



Investigation of Temperature Distribution During Dynamic Stress Test on the Surface of Lithium-ion Battery used in an Electric Hybrid Vehicle

G.R. Molaeimanesh^{1*}, S.M. Mousavi-Khoshdel², A.B. Nemat¹

¹ School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

² Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: There are two major challenges for today's world: urban air pollution and the concern that fossil fuels will end, which forces humans to replace fossil fuels sources with renewable energy sources; the automobile industry can have a key role in tackling of both challenges. To overcome these challenges, during the last decade, the development of electric vehicles has been on the agenda for the automotive industry. Lithium-ion rechargeable batteries play a vital role in these vehicles. The performance, safety and life of these batteries are very much affected by their operating temperature. In this study, with the help of experimental data, a lithium-ion battery cell is simulated using the ANSYS Fluent software via a two-potential model. The time variations of the voltage and maximum cell temperature along with the temperature distribution at four constant discharge rates of 2C, 3C, 7C, and 9C and the discharge profile of dynamic stress test -which is a special profile used for testing hybrid vehicles battery systems- are presented. The simulation results indicate that high temperatures as 45 °C are also experienced during the dynamic stress test. Such a temperature which could lead to a battery thermal runaway would be a hazard to the battery and electric vehicle.

Review History:

Received: 13 May 2018

Revised: 14 Nov. 2018

Accepted: 15 Nov. 2018

Available Online: 15 Jan. 2019

Keywords:

Air pollution

Electric vehicles

Renewable energy

Lithium batteries

Battery simulation

1- Introduction

In recent years, the electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell vehicles are commercializing to replace the conventional vehicles [1]. These vehicles have a battery as part of their energy storage. In this regard, lithium batteries are more important than other types of batteries due to their energy density and high power density. Nevertheless, these batteries are very sensitive to operating temperatures and need to be used at a specific temperature range. The high operating temperature of these batteries can directly reduce their service life and even create unbreakable combustion and fire. For this reason, researchers have conducted research on battery thermal management systems, and each has provided solutions for this purpose, and some of them are referred to below. In the air-cooled cooling thermal management system, Chen et al. [2] optimized the dimensions of the air-conducting channel on the batteries using a Computational Fluid Dynamics (CFD) model. In this regard, it can be noted that Lu et al. [3] pointed to the increase in the heat transfer rate between the batteries and the air by simulating the flow of air from the batteries at different rates of flow and different passageways, This results in a decrease in the maximum temperature of the batteries and an improvement in the temperature difference between the batteries. Qian et al. [4] examined the cooling system using a liquid passing through the mini-channels around the battery and, during the simulation of their numerical model, observed that the use of this method can keep the temperature of the batteries in the range of 300 to 312 Kelvin. Greco and Jiang

[5] investigated the thermal and electrochemical attribute of a cylindrical lithium-ion battery and in the cooling system they have used composite phase change material, they found that the use of an inactive cooling system can create an appropriate uniform temperature uniformity in battery cells without energy consumption. Using the inactive cooling system, the use of a heat pipe by Zhao et al. [6] has been investigated experimentally. One of the major problems of the inactive thermal management systems is the lack of control in cooling process. To overcome this problem, hybrid cooling systems have been suggested to combine both active and inactive cooling methods. In this regard, we can mention the research by Rao et al. [7] who studied the combination of a cooling system of phase-change material and mini-channels to improve the cooling system of the battery. It should be noted, that the hybrid cooling systems have high power to control the temperature of the battery and the benefits of both active and inactive methods.

2- Numerical method

One of the best sub models to simulate the dynamic behavior of the battery is the NTGK model, which was designed based on the Newman Tiedemann, Gu and Kim research [8, 9]. Because of the heat generated in the battery, it depends on the voltage and current, so in the two-potential model, the two main Eqs. (1) and (2) are solved for the battery [8].

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial T} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} \quad (1)$$

*Corresponding author's email: nozar@ssau.ac.ir



$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) &= -(j_{ECh} - j_{short}) \\ \nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) &= j_{ECh} - j_{short} \end{aligned} \quad (2)$$

σ_+ and σ_- , effective electrical conductivity for positive and negative poles, φ_+ and φ_- , Phase potential for positive and negative poles, j_{ECh} and \dot{q}_{ECh} , respectively the discharge rate of the volumetric flow and the heat generated by the chemical reaction, j_{short} and \dot{q}_{short} respectively the transmission of heat and flow is due to short circuit in the battery. It is necessary to mention that j_{ECh} and \dot{q}_{ECh} can be calculated in different ways and \dot{q}_{short} , j_{short} typically is considered as zero. Because the short circuit does not normally occur within the battery. In the NTGK electrochemical model, the volumetric discharge rate can be calculated by Eq. (3) [10].

$$j_{ECh} = aY [U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \quad (3)$$

In recent equation a is specific electrode area, Y and U

Are model parameters which are a function of the discharge depth. Eq. (4) is used to calculate the discharge depth.

$$DoD = \frac{Vol}{3600Q_{Ah}} \left(\int_0^t j dt \right) \quad (4)$$

Vol is volume of a battery, Q_{Ah} is the total capacity of the battery in Amps-hours. The parameters Y and U can be calculated by Eqs. (5) and (6).

$$Y = \left(\sum_5^{n=0} a_n (DoD)^n \right) \exp \left[C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (5)$$

$$U = \left(\sum_5^{n=0} b_n (DoD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (6)$$

where C1 and C2 are constant number on the NTGK model. After calculating j_{ECh} the heat produced by the electrochemical reaction can be calculated from Eq. (7).

3- Results and Discussion

In this section, first, temperature distribution on the cell surface will be monitored for a few fixed discharge rates, and then the temperature distribution will be presented during the dynamic stress test. It should be noted that in all discharges, the ambient temperature is considered to be 300 Kelvin. The below figure shows the maximum cell surface temperature during discharge with different rates. As shown in this figure, over time, the maximum cell temperature increases for all expansion rates, however, the slope of this increase has declined over time and generally tends to be constant. It can also be concluded from this figure that at discharge rates lower than 4C (1C is the discharge rate by which all the

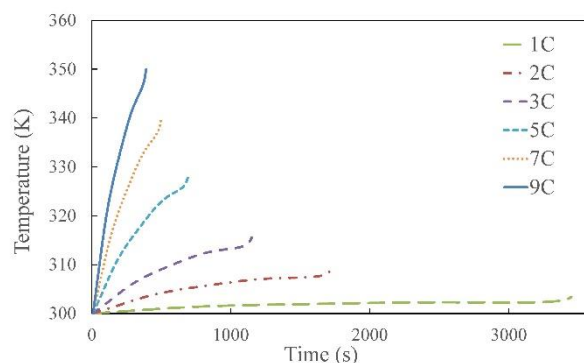


Fig. 1. Maximum cell surface temperature (in Kelvin) with different discharge rates

battery electrical charge is drained in 1 hr.), the increase in cell surface temperature is not appreciable. So that the maximum temperature of the surface with 1C rate has 1 Kelvin increase and with 3C rate has 8 Kelvin increase. In another view, it can be seen that the increase in discharge rate greater than 4C, the surface temperature rises sharply. So, at discharge rate of 9C, the maximum temperature reaches 337 Kelvin. This increase in temperature confirms the early deterioration of batteries during high discharge.

4- Conclusions

In this study, with the help of experimental data, a lithium-ion battery cell was simulated using the Ansys/Fluent software as a two-potential model and a sub-model of NTGK, And time variations of the voltage and maximum cell temperature along with the temperature distribution at four constant discharge rates 2C, 3C, 7C and 9C was presented, the discharge profile was variable with dynamic stress (hybrid vehicle battery special test. The results of this survey show that whatever the rate of battery discharge increases, the amount of heat generated in the battery will be higher and as mentioned earlier, one of the key factors in reducing battery life is the high heat buildup which causes the electrochemical processes in the battery to be damaged and thus reduce battery life. Therefore, it is recommended that, due to the physical and electrochemical nature of the battery, the discharge rate of the batteries should be 2C or 3C to prevent damage to the battery. Also, high temperatures such as 45 degrees Celsius are also observed during the dynamic stress test, which can lead to rapid and risky exhaustion. Thus, in order to prevent damage to the battery of a hybrid vehicle, it is imperative that an effective thermal management system be used.

References

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, CRC press, (2018).
- [2] K. Chen, S. Wang, M. Song, L. Chen, Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system, International Journal of Heat and Mass Transfer, 111 (2017) 943-952.
- [3] Z. Lu, X. Meng, L. Wei, W. Hu, L. Zhang, L. Jin, Thermal management of densely-packed EV battery with forced air cooling strategies, Energy Procedia, 88 (2016) 682-

- 688.
- [4] Z. Qian, Y. Li, Z. Rao, Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling, *Energy Conversion and Management*, 126 (2016) 622-631.
- [5] A. Greco, X. Jiang, A coupled thermal and electrochemical study of lithium-ion battery cooled by paraffin/porous-graphite-matrix composite, *Journal of Power Sources*, 315 (2016) 127-139.
- [6] R. Zhao, J. Gu, J. Liu. An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 273 (2015) 1089-1097.
- [7] Z. Rao, Q. Wang, C. Huang, Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system, *Applied Energy*, 164 (2016) 659-669.
- [8] G.H. Kim, K. Smith, K.J. Lee, S. Santhanagopalan, A. Pesaran. Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales, *Journal of the Electrochemical Society*, 158 (2011) A955-A969.
- [9] H. Gu, Mathematical analysis of a Zn/NiOOH cell, *Journal of The Electrochemical Society*, 130(1983) 1459-1464.
- [10] K.H. Kwon, C.B. Shin, T.H. Kang, C.S. Kim. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery, *Journal of Power Sources*, 163 (2006) 151-157.



بررسی توزیع دما طی تست تنش دینامیکی بر روی سطح باتری لیتیوم-یون بکار گرفته شده در یک خودروی هیبرید الکتریکی

غلامرضا مولایی منش^{۱*}، سید مرتضی موسوی خوشدل^۲، امیر بهادر نعمتی^۱

^۱ دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

^۲ دانشکده شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۸/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

کلمات کلیدی:

آلودگی هوا

خودروهای الکتریکی

انرژی‌های تجدیدپذیر

باتری‌های لیتیوم-یون

شبیه سازی باتری

خلاصه: دو چالش بزرگ دنیای امروز، آلودگی هوای شهرها و نگرانی از روبه پایان نهادن سوخت‌های فسیلی است که بشر را ناگزیر به جایگزین کردن منابع تجدیدناپذیر سوخت با منابع تجدیدپذیر انرژی می‌کند. در هر دو زمینه، صنعت خودرو نقش قابل توجهی دارد. جهت غلبه بر چالش‌های مذکور، طی دهه اخیر توسعه خودروهای الکتریکی در دستور کار صنعت خودرو بوده است. در این خودروها باتری‌های قابل شارژ لیتیوم-یون نقشی اساسی ایفا می‌کنند. کارایی، ایمنی و عمر این باتری‌ها بسیار متأثر از دمای عملکردی آنها است. در این پژوهش به کمک داده‌های تجربی یک سلول باتری لیتیوم-یون منشوری با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلونت به صورت یک مدل دو پتانسیلی شبیه سازی می‌گردد و تغییرات زمانی ولتاژ و دمای ماکزیمم سلول به همراه توزیع دما طی چهار نرخ دشارژ ثابت $۲C$ ، $۳C$ ، $۷C$ و $۹C$ (نرخ دشارژ $۱C$ معادل نرخ جریانی است که کل بار الکتریکی باتری را طی یک ساعت تخلیه می‌نماید) و نیز طی پروفیل دشارژ متغیر با زمان تست تنش دینامیکی (تست ویژه باتری خودروی هیبریدی) در بازه‌های مختلف ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از شبیه سازی بیان‌گر آن است که دماهای بالایی نظیر ۴۵ درجه سانتیگراد نیز در طی تست تنش دینامیکی تجربه می‌شود. چنین دمایی علاوه بر اینکه می‌تواند منجر به فرسودگی سریع باتری شود، می‌تواند مخاطره آفرین نیز باشد.

۱- مقدمه

ایجاد احتراق و آتش‌سوزی غیر قابل مهار شود. به همین دلیل پژوهشگران بر روی سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری تحقیقاتی را انجام داده‌اند و هر کدام راه حل‌هایی را برای این منظور ارائه داده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. در سیستم خنک کاری باتری با استفاده از هوا که اصطلاحاً به آن هوا خنک گفته می‌شود چن^۱ و همکارانش [۲] ابعاد کانال هدایت کننده‌ی هوای عبوری بر روی باتری‌ها را با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی^۲ بهینه سازی نمودند. در همین رابطه می‌توان به پژوهش لو^۲ و همکارانش [۳] در رابطه با افزایش نرخ انتقال حرارت عبوری بین باتری‌ها و هوا از طریق شبیه سازی جریان هوای عبوری از روی باتری‌ها با نرخ دبی‌های متفاوت و مسیرهای عبوری مختلف اشاره نمود که نتیجه آن کاهش بیشینه دمای ایجاد شده در باتری‌ها و بهبود اختلاف دمای بین باتری‌ها را نشان می‌دهد. کوآن^۴ و همکاران [۴] سیستم خنک کاری با استفاده از مایع عبوری از درون مینی کانال‌های اطراف باتری را بررسی

اختراع خودرو تحول عمیقی را در زندگی بشر ایجاد کرده است و جامعه بشری را دگرگون ساخته است. این صنعت امروزه ستون فقرات اقتصاد جهانی را تشکیل می‌دهد و بیشترین اشتغال‌زایی را به طور مستقیم یا غیرمستقیم به دنبال خود دارد. از سوی دیگر تعداد بسیار زیاد خودروها باعث بروز مشکلات جدی مانند گرمایش زمین، تولید آلاینده‌ها و به علاوه کاهش شدید و جدی منابع فسیلی شده است. به این دلیل در سال‌های اخیر ایده‌ی خودروهای تمام الکتریکی، هیبرید الکتریکی و پیل سوختی مطرح شده‌اند تا جایگزینی برای خودروهای احتراق داخلی شوند [۱]. این خودروها دارای باتری به عنوان بخش ذخیره ساز انرژی در قوای محرکه خود هستند. در این ارتباط، باتری‌های لیتیومی به دلیل چگالی انرژی و چگالی توان بالایشان بیش از سایر انواع باتریها مورد توجه می‌باشند. با این وجود، این باتری‌ها نسبت به دمای عملکردی بسیار حساس‌اند و لازم است که در یک بازه دمایی خاص مورد استفاده قرار گیرند. بالا بودن دمای عملکردی این باتری‌ها می‌تواند به طور مستقیم سبب کاهش عمر آنها گردد و حتی باعث

1 Chen

2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

3 Lu

4 Qian

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: molaeimanesh@iust.ac.ir

طی یک بررسی عددی توزیع دما را بر روی سطح یک باتری لیتیومی منشوری برای سه نرخ دشارژ C۲، C۹ و C۱۵ ارائه نمودند. همان گونه که مشاهده می‌شود در اغلب این بررسی‌ها نرخ دشارژ سلول یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است، حال آنکه در یک پک باتری مورد استفاده در یک خودروی برقی نرخ دشارژ سلول‌ها بسیار متغیر نسبت به زمان می‌باشد.

با توجه به بررسی نویسندگان این مقاله، تاکنون توزیع دما بر روی سطح یک سلول لیتیومی منشوری با پروفیل نرخ دشارژ تست تنش دینامیک^۴ (تست تنش دینامیک یک رویه‌ی استاندارد برای نرخ دشارژ باتری در خودروهای هیبریدی است) ارائه و بررسی نشده است. از این‌رو در این پژوهش یک سلول لیتیومی منشوری توسط نرم‌افزار انسیس فلونت^۵ برای نرخ دشارژ متغیر با زمان تست تنش دینامیک شبیه‌سازی خواهد شد و توزیع دما بر روی سطح آن ارائه خواهد گردید. در نرم‌افزار انسیس فلونت نسخه‌ی ۱۶ امکانات جدید برای بررسی باتری‌های لیتیوم-یون فراهم شده است که می‌تواند باتری را به صورت تک پتانسیلی^۶ و دو پتانسیلی^۷ شبیه‌سازی کند. مدل تک پتانسیلی مدلی بسیار ساده می‌باشد و تنها برای شبیه‌سازی یک سلول به کار می‌رود و توسط این مدل نمی‌توان باتری شامل چند سلول و همچنین پدیده‌های الکتروشیمیایی درون باتری را مدل نمود. اما مدل دو پتانسیلی بسیار جامع‌تر بوده و مشکلات مدل تک پتانسیلی در آن رفع گردیده است. مدل دو پتانسیلی خود دارای چندین زیر مدل می‌باشد که بر حسب نیاز و هدف می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. در این پژوهش از مدل دو پتانسیلی NTGK استفاده شده است.

۲- روش عددی

۲-۱- مدل‌سازی سلول باتری

یکی از بهترین زیر مدل‌ها جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیک باتری، مدل NTGK است که بر اساس تحقیقات نیومن^۸ تیدمن^۹، جو^{۱۰} و کیم^{۱۱} طراحی گردید [۱۲ و ۱۳]. از آنجایی که در باتری حرارت به وجود آمده به ولتاژ و جریان وابسته است، از این‌رو در مدل دو پتانسیلی روابط اصلی (۱) و (۲) برای باتری حل می‌گردد [۱۲].

نمودند و در طی شبیه‌سازی مدل عددی خود مشاهده کردند که استفاده از این روش می‌تواند دمای باتری‌ها را در محدوده‌ی ۳۰۰ تا ۳۱۲ کلوین نگه دارد. گرکو و ژیانگ^۱ [۵] در پژوهشی به بررسی حرارتی و الکتروشیمیایی باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای پرداختند و در سیستم خنک کاری از مواد تغییر فازدهنده‌ی کامپوزیتی استفاده نمودند و دریافتند که استفاده از سیستم خنک کاری غیر فعال می‌تواند یکنواختی دمایی مناسبی را در سلول باتری بدون مصرف انرژی ایجاد نماید. در رابطه با استفاده از سیستم خنک کاری غیر فعال استفاده از لوله‌ی حرارتی^۲ توسط ژائو و همکارانش [۶] با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مشکلات بزرگ سیستم‌های مدیریت حرارتی غیر فعال باتری کنترل‌ناپذیر بودن فرآیند خنک کاری می‌باشد. برای رفع این مشکل استفاده از سیستم‌های خنک کاری ترکیبی^۳ که ترکیب دو روش خنک کاری فعال و غیرفعال است، پیشنهاد شده است که در این رابطه می‌توان به پژوهش رائو و همکارانش [۷] اشاره کرد که سیستم خنک کاری ترکیبی، مواد تغییر فاز دهنده و مینی کانال‌ها را جهت بهبود خنک کاری باتری مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. البته لازم به ذکر است که سیستم‌های خنک کاری ترکیبی از قدرت بالایی جهت کنترل دمای باتری برخوردارند و مزایا هر دو روش فعال و غیرفعال را دارا هستند.

در طراحی تمامی انواع سیستم‌های مدیریت حرارتی لازم است که در ابتدا رفتار حرارتی باتری به خوبی شناخته و درک گردد [۸]. به خصوص توزیع دما در حالت فاقد سیستم مدیریت حرارتی (یعنی دفع حرارت صرفاً از طریق جابه‌جایی طبیعی با هوا) می‌تواند نشان‌گر نقاط حساس‌تر سطح باتری که نیازمند خنک کاری بیشتری می‌باشند، باشد. در این زمینه، یعنی یافتن توزیع دما بر روی سطح باتری، برخی کارهای تجربی و عددی صورت پذیرفته‌اند. در پژوهشی پانچال و همکاران [۹] کانتورهای توزیع دما بر روی سطح یک سلول لیتیومی منشوری را برای چهار مقدار مختلف نرخ دشارژ ۱C، ۲C، ۳C و ۴C به صورت تجربی ارائه نمودند. شایان ذکر است که منظور از نرخ دشارژ، جریان الکتریکی نرمال شده بر اساس ظرفیت باتری می‌باشد، بدین معنی که مثلاً ۱C نرخ دشارژی معادل جریان الکتریکی‌ای است که شارژ باتری را طی یک ساعت خالی می‌نماید و یا ۲C نرخ دشارژی معادل جریان الکتریکی‌ای است که شارژ باتری را طی نیم ساعت تخلیه می‌نماید. در پژوهش دیگری [۱۰] ایشان توزیع دما را برای دو مقدار مختلف نرخ دشارژ ۲C و ۴C با استفاده از شبیه‌سازی عددی ارائه نمودند. دارکوویچ و همکاران [۱۱]

4 Dynamic Stress Test (DST)
5 ANSYS Fluent
6 Single-Potential
7 Dual-Potential
8 Newman
9 Tiedemann
10 Gu
11 Kim

1 Greco and Jiang
2 Heat Pipe
3 Hybrid

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DoD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (۶)$$

که در آن C_1 و C_2 ثابت مدل NTGK است. پس از به دست آوردن J_{ECh} ، حرارت تولید شده توسط واکنش الکتروشیمیایی را می‌توان از رابطه (۷) محاسبه نمود:

$$\dot{q}_{ECh} = J_{ECh} \left[U - (\varphi_+ - \varphi_-) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (۷)$$

۲-۲- صحت آزمایشی مدل

در این بررسی یک سلول لیتیومی منشوری به ابعاد $۱۴/۵ \times ۱۹/۲ \times ۵/۴$ میلی‌متر مکعب به همراه دو تب، هر یک به ابعاد $۴۵ \times ۴۵ \times ۵/۴$ میلی‌متر مکعب شبیه‌سازی گردیده است. پس از انجام بررسی استقلال حل از اندازه مش، تعداد تقریبی ۲۰۰۰ سلول محاسباتی جهت تولید مش انتخاب گردیده است. در کلیه شبیه‌سازی‌ها شرط مرزی جابه‌جایی طبیعی با محیط با دمای ۳۰۰ کلونین انتخاب شده است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مقدار $W/m^2 K$ انتخاب شده است. تمامی سطوح جانبی سلول باتری غیر رسانایی الکتریکی در نظر گرفته شده است.

پس از تنظیمات لازم و وارد نمودن مشخصات باتری نیاز است که مقدار پارامتر U و Y نشان داده شده در رابطه (۳) مشخص شود تا مدل کارایی لازم را پیدا کند (در اصطلاح برای سلول مذکور کالیبره شود). از اینرو نمودارهای دشارژ بدست آمده توسط آزمایش بوسیله فایل نوشتاری وارد نرم‌افزار می‌شود تا با فیت نمودن نمودار، پارامترهای U و Y بدست آید. اگر فیت کردن به صورت درست انجام شود، نمودارهای دشارژ بدست آمده از مدل باید با نمودارهای دشارژ آزمایشگاهی منطبق بشود. برای این منظور ابتدا مدل باتری با نرخ جریان $۱C$ ، $۲C$ ، $۳C$ ، $۴C$ ، $۷C$ و $۹C$ دشارژ می‌شود که این نمودارها در شکل ۱ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود نمودارهای بدست آمده توسط نرم‌افزار با نمودارهای تجربی [۱۵] انطباق بسیار خوبی دارد.

تا به اینجا معلوم گردید که نمودارها به خوبی فیت گردیده و در نتیجه پارامترهای U و Y با دقت بالایی محاسبه محاسبه شده است. در این مرحله نیاز است از اتصالات الکتریکی اطمینان حاصل کرد. اگر اتصالات به درستی صورت گرفته باشد، جریان خارجی باید از قطب مثبت به منفی و جریان

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial T} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \quad (۱)$$

$$\sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -(J_{ECh} - J_{short}) \quad (۲)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = J_{ECh} - J_{short}$$

که در آن σ_+ و σ_- رسانایی الکتریکی موثر برای قطب مثبت و منفی، φ_+ و φ_- پتانسیل فاز برای قطب مثبت و منفی، J_{ECh} و \dot{q}_{ECh} به ترتیب نرخ انتقال جریان حجمی و حرارت ناشی از واکنش شیمیایی، J_{short} و \dot{q}_{short} به ترتیب نرخ انتقال جریان و حرارت به وجود آمده در اثر اتصال کوتاه درون باتری می‌باشد. لازم به ذکر است که J_{ECh} و \dot{q}_{ECh} به روش‌های مختلف قابل محاسبه است و J_{short} و \dot{q}_{short} به طور معمول صفر در نظر گرفته می‌شود، زیرا در حالت عادی درون باتری اتصال کوتاه رخ نمی‌دهد. در مدل الکتروشیمیایی NTGK، نرخ انتقال جریان حجمی توسط رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشد [۱۴].

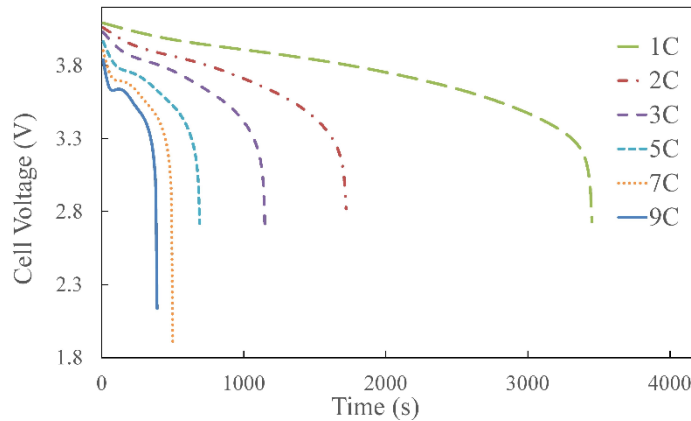
$$j_{ECh} = aY [U - (\varphi_+ - \varphi_-)] \quad (۳)$$

که در آن a مساحت مخصوص الکتروود و Y و U پارامترهای مدل است که تابعی از عمق دشارژ می‌باشد. برای محاسبه عمق دشارژ از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$DoD = \frac{Vol}{3600 Q_{Ah}} \left(\int_0^t j dt \right) \quad (۴)$$

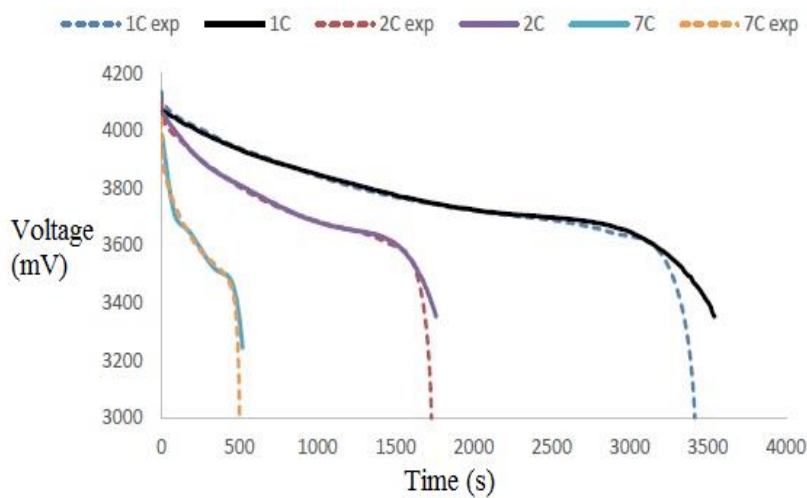
که منظور از Vol حجم باتری و Q_{Ah} ظرفیت کل باتری برحسب آمپر - ساعت می‌باشد. پارامترهای U و Y توسط روابط (۵) و (۶) قابل محاسبه است. لازم به ذکر است که برای یک باتری می‌توان نمودار دشارژ را توسط روش‌های آزمایشگاهی بدست آورد و توسط فیت کردن نمودارها، پارامترهای U و Y را بدست آورد که این روش در این بررسی به کار رفته است.

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DoD)^n \right) \exp \left[C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (۵)$$



شکل ۱: نمودار دشارژ با نرخ دشارژ متفاوت توسط نرم‌افزار فلونت

Fig. 1. Discharge diagram for different discharge rates in ANSYS Fluent



شکل ۲: مقایسه نمودار بدست آمده از انسیس فلونت با نمودار تجربی

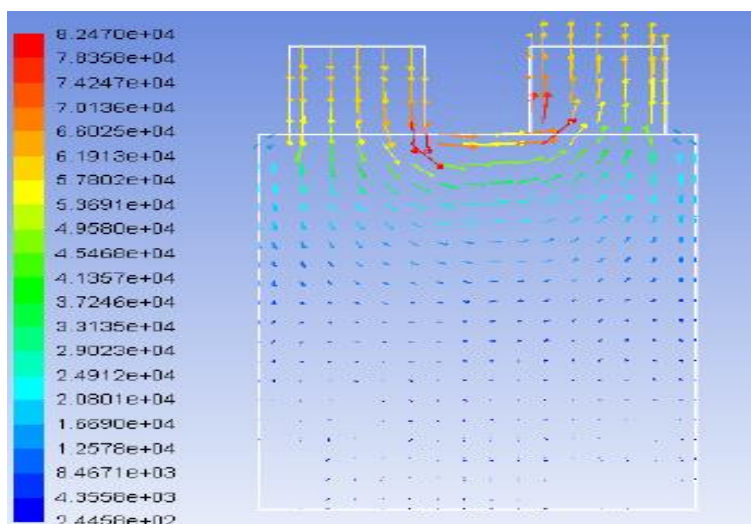
Fig. 2. Comparison of the obtained discharge graphs from ANSYS Fluent with experimental diagrams (Dashed curves)

کلوین در نظر گرفته شده است. شکل ۴ ماکزیمم دمای سطح سلول را در طول دشارژ با نرخ جریان متفاوت نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، با گذشت زمان ماکزیمم دمای سلول برای تمامی نرخ دشارژها افزایش می‌یابد، لیکن شیب این افزایش با گذشت زمان کاهش یافته و عموماً به یک مقدار ثابت (پایا) میل می‌کند. همچنین، از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که در نرخ‌های جریان کمتر از 4 C ، افزایش دمای سطح سلول محسوس نمی‌باشد. به گونه‌ای که دمای ماکسیمم دمای سطح با نرخ جریان 1 C به اندازه 1 کلوین و با جریان 3 C ، 8 کلوین افزایش یافته

داخلی از قطب منفی به مثبت صورت گیرد. همان طوری که در شکل ۳ دیده می‌شود بردارهای جریان جهت گیری مناسبی دارند که این نشان دهنده درستی اتصالات می‌باشد.

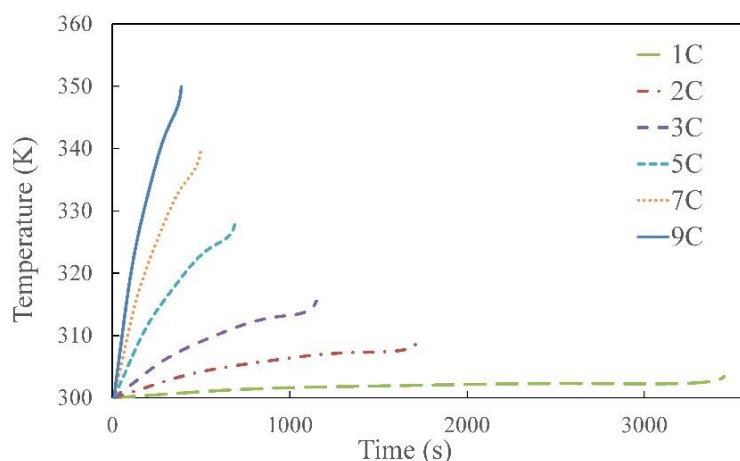
۳- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا توزیع دما بر روی سطح سلول به ازای چند نرخ دشارژ ثابت بررسی خواهد شد و سپس توزیع دما طی تست تنش دینامیک ارائه خواهد گردید. لازم به ذکر است در کلیه دشارژها، دمای محیط 300



شکل ۳: بردارهای جریان الکتریکی درون سلول

Fig. 3. Intracellular electrical current vectors



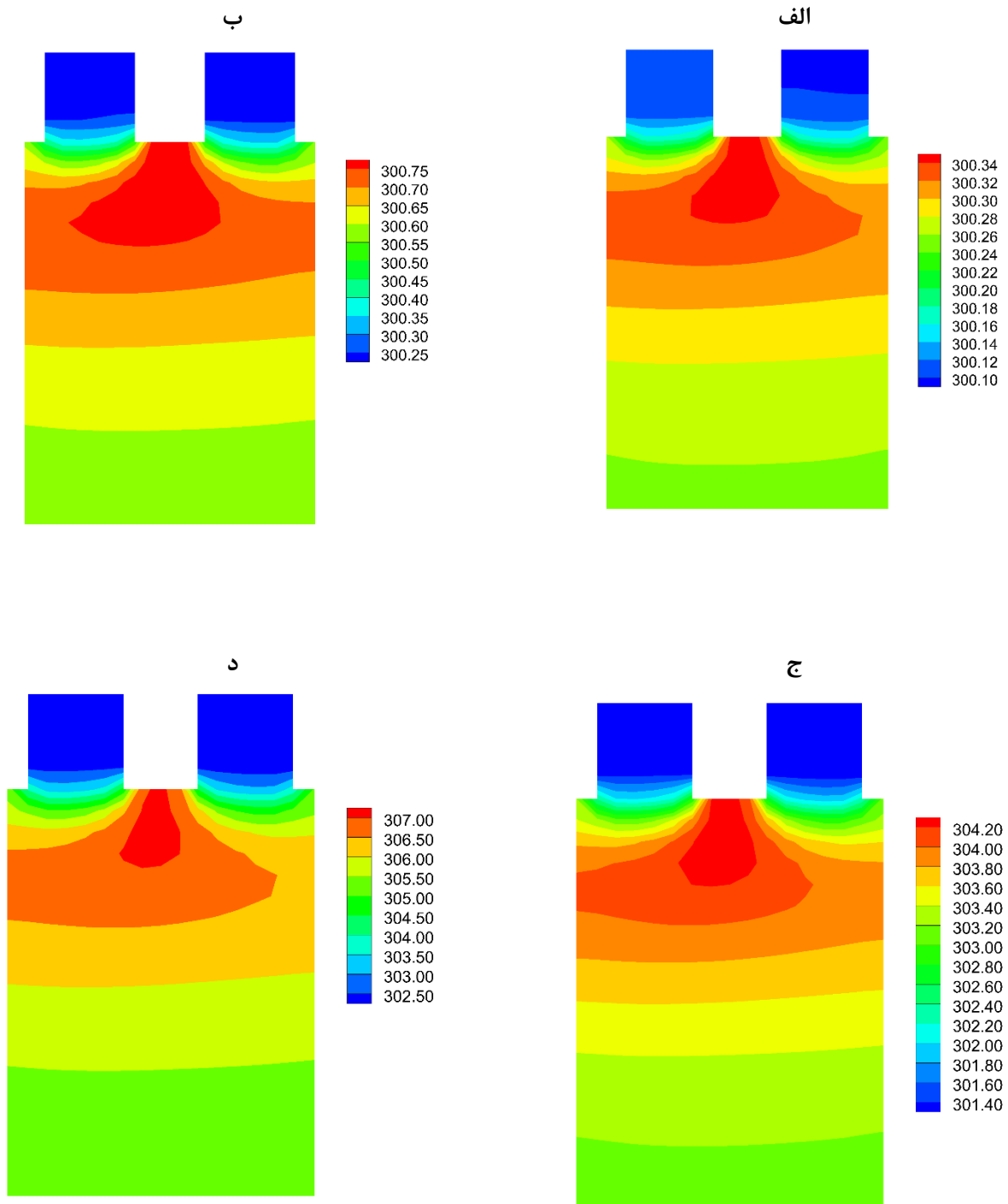
شکل ۴: ماکسیمم دمای سطح سلول (بر حسب کلونین) با نرخ دشارژ متفاوت

Fig. 4. Maximum cell surface temperature (in Kelvin) for different discharge rates

افزایش نرخ دشارژ دمای سطح سلول افزایش قابل ملاحظه ای می‌یابد. همان‌گونه که از شکل‌های ۵ تا ۹ پیداست، در دشارژ، محل اتصالات خارجی (تب‌ها) سردترین نقاط سلول را تشکیل می‌دهند، چرا که در این محل‌ها واکنش شیمیایی رخ نمی‌دهد و عامل تولید حرارت در آن‌ها صرفاً مقاومت اهمیک در برابر جریان الکتریکی می‌باشد. همچنین بیشینه دما بر روی سطح در نرخ جریان پایین (۲C و ۳C)، بیشتر محدود به سطح بالایی سلول می‌باشد. در صورتی که در نرخ جریان بالا، بیشینه دما از سطح بالایی کمی به سمت سطح زیرین میل می‌کند. علت این امر آن است که با افزایش

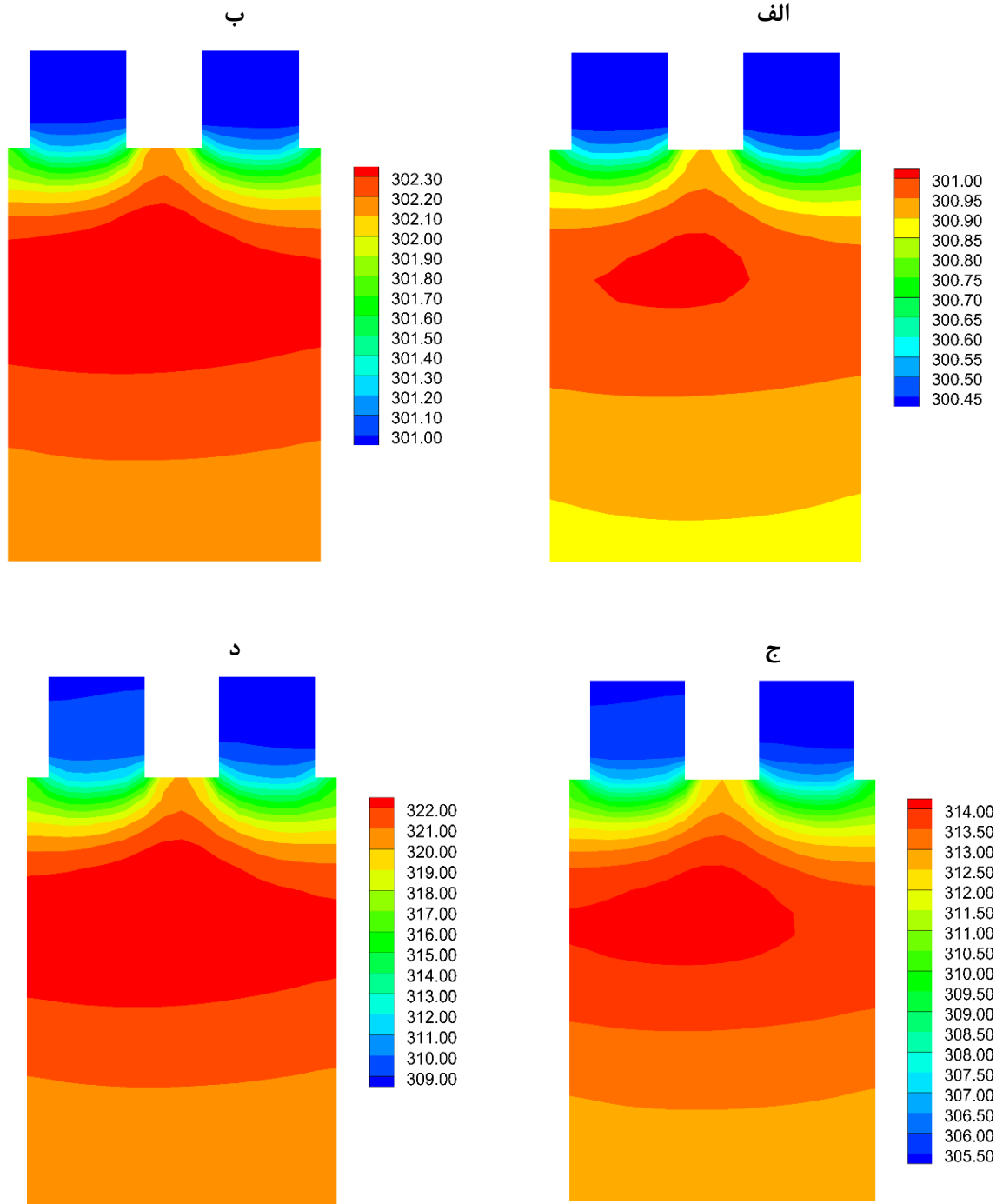
است. با نگاه دیگر به این شکل می‌توان مشاهده نمود که افزایش نرخ جریان بیش از ۴C، دمای سطح به شدت افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در نرخ جریان ۹C، ماکسیمم دما به ۳۳۷ کلونین می‌رسد. این افزایش دما، تخریب زودرس باتری‌ها در جریان دشارژ بالا را تأیید می‌کند.

برای مقایسه توزیع دما بر روی سطح سلول، در زمان‌های ۸۰، ۱۶۰، ۲۴۰، ۳۲۰ ثانیه و همچنین انتهای شارژ برای نرخ جریان ۲C، ۳C، ۷C و ۹C کانتورهای توزیع دما بر روی سطح سلول در شکل‌های ۵ تا ۹ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در تمامی ۵ شکل مذکور قابل مشاهده است، با



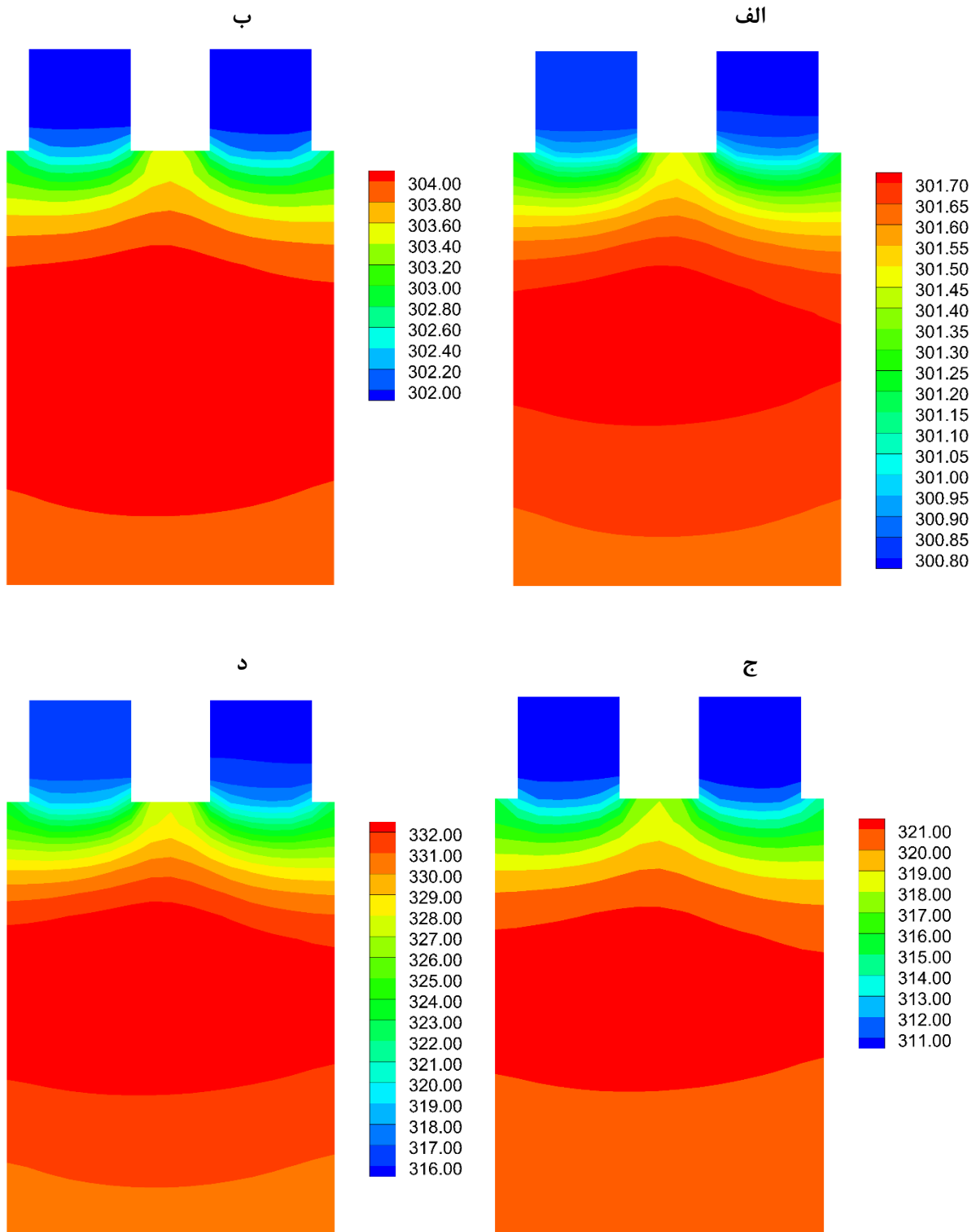
شکل ۵: توزیع دما بر روی سطح سلول (بر حسب کلوین) در ثانیه ۸۰ با نرخ جریان‌های (الف) ۲C، (ب) ۳C، (ج) ۷C، (د) ۹C

Fig. 5. Distribution of temperature on the cell surface (in Kelvin) after 80 seconds for discharge rate of: (a) 2C, (b) 3C, (c) 7C, (d) 9C.



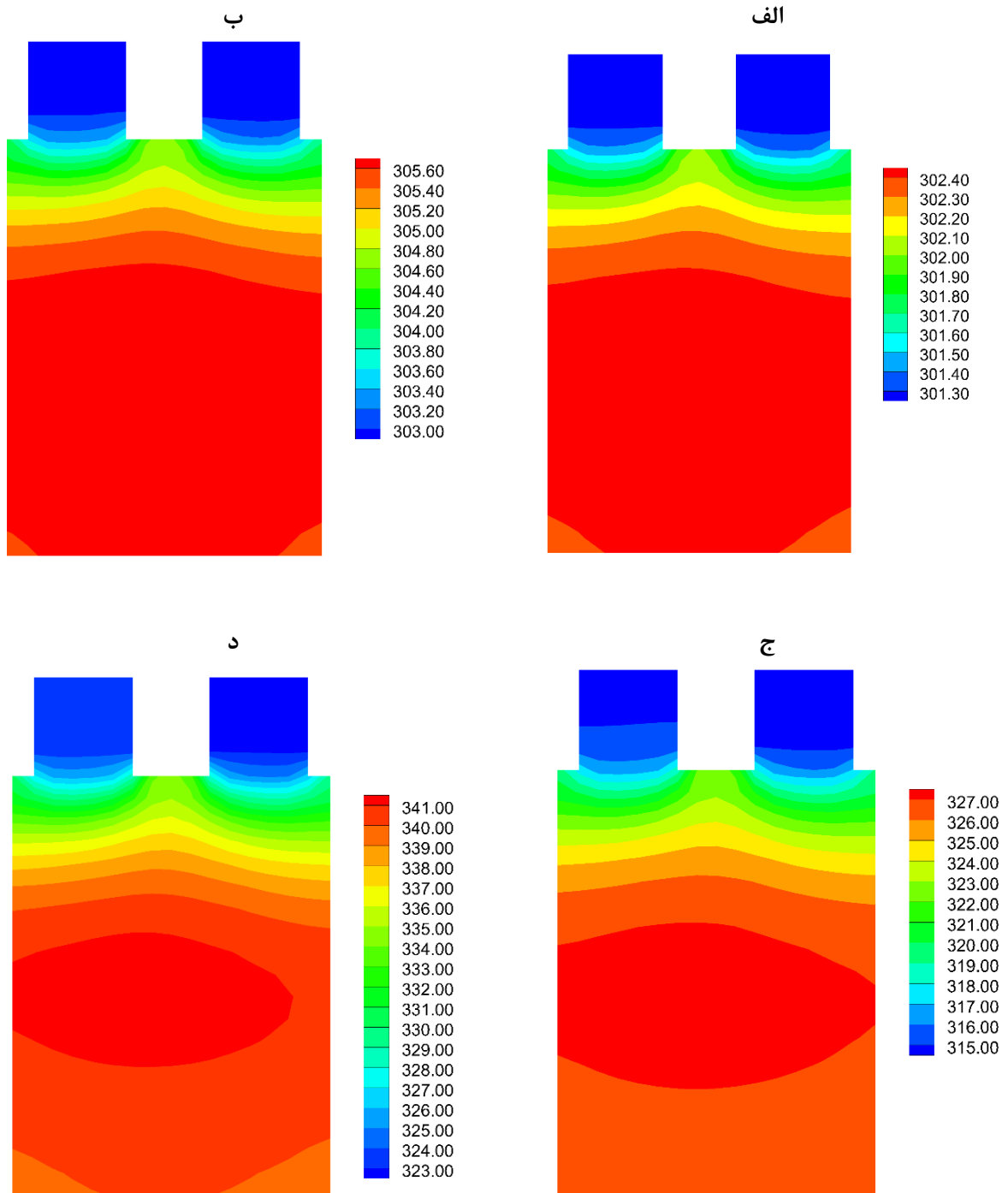
شکل ۶: توزیع دما بر روی سطح سلول (بر حسب کلوین) در ثانیه ۱۶۰ با نرخ جریان‌های (الف) ۲C، (ب) ۳C، (ج) ۷C، (د) ۹C

Fig. 6. . Distribution of temperature on the cell surface (in Kelvin) in 160 seconds at discharge rate (a)-2C (b)-3C (c)-7C (d)-9C



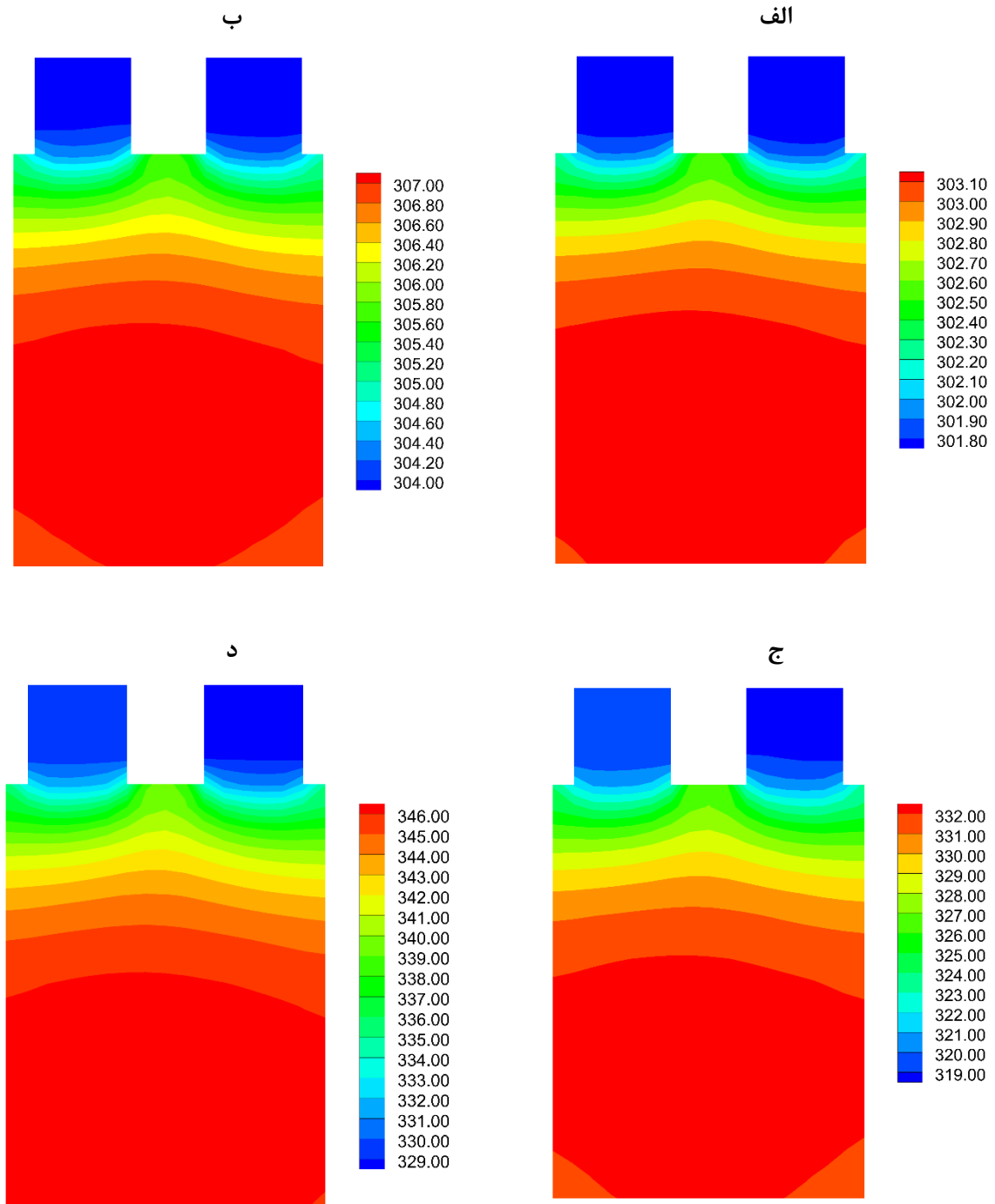
شکل ۷: توزیع دما بر روی سطح سلول (بر حسب کلوین) در ثانیه ۲۴۰ با نرخ جریان‌های (الف) ۲C، (ب) ۳C، (ج) ۷C، (د) ۹C

Fig. 7. Distribution of temperature on the cell surface (in Kelvin) in 240 seconds at discharge rate (a)-2C (b)-3C (c)-7C (d)-9C



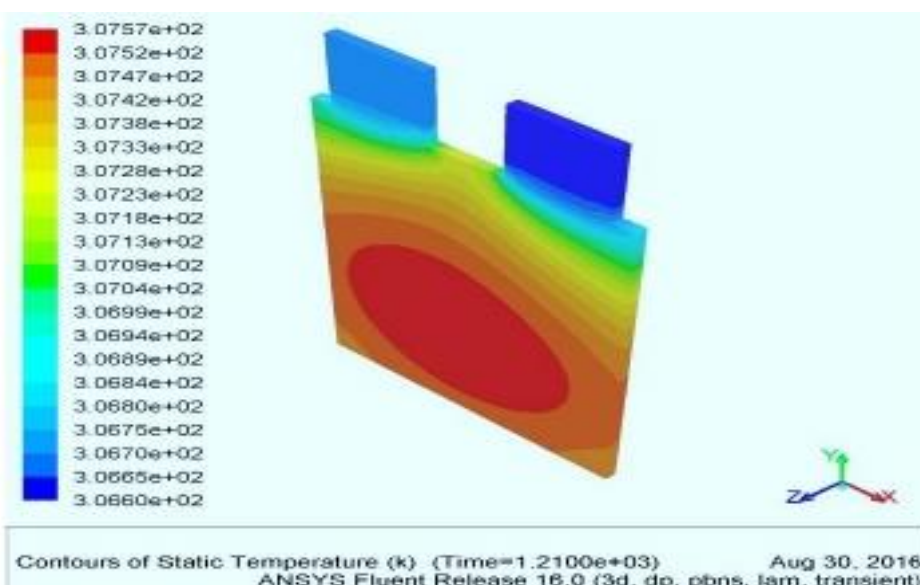
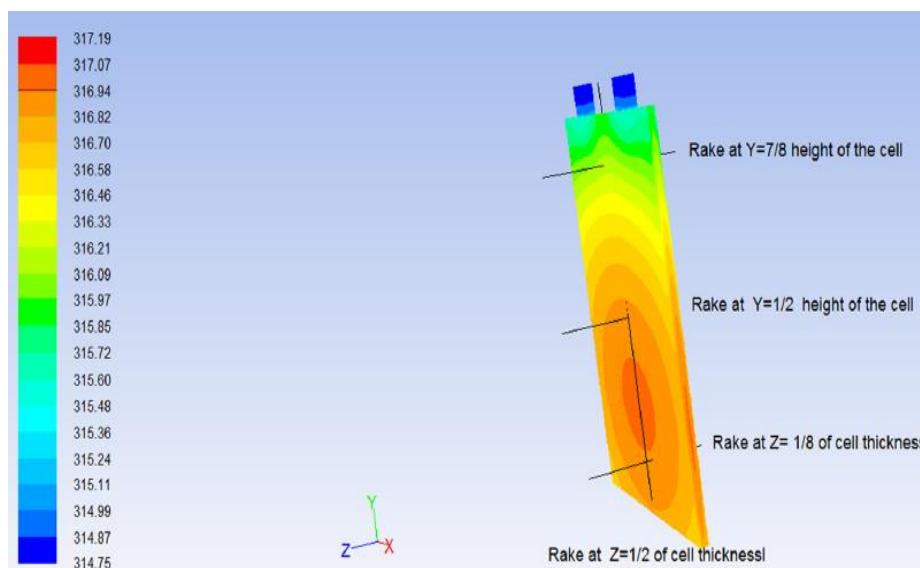
شکل ۸: توزیع دما بر روی سطح سلول (بر حسب کلوین) در ثانیه ۳۲۰ با نرخ جریان‌های (الف) ۲C، (ب) ۳C، (ج) ۷C، (د) ۹C

Fig. 8. Distribution of temperature on the cell surface (in Kelvin) in 320 seconds at discharge rate (a)-2C (b)-3C (c)-7C (d)-9C



شکل ۹: توزیع دما بر روی سطح سلول (بر حسب کلوین) در انتهای دشارژ با نرخ جریان‌های (الف) ۲C، (ب) ۳C، (ج) ۷C، (د) ۹C

Fig. 9. Distribution of temperature on the cell surface (in Kelvin) at the end of discharge at discharge rate (a)-2C (b)-3C (c)-7C (d)-9C



شکل ۱۰: مقایسه توزیع دمای حاصل از این بررسی (شکل پایین) با نتایج مقاله جاوانی [۱۶] (شکل بالا)

Fig. 10. Comparison of the temperature distribution obtained from this study (the figure below) with the results of Javani's paper [16]

درجه کلین تجاوز کند [۸].
برای اطمینان بیشتر از درستی توزیع دما و همچنین مقایسه با کارهای محققان دیگر، در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین توزیع دما در مقاله جاوانی [۱۶] و شبیه سازی انجام شده در این پژوهش صورت گرفته است و همانطور که مشاهده می‌شود توزیع دما به درستی مدل شده است.

همان طور که قبلاً ذکر شد نوآوری این پژوهش استفاده پروفیل دشارژ تست تنش دینامیکی می‌باشد. از اینرو هدف، شبیه سازی این سیکل در

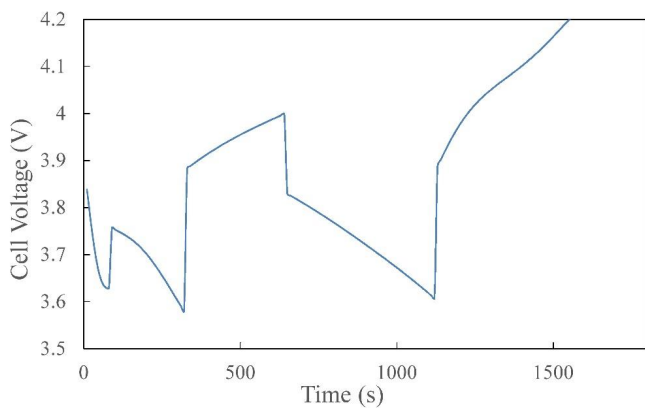
نرخ دشارژ میزان حرارت تولید افزایش می‌یابد. در نرخ دشارژهای پایین بخش عمده این حرارت تولیدی می‌تواند از طریق تب‌ها دفع گردد، اما در نرخ دشارژهای بالا، بخش کمتر آن می‌تواند از این طریق دفع گردد.

نکته بسیار مهم این است که نرخ جریان بالا سبب غیر یکنواختی بسیار زیاد توزیع دما بر روی سطح سلول می‌شود، به گونه‌ای که این اختلاف در نرخ دشارژ ۹C به حدود ۱۷ کلین می‌رسد. شایان ذکر است که بر اساس اغلب استانداردهای طراحی سیستم مدیریت حرارتی باتری، اختلاف دمای درون یک جعبه باتری که ممکن است شامل چند صد سلول باشد، نباید از ۵

Table 1. Dynamic stress test

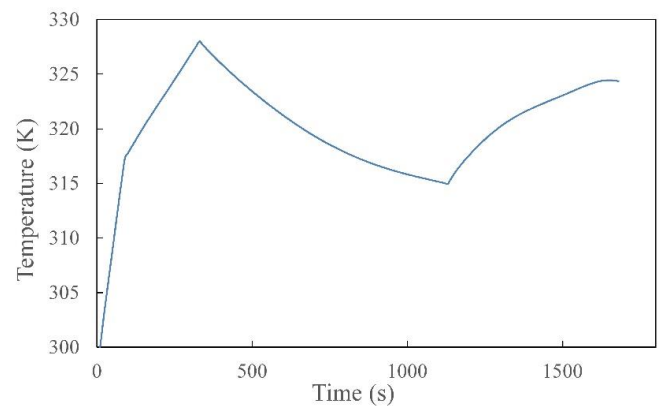
جدول ۱: تست تنش دینامیکی

پایان (ثانیه)	آغاز (ثانیه)	نرخ جریان (C)
۸۰	۰	۹
۳۲۰	۸۰	۶
۶۴۰	۳۲۰	-۲/۲۵
۱۱۲۰	۶۴۰	۲/۲۵
۱۶۸۰	۱۱۲۰	-۴/۵



شکل ۱۲: تغییرات ولتاژ سلول (بر حسب ولت) در طول تست تنش دینامیکی

Fig. 12. Voltage variation of the cell (in Volts) during the dynamic stress test



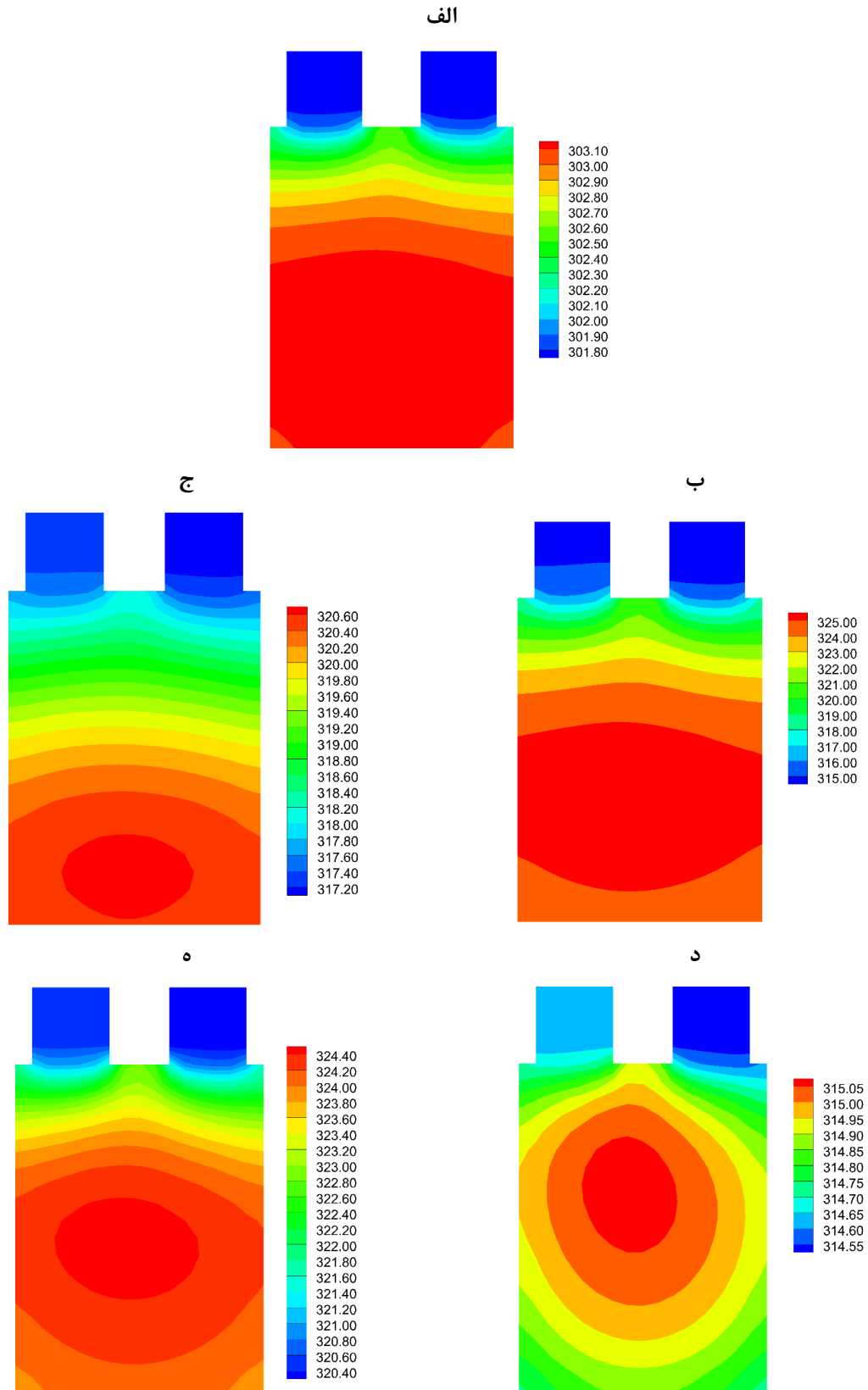
شکل ۱۱: تغییرات ماکسیمم دمای سلول (بر حسب کلونین) تحت تست تنش دینامیکی

Fig. 11. Maximum temperature changes of the cell (in Kelvin) under dynamic stress test

می‌آید که نرخ جریان بالای دشارژ، افت شدید ولتاژ و همچنین تولید حرارت زیاد را به همراه دارد که این امر فرسودگی سلول را به همراه دارد. از طرفی نرخ جریان شارژ ۴/۵C نیز سبب افزایش شدید دما گردید که این پدیده علت پایین تر بودن نرخ شارژ نسبت به دشارژ باتری‌ها را تصدیق می‌کند (مثلاً) باتری با نرخ دشارژ ۱۵C، میتواند با ۵C شارژ شود). برای یافتن توزیع دما، در انتهای هر گام، یعنی ثانیه‌های ۸۰، ۳۲۰، ۶۴۰، ۱۱۲۰ و ۱۶۸۰ دمای سطح سلول ارائه شده است. همان طوری که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، هنگامی که که نرخ شارژ یا دشارژ بالا باشد اختلاف دمای بیشینه و کمینه سطح سلول بالا می‌رود مثلاً هنگامیکه سلول با نرخ ۶C دشارژ می‌شود شکل ۱۳-ب اختلاف دمای سطح حدود ۶ کلونین است اما هنگام دشارژ شدن با نرخ ۲/۵C، این اختلاف به کمتر از ۱ کلونین می‌رسد. لازم به ذکر است که اختلاف دمای بالا، کاهش عمر و عملکرد غیر مطلوب و همچنین ترک بر روی الکترودها را به همراه دارد.

نرم‌افزار و یافتن تغییرات پتانسیل و توزیع دما بر روی سطح سلول می‌باشد. تست تنش دینامیکی مورد استفاده، از ۵ گام تشکیل شده است که در جدول ۱ نشان داده شده است (منظور از علامت منفی در جدول حالت شارژ است). شایان ذکر است که جدول فوق باید به گونه‌ای در قالب فایل تابع تعریف شده توسط کاربر ارائه شود که برای نرم‌افزار قابل درک باشد. پس از عملیات لازم و شبیه سازی، بیشینه دمای سلول و همچنین تغییرات ولتاژ حاصله از تست تنش دینامیکی به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود، دماهای بالایی نظیر ۴۵ درجه سانتیگراد نیز در طی تست تنش دینامیکی تجربه می‌شود که می‌تواند منجر به فرسودگی سریع و نیز مخاطره آفرین باشد. این مهم ضرورت استفاده از سیستم‌های مدیریت حرارتی در باتری‌های خودروهای هیبرید را جهت جلوگیری از چنین دماهای بالایی را بیش از پیش متذکر می‌شود.

با توجه به تغییرات ماکسیمم دما و همچنین ولتاژ، این نتیجه بدست



شکل ۱۳: توزیع دما بر روی سطح سلول (بر حسب کلوین) تحت تست تنش دینامیکی در ثانیه های (الف) ۸۰، (ب) ۳۲۰، (ج) ۶۴۰ (د) ۱۱۲۰ (ه) ۱۶۸۰

Fig. 13. Distribution of temperature on the cell surface (in Kelvin) under dynamic stress test in seconds (a)-80 (b)-320 (c)-640 (d)-1120 (e)-1680

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, CRC press, (2018).
- [2] K. Chen, S. Wang, M. Song, L. Chen, Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system, International Journal of Heat and Mass Transfer, 111 (2017) 943-952.
- [3] Z. Lu, X. Meng, L. Wei, W. Hu, L. Zhang, L. Jin, Thermal management of densely-packed EV battery with forced air cooling strategies, Energy Procedia, 88 (2016) 682-688.
- [4] Z. Qian, Y. Li, Z. Rao, Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling, Energy Conversion and Management, 126 (2016) 622-631.
- [5] A. Greco, X. Jiang, A coupled thermal and electrochemical study of lithium-ion battery cooled by paraffin/porous-graphite-matrix composite, Journal of Power Sources, 315 (2016) 127-139.
- [6] R. Zhao, J. Gu, J. Liu. An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries, Journal of Power Sources, 273 (2015) 1089-1097.
- [7] Z. Rao, Q. Wang, C. Huang, Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system, Applied Energy, 164 (2016) 659-669.
- [8] Z. Rao, S. Wang, A review of power battery thermal energy management, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011) 4554-4571.
- [9] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, M. Fowler, Experimental temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at varying conditions,

۴- نتیجه گیری

با شبیه‌سازی فرآیند دشارژ باتری در نرم افزار انسیس فلونت ۱۶ طی چهار نرخ دشارژ ثابت ۲C، ۳C، ۷C و ۹C و نیز طی پروفیل دشارژ متغیر با زمان تست تنش دینامیکی (تست ویژه باتری خودروی هیبریدی) ولتاژ و ماکزیمم دمای سلول به همراه توزیع دما بر روی سطح سلول در بازه‌های مختلف ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که هرچقدر که میزان نرخ دشارژ باتری افزایش پیدا کند، میزان حرارت تولیدی در باتری بیشتر خواهد شد و همان طور که پیشتر ذکر شد، یکی از عوامل اصلی و مهم در کاهش عمر باتری ایجاد گرمای زیاد است که سبب می‌شود فرآیندهای الکتروشیمیایی درون باتری دچار مشکل گردند و در نتیجه عمر باتری کاهش یابد. لذا پیشنهاد می‌گردد که به دلیل ماهیت فیزیکی و الکتروشیمیایی باتری، نرخ دشارژ باتری‌ها در حد ۲C یا ۳C باشد تا از ایجاد خسارات جبران‌ناپذیر به باتری جلوگیری شود. همچنین، دماهای بالایی نظیر ۴۵ درجه سانتیگراد نیز در طی تست تنش دینامیکی مشاهده می‌شود که می‌تواند منجر به فرسودگی سریع و نیز مخاطره آفرین باشد. بدین ترتیب، جهت جلوگیری از خسارت وارد شدن به سیستم باتری یک خودروی هیبرید حتماً ضروری است که از سیستم مدیریت حرارتی اثربخشی استفاده شود.

۵- فهرست علائم

منابع	
<i>a</i>	مساحت مخصوص الکتروود، m^2/m^3
C_p	گرمای ویژه فشار ثابت، J/kg
<i>DoD</i>	عمق دشارژ
<i>ECh</i>	ناشی از واکنش الکتروشیمیایی
<i>j</i>	چگالی جریان، A/m^2
Q_{Ah}	ظرفیت کالریمتریک باتری، Ah
<i>q</i>	حرارت تولیدی بر واحد حجم، J/m^3
<i>short</i>	ناشی از اتصال کوتاه
<i>T</i>	دما، K
<i>U</i>	پتانسیل مدار باز، V
<i>Y</i>	پارامتر رسانایی ویژه، A/mV
ρ	چگالی، kg/m^3
σ	رسانایی الکتریکی مؤثر، $A/m^2 V$
φ	پتانسیل فاز، V

- A955-A969.
- [13] H. Gu, Mathematical analysis of a Zn/NiOOH cell, *Journal of The Electrochemical Society*, 130(1983) 1459-1464.
- [14] K.H. Kwon, C.B. Shin, T.H. Kang, C.S. Kim. A two-dimensional modeling of a lithium-polymer battery, *Journal of Power Sources*, 163 (2006) 151-157.
- [15] A.B. Nemati, Life investigation of Li-ion batteries used in electric vehicles, M.Sc. Thesis, Iran University of Science and Technology, 2016.
- [16] N. Javani, I. Dincer, G. Naterer, B. Yilbas, Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72 (2014) 690-703.
- International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71 (2016) 35-43.
- [10] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, M. Fowler, Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions, *Applied Thermal Engineering*, 96 (2016) 190-199.
- [11] K. Darcovich, D. MacNeil, S. Recoskie, B. Kenney. Coupled electrochemical and thermal battery models for thermal management of prismatic automotive cells, *Applied Thermal Engineering*, 133 (2018) 566-575.
- [12] G.H. Kim, K. Smith, K.J. Lee, S. Santhanagopalan, A. Pesaran. Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales, *Journal of the Electrochemical Society*, 158 (2011)

