# مدل‌سازی و بهینه‌سازی پالس شارژ باتری سربی - اسیدی

نویسنده: مجتبی شیرویی-mj.shiroei@gmail.com
علی مصلی نژاد alimosallanezhadmsc@gmail.com

**چکیده:** باتری‌ها از دیرباز یکی از بهترین ادوات ذخیره انرژی به حساب می‌آمده‌اند، اصول اساسی کارکرد باتری‌های قابل شارژ و غیرقابل شارژ واکنش‌های الکتروشیمیایی درون سلول می‌باشد. مهم‌ترین مسئله در کارایی باتری‌های مختلف شیوه‌ی شارژ و دشارژ می‌باشد، معمولاً روند دشارژ باتری را بار تعیین می‌کند اما روند شارژ بسیار در افزایش دمای باتری و همچنین در میزان طول عمر باتری بسیار مؤثر است. لذا شیوه‌های شارژ قدیمی باتری همچون جریان ثابت، ولتاژ ثابت و غیره افزایش دمای باتری و کاهش طول عمر علیرغم زمان شارژ طولانی، را به همراه دارد. در این مقاله روش شارژ کردن باتری به‌وسیله پالس مثبت و منفی بهینه بدون فیدبک گرفتن از میزان شارژ باتری انجام‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای باتری در زمان پالس منفی پایین می‌آید و به عبارتی باتری استراحت می‌کند، لذا افزایش طول عمر باتری در دمای کمتر واضح است.

**کلیدواژه:** مدار معادل الکتریکی باتری، پالس شارژ بهینه، شارژر سریع، شارژر بهینه

## ۱- مقدمه

از دیرباز بحث ذخیره انرژی یک موضوع پر چالش در بین محققین و دانشمندان در زمینه انرژی بوده است. در بین عناصر ذخیره‌ساز انرژی، باتری‌ها سهم زیاد و مهمی را ایفا می‌کنند. نیاز به ذخیره انرژی مقطعی باعث اختراع و تولید عمده باتری‌ها با تکنولوژی‌های مختلف شده است، تکنولوژی‌های مختلفی همچون سربی-اسیدی، لیتیوم-یونی و غیره. در زندگی روزمره به‌خصوص در خودروها و سیستم‌های توزیع انرژی باتری‌های سربی-اسیدی به علت قیمت مناسب و تعمیر و نگهداری راحت‌تر بیشتر موردتوجه قرارگرفته‌شده‌اند. باتری‌های سربی-اسیدی یکی از قدیمی-ترین عناصر ذخیره‌ساز انرژی محسوب می‌شوند. این نوع باتری‌ها تابه‌حال به دلیل قیمت پایین در مقابل انواع دیگر باتری در ظرفیت مشابه در حال استفاده هستند[۱]. این نوع باتری‌ها در خودرو الکتریکی، در سیستم انرژی بدون وقفه (UPS)[1] و سیستم ارتباطات استفاده می‌شوند[۲]. لذا مهم‌ترین مبحث در بهبود کارایی باتری‌های سربی-اسیدی بحث شارژ و دشارژ آن‌ها می‌باشد. باتری‌های سربی-اسیدی به دو دلیل در صنعت بیشترین استفاده را دارند:

۱) یک انتخاب مناسب بادوام بالا برای دستگاه‌های قابل‌حمل [۳،۴]

۲) مناسب جهت حرکت ماشین‌های الکتریکی هیبریدی [۵،۶]. البته زمان شارژ و عمر باتری وابستگی شدیدی به ویژگی‌های شارژ و دشارژ باتری دارد[۷،۸]. در بخش دوم این مقاله به معرفی انواع مدل‌سازی باتری‌های قابل شارژ اشاره می‌شود، با توجه به مزایای مدل مدار معادل الکتریکی این مدل انتخاب می‌شود. در بخش سوم به معرفی مدل مدار معادل پیشنهادی و روابط موجود پرداخته می‌شود. در بخش بعد با توجه به مدل‌سازی انجام‌شده، بهترین پالس شارژ به‌منظور شارژ سریع و افزایش عمر باتری به‌وسیله الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شود. در بخش آخر نتایج مربوط به شبیه‌سازی پالس بهینه موردبررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- انواع مدل‌های موجود باتری

به‌منظور تخمین زدن عملکرد باتری، یک مدل ریاضی نزدیک به کارکرد واقعی باتری موردنیاز است، در این بخش ابعاد مدل‌های موجود، فواید و کلیات هرکدام ارائه می‌شود و نهایتاً مناسب‌ترین مدل ازنظر سرعت و دقت انتخاب می‌شود.

مدل‌های بسیاری تابه‌حال به‌منظور پیش‌بینی عملکرد باتری ارائه‌شده است، برخی از این مدل‌ها عبارت‌اند از: مدل الکتروشیمیایی، مدل دینامیک سیال، مدل اجزای محدود و در آخر مدل مدار معادل الکتریکی

۱) مدل الکتروشیمیایی: الکتروشیمیایی شاخه‌ای از شیمی است که در آن عملکرد واکنش‌های شیمیایی مربوط به رسانایی الکترون همچون فلزات و نیم‌رساناها مطالعه می‌گردد. به‌طور خلاصه مدل الکتروشیمیایی عمدتاً بر واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش بین الکترودها و الکترولیت استوار است. در این مدل بر اساس سازگاری هر ماده در حلال و واکنش‌های الکتروشیمیایی براثر اتصال الکترودها بر بار خارجی و رفتار دینامیکی را مشخص می‌کند.

۲) مدل اجزای محدود: این مدل یک‌راه‌حل عددی به‌منظور یافتن جواب تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی یا انتگرالی می‌باشد، اساس این مدل در تقسیم مسئله به اجزای کوچک و آنالیز همه اجزا به‌صورت جداگانه و نهایتاً جمع‌کردن اجزا کوچک می‌باشد. مدل اجزای محدود اطلاعات خوبی از گرمای تلف‌شده و یا انرژی ارائه می‌دهد.

۳) روش دینامیک سیال: این روش تکنولوژی برای آنالیز فیزیکی و بهینه‌سازی جریان سیال، انتقال جرم و گرما و مسائلی از قبیل واکنش‌های شیمیایی در یک سیستم پیچیده می‌باشد، در مدل CFD[۲] باتری، معادلات حاکم دینامیکی نسبت به زمان، فضا و یا هر پارامتر وابسته دیگر حل می‌شوند.

۴) مدار معادل الکتریکی: یک مدل جایگزین مدار اولیه (اکثر مواقع پیچیده‌تر) معمولاً شامل عناصر خطی، پسیو که مشخصات سیستم اولیه را داشته باشد. به مدار معادل الکتریکی معروف است. در شاخه مهندسی برق، استفاده از مدار معادل الکتریکی به‌منظور ساده‌سازی عملکرد ادوات غیر ایده آل معمول است.

مدل الکتروشیمیایی مروری بر معادلات و فعالیت‌های درونی باتری تمرکز دارد، این مدل با هدف طراحی استفاده می‌شود و توضیح برخی پارامترها همچون مقاومت داخلی در مدل مشکل است و از همه مهم‌تر نبود اطلاعات الکتروشیمیایی باتری در این مقاله از این مدل استفاده‌نشده است و با توجه به زمان‌بر بودن مدل‌هایی همچون CFD و FEM [۳]، مدار معادل الکتریکی باتری قادر است با دقت و سرعت مناسب رفتار دینامیکی باتری را با چند بلوک ساده شبیه‌سازی کند.

## ۳- معادل‌سازی مدار معادل الکتریکی

در بخش قبل سه نوع مدل مختلف باتری برای اهداف مختلف با ویژگی‌ها و توانایی‌های مختلف ارائه شد و بیان شد که مدار معادل الکتریکی علیرغم توجه به ارتباط بین مدار داخلی و ویژگی‌های خارجی، می‌تواند به‌اندازه کافی تمام نیازهای پروژه را رفع می‌کند.

مدار معادل الکتریکی باتری با صرف زمان اندک منعکس‌کننده رفتار پویای اصلی یک باتری می‌باشد و با استفاده از اجزای الکتریکی همچون منابع ولتاژ متغیر با عنوان نیرومحرکه الکتریکی، مقاومت‌های متغیر به‌عنوان مقاومت داخلی و مقاومت اضافه ولتاژ و یک خازن به‌عنوان خازن باتری انجام می‌شود لذا ابتدا روابط موجود معرفی و بیان می‌شود سپس ارتباط بین روابط موجود در قالب مدار معادل بیان می‌شود[۹].

ظرفیت باتری بر اساس قانون پارگر مطابق با رابطه (۱) مشخص می‌شود.

$$C_o(I)=\frac{KC_{o*}}{1+(K_c-1)(I/I^*)^m} \qquad (۱)$$

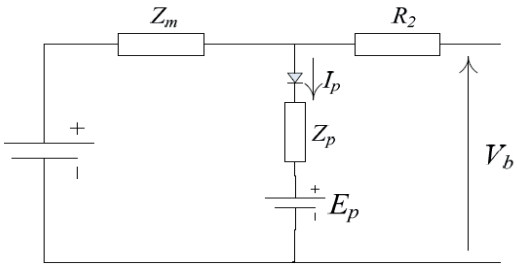
به‌طوری‌که $C_{o*}=C_o(I^*)$ ظرفیت در نرخ دشارژ مشخص می‌باشد، معمولاً ظرفیت نامی $C_{10}$ و $k_c$ ضرایب تجربی بوده و برای باتری‌های مختلف مقداری متفاوت است.

واضح است که دما بر ظرفیت باتری تأثیرگذار است[۱۰،۱۱]. لذا با دخیل دما در معادله ظرفیت خواهیم داشت.

$$C(I,\theta)=C_o(\mathrm{I})(1+\frac{\theta}{-\theta_f})^{\varepsilon} \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که $\theta_f$ دمای انجماد الکترولیت، $\theta$ دمای سلول، $C_o(\mathrm{I})$ ظرفیت باتری در جریان دشارژ I در دمای ۰ درجه بوده و $\varepsilon$ ثابتی مربوط به باتری می‌باشد.

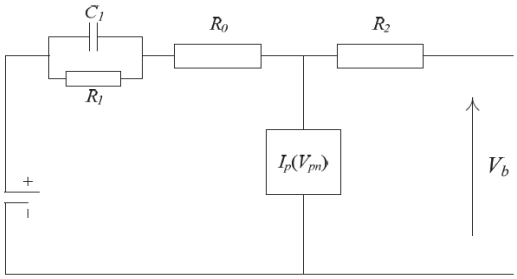
در شکل (۱) مدار معادل الکتریکی پیشنهادی باتری مشخص‌شده است در این مدل از دشارژ خودی به دلیل ۱۰ درصد در ماه بودن صرف‌نظر شده است.




شکل (۱) شبکه الکتریکی معادل باتری

در شکل (۱) $E_m$ در شاخه اصلی نشان‌دهنده پتانسیل باتری و $V_b$ ولتاژ ترمینال و $Z_m$ در شکل نشان‌دهنده امپدانس درونی که می‌تواند با بلوک R-C مدل شود.

طبیعی است که تمام انرژی در زمان دشارژ به باتری منتقل نمی‌شود، بخشی از انرژی به دلایلی همچون الکترولیز آب هدر می‌رود، لذا شاخه پارازتیک در شکل (۲) اضافه می‌شود تا این خاصیت لحاظ شود.




شکل (۲) شبکه الکتریکی معادل با $Z_m$ تقریبی

حالت شارژ و عمق شارژ باتری با روابط (۳) و (۴) مشخص می‌شود، البته روش‌های زیادی برای تخمین SOC در منبع [۱۲] پیشنهادشده است.

$$SOC = 1 - Q_e / C(O,\theta) \quad (۳)$$

$$DOC = 1 - Q_e / C(\mathrm{I}_{avg},\theta) \quad (۴)$$

به‌طوری‌که، $Q_e(t) = \int_0^t I(\sigma)\,\mathrm{d}\sigma$ میزان شارژی است که از باتری کشیده شده می‌باشد، $C(O,\theta)$ ظرفیت نامی باتری و $C(\mathrm{I}_{avg},\theta)$ مخزن ظرفیت واقعی تحت جریان شارژ و دشارژ خاص است.

و نیرومحرکه الکتریکی از فرمول معروف نرنست مطابق رابطه (۵) قابل‌محاسبه می‌باشد.

$$EMF = 2.041 + 0.0296\log_{10}\frac{\alpha(H^+)\alpha(SO_4^{2-})}{\alpha^2(H_2O)}$$

رابطه (۵) شامل روابط شیمیایی است که رابطه (۶) در مقالات و منابع مختلف جایگزین شده است.

$$E_m = E_{mo} - K_E(273+\theta)(1-SOC) \quad (۶)$$

به‌طوری‌که $E_{mo}$ و $K_E$ برای باتری مقداری ثابت است، $\theta$ دمای سلول و SOC حالت شارژ باتری می‌باشد.

مقاومت‌های لازم در مدار معادل مطابق روابط (۷) تا (۹) قابل‌محاسبه و جایگذاری است.

$$R_o = R_{oo}[1 + A_o(1-SOC)] \quad (۷)$$

$$R_1 = -R_{10}\ln(DOC) \quad (۸)$$

$$R_2 = R_{20}\frac{e^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1+\exp(A_{22}\,I_m/I^*)} \quad (۹)$$

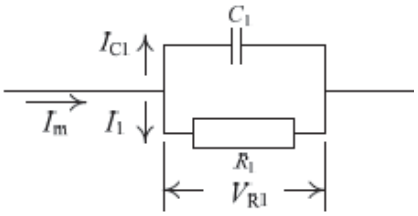
به‌طوری‌که $A_o$، $A_{21}$ و $A_{22}$ ثوابت مربوط به باتری می‌باشند، درحالی‌که $R_{oo}$، $R_{10}$، $R_{20}$ پارامترهای وابسته به SOH می‌باشد.

در زمان شارژ باتری شاخه پارازیتی به‌صورت رابطه‌ای بین جریان و ولتاژ مطابق (۱۰) مشخص می‌شود.

$$I_p = V_{pn}G_{po}\exp[\frac{V_{pn}}{V_{po}} + A_p(1-\frac{\theta}{\theta_f})] \quad (۱۰)$$

به‌طوری‌که $I_p$ جریان شاخه پارازیتی، $V_{pn}$ ولتاژ شاخه پارازیتی، $G_{po}$ ثابت در ثانیه، $V_{pn}$ ثابت در ولت، $A_p$ ثابت مربوط به نوع باتری می‌باشد.

شاخه R-C به‌صورت شکل (۳) قابل‌نمایش و به‌صورت رابطه (۱۱) قابل‌محاسبه است.




شکل (۳) بلوک R-C

$$C_{R1}(t) = \mathrm{R}_1(1-e^{-\frac{t}{\tau}})\mathrm{I}_m \quad (۱۱)$$

به‌طوری‌که $R_1C_1 = \tau$ ثابت زمانی مربوط به خازن می‌باشد.

## ۳-۱- رفتار حرارتی باتری

در زمان شارژ و دشارژ باتری جریان عبوری باعث تولید گرما می‌شود، با توجه به اهمیت دمای باتری، گرمای تولیدی در هرکدام از مدل‌های باتری باید لحاظ شود.

(۱۲)

$$P_s = I_p.V_{pn} + V_{R2}I + V_1^2/R_1 + I^2.R_o$$

با توجه به رابطه (۱۲) گرما و تلفات هر بخش جمع شده است، لذا معادله دینامیکی دمای سلول به‌صورت رابطه (۱۳) پیاده‌سازی می‌شود.

(۱۳)

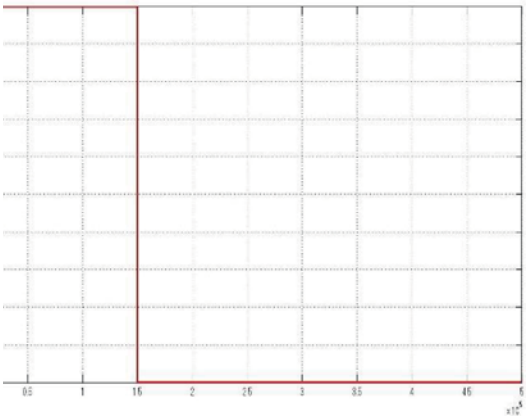
$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_a}{R_\theta} + P_s$$

به‌طوری‌که $C_\theta$ گرمای خازن، $R_\theta$ گرمای مقاومت بین باتری و محیط، $\theta$ دمای سلول و $\theta_a$ دمای محیط می‌باشد.

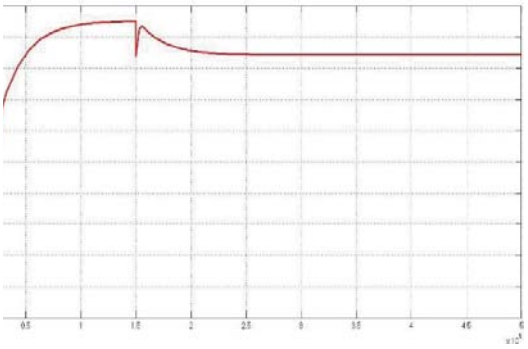
**جدول ۱ پارامترهای ثابت مربوط به باتری نمونه[۱۳]**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $I^*$ | ۵۱،۵ | $C_0$ | ۳۱۷،۹ **Ah** | $K_c$ | ۱،۱۱ |
| $\delta$ | ۱،۷۵ | $\tau$ | ۷۲۰۰ **s** | $A_0$ | -۰،۲ |
| $\theta_f$ | -۴۰ $^\circ C$ | $\varepsilon$ | ۱،۱۹ | $R_\theta$ | ۰،۲ |
| $\theta_f$ | -۴۰ $^\circ C$ | $\varepsilon$ | ۱،۱۹ | $E_{mo}$ | ۲،۱۸ **v** |
| $A_{21}$ | -۸ | $R_{20}$ | ۱۵ | $A_{22}$ | -۸،۴۵ |
| $V_{po}$ | ۰،۱ | $G_{po}$ | ۲ | $R_{10}$ | ۰،۲ |
| $R_{00}$ | ۲ | $A_p$ | ۲،۰ | $C_\theta$ | ۱۵ |
| $K_E$ | ۸،۸۳*۱۰$^{-۲}$ | | | | |

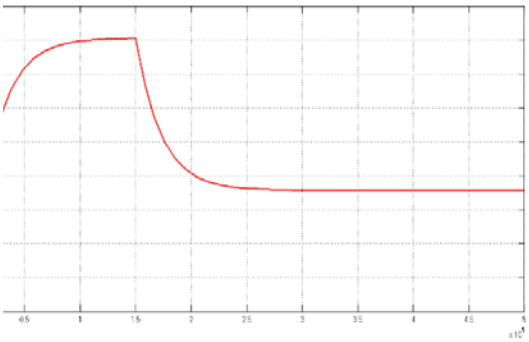
با اعمال پالس در حالت شارژ و دشارژ نتایج شبیه‌سازی پس از اعمال به مدل در زیر ارائه می‌شود.



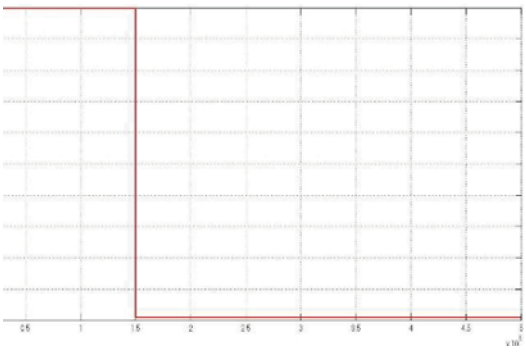
شکل (۴) پالس جریان شارژ تزریقی به باتری



شکل (۵) ظرفیت باتری در هنگام تزریق جریان شارژ



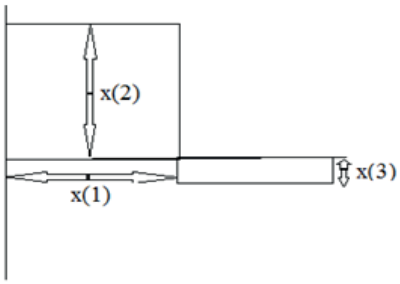
شکل (۶) تغییرات دمای باتری در هنگام شارژ



شکل (۷) تغییرات ولتاژ ترمینال باتری در هنگام شارژ

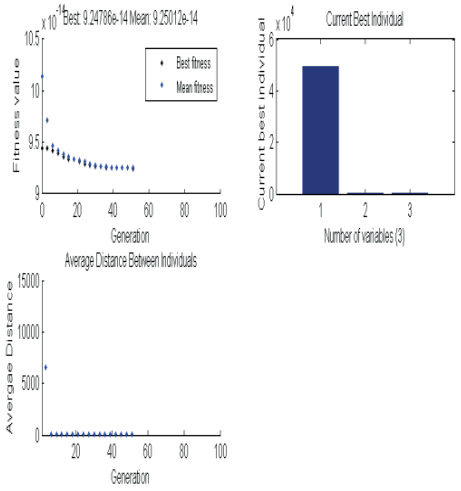
## ۴- بهینه‌سازی و اعمال پالس بهینه

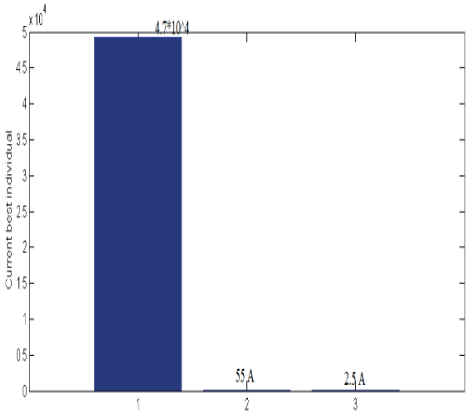
با توجه به اینکه در مقالات و منابع پیشین در همه زمینه-های بهینه‌سازی به‌صورت مفصل الگوریتم ژنتیک معرفی‌شده است. در این مقاله فقط الگوریتم ژنتیک به سیستم اعمال می‌شود و متغیرهای لازم در حل مسئله معرفی می‌شوند، درواقع اگر بخواهیم ابعاد یک پریود از پالس را به‌عنوان متغیر انتخاب کنیم، به‌صورت شکل (۸) متغیرهای قابل پیاده‌سازی در الگوریتم ژنتیک خواهند بود. با اعمال الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی بر روی سیستم باتری متغیرهای بهینه استخراج‌شده و در شکل (۹) نمایش داده‌شده‌اند.




شکل (۸) پالس اعمالی به سیستم باتری و مشخص‌سازی پارامترهای دخیل در بهینه‌سازی

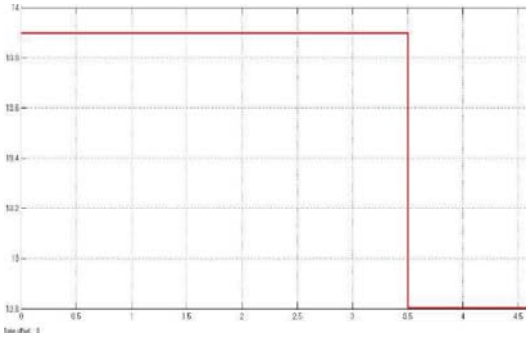
متغیرهای بهینه‌سازی خروجی الگوریتم ژنتیک به‌صورت شکل (۹) نمایش داده‌شده است.



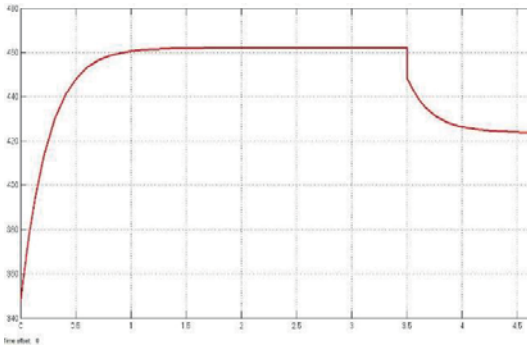




شکل (۹) نتایج خروجی بهینه‌سازی پالس اعمالی به باتری

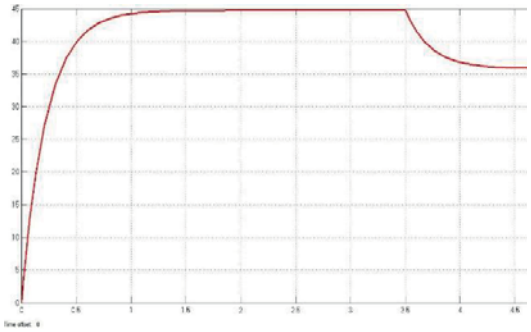
با اعمال پالس بهینه به مدل باتری، نتایج در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) مشخص‌شده است.



شکل (۱۰) ولتاژ ترمینال خروجی با اعمال پالس بهینه



شکل (۱۱) ظرفیت باتری با اعمال پالس بهینه به باتری



شکل (۱۲) افزایش دمای باتری با توجه به اعمال پالس بهینه

## ۵- نتیجه‌گیری

همان‌طوری که مشخص است در حالت پالس اولیه که به سیستم باتری اعمال می‌شود، دمای باتری تا حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالا رفته و پس از قطع به میزان حدود ۳۷ درجه برگشته است، اما در حالت دوم یعنی پالس با ابعاد بهینه، ماکزیمم دما به مقدار ۴۵ درجه محدودشده است، این با توجه به این مسئله است که ولتاژ ترمینال و ظرفیت باتری در هر دو مورد مشابه می‌باشد، لذا علیرغم سرعت شارژ مشابه هر دو پالس، با توجه به افزایش دمای باتری در حالت پالس بهینه، عمر باتری در حالت دوم بالاتر خواهد بود.

1-Uninterruptible Power Supplies
2- Comutational Fluid Dynamics Model
3- Finite Element Model

## ۶- مراجع

[1] J. Leao, L. Hartmann, M. Correa, and A. Lima, “Lead-acid battery modeling and state of charge monitoring,” *Applied Power Electronics Conference and Exposition APE), Twenty-Fifth Annual IEEE*, pp. 239– 243, 2010.
[2] M. W. P. Chagas, “Novas tecnologias para avaliação de baterias,” Mestrado Profissionalizante, IEP/LACTEC, 2007.
[3] Rao, Ravishankar, Sarma Vrudhula, and Daler N. Rakhmatov. "Battery modeling for energy aware system design." *Computer*36.12 (2003): 77-87.
[4] Pedram, M., & Wu, Q. (1999, June). Design considerations for battery-powered electronics. In *Proceedings of the 36th annual ACM/IEEE Design Automation Conference* (pp. 861-866). ACM.
[5] Lukic, Srdjan M., et al. "Energy storage systems for automotive applications." *IEEE Transactions on industrial electronics* 55.6 (2008): 2258-2267.
[6] Pesaran, A. A. “*Battery choices and potential requirements for plug-in hybrids*”. National Renewable Energy Laboratory (2007). .
[7] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekara, “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2237–2245, Jun. 2008.
[8] F. L.Mapelli, D. Tarsitano, andM. Mauri, “Plug-in hybrid electric vehicle: Modeling, prototype realization, and inverter losses reduction analysis,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 598–607, Feb. 2010.
[9] H. J. Bergveld, W. S. Kruijt, P. H. L Notten, *Battery Management Systems Design by Modeling*, Published by Kluwer Academic publishers, 2002.
[10] Manwell, J. F., & McGowan, J. G. “Lead acid battery storage model for hybrid energy systems”. *Solar Energy*, *50*(5), 399-405(1993).
[11] Mayer, D., & Biscaglia, S. “Modelling and analysis of lead acid battery operation”. In *Telecommunications Energy Conference, INTELEC'89. Conference Proceedings. Eleventh International* (pp. 23-3). IEEE1989.
[12] Piller, S., Perrin, M., & Jossen, A. “Methods for state-of-charge determination and their applications”. *Journal of power sources*, *96*(1), 113-120,2001.
[13] Ceraolo, M. New dynamical models of lead-acid batteries. IEEE transactions on Power Systems, 15(4), 1184-1190.