



### Article Info

Received: 2021-02-15  
Accepted: 2021-09-05

### Keywords

Scheduling, Real-time systems, Energy harvesting, Battery

### How to Cite this article

Mahmoud Hasanloo, Mahdi Kargahi and Shahrokh Jalilian, "Lifetime Improvement Using Task Scheduling in Hard Real-Time", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 1 (1), p.: 13-24, 2021.

# Lifetime Improvement Using Task Scheduling in Hard Real-Time Systems Equipped with Environmental Energy Harvester and Hybrid Energy Storage

Mahmoud Hasanloo<sup>1</sup>, Mahdi Kargahi<sup>2</sup> and Shahrokh Jalilian<sup>\*,3</sup>

1. Freelancer Researcher, m.hasanloo@ut.ac.ir

2. School of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, kargahi@ut.ac.ir

3. shjalilian@gmail.com

\*Corresponding author

## Abstract

In this paper, we investigate the effect of task scheduling on the lifetime of a real-time hard drive system that uses a composite energy tank consisting of a battery, a super capacitor, and a solar energy picker to power supply itself. The lifetime of a system in this document is the moment the system starts until the moment its tasks are disrupted due to lack of energy. Due to the nonlinear properties of batteries and super capacitors which cause their internal charge to be divided into available (IAC) and inaccessible (IUC); the lifetime of such a system depends entirely on the charging and discharging pattern of the energy tank. Ultimately, it leads to the amount of charge stored in the IUC section and the amount of charge extracted from this section. Therefore, we can influence the lifetime of the system and increase it by managing the charge/ discharge pattern of energy tanks. Since the pattern of energy delivery from the environment is beyond the control of the system, the main idea of this paper is to influence the charge/ discharge pattern of the tank by adjusting the pattern of energy consumption to improve the lifetime of the system. In this regard, we have presented two scheduling algorithms MCF and MGF, which are respectively trying to perform the most consumed and least consumed task in the system, then using the MCG policy, which at any time, Decisions are made on the use of one of these algorithms according to the conditions. Experimental results show that we can increase system lifetime between 5% and 16%. Considering that in recent years the issue of using super capacitors along with batteries and solar cells in space systems has been raised, so the results of this research can be investigated for use in satellites.

## بهبود طول عمر در سیستم‌های بی‌درنگ سخت مجهز به برداشت‌گر انرژی محیطی و مخزن مرکب انرژی با استفاده از زمان‌بندی وظایف

محمود حسنلو<sup>۱</sup>، مهدی کارگهی<sup>۲</sup>، شاهرخ جلیلیان\*

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، m.hasanloo@ut.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، kargahi@ut.ac.ir

\* sh.jalilian@isrc.ac.ir (نویسنده مسئول)

### چکیده

این مقاله به بررسی تاثیر زمان‌بندی وظایف بر روی طول عمر یک سیستم بی‌درنگ سخت که از مخزن انرژی مرکب متشکل از باتری و ابرخازن و برداشت‌گر انرژی خورشیدی برای تامین انرژی خود استفاده می‌کند، می‌پردازد. منظور از طول عمر سیستم در این مستند، لحظه شروع به کار سیستم تا لحظه مختل شدن وظایف آن به دلیل نبود انرژی است. با توجه به خواص غیرخطی باتری و ابرخازن که موجب می‌شود شارژ داخلی آن‌ها در دو بخش در دسترس (IAC) و غیرقابل دسترس (IUC) تقسیم شود، طول عمر چنین سیستمی کاملاً به الگوی شارژ و دشارژ مخزن انرژی وابسته است زیرا این الگو در نهایت منجر به میزان شارژ ذخیره شده در بخش IUC و میزان شارژ استخراج شده از این بخش می‌شود. بنابراین، با مدیریت الگوی شارژ/دشارژ مخازن انرژی می‌توان روی طول عمر سیستم و افزایش آن تاثیرگذار بود. از آنجایی که الگوی رسیدن انرژی از محیط خارج از کنترل سیستم است، ایده اصلی این مقاله تاثیرگذاری بر روی الگوی شارژ/دشارژ مخزن از طریق تنظیم الگوی مصرف انرژی است تا در نهایت طول عمر سیستم بهبود یابد. در این راستا، ابتدا دو الگوریتم زمان‌بندی MCF و MGF که الگوی زمان‌بندی در اجرای پرمصرف‌ترین و کم مصرف‌ترین وظیفه حاضر در سیستم هستند، ارائه می‌شوند. سپس الگوریتم MCG مورد بررسی قرار می‌گیرد که طبق آن الگوریتم، در هر برهه از زمان با توجه به شرایط موجود، در مورد استفاده از یکی از الگوریتم‌های مذکور تصمیم‌گیری می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این الگوریتم بین ۵٪ تا ۱۶٪ طول عمر سیستم را افزایش می‌دهد. با توجه به این که در سال‌های اخیر موضوع استفاده از ابرخازن در کنار باتری و سلول‌های خورشیدی در سامانه‌های فضایی مطرح شده است، از این‌رو، نتایج این تحقیق می‌تواند برای استفاده در ماهواره‌ها نیز بررسی شود.

واژه‌های کلیدی

نحوه استناد به این مقاله

## ۱- مقدمه

IAC به IUC شارش می‌کند و برعکس. این شارش تا آنجا ادامه خواهد داشت که اختلاف ولتاژ بین آن دو به صفر برسد.

در یک مخزن مرکب ظرفیت و شارژ بخش IAC به ترتیب برابر با مجموع ظرفیت‌ها و شارژهای موجود در IACهای باتری و ابرخازن است. برای بخش IUC نیز فرمول متنظری صحت دارد. حال وقتی که در یک کاربرد از یک مخزن مرکب استفاده می‌شود، با توجه به خواص مختلف این دو مخزن انرژی عواملی مانند الگوی شارژ/دشارژ و الگوریتم تقسیم توان اعمالی بر مخزن بین باتری و ابرخازن بر روی میزان شارژ موجود در هر بخش از مخزن مرکب تاثیر خواهد داشت [۴]. در این مقاله فرض شده است که مدیریت مخزن مرکب با استفاده از الگوریتم ارائه شده در [۵] انجام می‌شود و ما بر روی تنظیم الگوی شارژ/دشارژ که خود حاصل زمان‌بندی وظایف است تمرکز می‌کنیم.

توان اعمال شده به سیستم در این مقاله حاصل جمع جبری توان برداشت شده از محیط (با علامت مثبت) و توان مورد نیاز اجرای وظیفه بی‌درنگ (با علامت منفی) تعریف می‌شود. از آنجایی که الگوی برداشت انرژی (شامل میزان و زمان برداشت انرژی) از محیط خارج از کنترل سیستم است، زمان‌بندی وظایفی که میزان توان مصرفی آن‌ها متفاوت است، به طور مستقیم روی الگوی توان اعمال شده بر مخزن تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، اگر وظایف به شکل توان مصرفی کم به زیاد زمان‌بندی شوند، موجب می‌شود توان اعمالی به مخزن در نهایت نسبت به حالتی که وظایف بر حسب توان از زیاد به کم زمان‌بندی می‌شوند، الگوی توان زیاد به کم پیدا کند. به عبارت دیگر، در مقایسه لحظه به لحظه الگوهای حاصل از دو نوع زمان‌بندی وظایف، الگوی اولی در لحظات ابتدایی الگو توان بیشتر (با توجه به علامت جبری) و در لحظات انتهایی توان کمتری به مخزن اعمال نماید. این تفاوت الگوها باعث می‌شود میزان شارژ موجود در دو بخش IAC و IUC مخازن در دو حالت متفاوت شود که آن نیز به نوبه خود موجب متفاوت شدن میزان شارش شارژ بین دو بخش می‌شود. این اختلافات در نهایت روی میزان برداشت انرژی از مخزن در طول عمر سیستم تاثیرگذار است که موجب اختلاف عمر دو سیستم می‌شود. یادآوری می‌شود که در این مقاله طول عمر یک سیستم بی‌درنگ سخت از لحظه شروع به عملیات سیستم تا لحظه اولین از دست رفتن موعده یک وظیفه سخت تعریف می‌شود.

امروزه با ظهور فناوری‌های نوینی مثل اینترنت اشیا [۱] تعداد دستگاه‌های ریز و درشتی که قرار است به اینترنت متصل باشند به میلیاردها دستگاه می‌رسد [۲]. یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود برای این دستگاه‌ها، تامین انرژی به صورت خودمختار است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از برداشت‌گر انرژی محیطی می‌تواند راه‌حل موثری در این زمینه باشد. بسیاری از این دستگاه‌ها در کنار برداشت‌گر انرژی از یک مخزن انرژی (باتری، ابرخازن و ...) نیز برای ذخیره‌سازی انرژی مازاد برداشت شده به منظور استفاده در مواقعی که انرژی محیطی در دسترس نیست استفاده می‌کنند.

معیارهای متعددی برای انتخاب مخزن انرژی وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، میزان توان قابل تحمل، تعداد سیکل‌های شارژ/دشارژ، نرخ نشتی انرژی، هزینه و ... اشاره نمود. متأسفانه هیچ مخزن ایده‌آلی که بتواند تمامی معیارها را در حد خوبی محقق نماید وجود ندارد. به عنوان مثال، باتری لیتیوم-یونی از ظرفیت ذخیره‌سازی بالای انرژی، نرخ نشتی پایین و هزینه کم برخوردار است در حالی که ابرخازن در معیارهایی مانند توان‌دهی بالاتر و تعداد سیکل‌های شارژ/دشارژ بیشتر از باتری پیشی می‌گیرد. به همین دلیل، در بسیاری از کاربردها از مخزن ترکیبی که شامل باتری لیتیومی و ابرخازن است استفاده می‌شود.

مدیریت شارژ به معنای تقسیم توان شارژ/دشارژ اعمالی به مخزن بین باتری و ابرخازن به خاطر خاصیت‌های غیرخطی متفاوت آن‌ها، در مخازن ترکیبی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو است. برای توصیف این خاصیت‌ها باید خاطر نشان سازیم که به طور کلی ظرفیت یک مخزن انرژی را می‌توان به دو بخش شارژ در دسترس ( $IAC^1$ ) و شارژ دور از دسترس ( $IUC^2$ ) تقسیم نمود [۳]. بخش IAC مستقیم به پایانه‌های مخزن وصل بوده و در صورت مثبت بودن توان اعمالی آن را به صورت شارژ در خود ذخیره می‌کند و در صورت منفی بودن توان اعمالی از شارژ موجود در این بخش برای تامین انرژی مورد نیاز سیستم استفاده می‌شود. در حالی که میزان شارژ موجود در بخش IUC به میزان شارژ موجود در IAC و اختلاف ولتاژ بین این دو بخش وابسته است. اگر ولتاژ بخش IAC بیشتر باشد، شارژ در جهت

بعداً موزر [۷] الگوریتم زمان‌بندی  $LSA^1$  را برای تمام حالات مجموعه وظایف ارائه نمود. می‌توان گفت که این الگوریتم نسخه تغییر یافته‌ای از الگوریتم معروف EDF<sup>۲</sup> است که سعی می‌کند اجرای وظایف را تا جای ممکن دیر شروع کند تا به اندازه کافی انرژی محیطی برای اجرا جذب شده باشد.

در [۸]، الگوریتمی به نام  $EDeg^3$  ارائه شده که کارها را بر اساس الگوریتم EDF تا زمانی که با مشکل کمبود انرژی مواجه نشده‌اند، اجرا می‌کند. آنگاه اجرای کارها تا زمانی که محدودیت‌های زمانی اجازه می‌دهد و مخزن انرژی پر نشده است، متوقف می‌شود. با وجود اینکه الگوریتم  $EDeg$  بهینه است ولی از سربار محاسبات زیاد رنج می‌برد.

الگوریتم زمان‌بندی پویای دیگری به نام  $ED-H^4$  در [۹] ارائه شده است که آن هم از مفهوم لختی انرژی استفاده می‌کند. در این الگوریتم نیز بالاترین اولویت به وظیفه‌ای اختصاص داده می‌شود که زودترین موعد اجرا را دارد ولی اجرای آن تا زمان جذب انرژی کافی به تعویق می‌افتد. این الگوریتم برای سیستمی که همه وظایف آن از نوع مصرفی هستند (نرخ مصرف انرژی کار بیشتر از نرخ برداشت انرژی است)، بهینه است.

کارهای زیادی در حوزه زمان‌بندی پویا انجام شده و همان‌طور که توضیح داده شد، بسیاری از آن‌ها هم مبتنی بر EDF هستند. اما در حوزه زمان‌بندی ایستا نیز کارهایی انجام شده که مهم‌ترین آن‌ها الگوریتم زمان‌بندی  $PPF-ASAP^5$  [۹] است. این الگوریتم زمان‌بندی، در صورت وجود انرژی کافی بر اساس اولویت از پیش تعریف شده به اجرای وظایف می‌پردازد. اگر انرژی کافی برای اجرای با اولویت‌ترین وظیفه وجود نداشته باشد، آنگاه اجرا تا جذب انرژی کافی برای اجرای یک واحد از آن وظیفه متوقف می‌شود.

برخی از وظایف نرخ برداشت انرژی را در طول عمر سیستم ثابت فرض می‌کنند که موجب سادگی محاسبات و غیر واقعی شدن سیستم می‌شود و برخی دیگر نیز حالت عمومی برای نرخ برداشت انرژی فرض می‌کنند که موجب واقعی شدن سیستم می‌شود ولی سربار محاسباتی بسیار زیادی به سیستم تحمیل می‌کنند. در این کار، ما حالت بینابینی را فرض می‌کنیم به این شکل که فرض بر این است که به طور کلی نرخ برداشت انرژی متغیر است اما در داخل یک ابردوره نرخ برداشت انرژی ثابت

- تعریف تابع هزینه برای سنجش میزان شارژ ذخیره و برداشت شده در سیستم،
- پیشنهاد یک الگوریتم زمان‌بندی بهینه برای اجرای وظایف بی‌درنگ سخت بر اساس توان مصرفی آن‌ها از توان کم به زیاد با توجه به محدودیت‌های زمانی،
- پیشنهاد یک الگوریتم زمان‌بندی بهینه برای اجرای وظایف بی‌درنگ سخت بر اساس توان مصرفی آن‌ها از توان زیاد به کم با توجه به محدودیت‌های زمانی،
- پیاده‌سازی الگوریتم‌های فوق و مقایسه آنها در شرایط برداشت انرژی واقعی،
- پیشنهاد کاربرد الگوریتم در یک پیکربندی باتری-ابرخازن در ماهواره‌هایی که پیک مصرف توان بالایی دارند.

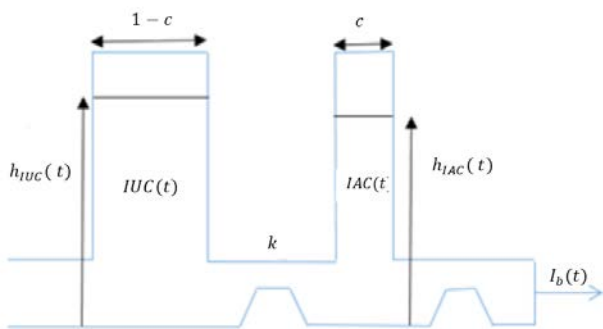
در ادامه این مقاله، ابتدا پیشینه تحقیق بررسی، سپس مدل سیستم شامل مدل وظایف، مدل باتری و مدل ابرخازن معرفی می‌شود. در ادامه، به تشریح جزئیات الگوریتم‌های زمان‌بندی فوق پرداخته شده و نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

یکی از نخستین کارهایی که به موضوع زمان‌بندی وظایف بی‌درنگ در سیستم‌های مجهز به برداشت‌گر انرژی پرداخته است در [۶] آمده است. نویسندگان این مقاله وظایف دوره‌ای که همگی آن‌ها دارای دوره یکسانی هستند را بررسی کرده و زمان‌بندی بهینه ارائه نموده‌اند. این‌گونه وظایف در زیرساخت‌های ارتباطی و کاربردهای عکس‌برداری بی‌درنگ یافت می‌شوند. مهم‌ترین نقاط ضعف این کار را می‌توان به شرح زیر نام برد: (۱) همه وظایف باید دوره یکسانی داشته باشند؛ (۲) همه وظایف باید هم فاز بوده و در زمان صفر وارد سیستم شده باشند؛ و (۳) موعد همه وظایف باید برابر با دوره آن‌ها باشد.

4 Earliest Deadline-Harvesting  
5 As Soon As Possible Preemptive Fixed Priority

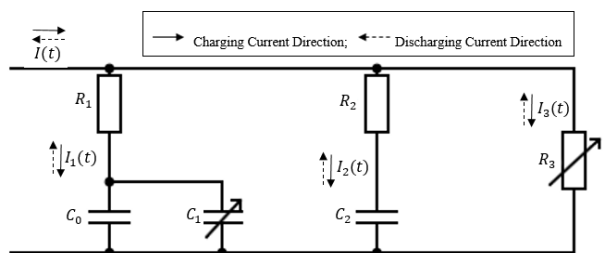
1 Lazy Scheduling Algorithm  
2 Earliest deadline first  
3 Earliest Deadline with energy guarantee



شکل ۱. مدل باتری KiBaM

### مدل ابرخازن

برای ابرخازن از مدل VLR معرفی شده در [12] استفاده می‌کنیم که در شکل ۲ نشان داده شده است. در اینجا هم ظرفیت ابرخازن به دو شاخه اصلی تقسیم می‌شود که شاخه اول مستقیم به ترمینال ابرخازن وصل است و در صورت اعمال توان به ترمینال می‌تواند شارژ شود یا شارژ مورد نیاز سیستم را تامین نماید. شاخه دوم نیز به شاخه اول وصل است و به دلیل وجود اختلاف پتانسیل بین آن، شارژ موجود در آن‌ها از شاخه‌ای با پتانسیل بیشتر به سمت شاخه دیگر شارژ خواهد نمود. سوم در این شکل نمایش دهنده نشتی ابرخازن است که آن نیز مستقیم به شاخه اول وصل است. بدین معنا که هر چه شارژ موجود در شاخه اول بیشتر باشد، میزان نشتی نیز بیشتر خواهد بود و برعکس.



شکل ۲. مدل VLR ابرخازن

### مدل برداشت‌گر انرژی

سیستم مدنظر به یک برداشت‌گر انرژی محیطی مثل پنل خورشیدی مجهز است که می‌تواند انرژی محیطی را جذب نموده و به شکل انرژی الکتریکی به سیستم تحویل دهد. انرژی محیطی در هر لحظه مانند  $t$  با نرخ  $r(t)$  جذب می‌شود. فرض می‌کنیم

می‌ماند. در بسیاری از کارها مخزن انرژی را ایده‌آل در نظر می‌گیرند در حالی که در این مقاله از مدل واقعی برای مخازن انرژی از نوع باتری و ابرخازن استفاده می‌شود.

### ۳- مدل سیستم و بیان مساله

در سیستم مورد نظر زمان به صورت گسسته در بازه‌هایی به طول  $T$  در نظر گرفته شده است که  $k$  امین بازه از لحظه  $k * T$  شروع شده و در لحظه  $(k+1) * T$  تمام می‌شود. همچنین این سیستم از بخش‌های مختلفی مثل برداشت‌گر انرژی، مخزن انرژی و مجموعه وظایف بی‌درنگ تشکیل شده است که در هر کدام از آن‌ها در زیربخش‌های جداگانه‌ای در ادامه معرفی می‌شوند.

### مدل مخزن انرژی

مخزن مورد استفاده در این سیستم یک مخزن مرکب از مخزن باتری لیتیوم-یون و ابرخازن است. در ادامه هر کدام از این مخازن به طور جداگانه معرفی می‌شوند.

### مدل باتری

در این مقاله از مدل باتری معرفی شده در [۱۱] استفاده می‌شود که ترکیبی از مدل مدار الکترونیکی (برای پیش‌بینی خواص مدارات پویا) و مدل تحلیلی KiBaM (برای در نظر گرفتن خواص غیرخطی باتری) است [۳]. مدل KiBaM ظرفیت باتری را به دو بخش IAC و IUC تقسیم می‌کند. مطابق شکل ۱ بخش IAC مستقیم به ترمینال باتری متصل است و بسته به توان اعمال شده به ترمینال باتری، یا شارژ می‌شود یا انرژی مورد نیاز سیستم را تامین می‌کند. در حالی که بخش IUC به بخش IAC متصل است و شارژ موجود در آن به دلیل اختلاف پتانسیل دو بخش که موجب شارژ بار بین آن دو می‌شود تغییر می‌کند.

بدترین زمان پاسخ  $R_i$  برای وظیفه  $\tau_i$  تحت الگوریتم زمان بندی  $\mathcal{A}$  به شکل طولانی ترین زمان از لحظه ورود یک وظیفه به سیستم تا تکمیل انجام آن تعریف می شود. گفته می شود که وظیفه  $\tau_i$  موعد خود را می بیند اگر و فقط اگر  $R_i \leq p_i$ . مساله  $\mathbb{P} = (\Gamma, \beta)$  زمان بندی پذیر گفته می شود اگر الگوریتم  $\mathcal{A}$  یک زمان بندی تولید کند به طوری که تمام وظایف موعد خود را ببیند و میزان شارژ مخزن انرژی بین  $0\%$  تا  $100\%$  باشد.

با توجه به خواص غیرخطی مخازن انرژی، طول عمر سیستم به طور مستقیم از عملکرد مخازن انرژی تاثیر می پذیرد. بنابراین، مهم ترین هدف این مقاله بیشینه کردن طول عمر سیستم با استفاده از ابزار زمان بندی وظایف بی درنگ سخت و با توجه به میزان انرژی قابل برداشت از محیط، نرخ مصرف انرژی وظایف و حالت مخازن انرژی است.

میزان کارایی سیاست مدیریت شارژ کاملاً به دقت پیش بینی برداشت انرژی و پیش بینی میزان مصرف انرژی وابسته است که انجام این پیش بینی ها خارج از حوزه این مقاله است و فرض می کنیم که اطلاعات به صورت  $100\%$  دقیق داده شده است.

#### ۴- راه حل پیشنهادی

در این بخش به تشریح جزئیات مربوط به راه حل پیشنهادی برای بیشینه کردن طول عمر سیستم با استفاده از زمان بندی وظایف می پردازیم. ابتدا یک تابع هزینه معرفی می کنیم و سپس دو الگوریتم زمان بندی بهینه برای کمینه و بیشینه کردن این تابع هزینه ارائه می کنیم.

همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، شارژ موجود در بخش IAC یا همان شارژ در دسترس، از طریق شارش به/ از بخش IUC می تواند کم یا زیاد شود. این شارش به دلیل وجود اختلاف پتانسیل بین دو بخش صورت می پذیرد و هر چه این اختلاف پتانسیل بیشتر باشد، نرخ شارش نیز بیشتر می شود. میزان شارژ موجود در IAC و در نتیجه پتانسیل این بخش را می توان از طریق اجرای وظایف مختلف از لحاظ نرخ مصرف انرژی تحت تاثیر قرار داد. بنابراین تابع هزینه را به شکل  $\sigma = \int_{t=0}^{t=H} I_f(t) dt$  تعریف می کنیم که بیانگر میزان شارش شده بین دو بخش در طول یک ابردوره است.

که نرخ جذب انرژی در طول یک ابردوره از وظایف بی درنگ ثابت است و برای ابردوره  $k$ ام با  $r_k$  نمایش می دهیم. این در حالی است که نرخ جذب انرژی برای ابردوره های مختلف می تواند متفاوت باشد.

#### مدل وظایف بی درنگ

سیستم تحت بررسی، مجموعه ای از  $m$  وظیفه بی درنگ سخت،  $\Gamma: \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m\}$ ، را اجرا می کند که هر وظیفه  $\tau_i$  با چندتایی به شکل  $\tau_i: (c_i, p_i, e_i)$  نمایش داده می شود که پارامترهای آن به ترتیب نشان دهنده بدترین زمان اجرا، دوره اجرا و نرخ مصرف انرژی هستند. فرض بر این است که همه وظایف هم فاز بوده و در لحظه صفر به سیستم وارد می شوند. به کوچکترین مضرب مشترک دوره همه وظایف، یک ابردوره گفته می شود،  $H = lcm(p_1, p_2, \dots, p_m)$ .

در هر ابر دوره بسته به نرخ برداشت انرژی  $r_k$ ، وظایف را به دو بخش مصرف گرا و ذخیره گرا تقسیم می کنیم. وظایف مصرف گرا آنهایی هستند که نرخ مصرف انرژی آن ها از نرخ برداشت انرژی بیشتر است در حالی که وظایف ذخیره گرا وظایفی هستند که نرخ مصرف انرژی آن ها از نرخ برداشت انرژی کمتر است.

بهره وری زمانی هر وظیفه به شکل بدترین زمان اجرا به روی دوره،  $u_i^t = \frac{c_i}{p_i}$ ، تعریف می شود که در نهایت مجموع همه بهره وری ها برابر با بهره وری کل سیستم می شود،  $U^t = \sum_{i=1}^m u_i^t$ . از طرف دیگر، بهره وری انرژی هر وظیفه برابر با انرژی مصرف شده در طول اجرا بر روی انرژی برداشت شده در طول دوره،  $u_i^e = \frac{e_i * c_i}{r_k * p_i}$ ، تعریف می شود. باز هم مجموع کل بهره وری های انرژی برابر با بهره وری کلی انرژی سیستم می شود،  $U^e = \sum_{i=1}^m u_i^e$ .

#### تعریف مساله

$\mathbb{P} = (\Gamma, \beta)$  مساله زمان بندی آگاه از انرژی را به شکل به ترتیب نشان دهنده مجموعه  $\beta$  و  $\Gamma$  تعریف می کنیم که  $\mathbb{P} =$  وظایف و مخزن انرژی هستند. یک زمان بندی برای  $\mathbb{P}$ ، یک بردار به طول یک ابردوره است که توسط الگوریتم  $(\Gamma, \beta)$  تولید شده است و برای هر بازه زمانی یا یک واحد از یک  $\mathcal{A}$  وظیفه برای اجرا تعیین شده یا آن بازه خالی گذاشته شده است.



### الگوریتم زمان‌بندی MCF<sup>1</sup>

این الگوریتم زمان‌بندی در هر لحظه سعی می‌کند با توجه به شرایط، پرمصرف‌ترین وظیفه را انجام دهد. این شرایط عبارت است از:

- ۱) اجرای یک واحد زمانی از پرمصرف‌ترین وظیفه موجب از دست رفتن موعد زمانی هیچ وظیفه دیگری نشود،
- ۲) اجرای یک واحد زمانی از پرمصرف‌ترین وظیفه موجب کمبود انرژی برای وظایف دیگری با موعد زمانی کمتر از این وظیفه نشود.

با توجه به دو شرط بالا، این الگوریتم زمان‌بندی یک بردار با طول تعداد موعدهای موجود در یک ابردوره خواهد داشت که هر عنصر آن شامل یک سه‌تایی (زمان، لختی زمانی، لختی انرژی) است. زمان همان موعد را نشان می‌دهد و لختی‌های زمانی و انرژی به ترتیب نمایش دهنده میزان زمان اضافه بر نیاز و میزان انرژی اضافه بر نیاز وظایفی هستند که اجرای آن‌ها باید تا آن لحظه تمام شود. با توجه به این بردار در هر لحظه چک می‌کند که آیا لختی کافی زمانی و انرژی برای اجرای پرمصرف‌ترین وظیفه وجود دارد یا خیر. برای مقاردهای اولیه هر کدام از عناصر، به شکل زیر اقدام می‌شود:

- ۱) بخش زمان هر عنصر از بردار فوق با یک موعد مقاردهی می‌شود.
- ۲) بخش لختی زمانی هر موعد به این شکل محاسبه می‌شود که مجموع زمان‌های اجرایی تمامی وظایف از طرف همه وظایف که موعد آن‌ها قبل یا برابر با موعد در دست بررسی است از مقدار جبری آن زمان کم می‌شود که در اصل برابر است با مقدار زمان در دسترس، منهای مقدار زمان مورد نیاز برای اجرای کارهایی که موعد آن‌ها قبل از زمان مدنظر است.

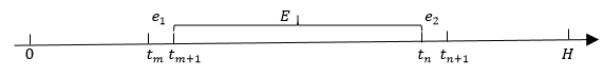
- ۳) بخش لختی انرژی هر موعد، از کم کردن انرژی مورد نیاز تمامی وظایفی که موعد آن‌ها قبل از یا برابر با موعد در دست بررسی است، از مقدار کل انرژی موجود در ابتدای ابردوره به اضافه انرژی برداشت از ابتدای ابردوره تا موعد مدنظر به دست می‌آید.

بعد از هر لحظه، بردار فوق به شکل زیر به‌روزرسانی می‌شود:

حال هدف از زمان‌بندی را از طریق این تابع هزینه به این شکل تعریف می‌کنیم که اگر بر طبق پیش‌بینی‌ها در طول بازه زمانی  $\Pi$  ابردوره آینده، انرژی به قدری اضافه برداشت شود که مخازن انرژی سرریز شوند، آنگاه به گونه‌ای عمل خواهیم کرد که تابع هزینه کمینه شود. به عبارت دیگر، بیشترین شارش شارژ از بخش IAC به IUC را داشته باشیم تا در آینده بتوانیم از آن استفاده کنیم. از طرفی در شرایطی غیر از شرایط مذکور سعی می‌کنیم تابع هزینه را بیشینه کنیم تا بیشترین شارش را به سمت IAC داشته باشیم تا بتوانیم طول عمر سیستم را افزایش دهیم.

**قضیه ۱:** اجرای وظایف به ترتیب غیرصعودی بر اساس نرخ مصرف آن‌ها موجب بیشینه شدن تابع هزینه می‌شود و برعکس.

**اثبات:** فرض کنید مقدار  $\sigma_1$  برای تابع هزینه از اجرای غیرصعودی وظایف به دست آمده است. حال اگر فرض کنیم که این مقدار بیشینه نیست، آنگاه باید ترتیب دیگری وجود داشته باشد که با تغییر وظایف اجرا شده در واحدهای زمانی  $t_m$  و  $t_n$  شکل ۳، با نرخ مصرف انرژی  $e_1 \geq e_2$ ، مقدار  $\sigma_2$  برای تابع هزینه به دست می‌آید که این مقدار بیشتر از مقدار اول است،  $\sigma_2 > \sigma_1$  از آنجایی که تغییری در مصرف انرژی قبل از نقطه  $t_m$  شکل نگرفته است، بنابراین در این لحظه بین دو زمان‌بندی تفاوتی وجود ندارد. جابه‌جا شدن دو بازه زمانی مذکور موجب می‌شود شارژ موجود در IAC در پایان اسلات زمانی  $t_m$  در زمان‌بندی تغییر یافته بیشتر شود که در نهایت موجب کمتر شدن مقدار جبری نرخ شارش می‌شود. در نتیجه، در طول ابردوره شارژ کمتری شارش خواهد کرد و تابع هزینه کمتر از حالت قبلی می‌شود که این یک تناقض با فرض است. بنابراین، قضیه اثبات می‌شود.



شکل ۳. اجرای وظایف به ترتیب غیرصعودی موجب بیشینه شدن تابع هزینه می‌شود

با توجه به قضیه ۱ به این نتیجه می‌رسیم که الگوریتم زمان‌بندی باید سعی نماید هنگامی که تصمیم به ذخیره انرژی مازاد برداشت شده در بخش IUC دارد، وظایف را به ترتیب غیرصعودی اجرا کند و برعکس.

زمان  $t_m$ ، قبل از زمان  $t_n$  که یک واحد از وظیفه  $J_{s,d}$  اجرا می‌شود

**قضیه ۳:** الگوریتم زمان‌بندی MCF تابع هزینه را بیشینه می‌کند.

**اثبات:** همان‌طور که در قضیه ۱ اثبات شد، اجرای وظایف به ترتیب غیرصعودی، نرخ مصرف انرژی آن‌ها موجب بیشینه شدن تابع هزینه می‌شود. همین‌طور با نگاهی به قضیه ۲ متوجه می‌شویم که این الگوریتم، وظایف را به ترتیب غیرصعودی اجرا می‌کند که در نهایت موجب بیشینه شدن تابع هزینه می‌شود.

### الگوریتم زمان‌بندی MGF<sup>۱</sup>

این الگوریتم زمان‌بندی، با هدف بیشینه کردن شارژ موجود در بخش IUC که از طریق کمینه کردن تابع هزینه اتفاق می‌افتد، ارائه شده است. این الگوریتم در هر لحظه سعی می‌کند وظیفه‌ای را برای اجرا انتخاب کند که کمترین نرخ مصرف انرژی را داشته باشد. برای انتخاب یک واحد زمانی از یک وظیفه، از بین وظایف آماده به اجرا، این الگوریتم چک می‌کند که:

(۱) اجرای این وظیفه در واحد زمانی جاری موجب از دست رفتن موعد زمانی وظیفه دیگری در آینده نشود،

(۲) اجرای این وظیفه در واحد زمانی جاری موجب کمبود انرژی برای یک وظیفه دیگر در آینده ولی با موعد کمتر از این وظیفه نشود.

این الگوریتم هم مثل الگوریتم MCF از یک بردار لختی با همان تعریف و مقداردهی اولیه و روال به‌روزرسانی برای این وظیفه استفاده می‌نماید. ثابت می‌شود که این الگوریتم نیز بهینه است.

**قضیه ۴:** الگوریتم زمان‌بندی MGF بهینه است.

**اثبات:** اثبات بهینگی این الگوریتم کاملاً مثل اثبات بهینگی MCF است.

**قضیه ۵:** الگوریتم MGF موجب کمینه شدن تابع هزینه می‌شود.

**اثبات:** در قضیه ۱ اثبات شد که اجرای غیرنزولی وظایف بر اساس نرخ مصرف انرژی آن‌ها، موجب کمینه شدن تابع هزینه می‌شود. از طرفی در قضیه ۴ نیز اثبات شد که این الگوریتم،

(۱) اگر آن لحظه خالی بود و وظیفه‌ای برای اجرا انتخاب نشد آن‌گاه از لختی زمانی همه وظایف یک واحد کم می‌شود و لختی انرژی دست نمی‌خورد.

(۲) اگر وظیفه‌ای برای اجرا انتخاب شد، لختی زمانی تمام عناصری که موعد آن‌ها کمتر از موعد وظیفه منتخب است، یک واحد کم می‌شود و لختی انرژی آن‌ها نیز به اندازه انرژی مصرفی وظیفه منتخب کاهش پیدا می‌کند.

**قضیه ۲:** الگوریتم MCF بهینه است. به عبارتی، الگوریتم MCF یک زمان‌بندی برای یک مجموعه وظیفه پیدا خواهد کرد، اگر حداقل یک زمان‌بندی امکان‌پذیر برای آن وجود داشته باشد.

**اثبات:** برای اثبات این قضیه اثبات می‌کنیم که هر زمان‌بندی انجام شده برای یک مجموعه وظیفه، قابل تبدیل به زمان‌بندی بر اساس الگوریتم MCF است. با نگاهی به شکل ۴ که در آن یک واحد از وظیفه  $J_{i,j}$  برای اجرا در زمان  $t_m$  و قبل از یک واحد از وظیفه  $J_{s,d}$  که در زمان  $t_n$  زمان‌بندی شده است. برای تبدیل این زمان‌بندی به زمان‌بندی مبتنی بر الگوریتم MCF، سه حالت کلی وجود دارد:

(۱) اگر  $e_i < e_s$  یا  $R_{s,d} \geq t_{m+1}$  یا  $D_{i,j} \leq t_n$ : این کارها به ترتیب MCF هستند.

(۲) اگر  $e_i = e_s$ : دو حالت پیش می‌آید:

(۱)  $D_{i,j} \leq D_{s,d}$ : آن‌ها به ترتیب MCF هستند،

(۲)  $D_{i,j} > D_{s,d}$ : با توجه به مصرف انرژی برابر آن‌ها می‌توانند با هم جابه‌جا شوند.

(۳)  $e_i < e_s$ : باز هم دو حالت پیش می‌آید:

(۱) اگر انرژی در دسترس در نقطه  $t_m$  به اندازه کافی بود، آن‌گاه این دو وظیفه جابه‌جا می‌شوند،

(۲) اگر انرژی در دسترس در نقطه  $t_m$  به اندازه کافی نبود، این دو وظیفه به ترتیب MCF هستند.



شکل ۴. زمان‌بندی معتبر یک واحد زمانی از وظیفه  $J_{i,j}$  برای اجرا در



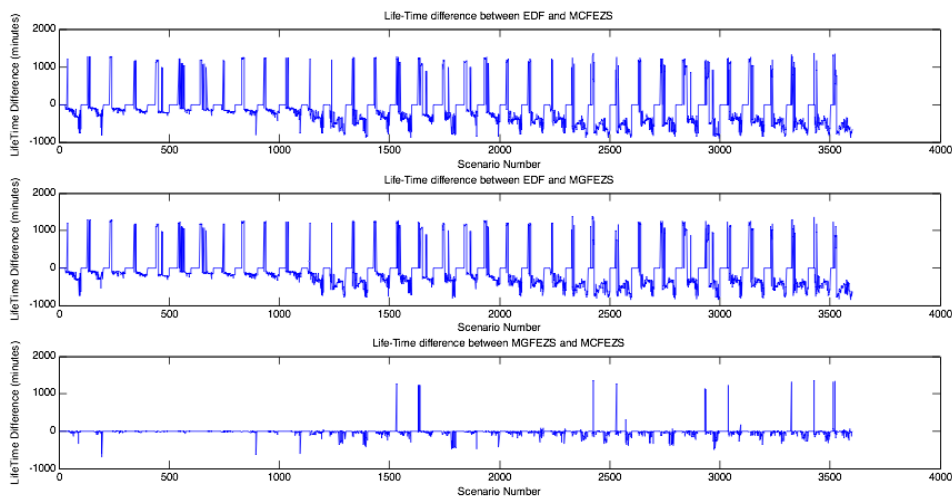
سیس در Matlab/Simulink مدل باتری، خازن توسعه داده شد که به عنوان ورودی بردار مصرف و بردار برداشت انرژی را قبول می‌کند و به عنوان خروجی بردارهایی را ارائه می‌دهد که نشان می‌دهد در هر لحظه شارژ موجود در باتری و ابرخازن چقدر بوده است. در هر لحظه که مجموع شارژ موجود در IAC‌های باتری و خازن کمتر از صفر شود، آن لحظه سیستم دچار شکست شده و به عنوان لحظه آخر عمر آن سیستم تلقی می‌شود. در مجموع  $3 \times 10^3$ ؛  $12 \times 10^3$ ؛  $3600$  سناریو مختلف شبیه‌سازی شد که نتایج آن در ادامه تشریح می‌شود.

در شکل ۵، تفاوت طول عمر سیستم در الگوریتم‌های مختلف مشاهده می‌شود. بخش اول این شکل، تفاوت طول عمر سیستم با استفاده از الگوریتم‌های MCF و EDF است که در بیشتر سناریوها MCF توانسته به میزان خوبی طول عمر سیستم را بهبود ببخشد. در بخش دوم شکل، تفاوت طول عمر سیستم با استفاده از دو الگوریتم MGF و EDF دیده می‌شود که باز هم الگوریتم MGF، بهبود خوبی نسبت به EDF داشته است. در نهایت در بخش سوم این شکل، تفاوت عمر سیستم با استفاده از دو الگوریتم MCF و MGF دیده می‌شود که در برخی سناریوها MCF، بهبود چشم‌گیری نسبت به MGF داشته است.

وظایف را به ترتیب غیرنزولی اجرا می‌کند. پس این الگوریتم موجب کمینه شدن تابع هزینه می‌شود.

## ۵- بحث و بررسی

برای ارزیابی الگوریتم‌های ارائه شده در این مستند، چارچوبی برای شبیه‌سازی آن‌ها ساخته شد که در ادامه به تشریح جزئیات می‌پردازیم. ابتدا یک برنامه به زبان C# تهیه شد که مجموعه وظایف تصادفی بر اساس الگوریتم بسیار معروف UUnifast تولید می‌کند. برای هر کدام از بهره‌وری‌های پردازنده بین ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ با فاصله ۱۰٪ (در مجموع برای ۱۰ سطح بهره‌وری)، ۱۰ مجموعه وظیفه و هر کدام شامل ۱۰ وظیفه تولید شد. به عبارت دیگر ۱۰۰ وظیفه برای شبیه‌سازی تولید شدند. از طرفی نرخ برداشت انرژی به ازای ۱۲ روز منتخب (یک روز به صورت تصادفی به ازای هر ماه انتخاب شد تا شرایط مختلف برداشت انرژی شامل طول روز و میزان انرژی قابل برداشت شبیه‌سازی شود) از سال ۲۰۱۶ به صورت بردارهای برداشت انرژی تولید شدند. سپس الگوریتم MCF، MGF و EDF برای زمان‌بندی این مجموعه وظایف توسعه داده شدند که خروجی این برنامه‌ها، بردارهایی با طول ابردوره‌های مجموعه وظایف بود که مشخص می‌نمود در هر لحظه چه نرخ مصرفی خواهیم داشت.



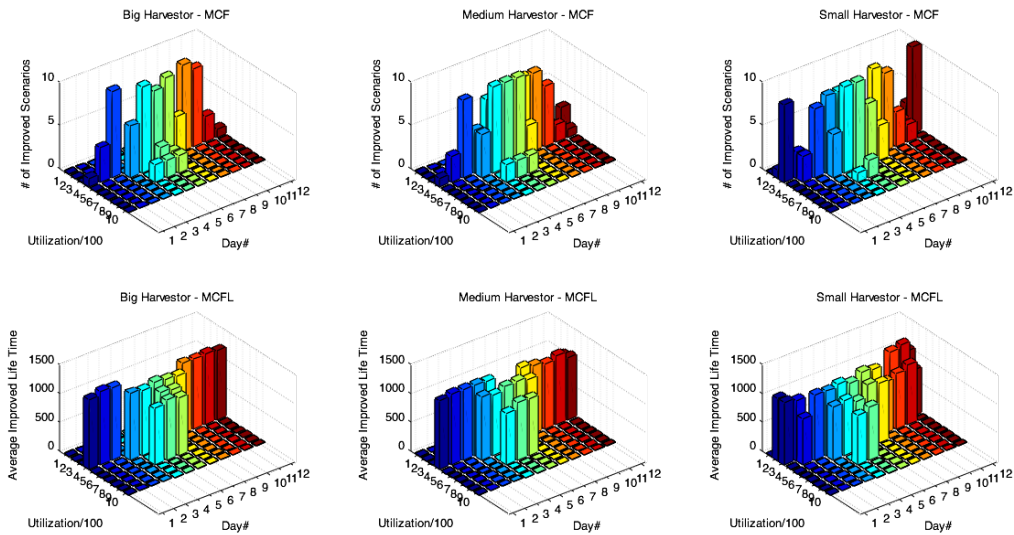
شکل ۵. تفاوت طول عمر سیستم در الگوریتم‌های مختلف

طول عمر سیستم بهبود داشته نمایش داده شده و در بخش پایینی نیز، متوسط بهبود طول عمر سیستم دیده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تعداد سناریوها در روزهایی که

در شکل ۶، تفاوت طول عمر سیستم در الگوریتم MCF نسبت به EDF به تفکیک اندازه برداشت‌گر انرژی و روزهای سال ارائه شده است. در بخش بالایی این شکل، تعداد سناریوهایی که

برداشت شده کم است، مثل حالت استفاده از برداشت‌گر با اندازه کوچک، هم تعداد سناریوهای بهبود یافته بیشتر و هم متوسط بهبود طول عمر چشم‌گیر است.

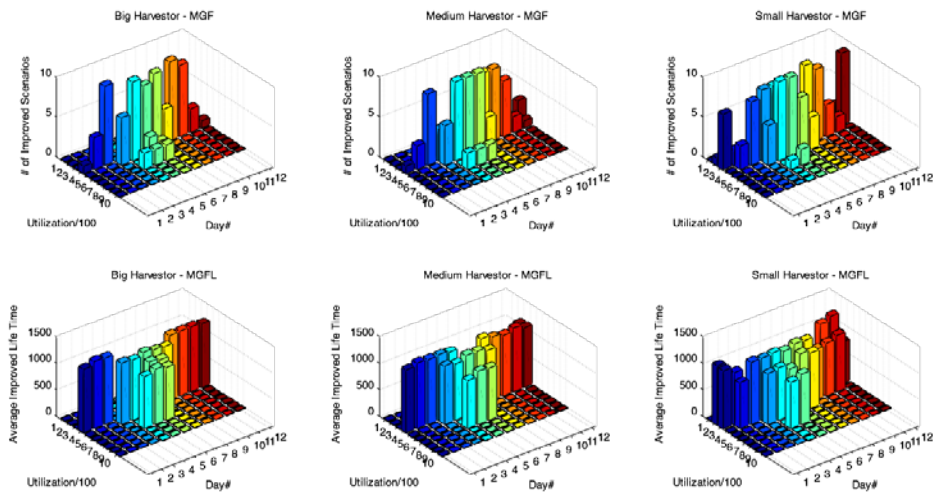
انرژی برداشت شده زیاد بوده یا به عبارتی طول روز زیاد بوده، کمتر است. زیرا تعداد ساعات نبود انرژی محیطی کم است و سیستم می‌تواند خود را نجات دهد اما در روزهایی که انرژی



شکل ۶: بهبود MCF نسبت به EDF

روز زیاد است یا انرژی برداشت شده واقعا کم است، الگوریتم نمی‌تواند بهبود خاصی ارائه نماید. زیرا در حالت وجود انرژی زیاد، سیستم نیازی به مدیریت انرژی ندارد و در سناریوهایی که انرژی بسیار کم است، مدیریت انرژی نیز نمی‌تواند کمک زیادی بکند، زیرا در هر صورت، سیستم به دلیل نبود انرژی دچار شکست می‌شود.

در شکل ۷، تفاوت طول عمر سیستم در الگوریتم‌های MGF و EDF ارائه شده است. باز هم بخش اول، تعداد سناریوهای بهبود یافته و بخش دوم، متوسط بهبود طول عمر سیستم را به تفکیک اندازه برداشت‌گر انرژی و روزهای مختلف سال نشان می‌دهند. همان‌گونه که در نمودارها مشخص است، باز هم در اکثر سناریوها، برداشت‌گر کوچک MGF توانسته بهبود چشم‌گیری نسبت به EDF به دست آورد. اما در مواقعی که طول



شکل ۷. بهبود MGF نسبت به EDF

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا به خواص غیرخطی مخازن انرژی اشاره و توضیح داده شد که چگونه الگوریتم توان اعمال شده بر مخزن انرژی می‌تواند روی طول عمر سیستم تاثیرگذار باشد. سپس، مساله افزایش طول عمر سیستم به وسیله زمان‌بندی وظایف بی‌درنگ سخت تشریح شد و یادآور شدیم که از این طریق می‌توان روی الگوریتم توان اعمالی بر مخزن انرژی و در نهایت طول عمر سیستم تاثیرگذار بود. آنگاه، در بخش ارائه راه‌حل، دو الگوریتم زمان‌بندی بهینه با نام‌های MGF و MCF ارائه شد که به ترتیب سعی می‌کردند اولویت اجرا را در هر لحظه به پرمصرف‌ترین و کم مصرف‌ترین وظیفه بدهند. بدین ترتیب، الگوریتم اعمال شده به مخزن انرژی به ترتیب به غیرصعودی و غیرنزولی تغییر می‌کرد که هر کدام می‌توانست تاثیر قابل توجهی در طول عمر سیستم داشته باشد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی در بخش آخر نمایش داده شد که نشان می‌دهد الگوریتم‌های ارائه شده در سناریوهایی که انرژی قابل برداشت از محیط نه خیلی زیاد و نه خیلی کم است، می‌تواند بهبود چشم‌گیری داشته باشد.

با توجه به امکان به‌کارگیری ترکیب ابرخازن و باتری در ماهواره‌ها بر اساس پژوهش‌های اخیر که در مقدمه اشاره شد، نتایج به دست آمده در این مقاله می‌تواند برای بهبود بیشتر پروفایل جرمی زیرسیستم توان ماهواره و بهبود طول عمر آن به عنوان یک کاربرد صنعتی استفاده شود.

یکی از کاربردهای پژوهش حاضر، استفاده از نتایج آن در صنعت فضایی و به ویژه ماهواره‌هاست. در [۱۳]، امکان به‌کارگیری ابرخازن در میکروماهواره‌ها، با در نظر گرفتن مزایا و معایب آنها، مورد بررسی قرار گرفته است. از مهم‌ترین مزایای ابرخازن‌ها می‌توان به طول عمر بالا در سیکل‌های شارژ و دشارژ، چگالی توانی بالا، سرعت بالای شارژ و دشارژ و اتلاف حرارتی پایین اشاره کرد. با وجود معایبی چون چگالی پایین انرژی و دشارژ سریع آنها، در [۱۳]، محاسبات طراحی منبع ذخیره‌ساز توان در یک میکروماهواره نمونه، با ابرخازن و بدون ابرخازن انجام شده است. نتایج نشان داده است که در صورت استفاده از ابرخازن در کنار باتری، جرم منبع ذخیره‌ساز توان به میزان ۲۱ درصد در آن میکروماهواره نمونه کاهش می‌یابد. در [۱۴]، کاربرد ابرخازن در کنار باتری برای تامین پیک توان مصرفی در یک ماهواره SAR بررسی شده است. ماهواره‌های SAR، دارای پیک مصرف توان بیشتری در بازه‌های زمانی کوتاه هستند. باز هم با انجام محاسبات، طراحی منبع ذخیره‌ساز توان در دو حالت با ابرخازن و بدون ابرخازن، نشان داده شده است که جرم مورد نیاز در صورت استفاده از ابرخازن، به میزان ۳۴ درصد کاهش یافته است. این کاهش، بیشتر از مورد قبلی است زیرا ماهواره‌های SAR، پیک مصرف به نسبت بالایی دارند. علاوه بر این در هر دو مورد، با به‌کارگیری ابرخازن، طول عمر منبع ذخیره‌ساز و نیز کارایی شارژ و دشارژ بهبود داشته است.

- [10] Y. Abdedda??m, Y. Chandarli, and D. Masson, "The optimality of PFPasap algorithm for fixed-priority energy-harvesting real-time systems", *Proc. - Euromicro Conf. Real-Time Systpp.* 47-56, 2013.
- [11] T. Kim, S. Member, and W. Qiao, "A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects, *IEEE Trans. Energy Convers*", vol. 26, no. 4, pp. 1172- 1180, Dec. 2011. .
- [12] H. Yang and Y. Zhang, "Analysis of Supercapacitor Energy Loss for Power Management in Environmentally Powered Wireless Sensor Nodes", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 11, pp. 5391- 5403, Nov. 2013..

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از آقای دکتر مهدی کارگهی که در تعریف موضوع پژوهش، اجرا و تدوین مقاله راهنمایی‌های ارزنده‌ای داشتند، آقای دکتر محمود حسنلو که در انجام پژوهش و تدوین مقاله نقش محوری داشته‌اند و همچنین از راهنمایی‌های آقای دکتر امید شکوفا در بازنگری و انجام اصلاحات مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## مراجع

- [۱۳] ا. شکوفا، ن. نمازی‌پور، ف. باقر اسکویی، م. باغبان‌کندری، ش. کرباسیان، ا. کوثری، "بررسی مزایا و معایب کاربرد ابرخازن‌ها در زیرسیستم توان الکتریکی میکروماهواره‌ها و تاثیر آن بر پیکربندی باتری"، هفدهمین کنفرانس هوافضای ایران، خرداد ۱۳۹۷.
- [۱۴] م. فکور ثقیه، ا. شکوفا، ص. آشوری فلاح، "بررسی تاثیر ترکیب ابرخازن با باتری برای تامین پیک مصرفی در ماهواره‌های SAR"، هجدهمین کنفرانس هوافضای ایران، بهمن ۱۳۹۸.
- [1] Y. Wang, Z. Liu, D. Wang, Y. Li, and J. Yan, "Anomaly detection and visual perception for landslide monitoring based on a heterogeneous sensor network", *IEEE Sens. J.1* , pp. 1- , 2017.
- [2] H. Jayakumar, K. Lee, W. S. Lee, A. Raha, Y. Kim, and V. Raghunathan, "Powering the Internet of Things", in *IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, pp.. 375- 380, 2014.
- [3] J. F. Manwell and J. G. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems", *Sol. Energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399-405, May 1993.
- [4] X. Gao, Y. Cao, W. Liao, and G. Li, "Slack-nibbling battery-aware task scheduling", *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 229- 234, 2009.- [5] M. Hasanloo and M. Kargahi, "Harvesting-aware charge management in embedded systems equipped with a hybrid electrical energy storage", pp. 98- 114, 2018, ", *Comput. Electr. Eng.*, vol.no. 69, December 2017
- [6] D. Moss and P. Pittsburgh, "Scheduling of Frame-based Embedded Systems with Rechargeable Batteries", pp. 1- 8, 2001.



### COPYRIGHTS

© 2021 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. 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/>)

- [9] M. Chetto, "Optimal scheduling for real-time jobs in energy harvesting computing systems", *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput*, vol. 2, no. 2, pp. 122-133, 2014.