

Experimental Investigation of the Simultaneous Effect of Temperature and Aging on Mechanical Safety and Failure Behavior of Cylindrical Lithium-Ion Batteries Under Dynamic Impact

Mohammad Ali Ehteram*, Amir Nezhadsafar

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* m_ehteram@sbu.ac.ir

ABSTRACT

The present research aims to experimentally evaluate the safety behavior and failure mechanism of 18650 cylindrical lithium-ion battery cells under dynamic impact loading. To this end, a pneumatic impact testing apparatus was developed in accordance with the SAE J2464 standard to assess the simultaneous effects of initial temperature (25, 0, and -25 °C), state of charge (10% and 100%) and state of health (fresh and aged over 400 cycles). Experimental results derived from high-speed imaging and thermal data analysis indicated that at ambient temperature, impact with a critical velocity of 9.23 m/s on fully charged samples led to immediate separator rupture and extensive internal short circuit. Under these conditions, the cell voltage dropped to zero within 290 ms, and explosive thermal runaway occurred with a severe temperature rise reaching 662 °C. In contrast, the most significant finding of this study reveals a substantial enhancement in the cell's mechanical resistance at sub-zero temperatures; remarkably, at -25 °C, no penetration or exothermic reaction was recorded even at high impact velocities. Further analysis suggests that the partial solidification and increased viscosity of the electrolyte at low temperatures act as an internal support with quasi-solid behavior, thereby preventing local stress concentration and separator tearing.

KEYWORDS

Lithium-ion Battery, Safety, Mechanical Impact, Temperature Effect, Thermal Runaway

1. Introduction

The rapid transition towards Electric Vehicles has established lithium-ion batteries as the primary energy storage system due to their high energy density and long cycle life [1]. However, the safety of these batteries under mechanical abuse, such as vehicle collisions, remains a major concern [2]. Mechanical deformation can cause internal short circuits, leading to thermal runaway, fire, and explosions [3]. Environmental factors, particularly ambient temperature, and the operational history of the battery (aging) are believed to influence the mechanical properties of battery components, yet comprehensive experimental data remains limited [4,5].

Various testing standards and procedures have been developed to evaluate battery safety, including nail penetration, crush, and impact tests [6]. While existing literature has extensively studied the quasi-static and dynamic responses of batteries at room temperature [7], the combined effects of extreme temperatures and charge/discharge cycling (aging) on dynamic impact resistance have not been thoroughly explored.

The main contribution of this paper is to experimentally bridge this gap by evaluating the dynamic impact response of 18650 lithium-ion batteries under a combination of different temperatures (from 25°C down to -25°C) and aging states (up to 400 cycles in 30°C and 60°C). This study provides novel insights into how thermal and cyclic history dictates the failure threshold and thermal runaway of cylindrical cells under localized impact.

2. Methodology

The overall experimental procedure, as illustrated in the figure 1, involves new, unused batteries and batteries subjected to 400 charge (8A) and discharge cycles (0.5 Ah) at constant temperatures of 30°C and 60°C (to simulate batteries used in environments with specific temperatures). These batteries are struck by an impact testing machine under varying impact intensities, contact cross-sections, states of charge, and ambient temperatures. Consequently, following the impact, the safety stability, temperature variations, and voltage drop of the batteries are recorded and analyzed. Furthermore, the effect of instantaneously applying cold temperatures to the battery during impact on preventing catastrophic events such as gas leakage, fire, and explosion is investigated. battery cells used in the experiments are Sony VTC6 with a capacity of 3 Ah and Gita 2565 with a capacity of 2.5 Ah.

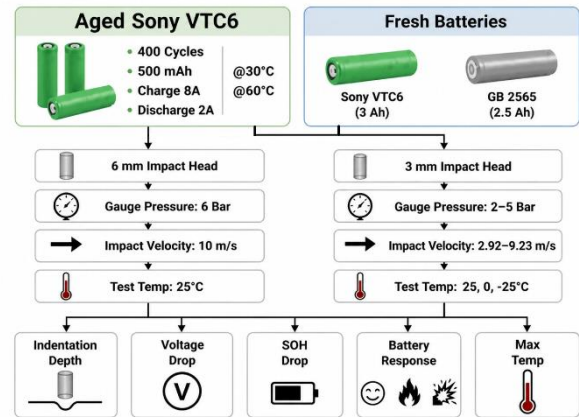


Figure 1 - The overall experimental procedure in this research

The experiments were conducted using an impact testing machine (figure 2) on both cycled and fresh batteries using an impact cross-section with a 6 mm diameter, and on fresh batteries using a 3 mm diameter impact cross-section (in accordance with the SAE J2464 standard mechanical penetration test) at various impact velocities (3 to 10 m/s), state of charge (10% and 100%) and different temperatures (25, 0, and -25 °C). Results such as voltage drop, current, physical alterations, and battery temperature were recorded using an oscilloscope, a voltmeter and slow-motion and thermal cameras.

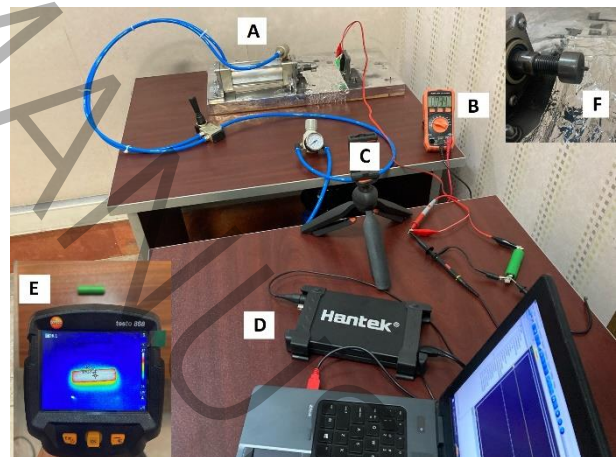


Figure 2 - The impact testing setup consists of: A - pneumatic jack along with a compressor, pressure gauge, and battery holder, B - multimeter, C - stand and slow-motion camera, D - oscilloscope, E - thermal camera, and F - adapter nut for the impact cross-section with a 3 mm diameter.

3. Results and Discussion

The results demonstrate a stark contrast between battery behavior at room temperature and sub-zero conditions.

- **Impact at Room Temperature (25 °C):** At 25°C, with a 3 mm diameter impact cross-section (mechanical penetration test) and a 100% State of Charge, the battery reached its mechanical failure limit at an impact velocity of 9.23 m/s. High-speed filming revealed that the instantaneous deformation of the casing was accompanied by the failure of the internal separator. The resulting internal short circuit, as shown in the figure 3, led to a rapid temperature spike (662°C) and a complete voltage drop in less than 0.3 seconds.

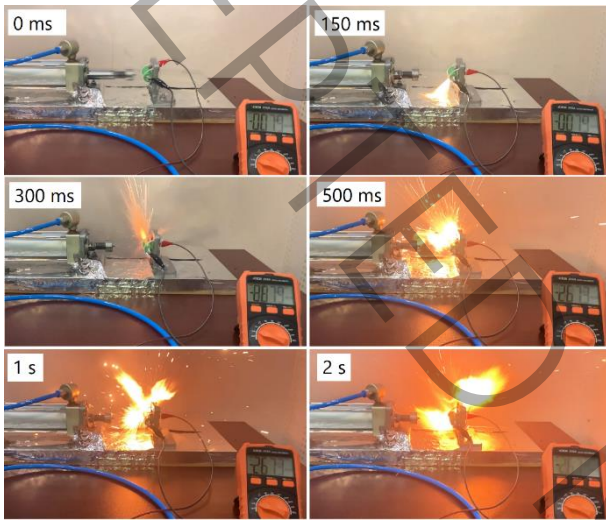


Figure 3 - Mechanical penetration test on a Sony VTC6 battery at an impact velocity (9.23 m/s) and 25°C, resulting in the puncture of the battery casing, a short circuit, and consequently an explosion (the first 2 seconds after impact)

- **The Protective Effect of Sub-zero Temperatures:** One of the most significant findings is the enhanced mechanical resilience at -25 °C. Despite the identical impact energy, batteries at -25 °C did not exhibit thermal runaway. The analysis suggests that as the temperature drops, the liquid electrolyte undergoes a phase change or significant viscosity increase. This "quasi-solid" state acts as an internal cushion that supports the jelly roll (anode / cathode / separator layers), preventing localized stress concentrations that would otherwise tear the separator.
- **Influence of Aging:** Aged cells (400 cycles) showed a slight decrease in mechanical ductility compared to fresh cells, making them more prone to brittle-like failure of the casing, although the thermal runaway intensity was slightly lower due to the reduced energy density in aged chemistry.

4. Conclusion

This study provides experimental evidence that the safety of lithium-ion batteries under dynamic impact is highly dependent on ambient temperature. While low temperatures are generally detrimental to battery capacity, they provide a surprising safety margin against mechanical failure by stabilizing the internal structure. These results are vital for the development of adaptive Battery Thermal Management Systems and the design of safer battery enclosures in electric vehicles.

5. References

- [1] **Pepó, M., Fullér, S., Cseke, T., Weltsch, Z.,** Advances in Standardised Battery Testing for Enhanced Safety and Innovation in Electric Vehicles: A Comprehensive Review, *Batteries*, 11(4) (2025) 157.
- [2] **Edler, F.,** Occupational health and safety during development and usage of lithium-ion batteries, In *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, (2018) 253-262.
- [3] **Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., Gamble, G.,** A review of lithium-ion battery fire suppression, *Energies*, 13(19) (2020) 5117.
- [4] **Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J., Ouyang, M.,** A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle, *ETransportation*, 1 (2019) 100005.
- [5] **Molaeimanesh, G.R., Mousavi-Khoshdeld, S.M., Nemati, A.B.,** Experimental analysis of commercial LiFePO₄ battery life span used in electric vehicle under extremely cold and hot thermal conditions, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143 (2021) 3137-3146.
- [6] **Edge, J.S., O’Kane, S., Prosser, R.,** Lithium ion battery degradation: What you need to know, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(14) (2021) 8200-8221.
- [7] **Guo, Z., Ma, Z., Liu, J., Zhao, W., Wang, S., Zhao, H., Ren, L.,** Overcharging cycle aging-induced severe degradation of safety properties of lithium-ion pouch battery cells subjected to mechanical abuse, *Energy*, 320 (2025) 135168.

ACCEPTED MANUSCRIPT

بررسی تجربی اثر همزمان دما و پیرشدگی بر ایمنی مکانیکی و رفتار شکست باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای تحت ضربه دینامیکی

محمدعلی احترام*، امیر نژادصفر

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* m_ehteram@sbu.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تجربی رفتار ایمنی و مکانیزم شکست سلول‌های باتری لیتیوم-یون استوانه‌ای ۱۸۶۵۰ تحت بارگذاری ضربه دینامیکی انجام شده است. بدین منظور، با توسعه یک بستر آزمون ضربه پنوماتیک منطبق بر استاندارد اس‌ای‌ئی جی ۲۴۶۴، اثر همزمان پارامترهای دمای اولیه (۰، ۲۵ و ۲۵- درجه سلسیوس)، وضعیت شارژ (۱۰٪ و ۱۰۰٪) و وضعیت سلامت (سلول نو و پیرسازی شده طی ۴۰۰ چرخه) مورد سنجش قرار گرفت. نتایج تجربی حاصل از پردازش تصاویر سرعت بالا و داده‌های حرارتی نشان داد که در دمای محیط، برخورد با سرعت بحرانی ۹،۲۳ متر بر ثانیه در نمونه‌های با شارژ کامل، منجر به گسیختگی آنی جداکننده و وقوع اتصال کوتاه داخلی گسترده می‌شود. در این شرایط، ولتاژ سلول در کمتر از ۲۹۰ میلی‌ثانیه به صفر رسید و فرار حرارتی انفجاری با نرخ افزایش دمای شدید تا ۶۶۲ درجه سلسیوس به وقوع پیوست. در مقابل، مهم‌ترین یافته پژوهش حاکی از افزایش قابل توجه مقاومت مکانیکی سلول در دماهای برودتی است؛ به طوری که در دمای ۲۵- درجه سلسیوس، حتی در سرعت‌های برخورد بالا، هیچ‌گونه نفوذ و واکنش گرمایی ثبت نشد. تحلیل‌های تکمیلی نشان می‌دهد که انجماد جزئی و افزایش ویسکوزیته الکترولیت در دمای پایین، با ایجاد یک تکیه‌گاه داخلی و رفتار شبه‌جامد، مانع از تمرکز تنش موضعی و پارگی جداکننده می‌شود.

کلمات کلیدی

باتری لیتیوم-یون، ایمنی، ضربه مکانیکی، اثر دما، فرار حرارتی.

کاربرد باتری‌های لیتیوم-یون در تجهیزات الکترونیکی و خودروها روز به روز در حال افزایش است [۱، ۲] و تضمین ایمنی آن‌ها، به‌ویژه در خودروهای برقی تحت شرایط تصادف یا دماهای حدی، به یکی از چالش‌های اصلی بدل شده است [۳]. گزارش‌های متعددی از آتش‌سوزی و انفجار خودروهای برقی ثبت شده است که بخش قابل توجهی از آن‌ها ناشی از تصادفات و ضربات مکانیکی بوده است [۴].

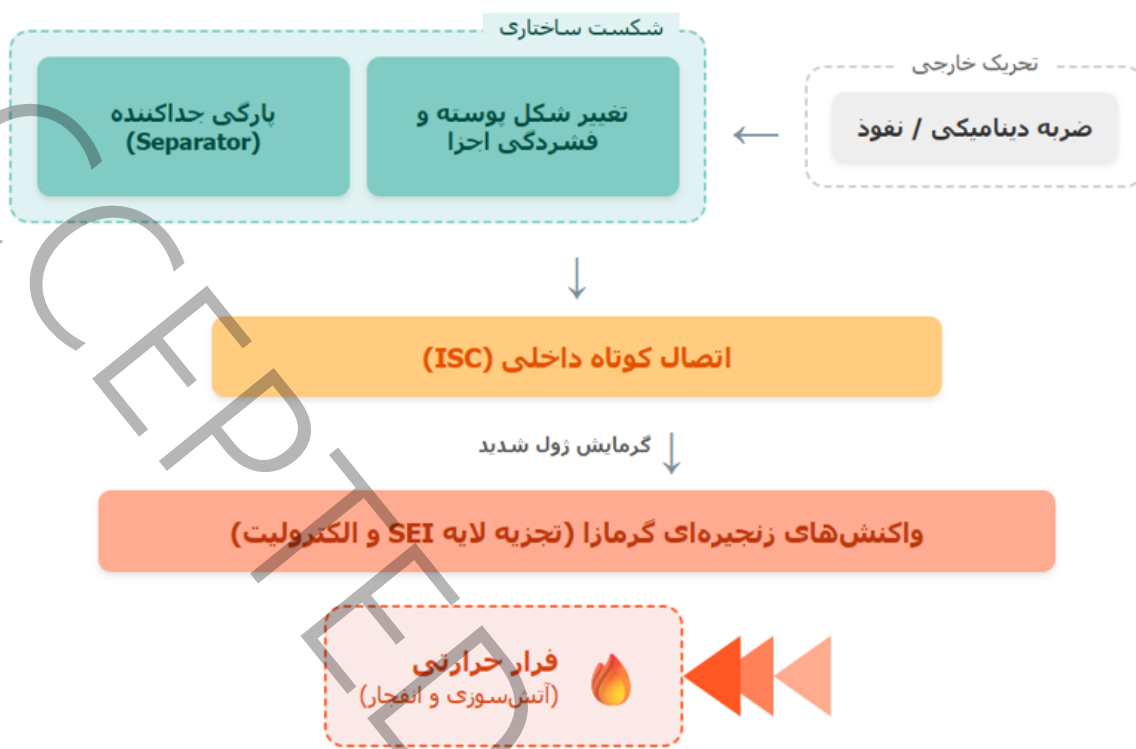
در باتری‌های مورد استفاده در وسایل نقلیه برقی و هیبریدی، الزامات سخت‌گیرانه‌ای نظیر چگالی انرژی و توان بالا، ایمنی، هزینه پایین و عمر طولانی باید لحاظ شوند [۵]. سلول‌های لیتیوم-یون که معمولاً در هندسه‌های استوانه‌ای، منشوری و کیسه‌ای تولید می‌شوند، به دلیل چگالی انرژی بالاتر، گزینه اصلی برای این کاربردها هستند. این سلول‌ها در قالب ماژول و بسته به همراه سیستم مدیریت باتری، منبع ذخیره انرژی خودرو را تشکیل می‌دهند. هر سلول از یک کاتد (اکسید فلز لیتیوم)، یک آند (گرافیت)، الکتrolیت و یک جداکننده تشکیل شده است. جداکننده که بین آند و کاتد قرار می‌گیرد، وظیفه حیاتی جلوگیری از اتصال کوتاه فیزیکی بین دو الکتروود را بر عهده دارد، در حالی که به یون‌های لیتیوم اجازه عبور می‌دهد [۶].

عملکرد ایمن باتری مستلزم کنترل دقیق پارامترهایی نظیر ولتاژ، جریان و دما در محدوده مجاز است [۷-۹]. تجاوز از این حدود یا اعمال ضربه مکانیکی می‌تواند منجر به تخریب باتری شود. آزمون‌های استاندارد متعددی توسط مراجعی مختلفی برای ارزیابی ایمنی باتری در سطوح سلول، ماژول و بسته تدوین شده است [۱۰، ۱۱]. این آزمون‌ها به دسته‌های مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و محیط‌زیستی تقسیم می‌شوند [۱۲].

ساز و کار زنجیره‌ای آتش‌سوزی در باتری‌های لیتیوم-یون در شکل ۱ نشان داده شده است. در هنگام وقوع تصادف و ضربه مکانیکی، خطر اصلی، پارگی یا سوراخ شدن جداکننده و وقوع اتصال کوتاه داخلی است [۱۳]. این پدیده باعث تخلیه سریع انرژی، افزایش شدید دما و در نهایت وقوع فرار حرارتی می‌شود که می‌تواند به آتش‌سوزی یا انفجار منجر گردد [۱۴]. شدت این واکنش‌ها وابستگی شدیدی به سطح انرژی (وضعیت شارژ) و دمای محیط دارد.

از سوی دیگر، پدیده پیرشدگی در طول عمر باتری منجر به تغییرات ساختاری نظیر رشد لایه ای (لایه بین‌فازی الکتrolیت جامد)، تشکیل دندریت‌ها و آبکاری لیتیوم می‌شود [۱۵]. اگرچه استانداردهایی نظیر اس‌ای‌ئی جی ۲۴۶۴ آزمون نفوذ مکانیکی را در شرایط دمای اتاق تعریف کرده‌اند [۱۱]، اما مطالعات اندکی به بررسی اثر همزمان "دمای برودتی (زیر صفر)" و "تاریخچه پیرشدگی" بر مکانیزم شکست باتری پرداخته‌اند [۱۶].

از این‌رو، در پژوهش حاضر، رفتار ایمنی سلول‌های لیتیوم-یون تحت ضربه دینامیکی در طیف دمایی گسترده (۲۵- تا ۲۵ درجه سلسیوس) و در دو وضعیت نو و پیرسازی شده بررسی می‌شود تا نقش انجماد الکتrolیت و تغییر خواص مکانیکی اجزا در جلوگیری از فرار حرارتی مشخص گردد.



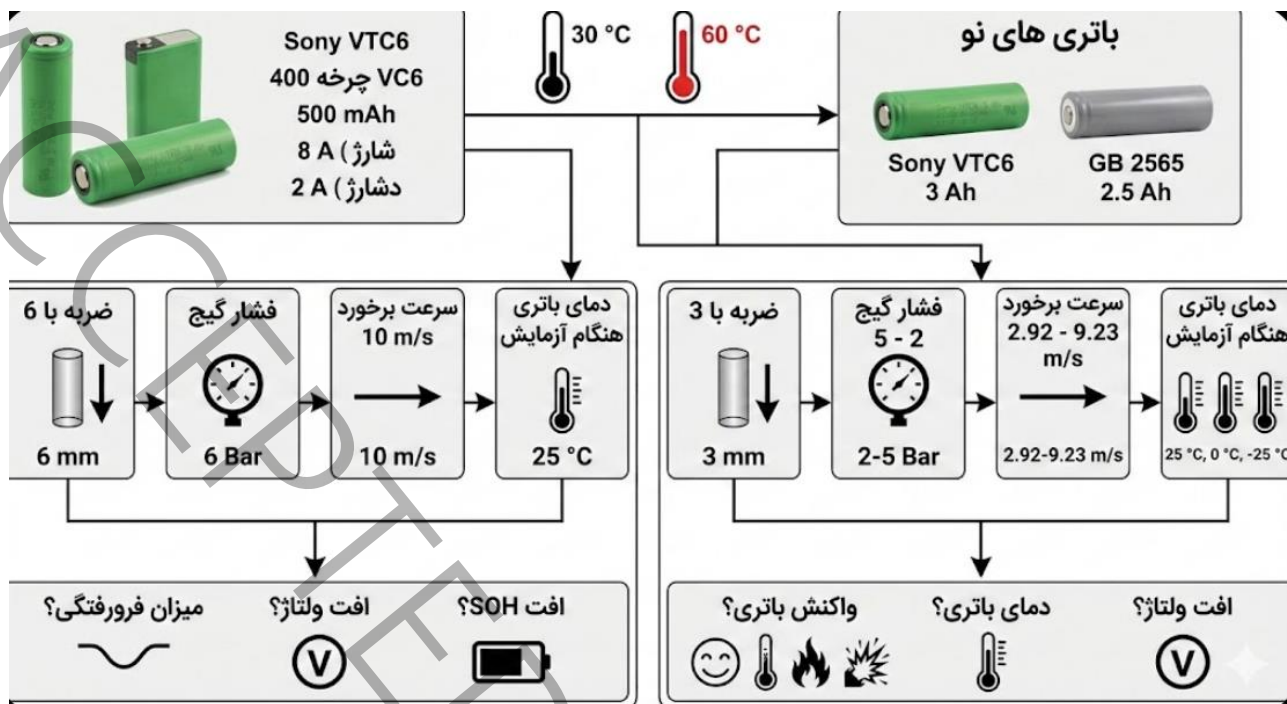
شکل ۱: فرایند زنجیره‌ای که با تحریک مکانیکی، حرارتی و الکتریکی باتری لیتیوم یون، آتش‌سوزی و انفجار را ممکن می‌کند

Figure 1: The chain process that enables fire and explosion by mechanically, thermally, and electrically stimulating a lithium-ion battery

۲- طراحی؛ ساخت تجهیزات و انجام آزمایشات

روند کلی آزمایش مطابق شکل ۲ به این صورت بوده که باتری‌های مورد آزمایش ضربه، شامل باتری‌های نو و استفاده نشده و باتری‌هایی که ۴۰۰ چرخه شارژ و دشارژ در دمای ثابت ۳۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد (به منظور باتری‌های استفاده شده در مکان‌های با دمای مشخص) هستند و این باتری‌ها توسط دستگاه ضربه با مقادیر مختلفی از شدت ضربه، سطح مقطع برخورد، سطح شارژ و دمای محیط مورد ضربه قرار گرفته و در نتیجه ضربه، پایداری ایمنی باتری، تغییرات دمای باتری، افت ولتاژ باتری ثبت شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تاثیر اعمال آبی سرد به باتری هنگام ضربه بر جلوگیری از وقوع وقایع مخرب مانند نشت گاز، آتش‌سوزی و انفجار باتری آزمایش می‌شود.

سلول‌های باتری مورد استفاده در آزمایش‌ها با نام تجاری سونی وی تی سی ۶ با ظرفیت ۳ آمپر ساعت و گیتا ۲۵۶۵ با ظرفیت ۲/۵ آمپر ساعت هستند.

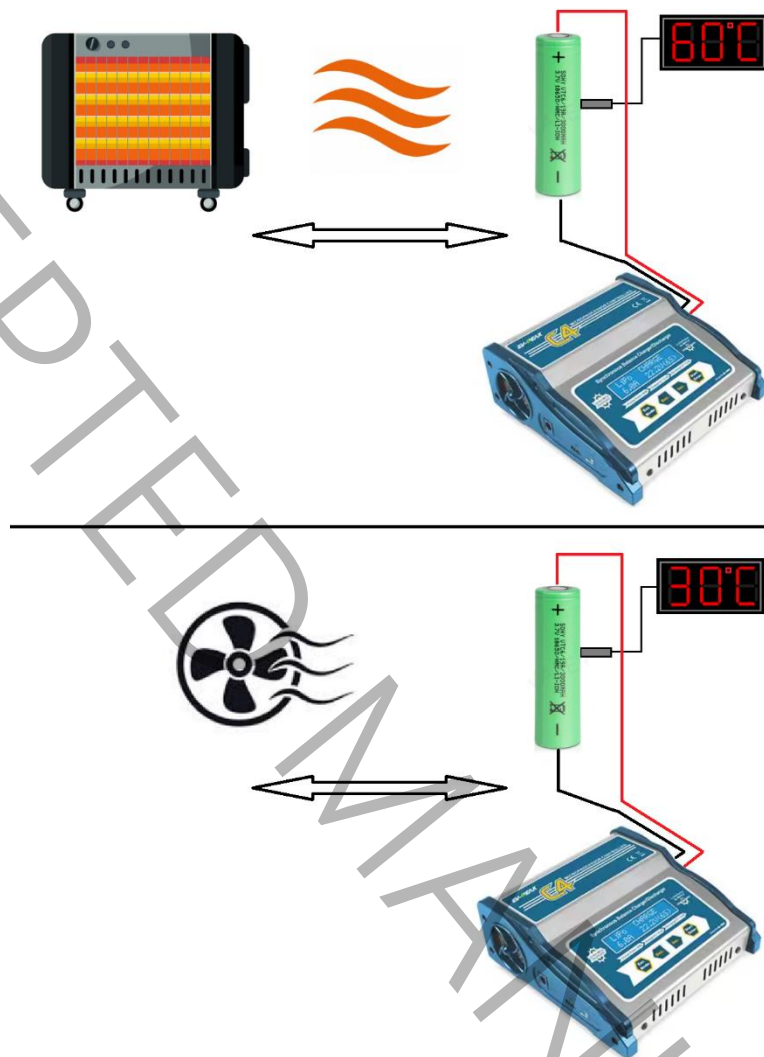


شکل ۲: فرآیند تست ایمنی و عملکرد باتری‌های لیتیوم-یون در این تحقیق

Figure 2: Impact test setup and components of the pneumatic impact apparatus :

برای آزمایش چرخه شارژ و دشارژ در دمای ثابت مطابق شکل ۳، برای منبع گرما از یک هیتر برقی و برای کاهش دما، از یک فن برقی استفاده شد. دمای باتری توسط یک سنسور دما که نشانگر دمای باتری دارد با تغییر فاصله باتری از هیتر یا فن، در طی آزمایش ثابت نگه داشته شد و باتری توسط دستگاه شارژ و دشارژ ای‌وی-پیک سی ۴ برای هر چرخه، با حداکثر جریان ۸ آمپر مقدار ۵۰۰ میلی آمپرساعت

شارژ و با جریان ۲ آمپر دشارژ شد. این آزمایش برای باتری وی تی سی ۶ به تعداد ۴۰۰ چرخه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و برای یک باتری دیگر وی تی سی ۶ در دمای ۶۰ درجه سلسیوس انجام شد



شکل ۳: آزمایش چرخه شارژ و دشارژ باتری وی تی سی ۶ در دمای ۶۰ °C (عکس بالا) و دمای ۳۰ °C (عکس پایین)

Figure 3: battery charge and discharge cycle test at 60 °C (top photo) and 30 °C (bottom photo)

برای آزمایش ضربه به باتری، ابتدا دستگاه ضربه توسط نرم افزار مطابق شکل ۴ - الف طراحی و مدل شد سپس قطعات آن که شامل سیلندر پنوماتیک، کمپرسور، تنظیم کننده فشار به همراه گیج فشار، شیر فرمان، لوله ها و اتصالات، پایه ها و مهره های تبدیل سطح مقطع برخورد شفت بود تهیه و مونتاژ شد. سپس برای پایش و ثبت نتایج آزمایش، رایانه به همراه اسیلوسکوپ و مولتی متر، دوربین با نرخ تصویربرداری با فرکانس بالا، دوربین حرارتی و سیم ها مطابق شکل ۴ - ج به سیستم ضربه اضافه شدند.



شکل ۴: طراحی سیستم ضربه در نرم افزار Solidworks (الف) و اجرای آن (ب) شامل قطعات سیلندر پنوماتیک (1)، پایه زیرین مجموعه با پوشش ورق آلومینیوم (2)، پایه‌های نگه دارنده جک و باتری در یک راستا (3)، شیر دستی فشار هوا (4)، تنظیم کننده فشار به همراه گیج فشار (5)، شیر دستی (6)، سنسور (7)

(5)، کمپرسور هوا (6)، لوله‌ها و اتصالات (7) و بطور کلی مجموعه آزمایش و ثبت وقایع (ج) شامل سیستم ضربه (8)، مولتی متر (9)، دوربین حرارتی به همراه دوربین فیلمبرداری با نرخ فریم بالا به همراه پایه نگهدارنده (10)، باتری موازی با باتری آزمایش ضربه برای ثبت افت ولتاژ

(11)، اسیلوسکوپ (12) و رایانه به همراه نرم افزار اسیلوسکوپ (13)

Figure 4: Design of the impact system in Solidworks software (a) and its implementation (b) including pneumatic cylinder parts (1), the lower base of the assembly covered with aluminum sheet (2), the jack and battery support legs in one direction (3), the air pressure manual valve (4), the pressure regulator with pressure gauge (5), the air compressor (6), the pipes and fittings (7) and in general the test and event recording set (c) including the impact system (8), the multimeter (9), the thermal camera with the high frame rate video camera with the support leg (10), the battery in parallel with the impact test battery to record the voltage drop (11), the oscilloscope (12) and the computer with the oscilloscope software (13).

برای انجام آزمایش ضربه، مرکز سمت مجاور سلول باتری می‌بایست عمود بر راستای شفت سیلندر پنوماتیک جاگذاری شده و توسط پایه و بست‌ها ثابت نگه داشته شود.

دو مهره به منظور تغییر اندازه سطح برخورد سر شفت، استفاده شدند که قطر سطح مقطع برخورد را به ۶ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر تبدیل کردند، که قطر ۳ میلی‌متر مطابق استاندارد آزمایش نفوذ مکانیکی (نفوذ میخ) در استاندارد اس‌ای‌ئی جی ۲۴۶۴ می‌باشد. این آزمایش علاوه بر اینکه در دمای ۲۵ °C انجام شد، در دماهای ۰ °C و ۲۵ °C- هم انجام شد، برای اعمال این دما به باتری از اسپری منجمد کننده استفاده شد. با توجه به واضح بودن خطرات انجام آزمایش در دمای بالا و اعمال این دما به وسیله هیتر در هنگام ضربه، این آزمایش در دماهای بالای دمای اتاق انجام نشد.

بدیهی است فشار اعمالی در تنظیم کننده فشار با سرعت برخورد رابطه مستقیم دارد. برای بدست آوردن سرعت برخورد، ابتدا سرعت متوسط با استفاده از رابطه (۱) بدست آمده و با توجه به رابطه (۲) و شروع حرکت شفت از لحظه سکون، با دو برابر کردن سرعت متوسط (\bar{V})، سرعت برخورد (V_1) به دست می‌آید.

$$\bar{V} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\bar{V} = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (2)$$

۳- عدم قطعیت‌ها و دقت در اندازه‌گیری‌ها

برای محاسبه عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت لحظه برخورد، ابتدا مقادیر اندازه‌گیری شده زمان حرکت شفت تا زمان برخورد در آزمایش‌های متفاوت با فشار یکسان اعمالی به تنظیم کننده فشار (تکرار آزمایش) که توسط دوربین فیلمبرداری با نرخ ۲۴۰ فریم بر ثانیه اندازه‌گیری شد سپس با محاسبه میانگین و انحراف از معیار آن‌ها، طبق جدول ۱ بدست آمد.

جدول ۱: میانگین و انحراف از معیار از اندازه‌گیری‌های زمان حرکت سر شفت تا برخورد در آزمایش‌ها

Table 1: Mean and standard deviation of shaft head travel time to impact measurements in experiments

انحراف از معیار زمان (ms)	میانگین زمان (ms)	فشار اعمالی به تنظیم کننده (bar)	قطر سر شفت (mm)
± ۴/۰۸	۱۱/۶۶	۶	۶
± ۴/۰۸	۴۱/۶۶	۲	۳

± ۷/۰۷	۲۵	۳	۳
± ۱۲/۲۴	۲۰	۴	۳
± ۸/۱۶	۱۳/۳۳	۵	۳

با توجه به دقت ± 1 میلی متری ابزار اندازه گیری طول بین موقعیت مکانی سر شفت قبل از فرمان ضربه تا نقطه برخورد و با توجه به رابطه (۱)، به دلیل تقسیم شدن پارامترها با یکدیگر، برای بدست آوردن عدم قطعیت سرعت برخورد، عدم قطعیت های زمان و طول با هم جمع می شوند که در جدول ۲ آورده شده اند.

جدول ۲: عدم قطعیت ها در سرعت برخورد شفت به باتری

Table 2: Uncertainties in the shaft-battery impact velocity

حد اکثر عدم قطعیت سرعت (m/s)	دقت اندازه گیری طول (m)	عدم قطعیت زمان (s)	فشار اعمالی به تنظیم کننده (bar)	قطر سر شفت (mm)
± ۰/۰۱	± ۰/۰۰۱	± ۰/۰۰۴	۶	۶
± ۰/۰۱	± ۰/۰۰۱	± ۰/۰۰۴	۲	۳
± ۰/۰۱	± ۰/۰۰۱	± ۰/۰۰۷	۳	۳
± ۰/۰۱	± ۰/۰۰۱	± ۰/۰۱۲	۴	۳
± ۰/۰۱	± ۰/۰۰۱	± ۰/۰۰۸	۵	۳

دقت ریزسنج برای اندازه گیری عمق له شدن بدنه باتری بر اثر ضربه برابر $\pm 0/001$ میلی متر بوده و همچنین دوربین حرارتی با یک سنسور حرارتی نوع K کالیبره شد و خطای آن $\pm 0/05$ °C بدست آمد.

۴- نتایج آزمایش

آزمایش های ضربه با قطر سطح مقطع برخورد ۶ میلی متری برای باتری های استفاده نشده (نو) و کارکرده وی تی سی ۶ در دمای ۳۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و باتری های استفاده نشده جی بی ۲۵۶۵، با فشار تنظیم کننده ۶ بار، سرعت برخورد $10 \pm 0/10$ متر بر ثانیه، شارژ ۱۰۰٪ و دمای آزمایش ۲۵ درجه سلسیوس انجام شدند. هیچ گونه شکاف و سوراخ شدگی، داغ شدن، آتش سوزی و یا انفجار در باتری ها در برابر ضربه و یا افت ولتاژ، صورت نگرفت. جدول ۳ عمق فرورفتگی بدنه باتری ها پس از ضربه را که توسط ریزسنج با دقت اندازه گیری شده است نشان می دهد. همچنین تغییری در وضعیت سلامت باتری ها بعد از ضربه مشاهده نشد.

جدول ۳: میزان فرورفتگی ایجاد شده در بدنه باتری بر اثر ضربه با قطر سطح مقطع برخورد ۶ میلی متری

Table 3: Amount of indentation created in the battery body due to impact with a 6 mm diameter impact cross-section

سلول باتری	فرورفتگی باتری کارکرده در ۳۰ °C بر اثر ضربه با قطر ۶mm	فرورفتگی باتری کارکرده در ۶۰ °C بر اثر ضربه با قطر ۶mm	فرورفتگی باتری نو بر اثر ضربه با قطر سطح مقطع برخورد شفت ۶mm
وی تی سی ۶	1.39 ± 0.1 mm	1.68 ± 0.1 mm	1.43 ± 0.1 mm
GB 2565	-	-	1.92 ± 0.1 mm

آزمایش های ضربه با قطر سطح مقطع برخورد ۳ میلی متری (آزمایش نفوذ مکانیکی) فقط برای باتری های استفاده نشده وی تی سی ۶ و جی بی ۲۵۶۵ با شارژ ۱۰۰٪ و ۱۰٪ و در فشار تنظیم کننده ۲ تا ۵ بار (سرعت برخورد ۹۲/۲ تا ۲۳/۹ متر بر ثانیه) و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و برای باتری وی تی سی ۶ علاوه بر دمای ۲۵ درجه سلسیوس، در دماهای ۰ و ۲۵- درجه سلسیوس نیز انجام شد. هر کدام از این آزمایش ها سه مرتبه (در هر مرتبه برای باتری جداگانه) تکرار شدند.

جدول ۴ نتایج آزمایش‌های ضربه با قطر سطح مقطع برخورد ۳ میلی‌متری (نفوذ مکانیکی) را نشان می‌دهد. در آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار تنظیم‌کننده ۲ بار (سرعت برخورد $92/2 \pm 0/10$ متر بر ثانیه) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای هر دو باتری در هر سه مرتبه آزمایش و سطح شارژ ۱۰۰٪ و ۱۰٪، باتری‌ها پایداری سلامت خود را حفظ کردند و تنها فرورفتگی در بدنه به وجود آمد. در آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار تنظیم‌کننده ۳ بار (سرعت برخورد $80/4 \pm 0/10$ متر بر ثانیه) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای باتری وی‌تی‌سی ۶ با شارژ ۱۰۰٪ و ۱۰٪ در مرتبه اول و سوم از انجام آزمایش، باتری‌ها پایداری سلامت خود را حفظ کردند و تنها فرورفتگی در بدنه باتری مشاهده شد؛ ولی در مرتبه دوم آزمایش با شارژ ۱۰٪، باتری سوراخ شد، اتصال کوتاه رخ داد، دمای آن به صورت جزئی تا ۳۳ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرد و نشت گاز صورت گرفت. باتری جی‌بی ۲۵۶۵ در هر سه مرتبه آزمایش پایداری خود را حفظ نمود و سوراخ‌شدگی در آن مشاهده نشد.

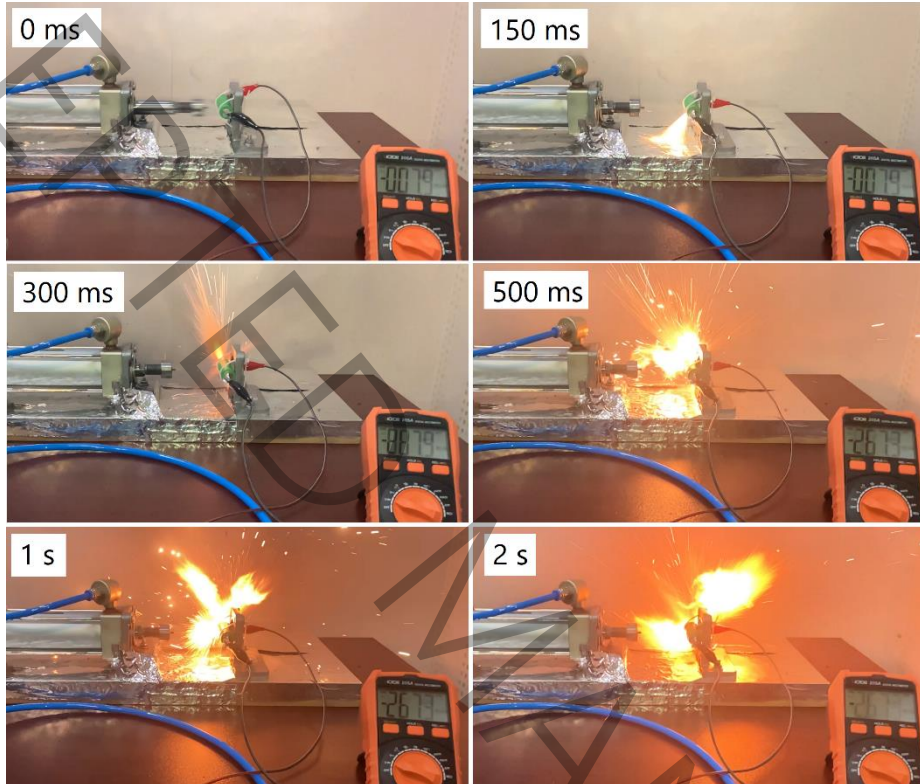
در آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار تنظیم‌کننده ۴ بار (سرعت برخورد $00/6 \pm 0/10$ متر بر ثانیه) برای باتری وی‌تی‌سی ۶ با شارژ ۱۰۰٪ در مرتبه اول آزمایش، باتری سوراخ و منفجر شد. دمای باتری ۳ دقیقه پس از ضربه حداکثر به ۵۱۴ درجه سلسیوس و ولتاژ باتری در عرض ۴۳۰ میلی‌ثانیه به صفر رسید. در مرتبه دوم آزمایش نیز باتری سوراخ شد و انفجار صورت نگرفت ولی نشت گاز رخ داد و دمای باتری در عرض ۶ دقیقه حداکثر به ۱۳۹ درجه سلسیوس رسید و ولتاژ آن در عرض ۷۱ ثانیه از ۲/۴ ولت به ۳ ولت کاهش پیدا کرد. در آزمایش مرتبه سوم با فشار ۴ بار، باتری پایداری سلامت خود را حفظ کرد و شکاف و سوراخ‌شدگی در آن صورت نگرفت و فقط فرورفتگی در بدنه آن به وجود آمد. باتری جی‌بی ۲۵۶۵ در مرتبه اول و دوم آزمایش پایداری خود را حفظ نمود و سوراخ‌شدگی در آن مشاهده نشد ولی باتری سوم سوراخ شد و دمای آن تا ۵۹ درجه سلسیوس بالا رفت.

جدول ۴: مشخصات آزمایش‌های ضربه انجام شده و نتایج آن (برای هر فشار تنظیم‌کننده و دمای آزمایش، آزمایش ضربه با باتری‌های مختلف ۳ بار تکرار شد که رنگ آبی به معنای شارژ ۱۰۰٪ باتری هنگام ضربه و رنگ خاکستری به معنای شارژ ۱۰٪ باتری هنگام ضربه، همچنین رنگ سبز به معنای حفظ پایداری باتری پس از ضربه، رنگ زرد به معنای افزایش دمای باتری پس از ضربه و رنگ قرمز به معنای انفجار باتری پس از ضربه می‌باشد.)

Table 4: Characteristics of the impact tests performed and their results (For each regulator pressure and test temperature, the impact test was repeated 3 times with different batteries, where blue means 100% battery charge at the time of impact and gray means 10% battery charge at the time of impact, green means battery stability after impact, yellow means battery temperature increase after impact, and red means battery explosion after impact.)

فشار تنظیم‌کننده قطر سر شفت در ضربه دما - باتری	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar
6 mm وی تی سی ۶ @ 25 °C					Green, Blue, Blue
6 mm GB 2565 @ 25 °C					Green, Blue, Blue
3 mm وی تی سی ۶ @ 25 °C	Green, Green, Green, Blue, Blue, Blue, Blue, Blue, Blue, Blue, Blue, Blue	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green
3 mm GB 2565 @ 25 °C	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green
3 mm وی تی سی ۶ @ 0 °C				Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green
3 mm				Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green	Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green, Green

در آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار تنظیم کننده ۵ بار (سرعت برخورد $0.1/0 \pm 23/9$ متر بر ثانیه) برای باتری وی تی سی ۶ با شارژ ۱۰۰٪ و ۱۰٪ در هر مرتبه از سه مرتبه آزمایش، باتری منفجر شد. شکل ۵ آزمایش مرتبه اول و انفجار را در ۲ ثانیه اول پس از ضربه نمایش می دهد. در آزمایش مرتبه اول دمای آن در عرض ۴ دقیقه حداکثر به ۶۶۲ درجه سلسیوس و ولتاژ باتری در عرض ۲۹۰ میلی ثانیه به صفر رسید.



شکل ۵: آزمایش نفوذ مکانیکی به باتری Sony وی تی سی ۶ با فشار ۵ bar تنظیم کننده و سرعت برخورد $9/2 \text{ m/s}$ در دمای 25°C که منجر به سوراخ شدن بدنه باتری و اتصال کوتاه و در نتیجه انفجار شد (۲ ثانیه اول پس از ضربه)

Figure 5: Mechanical penetration test on Sony battery with 5 bar regulator pressure and impact velocity of 2.9 m/s at 25°C , which resulted in a puncture of the battery body and a short circuit, resulting in an explosion (first 2 seconds after impact)

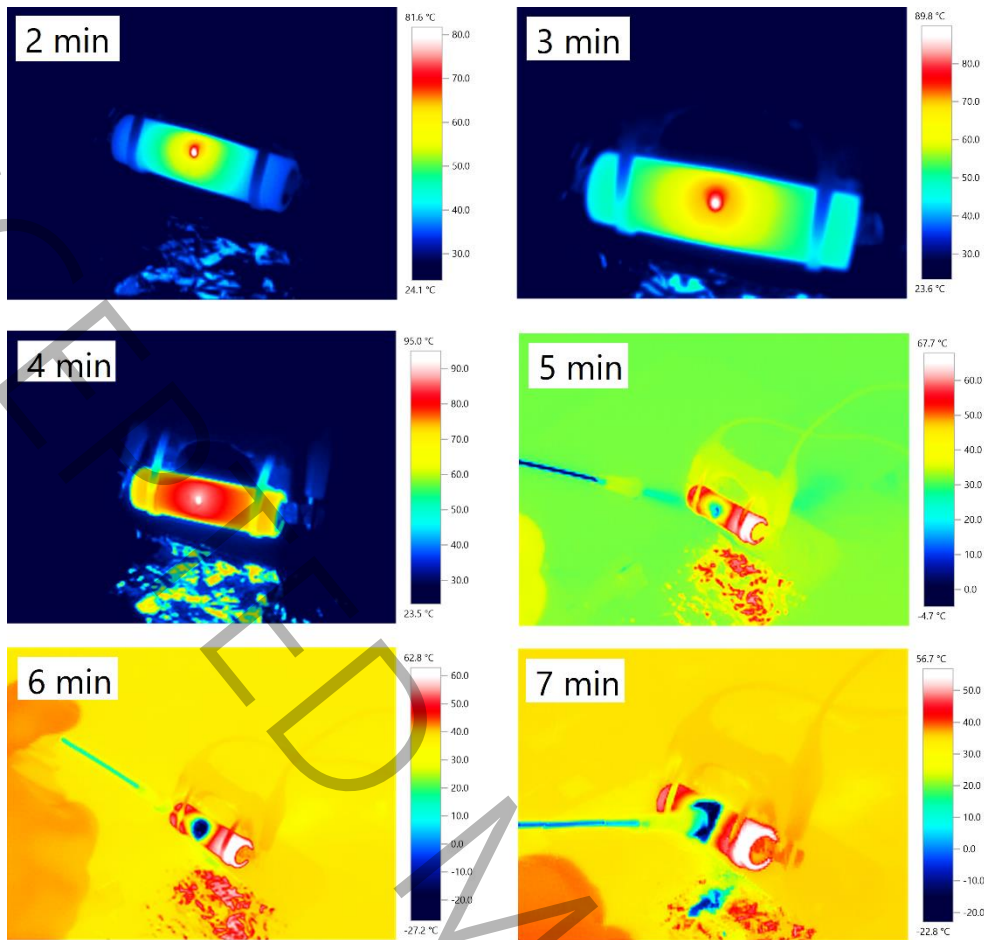
در آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار تنظیم‌کننده ۵ بار برای باتری جی بی ۲۵۶۵ با شارژ ۱۰۰٪ در سه مرتبه صورت گرفت و مطابق شکل ۶ در هر سه مرتبه باتری سوراخ شد ولی منفجر نشد و صرفاً دمای آن‌ها بالا رفت. در باتری دوم، دمای باتری حداکثر پس از ۱۰ دقیقه به ۹۸ درجه سلسیوس رسید.



شکل ۶: باتری GB 2565 پس از آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار تنظیم‌کننده ۵ bar و سرعت برخورد ۹/۲ m/s که منجر به سوراخ شدن بدنه باتری و اتصال کوتاه شد

Figure 6: GB 2565 battery after mechanical penetration test with a regulator pressure of 5 bar and an impact speed of 2.9 m/s, which resulted in a puncture of the battery body and a short circuit.

آزمایش‌های نفوذ مکانیکی در دماهای ۰ و ۲۵- درجه سلسیوس در فشار تنظیم‌کننده ۵ بار فقط برای باتری وی تی سی ۶ با شارژ ۱۰۰٪ انجام شد. علاوه بر آن پس از ضربه در صورت سوراخ شدن با اعمال اسپری منجمدکننده (اسپری نیتروژن با دمای خروج گاز ۵۰- درجه سلسیوس) روی باتری، واکنش باتری مورد آزمایش قرار گرفت. در مرتبه اول و دوم آزمایش نفوذ مکانیکی در دمای ۰ درجه سلسیوس، نفوذی در باتری صورت نگرفت و باتری‌ها توانستند پایداری سلامت خود را حفظ کنند، ولی باتری سوم سوراخ شد و دمای آن در عرض ۴ دقیقه به ۹۵ درجه سلسیوس رسید ولی با شروع فرآیند اسپری، روند دما کاهشی شد و در عرض ۶ دقیقه به ۲۰ درجه سلسیوس رسید. شکل ۷ تصاویر حرارتی باتری را پس از ضربه و همچنین فرآیند اسپری بعد از دقیقه چهارم پس از ضربه را نمایش می‌دهد.



شکل ۷: تصاویر حرارتی باتری Sony تی سی ۶ و روند تغییر دمای آن در ۲ تا ۷ دقیقه پس از ضربه با فشار ۵ bar و سطح برخورد ۳ میلی‌متر در دمای ۰°C که بعد از ۴ دقیقه پس از برخورد پاشش اسپری منجمد کننده بر باتری ایجاد شده در اثر ضربه شروع شده و باعث متوقف شدن روند افزایش دمای سلول و کاهش دما شد

Figure 7: Thermal images of the Sony battery and the process of its temperature change in 2 to 7 minutes after impact with a pressure of 5 bar and a 3 mm impact surface at a temperature of 0 °C. After 4 minutes after impact, the freezing spray on the battery caused by the impact began, stopping the process of increasing the cell temperature and decreasing the temperature.

آزمایش‌های نفوذ مکانیکی در دمای -۲۵ درجه سلسیوس در هر سه مرتبه آزمایش پایداری خود را حفظ نمود و مطابق شکل ۸ سوراخ‌شدگی در آن مشاهده نشد و صرفاً فرورفتگی در روی بدنه باتری ایجاد شد.



شکل ۸: سلول باتری Sony تی سی ۶ پس از آزمایش نفوذ مکانیکی با فشار ۵ bar تنظیم کننده و سرعت برخورد $9/2 \text{ m/s}$ در دمای -25°C که باتری توانست پایداری خود در برابر نفوذ را حفظ کند

Figure 8: Sony battery cell after mechanical penetration test with a pressure of 5 bar regulator and an impact velocity of 2.9 m/s at a temperature of -25°C , where the battery was able to maintain its resistance to penetration.

۴-۱ تحلیل مکانیزمی رفتار شکست در دماهای برودتی

همان طور که در نتایج مشاهده شد، کاهش دما به -25°C درجه سلسیوس مانع از نفوذ ضربه‌زنده و وقوع فرار حرارتی شد. این پدیده را می‌توان با تغییر خواص مکانیکی اجزای سلول و رفتار رئولوژیکی الکترولیت توضیح داد. همچنین در دماهای برودتی، استحکام تسلیم بدنه فولادی باتری و مدول یانگ پلیمرهای جداکننده افزایش می‌یابد که منجر به ارتقای سختی محوری سلول می‌شود. مهم‌تر از آن، نقش تغییر فاز الکترولیت است. الکترولیت‌های تجاری معمولاً حاوی حلال اتیلن کربنات هستند که نقطه انجماد بالایی دارد. در دمای -25°C درجه سلسیوس، الکترولیت در سطح باطری (اسپری نیتروژن بیشتر سطح را سرد می‌کند ولی سرمای وارد شده به بدنه سلول می‌تواند بخشی از الکترولیت نزدیک جداره را ویسکوزتر کند) دچار انجماد جزئی و افزایش شدید ویسکوزیته می‌شود و حالتی نیمه‌جامد پیدا می‌کند. این ساختار سفت‌شده، برخلاف حالت مایع، تراکم‌ناپذیر نیست و به عنوان یک تکیه‌گاه داخلی عمل می‌کند. این تکیه‌گاه باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش ناشی از ضربه شده و از تمرکز تنش موضعی که عامل اصلی پارگی جداکننده و شروع اتصال کوتاه است، جلوگیری می‌کند.

جمع بندی

این پژوهش با هدف ارزیابی تجربی اثر دما، وضعیت شارژ و عمر باتری بر ایمنی مکانیکی سلول‌های لیتیوم-یون استوانه‌ای در برابر ضربه انجام شد. نتایج به وضوح نشان داد که اگرچه استانداردهایی مانند اس‌ای‌ئی جی ۲۴۶۴ شرایط آزمون را در دمای اتاق تعریف می‌کنند، اما دما یک پارامتر بسیار تعیین‌کننده‌تر در پیامد نهایی ضربه است. مشخص شد که ضربه‌های با سرعت بالا (تا $23/9$ متر بر ثانیه) بر یک باتری با شارژ کامل در دمای اتاق، به سادگی منجر به نفوذ، اتصال کوتاه داخلی و فرار حرارتی فاجعه‌بار می‌شود. در مقابل، مهم‌ترین یافته این تحقیق آن بود که کاهش دمای باتری به سطوح زیر صفر (به‌ویژه -25°C درجه سلسیوس) مقاومت مکانیکی آن را به شکل چشمگیری افزایش داده و از وقوع سوراخ‌شدگی و حوادث پس از آن جلوگیری می‌کند. همچنین، نتایج حاکی از آن است که پیرشدگی باتری (پس از ۴۰۰ چرخه)، تأثیر معناداری بر استحکام مکانیکی آن در برابر ضربه ندارد.

این پدیده‌های مشاهده شده را می‌توان با اصول بنیادی علم مواد و الکتروشیمی توضیح داد. افزایش مقاومت مکانیکی در دمای پایین، ناشی از یک اثر ترکیبی است: از یک سو، افزایش استحکام تسلیم پوسته فلزی باتری که تغییر شکل آن را دشوارتر می‌کند و از سوی دیگر، انجماد الکترولیت که به عنوان یک تکیه‌گاه داخلی عمل کرده و نیروی ضربه را توزیع می‌کند. برعکس، شکست‌های فاجعه‌بار در دمای اتاق، پس از نفوذ مکانیکی و پارگی جداساز آغاز می‌شوند. این امر منجر به یک اتصال کوتاه داخلی با مقاومت بسیار پایین شده که

افت ولتاژ آنی و جریان شدید را در پی دارد. این جریان بالا، از طریق گرمایش ژول، ماشه یک سری واکنش‌های زنجیره‌ای گرم‌زای الکتروشیمیایی (شامل تجزیه لایه بین‌فازی الکترولیت جامد، الکترولیت و الکترودها) را می‌کشد که به فرار حرارتی، تولید گاز و نهایتاً انفجار ختم می‌شود.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت حرارتی نه تنها برای عملکرد و عمر باتری، بلکه به عنوان یک عامل حیاتی در ایمنی فعال آن نیز اهمیت دارد. یافته‌ها این ایده را پشتیبانی می‌کنند که طراحی یک سیستم خنک‌کننده اضطراری که بتواند در هنگام تشخیص ضربه یا افزایش دمای غیرعادی، به سرعت دمای بسته باتری را کاهش دهد، می‌تواند راهکاری مؤثر برای جلوگیری یا کنترل فرار حرارتی در خودروهای برقی باشد و باید در تحقیقات آینده بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

۵- مراجع

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2018.
- [2] M. Pepó, S. Fullér, T. Cseke, Z. Weltsch, Advances in Standardised Battery Testing for Enhanced Safety and Innovation in Electric Vehicles: A Comprehensive Review, *Batteries*, 11(4) (2025) 157.
- [3] F. Edler, Occupational health and safety during development and usage of lithium-ion batteries, In *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, (2018) 253-262.
- [4] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, A review of battery fires in electric vehicles: Data analysis and safety strategies, *Fire Technology*, 56 (2020) 1361-1410.
- [5] M. Chen, D. Zhou, X. Chen, W. Zhang, J. Liu, R. Yuen, J. Wang, Investigation on the thermal hazards of 18650 lithium ion batteries by fire calorimeter, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122 (2015) 755-763.
- [6] M. Ghiji, V. Novozhilov, K. Moinuddin, P. Joseph, I. Burch, B. Suendermann, G. Gamble, A review of lithium-ion battery fire suppression, *Energies*, 13(19) (2020) 5117.
- [7] • S. Saxena, C. Hendricks, M. Pecht, Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO₂ cells under different state of charge ranges, *Journal of Power Sources*, 327 (2016) 394-400.
- [8] W. Li, B. Song, A. Manthiram, High-voltage positive electrode materials for lithium-ion batteries, *Chemical Society Reviews*, 46(10) (2017) 3006-3059.
- [9] A. Sarkar, P. Shrotriya, I.C. Nlebedim, Parametric analysis of anodic degradation mechanisms for fast charging lithium batteries with graphite anode, *Computational Materials Science*, 202 (2022) 110979.
- [10] X. Han, L. Lu, Y. Zheng, X. Feng, Z. Li, J. Li, M. Ouyang, A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle, *ETransportation*, 1 (2019) 100005.
- [11] G.R. Molaemanesh, S.M. Mousavi-Khoshdel, A.B. Nemati, Experimental analysis of commercial LiFePO₄ battery life span used in electric vehicle under extremely cold and hot thermal conditions, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143 (2021) 3137-3146.
- [12] D. Zhou, H. Li, Z. Li, C. Zhang, Toward the performance evolution of lithium-ion battery upon impact loading, *Electrochimica Acta*, 432 (2022) 141192.
- [13] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. Van den Bossche, L. Boon-Brett, A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 1427-1452.

- ACCEPTED MANUSCRIPT
- [14] T. Wang, H. Liu, W. Wang, W. Jiang, Y. Xu, S. Zhu, Q. Sheng, Advances in Thermal Management of Lithium-Ion Batteries: Causes of Thermal Runaway and Mitigation Strategies, *Processes*, 13(8) (2025) 2499.
 - [15] J.S. Edge, S. O’Kane, R. Prosser, Lithium ion battery degradation: What you need to know, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(14) (2021) 8200-8221.
 - [16] Z. Guo, Z. Ma, J. Liu, W. Zhao, S. Wang, H. Zhao, L. Ren, Overcharging cycle aging-induced severe degradation of safety properties of lithium-ion pouch battery cells subjected to mechanical abuse, *Energy*, 320 (2025) 135168.

Experimental Investigation of the Simultaneous Effect of Temperature and Aging on Mechanical Safety and Failure Behavior of Cylindrical Lithium-Ion Batteries Under Dynamic Impact

Mohammad Ali Ehteram*, Amir Nezhadsafar

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

The present research aims to experimentally evaluate the safety behavior and failure mechanism of 18650 cylindrical lithium-ion battery cells under dynamic impact loading. To this end, a pneumatic impact testing apparatus was developed in accordance with the ۲۴۶۴ اس ای ٹی جی standard to assess the simultaneous effects of initial temperature (25, 0, and -25 °C), state of charge (10% and 100%), and state of health (fresh and aged over 400 cycles). Experimental results derived from high-speed imaging and thermal data analysis indicated that at ambient temperature, impact with a critical velocity of 9.23 m/s on fully charged samples led to immediate separator rupture and extensive internal short circuit. Under these conditions, the cell voltage dropped to zero within 290 ms, and explosive thermal runaway occurred with a severe temperature rise reaching 662 °C. In contrast, the most significant finding of this study reveals a substantial enhancement in the cell's mechanical resistance at sub-zero temperatures; remarkably, at -25 °C, no penetration or exothermic reaction was recorded even at high impact velocities. Further analysis suggests that the partial solidification and increased viscosity of the electrolyte at low temperatures act as an internal support with quasi-solid behavior, thereby preventing local stress concentration and separator tearing.

Keywords: Lithium-ion Battery, Safety, Mechanical Impact, Temperature Effect, Thermal Runaway, Electric Vehicle