Mohammadi, and Alireza Ahangarani Farahani 

Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 13 Feb 2024
Revised 07 March 2024
Accepted 14 April 2024
Available Online 21 April 2024

Keywords:

Probe
Lunar rover
System design
ECSS standard
Product tree
Function tree
Conceptual design

ABSTRACT

This study examines the structural design of planetary probes, introducing common configurations and methodologies. The research focuses on the system design process of the Armita lunar rover, developed for the first national probe robot competition organized by the Iran Space Research Institute. The Armita team achieved first place in the initial phase of the competition in 1401. The design process of the Armita rover adheres to the European cooperation for space standardization (ECSS) framework. Key stages of the process are briefly outlined, including the compilation and extraction of a requirements document, the development of a function-performance tree, a product tree, and the conceptual design of subsystems to meet mission objectives. According to the design results, the Armita rover has a mass of 6.9 kg and geometric dimensions of $48 \times 38 \times 36$ cm, with a total energy consumption of 112 amp-hours. These specifications enable the rover to successfully perform its intended mission while meeting all technical, dimensional, and mass requirements.

*Corresponding Author's E-mail: adami_amir@mut.ac.ir

How to Cite this Article:

A. H. Adami *et al.*, "Introducing the conceptual design process of the Armita lunar rover based on ECSS," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 65-76, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1477>.



COPYRIGHTS

© 2024 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/).



ارائه روند طراحی مفهومی ماه‌نورد آرمتا مطابق با استاندارد ECSS

امیرحسین آدمی^{۱*}، زهرا پورجباری^۲، محمد اژدری^۳، سیدعلی سعادتدار^۴، حانیه اسحاق‌نیا^۵، کاظم قلی‌پور^۶، سیدمحمد میرمحمدی^۷، و علیرضا آهنگرانی^۸

۱ و ۸ - استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲، ۳، ۶ و ۷ - کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴ و ۵ - دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق ابتدا به بررسی ساختار کاوشگرهای ارسال شده به سایر سیاره‌ها پرداخته شده و ساختارهای متداول معرفی می‌گردند. در ادامه، به ارائه روند طراحی سیستمی کاوشگر آرمتا که برای اولین مسابقات ملی ربات کاوشگر (پژوهشگاه فضایی ایران) آماده‌سازی شده بود پرداخته خواهد شد. تیم آرمتا موفق به کسب رتبه نخست در فاز اول مسابقه در سال ۱۴۰۱ گردیده است. روند طراحی کاوشگر، مبتنی بر استاندارد ECSS بوده و به‌طور مختصر ارائه می‌گردد که شامل تدوین و استخراج سند الزامات، درخت کارکرد-عملکرد، درخت محصول و نهایتاً طراحی مفهومی زیرسامانه‌ها برای دستیابی به انجام ماموریت مدنظر می‌باشد. بر اساس نتایج استخراج شده، کاوشگر آرمتا با جرم ۶/۹ کیلوگرم و ابعاد هندسی ۳۶×۳۸×۴۸ سانتی متر با انرژی مصرفی کل ۱۱۲ آمپر ساعت امکان انجام ماموریت در نظر گرفته شده را خواهد داشت و کلیه الزامات فنی، ابعادی و جرمی را به‌خوبی ارضاء می‌نماید.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۴ بهمن ۱۴۰۲

بازنگری ۱۷ اسفند ۱۴۰۲

پذیرش ۲۶ فروردین ۱۴۰۳

اولین انتشار ۰۲ اردیبهشت ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

کاوشگر

ماه‌نورد

طراحی سیستمی

استاندارد ECSS

درخت محصول

درخت کارکرد

طراحی مفهومی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: adami_amir@mut.ac.ir

How to Cite this Article:

A. H. Adami et al., "Introducing the conceptual design process of the Armita lunar rover based on ECSS," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 65-76, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1477>.

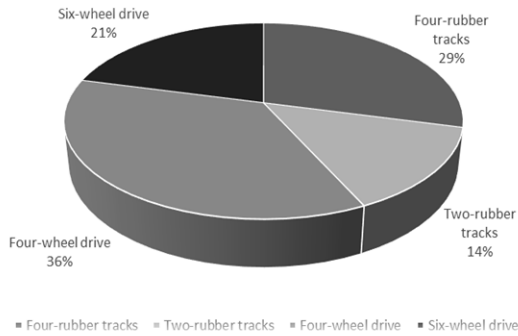


COPYRIGHTS

© 2024 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/).



برای این نوع سامانه‌ها دو نوع پیکربندی رایج وجود دارد که عبارتند از: نوع چرخ‌دار و نوع سنی. در شکل ۱ توزیع آماری ساختارها نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌های کاوشگر بررسی شده برای شرایط مشابه [۱].

Fig. 1. Probe samples examined for similar conditions [1].

اغلب ربات‌هایی که به مریخ و ماه ارسال شده‌اند؛ پنج هدف علمی زیر را پوشش می‌دهند:

- در جستجوی نشانی از آب(مایع حیات): شناسایی محیط‌ها یا بسترهایی که در آن‌ها آب قرار دارد.
 - در جستجوی نشانی از قابلیت زندگی (حیات): شناسایی محیط‌هایی که در گذشته می‌توانسته‌اند قادر به پشتیبانی از زندگی میکروبی باشند.
 - به دنبال نشانه‌های زیستی: یافتن نشانه‌هایی از حیات میکروبی پیشین در آن محیط‌های دارای قابلیت میزبانی زیست، به‌ویژه در سنگ‌های بخصوصی که با گذشت زمان چنین نشانه‌هایی را در خود حفظ می‌کنند.
 - یافتن و ذخیره‌سازی نمونه‌ها: یافتن نمونه‌هایی از سنگ اصلی و سنگ‌پوشه‌ها (خاک) و جمع‌آوری آن‌ها.
 - آماده‌سازی برای انسان: آزمودن روش تهیه اکسیژن از جو آن سیاره این تحقیق، به ارائه روند طراحی سیستمی کاوشگر آرمیتا که برای اولین مسابقات ملی ربات کاوشگر (پژوهشگاه فضایی ایران) آماده‌سازی شده بود، می‌پردازد. روند طراحی مبتنی بر استاندارد ECSS بوده و تیم آرمیتا موفق به کسب رتبه نخست در فاز اول مسابقه در سال ۱۴۰۱ گردید.
- ابتدا ماموریت و الزامات فنی معرفی شده و سپس درخت کارکرد-عملکرد سامانه برای ارضاء سند الزامات استخراج می‌شود. در ادامه بر اساس درخت کارکرد-عملکرد، درخت محصول متناظر، طراحی شده و در نهایت روند طراحی مفهومی زیر سامانه‌ها برای دستیابی به سامانه اصلی تشریح می‌گردد.

علائم و اختصارات

A_i	سطح مقطع نواحی مختلف
m_i	جرم
c_{p_i}	گرمای ویژه
C_{ij}	ضریب انتقال حرارت
F_{ij}	ضریب دید
Q_i	ورودی و خروجی ماهنورد
T_j, T_i	دما در نقاط خاص
σ	ثابت استفان بولتزمن
ϵ_j, ϵ_i	گسیل پذیری

مقدمه

سال‌هاست که ایده مسکونی شدن کرات دیگر و اعزام انسان به فضا به‌طور جدی پیگیری می‌شود. دانشمندان تلاش‌های زیادی را در راستای کشف آثار حیات در سایر کرات و انتخاب مکان مناسب برای زندگی انسان‌ها در فضا انجام داده‌اند. فناوری فضایی یکی از مهم‌ترین زمینه‌های رقابتی در بین کشورها شناخته می‌شود به گونه‌ای که میزان دستیابی به اشکال گوناگون فناوری فضایی مبنایی برای مقایسه کشورها از نظر توسعه اقتصادی و صنعتی است. بهره‌برداری از فضا با اهداف مختلفی انجام می‌شود. به دلیل پیچیدگی، هزینه گزاف، ریسک‌پذیری بالای پروژه‌های فضایی و عدم پوشش تمامی ابعاد علمی-تکنولوژیک آن توسط طراحان و متخصصان، طراحی و ساخت محصولات فضایی با توجه به کارهای پیشین صورت می‌گیرد. یکی از حوزه‌های نوین در کاوش محیط فضا و سیارات دیگر، بحث کاوشگرهای فضایی است [۱]. فعالیتهای اکتشافی-استخراجی یک ربات معمولاً در یک محیط سخت نظیر اعماق دریا، معادن، فضای خارج از جو، رادیواکتیو یا در محیطی با درجه حرارت بالا صورت می‌گیرد. به‌طور کلی هر کاوشگر دارای چندین بخش است که این بخش‌ها شامل: سازه و چیدمانی، چرخ و موبیلیتی، کنترل، هدایت و ناوبری، مخابرات، تامین و توزیع توان، کنترل حرارت و محموله است، که برای اهداف علمی و اکتشافی مناسب‌سازی می‌گردند.

در ادامه روند طراحی کاوشگرها براساس جامعه آماری و بررسی انواع پیکربندی‌های کاوشگرهای فضایی آورده شده است [۲]. یکی از اولین گام‌ها در طراحی هر سامانه، مطالعه ویژگی‌ها و مشخصات عملکردی سامانه‌های مشابه است [۳-۵]. به‌صورت کلی

ارائه مأموریت و الزامات فنی طراحی

روند طراحی مفهومی کاوشگر بر اساس دو مأموریت علمی و ناوبری و با توجه به الزامات عنوان شده به شرح زیر در نظر گرفته شده است.

مأموریت اول، جستجوی علایم وجود آب در یک منطقه به شعاع ۵۰ متر است. همچنین کاوشگر باید در کمتر از ۴۰ دقیقه بتواند علایم وجود آب را استخراج کند. کشف علایم حیات باید به صورت برخط باشد. جستجو در یک منطقه ناشناخته نیازمند استفاده از متدهای SLAM^۱ برای تولید نقشه و مکان‌یابی است.

مأموریت دوم، ناوبری اتوماتیک است. در این مأموریت ماهرورد باید بتواند به صورت اتوماتیک به مناطقی که مختصات آن‌ها به ماهرورد داده شده است با خطای حداکثر سه متر برود.

شایان ذکر است که هدف طراحی کاوشگر برای استفاده بر روی ماه می‌باشد ولی در یک گام میانی مأموریت تقلیل یافته تا امکان تست و ارزیابی بر روی سطح زمین را داشته باشد.

برخی از الزامات فنی مطابق با سند الزامات در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- الزامات فنی ماهرورد آرمیتا [۶].

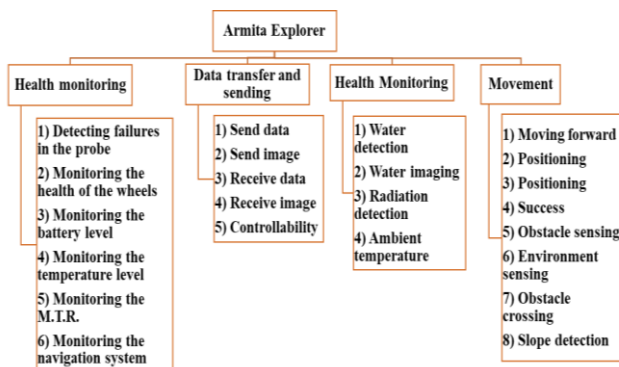
7	The rover must be able to deal with Lunar Dust, which contains abrasive particles, which is one of the challenging factors in the design of the rover.
8	The rover must perform mission changes in the worst-case temperature conditions between -150 and 150 degrees.
9	The weight of the rover must be a maximum of 10 kilograms.
10	The rover must have a processing system to be able to automatically collect data.
11	The rover must be able to produce 360-degree images of the environment.
12	After the location and mapping operations, the rover must have the ability to semi-automatically return to designated points in the environment that have been previously explored.
13	After the rover loses contact with the operator and the base, the rover must be able to continue patrolling and exploring unknown points automatically.

Table 1. Armita Rover technical requirements [6].

Row	Requirement Title
1	The rover must be autonomous. No power or data transmission is allowed by wire.
2	The rover must be able to move for a total distance of 500 meters.
3	The rover must be able to move up to 250 meters from the control station.
4	The rover must be able to move in an environment with a slope of 15 degrees.
5	The mass of the rover must be less than 10 kilograms.
6	The rover must be placed completely (with antennas) in a box measuring 60×60×60 centimeters.

ارائه درخت عملکرد و درخت محصول

براساس الزامات مشخص شده در جدول ۱، درخت کارکرد و عملکرد و سپس درخت محصول برای انجام مأموریت استخراج شده و به طور خلاصه در شکل ۲ ارائه شده است

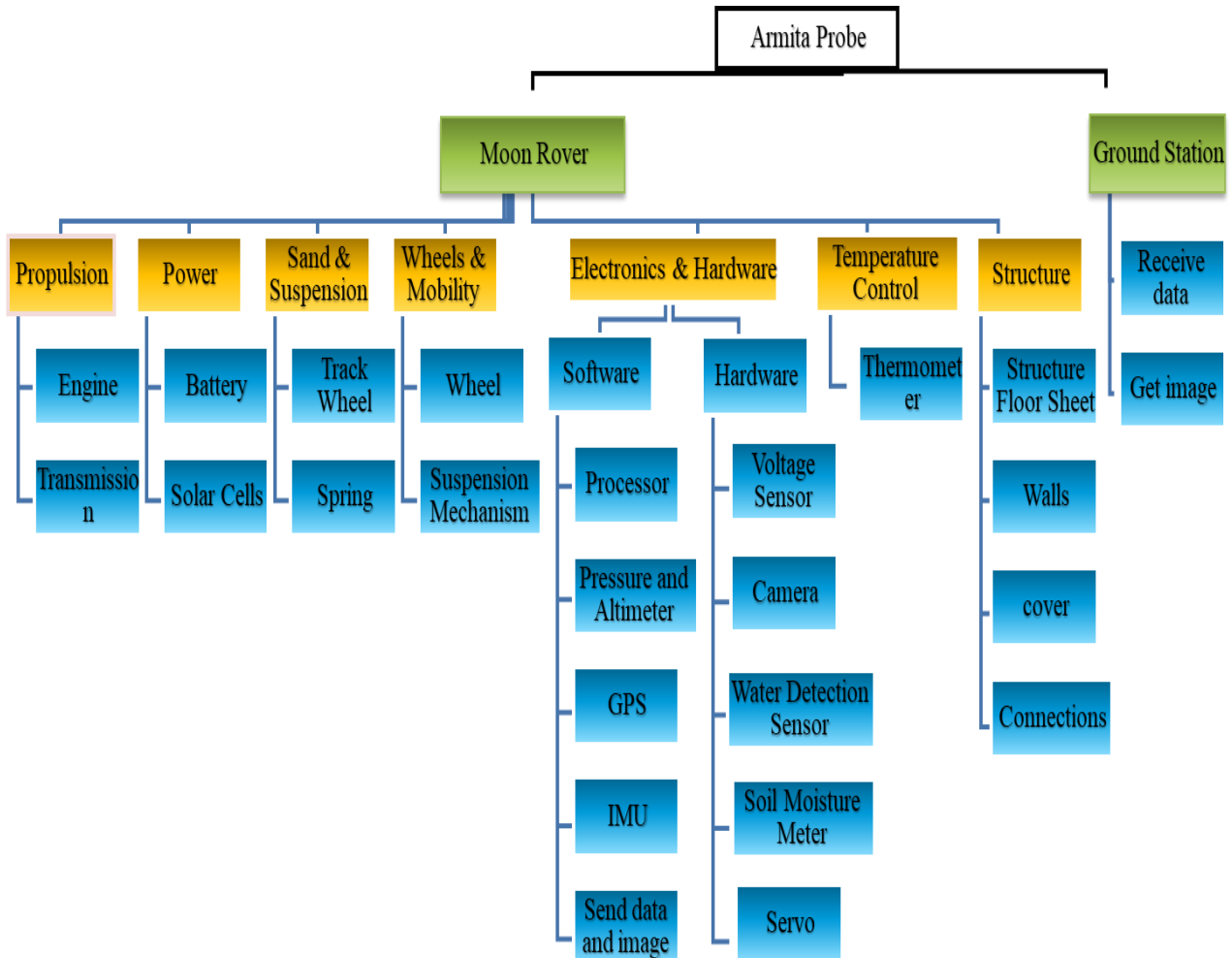


شکل ۲- درخت عملکردی-کارکردی ماهرورد آرمیتا [۶].

Fig. 2. Functional tree of Armita Rover [6].

محصول، متناظر با کارکردها و عملکردهای خواسته شده استخراج و در شکل ۳ ارائه گردیده است.

درخت محصول، سند مرجعی می‌باشد که ساختار و اجزاء محصولات پروژه را تعریف و تعیین می‌کند. این سند بیانگر تعاریف اصلی از سیستم مأموریت ماهنورد و بخش زمینی تا سطوح پایین‌تر است. درخت



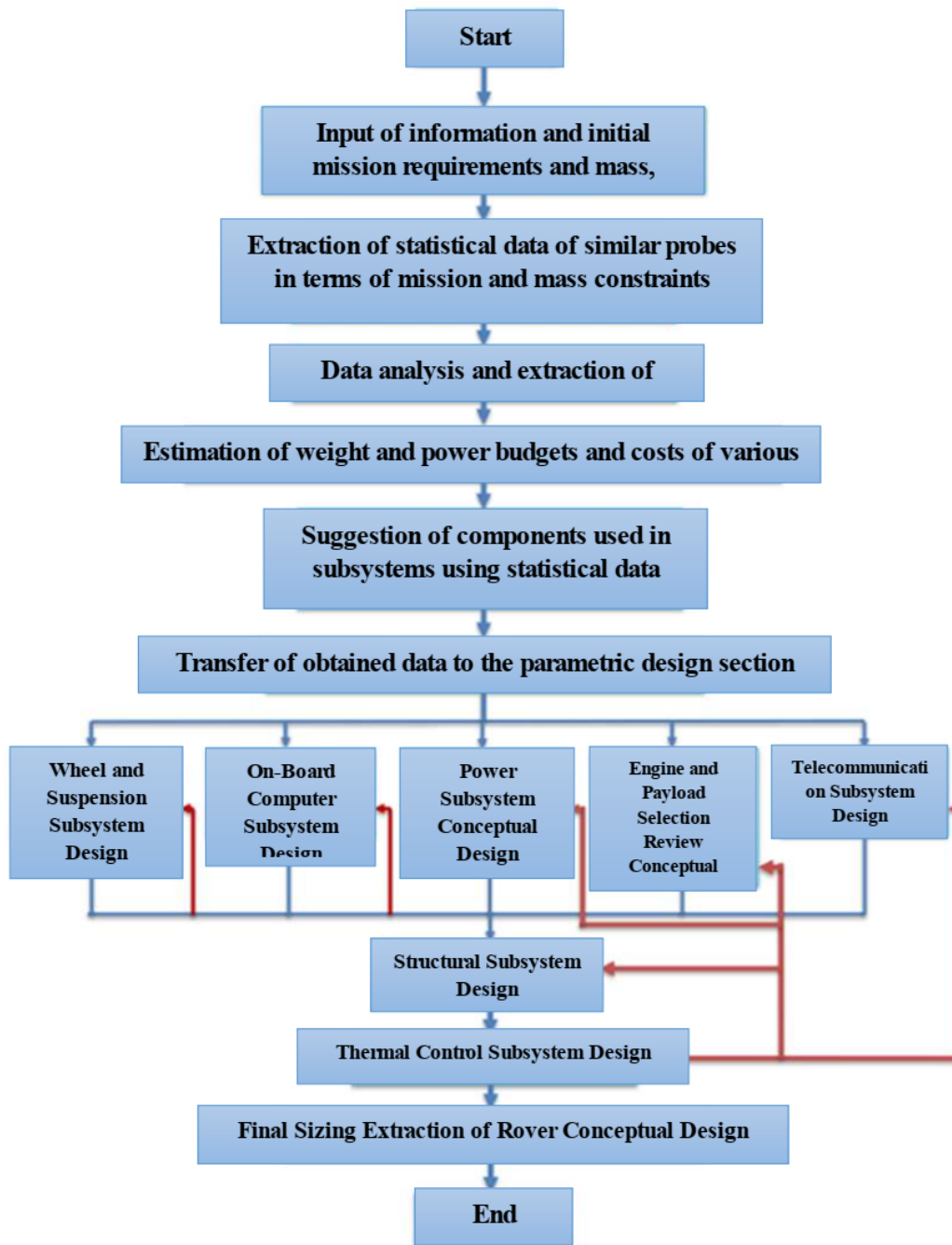
شکل ۳- درخت محصول ماهنورد آرمیتا [۶].

Fig. 3. Armita Rover product tree [6].

ارائه طراحی سامانه و طراحی زیرسامانه‌ها

الگوریتم طراحی مفهومی کاوشگر، مطابق با دیاگرام شکل ۴ تدوین و انجام پذیرفته است

پیکربندی نهایی ماهنورد حاصل مصالحه میان تعداد زیادی از معیارهای طراحی است. برای این منظور هدف زیر سامانه‌ها به‌گونه‌ای است که انجام مأموریت و ارضاء کلیه الزامات مربوط به سند الزامات فنی را تضمین نماید. در ادامه به‌طور مختصر روند طراحی مفهومی زیر سیستم‌ها کاوشگر آرمیتا (پس از نهایی سازی) ارائه شده است.



شکل ۴- بلوک دیاگرام روند طراحی ماهنورد آرمیتا [۶].

Fig. 4. Block diagram design process of Armita Rover [6].

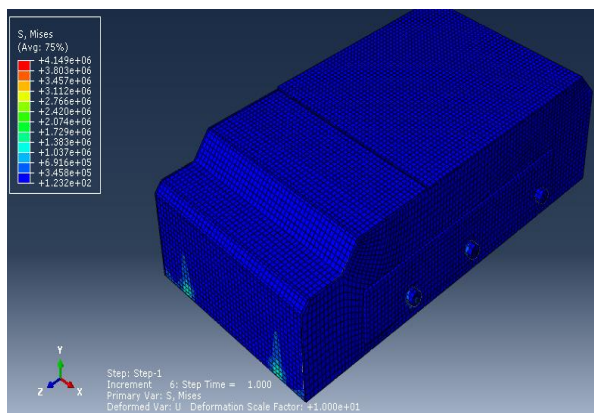
طراحی زیر سیستم سازه

سازه اصلی یا بدنه، ستون فقرات کاوشگر به‌شمار می‌رود. این سازه تمامی نیروهای برشی، ممان‌های خمشی، بارهای محوری، و بارهای پیششی را باید تحمل کند. با توجه به نیازمندی‌های سیستمی، سازه کاوشگر باید

روند طراحی تا رسیدن به مشخصات اصلی انجام و در برخی موارد تغییراتی در زیرسامانه‌ها با عملیات رفت و برگشتی انجام شده‌است. با توجه به درخت محصول نشان‌داده‌شده در شکل ۳، بخش‌های مورد نیاز در طراحی زیرسیستم‌ها در ادامه تشریح می‌گردد.

Characteristics	Al 7075-T6	Al 6063-T6	Units
Property	Value	Value	---
Thermal Expansion Coefficient	2.36E-05	2.34E-05	/k
Thermal Conductivity	130	209	W/(m.k)
Specific Heat	960	900	J/(kg.k)

در بخش دوم، نتایج حاصل از تحلیل‌های استحکامی و دینامیکی استخراج شده از نرم‌افزار آباکوس بیان شده است.



شکل ۶ - ماکزیمم تنش فون میسز وارده بر کاوشگر در تحلیل استحکامی [۷].

Fig. 6. The maximum von mises stress on the probe in strength analysis [7].

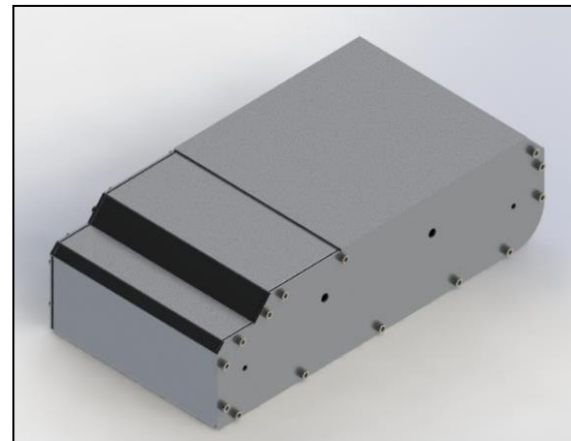
باتوجه به شکل ۶ میزان تنش وارد شده به سازه ۴ مگاپاسکال در تحلیل استاتیکی محاسبه شده است که این مقدار بسیار ناچیز است. تحلیل استحکامی شامل بارگذاری استاتیکی ناشی از نیروی وزن کاوشگر و تحلیل دینامیکی شامل آنالیز مودال است. فرکانس‌های طبیعی حاصل از تحلیل مودال در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۳ - فرکانس‌های طبیعی ماهنورد آرمیتا [۸].

Table 3. Armita rover natural frequencies [8].

Mode	Frequency
1	15.73
2	19.37
3	24.32
4	29.65
5	44.95
6	53.70

به صورت یک باکس سر بسته باشد تا زیر سامانه‌ها را از تشعشعات موجود در فضا حفظ نماید. برای سازه کاوشگر، ضرایب بار مندرج در استاندارد MIL-STD-810G برای طراحی مفهومی سازه کافی است. این ضرایب در قالب شتاب‌های محوری و جانبی و عمودی متشکل از شتاب‌های تصادفی و همچنین شوک به سازه اعمال می‌گردد. در شکل ۵ نمونه‌ای از طراحی سازه کاوشگر مشاهده می‌شود.



شکل ۵ - سازه بدنه کاوشگر [۷].

Fig. 5. Probe body structure [7].

طراحی بخش سازه شامل دو بخش کلی است. بخش اول در مورد مواردی همچون طراحی پیکربندی، شکل عمومی و جنس ماده انتخابی سازه، بحث شده است. بر اساس مطالعات آماری انجام شده، Al 6063-T6 و Al 7075-T6 به عنوان دو ماده اصلی انتخابی برای سازه بدنه کاوشگر انتخاب شده که خواص آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ - مشخصات مکانیکی آلومینیوم ۶۰۶۳ و آلومینیوم ۷۰۷۵ [۷].

Table 2- Mechanical characteristics of aluminum 6063 and aluminum 7075 [7].

Characteristics	Al 7075-T6	Al 6063-T6	Units
Property	Value	Value	---
Elastic Modulus	7.2E10	6.95E10	N/m ²
Poisson's Ratio	0.33	0.33	N/A
Shear Modulus	2.69E10	2.58E10	N/m ²
Mass Density	2810	2700	Kg/m ³
Tensile Strength	570E6	240E6	N/m ²
Compressive Strength	-	240E6	N/m ²
Yield Strength	5.05E6	215E6	N/m ²

اول می‌باشد و در معادله (۱) بیان شده است.

$$m_i c_{pi} \frac{dT_i}{dt} = Q_i - \sum_{j=1}^n C_{ij}(T_i - T_j) - \sum_{j=1}^n \epsilon_i \epsilon_j F_{ij} A_i \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (1)$$

در معادله (۱)، m_i جرم، c_{pi} گرمای ویژه، Q_i ورودی و خروجی حرارتی به ماهنورد، C_{ij} ضریب انتقال حرارت، ϵ_i و ϵ_j گسیل‌پذیری، T_i و T_j دما در نقاط خاص، F_{ij} ضریب دید، A_i سطح مقطع نواحی مختلف و σ ثابت استفان بولتزمن می‌باشند.

جدول ۴ - محدوده دمای عملیاتی سخت افزارهای مورد استفاده [۱۰].

Table 4. The operating temperature range of the used hardware [10].

Material	λ	c_p	ϵ	α
CFRP	10	795	0.80	0.80
Stainless steel	17	510	0.56	0.80
Al 7075-T6	130	960	0.06	0.25
ULTEM	0.1225	1470	0.84	0.40
Magnesium alloy	156	1050	0.07	0.39
Ag Teflon	5.02	1400	0.76	0.17
Solar panel	66	320	0.85	0.92
λ_{gel}	2.60	1150	0.79	N/A
FR4	0.22	1386	0.75	N/A

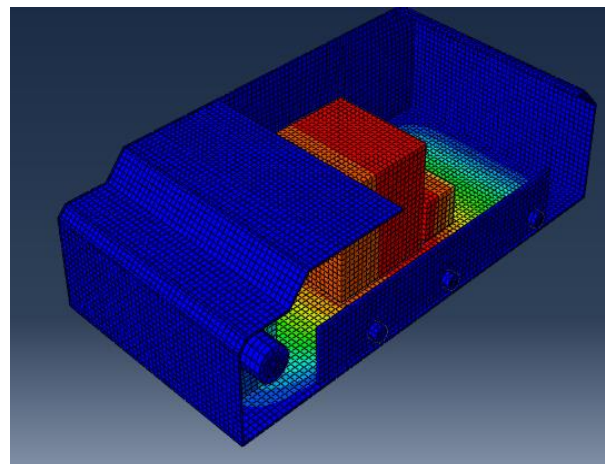
هدایت حرارتی بیشترین تأثیر را بر روی ماهنورد دارد. با توجه به این موضوع هر جزء در مکان خاصی نصب شده است تا از اشباع حرارتی جلوگیری شود.

زیرسامانه الکترونیک و سخت‌افزار

زیرسیستم الکترونیک و سخت‌افزار را می‌توان از اصلی‌ترین بخش‌های یک کاوشگر نامید که داده‌های مورد نیاز کاوشگر برای انجام موفق مأموریت تولید می‌نماید. واحد الکترونیکی کاوشگر از یک پردازنده و حسگرهایی نظیر IMU، دماسنج، فشار و ارتفاع سنسور، GPS، دوربین، برد توزیع توان، حسگر ولتاژ تشکیل شده است متناسب با الزامات مأموریتی نهایتاً، لیست قطعات الکترونیکی استفاده شده در ماهنورد آرمیتا در جدول ۵ آورده شده است. [۸]

Mode	Frequency
7	63.01
8	67.56
9	82.56
10	105.01

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی حاکی از آن است که سازه استحکام کافی در برابر بارهای استاتیکی وارده بر آن را دارد و در فازهای بعد به تحلیل استحکام سازه در برابر بارهای شبه استاتیکی و بارهای دینامیکی نظیر شوک و بارگذاری اتفاقی پرداخته خواهد شد.



شکل ۷ - شکل مود اول سازه کاوشگر آرمیتا [۷].

Fig. 7. The figure of the first mode of the Armita probe structure [7].














باتوجه به شکل مودها و فرکانس‌های استخراج شده می‌توان رفتار سازه را در هنگام مواجهه با بارهای تصادفی و شوک پیش‌بینی نمود.

زیر سیستم کنترل حرارت

اگر کاوشگر مدت زمان طولانی در سایه‌ی ماه قرار گیرد، چنان سرد می‌شود که دمای قطعاتش از محدوده مجاز پایین تر خواهد رفت و اگر در برابر خورشید قرار بگیرند، بدنه‌ی فلزی آن به شدت گرم می‌شود [۶]. بنابراین، همیشه این خطر وجود دارد که ابزارهای موجود در کاوشگر بیش از حد گرم یا چنان سرد شوند که از کار بیفتند. چون در فضا، هوا وجود ندارد، تنظیم دما به شیوه‌ی تبادل حرارتی با محیط ممکن نیست، اما به شیوه‌ی تابشی می‌توان مقدار دما را تغییر داد. به همین دلیل، کاوشگرها را با موادی پوشانده شده که عایق حرارتی باشند و پرتوهای رسیده را منعکس کنند. معادله توازن حرارتی کلی به صورت معادله دیفرانسیل مرتبه

جدول ۵ - لیست تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده [۸].

Table 5. List of electronic equipments [8].

Weight g	Power consumption W	Dimensions mm	Shape	Name	Component
10	80×10 ⁻³	53×20.8		Arduino (Blupill stm32)	Processor
4	105.6×10 ⁻⁶	14×12×0.9		BMP180	Pressure and altitude
4	150×10 ⁻⁶	5×3×0.9		SHT10	Temperature and humidity
10	180×10 ⁻³	25×25×3		-GY NEO6M V2	GPS
5	5×10 ⁻³	-		DS18B20	Thermometer
5	1.65×10 ⁻⁵	25×11×3		MAX17043	Voltage sensor
5	10.56×10 ⁻³	35×15×3		MPU9250	IMU
15	3.3×80×10 ⁻⁶	35×25×10		JPEG Camera	Camera
4	0.1	60×20×7		Water sensor YwRobot	Water detection sensor
10	0.2	71.65×24×1.6		Soil Moisture Meter AHN-72	Soil moisture sensor
52	2	77×27×30		TS582000	Image transmission
30	0.5	50×50×20		DRF7020 D27	Data transmission
13.4	2.1	22.8×12.2×28.5		MG90S (Micro Servo)	Servo
167.4	5.1761	-	-	-	Total

مطابق جدول ۵ مجموع توان مورد نیاز برای بخش الکترونیکی و ساختافزار برابر با ۵/۱۷۶۱ وات است. مطابق با سند مهندسی سیستم، ۲۰ درصد قابلیت اطمینان به این عدد باید اضافه گردد. همچنین مجموع وزن این بخش برابر با ۱۶۷/۴ گرم به دست آمده است.

باند فرکانسی سیستم ارسال تصویر ۵.۸ GHz و ابعاد آنتن ۵×۰/۵ سانتی متر با برد مخابراتی ۷۰۰ متر و اگر از آنتن‌های پولاریزه استفاده شود، برد آن تا ۲ کیلومتر نیز قابل افزایش است. باند فرکانسی سیستم تله متری ۴۳۳ MHz و ابعاد آنتن ۱۰×۱ سانتی متر با برد مخابراتی ۶ کیلومتر می‌باشد.

زیرسامانه چرخ و موبیلیتی

در بین روش‌های مختلفی که برای جابه‌جایی و حرکت وجود دارد، یکی از روش‌ها برای جابه‌جاشدن کاوشگر، چرخ است [۸-۷] هدف از این طراحی تعیین ابعاد هندسی چرخ کاوشگر آرمیتا است. با مروری بر جامعه آماری، انواع طرح و ایده‌های مورد استفاده شده بررسی و مقایسه می‌گردد. برای تعیین قطر، عرض، جنس و وزن هر چرخ، تعداد ۸ کاوشگر، که آخرین فناوری ارسالی بشر به سیاره‌ای دیگر است را به عنوان جامعه آماری هدف مشخص نموده، سپس با به دست آوردن نسبت وزن کل کاوشگر به وزن هر چرخ، بودجه بندی وزنی محاسبه خواهد شد. برای تعیین قطر و عرض چرخ، سامانه تعلیق نیز در نظر گرفته شده است. تمرکز این سامانه‌ها بر روی افزایش توانایی حرکت سامانه اعم از رد کردن موانع بلند، پله‌ها، سراسیمبی‌ها و سربالایی‌های تند و در درجه پایین‌تر کاهش ارتعاشات و ضربات ناشی از عبور از موانع است. به صورت کلی سامانه تعلیق مورد استفاده در ماهنوردهای چرخ‌دار بر روی جانمایی چرخ‌ها و نحوه اتصالات به نحوی که درجه آزادی مفیدی داشته باشند است. در شکل ۸ نمای از نحوه اتصالات چرخ‌ها در ماهنورد آرمیتا آورده شده است.



شکل ۸- زیر سیستم چرخ و تعلیق در کاوشگر آرمیتا [۱۳].

Fig. 8. Wheel and suspension system in Armita probe [13].

جدول ۷ - مشخصات موتور کاوشگر [۱۴].

Table 7. Probe engine specifications [14].

Minimum shaft diameter	Maximum shaft length	Maximum engine length	Minimum output speed	Minimum torque output
4 mm	20 mm	60.5 - 70 mm	40 rpm	5010 $g_f.cm$

زیر سیستم توان

زیر سیستم تأمین توان نقش تولید و ذخیره و توزیع توان الکتریکی را در کاوشگر دارد. یکی از روش‌های تأمین توان باطری است. باتری لیتیوم پلیمری یا باتری لیتیوم-یون پلیمری که اصولاً به Lipoly, Li-Po, Lipo و یا لیبو مخفف می‌شود، باتری انتخاب شده برای این مأموریت است. این باتری‌ها در مقایسه با انواع دیگر باتری‌های لیتیومی انرژی بالاتری را انتقال می‌دهند. در ادامه روند دقیق انتخاب باتری بررسی خواهد شد. برای انتخاب باتری لازم است ابتدا مقدار power را محاسبه شود که با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$power = \frac{(torque(N.M).speed(rpm))}{9.5488} \quad (4)$$

میزان توان مصرفی کل سامانه برابر است با 93 W که برای زمان تقریبی ۱ ساعت و با در نظر گرفتن 1.2 حاشیه اطمینان برای سامانه، مقدار توان مصرفی کل سامانه برابر با 11.6 Wh می‌شود [۱۵] جهت تعیین ظرفیت باتری که باید انتخاب گردد این مقدار توان را طبق رابطه (۵) باید به ولتاژ باتری تقسیم نمود.

$$Cappacity = \frac{P_{total}}{V_{max}} = \frac{111.6}{12} = 9.3 Ah \quad (5)$$

با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان برای ظرفیت باتری، باتری انتخاب شده باید ظرفیت 9.3 Ah و ولتاژ 12 V داشته باشد. با توجه به نوع باتری‌های لیتیومی موجود، باتری انتخاب شده باید از میان باتری‌های 3Cell انتخاب گردد.

جدول ۸ - مشخصات باتری کاوشگر [۱۵].

Table 8. Probe battery specifications [15].

N.O battery packs	Voltage V	power wh	Dimensions mm	Weight g
1	11.1	9.435	55×30×25	73

با توجه به طراحی صورت گرفته و به کمک جامعه آماری مشخصات کلی چرخ‌های ماهنورد آرمیتا در جدول ۶ خلاصه شده است.

جدول ۶ - مشخصات نهایی چرخ کاوشگر [۱۳].

Table 6. The final specifications of the probe wheel [13].

Dimension s (mm)	Weight (grams)	Shape	Subsystem	Row
$\phi=100$ W=62	2200		Wheel set (4 pcs.)	1

میزان قطر و ارتفاع تعیین شده، با جامعه آماری هدف همپوشانی خوبی دارد و قادر به ارضاء قیود و الزامات تعیین شده می‌باشد.

زیر سیستم نیرو محرکه

موتور محرک را می‌توان به‌عنوان وسیله‌ای که انرژی را به حرکت فیزیکی تبدیل می‌کند تعریف کرد. هر روباتی برای حرکت نیاز به یک عامل تولید کننده نیرو و یک عامل انتقال دهنده آن دارد همان‌طور که از اسم آن مشخص است، به این نوع محرک‌ها، موتور محرکه گفته می‌شود. اهمیت سامانه انتقال قدرت از این جهت بیشتر می‌شود که باید انتقال قدرت و توان تولیدی موتور با کمترین کاهش و هدر رفت به چرخ‌ها برسد [۱۴] بنابراین، نیروی اصطکاکی که در اثر تماس چرخ با زمین به وسیله اعمال می‌شود، به‌صورت معادله (۲) بیان می‌شود.

$$F = mg \cdot \cos\theta \cdot \mu + mg \cdot \sin\theta \quad (2)$$

که با ضرب نمودن این رابطه در شعاع چرخ، T حداقل گشتاور مورد نیاز موتورها را می‌توان به دست آورد. (رابطه شماره (۳))

$$T = F \times R_w \quad (3)$$

با احتساب حاشیه اطمینان، زمان پیدا کردن آب و حداقل سرعتی که وسیله نیاز دارد تا این مسافت ۵۰۰ متری را ظرف مدت ۴۰ دقیقه همراه با کاوش جهت شناسایی آب طی نماید، معادل ۴۰ تا ۴۵ rpm خواهد بود. این مقدار بدین معناست که موتوری که انتخاب می‌گردد، حداقل دور خروجی که لازم است داشته باشد، باید از 40 rpm بیشتر باشد. با توجه به این محاسبات مشخصات نهایی محرک‌های انتخابی در جدول ۷ مشاهده می‌شود.

جدول ۹- مشخصات سیستمی کاوشگر آرمیتا [۶].

Table 9. Armita probe system specifications [6].

Number of sensors	Number of engines	Energy consumption (Ahr)	Geometric dimensions (mm)	Total mass (kg)
8	4	112	480×387×360	6.9

همان طور که نتایج نشان می‌دهد، طراحی صورت گرفته الزامات

سیستمی نظیر جرم و حجم را ارضا می‌نماید [۱۶-۹].

جمع بندی و خلاصه

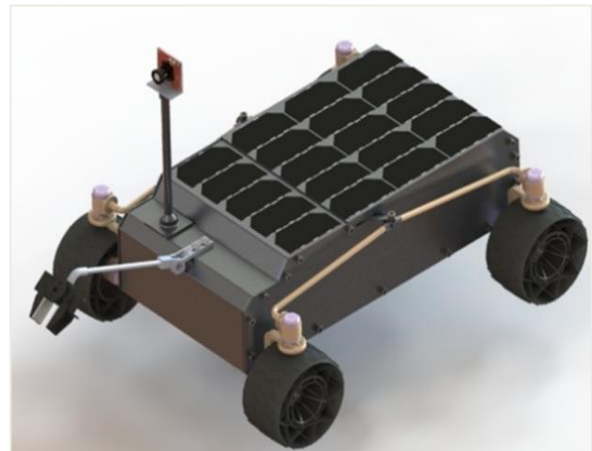
در این تحقیق به طور مختصر به بررسی ساختار کاوشگرهای ارسال شده به سایر سیاره‌ها پرداخته شده و ساختار چرخ دار (۴ عدد چرخ) به عنوان ساختار برگزیده برای ماموریت مدنظر این تحقیق انتخاب گردید. در ادامه، با پیاده‌سازی استاندارد ECSS در روند طراحی مفهومی، سند الزامات، درخت کارکرد-عملکرد، درخت محصول و نهایتاً طراحی مفهومی زیرسامانه‌ها برای دستیابی به انجام ماموریت مدنظر ارائه گردید. زیر سامانه سازه بر اساس المان پوسته و جنس Al 7075-T6 و Al 6063-T6 طراحی گردید که در تحلیل استاتیکی و دینامیکی آنالیز مودال، سازه دارای فرکانس طبیعی اول ۱۵/۷۳ می‌باشد. زیر سامانه کنترل حرارت به صورت غیر فعال و مبتنی بر هدایت رسانایی و تشعشعی طراحی گردید که نتایج تحلیل‌های حرارتی در بدترین شرایط گرم و بدترین شرایط سرد نشان دهنده تامین دمای مجاز برای کلیه قطعات است. زیرسامانه الکترونیک و سخت افزار بر اساس الزامات فنی، مبتنی بر استفاده از نمونه تجاری به صورت کامل استخراج و ارائه گردید که با لحاظ ۲۰ درصد حاشیه اطمینان طراحی توان مصرفی برابر با ۶/۲۱ وات مطالبه می‌نماید. خلاقانه ترین بخش ماهنورد یعنی زیر سامانه موبیلیتی و چرخ بر اساس الزامات فنی طراحی و با طراحی مکانیکی صورت گرفته چرخها دارای درجه آزادی نسبت به هم برای عبور از موانع خواهند بود. جرم این زیرسامانه ۲۲۰۰ گرم می‌باشد. زیرسامانه نیرو محرکه بر اساس الزامات فنی و ماموریتی (در بخش یافتن آب) نهایتاً منجر به استفاده از موتور الکتریکی با توان حداقل گشتاور ۵۰۱۰ گرم نیرو. سانی مترو سرعت چرخش حداقل ۴۰rpm گردید. حساس ترین زیرسامانه یعنی تولید و توزیع توان الکتریکی، بر اساس مطالبات مصرفی زیرسامانه‌ها و لحاظ حاشیه اطمینان قید شده، منجر به استفاده از باتری لیتیوم-یون با ولتاژ ۱۲ ولت و ظرفیت ۹/۳ آمپر ساعت برای انجام ماموریت گردید. بر اساس نتایج استخراج شده، کاوشگر آرمیتا با جرم ۶/۹ کیلوگرم و

با توجه به محاسبات ذکر شده و باتری‌های موجود، می‌توان از ۴ بسته از باتری‌های با مشخصات جدول ۸ که به صورت سری به یکدیگر وصل می‌شوند استفاده نمود.

ارائه طرح نهایی و بودجه فنی، جرمی و حجمی

تیم مهندسی سیستم طرح‌های مختلف چرخ دار و شنی را مد نظر قرار داد و در نهایت برای این ماموریت گزینه بهینه براساس ارزیابی انجام شده طرح چهار چرخ است که در ادامه بودجه‌بندی آن به طور مختصر ارائه می‌گردد.

با توجه به الزامات و طراحی صورت گرفته ابعاد و هندسه کلی این ماهنورد ۴۸۰ × ۳۸۷ × ۳۶۰ میلی‌متر است. در این طرح از چهار موتور استفاده شده که درون چرخ‌ها نصب شده و سایر زیر سامانه‌ها درون بدنه قرار گرفته‌اند. بدنه و سازه خارجی از طریق مکانیزم سیستم تعلیق به چرخ‌ها متصل می‌شود. از جمله مزایای استفاده از طرح چرخ دار می‌توان به وزن پایین و قابلیت اطمینان بالای آن اشاره کرد. استحکام پایین این طرح از جمله معایب آن به‌شمار می‌رود. در شکل ۹ نمای از بالای کاوشگر آرمیتا نشان داده شده‌است.



شکل ۹- نمای ایزومتریک کاوشگر آرمیتا [۷].

Fig. 9. Armita probe isometric view [7].

در طرح چرخ‌دار، چرخ‌های عقب و جلو هر طرف به کمک میله‌هایی که تحت زاویه خاصی قرار گرفته‌اند به یکدیگر متصل می‌شوند همچنین مجموعه چرخ‌های سمت چپ و راست ماهنورد با استفاده از مکانیزمی که درون بدنه قرار گرفته است به یکدیگر متصل شده‌اند. این مکانیزم یک درجه آزادی چرخشی دارد که تعادل ماهنورد در هنگام عبور از موانع حفظ می‌شود. مشخصات جرمی و حجمی این کاوشگر در جدول ۹ خلاصه شده است.

- [7] A. H. Adami *et al.*, "Conceptual design report of our structure and layout subsystem," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, 1401.
- [8] A. H. Adami *et al.*, "Conceptual design report of electronic and hardware sub-system," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran 1401.
- [9] S. Barraclough, K. Huston, and E. Allouis, "Thermal design for moon-next polar rover," SAE., Technical Paper 2009-01-2461, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-2461>.
- [10] A. H. Adami *et al.*, "Conceptual design report of temperature control subsystem," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran 1401.
- [11] D. Cardile, N. Viola, S. Chiesa, and A. Rougier, "Applied design methodology for lunar rover elastic wheel," *Acta Astronautica*, vol. 81, no. 1, pp. 1-11, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.06.002>.
- [12] B. Bhattarai, C. Datta, K. M. Shrilakshmi, A. S. Deeptha, and K. Nair, "Design and analysis of lunar rover wheels using finite element modelling," *ECS Transactions*, vol. 107, no. 1, 2022, Art. no. 3769, <https://doi.org/10.1149/10701.3769ecst>.
- [13] A. H. Adami *et al.*, "Conceptual design report of wheel and mobility subsystem," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, 1401.
- [14] A. H. Adami *et al.*, "Conceptual design report of gearbox engine subsystem," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, 1401.
- [15] A. H. Adami *et al.*, "Conceptual design of electric power supply and distribution subsystem," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, 1401.
- [16] A. H. Adami *et al.*, "Statistical community report," Armita team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, 1401.

ابعاد هندسی $۳۶ \times ۳۸ \times ۴۸$ سانتی‌متر با انرژی مصرفی کل ۱۱۲ آمپر ساعت امکان انجام ماموریت را خواهد داشت و کلیه الزامات فنی، ابعادی و جرمی را به خوبی ارضاء می‌نماید.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- [1] P. Berkelman *et al.*, "Design of a Day/Night Lunar Rover," The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213, Technical Report CMU-RI-TR-95-24, 1995.
- [2] A. Vasiliev, I. Dalyaev, and E. Slyuta, "Design concept of lunar rover for the moon geological exploration," in *28th DAAAM International Symposium On Intelligent Manufacturing And Automation Annals*, Zadar, Croatia, 2017, <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.110>.
- [3] G. Kumar, "Moon Rover design." in *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Buenos Aires, Argentina, 2016.
- [4] A. Della Torre, *et al.*, "Amalia mission lunar rover—the conceptual design of the team italia rover, candidate for the google lunar X prize challenge," *Acta Astronautica*, vol. 67, no. 7-8, pp. 961-978, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.05.023>.
- [5] N. Britton, K. Yoshida, J. Walker, K. Nagatani, G. Taylor, and L. Dauphin, "Lunar micro rover design for exploration through virtual reality teleoperation," in *Field and Service Robotics Springer Tracts in Advanced Robotics*, L. Mejias, P. Corke, and J. Roberts, Eds. vol. 105, Springer, Cham, 2015, https://doi.org/10.1007/978-3-319-07488-7_18
- [6] A.H. Adami *et al.*, "Design of engineering document," Armita Team of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, 1401.

فهرست

- طراحی، ساخت و تست یک واحد رابط راه دور با تاب‌آوری بالا برای کاربردهای فضایی: رویکردی مبتنی بر قطعات تجاری ۱
رضا امیدی و اعظم عیدی
- طراحی دیپلکسر باند S برای زیرسیستم تله‌متری و تله‌کامند ماهواره‌های LEO ۱۴
بهزاد احمدی، راضیه نریمانی، و الهام حسینی
- آنتن پوشیدنی فشرده دوبانده جهت کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش ۲۸
فرزاد مهاجری و مریم دارابی
- توسعه فناوری یک سوییچ موج‌بری توان بالای کم‌هزینه برای کاربرد در ترانسپوندر باند Ku ماهواره‌های مخابراتی ۴۰
الهام شریفی‌مقدم، محسن شفقتی، و بهزاد احمدی
- تأثیر بی‌وزنی شبیه‌سازی شده بر روی موش‌های مبتلا به سرطان پستان ۴۹
مرتضی عالمی، فیروز صمدی، علیرضا مجیدانصاری، و زهرا حاج‌ابراهیمی
- تأثیر کاهش فشار اتمسفری بر رشد و پاسخ دفاع آنتی‌اکسیدانی جلبک دونالایلا سالینا ۵۶
حلیمه حسن‌پور
- ارائه روند طراحی مفهومی ماه‌نورد آرمیتا مطابق با استاندارد ECSS ۶۵
امیرحسین آدمی، زهرا پورجباری، محمد اژدری، سیدعلی سعادتدار، حانیه اسحاق‌نیا، کاظم قلی‌پور، سیدمحمد میرمحمدی، و علیرضا آهنگرانی
فراهانی

JSST

فصلنامه علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضای

فصلنامه علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضای

سال ۱۴۰۳، دوره ۱۷، شماره ۴

نمایه‌نامه‌ها:

DOAJ, ISC, EBSCO, ...

صاحب امتیاز: IAS

مدیر مسئول: دکتر محمد نوابی

سر دبیر: دکتر رضا ابراهیمی

جانشین سردبیر: دکتر میلاد عظیمی

کارشناس اجرایی: هاجر دسترنجی نژادفر

ویرایش و صفحه‌آرایی: اکرم ورمزیار

مینا عبداللهی

نشانی دبیرخانه: تهران، بلوار دریا، خیابان مهندس، شماره ۱

تلفن: ۰۲۱ ۸۸۳۶۶۰۳۰

نشانی اینترنتی: <https://jsstpub.com>

پست الکترونیکی: jsst@jsstpub.com

پست الکترونیکی بین‌المللی: info1@jsstpub.com

دبیرخانه فصلنامه در ویرایش ادبی مطالب آزاد است.

شاپای چاپی: ۴۵۶۰-۲۰۰۸ شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۴۲۳

هیئت تحریریه بین‌المللی

دکتر نیکولا لوئیجی برگزی، استاد، دانشگاه پارما، ایتالیا

دکتر هاجر بینتی جعفر، دانشیار، دانشکده مهندسی الکترونیک، دانشگاه تکنولوژی مارا، مالزی

دکتر حلمی ذولهیدی محمد شافری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پوترا مالزی، مالزی

دکتر سمیر لادچی، استاد، دانشکده مهندسی اتوماتیک و کنترل، دانشگاه ملی پلی‌تکنیک الجزیره، الجزایر

دکتر آندون دیمیتروف لازروف، استاد، گروه فناوری اطلاعات، آکادمی نیروی دریایی نیکولا واپتساروف، بلغارستان

دکتر سیدعامر محمود، استاد، دانشکده علوم فضایی، دانشگاه پنجاب، پاکستان

دکتر محمود نجفی، استاد، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه کنت آمریکا، آمریکا

دکتر محمد هیمدی، استاد، مؤسسه الکترونیک و فناوری‌های دیجیتال، دانشگاه رنس ۱ فرانسه، فرانسه

هیئت تحریریه

دکتر حسین بلندی، استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

دکتر محسن بهرامی، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

دکتر سیدحسین پور تاکدوست، استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ایران

دکتر سیدمصطفی حسینعلی پور، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

دکتر جعفر روشنی‌یان، استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

دکتر محمدهمایون صدر، استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

دکتر محمد طیبی رهنی، استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ایران

دکتر محمدطاهای ابدی، دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، ایران

دکتر محمد فرشچی، استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ایران

دکتر منصور کبگانیان، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران

دکتر مهران میرشمس، دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

دکتر محمد نوابی، دانشیار، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

مشاوران هیئت تحریریه

مهندس محمدحسن انتظاری، مربی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

دکتر سعید شاخصی، دانشیار، پژوهشگاه فضایی ایران

دکتر سیدمصطفی صفوی همای، استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر حمید فاضلی، دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

علی اکبر گلرو، مربی، پژوهشگاه هوافضا

دکتر ابوالقاسم نقاش، دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

علوم و فناوری فضایی

سال ۱۴۰۳، دوره ۱۷، شماره ۴

شاپای چاپی: ۲۰۰۸-۴۵۶۰
شاپای الکترونیکی: ۲۴۲۳-۴۵۱۶

- ۱ طراحی، ساخت و تست یک واحد رابط راه دور با تاب‌آوری بالا برای کاربردهای فضایی: رویکردی مبتنی بر قطعات تجاری
رضا امیدی و اعظم عیدی
- ۱۴ طراحی دیپلکسر باند S برای زیرسیستم تله‌متری و تله‌کامند ماهواره‌های LEO
بهزاد احمدی، راضیه نریمانی، و الهام حسینی
- ۲۸ آنتن پوشیدنی فشرده دوبانده جهت کاربردهای شبکه‌های بی‌سیم تن‌پوش
فرزاد مهاجری و مریم دارابی
- ۴۰ توسعه فناوری یک سویچ موج‌بری توان بالای کم هزینه برای کاربرد در ترانسپوندر باند Ku ماهواره‌های مخابراتی
الهام شریفی مقدم، محسن شفقتی، و بهزاد احمدی
- ۴۹ تأثیر بی‌وزنی شبیه‌سازی شده بر روی موش‌های مبتلا به سرطان پستان
مرتضی عالمی، فیروز صمدی، علیرضا مجیدانصاری، و زهرا حاج‌ابراهیمی
- ۵۶ تأثیر کاهش فشار اتمسفری بر رشد و پاسخ دفاع آنتی‌اکسیدانی جلبک دونا لیبلا سالیئا
حلیمه حسن پور
- ۶۵ ارائه روند طراحی مفهومی ماه‌نورد آرمیتا مطابق با استاندارد ESCC
امیرحسین آدمی، زهرا پورجباری، محمد اژدری، سیدعلی سعادتدار، حاتبه اسحاق‌نیا، کاظم قلی‌پور، سیدمحمد میرمحمدی، و علیرضا آهنگرانی فراهانی