



## طراحی و شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک و ردیاب حداکثر توان در میکروماهواره‌ها

مرضیه کریمی دهکردی<sup>۱</sup>، سید محمد مهدی میرطلایی<sup>\*</sup>

\* نویسنده مسئول: mirtalaei.iaun@gmail.com

### واژه‌های کلیدی

سلول خورشیدی، میکروماهواره، ردیابی  
حداکثر توان، مبدل DC-DC، باتری لیتیوم  
یون

### چکیده

امروزه با گسترش صنعت و افزایش جمعیت نیاز به انرژی روز به روز افزایش می‌یابد. با توجه به این که انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی رو به پایان است، در حال حاضر استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر، به خصوص انرژی خورشیدی گسترش یافته است، همچنین انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین و پر کاربردترین منابع تامین توان ماهواره‌ها و فضاپیماها نیز می‌باشد. سلول خورشیدی وقتی دارای بیشترین بازده می‌باشد که در نقطه حداکثر توان کار کند. اما به خاطر تغییر پارامترها نمی‌توانند بدون کنترل در این نقطه کار کنند. توان تولید شده به وسیله سلول خورشیدی به عوامل اصلی، تابش و دمای سلول خورشیدی و اندازه بار متصل شده به آن بستگی دارد که در آن تابش و دمای سلول خورشیدی با زمان تغییر می‌کند پس نقطه حداکثر توان نیز تغییر می‌کند. روش‌های مختلفی برای ردیابی نقطه حداکثر توان وجود دارد که ما در این مقاله از روش P&O استفاده کردیم. برای این که بتوان حداکثر توان را از سلول خورشیدی به بار انتقال داد، نیاز است مبدلی که دارای بازده بالایی می‌باشد را انتخاب کرد. در این مقاله مبدل بوست برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. کاهش حجم و وزن در میکروماهواره از نیازهای اصلی است که باعث می‌شود باتری با چگالی انرژی حجمی و وزنی بالا انتخاب شود و از آنجایی که با توجه به مقایسات صورت گرفته در مورد باتری Li-Ion از قبیل چگالی انرژی بالا، وزن کم، نداشتن اثر حافظه در مقایسه با NiCd و NiH<sub>2</sub> و توان انرژی بالا، انتخاب باتری Li-Ion برای ماهواره‌ی مورد نظر مناسب‌ترین گزینه به نظر می‌رسد. سیستم توان ماهواره که شامل سه قسمت است باید به طور همزمان مورد آزمایش قرار گیرد. چون سناریوهای مختلفی برای بار و تولید توان وجود دارد پس ما به یک شبیه‌ساز نیاز داریم که بتواند عملکرد هم‌زمان هر سه قسمت را شبیه‌سازی کند، به همین علت ما مدل‌های متداول برای هر قسمت را در شبیه‌ساز جایگذاری کردیم که بتوانیم سناریوها و بارهای مختلف را شبیه‌سازی کنیم.

## ۱- مقدمه

محدودیت‌های آشکار و پنهان سایر منابع انرژی، جذابیت آن به صورت چشمگیری در صنایع دیگر روبه افزایش می‌باشد.

مبدل‌های فتوولتائیک<sup>۲</sup> به دلیل امکان تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی و مزایای دیگر نظیر وزن کم و امکانات نصب در قدرت‌های کوچک، جزء تجهیزات مورد توجه در زمینه استفاده از انرژی‌های نو می‌باشند ولی در مقایسه با سایر مبدل‌های انرژی الکتریکی، قیمت بیشتری دارند بنابراین لازم است که همواره شرایطی فراهم شود که از این مبدل‌ها حداکثر انرژی جذب شود تا استفاده بهینه از سیستم صورت گیرد.

بررسی مشخصه‌های سیستم فتوولتائیک نشان می‌دهد که مشخصه  $p-v$  و  $i-v$  آن، یک مشخصه کاملاً غیرخطی است و توان تولیدی این سیستم‌ها به عوامل اصلی شدت تابش، دما و اندازه بار متصل شده به آن بستگی دارد که در آن تابش و دمای سلول خورشیدی با زمان تغییر می‌کند پس نقطه حداکثر توان نیز تغییر می‌کند. روش‌های مختلفی برای ردیابی نقطه حداکثر توان وجود دارد که ما به بررسی روش اختلال و مشاهده<sup>۳</sup> خواهیم پرداخت. برای جذب توان حداکثر از PV، بایستی تطبیق امپدانس بار از دید منبع فتوولتائیک صورت بگیرد که این اقدام توسط مبدل‌های DC/DC انجام می‌شود. [9-13]

شکل ۱ مدار معادل یک سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. یک پنل خورشیدی از چندین سلول فتوولتائیک که دارای اتصال بیرونی سری یا موازی و یا سری-موازی تشکیل شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای شکل ۱ مشخصه پنل خورشیدی به دست می‌آید:

امروزه با توجه به عملکرد مناسب ماهواره‌های کوچک و طراحی، ساخت و پرتاب آن‌ها توسط بسیاری از کشورها، ایجاد و توسعه علوم و تکنولوژی فضایی کار دشوار و دور از دسترسی نبوده و تنها منحصر به کشورهای بزرگ و ثروتمند جهان نمی‌باشد.

بدیهی است که با توجه به هزینه نسبتاً کم طراحی، ساخت و پرتاب ماهواره‌های کوچک، روند توسعه و پیشرفت آن‌ها ادامه خواهد داشت و ایجاد بستر مناسب علمی، راه‌اندازی آزمایشگاه‌های تحقیقاتی فضایی و تربیت نیروی انسانی متخصص در دستور کار بسیاری از کشورهای در حال توسعه قرار خواهد گرفت. [۱]

اصولاً ماهواره‌ها از شش سیستم اصلی شامل: انرژی الکتریکی، مخابرات، کنترل وضعیت، کنترل حرارت، سازه و کامپیوتر مرکزی تشکیل می‌شوند. اگرچه ما در این‌جا فقط به بخش انرژی الکتریکی ماهواره می‌پردازیم.

سیستم انرژی الکتریکی یک ماهواره را می‌توان به سه قسمت اصلی زیر تقسیم کرد:

- سیستم تولید انرژی
- سیستم کنترل و تنظیم توان
- سیستم ذخیره انرژی

## ۲- سیستم تولید انرژی

انرژی خورشیدی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد که به علت سهولت دسترسی به آن در خارج از جو زمین کاربرد-های فراوانی را در سیستم‌های ماهواره‌ای به خود اختصاص داده است. هم‌چنین به علت مسائل و مشکلات زیست محیطی و

<sup>2</sup> Photovoltaic

<sup>3</sup> P&O

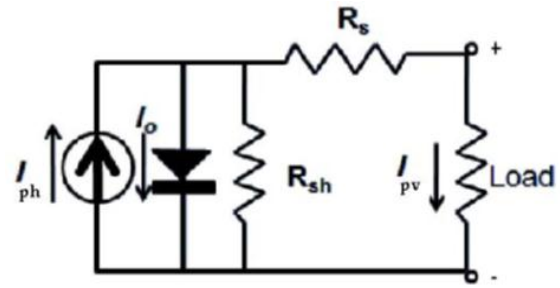
فاصله باند سیلیکون و مقدار آن  $1/1\text{eV}$ ،  $K$  ثابت بولتزمن و مقدار آن  $1.38 \times 10^{-23} \text{ j/k}$  می‌باشد.

جریان خروجی سلول خورشیدی برابر است با: که  $V_{oc} = V_{pv}$ ،  $R_s$  و  $R_{sh}$  به ترتیب مقاومت‌های معادل سری و موازی پنل خورشیدی می‌باشند که به دلیل بزرگ بودن  $R_{sh}$  از آن صرف-نظر می‌کنیم.

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left[ \exp\left\{ \frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{N_s A K T} \right\} - 1 \right] \quad (5)$$

### ۳- سیستم کنترل و تنظیم توان

هنگامی که یک پنل خورشیدی در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد و در آن پتانسیلی ایجاد می‌شود و باری را تغذیه می‌کند، همیشه نقطه بارگیری در نقطه توان حداکثر ( $P_{max}$ ) قرار ندارد و با توجه به قیمت بالای سیستم‌های فتوولتائیک و اهمیت میزان توان تولیدی سیستم، همواره ضروری است که نقطه کار در نقطه توان حداکثر قرار گیرد تا بیش‌ترین توان ممکن از پنل خورشیدی دریافت گردد، این عمل توسط ردیاب نقطه توان حداکثر  $(MPPT)^4$  انجام می‌شود. سیستم  $(MPPT)$  با تنظیم جریان آرایه و یا ولتاژ آن، نقطه کار را به سمت نقطه توان ماکزیمم  $(MPPT)$  هدایت می‌کند. فلوجارت روش مشاهده و دنبال کردن در شکل (۲) نشان داده شده است. [2-6]



شکل (۱) مدار معادل الکتریکی سلول خورشیدی

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \quad (1)$$

$$I_{ph} = [I_{scr} + K_i(T - 298)] * \lambda / 1000 \quad (2)$$

که  $I_{ph}$  جریان تولید شده از نور تابشی،  $T$  دمای ماژول،  $\lambda$  شدت تابش و  $I_{scr}$  جریان اتصال کوتاه ماژول در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و شدت تابش  $1000 \text{ w/m}^2$ ،  $K_i$  ضریب نسبت جریان اتصال کوتاه به دما می‌باشد.

جریان اشباع معکوس برابر است با:

$$I_{rs} = I_{scr} / [\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s K A T}\right) - 1] \quad (3)$$

جریان اشباع برابر است با:

$$I_o = I_{rs} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left[\frac{q^* E_{go}}{AK} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

که  $T_r$  دمای مرجع و برابر  $298 \text{ K}$ ،  $A$  ضریب ایده آل که مقدار آن برابر  $1/6$ ،  $N_p$ ،  $N_s$  تعداد سلول‌های سری و موازی،  $E_{go}$

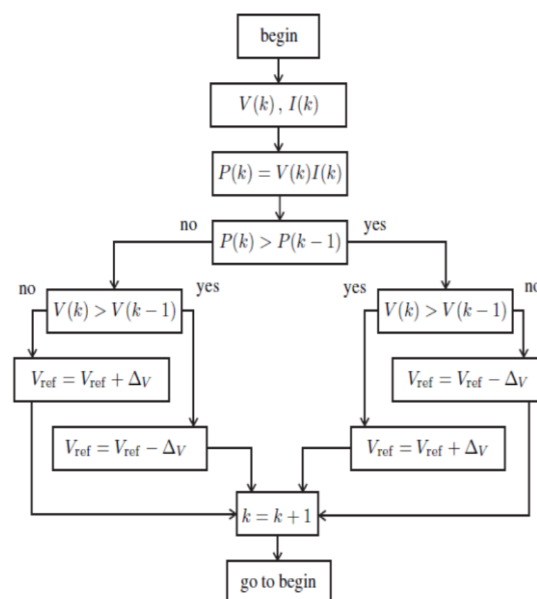
<sup>4</sup> Maximum Power Point Tracking

دیود به بار منتقل می‌شود و خازن نیز نقش تثبیت ولتاژ خروجی را در خلال این مدت به عهده دارد. وقتی که تمام انرژی سلف به بار منتقل گردید، خازن در دو سر بار دشارژ گردیده، ولتاژ خروجی شروع به کاهش می‌نماید و نهایتاً کلید مجدداً روشن و سیکل قبل دوباره تکرار می‌شود. بنابراین:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{t_{on}}{t} \leq 1 \quad (۶)$$

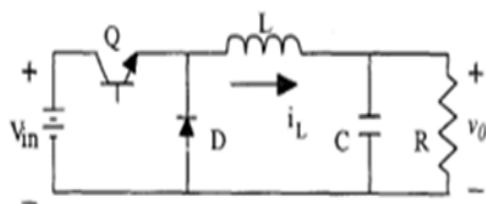
به طوری که  $t_{on}$  زمان اتصال کلید و  $t$  دوره تناوب کلید-

زنی می‌باشند. [7]



شکل (۲) فلوجارت الگوریتم تحریک و مشاهده

با توجه به این موضوع که ولتاژ خروجی یک پانل خورشیدی و نیز باتری‌ها (در صورت استفاده آن‌ها به عنوان ذخیره‌کننده انرژی) ثابت نمی‌ماند و هم‌چنین سطح ولتاژ مورد نیاز در مصرف‌کننده‌ها بالاست، معمولاً یک مبدل ولتاژ DC-DC به منظور بالا بردن سطح ولتاژ و تثبیت آن در یک ولتاژ مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. که ما به بررسی دو نوع مبدل DC-DC پرداختیم:



شکل (۳) مبدل کاهنده

### ۳-۲- مبدل بوست (Boost)

شکل (۴) شمای ساده یک مبدل افزایشنده را نشان می‌دهد. متوسط ولتاژ خروجی همواره بیش‌تر یا حداکثر مساوی ولتاژ ورودی می‌باشد. هنگامی که کلید وصل می‌شود، انرژی ورودی از طریق جریان در سلف ذخیره می‌شود. در زمان باز شدن کلید، ولتاژ دو سر سلف ضمن تغییر پلاریته با ولتاژ ورودی جمع و دو سر بار ظاهر می‌شود، در نتیجه ولتاژ در دو سر بار افزایش یافته و خازن نیز تا این سطح ولتاژ شارژ می‌گردد. در مدت زمانی که سلف انرژی خود را کاملاً از دست

### ۳-۱- مبدل کاهنده (Buck)

شکل (۳) شمای ساده یک مبدل کاهنده را نشان می‌دهد. متوسط ولتاژ خروجی همواره کمتر یا مساوی ولتاژ ورودی می‌باشد و این عمل با تغییر سیکل کار مبدل (D) توسط سیگنال PWM انجام می‌شود. هنگام روشن بودن کلید، انرژی ورودی به بار منتقل شده و مقداری از آن نیز در سلف و خازن ذخیره می‌گردد. در مدت زمانی که کلید قطع می‌باشد، انرژی ذخیره شده در سلف معکوس شده و از طریق

خورشیدی و دنبال کننده نقطه حداکثر توان، مبدل بوست، باتری می باشد.

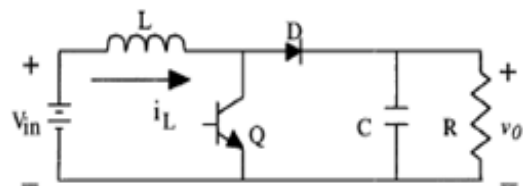
در قسمت پنل خورشیدی و دنبال کننده حداکثر توان از ترکیب آرایه (pv) و (MPPT) که در بلوک MPPT Controller using P & O technique مدل شده است. این بلوک از نوع Embedded Matlab Function و بر اساس تابع نوشته شده در MFile متلب می باشد. دو مقدار دما و تابش، به صورت ورودی به سیستم پنل خورشیدی اعمال می شود، قسمت پنل خورشیدی بر اساس معادلات بیان شده شبیه سازی شده است. با توجه به الگوریتم دنبال کننده نقطه حداکثر توان، دو خروجی ماکزیمم جریان و ماکزیمم ولتاژ بدست می آید.

منحنی I-V و P-V برای دما و شدت تابش مختلف در نظر گرفته شده است:

می دهد، انرژی ذخیره شده در خازن به بار منتقل می گردد. بنابراین:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{t}{t_{off}} \geq 1 \quad (7)$$

ت<sub>on</sub> زمان اتصال کلید و t<sub>off</sub> زمان قطع کلید می باشند.



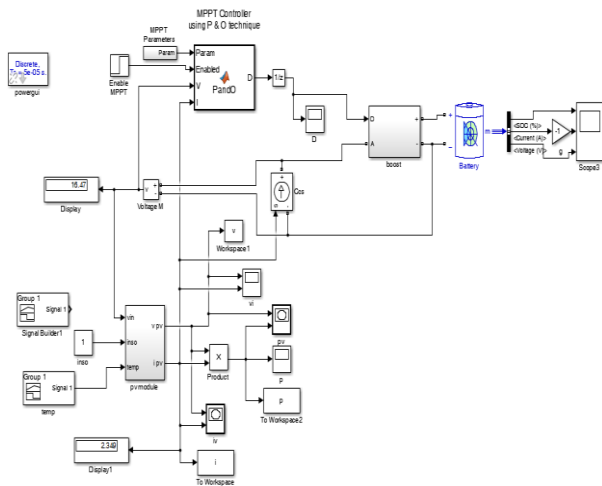
شکل (۴) مبدل افزایش دهنده

#### ۴- سیستم ذخیره توان

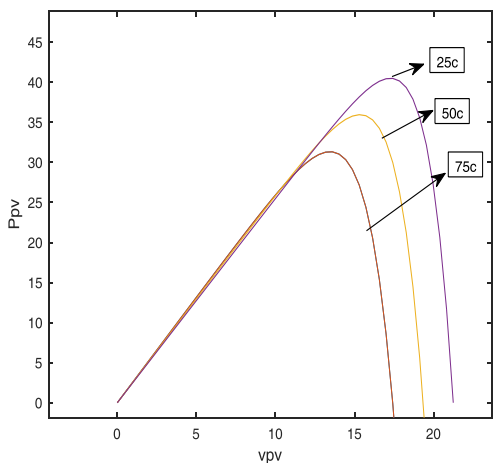
برای میکروماهواره با مدار LEO تعداد دفعات خورشید گرفتگی در یک روز زیاد است و تعداد دفعات شارژ و دشارژ باتری ها بسیار زیاد می باشد. از سوی دیگر کاهش حجم و وزن در میکروماهواره نیز از نیازهای اصلی است که باعث می شود باتری با چگالی انرژی حجمی و وزنی بالا انتخاب شود و از آنجایی با توجه به مقایسات صورت گرفته در مورد باتری Li-Ion از قبیل چگالی انرژی بالا، وزن کم، نداشتن اثر حافظه در مقایسه با NiCd و NiH<sub>2</sub> و توان انرژی بالا، انتخاب باتری Li-Ion برای ماهواره ی مورد نظر مناسب ترین گزینه به نظر می رسد. [8]

#### ۵- شبیه سازی

شکل (۵) بلوک دیاگرام شبیه سازی شده نمایش داده شده است. که شامل قسمت های ورودی دما و تابش، پنل



شکل (۵) بلوک دیاگرام شبیه سازی شده

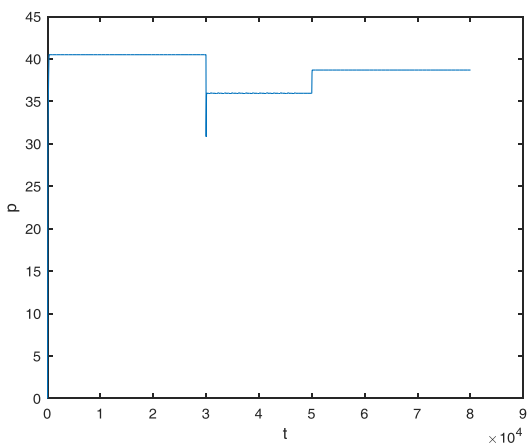


شکل (۹) منحنی P-V در شدت تابش ثابت  $1000 \text{ w/m}^2$

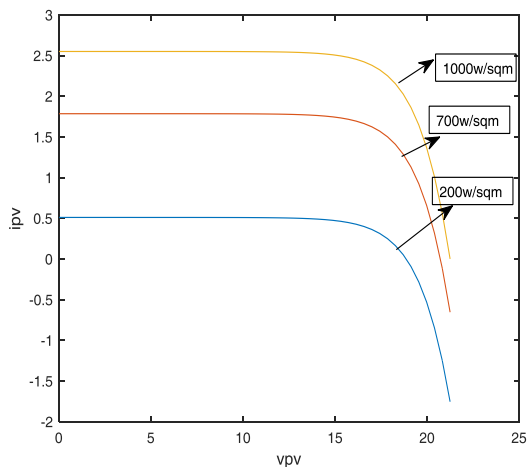
همان‌طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌کنید در یک دمای ثابت با افزایش شدت تابش، جریان و ولتاژ خروجی افزایش می‌یابند در نتیجه توان هم زیاد می‌شود.

در یک دمای ثابت با افزایش شدت تابش، جریان و ولتاژ خروجی افزایش می‌یابند در نتیجه توان هم زیاد می‌شود. (شکل ۸ و ۹)

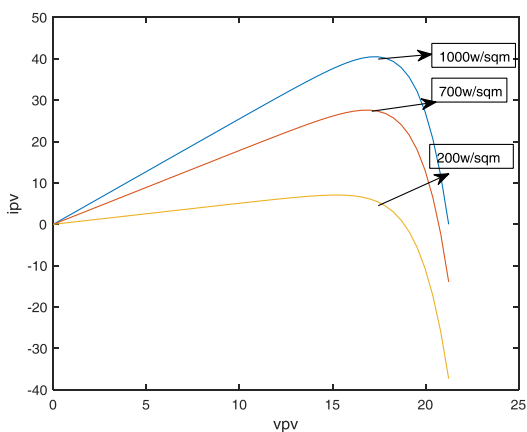
با استفاده از الگوریتم دنبال کننده نقطه حداکثر توان می‌توان تقریباً ۲۰٪ توان دریافتی را افزایش داد. ما در اینجا از روش P&O بهره گرفتیم. شکل ۱۰ توان خروجی را نشان می‌دهد.



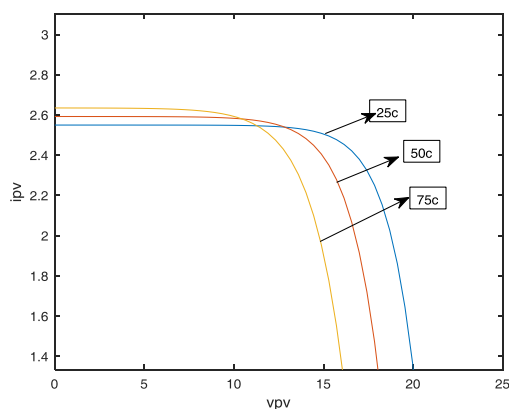
شکل (۱۰) منحنی P با ردیابی حداکثر توان



شکل (۶) منحنی I-V در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل (۷) منحنی P-V در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد



شکل (۸) منحنی I-V در شدت تابش ثابت  $1000 \text{ w/m}^2$

Technique Exploiting the PV Module MP Locus Characterization", IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, p. 1531-538, May 2009

[7] J.Mahdavi, A.Emadi, H.A.Toliat, Application of State Space Averaging Method to Sliding Mode Control of PWM DC/DC Converters, IEEE Industry Applications Society October 1997.

[8] W.X. Shen, C.C. Chan, E.W.C. Lo, K.T. Chau, "A new battery available capacity indicator for electric vehicles using neural network", Energy Conversion and Management, No. 43, pp. 817-826, 2002.

[9] Piegari L, Rizzo R. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. Renew Power Generation, IET 2010; 4:317-28.

[10] Bangyin Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, and Pengwei Xu, "Analysis and improvement of maximum power point tracking algorithm based on incremental conductance method for photovoltaic array," PEDS 2007, IEEE pp.637~641.

[11] Mamarelis E, Petrone G, Spagnuolo G. A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency. Appl Energy 2014; 113:414-21.

[12] Piegari L, Rizzo R. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. Renew Power Generation, IET 2010; 4:317-28.

[13] E. Bianconi, J. Calvente, R. Giral, E. Mamarelis, G. Petrone, C. A. Ramos-Paja, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Perturb and observe MPPT algorithm with a current controller based on the sliding mode," International J. of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, no. 1, pp. 346-356, Jan. 2013.

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله توانستیم یک سیستم جامع برای ماهواره طراحی کنیم که هر سه بخش تولید، کنترل و ذخیره را شبیه سازی کند. که بتواند با تغییر دما و تابش حداکثر توان را با استفاده از الگوریتم ردیابی اختلال و مشاهده دنبال کند و آن را برای انجام ماموریت و شارژ باتری مصرف کند و در مواقعی که در حالت خورشیدگرفتگی قرار می گیرد از انرژی ذخیره شده در باتری استفاده کند. به دلیل چگالی انرژی بالای باتری لیتیوم-یون در بین باتری ها از این باتری استفاده کردیم.

## ۷. مراجع

[1] R.J.Wai, W.H.Wang, C.Y.Lin, "High-performance stand-alone photovoltaic generation system," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no.1, pp. 240-250, Jan. 2008.

[2] J. J. Schoeman and J. D. Van Wyk, "A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays," in Proc. 13<sup>th</sup> Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf., pp. 361-367, Jun.1982.

[3] J. H. R. Enslin, M. S. Wolf, D. B. Snyman, and W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter,"

[4] N.Mutoh, T.Matuo. "Prediction-data-based maximum power point racking for photovoltaic power eneration system", In Proc. 3rd Anu. IEEE Power Electron, Spec. Conf., p. 1489- 1494, 202.

[5] S. Yuvarajan & S. Xu, "Photo-voltaic power converter with a simple maximumpower-point-tracker," in Proc. 203 Int. Symp. Circuits Syst., p. 39-402, 203.

[6] Vladimir V. R. Scarpa & Simone Buso & Giorgio Spiazzi", Low-Complexity MPT