



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الطاقات الكهربائية المتجددة

إعداد

م. عبدالباسط خالد شباط

المشرف المشارك

د. نصر ياسين

المشرف

د. رائد الشرع

لجنة الحكم:

الأستاذ	الأستاذ	الأستاذ	الأستاذ المساعد	الأستاذ المساعد
د. مصطفى الحزوري	د. نديم مخول	د. جمال الناصير	د. رائد الشرع	د. وسيم سعيد

٢٠٢٤-٢٠٢٥



الحمد لله رب العالمين الذي منّ علينا ووفقنا لإنجاز هذا البحث والصلاة والسلام على خير المرسلين وإمام النبيين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

إلى والدي العزيز قدوتي ومعلمي وأستاذي، ووالدتي الغالية المربية العظيمة ونبع الحنان والاطمئنان، وزوجتي العزيزة سندي في كل التحديات، وإخوتي وأخواتي الكرام الذين لم يخلوا في دعمي والوقوف معي للوصول إلى هذا الإنجاز.

إلى أساتذتي المشرفين على الأطروحة، وجميع أعضاء الهيئة التدريسية الذين لم يخلوا في تقديم النصائح والمعلومات القيمة والمفيدة التي كان لها دور بارز في مسيرتي العلمية .

إلى زملائي وأصدقائي ورفاقي في درب الدراسة والتعلم الذين خضت معهم غمار هذه الرحلة الطويلة وقاسيت معهم ظروفها الصعبة فكانوا سنداً وعوناً لي عليها.

إلى شهداء الثورة السورية العظيمة الذين أناروا بدمائهم طريق العلم والتعلم وفتحوا دروب الهداية والنور لمن خلفهم.

الباحث

فهرس المحتويات

١٢	الفصل الأول : الإطار العام للبحث
١٣	١-١ مقدمة(Introduction):
١٣	٢-١ إشكاليات البحث(research problems):
١٤	٣-١ تساؤلات البحث(Research Questions):
١٤	٤-١ فرضيات البحث (Research Hypothesis):
١٤	٥-١ مسلمات البحث (Research Postulates):
١٤	٦-١ الهدف من البحث(Research Objective):
١٥	٧-١ أهمية البحث(Research Importance):
١٥	٨-١ مبررات البحث(Research Justifications):
١٥	٩-١ مصطلحات البحث (Research Terms):
١٦	١٠-١ اأودود البحث (Research Limits):
١٦	١١-١ الدراسة المرجعية (Literature Review):
٣٠	١٢-١ منهج البحث وأدواته: (Research Methodology)
٣٠	١٣-١ مكونات الأطروحة (Thesis Parts):
٣٢	الفصل الثاني: دراسة نظرية
٣٣	١-٢ دراسة نظرية في المدخرات الكهربية(Theorotical Study In Batteries):
٣٣	١-١-٢ تعريف ومكونات المدخرة(Battery Definition And Components):
٣٣	٢-١-٢ أنواع المدخرات الكهربية (Batteries Types)
٤٤	٢-٢ مقارنة بين أنواع المدخرات المستخدمة في التطبيقات العملية(Batteries Comparison):
٤٦	٣-٢ دراسة عامة في الشحن السريع(General Study In Fast Charging):
٤٦	١-٣-٢ ميزات الشحن السريع(Fast Charging Features):
٤٦	٢-٣-٢ سلبيات الشحن السريع (Fast Charging Cons):
٤٩	٣-٣-٢ طرائق وتقنيات الشحن السريع(Fast Charging Methods):
٥٦	٤-٢ طرائق تبريد المدخرات(Batteries Cooling Methods):

١-٤-٢ التبريد بتغيير طور المادة: (Phase Change Material Cooling) ٥٦

٢-٤-٢ التبريد باستخدام مشتتات معدنية (Fins Coolig): ٥٦

٣-٤-٢ التبريد الهوائي الطبيعي: (Air Cooling) ٥٧

٤-٤-٢ التبريد الهوائي القسري (Forced Air Cooling) ٥٨

٥-٤-٢ التبريد السائل: (Liquid Cooling) ٥٩

٦-٤-٢ التبريد الهجين: (Hybrid Cooling) ٦٠

٧-٤-٢ مقارنة بين طرائق التبريد المختلفة (Cooling Methods Comparsion): ٦٢

٦٥ الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة سلوك المدخرة

١-٣ النموذج الرياضي المستخدم لنمذجة المدخرة (The Mathematical Model): ٦٦

١-١-٣ نمذجة أثر درجة الحرارة على المدخرة (Modeling of Temperature Effect On Battery): ٦٩

٢-١-٣ نمذجة أثر التقادم على المدخرة (Modelling Of Aging Effect On Battery): ٧٣

٢-٣ استخراج البيانات المطلوبة من منحنى التفريغ (Extracting The Required Data From The Discharge)

٧٧ (Curve):

١-٢-٣ الاستجابة الحرارية والفقد الحراري (Thermal Response And Heat Loss): ٨٠

٢-٢-٣ القيم المتعلقة بنمذجة التقادم في المدخرة (Values Related To The Aging) : (Caldeira, C. A., and

٨٢ others,2019)

٣-٣ المدخرة المدروسة (Studied Battery): ٨٢

٤-٣ النموذج المستخدم (Used Model): ٨٥

١-٤-٣ المخطط الصندوقي للنمذجة (Simulation Flow Chart) ٨٨

٥-٣ تعديل النموذج لحساب عدد دورات الشحن والتفريغ الفعلية (Model Modification to Calculate Actual

٩٨ (Cycles)

٦-٣ تعديل النموذج لمراعاة تغير درجة الحرارة بين الشحن والتفريغ (Model Modification to Calculate Temp

٩٩ (Differnce)

٧-٣ نتائج نمذجة تأثير درجة الحرارة على عمر المدخرة (Simulation Results of Temp Effect On Battery)

٩٩ (Age)

٨-٣ نتائج نمذجة تأثير الشحن السريع على عمر المدخرة (Simulation Results of Fast Charging on Battery)

١٠١ (Age):

٩-٣ نتائج نمذجة تأثير التبريد أثناء الشحن السريع على عمر المدخرة (Simulation Results of Cooling During)

١٠٤ : (Fast Charging on Battery Age)

١٠٧ الفصل الرابع: الإجراء التجريبي

١٠٨ : (Used Equipments) التجهيزات المستخدمة

١١٢ : (Experiment steps) خطوات التجربة

١١٣ : WATCHPOWER ميزات برنامج

١١٥ : (Cooling Method) طريقة التبريد

١١٧ : (Cooling Methods Compare Results) نتائج مقارنة طرائق التبريد

١١٨ : (The Initial Values Calculaion Experimentally) حساب القيم الابتدائية للمدخرة تجريبياً

١-٦-٤ حساب المقاومة الحرارية للمدخرة تجريبياً (Battery Thermal Resistance Experimentally)

١١٨ : (Calculation

٢-٦-٤ حساب الثابت الزمني الحراري للمدخرة تجريبياً (Battery Time Constant Experimentally)

١١٩ : (Calculation

٣-٦-٤ حساب المقاومة الداخلية للمدخرة تجريبياً (Battery Internal Resistance Experimentally)

١٢٠ : (Calculation

٤-٦-٤ حساب السعة الابتدائية للمدخرة تجريبياً (Battery Initial Capacity Experimentally Calculation)

١٢١ : (Capacity And Internal Resistance During Normal Charging

٧-٤ تغيير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن الطبيعي (Change In

١٢٢ : (Capacity And Internal Resistance During Normal Charging

٨-٤ تغيير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن السريع (Change In Capacity And Internal Resistance

١٢٣ : (During Fast Charging

٩-٤ تغيير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن السريع مع تبريد (Change In Capacity And Internal

١٢٤ : (Resistance During Cooled Fast Charging

١٠-٤ مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة (Comparison Of Experimental Results With Modeling

١٢٥ : (Results

١-١٠-٤ تغيير السعة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في حالة الشحن الطبيعي (Change In Capacity as a

١٢٦ : (Function of Cycles In Normal Charging

٢-١٠-٤ تغير السعة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في حالة الشحن السريع بدون تبريد (Change In

١٢٦: (Capacity as a Function of Cycles In Fast Charging

٣-١٠-٤ تغير السعة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في حالة الشحن السريع مع تبريد (Change In Capacity

١٢٧: (as a Function of Cycles In Cooled Fast Charging

٤-١٠-٤ تغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة أثناء الشحن الطبيعي (Change In Temp During

١٢٩: (Cycle In Normal Charging

٥-١٠-٤ تغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة أثناء الشحن السريع بدون تبريد (Change In Temp

١٢٩: (During Cycle In Fast Charging

٦-١٠-٤ تغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة أثناء الشحن السريع مع تبريد (Change In Temp

١٣٠: (During Cycle In Cooled Fast Charging

١٣٢: (Results And Recommendations) النتائج والتوصيات

١٣٥: (refernces) المراجع

جدول المصطلحات

Battery Electric Vehicles	سيارات المدخرات الكريائية
Ultra-fast Battery Charging	الشحن فائق السعة للمدخرات
Hybrid Cooling	التبريد الهجين
Battery Aging	تقادم مدخرة
Oxidation and Reduction	تفاعلات الأكسدة والإرجاع
Positive Electrode	القطب الموجب
Negative Electrode	القطب السالب
Electrolyte	الكهرليت
Unrechargeable Batteries	المدخرات غير القابلة للشحن
Rechargeable Batteries	المدخرات القابلة للشحن
Lead – Acid	مدخرات الرصاص – حمض
Batteries.Ni-Cd	مدخرات النيكل – كاديوم
Ni-MH Batteries	مدخرات النيكل – هيدروجين
Li-ion Batteries	مدخرات شوارد الليثيوم

Lithium Batteries cobalt oxide	مدخرات أكسيد كوبالت الليثيوم
Lithium manganese oxide Batteries	مدخرات أكسيد منغنيز الليثيوم
Lithium cobalt aluminum oxide Batteries nickel	مدخرات النيكل كوبالت ألومنيوم
Lithium cobalt manganese nickel oxide Batteries	مدخرات أكسيد كوبالت منغنيز النيكل
Lithium Iron Phosphate Batteries	مدخرات فوسفات حديد الليثيوم
Lithium titanate Batteries	مدخرات تيتان الليثيوم
Lithium Batteries Polymer	مدخرات الليثيوم بوليمير
Thermal effect	الأثر الحراري
Lithium Plating	تصفح الليثيوم
Mechanical Effect	الأثر الميكانيكي
Boost Charging	الشحن الدفعي
Variable Current Profile (VCP)	الشحن بتيار متغير
Universal Voltage Protocol (UVP)	طريقة تغيير التوتر الشاملة
Pulse Charging	الشحن النبضي
Pulse Width Modulation	الشحن بطريقة تعديل عرض الموجة

Negative Pulse Charging	الشحن النبضي العكسي
Phase Change Material Cooling	التبريد بتغيير طور المادة
Fins Coolig	التبريد باستخدام الزعانف
Air Cooling	التبريد الهوائي الطبيعي
Forced Air Cooling	التبريد الهوائي القسري
Liquid Cooling	التبريد السائل
Hybrid Cooling	التبريد الهجين
rated capacity	السعة الاسمية
initial state of charge	حالة الشحن الابتدائية
fully charged voltage	توتر الشحن الكامل
Maximum Capacity	السعة الأعظمية للمدخرة
Nominal Discharge Current	تيار التفريغ الاسمي
Internal Resistance	المقاومة الداخلية
Exponential zone	المنطقة الأسية

الملخص

تعتبر السيارات الكهربائية من أهم الحلول لظاهرة الاحتباس الحراري، كما أنها تساهم في توفير الوقود لأن مردود المحرك الكهربائي يصل إلى 90%، بينما لا يتجاوز مردود محرك الاحتراق الداخلي 40%، والمدخرات هي مجال التطوير في السيارات الكهربائية، لذلك تعد إمكانية تطبيق الشحن السريع لها المفتاح الأساسي لانتشار هذه السيارات.

إن من أهم معوقات الشحن السريع للمدخرات ارتفاع درجة حرارتها نتيجة ازدياد سرعة التفاعلات الكيميائية فيها، وهذا يؤدي إلى انخفاض السعة المفرغة من المدخرة، ويساهم في إنقاص عمرها (عدد دورات الشحن والتفريغ قبل الوصول إلى 80% من السعة الاسمية)، كما يمكن أن يكون سبباً لانفجار المدخرة في حال ارتفعت حرارتها بشكل كبير، لذلك لا بد من إيجاد آلية لتبريد المدخرة لتجنب هذه المشاكل.

تم في هذه الأطروحة:

- إعداد نمذجة حاسوبية مبنية على نموذج الدارة المكافئة للمدخرة
- تبريد مدخرة شوارد الليثيوم المكونة من 3 خلايا عن طريق مراوح.
- تفريغ المدخرة بتيار متغير وتسجيل النتائج في الحالات التالية:
 - أ- في حالة الشحن الطبيعي.
 - ب- في حالة الشحن السريع بدون تبريد.
 - ت- في حالة الشحن السريع مع وجود تبريد.
- مقارنة تأثير الحالات الثلاث السابقة على سعة وعمر المدخرة المستخدمة .
- مقارنة نتائج النمذجة مع النتائج التجريبية.

بينت النتائج أن الشحن السريع أدى إلى ارتفاع درجة حرارة المدخرة وقد راعينا في سرعة الشحن عدم وصول درجة حرارة المدخرة إلى حد يؤدي إلى إتلافها. كما أن الشحن السريع أدى إلى تناقص عمر المدخرة بشكل كبير مقارنةً مع الشحن الطبيعي، كما أظهرت النتائج أن استخدام مروحتين للتبريد الهوائي القسري كان أفضل من التبريد المائي الطبيعي عند غمر النصف السفلي من المدخرة بالماء، وقد كان هذا التبريد سبباً في مضاعفة عمر المدخرة أثناء الشحن السريع مقارنةً مع حالة الشحن السريع بدون تبريد.

وأظهرت نتائج النمذجة المبنية على النموذج المكافئ للمدخرة تقارباً كبيراً مع النتائج التجريبية في حساب كل من درجة الحرارة وعمر المدخرة.

كلمات مفتاحية: مدخرات شوارد الليثيوم - سعة المدخرة - عمر المدخرة - برنامج Matlab .

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

عبدالواسط خالد شباط

الفصل الأول : الإطار العام للبحث

١-١ مقدمة (Introduction):

لوحظ ازدياد انتشار السيارات الكهربائية التي تعمل على طاقة المدخرات (Battery Electric Vehicles) في العالم وذلك لأسباب عدة منها: مردودها العالي وتكاليف تشغيلها المنخفضة ومساهمتها في التقليل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والتطور الحاصل في تقنيات المدخرات الذي أدى إلى زيادة المسافة التي يمكن للسيارة أن تسيرها في الشحنة الواحدة (Iyer, V. M., Gulur, S., Gohil, G., & Bhattacharya, S, 2018,2).

بالرغم من الميزات العديدة المذكورة التي يوفرها استخدام السيارات الكهربائية إلا أن هناك عوامل عدة تشكل مخاوفاً بالنسبة لمستخدميها أهمها: المسافة المحدودة التي يمكن للسيارة أن تقطعها في الشحنة الواحدة والوقت الطويل التي تحتاجه المدخرات لإعادة شحنها مرةً أخرى بالإضافة إلى عدم توفر محطات لشحن مدخرات السيارات على الطرق السريعة لذلك تركّز الأبحاث الحديثة على زيادة فترة العمل في الشحنة الواحدة وتقليل زمن الشحن (Trentadue, G, and others, 2018,2). إن زيادة فترة العمل في الشحنة الواحدة تتطلب زيادة حجم المدخرات وهذا يسبب زيادة في وزن وتكلفة السيارات الكهربائية وتصبح غير مجدية اقتصادياً لذلك فالخيار الأفضل هو تقليل فترة الشحن أي زيادة تيار الشحن والذي يُعرف بالشحن السريع (Iyer, V. M., Gulur, S., Gohil, G., & Bhattacharya, S, 2018,3).

١-٢ إشكاليات البحث (research problems):

نظراً لازدياد الحاجة إلى السيارات الكهربائية لأسباب بيئية، وكون المفتاح الأساسي لتطوير استخدام السيارات الكهربائية هو الشحن السريع لتقليل فترة توقفها، كما أن الشحن السريع ضروري في المناطق التي تعاني من انقطاع التيار الكهربائي لفترات طويلة، كان هذا البحث لمحاولة التخلص من مشاكل الشحن السريع وتطوير استخدامه.

١-٣ تساؤلات البحث (Research Questions):

هل هذا البحث يطور تقنيات الشحن السريع؟

وهل يحسن تبريد المدخرات أثناء الشحن السريع من عمر المدخرة؟

وما هو تأثير تبريد المدخرات أثناء الشحن السريع على عمرها؟

١-٤ فرضيات البحث (Research Hypothesis):

هناك مجموعة من القضايا التي يجب تحديدها عند تطبيق الدراسة:

- مواصفات المدخرة المستخدمة.

- طريقة الشحن السريع المتبعة.

- طريقة التبريد المتبعة.

١-٥ مسلمات البحث (Research Postulates):

يستند هذا البحث إلى ازدياد انتشار مدخرات شوارد الليثيوم، وتنوع تطبيقات استخدامها، وازدياد الحاجة

إلى الشحن السريع في هذه التطبيقات، والحاجة إلى معالجة مشاكل الشحن السريع، لتسهيل استخدامها.

١-٦ الهدف من البحث (Research Objective):

يهدف هذا البحث إلى:

- دراسة تأثير الشحن السريع على السعة المفرغة من المدخرة.
- دراسة تأثير الشحن السريع على عمر المدخرة.
- دراسة الطرائق المستخدمة في تبريد المدخرات واستنتاج الطريقة الأفضل لزيادة مردود وعمر المدخرة.
- نمذجة المدخرة حاسوبياً لبيان أثر تبريد المدخرة في زيادة عمرها عند الشحن السريع.

- تنفيذ نظام لتبريد المدخرة المستخدمة واستنتاج الأثر العملي لتبريد المدخرة على كل من سعتها وعمرها لتسهيل استخدامها في السيارات الكهربائية.

٧-١ أهمية البحث (Research Importance):

تكمن أهمية البحث في محاولة التخفيف من مشاكل الشحن السريع وتحسين أداء المدخرات التي تستخدم تقنيات الشحن السريع واختيار طريقة الشحن السريع الأفضل والتي تحافظ على أفضل عمر للمدخرة وتحقق أقل تقادم لها.

٨-١ مبررات البحث (Research Justifications):

- زيادة انتشار السيارات الكهربائية.
- الحاجة إلى استخدام الشحن السريع في السيارات الكهربائية والمناطق التي تعاني من انقطاع التيار الكهربائي لفترات طويلة.
- الحاجة إلى حل مشاكل الشحن السريع من ارتفاع درجة الحرارة وتأثير على عمر المدخرة.

٩-١ مصطلحات البحث (Research Terms):

المدخرة الكهربائية: عنصر كهروكيميائي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وبالعكس من خلال تفاعلات الأكسدة (Oxidation) والإرجاع (Reduction). (Bindner, H. and others, 2005)

مدخرات شوارد الليثيوم: مدخرات كهربائية يُصنع قطبها الموجب من الليثيوم المشاب وقطبها السالب من الكربون.

الشحن السريع: هو شحن المدخرات بنسبة تتجاوز 40A لكل 100Ah أي ما يعادل نسبة تتجاوز 0.4C (أي 0.4 من سعة المدخرة المستخدمة) وفي كل فرصة ممكنة. (Trivedi, N., and others, 2018, 1)

عمر المدخرة: هو عدد دورات الشحن والتفريغ التي تنجزها المدخرة قبل وصول سعتها إلى 80% من السعة الاسمية الابتدائية. (Battery and Energy Technologies, Electropaedia, 2009)

١-١٠ حدود البحث (Research Limits):

يشمل نطاق البحث التعرف على طرائق الشحن السريع وطرائق تبريد المدخرات، وتطبيق عملية الشحن

السريع والتبريد على مدخرة شوارد ليثيوم بسعة (10Ah) .

١-١١ الدراسة المرجعية (Literature Review):

اطُّع على عددٍ من الكتب والرسائل والأوراق البحثية؛ لمعرفة ما توصَّل إليه العالم في مجال بحثنا، ونعرض هنا

بعض هذه الأبحاث:

١-١١-١ مفهوم التبريد الهجين الجديد لتصميم الإدارة الحرارية للمدخرة

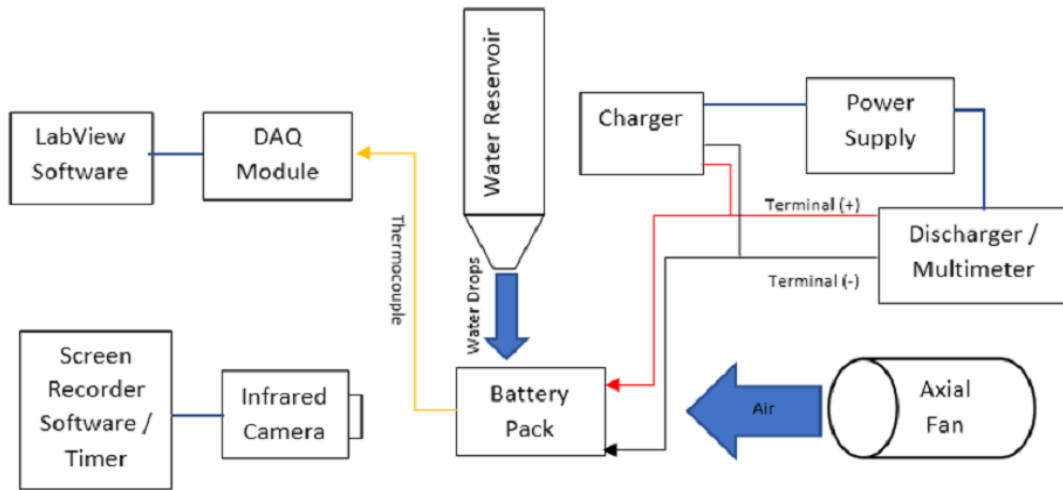
Novel Hybrid Cooling Concept for Battery Thermal Management

Design (2018)

Yuyang Wei, Martin Agelin-Chaab

الباحثون:

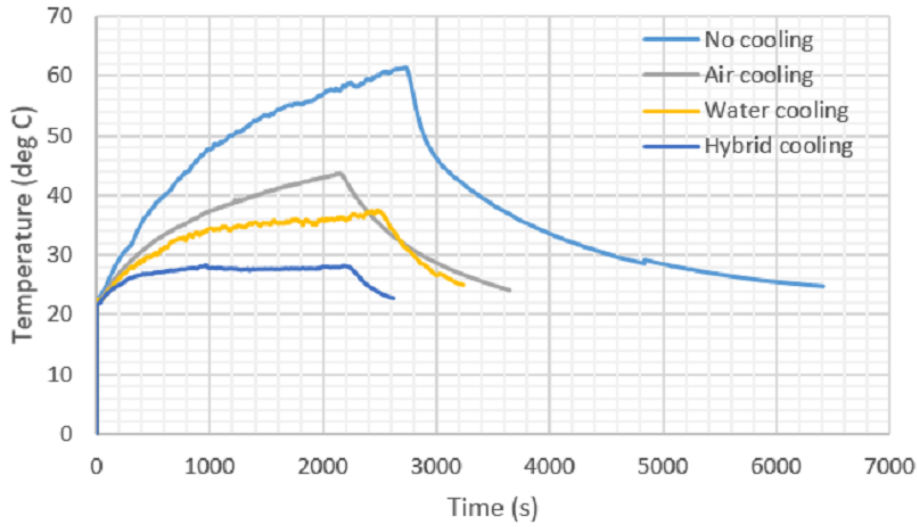
قام الباحثون بتبريد المدخرة (Efest IMR 26650 5200 mAh) وفق المخطط التالي:



الشكل (١-١) مخطط تبريد المدخرة

يوضح الشكل التالي درجة حرارة سطح المدخرة عند التفريغ بتيار 1.15C والشحن بعد ذلك بتيار

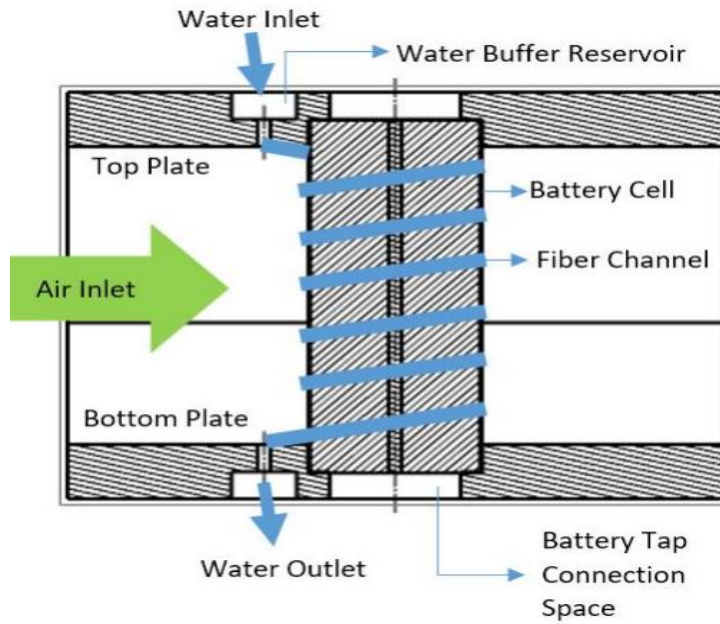
0.2C لمختلف طرائق التبريد



الشكل (١-٢) درجة حرارة سطح مدخرة بسعة 5200mAh عند التفريغ بتيار 1.15C والشحن بعد ذلك بتيار

0.2C لمختلف طرائق التبريد

مخطط التبريد المزدوج لخلايا المدخرة موضح بالشكل التالي:



الشكل (١-٣) مخطط التبريد المزدوج لخلايا المدخرة

باستخدام التبريد المزدوج تم تخفيض الحرارة العظمى ضمن الخلية بنسبة 82.9% مقابل 69.9% للتبريد

الهوائي و 57.3% للتبريد المائي.

١-١-٢ تأثير درجة الحرارة على معدل تقادم مدخرة شوارد الليثيوم التي تعمل فوق درجة

حرارة الغرفة

Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature (2015)

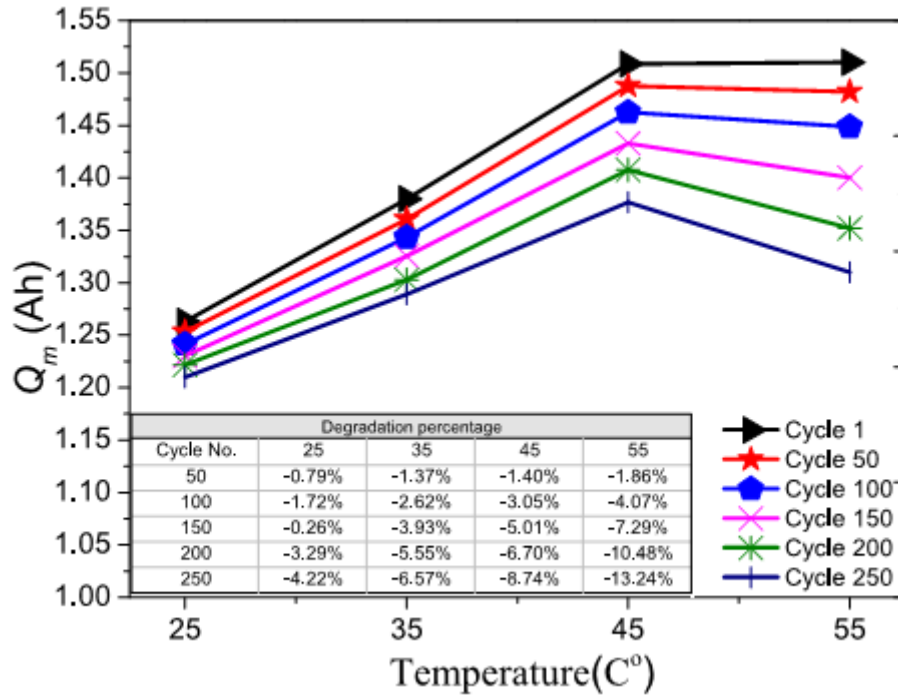
الباحثون: Feng Leng ,Cher Ming Tan & Michael Pecht

في هذا البحث تم تطوير نموذج لدراسة أثر الحرارة على كل من سعة وعمر مدخرة شوارد الليثيوم ذات المواصفات التالية:

الجدول (١-١) مواصفات مدخرة شوارد الليثيوم المستخدمة في الدراسة المرجعية الثانية

Battery	Characteristics
Series	Prismatic cell
Chemical System	LCO
Nominal Voltage	3.6 V
Capacity	1,350 mAh Typical
Charging Condition	CVCC 4.2 V max.0.5 C-rate (675 mA), 50 mA cut-off 25 °C
Discharging Condition	CONSTANT CURRENT, 2.7 V cut-off 25 °C
Dimensions (mm)	6.6 × 33.8 × 50
Approx.Weight	28(g)

يوضح الشكل التالي تغير كل من سعة وعمر المدخرة مع درجة الحرارة:



الشكل (١-٤) تغيّر سعة المدخرة مع درجة الحرارة عند دورات شحن وتفريغ مختلفة

يبين الشكل السابق ازدياد سعة المدخرة عند ارتفاع الحرارة بين (25° – 45° C) بينما تبدأ بالانخفاض

عند ارتفاع درجة الحرارة فوق (45° C)، كما نلاحظ ازدياد تأثير السعة بدرجة الحرارة كلما ازداد عدد دورات

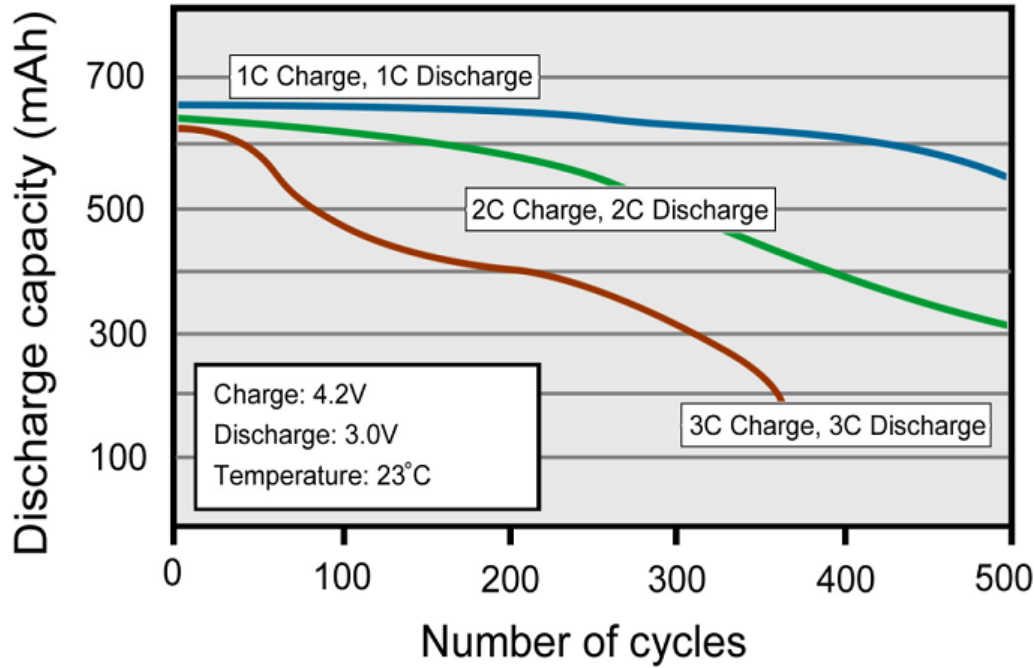
الشحن والتفريغ وبالتالي تناقص عمرها مع ازدياد درجة الحرارة.

١-١-٣ الآثار المترتبة على الشحن فائق السعة للمدخرات

Ultra-fast Battery Charging And what are the implications(2012)

الباحثون: Isidor Buchmann, CEO & founder of Cadex Electronics Inc.

يبين الشكل التالي تأثير الشحن السريع على كل من سعة وعمر مدخرة شوارد الليثيوم بسعة 650mAh:



الشكل (١-٥) تأثير الشحن السريع على كل من سعة وعمر مدخرة شوارد الليثيوم بسعة 650mAh

حيث يظهر الشكل انخفاض سعة وعمر مدخرة شوارد الليثيوم مع ازدياد سرعة الشحن.

عند الشحن والتفريغ بتيار 1C تنخفض سعة المدخرة من 650mAh إلى 550mAh بعد 500 دورة

شحن وتفريغ. أما عند الشحن والتفريغ بتيار 2C تنخفض إلى 310mAh (47% من السعة الاسمية) بعد

500 دورة شحن وتفريغ، أما عند الشحن والتفريغ بتيار 3C تنخفض إلى 26% من السعة الاسمية بعد 360

دورة شحن وتفريغ.

١-١-٤ تقييم كفاءة الشحن السريع في ظل درجات الحرارة القصوى

Evaluation of Fast Charging Efficiency under Extreme Temperatures

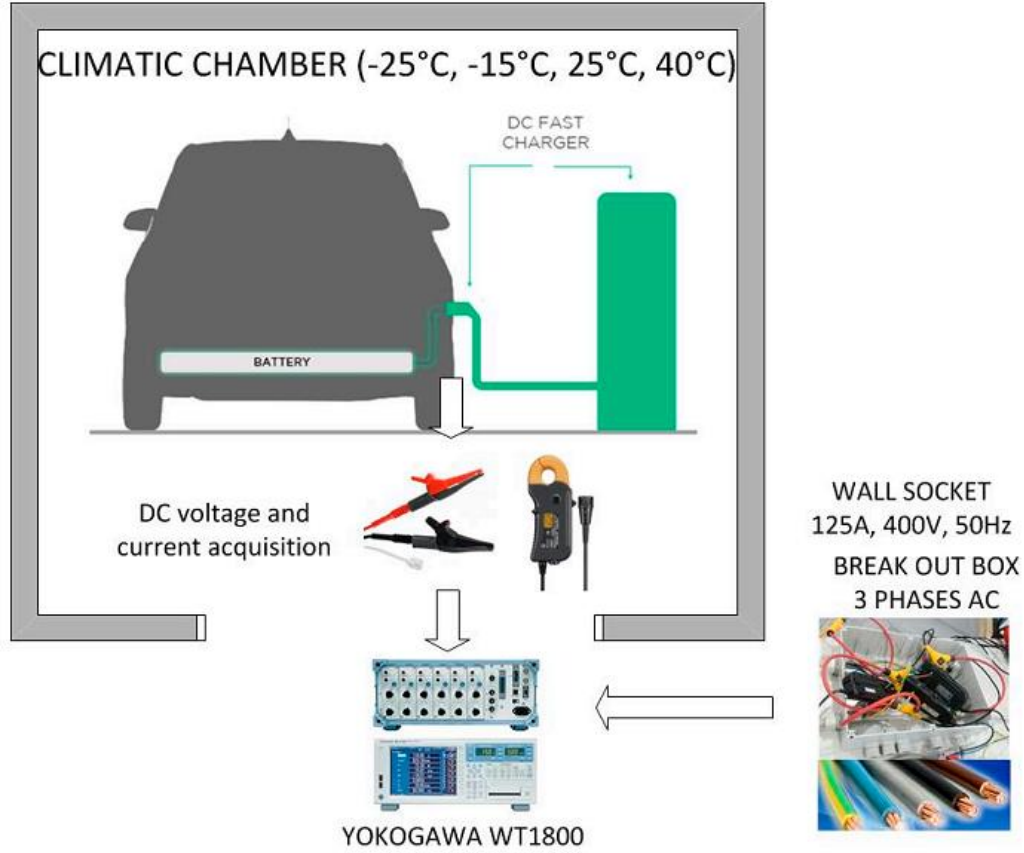
Alexandre Lucas, Marcos Otura, Konstantinos

الباحثون :

Pliakostathis, Marco Zanni and Harald Scholz (2018)

قام الباحثون بدراسة تأثير عدة أنواع من الشواحن السريعة على الاستطاعة المحقونة في المدخرات عند

رفع نسبة شحنها من 25% إلى 80% عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (٦-١) مخطط مراقبة الشحن السريع للمدخرات

مواصفات الشواحن السريعة المستخدمة:

الجدول (٢-١) مواصفات الشواحن السريعة المستخدمة

Charger	Electrical Parameters	Efficiency and Power Factor (PF)	Operating Temperature	Weight and Noise
A	400 Vac; 200–500 Vdc; 20 to 44 kWdc; 20 to 43 kWac; Max 63 Aac/125 Adc	Not available PF: Not available	–30 °C to +40 °C	350 kg; <55 dB
B	400 Vac; 300 Arms; 120 kWdc; 65 kWac	96% PF: 0.99	–25 °C to +45 °C	400 kg; 60 dB
C	400 Vac; 80 A; 55 kVA; 50 kWdc; Max 120 A Standby Power: 100 W (w/o heater), 1000 W	>92% PF: Not available	–30 °C to +40 °C	400 kg; <45 dB
D	400 Vac; 73 Aac, 43 kVA; Max 120 Adc	>93% PF: 0.98	–25 °C to +50 °C	600 kg; <55 dB
E	400 Vac; 80 A; Standby Power: 250 W (w/o heater), 1000 W	96% PF: Not available	–30 °C to +50 °C	350 kg; <60 dB
F	400 Vac; 87 A; 50 kW; Standby Power: 700 W (with heater)	95% PF: N/A	–30 °C to +45 °C	350 kg; <55 dB
G	400 Vac; 600–900 Vdc; 80 Aac; 90 Adc; 50 kWdc; 43 kWac; Max 125 Adc; 63 Aac	>92% PF: 0.99	–20 °C to +50 °C	165 kg; N/A
H	400 Vac; 143A; 43 kWac; 50 kWdc; Max 63 Aac, 120 Adc	95% at nominal output Power PF: >0.96	–30 °C to +45 °C	445 kg; <55 dB

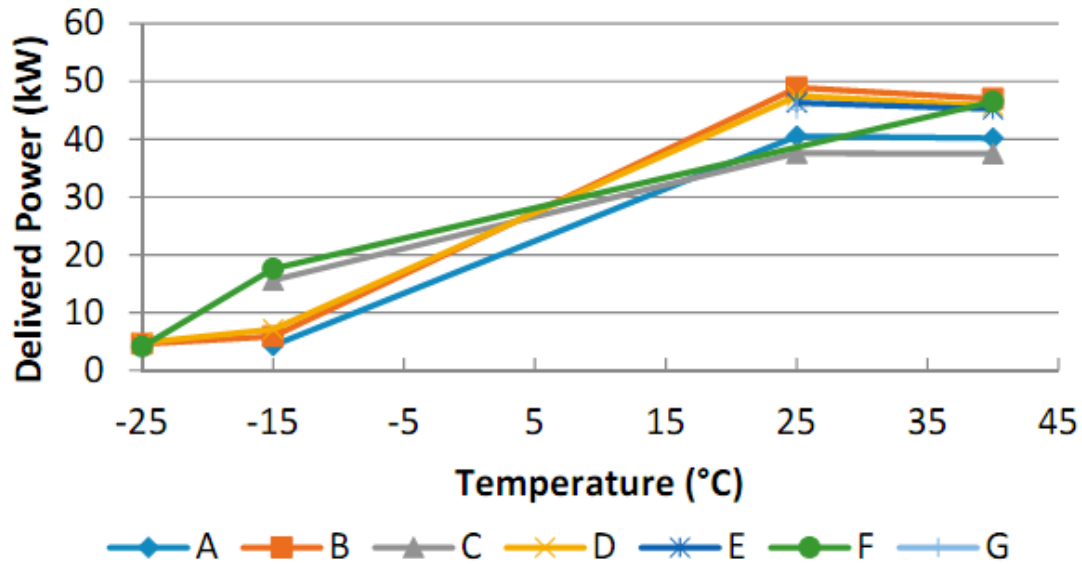
أما مردود وزمن الشحن لكل من الشواحن السريعة المستخدمة فهو موضح بالجدول التالي:

الجدول (٣-١) مردود وزمن الشحن لكل من الشواحن السريعة المستخدمة

Chargers	Power Conversion Efficiency	SoC	Time mm:ss (SoC 12-80%)	ERR
A	91% at 40.5 kW 87% at 20.7 kW	25% 80%	22:28	1.11
B	92% at 48.9 kW 87% at 15 kW	25% 80%	25:10	1.10
C	92% at 37.6 kW 87% at 15.3 kW	25% 80%	25:29	1.09
D	92% at 47.5 kW 93% at 20.9 kW	25% 80%	19:47	1.08
E	92% at 46.3 kW 93% at 16.2 kW	25% 80%	24:08	1.08
G	90 % at 45.2 kW 89% at 17.2 kW	25% 80%	25:39	1.11

والاستطاعة المحقونة في المدخرات عند رفع نسبة شحنها من 25% إلى 80% عند درجات حرارة مختلفة

موضحة بالشكل التالي:



الشكل (٧-١) الاستطاعة المحقونة في المدخرات عند رفع نسبة شحنها من 25% إلى 80% عند درجات حرارة مختلفة

١- عند الحرارة C (25-45) لا تتأثر الاستطاعة المحقونة في المدخرات بشكل كبير

٢- عند درجات الحرارة المنخفضة تنخفض الاستطاعة المحقونة في المدخرات بشكل كبير وقد تتعذر لبعض أنواع الشواحن.

١-١-٥ نمذجة عمر مدخرة شوارد الليثيوم عند درجات الحرارة المنخفضة:

Modeling of Ageing of Lithium-Ion Battery at Low Temperatures (2014)

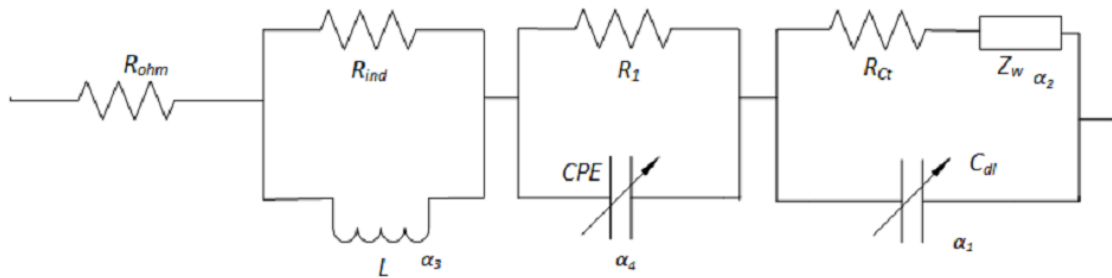
الباحث: Department of Energy and Environment Division of Electric Power

Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

الجدول (١-٤) مواصفات المدخرة المستخدمة

A123 Cell Specifications	
Manufacturer	A123
Cell Type	Round
Nominal Voltage [Volt/cell]	3.3
Peak Charge Voltage [V]	3.6-3.8
Nominal Capacity [Ah]	2.3
Cathode Material type	$LiFePO_4$
Anode Material	Graphite
Electrolyte	$LiPF_6$ in unspecified solution

والنموذج المعتمد لنمذجة المدخرة:



الشكل (١-٨) النموذج المعتمد لنمذجة المدخرة

خلص الباحثون إلى أن النموذج المستخدم يحاكي سلوك المدخرة عند درجات حرارة منخفضة.

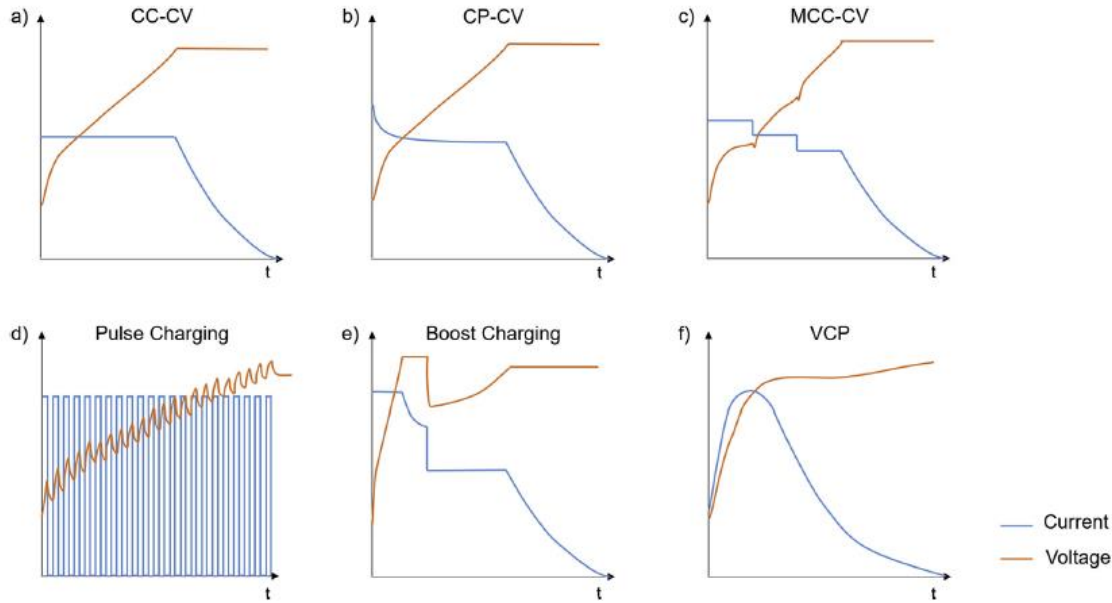
١-١١-٦ مراجعة في الشحن السريع لمدخرات شوارد الليثيوم:

Lithium-ion battery fast charging: A review (2019)

الباحثون: Anna Tomaszewska , Zhengyu Chu....and others

- بين الباحثون معوقات الشحن السريع:
 - الأثر الحراري
 - تصفح الليثيوم: تشكل صفيحة من الليثيوم على القطب السالب
 - الأثر الميكانيكي
- كما وضع الباحثون أشهر الطرائق المستخدمة للشحن السريع:
- CC-CV: تيار ثابت حتى وصول توتر المدخرة إلى توتر معين وبعدها توتر ثابت حتى يصل التيار إلى قيمة قريبة من الصفر
- CP-CV: استطاعة ثابتة وبعدها توتر ثابت حتى يصل التيار إلى الصفر
- (MCC-CV): عدة تيارات ثابتة وبعدها توتر ثابت
- Pulse charging: شحن نبضي
- Boost charging: CC-CV-CC-CV
- VCP: تيار متغير

A. Tomaszewska et al. / eTransportation 1 (2019) 100011



الشكل (٩-١) مخطط التوتر والتيار لطرائق الشحن السريع المختلفة

وقد تبين أن أفضل طريقة تحافظ على عمر المدخرة هي الطريقة الأولى حيث يمكن أن نصل إلى حوالي (330-400) دورة دون حصول تغيرات كبيرة على سعة المدخرة.

١-١-٧ طرائق الشحن السريع المختلفة المستخدمة في السيارات الكهربائية:

Different fast charging methods and topologies for EV charging(2018)

في هذا البحث تتم مناقشة أربع طرائق مختلفة للشحن السريع والمقارنة بينها بناءً على محاكاة

:MATLAB

١- الشحن بتيار ثابت

٢- الشحن بتوتر ثابت

٣- الشحن النبضي

٤- الشحن النبضي العكسي

الطريقة الأولى هي الأسهل في التنفيذ ولكن هناك تغير بتيار المدخرة أكثر وعامل الاستطاعة منخفض.

الطريقة الثانية يتم تحقيق تحكم أفضل وعامل الاستطاعة مرتفع ولكنها أكثر تكلفة نظراً لاستخدام مكونات مكلفة مثل المحولات عالية التردد والتثنيات.

الطريقة الثالثة والرابعة عامل الاستطاعة منخفض ونفس تكلفة الطريقة الثانية.

١٠-٨ الدروس المستفادة من انتشار الشحن السريع في السيارة الكهربائية:

LESSONS LEARNED ON EARLY ELECTRIC VEHICLE FAST-CHARGING DEPLOYMENTS (2018)

Michael Nicholas and Dale Hall

الباحثون:

يركز البحث على الدروس المستفادة من عمليات الشحن السريع في العديد من الأسواق حول العالم حتى منتصف عام ٢٠١٨ وعن استخدام السيارات الكهربائية التي تعمل بالمدخرات. ويستعرض التقرير التطورات الأخيرة في تكنولوجيا الشحن السريع وأيضاً الكمية والتوزيع عبر أسواق السيارات الكهربائية الرئيسية. ومن النتائج المستفادة من البحث:

هناك اختلافات بين البلدان تشير إلى أنه يجب تعديل عدد أجهزة الشحن اللازمة لتناسب مع الظروف المحلية. كما يجب زيادة عدد أجهزة الشحن السريع بشكل كبير مثل نمو السيارات الكهربائية في السوق، لكن الزيادة المطلوبة في الشحن السريع ستكون أقل من زيادة السيارات الكهربائية، حيث أصبح استخدام المحطات أفضل وسرعة الشحن تزيد ويمكن للحكومة والصناعة والمرافق أن تساعد في تمهيد الطريق للأنظمة السريعة الشحن لدعم السيارات الكهربائية الحالية والمستقبلية.

١١-٩ مدخرات شوارد الليثيوم الجزء الأول: نظرة عامة وتحديث ٢٠١٩

Lithium-ion Batteries Part I: General Overview and 2019 Update

هذا البحث هو تحديث لعام ٢٠١٩ للحالة الراهنة لتكنولوجيا شوارد الليثيوم. ويصف العناصر الأساسية الوظيفية لخلايا مدخرة شوارد الليثيوم، ويقارن عدة تقنيات لمدخرات الليثيوم الحالية والناشئة، ويقدم لمحة موجزة عن السلامة، والاختبار، و قضايا النقل المشاركة في تصميم المنتجات مع مدخرات شوارد الليثيوم. ويبين الجدول التالي مقارنة بين بعض أنواع مدخرات شوارد الليثيوم ومدخرات أخرى من حيث التوتر وكثافة الطاقة والعمر الافتراضي ومواصفات أخرى:

الجدول (١-٥) مقارنة بين أنواع المدخرات من حيث التوتر وكثافة الطاقة والعمر الافتراضي

Characteristic	LiCoO ₂ (LCO)	LiFePO ₄ (LFP)	SLA	NiCd	NIMH
Nominal voltage per cell	3.7	2.5-3.6 ¹	2.0 ²⁵	1.2 ²⁵	1.2 ²⁵
Specific energy (Wh/kg)	175-200 ^{2,25}	60-110 ²	30-40	35-80 ^{25,26}	55-110 ^{25,27}
Energy density (Wh/L)	400-640 ²	125-250 ¹	50-90 ^{25,26}	100-150 ^{25,26}	160 ²⁶ -420 ²⁸
Cycle life (to 80% original capacity at 100% DOD)	500+ ¹	1000+ ²	200-300 (up to 400 at 80% DOD) ²⁹	300-1000 ²⁵	500-1000 ²⁵
Calendar life (years)	>5 ²	>5 ¹	2-8 ²⁵	5-7 ²⁵	5-10 ²⁵
Ambient temperature during charge (°C)	0-45 ²	0-45 ²	-40-50 ²⁵	0-40 ²⁵	0-40 ²⁵
Ambient temperature during discharge (°C)	-20-60 ²	-30-60 ²	-40-60 ²⁵	-20-70 ²⁵	-20-65 ²⁵
Self-discharge capacity loss per month	2-10% ²⁵	2-10%	4-8% ²⁵	15-20% ²⁵	15-30% (conv.) 2% (advanced) ³⁰
Memory effect	No ²	No ²	No ²⁵	Yes ²⁵	Yes, less than NiCd ²⁵
Toxic metals	None	None	Lead	Cadmium	None
Battery management system required	Yes	Yes	No	No	No

١٠-١١-١ التحديات والإيجابيات في الشحن السريع لمدخرات شوارد الليثيوم

Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries (2020)

الباحثون: Wenlong Xie and others

يلخص هذا البحث آلية تقادم المدخرات الناتجة عن الشحن السريع والسلبات الناتجة عن طبيعة الشحن السريع، كما يراجع الأبحاث القديمة فيما يتعلق بخصائص مواد المدخرة والتغيرات الكيميائية التي تحدث أثناء الشحن السريع ويسلط الضوء على الأبحاث الجديدة في الشحن السريع.

١١-١١-١ اختبار ونمذجة المدخرة باستخدام مكتبة (MATLAB SIMULINK)

BATTERY SIMULATION AND INVESTIGATION UTILIZING MATLAB SIMULINK (2016)

تم في هذا البحث شرح عوامل تقييم خلايا مدخرة ليثيوم فوسفات الحديد. وتم فيه إجراء الاختبارات التجريبية للخلية باستخدام برنامج MACCOR، وهو برنامج نظام اختبار المدخرة. بالإضافة إلى ذلك، تمت محاكاة نظام إمداد الطاقة للمدخرة المستخدمة باستخدام نظام تحكم NPSAT1 المستخدم في Matlab Simulink .

١١-١٢-١ آثار الشحن السريع للمركبات الكهربائية على عمر المدخرة وأداء السيارة

Effects of Electric Vehicle Fast Charging on Battery Life and Vehicle Performance (2015)

تم اختبار ٤ سيارات في هذه الدراسة، واجهت السيارات الأربع التي تعمل بالمدخرات والتي كانت تسير في مدينة فينيكس بولاية أريزونا مناخًا حارًا، وتم شحن اثنتين منها بسرعة مضاعفة عما أوصت به الشركة المصنعة لها. على الرغم من هذه الشروط، تم إصلاح المركبات دون فشل لمسافة ٥٠ ألف ميل. ولوحظ وجود خسارة أكبر في سعة المدخرة بالنسبة للمركبات سريعة الشحن. تم التحقق من أن تشغيل السيارة، متشابه جدًا بين مجموعات الاختبار، وكان أكبر اختلاف في الظروف التي تمت ملاحظتها هو درجة حرارة المدخرة أثناء الشحن. وبدأ أن درجات الحرارة المحيطة الأكثر سخونة قد أدت إلى تسريع فقدان القدرة لجميع المركبات في الدراسة.

١١-١٣-١ تأثير الشحن السريع على عمر مدخرات السيارات الكهربائية

Impact of Fast Charging on Life of EV Batteries (2015)

الباحثون: Jeremy Neubauer and others

خلص الباحثون إلى النتائج التالية:

- يعتمد استخدام البنية التحتية العامة للشحن بشكل كبير على سلوك الطريق الخاص بالمستخدم
- يمكن أن يؤثر توفر الشاحن السريع بشكل إيجابي على مردود المركبات الكهربائية بالمدخنة، حتى في ظل الاستخدام غير المتكرر
- لا تبدو معدلات الاستخدام المقدر متكررة بما يكفي للتأثير بشكل كبير على عمر المدخنة
- تعد أنظمة الإدارة الحرارية للمدخنة أمرًا بالغ الأهمية في تخفيف الظروف الحرارية الخطيرة في جولات المسافات الطويلة مع أحداث الشحن السريع المتعددة

١-١١-١٤ نمذجة المدخنة والشحن السريع للمركبات الكهربائية

Battery modeling and fast charging of EV (2010)

يتناول هذا البحث بعض أساسيات تكنولوجيا السيارة الكهربائية وشحن المدخنة، ويركز على تكنولوجيا شحن المدخرات ونمذجة المدخنة للتطبيق في السيارات الكهربائية. تم استعراض طريقتين مختلفتين للنمذجة في البحث: نمذجة الحالة المستقرة والنمذجة الديناميكية للمدخرات. تظهر نتائج الشحن السريع كفاءة النمذجة ذهابًا وإيابًا في الحالة المستقرة والحالات الديناميكية.

١-١١-١٥ تصميم ومحاكاة محطة الشحن السريع لمدخرات السيارات الكهربائية

Design and simulation of a fast charging station for PHEV/EV batteries (2010)

الباحثون: G. Joos and M. de Freige, Jr.

ناقش البحث الأعمال التي تم إجراؤها في عملية الشحن السريع لمدخرات السيارات الكهربائية. أظهرت المحاكاة أن التصميم المقترح الذي يستخدم FES ومكثف فائق يقع في فئة محطة المستوى الثالث. في الواقع، تم شحن مدخنة PHEV النموذجية من 20% إلى 95% SOC في 13.25 دقيقة مع البقاء ضمن المواصفات الفنية للمعدات ولا تتجاوز طاقة الخرج ٢٤٠ كيلووات.

١-٢ منهج البحث وأدواته: (Research Methodology)

تعتمد منهجية البحث على إجراء دراسة متكاملة لتأثير الشحن السريع على مدخرات شوارد الليثيوم وتتضمن:

- إعداد نموذج حاسوبية تبين أثر ارتفاع درجة الحرارة على السعة المفرغة من المدخرة، وعلى عمر المدخرة في حالات الشحن المختلفة.
- تنفيذ طريقة الشحن السريع
- تبريد مدخرة شوارد الليثيوم المكونة من عدد من الخلايا
- تفريغ المدخرة بتيار متغير وتسجيل النتائج كتابع للزمن في الحالات التالية:
 - في حالة الشحن الطبيعي.
 - في حالة الشحن السريع بدون تبريد.
 - في حالة الشحن السريع مع وجود تبريد.

١-٣ مكونات الأطروحة (Thesis Parts):

(١) المقدمة و الدراسة المرجعية.

(٢) الدراسة النظرية

- دراسة نظرية في المدخرات الكهربائية.
- مقارنة بين أنواع المدخرات المستخدمة في التطبيقات العملية.
- دراسة عامة في الشحن السريع وتشمل:
 ١. ميزات وسلبيات الشحن السريع.
 ٢. طرائق وتقنيات الشحن السريع واختيار الطريقة الأفضل.

- دراسة الطرائق المستخدمة في تبريد المدخرات والمقارنة بينها.

(٣) نمذجة ومحاكاة سلوك المدخرة:

- تصميم النموذج الرياضي اللازم لحساب سعة وعمر المدخرة عند تغير درجة الحرارة.
- إعداد نمذجة حاسوبية تبين أثر ارتفاع درجة الحرارة على السعة المفرغة من المدخرة، وعلى عمر المدخرة.

(٤) الدراسة التطبيقية

- تنفيذ طريقة الشحن السريع المثلّي على المدخرة المستخدمة في المركبات الكهربائية ودراسة أثر هذه الطريقة في التخفيف من سلبات الشحن السريع.
- تبريد مدخرة شوارد الليثيوم المكونة من عدد من الخلايا .
- تفريغ المدخرة بتيار متغير وتسجيل النتائج كتابع للزمن في الحالات التالية:
 - في حالة الشحن الطبيعي.
 - في حالة الشحن السريع بدون تبريد.
 - في حالة الشحن السريع مع وجود تبريد.
- مقارنة تأثير الحالات الثلاث السابقة على سعة وعمر المدخرة المستخدمة .

(٥) مناقشة النتائج والتوصيات.

الفصل الثاني: دراسة نظرية

٢-١ دراسة نظرية في المدخرات الكهربائية (Theoretical Study In Batteries):

٢-١-١ تعريف ومكونات المدخرة (Battery Definition And Components):

تُعرّف المدخرة الكهربائية بأنها عنصر كهروكيميائي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وبالعكس من خلال تفاعلات الأكسدة (Oxidation) والإرجاع (Reduction).

تتكون المدخرة من: (Bindner, H. and others, 2005)

١- قطب موجب (Positive Electrode): تنتقل الإلكترونات منه إلى الدارة الخارجية.

٢- قطب سالب (Negative Electrode): يستقبل الإلكترونات من الدارة الخارجية.

٣- كهليلت (Electrolyte): وسط يسمح بانتقال الشوارد داخلياً بين القطبين

٤- فاصل (Separator): عازل كهربائي يسمح بمرور الشوارد دون الإلكترونات.

٢-١-٢ أنواع المدخرات الكهربائية (Batteries Types)

تقسم المدخرات بشكل عام إلى نوعين أساسيين:

▪ **المدخرات غير القابلة للشحن Unrechargeable Batteries:** وهي المدخرات التي تستخدم لمرة واحدة فقط، ولا يمكن إعادة شحنها.

▪ **المدخرات القابلة للشحن Rechargeable Batteries:** يتم شحنها وتفريغها بشكل متكرر وأهمها:

▪ مدخرات الرصاص - حمض Lead - Acid.

▪ مدخرات النيكل - كاديوم Ni-Cd.

▪ مدخرات النيكل - هيدروجين Ni-MH.

▪ مدخرات شوارد الليثيوم Li-ion.

٢-١-٢-١ مدخرات الرصاص - حمض Lead - Acid

١-٢-١-٢ استخدام مدخرات الرصاص - حمض (Lead – Acid Usage)

تستخدم مدخرات الرصاص - حمض لتشغيل محركات التيار المستمر التي تستخدم لإقلاع محركات الاحتراق الداخلي، وفي مقاسم الاتصالات السلكية واللاسلكية، وفي وحدات عدم انقطاع القدرة UPS وفي محطات توليد الطاقة الكهربائية لتغذية دارات التحكم في حالة الانقطاع العام (Black Out). يوضح الشكل (١-٢) شكل هذا النوع من المدخرات.



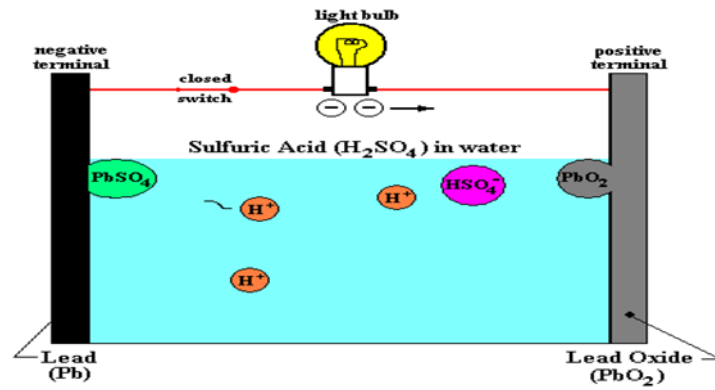
الشكل (١-٢) مدخرات الرصاص - حمض (Pavlov, D. 2011)

١-٢-١-٢-٢ بنية ومبدأ عمل مدخرات الرصاص - حمض (Lead – Acid Batteries)

(Components)

الجدول (١-٢) بنية مدخرات الرصاص-حمض

القطب الموجب	القطب السالب	الكهرليت	الجهد الاسمي للخلية
ثاني أكسيد الرصاص PbO_2	الرصاص Pb	حمض الكبريت الممدد H_2SO_4	$2 V$

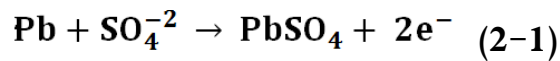


الشكل (٢-٢) بنية مدخرة الرصاص - حمض (Kiehen,H.A.,2003)

على القطب السالب: تتفاعل أيونات الكبريت السالبة الموجودة في السائل الكهرليتي مع ذرات الرصاص الموجودة

على سطح القطب السالب وينتج عن هذا التفاعل تحول ذرات الرصاص إلى أيونات موجبة وتصدر كل ذرة

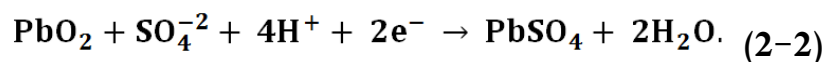
رصاص الكترونيين حسب التفاعل: (Kiehen,H.A.,2003)



على القطب الموجب: تتفاعل كل من أيونات الكبريت وأيونات الهيدروجين مع أكسيد الرصاص على هذا القطب

فينتج اتحاد بين أيون الرصاص السالب وأيون الكبريت الموجب ويتشكل مول من ذرتي ماء كما في التفاعل:

(Kiehen,H.A.,2003)



تتقادم الخلية وتفقد قدرتها على تخزين الكهرباء بالتدريج نتيجة تحول حمض الكبريت إلى ماء، ومع تكرار عمليتي الشحن والتفريغ يبقى بعض كبريتات الرصاص على القطب الموجب دون أن تتحلل في الكهرليت، وتتشكل مادة عازلة تغطي الأجزاء الفعالة من جسم القطب، وتسمى هذه الظاهرة بالسلفنة وهي السبب الرئيسي لتقادم المدخرة (Kiehn, H.A., 2003).

١-٢-١-٣ مميزات مدخرات الرصاص - حمض (Lead - Acid Batteries Features)

(Bindner, H. and others, 2005)

- ١- انخفاض سعرها مقارنة مع الأنواع الأخرى.
- ٢- تحمل ظروف التشغيل من حرارة مرتفعة والتيارات شحن وتفريغ عالية وهذا يعني عدم الحاجة لوجود عناصر حماية إضافية.
- ٣- قليلة التأثير بزيادة عمق التفريغ مقارنة مع مدخرات شوارد الليثيوم.

١-٢-١-٤ سلبيات مدخرات الرصاص - حمض (Lead-Acid Batteries Cons)

(Bindner, H. and others, 2005)

- ١- تعرضها إلى زيادة الشحن Overvoltage يؤدي إلى توليد فقاعات غازية وحدوث تبخر للماء الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض السعة بشكل ملحوظ.
- ٢- انخفاض كثافة قدرتها وثقل وزنها.
- ٣- سرعة التفاعلات غير المرغوبة تتضاعف مع زيادة درجة الحرارة بمقدار عشر درجات مما يؤدي إلى تسريع عملية التقادم.

١-٢-١-٥ مدخرات الرصاص حمض الأنبوبية (Tubular Batteries) :

الفرق بين مدخرة الصفائح المسطحة Flat Plate Battery والمدخرة الأنبوبية Tubular Battery ، هو طريقة

تصميم القطب الموجب، فالقطب الموجب هو الأضعف في المدخرة وهو الأقل عمراً. في مدخرة الصفائح المسطحة يكون القطب الموجب والسالب مسطحاً وتُطلى مادة اكسيد الرصاص Lead Oxide على وجهي القطب وتكون الأقطاب متوازية ومتتالية موجب فسالب، أما في المدخرات الأنبوبية تكون الأقطاب الموجبة على شكل أنابيب بينما يبقى القطب السالب كصفيحة مسطحة، فالمدخرة الأنبوبية من الداخل هي صفائح سالبة متوازية متتالية تحصر بينها أنابيب شاقولية تمثل الأقطاب الموجبة . (Faddouli, A.and others, 2019)

وتعتبر المدخرات الأنبوبية أطول عمراً من المسطحة، لأنه مع مرور الوقت تتآكل المادة التي تُطلى بها الصفائح وتهبط الى أسفل المدخرة وتصبح كفاءة مدخرة الصفائح المسطحة العادية أقل، بينما تبقى المادة سليمة على الأنابيب الممثلة للقطب الموجب في المدخرات الأنبوبية. (Faddouli, A.and others, 2019)

كما في الشكل التالي:



الشكل (٢-٣) المدخرة الأنبوبية

٢-٢-١-٢ مدخرات النيكل - كادميوم (Ni-Cd Batteries)

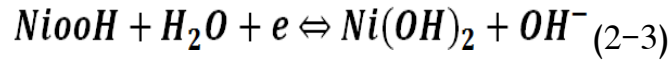
٢-٢-٢-١-٢ بنية ومبدأ عمل مدخرات النيكل - كادميوم (Ni-Cd Batteries Components)

الجدول (٢-٢) بنية مدخرات النيكل كادميوم

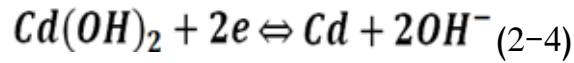
القطب الموجب	القطب السالب	الكهرليت	الجهد الاسمي للخلية
هيدروكسيد النيكل	الكادميوم	هيدروكسيد البوتاسيوم	1.2V

إن هيدروكسيد البوتاسيوم لا يدخل في التفاعلات على الأقطاب، حيث يجري على القطب الموجب التفاعل

التالي: (Kiehen, H.A., 2003)



أما على القطب السالب يجري التفاعل:



٢-١-٢-٢-٤ مميزات مدخرات النيكل - كادميوم (Ni-Cd Batteries Features):

(Kiehen, H.A., 2003)

- ثبات التوتر لوقت طويل أثناء عملية التفريغ.
- التفريغ العميق لا يؤثر على عمرها.
- زمن شحن قصير.
- يمكن شحنها بسرعة لأن التفاعلات فيها ماصة للحرارة.

٢-١-٢-٢-٥ سلبيات مدخرات النيكل - كادميوم (Ni-Cd Batteries Cons):

- كثافة استطاعة منخفضة Low Specific Energy .

■ أثر الذاكرة Memory Effect الذي يمنع المدخرة من التفريغ لمستوى عميق بعد تفريغها بشكل جزئي عدة مرات، فعلى سبيل المثال إذا تم تفريغها عدة مرات إلى نسبة 50% وإعادة شحنها بعد وصولها إلى هذه النسبة سوف تصبح سعتها 50% من السعة الاسمية فقط، وذلك يرجع إلى زيادة حجم البلورات المكونة للمادة الفعالة للأقطاب مما يزيد ممانعتها ويمنعها من التفريغ إلى مستوى أعمق Vasebi, (A.and others, 2007).

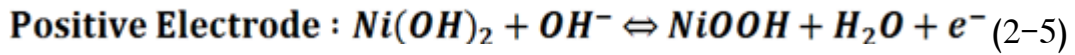
■ الكاديوم من المواد السامة.

٢-١-٢-٣ مدخرات النيكل - هيدروجين (Ni-MH Batteries)

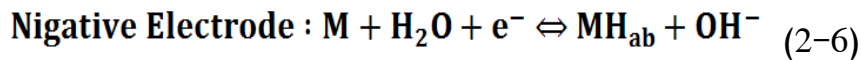
٢-١-٢-٣ مبدأ عمل مدخرات النيكل - هيدروجين (Ni-MH Batteries Components):

إن التفاعلات التي تحدث على القطب الموجب في كل من عمليتي الشحن والتفريغ موضحة حسب

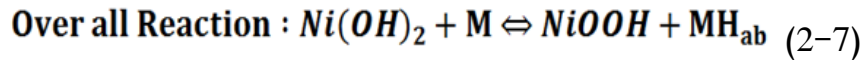
التفاعل: (Nguyen, T. H., 2014)



والتفاعلات التي تحدث على القطب السالب في كل من عمليتي الشحن والتفريغ هي:



التفاعل الكلي على القطب السالب والموجب خلال عمليتي الشحن والتفريغ هو:



M:Hydrogen-absorbing alloy ; H_{ab}:absorbed hydrogen

٢-١-٢-٣ ميزات مدخرات النيكل - هيدروجين (Ni-MH Batteries Features)

■ لا تحتوي على مواد سامة (الكاديوم).

■ أثر الذاكرة Memory Effect يكون أقل تأثيراً من حالة مدخرات النيكل-كادميوم.

■ كثافة الاستطاعة فيها أكبر من مدخرات النيكل-كادميوم.

٢-١-٢-٣ سلبيات لمدخرات النيكل -هيدروجين(Ni-MH Batteries Cons)

■ التفريغ الذاتي أعلى من مدخرات النيكل-كادميوم.

■ التفاعل الكيميائي فيه ناشر للحرارة مما يسبب ارتفاع درجة حرارتها خلال الشحن.

■ عمر المدخرة يتأثر عند زيادة عمق التفريغ.

٢-١-٢-٤ مدخرات شوارد الليثيوم (Li-ion Batteries)

كان أول ظهور لمدخرات شوارد الليثيوم غير القابلة للشحن في عام ١٩٧٠ ، وبعدها جرت عدة محاولات لتطويرها وجعلها قابلة للشحن لكن المحاولات لم تنجح بسبب عدم الاستقرار الكيميائي لمعدن الليثيوم، نجحت شركة Sony عام ١٩٩١ بطرح خلية شوارد الليثيوم القابلة لإعادة الشحن. يُعتبر الليثيوم من أخف المعادن ويملك أكبر جهد كهروكيميائي بين جميع المعادن كما أن التوتر الطرفي لكل خلية هو 3.6 V أي أكبر بثلاث مرات من مدخرات Ni-MH و Ni-Cd الأمر الذي يجعل كثافة الاستطاعة فيها عالية مقارنةً مع غيرها من الأنواع. هذه الميزات أدت إلى انتشار مدخرات شوارد الليثيوم بشكلٍ واسع في جميع التطبيقات الحديثة وبشكل خاص في الهواتف المحمولة والسيارات الكهربائية (Vasebi, A.and others, 2007).

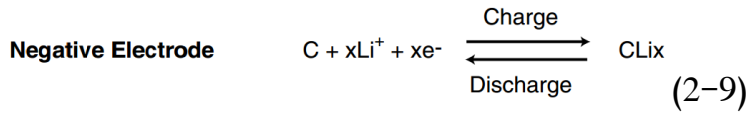
٢-١-٢-٤-٢ بنية ومبدأ عمل مدخرات شوارد الليثيوم (Li-ion Batteries)

(Components)

خلال عملية التفريغ تنتقل الأيونات من القطب السالب والمصنوع من الكربون وتنتشر عبر الكهرليت والعازل المسامي حتى تصل للقطب الموجب المصنوع من الليثيوم المُشاب، بينما تقوم الإلكترونات المنبعثة من القطب السالب بتشغيل الحمل الخارجي لتصل عبره إلى القطب الموجب.

وتبين المعادلات التالية التفاعلات الكيميائية الحاصلة في كل من دورتي الشحن والتفريغ في أحد أنواع

مدخرات شوارد الليثيوم وهي مدخرات أكسيد كوبالت الليثيوم: (Kiehen, H.A., 2003)



٢-١-٢-٣ أنواع مدخرات شوارد الليثيوم (Li-ion Batteries Types):

يتم تصنيع مدخرات شوارد الليثيوم بأشكال وأحجام مختلفة وفيما يلي وصف عام لعدة أنواع منها مع ذكر طريقة

تصنيعها واستخداماته: (Nguyen, T. H., 2014), (Lighting Global ,TECHNICAL NOTES, 2019)

١- مدخرات أكسيد كوبالت الليثيوم (Lithium cobalt oxide):

قطبها الموجب مصنوع من أكسيد كوبالت الليثيوم وقطبها السالب مصنوع من الغرافيت، تُستخدم في الهواتف

النقالة والحواسب المحمولة والكاميرات الرقمية، بسبب كثافة طاقتها العالية، من سلبياتها عمرها القصير

مقارنةً بالأنواع الأخرى، كما أنها ليست آمنة كغيرها من الأنواع.

ويمكن شحنها سريعاً بتيار لا يتجاوز 1C (تيار يساوي سعتها الاسمية) لأن شحنها بتيار أعلى يؤدي

إلى ارتفاع حرارتها وزيادة الضغط الداخلي فيها. (Chen, X., 2012)

٢- مدخرات أكسيد منغنيز الليثيوم (Lithium manganese oxide):

قطبها الموجب مصنوع من أكسيد منغنيز الليثيوم وقطبها السالب مصنوع من الغرافيت، تم اكتشاف هذه

المدخرات في ثمانينيات القرن الماضي، حيث تم نشر بحث في هذا المجال عام ١٩٨٣، وتم تصنيع أول

خلية تجارية منها عام ١٩٩٦ من قبل شركة Moli Energy .

يتميز هذا النوع من المدخرات باستقرار حراري عالي، كما أنها أكثر أماناً من غيرها، لذلك تستخدم في الأجهزة الطبية، ويمكن استخدامها أيضاً في أدوات الطاقة (power tools) وتطبيقات أخرى مثل الحواسيب المحمولة والمركبات الكهربائية، تم استبدال مدخرات النيكل كوبالت بها مؤخراً. (Chen, X.,2012)

هذه المدخرة تدعم الشحن السريع ويمكن أن يصل تيار الشحن السريع فيها إلى 3C.

٣- مدخرات النيكل كوبالت ألومنيوم (Lithium nickel cobalt aluminum oxide):

قطبها الموجب مصنوع من خليط من الليثيوم والنيكل والكوبالت والألمنيوم وقطبها السالب مصنوع من الغرافيت، تتميز بتوتر خلية عالٍ مقارنةً بغيرها وبالتالي كثافة طاقة أعلى من غيرها. لكنها أقل استقراراً حرارياً من غيرها، وكلفتها عالية وعمرها قصير نسبياً، تستخدم في السيارات الكهربائية والتطبيقات المرتبطة بالشبكة.

كما أن تيار الشحن السريع الأعظمي المسموح به في هذا النوع هو 0.7C. (Chen, X.,2012)

٤- مدخرات أكسيد كوبالت منغنيز النيكل

Lithium cobalt manganese nickel oxide

تستخدم للقطب الموجب خليط من المواد الثلاث بنسب محددة، هذا الخليط يوفر عمراً أطول للمدخرة وأماناً عالياً وكثافة طاقة عالية، ويمكن عن طريق تغيير نسب المواد المستخدمة في صناعة القطب الموجب الحصول على ميزات للمدخرة تناسب التطبيق المطلوب استخدامها فيه، وتعتبر مناسبة للسيارات الكهربائية نظراً لنسبة التسخين الذاتي المنخفضة فيها (low self heating).

ويمكن شحنها سريعاً بتيار لا يتجاوز 1C لأن شحنها بتيار أعلى يؤدي إلى انهيار عمرها. (Chen, X.,2012)

٥- مدخرات فوسفات حديد الليثيوم : Lithium Iron Phosphate

قطبها الموجب مصنوع من فوسفات حديد الليثيوم وقطبها السالب من الغرافيت، تتميز بعمرها الطويل، لكن كلفتها عالية وتوتر الخلية فيها منخفض، وبالتالي كثافة طاقتها أقل من غيرها، تُستخدم في أنظمة التخزين المنفصلة عن الشبكة الكهربائية وبعض الأجهزة النقالة.

تدعم هذه الخلايا الشحن السريع بمقدار 1C ويفضل أن يتم شحنها بتيار أقل من ذلك. (Chen, X.,2012)

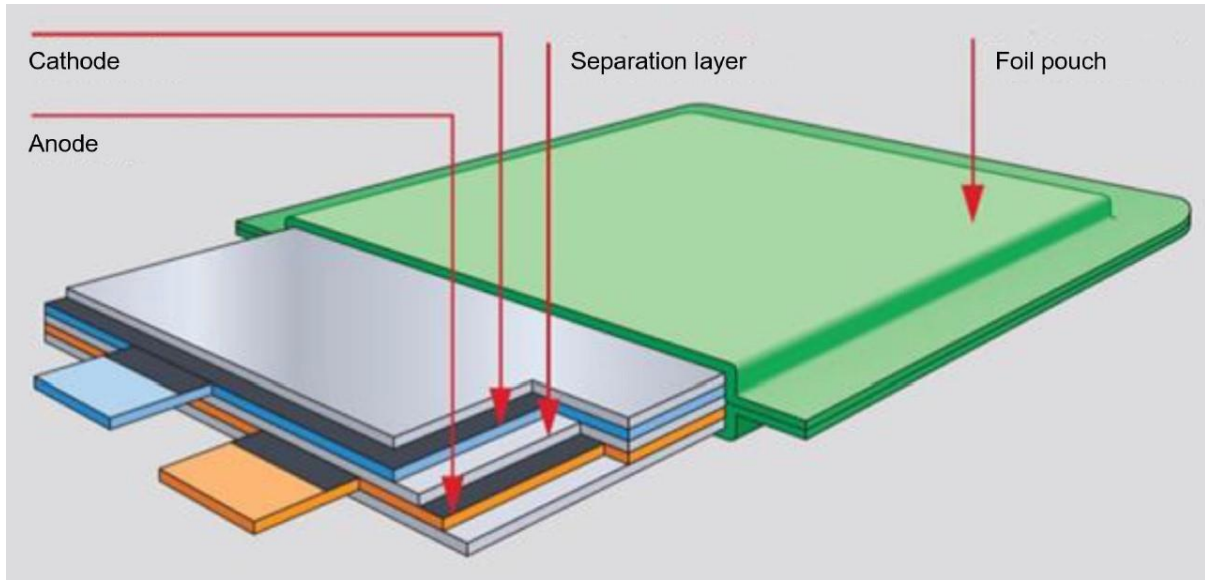
٦- مدخرات تيتان الليثيوم Lithium titanate:

قطبها السالب مصنوع من تيتان الليثيوم وقطبها الموجب مصنوع من أكسيد منغنيز الليثيوم (LMO) أو النيكل منغنيز كوبالت (NMC). عمرها طويل جداً واستقرارها الحراري عالي، وتتمتع بأمان عالي وحرارة منخفضة، كثافة طاقتها أقل من غيرها لأن توتر الخلية منخفض. تُستخدم في التطبيقات العسكرية والفضائية وفي تخزين الطاقة المتجددة.

تدعم هذه الخلايا الشحن السريع بتيار أعظمي قيمته 5C لفترة زمنية محددة. (Chen, X.,2012)

٧- مدخرات الليثيوم بوليمير Lithium Polymer:

تتميز هذه المدخرات بأن الكهرليت المستخدم فيها مصنوع من البوليمير الذي يتميز بقوامه الهلامي (gel) وناقليته العالية، ومن ميزاتها كثافة طاقتها العالية مقارنةً بغيرها، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي يكون فيها الوزن عاملاً مهماً مثل الهواتف النقالة والطائرات المقادة عن بعد والسيارات الكهربائية. تُغلف بطاريات الليثيوم-بوليمر بكيس من رقائق الألومنيوم (foil pouch) يكون الكيس أسهل في التصنيع، وأقل تكلفة من أغلفة بطاريات الليثيوم-أيون المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ أو الألومنيوم. يُتيح هذا النوع أيضاً إنتاج مدخرات بتصميمات متنوعة ويؤدي استبدال الكيس المعدني من رقائق الألومنيوم بأغلفة الفولاذ إلى كثافة طاقة عالية ومدخرات خفيفة الوزن. (Chae, W.,2023)



الشكل (٢-٤) طريقة تصنيع خلايا الليثيوم بوليمير (Chae, W.,2023)

إن تيار الشحن العملي لهذه المدخرات هو 1C، لكن يمكن شحنها بتيار قيمته 3C من نسبة شحن 0% حتى الوصول إلى 70%. (Kim, B. G.,2008)

٢-٢ مقارنة بين أنواع المدخرات المستخدمة في التطبيقات العملية (Batteries

:(Comparison

(Lighting Global,TECHNICALNOTES, 2019),(Nguyen, T. H.,2014)

الجدول (٢-٣) مقارنة بين أنواع المدخرات

نوع المدخرة	أهم الميزات	أهم السلبيات	الاستخدام	تيار الشحن السريع الأعظمي
مدخرات الرصاص - حمض	تحمل ظروف التشغيل المختلفة - قلة التأثير بعمق التفريغ	كثافة طاقة منخفضة	في التطبيقات التي لا تتطلب توفير في الحجم	لا تدعم الشحن السريع
مدخرات النيكل	تدعم الشحن	تعاني من أثر	في التجهيزات الرقمية	تيار الشحن السريع

الأعظمي المتاح 1C		الذاكرة – الكادميوم مادة سامة	السريع	كادميوم	
تيار الشحن السريع الأعظمي المتاح C/2	في التجهيزات الرقمية	تتأثر بعمق التفريغ	لا تحتوي على مواد سامة	مدخرات النيكل هيدريد المعدن	
1C	الهواتف النقالة والحواسب المحمولة والكاميرات الرقمية	عمرها القصير مقارنةً بالأنواع الأخرى، ليست آمنة كغيرها من الأنواع	كثافة طاقتها عالية	أكسيد كوبالت الليثيوم	مدخرات شوارد الليثيوم
3C	تستخدم في الأجهزة الطبية، وفي أدوات الطاقة (power tools) وتطبيقات أخرى مثل الحواسب المحمولة والمركبات الكهربائية		استقرار حراري عالي، كما أنها أكثر أماناً من غيرها	أكسيد منغنيز الليثيوم	
0.7C	في السيارات الكهربائية والتطبيقات المرتبطة بالشبكة	أقل استقراراً حرارياً من غيرها، وكلفتها عالية وعمرها قصير نسبياً	توتر خلية عالي مقارنةً بغيرها وبالتالي كثافة طاقة أعلى من غيرها.	النيكل كوبالت ألمنيوم	
1C	مناسبة للسيارات الكهربائية نظراً لنسبة التسخين الذاتي المنخفضة فيها		عمر أطول للمدخرة وأمان عالي وكثافة طاقة عالية	أكسيد كوبالت منغنيز النيكل	

1C	في التطبيقات المنفصلة عن الشبكة وبعض الأجهزة النقالة.	كلفتها عالية وتوتر الخلية فيها منخفض، وبالتالي كثافة طاقتها أقل من غيرها	تتميز بعمرها الطويل	فوسفات حديد الليثيوم
5C	تستخدم في التطبيقات العسكرية والفضائية وفي تخزين الطاقة المتجددة.	كثافة طاقتها أقل من غيرها لأن توتر الخلية منخفض.	عمرها طويل جداً واستقرارها الحراري عالي، وتتمتع بأمان عالي وحرارة منخفضة	تيتان الليثيوم
3C	مناسبة للتطبيقات التي يكون فيها الوزن عاملاً مهماً مثل الهواتف النقالة والطائرات المقادة عن بعد والسيارات الكهربائية.		كثافة طاقتها عالية مقارنةً بغيرها	الليثيوم بوليمير

٢-٣ دراسة عامة في الشحن السريع (General Study In Fast Charging):

٢-٣-١ مميزات الشحن السريع (Fast Charging Features):

١- تقليل وقت الراحة في التجهيزات التي لا يمكن فيها الشحن والاستخدام معاً.

٢- زيادة فترة استخدام الأجهزة المحمولة.

٣- يسهل استخدام المدخرات ذات السعة المنخفضة بسبب التقادم

٤- يسهل استخدام المدخرات ذات السعات الكبيرة

٢-٣-٢ سلبيات الشحن السريع (Fast Charging Cons):

١- يسبب تقادم سريع للمدخرة: للأسباب التالية:

الأثر الحراري (Tomaszewska, A.I ,Lithium-ion battery fast) Thermal effects

(charging, 2019)

يحدث توليد الحرارة في مدخرة شوارد الليثيوم نتيجة تفاعلات تحدث في المدخرة منها ما هو قابل للعكس (reversible) ومنها غير قابل للعكس (irreversible)، وتُعطى كمية الحرارة في واحدة الزمن الناتجة عن التفاعلات غير القابلة للعكس مقدرةً بالواط بالعلاقة التالية:

$$Q_{irr} = (V_{batt} - U)I \quad (2-10)$$

حيث:

V_{batt} : توتر المدخرة U : توتر الدارة المفتوحة للمدخرة

I : تيار المدخرة ويكون موجباً خلال فترة الشحن

ويعبر الفرق بين توتر الدارة المفتوحة وتوتر المدخرة عن ارتفاع التوتر الذي يحدث في المدخرة نتيجة الظواهر الكيميائية التي تحدث فيها مثل انتقال الشحن عبر الأقطاب والكهرليت، انتشار شوارد الليثيوم عبر الأقطاب والكهرليت والمفاقد الأومية، حيث يساهم أثر جول الحراري بشكل كبير في تفاعلات توليد الحرارة غير القابلة للعكس وهي تفاعلات ناشرة للحرارة في خلايا شوارد الليثيوم ويُعطى بالعلاقة التالية:

$$Q_{joule} = I^2 \cdot R \quad (2-11)$$

حيث:

R : مقاومة الخلية.

كلما ازداد تيار الشحن يزداد توليد الحرارة بسبب تناسب نسبة توليد الحرارة غير العكوسة مع مربع التيار، كما أن هناك تفاعلات عكوسة تُعرف بالإنتروبي يمكن وصفها بالعلاقة التالية:

$$Q_{rev} = I \cdot \frac{T\Delta S}{nF} \quad (2-12)$$

حيث:

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

عبدالباسط خالد شباط

T : درجة الحرارة المطلقة. ΔS : تغير الإنتروبي n : عدد الإلكترونات الداخلة في التفاعلات الكهروكيميائية

F : ثابت فاراداي. (Kiehen, H.A., 2003)

تصفح الليثيوم Lithium plating:

هو عبارة عن تفاعلات تحريضية تشكل فيها شوارد الليثيوم طبقة على سطح القطب السالب بدل أن تدخل فيه، ويحدث هذا الأمر بشكل رئيسي في حالة الشحن السريع عندما يصبح التوتر الكهرستاتيكي للقطب السالب أقل من القيمة المعيارية، ويتفاقم التصفح بسبب عوامل عدة منها انخفاض درجات الحرارة والتناقص في مواد القطب السالب اللازمة لدخول شوارد الليثيوم فيه. (Tomaszewska, A.I, Lithium-ion battery fast charging, 2019)

تشير الدراسات العملية إلى أن تأثير تصفح الليثيوم على تقادم المدخرة لا يذكر في خلايا النيكل كوبالت ألمنيوم ويمكن إهماله في خلايا فوسفات حديد الليثيوم بينما يعتبر أثره جلياً في باقي أنواع مدخرات الليثيوم وخاصة في خلايا أكسيد منغنيز الليثيوم وخلايا أكسيد كوبالت منغنيز النيكل. (Liu, J., 2023)

الأثر الميكانيكي: Mechanical effect

ويشمل مايلي:

- ١- الشقوق داخل جزيئات القطب ٢- عزل جزيئات القطب عن بعضها ٣- عزل المواد الفعالة للقطب عن الموصلات ٤- الفصل بين المواد الفعالة ومجمع التيار ٥- انخفاض التجانس ضمن القطب السالب الذي يؤدي إلى إلغاء الترابط بين جزيئاته وازدياد الضغط الداخلي فيه وقد يؤدي إلى انفجار المدخرة.

(Tomaszewska, A.I, Lithium-ion battery fast charging, 2019)

وتشير الدراسات العملية إلى أن خلايا أكسيد كوبالت الليثيوم وأكسيد منغنيز الليثيوم لا يحدث فيها شقوق عند معدلات كربون منخفضة، بينما في خلايا كوبالت منغنيز الليثيوم تكون الشقوق واضحة في حالة الشحن السريع.

(Tomaszewska, A.I, Lithium-ion battery fast charging, 2019).

٢ - يزيد كلفة التجهيزات المستخدمة: وتشمل

تكاليف أجهزة الشحن السريع:

إن زيادة تيار الشحن تتطلب وجود تجهيزات قادرة على تحمل هذا التيار، مثل العناصر الإلكترونية المستخدمة في الشواحن والأسلاك والتوصيلات الكهربائية اللازمة لنقل تيار الشحن، الأمر الذي يؤدي إلى تكلفة إضافية لإتمام عملية الشحن.

تكاليف تركيب محطات الشحن السريع:

تتطلب أجهزة الشحن السريع للسيارات الكهربائية تجهيزاً للموقع والبنية التحتية، ولهذا السبب لا تمثل الأجهزة سريعة الشحن سوى جزء من التكاليف، ويمكن أن تختلف التكلفة الإجمالية لتركيب محطات الشحن السريع بناءً على الموقع و تكاليف العمالة والبنية التحتية لذلك يجب تقييم الاحتياجات والأجهزة والمواد لكل موقع على حدة. وتشير الدراسات إلى أن تكلفة إعداد الموقع تتراوح من ٥٠٠٠ دولار إلى ١٢٥٠٠ دولار لكل شاحن. والجدير بالذكر أن هذه التكاليف لا تشمل تكلفة أجهزة الشحن نفسها. (Nicholas, M., & Hall, D. , 2018)

٢-٣-٣ طرائق وتقنيات الشحن السريع (Fast Charging Methods):

يتم استخدام العديد من التقنيات والطرائق للشحن السريع في مدخرات شوارد الليثيوم (Tomaszewska, A.I) (Lithium-ion battery fast charging, 2019) ومن هذه الطرائق:

٢-٣-٣-١ الشحن بتوتر ثابت (Constant Current Charging):

في هذه الطريقة يتم الحفاظ على تطبيق جهد ثابت على المدخرة. في البداية يكون تيار الشحن مرتفعاً و يبدأ بالتناقص مع زيادة نسبة الشحن في المدخرة، ويتم زيادة سرعة الشحن بزيادة توتر الشاحن. غالباً ما تستخدم هذه الطريقة في أجهزة شحن مدخرات السيارات الكهربائية الرخيصة ومع المدخرات الحمضية المستخدمة في السيارات وأنظمة الطاقة الاحتياطية (Trivedi, N. , 2018).

يتم ضبط توتر الشاحن بحيث لا تتجاوز قيمة التوتر المطبق على الخلية القيمة الأعظمية المسموح بها والتي

تكون عادةً حوالي 1.2 من قيمة التوتر الاسمي للخلية. (Deng, D.,2015)

٢-٣-٣-٢ الشحن بتيار ثابت (Constant Voltage Charging):

في هذه الطريقة يتم الحفاظ على تيار شحن المدخرة ثابتاً، ويزداد توتر المدخرة تدريجياً، حيث يتم إنهاء

عملية الشحن عندما يصل توتر المدخرة إلى توتر الشحن الكامل، تتم زيادة سرعة الشحن بزيادة تيار

الشحن، تستخدم هذه الطريقة في الأجهزة المحمولة (Trivedi, N. , 2018).

إن تيار الشحن الأعظمي المسموح به يختلف حسب نوع خلية الليثيوم المستخدمة وقد تم تحديدها لكل نوع

في الفقرة (٢-٢).

٣-٣-٣-٢ الشحن بطريقة (تيار ثابت - توتر ثابت) (Constant -Constant Voltage

Current):

وهي الطريقة الأكثر شيوعاً وتتكون من مرحلة شحن بتيار ثابت يزداد فيها الجهد حتى قيمة القطع تليها مرحلة

توتر ثابت يتم الاحتفاظ بالجهد الثابت فيها حتى ينخفض التيار إلى قيمة قريبة من الصفر، تسمح مرحلة التوتر

الثابت بتدرجات التركيز داخل جزيئات القطب التي تفيد في الحصول على سعة عالية للمدخرة دون تجاوز الحد

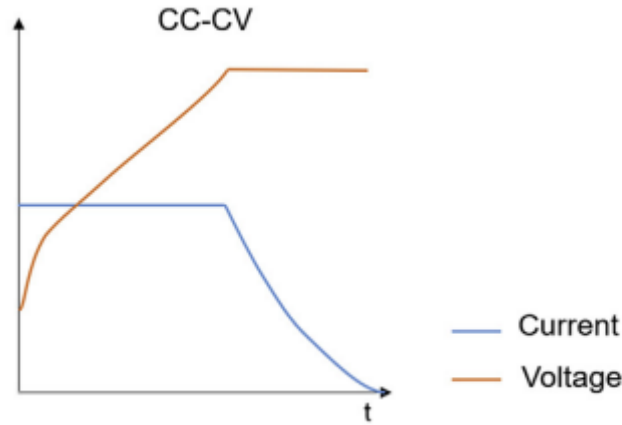
الأقصى للجهد. (Bandara, T. T. A.,2022)

إن تناقص تيار الشحن في مرحلة التوتر الثابت من هذه الطريقة يؤدي إلى زيادة فترة الشحن مقارنة بطريقة التيار

الثابت، كما أن زيادة تيار الشحن في مرحلة التيار الثابت قد تؤدي إلى تصفح الليثيوم، لكن سهولة وبساطة

تطبيق هذه الطريقة جعلتها الأكثر استخداماً في التطبيقات العملية، ويبين الشكل التالي تغير توتر وتيار الشاحن

أثناء الشحن بهذه الطريقة (Tomaszewska, A.l ,Lithium-ion battery fast charging, 2019):



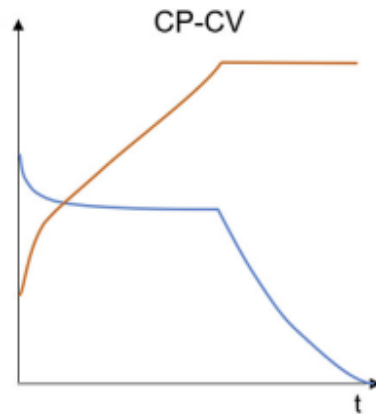
الشكل (٥-٢) تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقة (CC-CV)

٢-٣-٣-٤ الشحن بطريقة (استطاعة ثابتة توتر ثابت) (Constant -Constant Voltage)

:(Power

تتكون هذه الطريقة من مرحلتين المرحلة الأولى يتم فيها الشحن باستطاعة ثابتة بحيث يبقى جداء توتر وتيار الشاحن ثابتاً أم المرحلة الثانية فيتم فيها الشحن بتوتر ثابت حتى تصل قيمة التيار إلى الصفر، تبين الدراسات أن هذه الطريقة تحقق أفضل سعة تفريغ عند الشحن السريع بتيار 1C. يبين الشكل التالي تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بهذه الطريقة: (Tomaszewska, A.l ,Lithium-ion battery fast charging,)

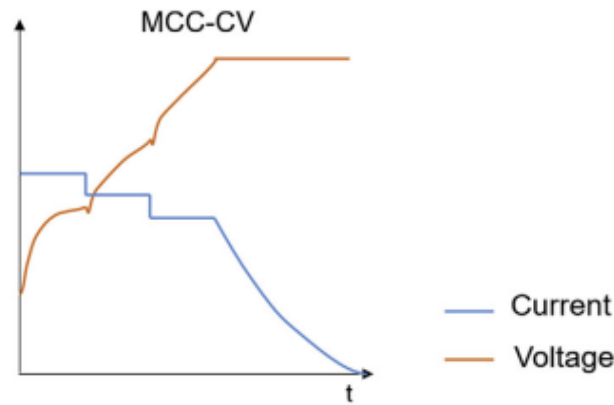
(2019



الشكل (٦-٢) تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقة (CP-CV)

٢-٣-٣-٥ الشحن بطريقة (تيارات ثابتة متعددة - توتر ثابت):

تتكون هذه الطريقة من عدة مراحل يتم فيها الشحن بتيار ثابت وبعد ذلك مرحلة يتم الشحن فيها بتوتر ثابت حتى تصل قيمة التيار إلى الصفر، يتم البدء في المرحلة الأولى بتيار ثابت عالٍ، ثم يتم تصغير تيار الشحن في كل مرحلة من مراحل التيار الثابت وذلك للتخفيف من تصفح الليثيوم، تتميز هذه الطريقة بأنها تحافظ على عمر المدخرة بسبب قلة تصفح الليثيوم فيها، لكنها مكلفة اقتصادياً وتحتاج إلى تجارب دقيقة قبل تطبيقها، يبين الشكل التالي تغير توتر و تيار الشاحن عند الشحن بهذه الطريقة: (Bandara, T. T. A.,2022)



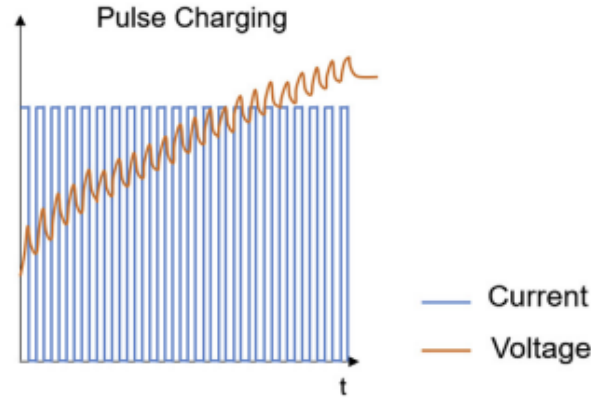
الشكل (٧-٢) تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقة (MCC-CV)

٦-٣-٣-٢ الشحن النبضي (Pulse Charging):

يكون فيها تيار الشحن على شكل نبضات تطبق على المدخرة، ويمكن زيادة سرعة الشحن فيها بزيادة عرض النبضة، وتتبع كل نبضة فترة استراحة للسماح للتفاعلات الكيميائية بالاستقرار ضمن المدخرة، تساهم هذه الطريقة في التقليل من التفاعلات غير المرغوب فيها في المدخرة مثل إطلاق الغازات وتشكل البلورات (Trivedi, N. , 2018).

إن تخفيف التفاعلات غير المرغوبة يساهم في تخفيف الضغط الداخلي ضمن المدخرة وبالتالي يقلل من تقادم المدخرة، كما أن هذه الطريقة تقلل من زمن الشحن إلى الثلث تقريباً مقارنة بطريقة (توتر ثابت - تيار ثابت).

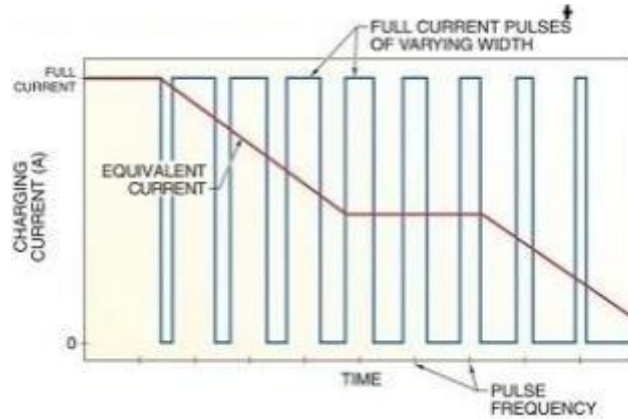
يبين الشكل التالي تغير توتر و تيار الشاحن عند الشحن بهذه الطريقة: (Bandara, T. T. A.,2022)



الشكل (٨-٢) تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقة (Pulse Charging)

٢-٣-٣-٧ الشحن بطريقة تعديل عرض الموجة (Pulse Width Modulation):

ويكون تيار الشحن في هذه الطريقة على شكل نبضات، ويقوم الشاحن بتعديل عرض النبضات وفقاً لكمية السعة المخزنة في المدخرة، فكلما ازدادت السعة المخزنة في المدخرة قام الشاحن بتصغير عرض النبضة، تتميز هذه الطريقة بأن تكلفتها منخفضة مقارنةً بغيرها، يبين الشكل التالي تغير توتر وتيار الشاحن عند الشحن بهذه الطريقة: (Das, S., and others, 2019)



الشكل (٩-٢) تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقة (Pulse Width Modulation)

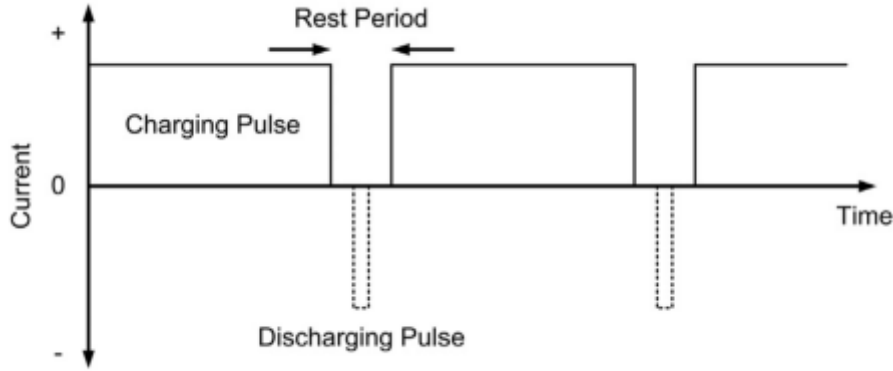
٢-٣-٣-٨ الشحن النبضي العكسي (Negative Pulse Charging):

شحن نبضي مع نبضات تفريغ عكسية في فترات الاستراحة، لإزالة الفقاعات التي تتشكل على الأقطاب لتحسين استقرار الخلية. (Trivedi, N. , 2018). صممت هذه الطريقة لمدخرات الرصاص - حمض ويمكن تعميمها

لتستخدم في مدخرات شوارد الليثيوم، حيث يتم تطبيق نبضات تفريغ لفترة زمنية وجيزة ومطال يساوي مطال نبضة

الشحن بعد كل نبضة شحن لتخفيف الضغط والحرارة على خلايا المدخرة. (Lai, C. P. Y. and others, 2020)

والشكل التالي يمثل التيار المطبق على المدخرة في هذه الطريقة:



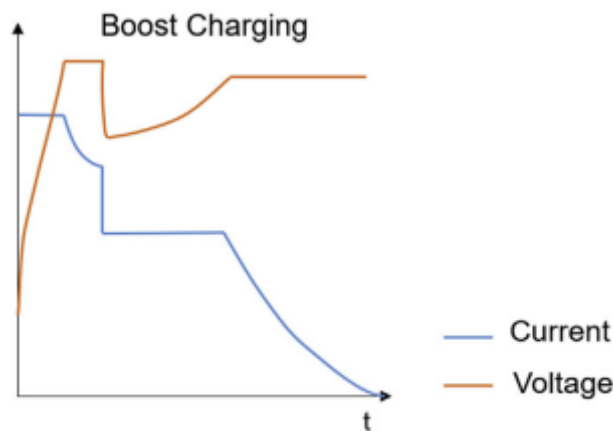
الشكل (١٠-٢) تغيّر تيار الشحن في حالة الشحن النبضي العكسي (Lai, C. P. Y. and others, 2020)

٢-٣-٣-٩ الشحن الدفعي: (Boost Charging)

تتكون هذه الطريقة من عدة مراحل يتعاقب فيها الشحن بطريقتي تيار ثابت يتبعها توتر ثابت، ويتم تكرار هاتين

المرحلتين عدة مرات بحيث يتم البدء بتيار وتوتر ثابتين كبيرين ثم يتم تصغير قيمة التوتر والتيار الثابتين في

المرحلة التالية كما هو موضح في الشكل التالي: (Bandara, T. T. A., 2022)



الشكل (١١-٢) تغيّر تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقتي (Boost)

إن هذه الطريقة تقلل من زمن الشحن بنسبة ٤٠ % مقارنةً بطريقة (تيار ثابت - توتر ثابت)، لكن السعة

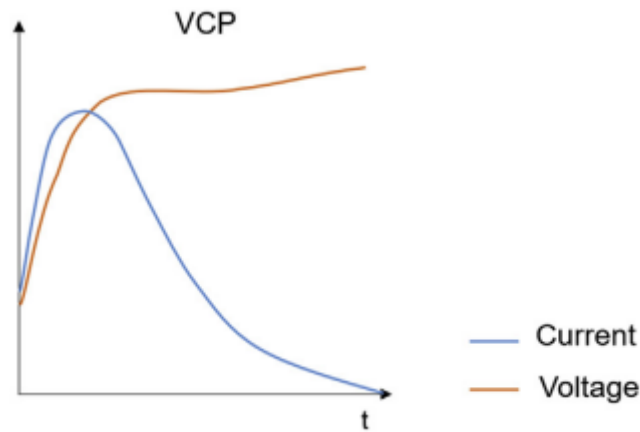
المخزنة في المدخرة تكون أقل مقارنةً بطريقة (تيار ثابت - توتر ثابت). (Trivedi, N. , 2018)

١٠-٣-٣-٢ الشحن بتيار متغير VCP (Variable Current Profile):

تم تطوير هذه الطريقة خصيصاً للشحن السريع، وهي تحقق زيادة في سعة المدخرة في دورات الشحن والتفريغ الأولى، لكنها تسبب تقادم أسرع للمدخرة مقارنةً بطريقة CC-CV بسبب الشحن الزائد. يبين الشكل التالي تغير

توتر وتيار الشاحن عند الشحن بهذه الطريقة: (Tomaszewska, A.I ,Lithium-ion battery fast

(charging, 2019)



الشكل (١٢-٢) تغير تيار وتوتر الشاحن أثناء الشحن بطريقة (VCP)

١١-٣-٣-٢ طريقة تغيير التوتر الشاملة UVP (Universal Voltage Protocol):

تستخدم هذه الطريقة خوارزمية لتحديد زمن الشحن وتوتر نهاية الشحن، وهي مشتقة من طريقة CC-CV. من

مميزات هذه الطريقة أنها تقلل من زمن الشحن و مفايد السعة. (Tomaszewska, A.I ,Lithium-ion

(battery fast charging, 2019)

١٢-٣-٣-٢ الشحن بطريقة تيار ثابت - درجة حرارة ثابتة (CV-CT):

يتم في هذه الطريقة الشحن بمرحلتين، المرحلة الأولى يتم فيها الشحن مع الحفاظ على عدم تجاوز درجة حرارة معينة للمدخرة، بحيث يتم البدء بتيار عالٍ وينخفض التيار تدريجياً للحفاظ على درجة حرارة ثابتة، في المرحلة الثانية يتم الشحن بتوتر ثابت مع تخفيض درجة الحرارة، هذه الطريقة تحقق زيادة في السعة بنسبة ٢٠% مقارنةً بطريقة CC-CV. (Tomaszewska, A.I, Lithium-ion battery fast charging, 2019)

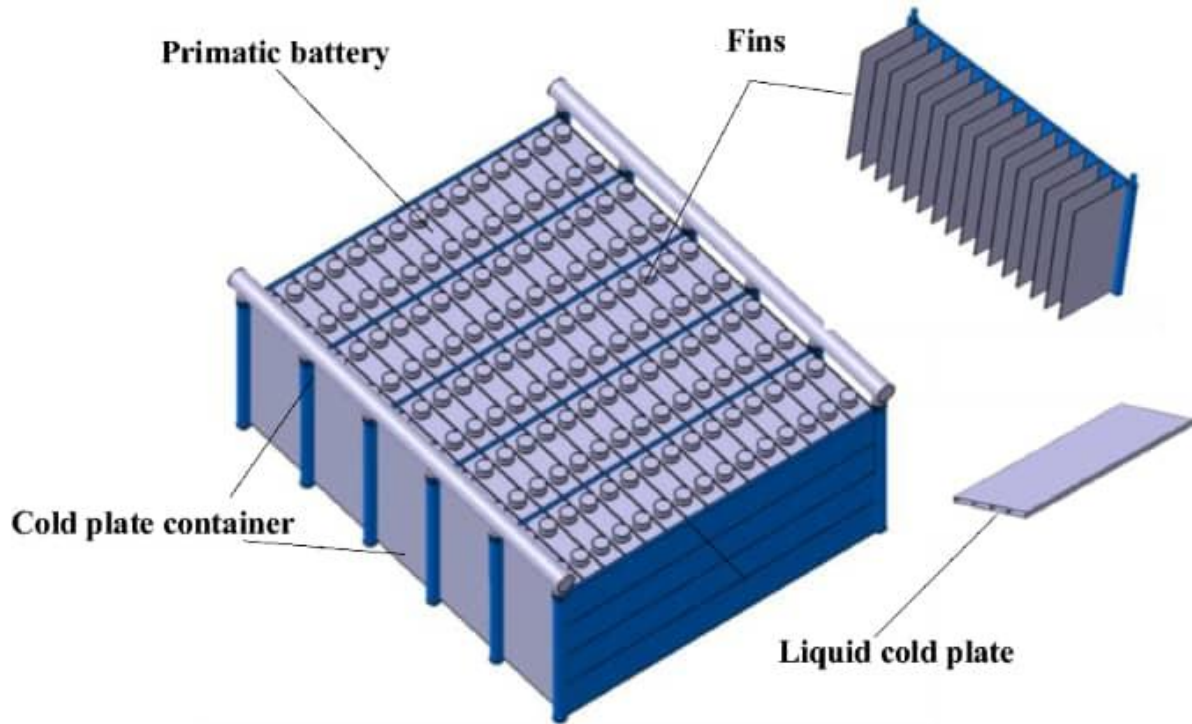
٢-٤ طرائق تبريد المدخرات (Batteries Cooling Methods):

٢-٤-١ التبريد بتغيير طور المادة: (Phase Change Material Cooling)

هذه الطريقة تمتص الحرارة من المدخرة بتغيير طور المادة من السائلة إلى الغازية، حيث تستطيع أن تمتص كمية كبيرة من الحرارة دون تغير كبير في درجة حرارة مادة التبريد. من سلبيات هذه الطريقة أنها أقل كفاءة في التبريد من غيرها، لأنها تمتص الحرارة ولا تنقلها إلى خارج المدخرة (Chen, D., 2016). ومن سلبيات هذه الطريقة الوزن الزائد للمدخرة وهي ملوثة بيئياً، كما أن مادة التبريد فيها مكلفة، وتحتاج للتبديل خلال فترة زمنية معينة، تستخدم هذه الطريقة في الأبنية في ذروة الحمل الحراري للمدخرات (Rallabandi, S., 2024).

٢-٤-٢ التبريد باستخدام مشتتات معدنية (Fins Coolig):

تعمل مشتتات الحرارة على زيادة مساحة السطح لزيادة معدل انتقال الحرارة، ويتم نقل الحرارة من حزمة المدخرة إلى المشتت من خلال التوصيل، ومن المشتت إلى الهواء من خلال الحمل الحراري، تتمتع المشتتات بموصلية حرارية عالية ويمكنها تحقيق أهداف التبريد، ولكنها تضيف الكثير من الوزن إلى العبوة. لقد حقق استخدام المشتتات نجاحاً كبيراً في مجال الإلكترونيات، وقد تم استخدامها تقليدياً كنظام تبريد إضافي في المركبات ذات محركات الاحتراق الداخلي، كما أصبح استخدام المشتتات لتبريد مدخرة السيارة الكهربائية غير مفضل لأن الوزن الإضافي له يفوق فوائد التبريد (Chen, D., 2016). كما في الشكل التالي:



الشكل (٢-١٣) تبريد مدخرات شوارد الليثيوم باستخدام مشتتات معدنية (Wang, G., Gao, Q., Yan, Y., &

Wang, Y., 2020)

٢-٤-٣ التبريد الهوائي الطبيعي: (Air Cooling)

يستخدم تبريد الهواء مبدأ الحمل الحراري لنقل الحرارة بعيداً عن المدخرة، ومع مرور الهواء على السطح يحمل الحرارة المنبعثة من المدخرة إلى الوسط الخارجي. يعد تبريد الهواء بسيطاً وسهلاً، ولكنه أقل فعالية مقارنة بالتبريد السائل. تم استخدام تبريد الهواء في الإصدارات القديمة من السيارات الكهربائية، مثل (Nissan Leaf)، ونظراً لاستخدام السيارات الكهربائية الآن بشكل أكثر شيوعاً، فقد ظهرت مشكلات تتعلق بالسلامة مع مجموعات المدخرات المبردة بالهواء، خاصة في المناخات الحارة، وتصر شركات تصنيع السيارات الأخرى، مثل (Tesla)، على أن التبريد السائل هو الطريقة الأكثر أماناً (Chen, D., 2016).

تتأثر كفاءة تبريد الهواء بشكل كبير بتصميم مسار تدفق الهواء. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي وجود مداخل ومخارج عند كل طرف من حزمة المدخرة إلى تعزيز مسار الهواء، وبالتالي تبريد حزمة المدخرة بأكملها بشكل

فعال (Rallabandi, S., 2024).

يؤدي ضبط التباعد بين خلايا المدخرة إلى تعزيز تدفق الهواء الأمثل ويضمن التبريد المتساوي لكل خلية، ويمكن أيضاً استخدام المواد الموصلة حرارياً مثل وسادات السيليكون في الجزء العلوي والسفلي من المدخرة، تساعد وسادات السيليكون هذه على نقل الحرارة بعيداً عن المناطق الأقل تعرضاً لتدفق الهواء، وبالتالي تحسين كفاءة التبريد بشكل عام (Rallabandi, S.,2024).

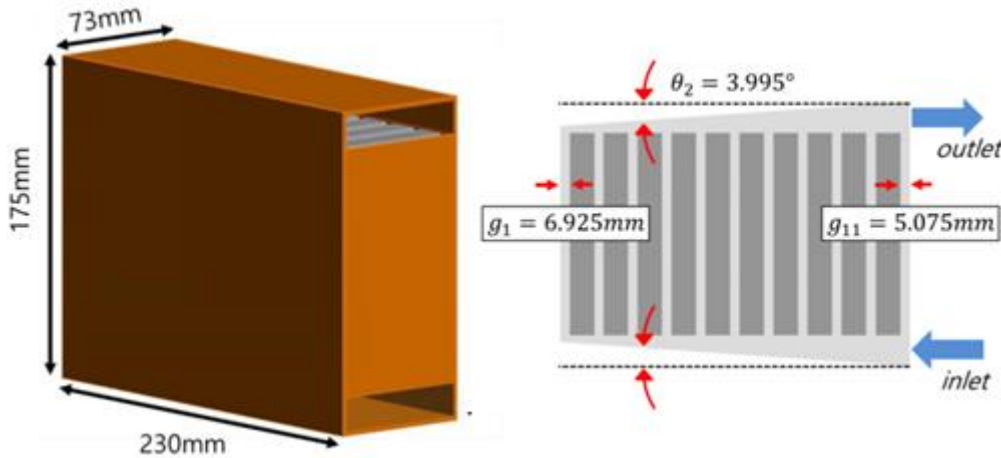
في المناخات الباردة قد يشتمل نظام تبريد الهواء على عناصر تسخين لتسخين المدخرات مسبقاً لضمان عملها في نطاق درجة الحرارة الأمثل، وهذا يضمن أن المدخرات لا تعمل بشكل سيئ بسبب درجات الحرارة الباردة (Rallabandi, S.,2024).

٢-٤-٤ التبريد الهوائي القسري (Forced Air Cooling)

بالمقارنة مع التبريد الهوائي الطبيعي، يستخدم التبريد القسري مراوح أو قنوات هواء مصممة خصيصاً لتشكيل تدفق هواء مناسب في مساحة محددة من أجل تبديد الحرارة. هذه الطريقة غير مجدية بالنسبة للمدخرات الصغيرة بسبب الطاقة اللازمة لتشغيل المروحة (Rallabandi, S.,2024).

وتشير الدراسة (Zhao, L.,2023) (التي أجريت على مدخرة مكونة من ٦ خلايا من نوع أكسيد كوبالت الليثيوم سعة كل خلية 1850mAh وتوترها الاسمي 3.6V) إلى أن أفضل مسافة بين الخلايا تحقق التبريد الهوائي القسري الأمثل هي 5mm وأفضل مسافة بين الخلايا وغلاف المدخرة هو أيضاً 5mm وأن سرعة الهواء يجب أن لا يتجاوز 0.4m/sec ليحقق التبريد المطلوب بأقل استهلاك للطاقة.

كما قام الباحثون في الدراسة (Jin, S.,2021) بتصميم الشكل الأمثل لغلاف مدخرة مكونة من 10 خلايا مسطحة أبعاد كل خلية (131,65,16mm) حيث تكون المسافة بين كل خليتين حوالي 5mm وسرعة الهواء 3m/s وتكون أبعاد الغلاف وزوايا التصميم كما في الشكل التالي:



الشكل (١٤-٢) التصميم الأمثل لأبعاد وزوايا غلاف مدخرة مكونة من ١٠ خلايا مسطحة

٢-٤-٥ التبريد السائل: (Liquid Cooling)

مبدأ التبريد السائل هو تدوير سائل التبريد في النظام بشكل مباشر أو غير مباشر مع خلايا المدخرة، وذلك لإزالة الحرارة الناتجة عن المدخرة لتبديد الحرارة، ويتم تقسيمه عادةً إلى تبريد سائل بالتلامس المباشر وتبريد سائل بالتلامس غير المباشر. (Rallabandi, S.,2024)

تتمتع المبردات السائلة بموصلية حرارية وسعة حرارية أعلى من الهواء (بسبب القدرة على تخزين الحرارة على شكل طاقة في روابطها) ، وبالتالي تؤدي أداءً فعالاً للغاية ولها مزايا خاصة مثل الهيكل المدمج وسهولة الترتيب. كما توفر المبردات السائلة أفضل أداء للحفاظ على حزمة المدخرة في نطاق درجة الحرارة الصحيح. أنظمة التبريد السائلة لها مشكلات تتعلق بالسلامة مثل التسرب، حيث يمكن أن يكون الجليكول خطيراً على البيئة إذا تم التعامل معه بشكل غير صحيح. يتم استخدام هذه الأنظمة حالياً بواسطة Tesla و Jaguar و BMW، على سبيل المثال لا الحصر. (Chen, D.,2016)

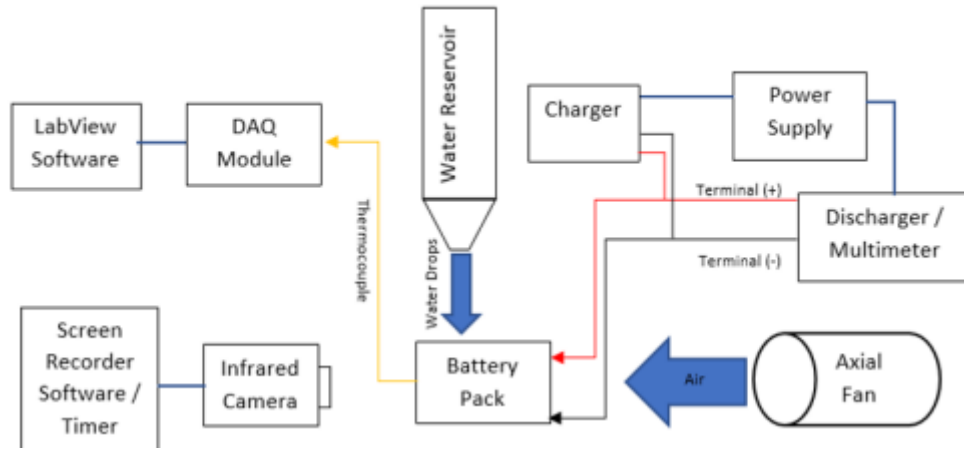
نظراً لأن المبرد يتمتع بقدرة حرارية وموصلية حرارية أعلى من الهواء، فإن عملية التبادل الحراري للتبريد السائل تكون أكثر مباشرة وكفاءة وإغلاقاً، وبالتالي فإن التحكم في درجة الحرارة وقدرته على معادلة درجة الحرارة وتأثير

تبريد الحرارة أفضل من تبريد الهواء. علاوة على ذلك، فهي مرنة للغاية ويمكن تصميمها وتعديلها وفقًا للظروف المحددة لنظام المدخرة من حيث لوحة التبريد وخطوط الأنابيب ووسائل التبريد. (Rallabandi, S.,2024) يتطلب التبريد السائل اختيار سائل تبريد مناسب، وإضافة أجهزة إضافية لتدوير سائل التبريد، ومتطلبات أعلى لإغلاقه لمنع خطر التسرب. ولذلك فهي معقدة من الناحية الهيكلية، الأمر الذي سيجعل صيانتها أكثر صعوبة في مرحلة لاحقة، وقد يزيد أيضًا من حجم ووزن حزمة المدخرة الإجمالية، مع تكلفة تصنيع أعلى من تبريد الهواء (Rallabandi, S.,2024).

٢-٤-٦ التبريد الهجين: (Hybrid Cooling)

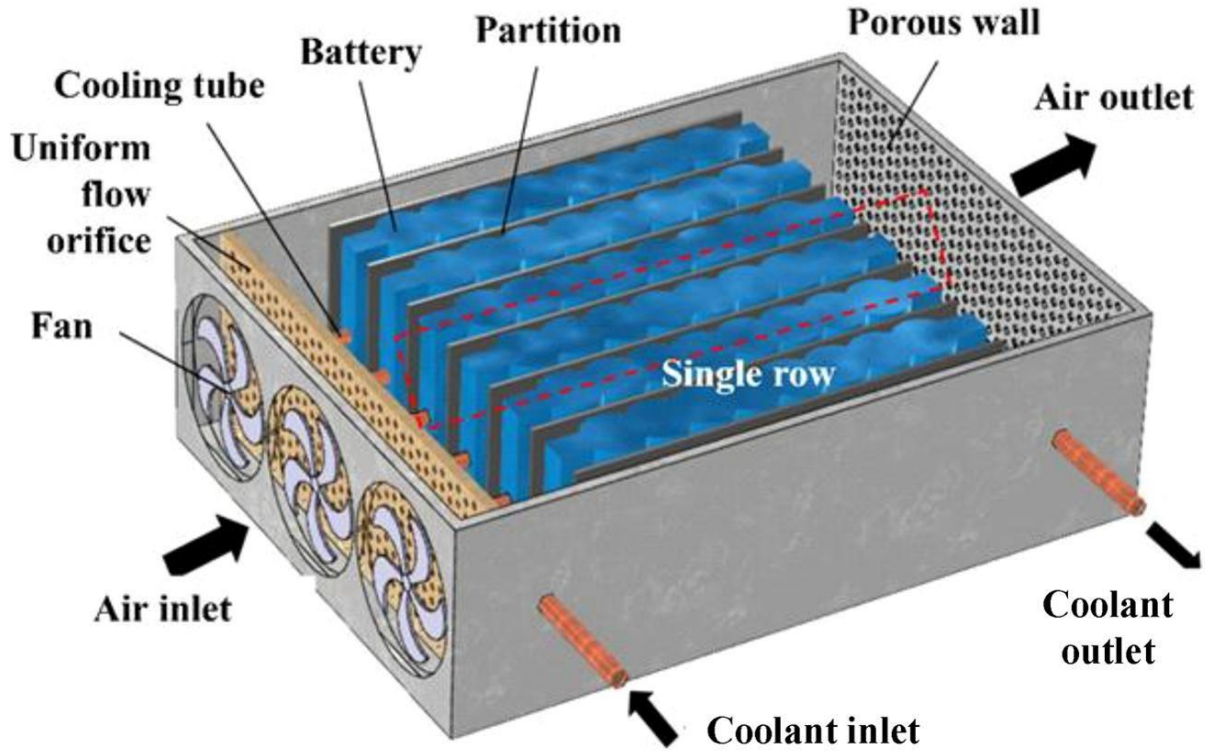
يجمع التبريد الهجين لمدخرات الليثيوم أيون بين طريقتين أو أكثر من طرائق التبريد للاستفادة من فوائد كل منها. تعالج استراتيجية التبريد هذه سلبيات كل طريقة من طرائق التبريد لتحقيق إدارة حرارية أكثر كفاءة، مما يجعلها مناسبة لمختلف التطبيقات ومختلف أنواع المدخرات. (Rallabandi, S.,2024) يمكن أن يؤدي دمج تقنيات التبريد المتعددة إلى زيادة التعقيد والتكاليف مقارنة بالأنظمة أحادية الطريقة. ويتطلب تحقيق التوازن الأمثل والتكامل بين تقنيات التبريد المختلفة أيضًا تصميمًا وهندسة دقيقة، ومع مرور الوقت، كما يمكن أن يؤدي تعقيد النظام الهجين إلى زيادة متطلبات الصيانة. (Wei, Y., & Agelin-Chaab, M.,2018)

وبين الشكل التالي مخططاً تمثيلاً للتجهيزات المطلوبة لعملية التبريد الهجينة التي تشمل التبريد السائل والتبريد الهوائي القسري:



الشكل (٢-١٥) التجهيزات المطلوبة لعملية التبريد الهجين (Wei, Y., & Agelin-Chaab, M., 2018)

كما صمم الباحثون في الدراسة (Zhao, L., 2023) نظامًا هجينًا جديدًا لإدارة الحرارة للمدخرة، يجمع بين التبريد السائل المباشر والتبريد الهوائي القسري. صُمم غلاف خارجي للمدخرة، وُضع سائل التبريد بين غلافها والغلاف الخارجي. حُلّلت آثار المسافة بين المدخرة وغلاف التبريد السائل، وعدد أنابيب التبريد، ومعدل تدفق السائل، وموضع المروحة على التبريد من خلال عمليات محاكاة رقمية لتحسين التصميم. تشير النتائج إلى أن أفضل تكوين لنظام الإدارة الحرارية هو مسافة ٥ مم بين المدخرة وغلاف التبريد السائل، وهيكل تبريد سائل مزدوج الأنابيب، وتدفق أفقي متوازي لسائل التبريد السائل والهواء. كما حُدّد معدل التدفق الأمثل للسائل عند 0.002 كجم/ثانية، ويجب أن يكون معدل تدفق الهواء أقل من 0.4 متر/ثانية كما هو موضح في الشكل التالي:

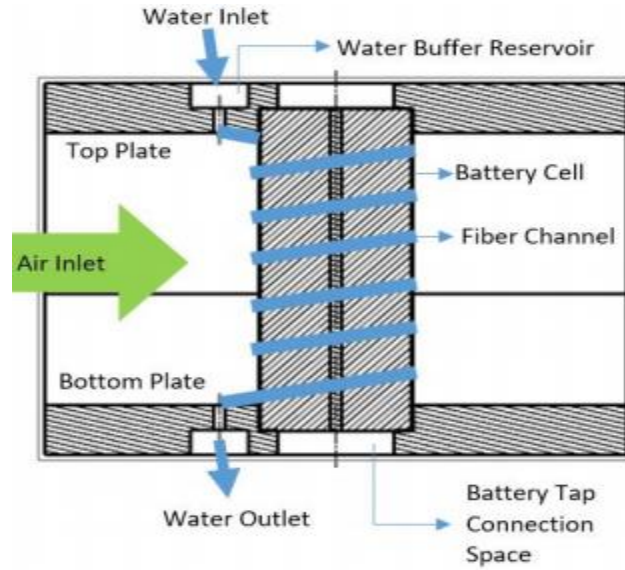


الشكل (٢-١٦) نظام تبريد هجين يستخدم التبريد المائي والهوائي القسري

٢-٤-٧ مقارنة بين طرائق التبريد المختلفة (Cooling Methods Comparison):

حسب (Wei, Y., & Agelin-Chaab, M., 2018) تم استخدام مدخرة Li-ion واحدة (Efest IMR 26650 5200 mAh) وشاحن (Reaktor Quadcore 4 × 300 W 20A) كما تم استخدام مفرغ (TDI RBL488) لتفريغ المدخرة، وتم قياس درجات الحرارة بواسطة الكاميرا الحرارية التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء (SPI) وتسجيل النتائج باستخدام برنامج (LabVIEW).

يبين الشكل التالي ارتفاع درجة حرارة سطح المدخرة المقاسة تحت ظروف التبريد المختلفة مع الزمن أثناء التفريغ بتيار ثابت مقداره (1.15C) يليه شحن بتيار ثابت وتوتر ثابت يبدأ بتيار أقل من (0.2C) (Wei, Y., & Agelin-Chaab, M., 2018). حيث كانت سرعة الهواء في التبريد الهوائي القسري تساوي 0.7m/s وتدفق الماء في الأنابيب (0.015-0.02g/s) كما في الشكل التالي:

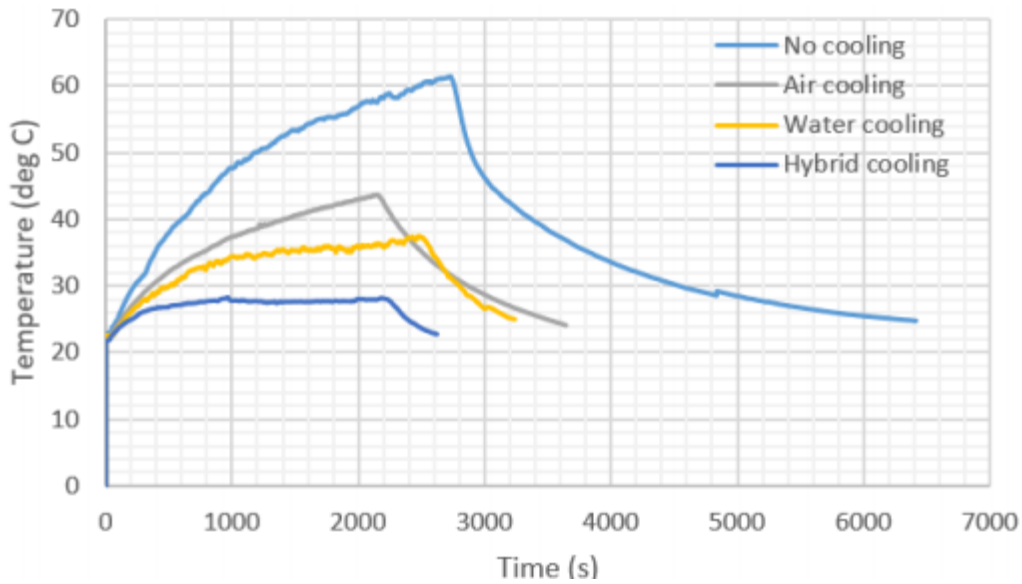


الشكل (١٧-٢) نظام تبريد هجين هوائي قسري ومائي قسري لخلية واحدة

لوحظ أنه في طريقة التبريد الهجين انخفضت درجة الحرارة القصوى في مستوى الخلية بمقدار 82.9%

مقارنة بطريقة عدم التبريد، كما انخفضت بنسبة 69.9% في التبريد الهوائي و 57.3% في التبريد

المائي.



الشكل (١٨-٢) تغير درجة حرارة سطح المدخرة مع الزمن أثناء التفريغ بتيار ثابت مقداره ١,١٥ C يليه

شحن بتيار ثابت وتوتر ثابت يبدأ بتيار أقل من (0.2C) (Wei, Y., & Agelin-Chaab, M., 2018)

تم في هذا الفصل التعرّف على أنواع المدخرات الكهربائية ومكونات كلّ منها والتوسّع في مبدأ عمل ومكونات وأنواع مدخرات شوارد الليثيوم، وذكر ميزات وسلبيات ومجال استخدام كل نوع من أنواعها، كما تمّ فيه بحث ميزات وسلبيات وطرائق الشحن السريع المستخدمة لشحن مدخرات شوارد الليثيوم، وقمنا بدراسة طرائق تبريد المدخرات وذكر سلبيات وإيجابيات كل طريقة.

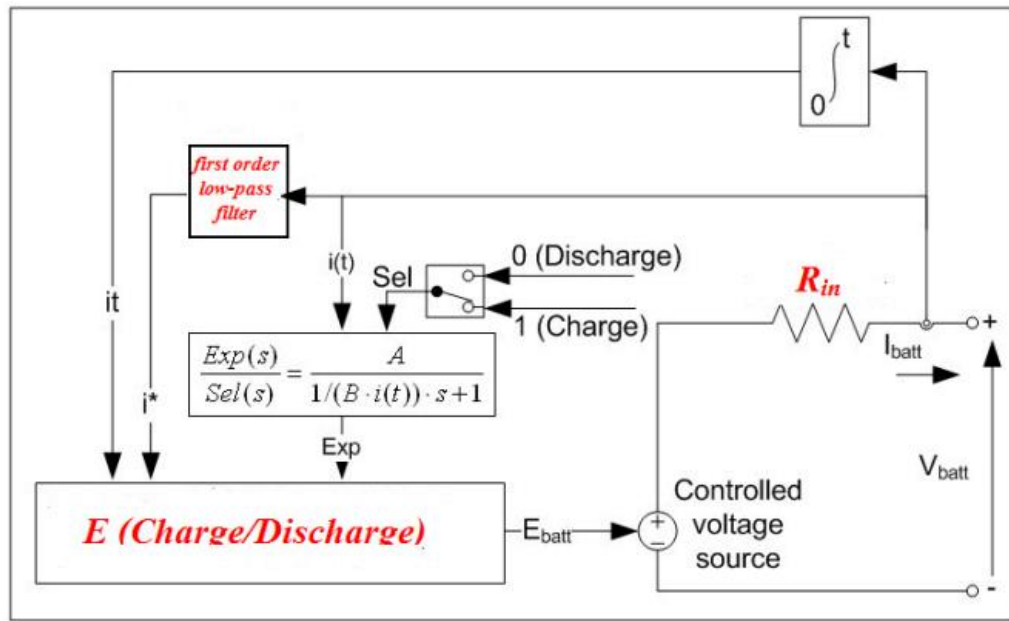
الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة سلوك المدخنة

تعطي النمذجة تصوراً أولياً للنتائج العملية، كما يمكن عن طريقها محاكاة أغلب الظواهر الفيزيائية التي تحدث في المدخرات، واستنتاج المحددات الأساسية لها، حيث قمنا في هذا الفصل بتصميم نموذج رياضي يصف الظواهر الفيزيائية التي تحدث في المدخرة وتمثيل هذا النموذج في برنامج ماتلاب لتحديد محدّدات المدخرة ورسم منحنيات لها عبر الزمن.

٣-١ النموذج الرياضي المستخدم لنمذجة المدخرة (The Mathematical Model):

إن النموذج المستخدم لنمذجة المدخرة في برنامج (MATLAB) نموذج شامل لمحاكاة المدخرات الشائعة

الاستخدام من المدخرات القابلة للشحن ، ويظهر الشكل التالي النموذج المستخدم:

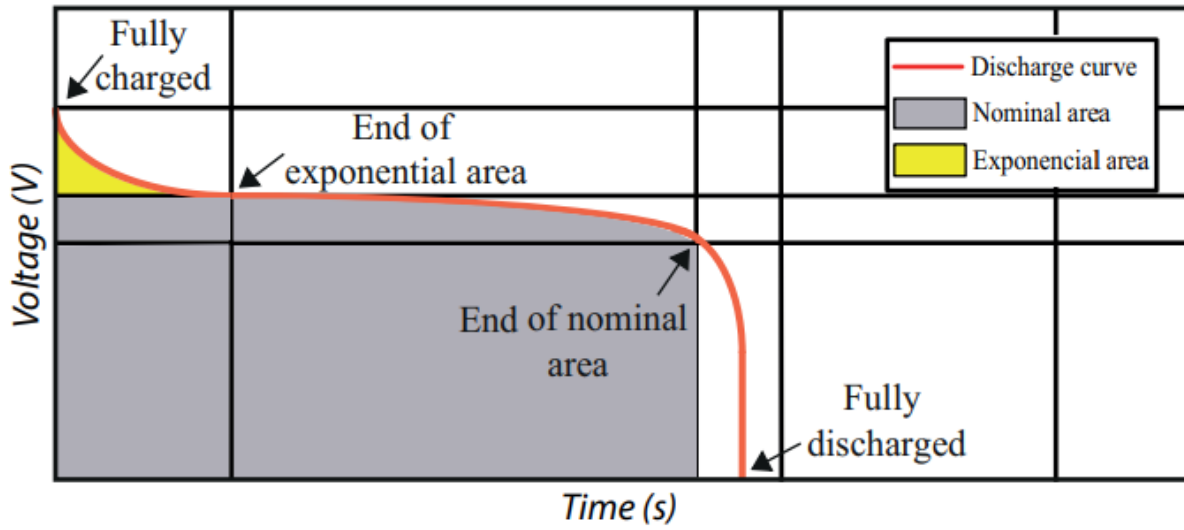


الشكل (٣-١) النموذج المستخدم في برنامج ماتلاب لنمذجة المدخرة (A. Kamel, and others, 2019)

يُستخدم النموذج السابق لحساب التوتر الطرفي للمدخرة V_{batt} والذي يساوي توتر الدارة المفتوحة للمدخرة E_{batt} منقوصاً منها جداء المقاومة الداخلية بتيار المدخرة، وقد تم تمثيل توتر الدارة المفتوحة للمدخرة بمنبع يتم التحكم به عن طريق i^* الذي يمثل تيار الترددات المنخفضة (ينتج عن

تمرير تيار المدخرة على مرشح لتمرير الترددات المنخفضة) و تابع أسي يتعلق بالجزء الأسي من منحنى تفريغ المدخرة.

يمكن تعديل متحولات الدارة السابقة لمحاكاة جميع أنواع المدخرات ومحاكاة خواص التفريغ الخاصة بها، حيث يتكون منحنى التفريغ من ثلاثة أقسام:



الشكل (٣-٢) منحنى تفريغ المدخرة (Caldeira, C. A., and others, 2019)

الجزء الأول يمثل هبوط الجهد الأسي عندما تكون المدخرة مشحونة، وتعتمد قيمة هبوط الجهد على نوع المدخرة. الجزء الثاني يمثل القدرة التي يتم استخلاصها من المدخرة قبل هبوط جهد المدخرة إلى قيمة أقل من قيمة جهد الاسمي. أما الجزء الثالث فيمثل التفريغ الكامل للمدخرة حيث يهبط الجهد بشكلٍ حاد (Caldeira, C. A., and others, 2019).

وتعطى المعادلات الواصفة لسلوك مدخرة شوارد الليثيوم خلال فترتي الشحن والتفريغ واللازمة لحساب التوتر

الطرفي للمدخرة كمايلي: (A. Kamel, and others, 2019)

حالة التفريغ:

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3-1)$$

$$V_{batt} = f_1(it, i^*, i) - R \cdot i$$

حالة الشحن:

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3-2)$$

$$V_{batt} = f_2(it, i^*, i) - R \cdot i$$

حيث:

الجدول (١-٣) متغيرات وثوابت معادلة توتر المدخرة

توتر ثابت	E_0 (V)
ثابت الاستقطاب	K (V.Ah ⁻¹)
تيار التردد المنخفض ونحصل عليه بتمرير التيار على مرشح لتمرير الترددات المنخفضة	i^* (A)
تيار المدخرة	i (A)
السعة المستجرة من المدخرة	it (Ah)
السعة الاسمية للمدخرة	Q (Ah)
توتر المدخرة عند نهاية المرحلة الأسية من منحنى التفريغ	A (V)
السعة المتبقية في المدخرة عند نهاية المرحلة الأسية من منحنى التفريغ	B (Ah)

ولتعريف و نمذجة المدخرة ينبغي معرفة المتحولات التالية:

١- نوع المدخرة: حيث تتغير معادلات النمذجة بتغير نوع المدخرة، وقد قمنا بذكر المعادلات الخاصة

بمدخرات شوارد الليثيوم (موضوع الدراسة) بالعلاقتين (2-13) و (2-14).

٢- السعة الاسمية (rated capacity): وهي كمية الطاقة التي يمكن تفريغها من المدخرة في ظروف العمل

الطبيعية (درجة حرارة 25C و تيار تفريغ مناسب) وتقدر ب (Ah)

٣- حالة الشحن الابتدائية (initial state of charge): نسبة الطاقة الموجودة في المدخرة إلى السعة

الاسمية للمدخرة عند بداية النمذجة.

٤- السعة الأعظمية للمدخرة (Maximum Capacity (Ah): سعة المدخرة عند التفريغ النبضي

٥- توتر الشحن الكامل (fully charged voltage): توتر خرج المدخرة عندما تكون نسبة شحنها

100%.

٦- تيار التفريغ الاسمي (Nominal Discharge Current (A)).

٧- المقاومة الداخلية (Internal Resistance): يتم افتراضها ثابتة خلال دورة الشحن والتفريغ الواحدة.

٨- سعة المدخرة المفرغة أثناء التفريغ من التوتر الأعظمي حتى الوصول إلى التوتر الاسمي (Capacity

:((Ah) @ Nominal Voltage

٩- المنطقة الأسية [Exponential zone (Voltage (V), Capacity (Ah)): توتر وسعة المدخرة عند

نهاية المرحلة الأسية من منحنى التفريغ.

٣-١-١ نمذجة أثر درجة الحرارة على المدخرة (Modeling of Temperature Effect On)

:(Battery

تم توسيع النموذج السابق ليشمل تأثير درجة الحرارة على المدخرة: (A. Kamel, and others, 2019)

نموذج التفريغ ($i > 0$):

$$f1(it, i^*, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (3-3)$$

$$V_{batt(T)} = f1(it, i, T, T_a) - R(T) \cdot i \quad (3-4)$$

نموذج الشحن ($i < 0$):

$$f2(it, i^*, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it + 0.1Q(T_a)} \cdot i^* - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (3-5)$$

$$V_{batt(T)} = f2(it, i, T, T_a) - R(T) \cdot i \quad (3-6)$$

حيث:

$$E_0(T) = E_0|_{T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T}(T - T_{ref}) \quad (3-7)$$

$$K(T) = K|_{T_{ref}} \cdot \exp(\alpha(1/T - 1/T_{ref})) \quad (3-8)$$

$$Q(T_a) = Q|_{T_a} + \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot (T_a - T_{ref}) \quad (3-9)$$

$$R(T) = R|_{T_{ref}} \cdot \exp(\beta(1/T - 1/T_{ref})) \quad (3-10)$$

الجدول (٣-٢) متغيرات وثوابت علاقات نمذجة أثر درجة الحرارة

درجة حرارة الجو الخارجي الاسمية مقدرة بالكلفن [K]	T_{ref}
درجة حرارة الخلية مقدرة بالكلفن [K]	T
درجة حرارة الجو الخارجي مقدرة بالكلفن [K]	T_a
معامل الجهد الحراري العكسي مقدراً ب [V/K]	$\frac{\partial E}{\partial T}$
ثابت أرينيوس النسبي لمقاومة الاستقطاب ويحسب بتعويض قيمة ثابت الاستقطاب	α

عند درجة حرارة مختلفة عن درجة الحرارة الاسمية في علاقة حساب معامل الاستقطاب	
ثابت أرينيوس النسبي للمقاومة الداخلية للمدخرة وحسب بتعويض قيمة المقاومة الداخلية للمدخرة عند درجة حرارة مختلفة عن درجة الحرارة الاسمية في علاقة حساب المقاومة الداخلية كتابع لدرجة الحرارة	β
معامل تغير السعة الأعظمي مع الحرارة مقدراً بـ [Ah/K]	$\frac{\Delta Q}{\Delta T}$
تغير معدل الانحدار الاسمي لمنحني التفريغ الناتج عن تغير درجة الحرارة درجة واحدة وذلك لكل أمبير ساعي وحسب من المنحنيات الاسمية للمدخرة وهو قريب من الصفر ويهمل لمدخرات شوارد الليثيوم [V/Ah]	C

وتعطى درجة حرارة الخلية (درجة الحرارة الداخلية) كتابع للزمن بالعلاقة التالية:

$$T(t) = L^{-1} \left(\frac{P_{loss} R_{th} + T_a}{1 + s \cdot t_c} \right) \quad (3-11)$$

حيث:

الجدول (٣-٣) متغيرات علاقة درجة حرارة المدخرة كتابع للزمن

المقاومة الحرارية بين الخلية والجو الخارجي مقدرة بـ [C°/W]	R_{th}
ثابت الزمن الحراري مقدراً بالثانية [s]	t_c
كمية الحرارة الكلية المولدة أثناء عملية الشحن أو التفريغ مقدرة بالواط [W]	P_{loss}

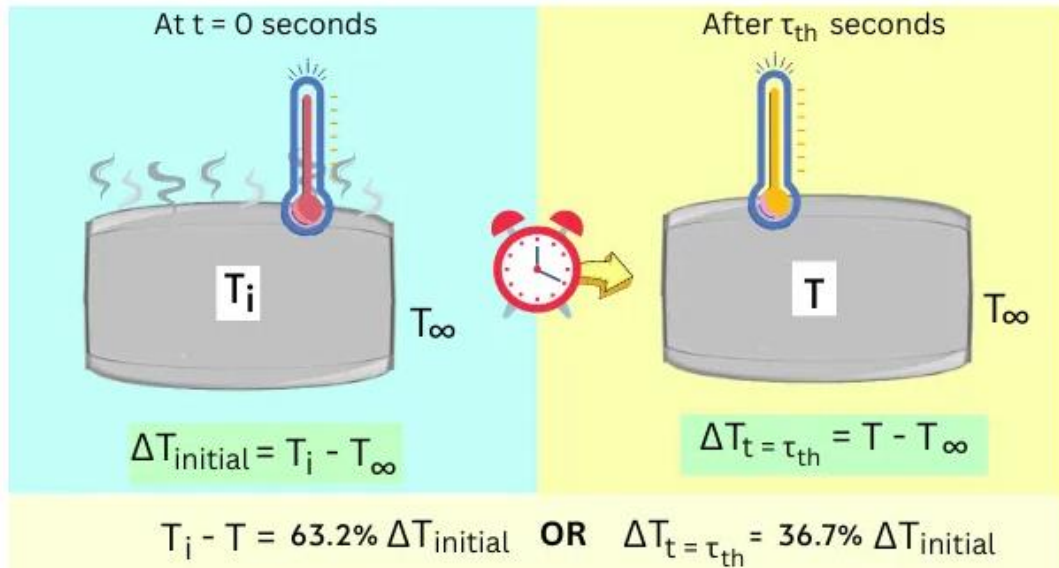
تعرف المقاومة الحرارية بين وسطين على أنها مقدار الفرق في درجة الحرارة بين الوسطين اللازم لانتقال واط

واحد من الحرارة بين الوسطين (C-Therm Technologies. Thermal resistance and Thermal

Conductance.2022).

الثابت الزمني الحراري هو الزمن اللازم لوصول حرارة المدخرة إلى 63.21% من الحرارة الابتدائية عند

تبريدها بالهواء الخارجي كما في الشكل التالي:



الشكل (٣-٣) الثابت الزمني الحراري لجسم صلب (MECH CONTENT. Thermal time constant in heat

(transfer.2022)

ويعطى t_c بالعلاقة التالية: (MECH CONTENT. Thermal time constant in heat

(transfer.2022)

$$t_c = \frac{\rho VC}{hA} \quad (3-12)$$

حيث:

الجدول (٣-٤) متغيرات علاقة الثابت الزمني الحراري

ρ	كثافة المدخرة kg/m^3
V	حجم المدخرة m^3
C	الحرارة النوعية للمدخرة J/kg.k
h	معامل انتقال الحرارة $\text{W/m}^2.\text{k}$
A	مساحة سطح المدخرة الخارجي m^2

وتعطى المفاقد الحرارية P_{loss} بالعلاقة التالية:

$$P_{loss} = (E_0(T) - V_{batt}(T)) \cdot i + \frac{\partial E}{\partial T} \cdot i \cdot T \quad (3-13)$$

٣-١-٢ نمذجة أثر التقادم على المدخرة (Modelling Of Aging Effect On Battery) :

يعطى تغير حالة شحن المدخرة كنسبة مئوية بالاعتماد على طريقة تراكم الشحنات خلال فترة العينة Δt

بالعلاقة التالية:

$$\Delta SOC = 100 \times \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt\right) \quad (3-14)$$

ومن أجل فترة الاعتيان رقم t تعطى حالة الشحن:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \Delta SOC \quad (3-15)$$

حيث $t=(1-2-3\dots)$ كما يعطى عمق التفريغ DOD من أجل اللحظة رقم t بالعلاقة التالية:

$$DOD(t) = 1 - SOC(t) \quad (3-16)$$

يمكن نمذجة أثر التقادم الناتج عن الشحن والتفريغ المتكرر على سعة المدخرة ومقاومتها الداخلية بالعلاقات

التالية: (Caldeira, C. A., and others, 2019)

$$Q(n) = Q_{BOL} - \varepsilon(n) \cdot (Q_{BOL} - Q_{EOL}) \quad (3-17)$$

$$R(n) = R_{BOL} + \varepsilon(n) \cdot (R_{EOL} - R_{BOL}) \quad (3-18)$$

حيث:

الجدول (٣-٥) متغيرات علاقة تقادم المدخرة

Q_{BOL}	سعة المدخرة الأعظمية عند بداية عمر المدخرة وعند درجة الحرارة الاسمية [Ah]
Q_{EOL}	سعة المدخرة الأعظمية عند نهاية عمر المدخرة وعند درجة الحرارة الاسمية [Ah]
R_{BOL}	المقاومة الداخلية للمدخرة [R] عند بداية عمر المدخرة وعند درجة الحرارة الاسمية
R_{EOL}	المقاومة الداخلية للمدخرة [R] عند نهاية عمر المدخرة وعند درجة الحرارة الاسمية
$\varepsilon(n)$	معامل تقادم المدخرة يساوي الصفر عند بداية عمر المدخرة

ويتم إنجاز دورة كاملة عندما يتم شحن وتفريغ المدخرة.

ويمكن وصف معامل تقادم المدخرة ε بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) \quad (3-19)$$

حيث:

DOD : عمق تفريغ المدخرة.

N : العدد الأعظمي لدورات الشحن والتفريغ ويعطى بالعلاقة التالية

$$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\xi} \cdot \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \cdot (I_{dis_ave}(n))^{-\gamma_1} \cdot (I_{ch_ave}(n))^{-\gamma_2} \right) \quad (3-20)$$

حيث:

الجدول (٦-٣) متغيرات وثوابت علاقة العدد الأعظمي لدورات الشحن والتفريغ

H	ثابت عدد دورات الشحن والتفريغ [دورة]
ξ	المعامل الأسّي لعمق التفريغ
ψ	ثابت أرينيوس النسبي لدورات الشحن والتفريغ
I_{dis_ave}	تيار التفريغ الوسطي خلال دورة التفريغ مقدراً بالأمبير [A]
I_{ch_ave}	تيار الشحن الوسطي خلال دورة الشحن مقدراً بالأمبير [A]
γ_1	المعامل الأسّي لتيار التفريغ
γ_2	المعامل الأسّي لتيار الشحن

وتُحسب الثوابت والمتغيرات السابقة كمايلي:

يتم اعتبار $H = 1[\text{cycle}]$ في حالة مدخرات شوارد الليثيوم

$$\xi = \frac{\ln(DOD(n))}{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})} \quad (3-21)$$

حيث:

N_{Cref} : عدد دورات الشحن والتفريغ الأعظمية عندما تكون قيم درجة الحرارة وعمق التفريغ ونسبة التفريغ مساوية للقيم الاسمية للمدخرة.

$N_C(n)$: عدد دورات الشحن والتفريغ الأعظمية عند القيم الحالية لكل من درجة الحرارة وعمق التفريغ ونسبة التفريغ.

$$\psi = \frac{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})}{\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)}} \quad (3-22)$$

$$I_{dis_ave}(n) = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{n-1} |I_{dis}(n)| \quad (3-23)$$

$$I_{ch_ave}(n) = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{n-1} |I_{ch}(n)| \quad (3-24)$$

$$\gamma_1 = \frac{\ln(\frac{I_{dis_ave}(n)}{I_{dis_ref}})}{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})} \quad (3-25)$$

$$\gamma_2 = \frac{\ln(\frac{I_{ch_ave}(n)}{I_{ch_ref}})}{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})} \quad (3-26)$$

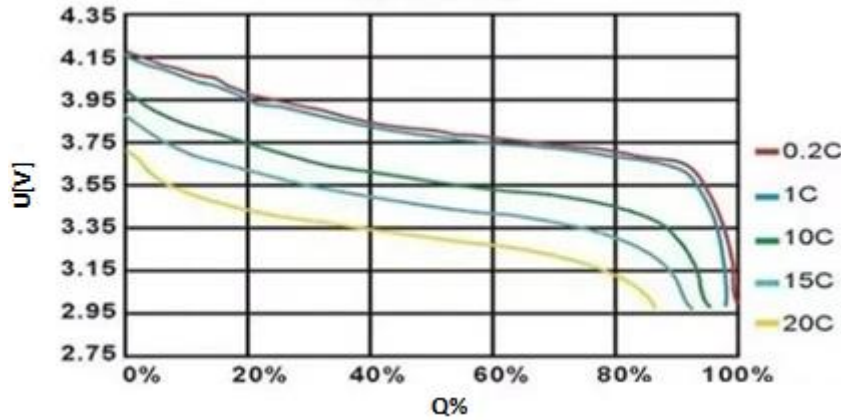
حيث I_{ch_ref} ، تيار الشحن الاسمي وتيار التفريغ الاسمي.

٢-٣ استخراج البيانات المطلوبة من منحنى التفريغ (Extracting The Required Data From The Discharge Curve):

إن الخلية المستخدمة في بناء المدخرة لهذا البحث هي خلية شوارد الليثيوم بوليمير (Li-polymer) ذات الرمز

(1260110) بسعة اسمية [mAh] 10000 وتوتر اسمي [V] 3.7

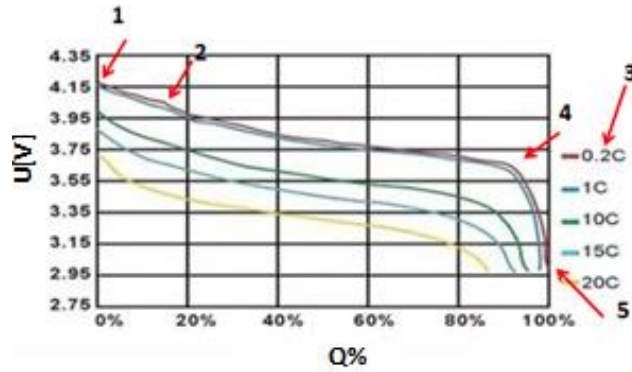
والشكل التالي يمثل منحنى خواص التفريغ للمدخرة حيث يبين الشكل تفريغ المدخرة بتيارات مختلفة:



الشكل (٣ - ٤) منحنى خواص التفريغ للمدخرة المدروسة من المصنع (<https://i2.kknews.cc.2022>)

يمكن استنتاج القيم المطلوبة لنمذجة المدخرة من منحنى التفريغ كما يلي (يمثل الرقم بين قوسين النقطة المقابلة

على المنحنى التي تم أخذ القيمة منها): (A. Kamel, and others, 2019)



الشكل (٣-٥) استنتاج القيم المطلوبة لنمجة المدخلة من المنحنيات المقدمة من الشركة المصنعة للخلية

السعة الاسمية: 10000mAh (5)

التوتر الاسمي من المنحني: 3.65V (4)

السعة الأعظمية: 10000mAh (5)

توتر الشحن الكامل: 4.35V (1)

المقاومة الداخلية: هبوط الجهد عند التحميل مقسوماً على تيار الحمل [A] 10.

من المنحني السابق:

$$R_i = \frac{4.35-4.15}{10} = 20m\Omega \quad (3-27)$$

تيار التفريغ الاسمي: 2000mA

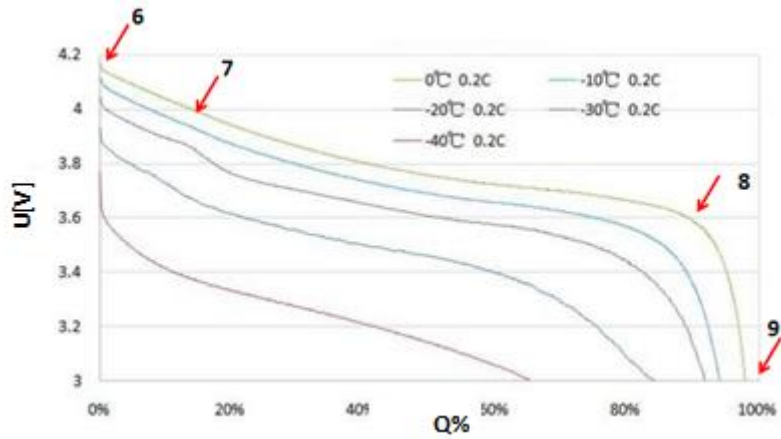
السعة المفرغة عند التوتر الاسمي: 9000mAh (4)

التوتر في نهاية المرحلة الأسية من منحني التفريغ: 4.05V (2)

السعة المفرغة في نهاية المرحلة الأسية من منحني التفريغ: 1500mAh (2)

توتر القطع (نهاية التفريغ) cut-off voltage: 3V (5)

أما القيم اللازمة لنمذجة أثر درجة الحرارة على المدخرة فيتم استنتاجها من المنحني التالي المأخوذ من مواصفات المدخرة (datasheet) التي تزودها الشركة المصنعة.



الشكل (٦-٣) استنتاج القيم اللازمة لنمذجة تأثير درجة الحرارة على المدخرة من منحني التفريغ عند درجات حرارة مختلفة

درجة الحرارة الابتدائية T_a (التي تتم عندها بداية عملية النمذجة: 20^0 C (حسب اختيار الدارس)

درجة حرارة الجو الاسمية (التي تم اختيارها من قبل المصنع لرسم منحني التفريغ الاسمي الذي تم الاعتماد عليه

لمعرفة المحددات الاسمية للمدخرة: 20^0 C (من المصنع)

درجة حرارة الجو الثانية (التي تم اعتمادها من قبل الدارس لأخذ منحني التفريغ المزود من قبل المصنع عندها

لنمذجة أثر درجة الحرارة على المدخرة) : 0^0 C (حسب اختيار الدارس)

- القيم عند درجة الحرارة الثانية

(9) السعة الأعظمية: 9.75Ah

(6) توتر بداية التفريغ: 4.15V

(8) التوتر عند نهاية المرحلة الاسمية من منحني التفريغ: 3.6V

التوتر عند نهاية المرحلة الأسية: 4V (7)

السعة المفرعة عند نهاية المرحلة الأسية: 2Ah (7)

١-٢-٣ الاستجابة الحرارية والفقد الحراري (Thermal Response And Heat Loss):

مقاومة انتقال الحرارة من الخلية إلى الوسط الخارجي: وتساوي تغير درجة الحرارة للمدخرة مقسوماً على كمية

الحرارة المنقولة أثناء هذا التغير: (Mousavi, M.,2011)

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (3-28) \quad \text{الثابت الزمني الحراري:}$$

$$t_c = \frac{\rho VC}{hA} = \frac{W.C}{hA} \quad (3-29)$$

حيث:

ρ : كثافة المدخرة kg/m^3 C : الحرارة النوعية للمدخرة J/kg.k

h : معامل انتقال الحرارة $\text{W/m}^2.\text{k}$ V : حجم المدخرة m^3

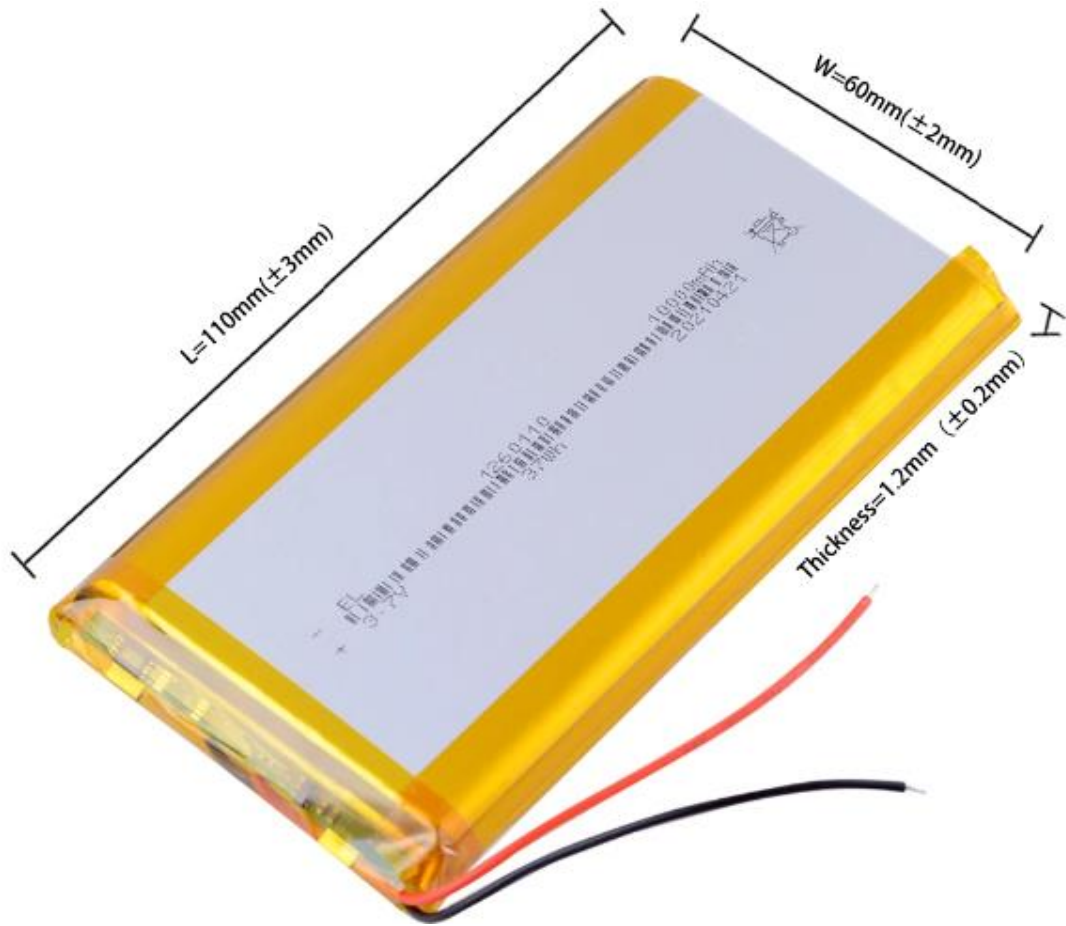
A : مساحة سطح المدخرة الخارجي m^2

وزن الخلية: (BATTREY Specification Sheet)

$$W = 0.15 [\text{kg}] \quad (3-30)$$

أما مساحة سطح الخلية فيتم حسابها اعتماداً على الشكل التالي كمايلي:

$$A = 2(0.11 \times 0.06) + 2(0.11 \times 0.012) + 2(0.06 \times 0.012) = 0.0173 [\text{m}^2] \quad (3-31)$$



الشكل (٣-٧) أبعاد الخلية المستخدمة (BATTREY Specification Sheet)

$$C = 1007 [J / kgC^0], h = 6 [W.m / C^0] \quad (3-32) \quad (\text{Chen, S. C., 2005})$$

$$t_c = 1455 [\text{sec}] \quad (3-33)$$

ثابت أرينيوس النسبي للاستقطاب α : ويحسب بتعويض قيمة معامل الاستقطاب للمدخرة عند درجة حرارة مختلفة عن درجة الحرارة الاسمية في علاقة حساب معامل الاستقطاب كتابع لدرجة الحرارة ويساوي (-0.42).

ثابت أرينيوس النسبي للمقاومة الداخلية β : ويحسب بتعويض قيمة المقاومة الداخلية للمدخرة عند درجة حرارة مختلفة عن درجة الحرارة الاسمية في علاقة حساب المقاومة الداخلية كتابع لدرجة الحرارة ويساوي (-3.5).

٢-٢-٣ القيم المتعلقة بنمذجة التقادم في المدخرة (Values Related To The Aging) :

(Caldeira, C. A., and others,2019)

عمر المدخرة الابتدائي: cycle [0] دورة شحن وتفريغ (باعتبار المدخرة جديدة)

- خواص التقادم عند حرارة وسط خارجي T_{a1} :

حرارة الوسط الخارجي $T_{a1}=25^0C$ (حسب اختيار الدارس)

السعة عند نهاية عمر المدخرة:

$$10000 \times 0.8 = 8000[mAh] \quad (3-34)$$

(استناداً لأغلب المراجع في هذا المجال) (www.mpoweruk.com, Battery Life and)

(DEATH,2009)

المقاومة الداخلية للمدخرة عند نهاية عمر المدخرة:

$$20 \times 1.3 = 26[m\Omega] \quad (3-35)$$

(استناداً لأغلب المراجع في هذا المجال) (Mousavi, M.,2011)

تيار الشحن الاسمي: $2[A]$ تيار الشحن الأعظمي: $10[A]$

تيار التفريغ الاسمي: $2[A]$ تيار التفريغ الأعظمي: $10[A]$

٣-٣ المدخرة المدروسة (Studied Battery): لتكوين المدخرة المطلوبة سنقوم بوصل (3)

خلايا على التسلسل لتكون القيم اللازمة لنمذجة المدخرة كمايلي: (هذه القيم تم حسابها في الفقرة السابقة

للخلية ويتم في هذه الفقرة حسابها للمدخرة المكونة من ٣ خلايا على التسلسل)

السعة الاسمية:

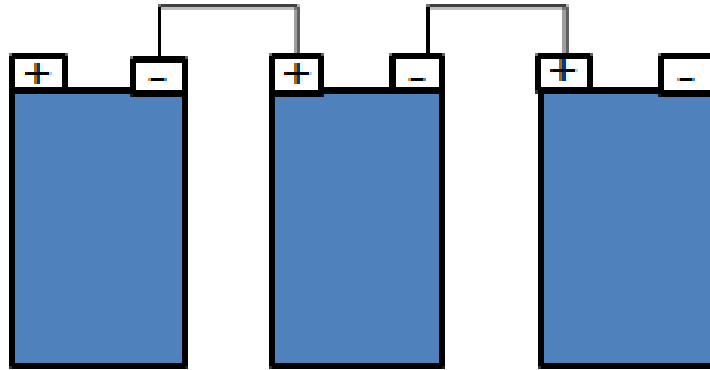
$$Q_{BAT} = Q_{cell} = 10000[mAh] \quad (3-36)$$

التوتر الاسمي من المنحني:

$$\begin{aligned} V_{BAT} &= 3 \times V_{cell} = 3 \times 3.7 \\ &= 11.1[V] \quad (3-37) \end{aligned}$$

المقاومة الداخلية:

$$\begin{aligned} R_i &= 3 \times R_{icell} = 3 \times 20 \\ &= 60[m\Omega] \quad (3-38) \end{aligned}$$



الشكل (٣-٨) طريقة توصيل الخلايا ضمن مدخرة

السعة الأعظمية:

$$Q_{BAT \max} = Q_{cell \max} = 10000[mAh] \quad (3-39)$$

توتر الشحن الكامل:

$$V_{BATfull} = 3 \times V_{cellfull} = 3 \times 4.35 = 13.05[V] \quad (3-40)$$

تيار التفريغ الاسمي:

$$i_{BAT} = i_{cell} = 2[A] \quad (3-41)$$

السعة المفرغة عند التوتر الاسمي (هي نفس السعة المفرغة من الخلية عند تفريغها من توتر الشحن الكامل

إلى التوتر الاسمي) : $9[Ah]$

التوتر في نهاية المرحلة الأسية من منحنى التفريغ:

$$3 \times 4.05 = 12.15[V] \quad (3-42)$$

السعة المفرغة في نهاية المرحلة الأسية من منحنى التفريغ:

$$1.5[Ah] \quad (3-43)$$

توتر القطع (نهاية التفريغ) cut-off voltage:

$$3 \times 3 = 9[V] \quad (3-44)$$

- القيم عند درجة الحرارة الثانية

السعة الأعظمية: $9.75Ah$ (9)

توتر بداية التفريغ: $4.15 \times 3 = 12.45V$ (6)

التوتر عند تفريغ 90% من السعة الاسمية: $3.6 \times 3 = 10.8V$ (8)

التوتر عند نهاية المرحلة الأسية: $4 \times 3 = 12V$ (7)

السعة المفرغة عند نهاية المرحلة الأسية: $2Ah$ (7)

بقية القيم للمدخلة تبقى نفس القيم المذكورة للخلية المكونة لهذه المدخلة ولكن يتم ضرب القيمة بعدد الخلايا (3) بالنسبة لقيم التوتر.

٣-٤ النموذج المستخدم (Used Model):

تمت محاكاة المعادلات الرياضية للنموذج الرياضي باستخدام برنامج MATLAB وبيّن الجدول التالي جميع المعادلات التي تم استخدامها لتصميم النموذج وطريقة حساب الثوابت الموجودة في كل معادلة:

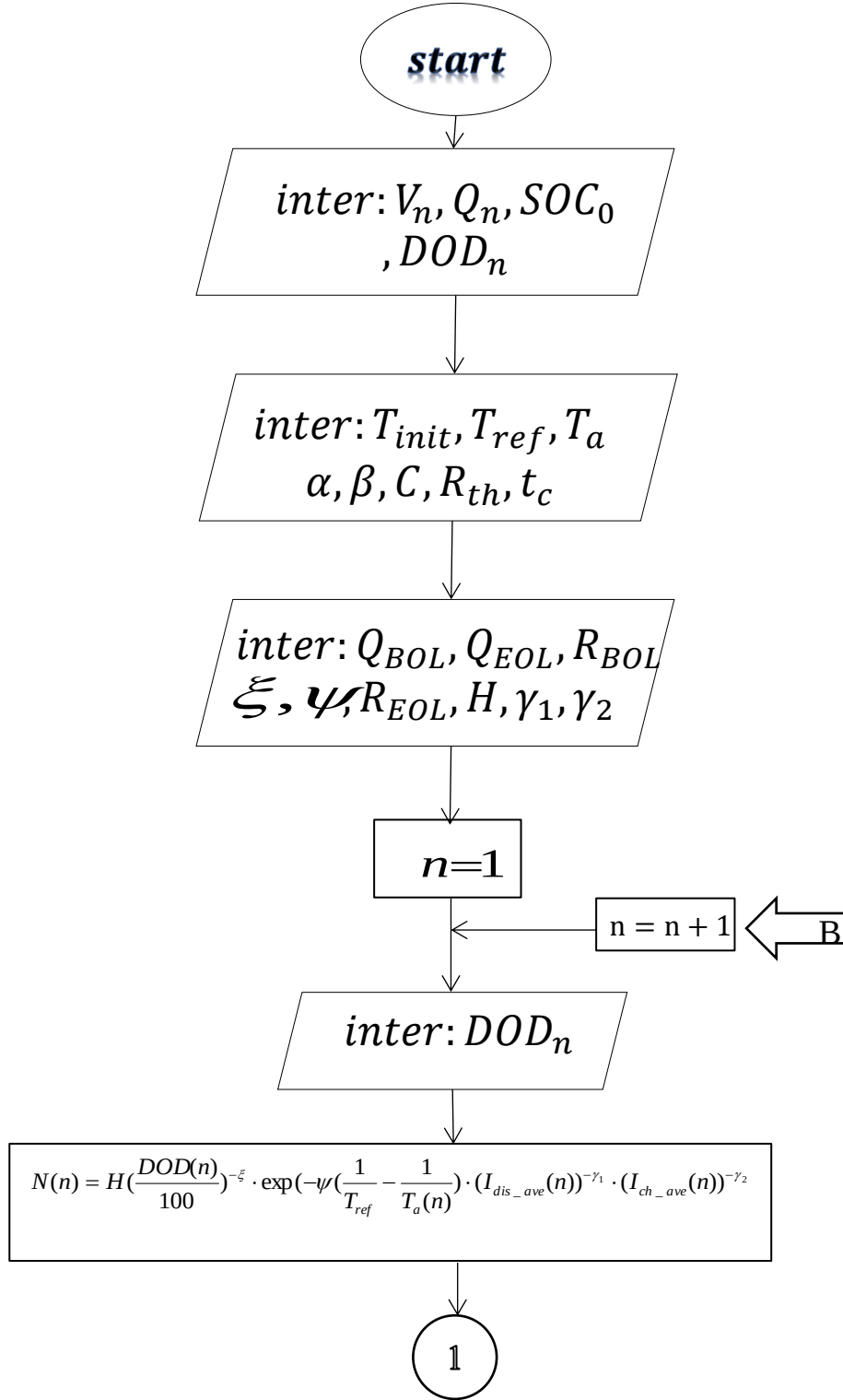
الجدول (٣-٧) المعادلات المستخدمة لنمذجة المدخلة وحساب الثوابت الموجودة فيها

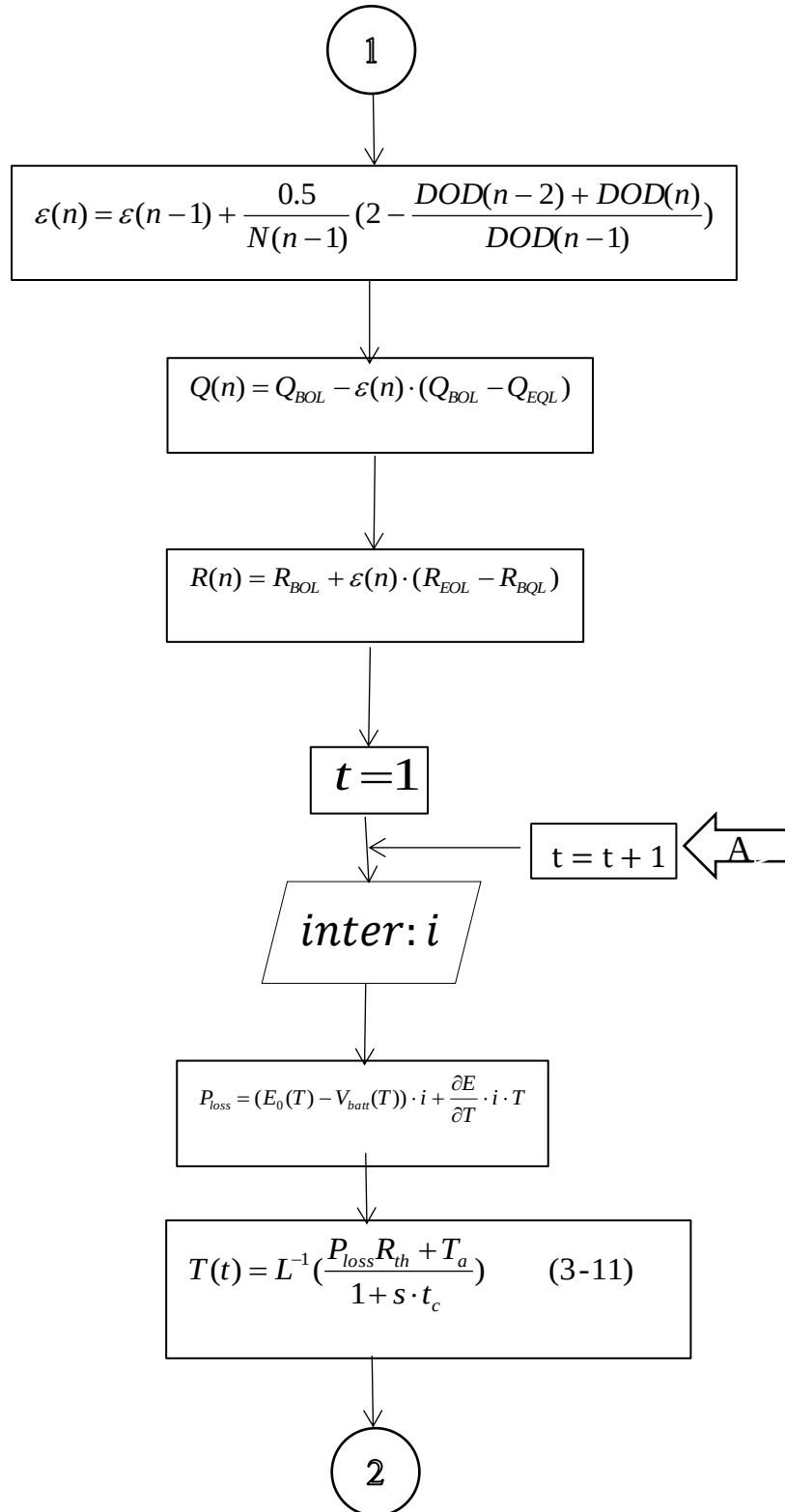
المتغير المراد حسابه	المعادلة	قيم الثوابت المطلوبة
التوتر الطرفي للمدخلة في حالة التفريغ	$V_{batt(T)} = f1(it, i, T, T_a) - R(T) \cdot i$	
التابع $f1$	$f1(it, i^*, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it$	$A = 4[V]$ $B = 2[V]$ $C = 0[V / Ah]$
التوتر الطرفي للمدخلة في حالة الشحن	$V_{batt(T)} = f2(it, i, T, T_a) - R(T) \cdot i$	
التابع $f2$	$f2(it, i^*, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it + 0.1Q(T_a)} \cdot i^* - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it$	$A = 4[V]$ $B = 2[V]$ $C = 0[V / Ah]$

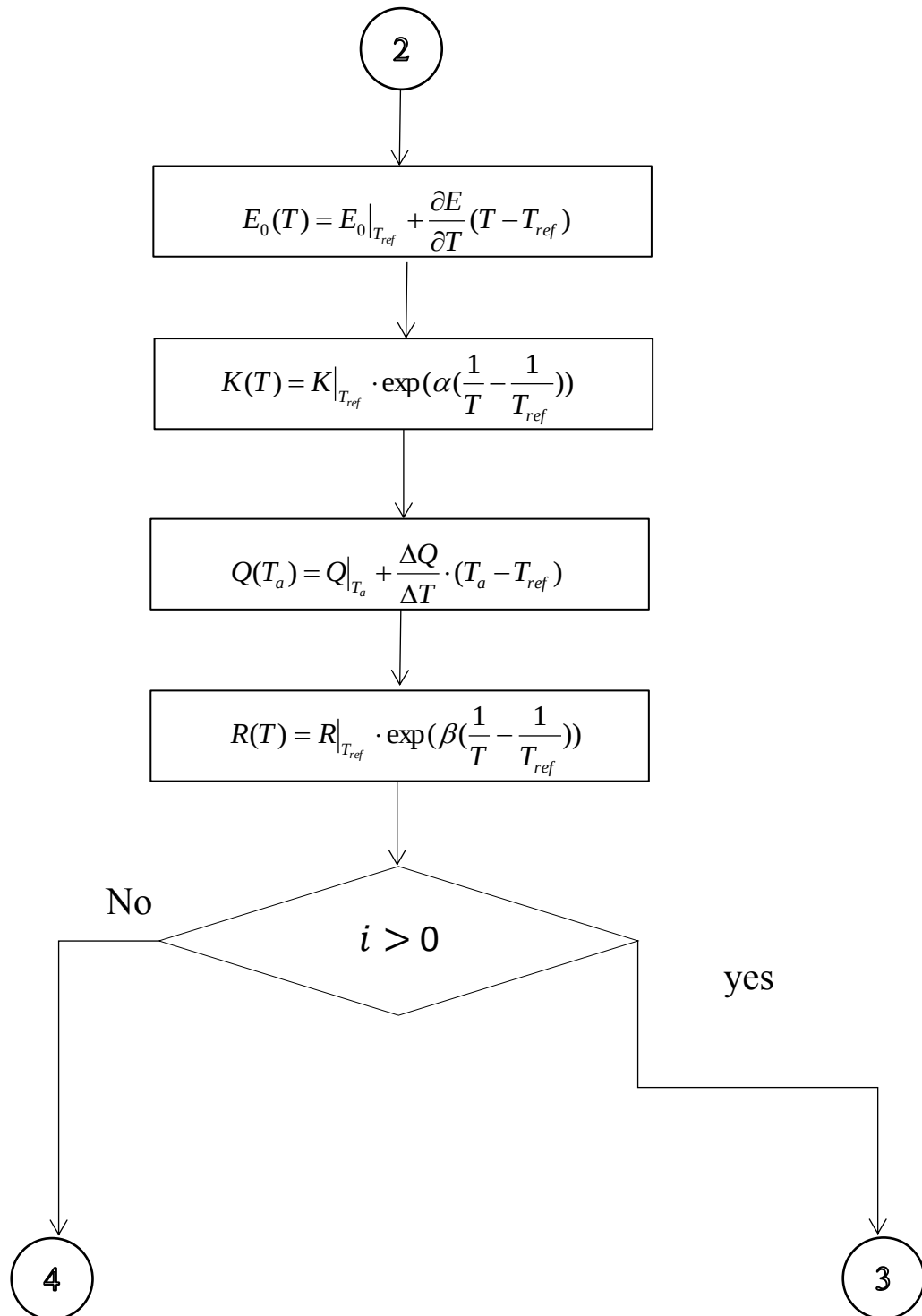
	$E_0(T) = E_0 _{T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T}(T - T_{ref})$	توتر الدارة المفتوحة للمدخنة
$\alpha = \frac{\ln(\frac{K(T)}{K _{T_{ref}}})}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}} = \frac{\ln(\frac{0.008}{0.01})}{\frac{1}{10} - \frac{1}{20}} = -0.42$	$K(T) = K _{T_{ref}} \cdot \exp(\alpha(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}))$	عامل الاستقطاب كتابع لدرجة الحرارة
	$Q(T_a) = Q _{T_a} + \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot (T_a - T_{ref})$	سعة المدخنة كتابع لدرجة الحرارة
$\beta = \frac{\ln(\frac{R(T)}{R _{T_{ref}}})}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}} = \frac{\ln(\frac{0.05}{0.02})}{\frac{1}{-40} - \frac{1}{20}} = -3.5$	$R(T) = R _{T_{ref}} \cdot \exp(\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}))$	المقاومة الداخلية للمدخنة كتابع لدرجة الحرارة
$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{18.6}{87.78} = 0.2 [C / W]$ $t_c = \frac{\rho VC}{hA} = 1455[\text{sec}]$	$T(t) = L^{-1}(\frac{P_{loss}R_{th} + T_a}{1 + s \cdot t_c})$	درجة حرارة المدخنة كتابع للزمن
	$Q(n) = Q_{BOL} - \varepsilon(n) \cdot (Q_{BOL} - Q_{EQL})$	سعة المدخنة عند دورة الشحن والتفريغ رقم n

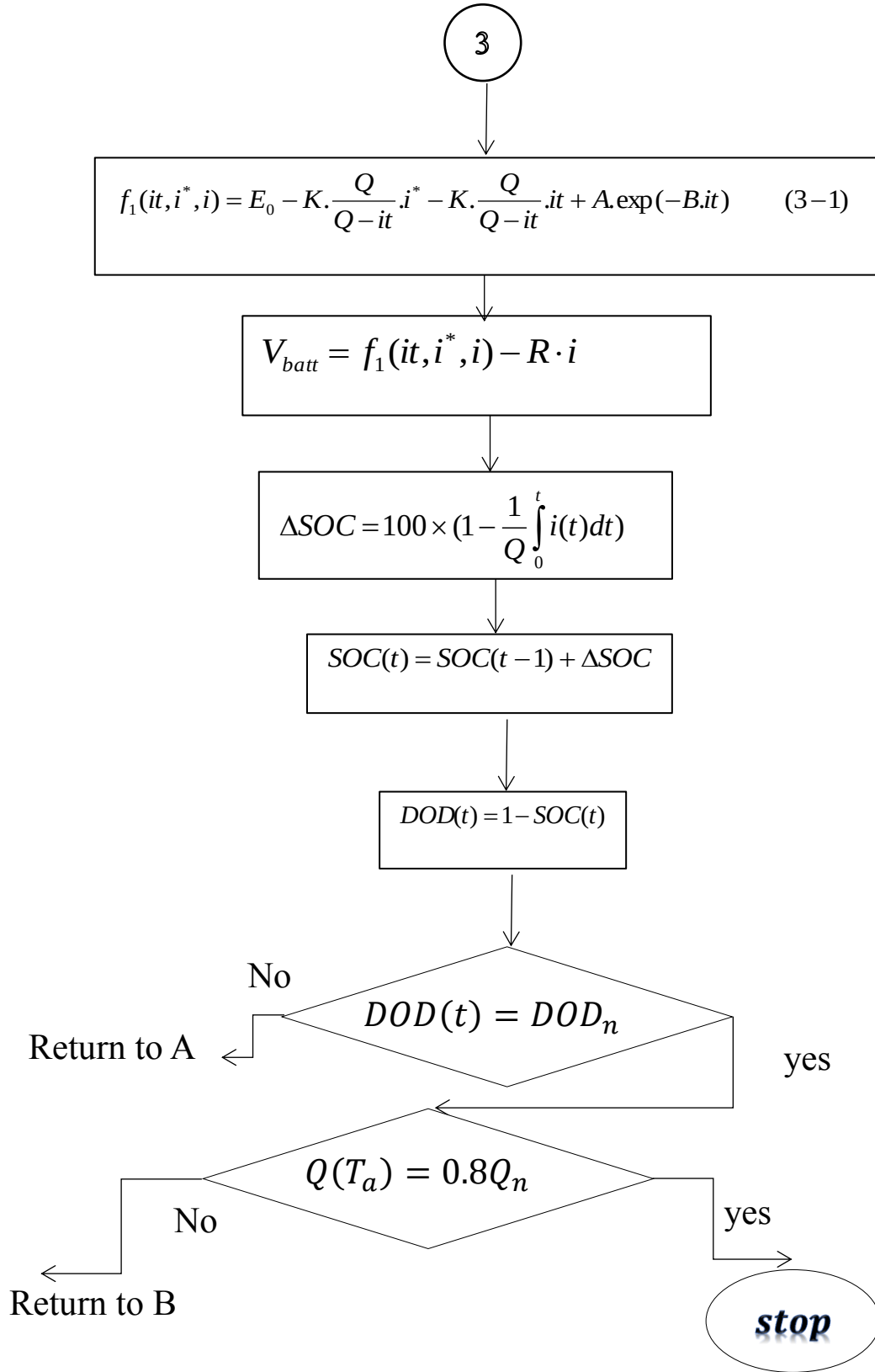
	$R(n) = R_{BOL} + \varepsilon(n) \cdot (R_{EOL} - R_{BQL})$	المقاومة الداخلية للمدخرة عند دورة الشحن والتفريغ رقم n
	$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right)$	معامل تقادم المدخرة
$\psi = \frac{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})}{\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)}} = 1.3$ $\xi = \frac{\ln(DOD(n))}{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})} = 2.41$ $\gamma_1 = \frac{\ln(\frac{I_{dis_ave}(n)}{I_{dis_ref}})}{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})} = 2.26$ $\gamma_2 = \frac{\ln(\frac{I_{ch_ave}(n)}{I_{ch_ref}})}{\ln(\frac{N_{Cref}}{N_C(n)})} = 2.26$	$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\varepsilon} \cdot \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) \cdot (I_{dis_ave}(n))^{-\gamma_1} \cdot (I_{ch_ave}(n))^{-\gamma_2}$	العدد الأعظمي لدورات الشحن والتفريغ

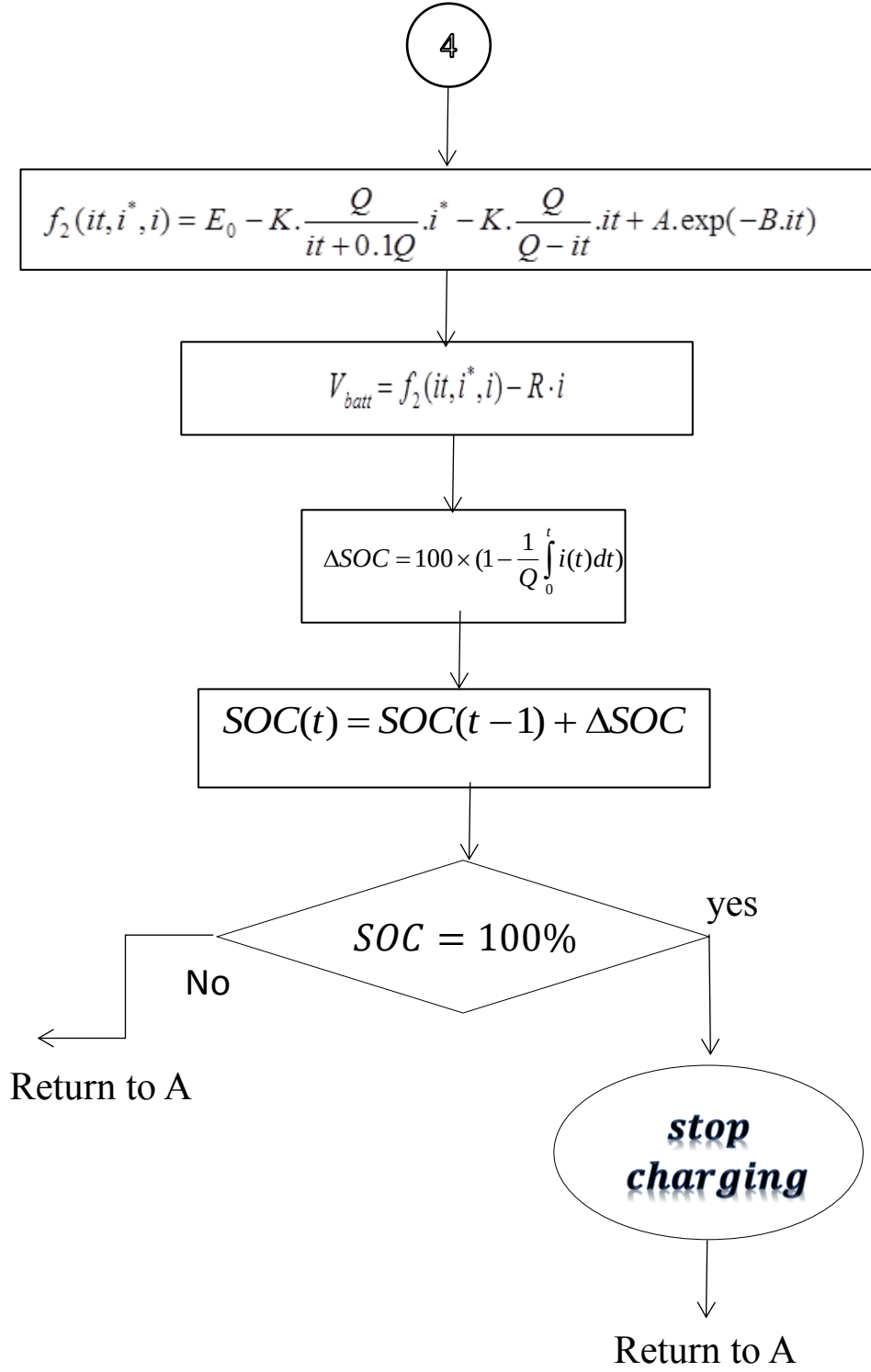
٣-٤-١ المخطط الصندوقي للنمذجة (Simulation Flow Chart)



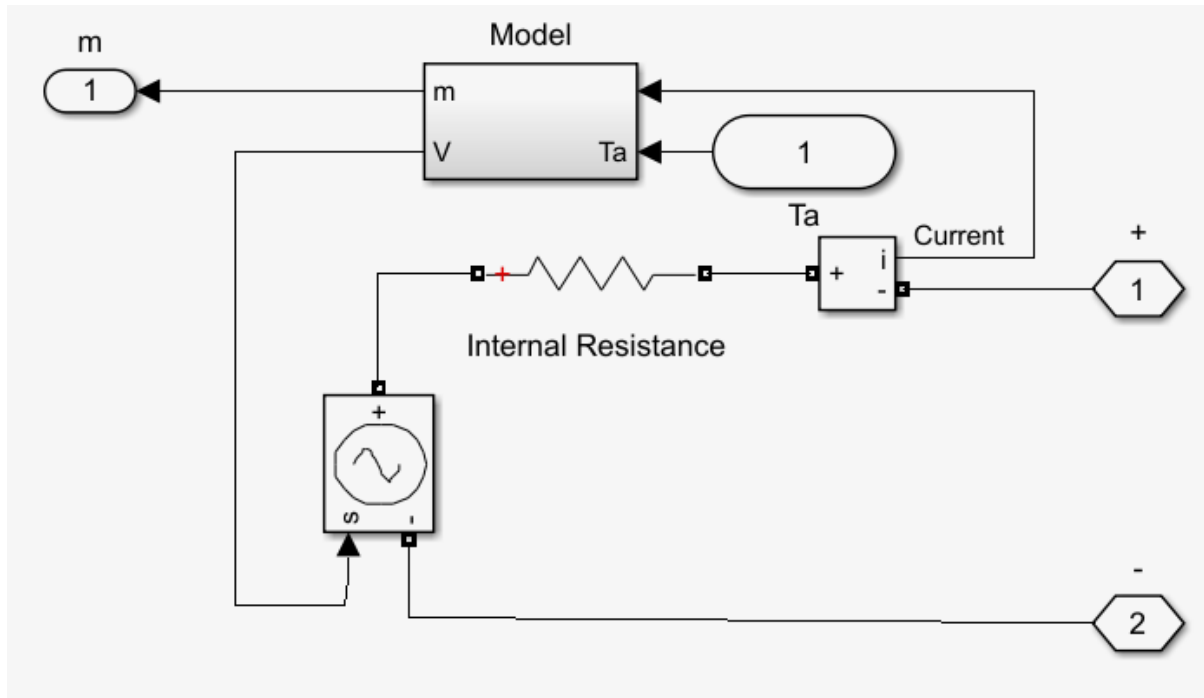








كما يبيّن الشكل التالي النموذج الكلي الذي تم استخدامه في برنامج ماتلاب لمحاكاة المعادلات الرياضية:



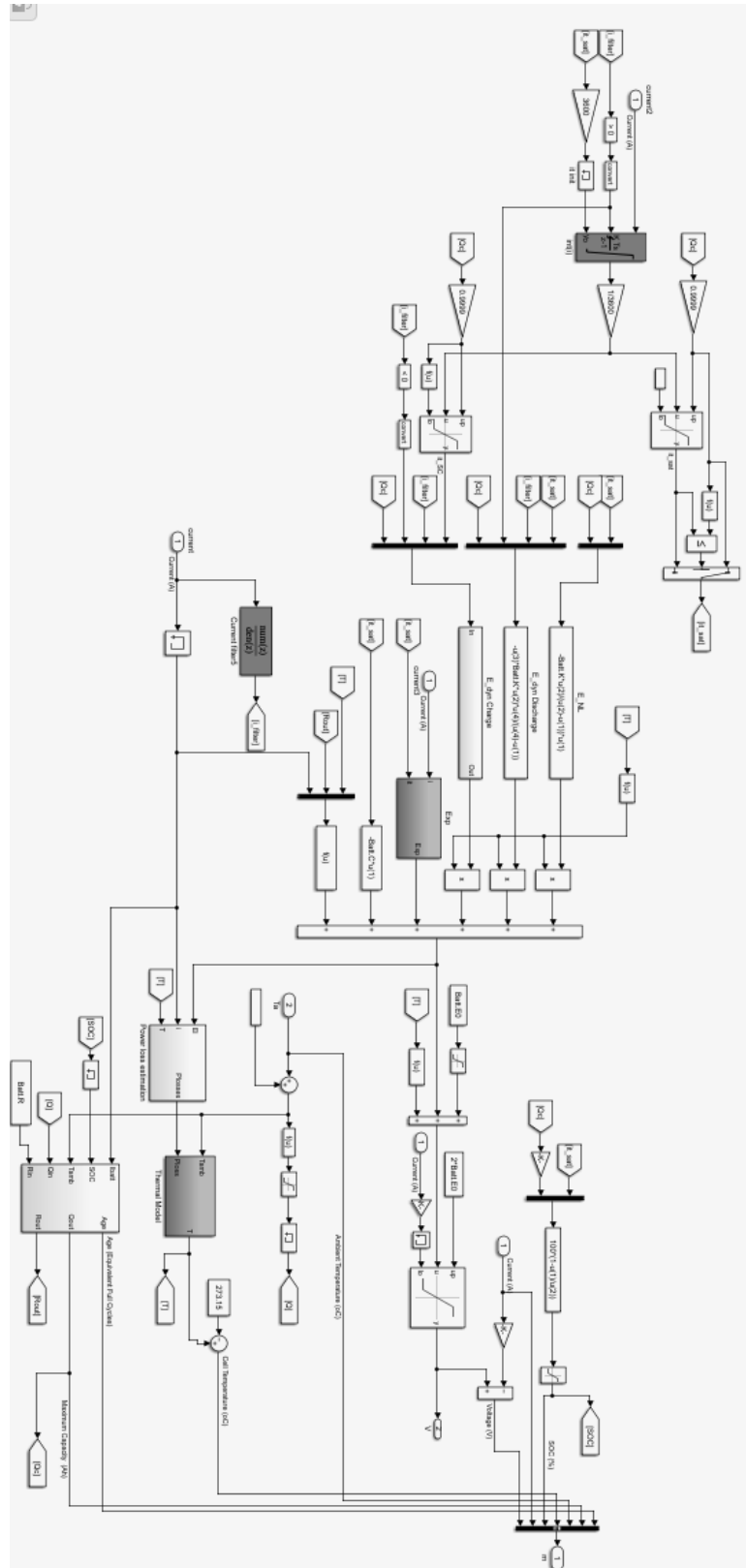
الشكل (٣-٩) النموذج العام المستخدم لمحاكاة المدخرة في برنامج ماتلاب

وهذا النموذج يتكون من مداخل هي القطب الموجب والسالب للمدخرة ودرجة حرارة الوسط الخارجي وتيار

وتوتر المدخرة ومخارج تعطي مجموعة من المحددات أهمها حالة شحنها ودرجة حرارتها ويحتوي Model

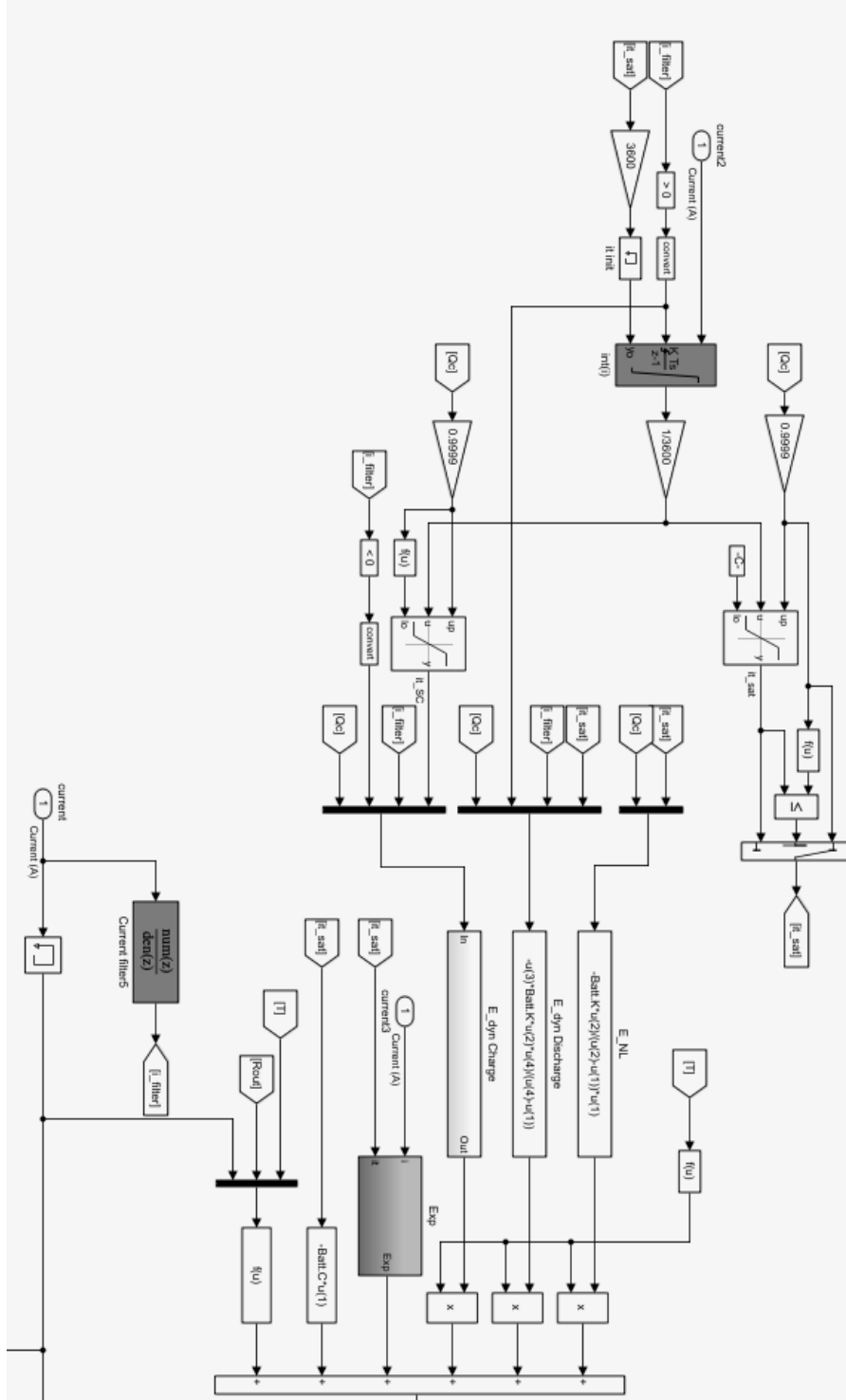
الموجود ضمن الشكل السابق على مجموعة من البلوكات التي تمثل سلوك المدخرة والشكل التالي يمثل

محتواه:

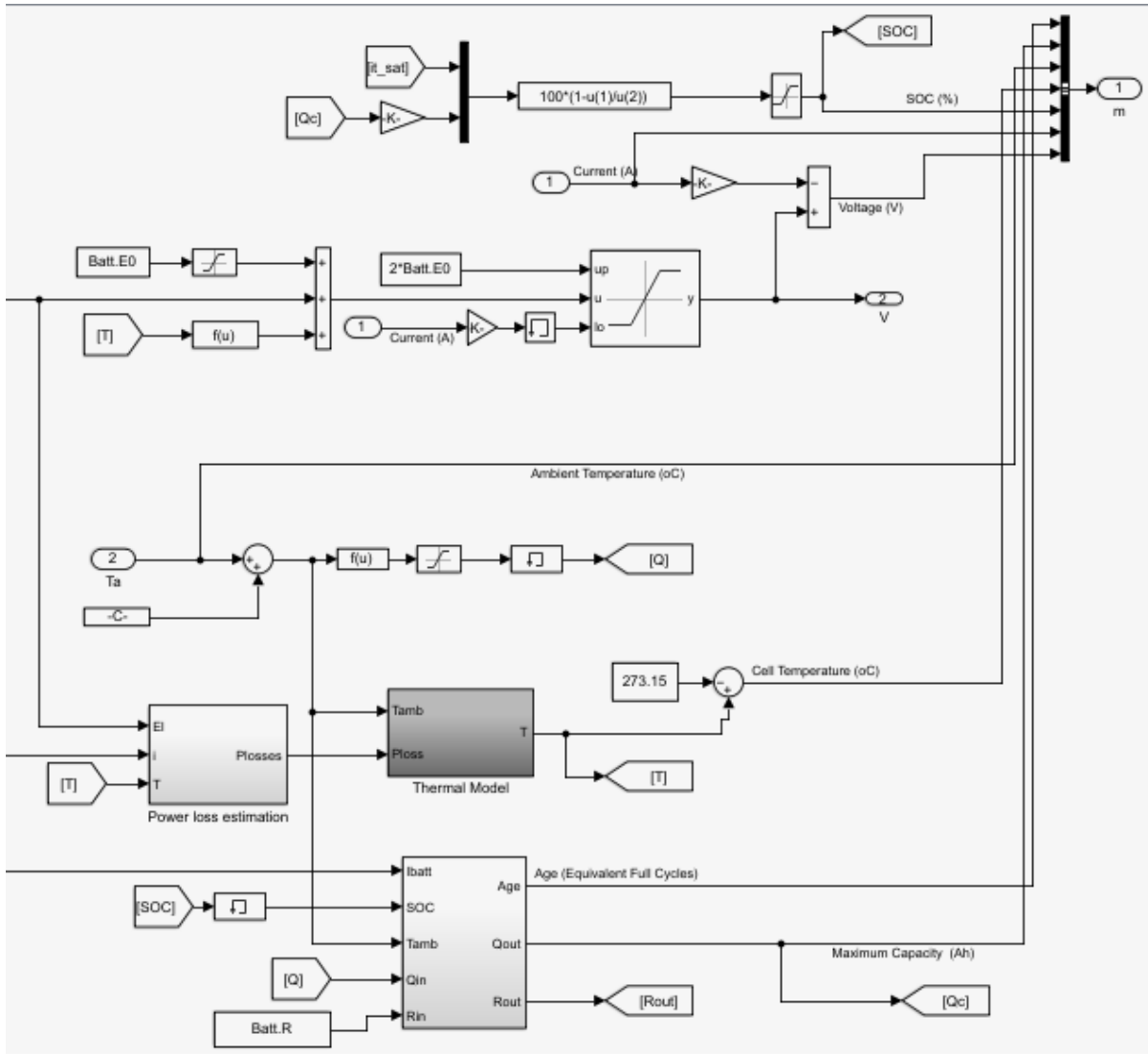


الشكل (٣-١٠) النموذج الموجود ضمن Model الموجود في الشكل السابق

يظهر الشكل السابق المخطط العام لمحاكاة معادلات المدخرة وتم تقسيمه إلى الشكلين التاليين للتوضيح:



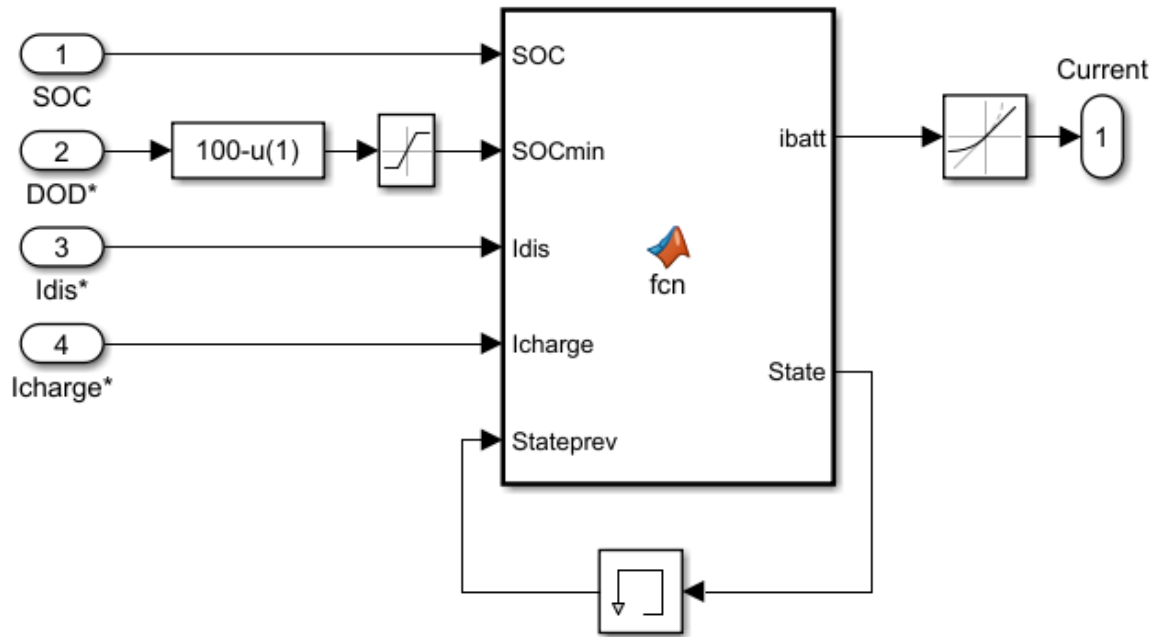
الشكل (٣-١١) الجزء الأول من المخطط العام لمحاكاة المدخرة



الشكل (٣-١٢) الجزء الثاني من المخطط العام لمحاكاة المدخرة

ولتعريف النموذج إذا كانت الحالة اللحظية شحن أو تفريغ اعتماداً على حالة الشحن وعمق التفريغ تم استخدام

النموذج التالي:



الشكل (٣-١٣) نموذج توليد تيار الشحن وتيار التفريغ

يحتوي النموذج السابق على بلوك (function) والذي يحتوي على الكود التالي الذي تمت كتابته في M.FILE

كمايلي:

```
function [ibatt,State] = fcn(SOC,SOCmin,Idis,Icharge,Stateprev)
%#codegen
State=Stateprev;
if(Stateprev==1 && SOC<=SOCmin)
    State=0;
end
if(Stateprev==0 && SOC>=99)
    State=1;
end
if (Stateprev==1)
    ibatt=Idis;
else
    ibatt=-Icharge;
end
```

الشكل (٣-١٤) كود m.file لتوليد تيار الشحن وتيار التفريغ

ولرسم المنحنيات الناتجة عن النماذج السابقة فقد تم استخدام البرنامج التالي الذي تمت كتابته على ملف

M.FILE ضمن برنامج ماتلاب:

```
plot(out.a(:,1),out.a(:,5),'bl-','LineWidth',1.5)
grid
hold on
plot(out.a(:,2),out.a(:,6),'r--','LineWidth',1.5)
plot(out.a(:,3),out.a(:,4),'gr','LineWidth',3)

title('Battery maximum capacity')
ylabel('Maximum Capacity(Ah)')
xlabel('Battery Age(cycles)')
legend('FAST','COOLED FAST','NORMAL')
```

الشكل (٣-١٥) كود m.file لرسم المنحنيات الناتجة عن النماذج السابقة

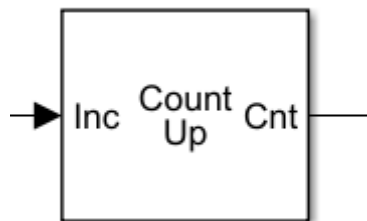
٣-٥ تعديل النموذج لحساب عدد دورات الشحن والتفريغ الفعلية (Model

(Modification to Calculate Actual Cycles

١- يتم قياس تيار المدخرة بشكل مستمر

٢- تم وضع عداد على خرج التيار

٤- يعد العداد دورة بعد كل دورة شحن وتفريغ



الشكل (٣-١٦) العداد المستخدم في برنامج ماتلاب لحساب دورات الشحن والتفريغ

٣-٦ تعديل النموذج لمراعاة تغير درجة الحرارة بين الشحن والتفريغ (Model

(Modification to Calculate Temp Differnce

١- لوحظ أثناء إظهار نتائج النمذجة أن درجة الحرارة تتناقص خلال التفريغ حتى لو كان تيار التفريغ عالياً

٢- بينت النتائج التجريبية أن درجة حرارة المدخرة تزداد إذا كان تيار التفريغ أكبر من التيار الاسمي للمدخرة.

٣- تم إضافة معامل حراري في معادلة حساب درجة حرارة المدخرة أثناء التفريغ بحيث يضيف قيمة 10

watt إلى المفاقيد الحرارية في معادلة حساب درجة الحرارة

٣-٧ نتائج نمذجة تأثير درجة الحرارة على عمر المدخرة (Simulation Results

(of Temp Effect On Battery Age

سنقوم بتصميم نموذج لدراسة تأثير درجة الحرارة على عمر المدخرة عبر برنامج ماتلاب:

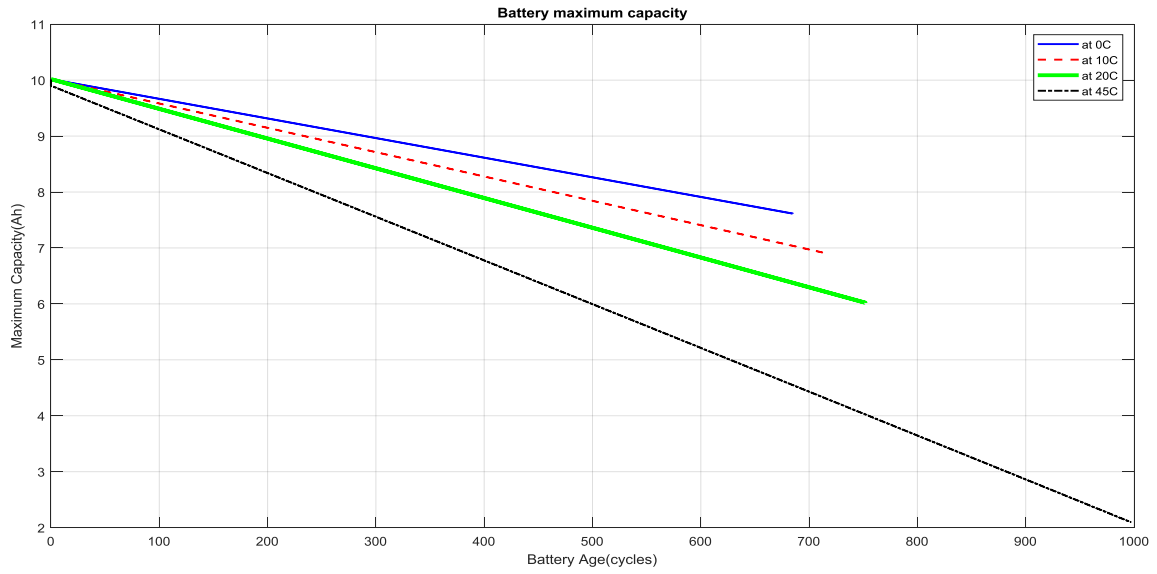
حيث قمنا بالشحن والتفريغ المتكرر للمدخرة المذكورة بتيار شحن ثابت يساوي 2[A] وتيار تفريغ ثابت يساوي

2[A] عند درجات حرارة مختلفة $(0 - 10 - 20 - 45) ^\circ C$ بشكل متكرر حتى الوصول إلى 80% من السعة

الاسمية الابتدائية.

ويرسم العلاقة بين السعة الأعظمية المفرغة من المدخرة وعمر المدخرة (عدد دورات الشحن والتفريغ الفعلية) نجد

الشكل التالي:



الشكل (٣-١٧) العلاقة بين السعة الأعظمية المفرغة من المدخرة وعمر المدخرة عند درجات حرارة مختلفة

ويظهر من الشكل السابق أنه كلما ارتفعت درجة حرارة المدخرة تقادمت بشكل أسرع أي نقصت السعة الأعظمية المفرغة منها بشكل أسرع، وبما أن عمر المدخرة يُعرف بأنه عدد دورات الشحن والتفريغ الكاملة قبل وصول سعة المدخرة الأعظمية إلى 80% من السعة الاسمية الابتدائية فإن الجدول التالي يبين عمر المدخرة عند درجات الحرارة المختلفة:

الجدول (٣-٨) عمر المدخرة عند درجات الحرارة المختلفة

درجة الحرارة	عمر المدخرة (دورة)
0°C	574
10°C	463
20°C	371
45°C	241

من الجدول السابق يتضح أن لارتفاع الحرارة أثراً سلبياً على عمر المدخرة، وهذا الأمر يدفع مستخدم السيارة الكهربائية العاملة على طاقة هذه المدخرات إلى المحافظة على درجة حرارة المدخرة قريبة من درجة الحرارة الاسمية المذكورة في بيانات الشركة المصنعة، وفي حال ارتفاع حرارة الجو الخارجي يُنصح باستخدام وسائل لتبريد المدخرة من أجل الحفاظ على عمرها ومردودها.

٣-٨ نتائج نمذجة تأثير الشحن السريع على عمر المدخرة (Simulation Results)

: (of Fast Charging on Battery Age

لدراسة تأثير طرائق الشحن المختلفة على السعة التي يمكن تفريغها من المدخرة في بداية عمرها وعلى عمر المدخرة (عدد دورات الشحن والتفريغ التي تنجزها المدخرة قبل هبوط سعتها إلى 80 بالمئة من سعتها الاسمية الابتدائية) تم شحن المدخرة المذكورة بالطرائق والمواصفات التالية:

١- CV: الشحن بتوتر ثابت قيمته $13.7[V]$.

٢- CC: الشحن بتيار ثابت قيمته $14[A]$.

٣- CC-CV: الشحن بتيار ثابت قيمته $13.9[A]$ وبعد ذلك توتر ثابت قيمته $15[A]$.

٤- CP-CV: الشحن باستطاعة ثابتة $190[W]$ (حيث يبقى جداء التيار والتوتر ثابتاً) وبعدها توتر ثابت

قيمته $13.9[V]$.

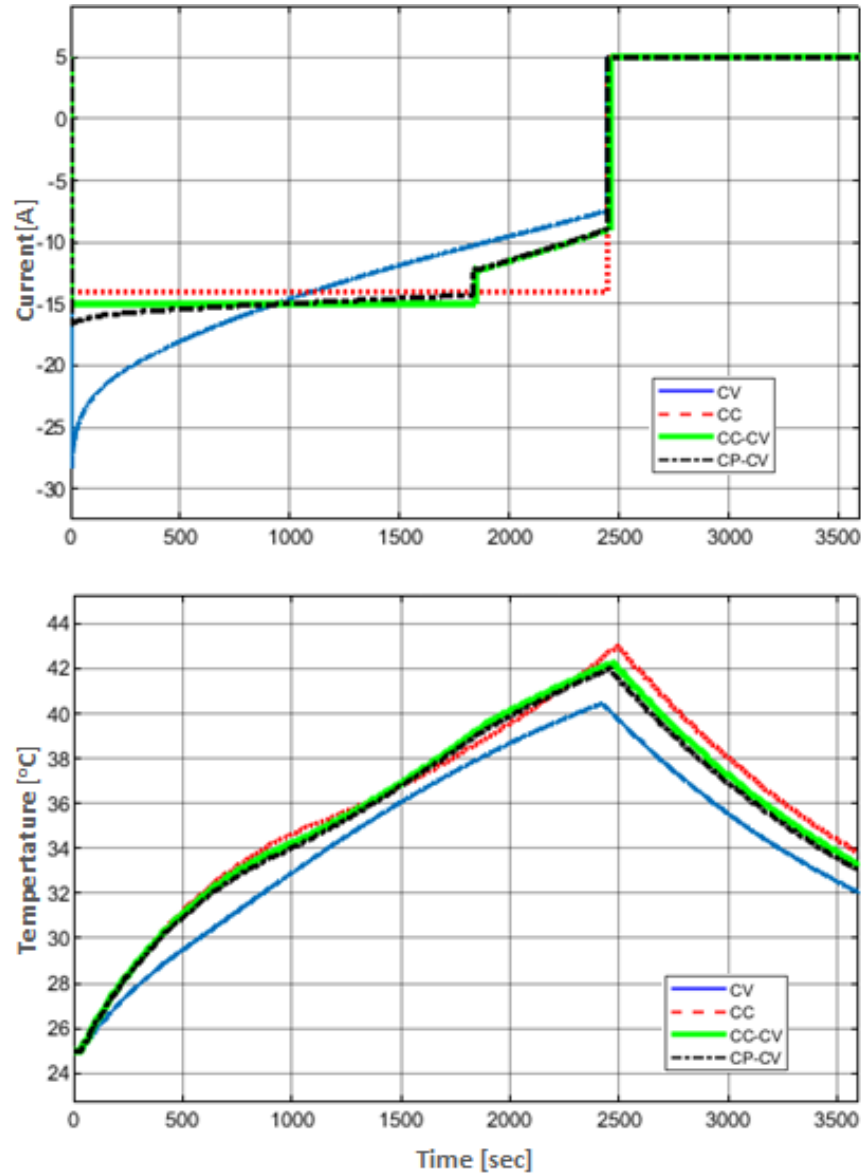
تم اختيار قيم تيارات وتوترات الشحن في الحالات الأربعة بحيث تكون فترة الشحن متساوية في جميع

الحالات وذلك للمقارنة بين طرائق الشحن المختلفة عند تساوي أزمنة الشحن (سرعة الشحن)

بينما تم تفريغها في جميع الحالات السابقة بتيار قدره $5[A]$. يظهر الشكلان التاليان أثر طريقة الشحن على

تغير درجة حرارة المدخرة حيث يبين الشكل العلوي تغير تيار الشحن عبر الزمن والشكل السفلي تغير درجة

الحرارة مع الزمن في نفس فترة الشحن وذلك لطرائق الشحن المذكورة سابقاً:



الشكل (٣-١٨) تغير درجة حرارة المدخرة أثناء الشحن بطرائق مختلفة

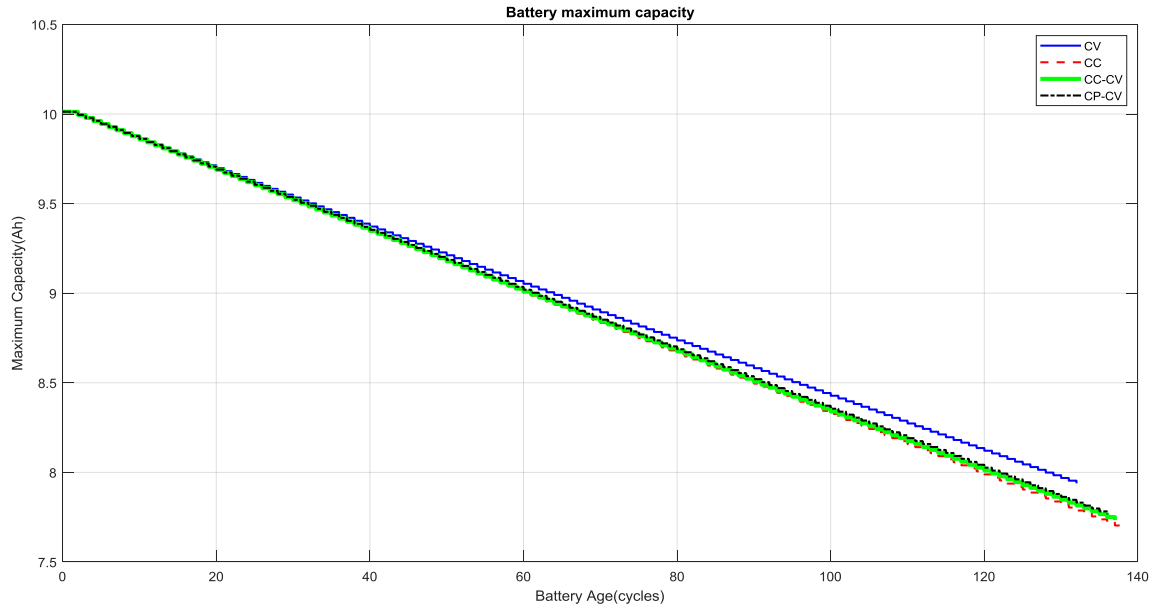
تبين من الشكل السابق أن تغيير طريقة الشحن المتبعة أدى إلى تغيير درجة حرارة المدخرة كمايلي:

الجدول (٣-٩) درجات حرارة المدخرة عند طرائق الشحن المختلفة

طريقة الشحن المتبعة	درجة الحرارة العظمى للمدخرة [°C]
CV	40.5

43	CC
42.2	CC-CV
42	CP-CV

يوضح الجدول السابق أن أقل درجة حرارة كانت عند تطبيق طريقة الشحن بتوتر ثابت CV. ومن المعلوم أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة كلما ازداد أثرها السلبي على عمر المدخرة، ولتوضيح هذا الأثر قمنا بمحاكاة شحن وتفريغ المدخرة حتى انتهاء عمرها (عندما تصبح ساعة المدخرة مساوية ل ٨٠% من سعتها الاسمية الابتدائية) حيث يتم شحنها في كل مرة بطريقة من طرائق الشحن المذكورة سابقاً وتفريغها دوماً بتيار تفريغ ثابت قيمته [A]5 كما في الشكل التالي:



الشكل (٣-١٩) تناقص ساعة المدخرة مع دورات الشحن والتفريغ عند الشحن بطرائق مختلفة

من الشكلين السابقين (٣-١١) و (٣-١٢) نجد أن عمر المدخرة قد تغير بتغير طريقة الشحن مع توحيد طريقة وتيار التفريغ والجدول التالي يوضح عمر المدخرة في كل حالة من حالات الشحن المذكورة آنفاً:

الجدول (٣-١٠) عمر المدخرة عند طرائق الشحن المختلفة

طريقة الشحن المتبعة	عمر المدخرة (Cycle)
CV	129
CC	119
CC-CV	121
CP-CV	123

من الجدول السابق تبين أن الطريقة الأفضل في الشحن والتي تحافظ على عمر المدخرة هي طريقة الشحن بتوتر ثابت CV وذلك لأنها تحافظ على أقل درجة حرارة للمدخرة بين الطرائق السابقة.

٣-٩ نتائج نمذجة تأثير التبريد أثناء الشحن السريع على عمر المدخرة (Simulation)

:(Results of Cooling During Fast Charging on Battery Age

بما أن ارتفاع درجة حرارة المدخرة يعتبر عاملاً مهماً وأساسياً في استهلاك عمرها بشكلٍ أسرع، كان حرياً بنا أن نبحث عن طريقة للتخفيف من هذه الحرارة وذلك عن طريق تبريدها بأي طريقة متاحة. لذلك تم تصميم النموذج التالي لمقارنة سعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ عند نفس شروط الشحن والتفريغ السابقة في حالاتٍ ثلاث:

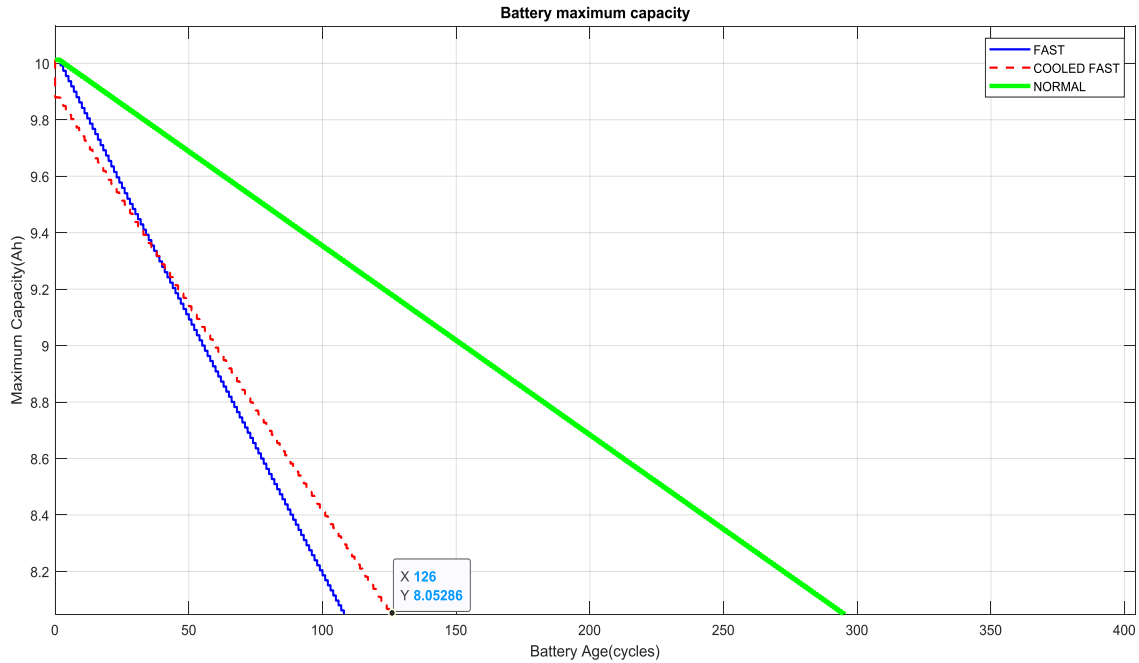
١- عند الشحن الطبيعي بتيار ثابت 1.2A

٢- عند الشحن السريع بتوتر ثابت [A] 14.1 مع تبريد بتخفيض درجة حرارة الوسط المحيط بالمدخرة من 25

إلى 15 درجة مئوية

٣- عند الشحن السريع بتوتر ثابت [A] 14.1 بدون تبريد

ويظهر الشكل التالي تغير سعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في الحالات الثلاث السابقة:



الشكل (٣-٢) مقارنة سعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ بين الشحن الطبيعي والشحن السريع مع

وبدون تبريد

والجدول التالي يبين عمر المدخرة في الحالات الثلاث السابقة:

الجدول (٣-١) عمر المدخرة عند الشحن السريع مع وبدون تبريد

طريقة الشحن المتبعة	عمر المدخرة
NORMAL	294
COOLED FAST	126
FAST	108

من الجدول السابق تبين أن الشحن السريع أدى إلى تناقص عمر المدخرة وكان التبريد بمقدار ١٠ درجات عاملاً

مهماً لزيادة عمر المدخرة وذلك بنسبة حوالي ١٦ بالمئة.

تم في هذا البحث استخراج البيانات المطلوبة لنمذجة الخلية المطلوبة انطلاقاً من منحنيات التفريغ لها المأخوذة من بيانات المصنع عند التفريغ بتيارات مختلفة وعند درجات حرارة متعددة، واستنتاج البيانات المطلوبة لنمذجة المدخرة المكونة من ٣ خلايا اعتماداً على بيانات الخلية الواحدة، كما تم فيه بيان النموذج الذي تم تصميمه باستخدام برنامج ماتلاب والذي يعتمد النموذج الرياضي للمدخرة والذي تم استنتاجه في الفصل الثاني، وأظهرت النتائج تأثير تغير درجات الحرارة على عمر المدخرة حيث يزداد عمرها بانخفاض درجة الحرارة وتأثير طرائق الشحن المختلفة على عمر المدخرة ، كما بينا في النتائج مقدار التحسن في عمر المدخرة عند تبريدها أثناء الشحن السريع.

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

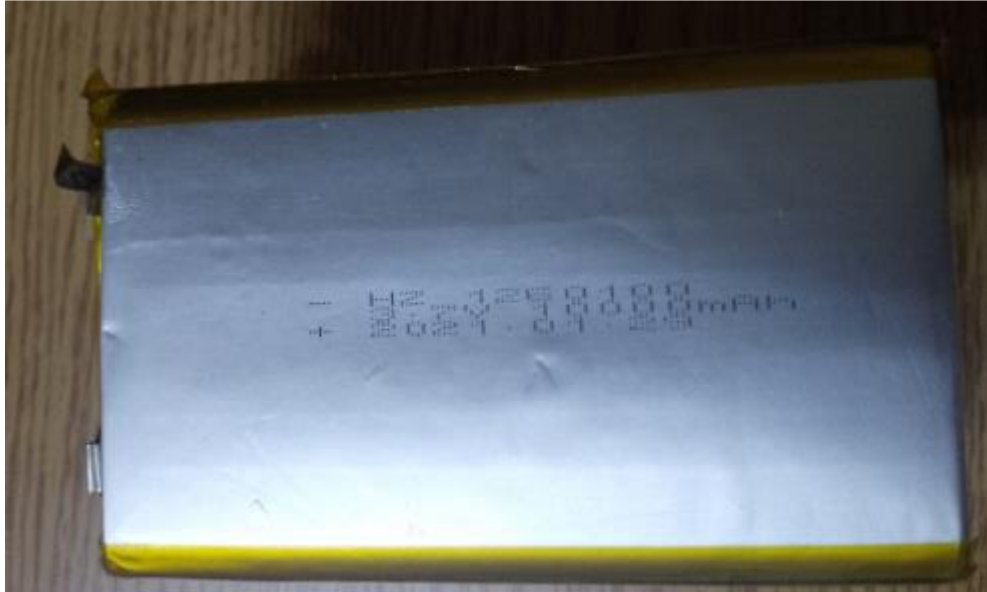
عبدالواسط خالد شباط

الفصل الرابع: الإجراء التجريبي

للتحقق من صحة نتائج النمذجة التي تم استنتاجها في الفصل السابق، ولتوضيح تأثير الشحن السريع والتبريد أثناء الشحن السريع على مدخرات شوارد الليثيوم، قمنا في هذا الفصل بإجراء مجموعة من التجارب العملية، وتفصيل التجهيزات المستخدمة فيها، وإظهار نتائج هذه التجارب وتصدير النتائج إلى الحاسب، ورسم المنحنيات البيانية لدرجة حرارة وعمر المدخرة عبر الزمن في حالة الشحن الطبيعي وحالة الشحن السريع وحالة الشحن السريع مع تبريد.

٤-١ التجهيزات المستخدمة (Used Equipments):

١- تسع خلايا من نوع ليثيوم بوليمير بسعة اسمية 10000mAh وتوتر اسمي 3.7V يتم وصل كل ثلاث خلايا منها على التسلسل للحصول على مدخرة بسعة 10000mAh وتوتر اسمي 11.1V. ويوضح الشكل التالي صورة للخلية المدروسة:



الشكل (٤-١) الخلية المدروسة

٢- حمل أومي مكون من ٣ مقاومات كل مقاومة بقيمة 2.2 أوم يتم وصلها بشكل تفرعي

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

عبدالواسط خالد شباط



الشكل (٢-٤) الحمل الأومي المستخدم

٣- مقياس حرارة مزود بمجس:



الشكل (٣-٤) مقياس الحرارة المستخدم

٤- مقياس أمبير + فولط



الشكل (٤-٤) مقياس التوتر والتيار المستخدم

- ١- إنفيرتر شمسي من نوع (marvel) يحتوي على شاحن يمكن تغيير تيار الشحن فيه ومزود بكرة اتصال BMS للوصل مع الحاسب سلكياً ومع الأجهزة المحمولة عن طريق WIFI.



الشكل (٤-٥) الإنفيرتر المستخدم

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

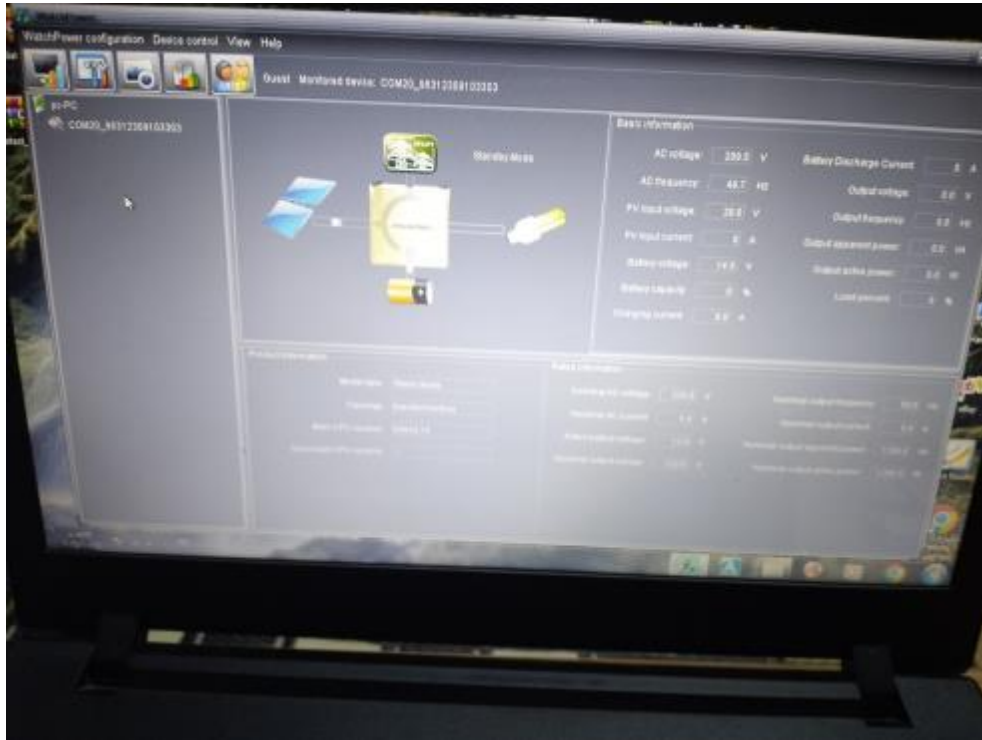
عبدالباسط خالد شباط

٥- قواطع كهربائية

٦- أسلاك توصيل

٧- حاسب شخصي

٨- برنامج WATCHPOWER



الشكل (٤-٦) برنامج watchpower

٩- وصلة USB-RS232 + وصلة LAN-RS232:

١٠- مقياس سرعة تدفق الهواء:



الشكل (٧-٤) مقياس سرعة تدفق الهواء

٢-٤ خطوات التجربة (Experiment steps):

تتكون التجربة من ثلاث حالات يتم تطبيق كل حالة على واحدة من المدخرات المكونة من الخلايا المذكورة:

١- يتم شحن المدخرة بتيار طبيعي قيمته 1.2A

٢- يتم شحن المدخرة شحناً سريعاً بتوتر ثابت قيمته 14.1 V حيث يصل التيار في بداية فترة الشحن إلى

8.9A ويتناقص تدريجياً حتى الوصول إلى 4.6A

٣- يتم شحن المدخرة شحناً سريعاً بنفس الطريقة السابقة مع تبريدها

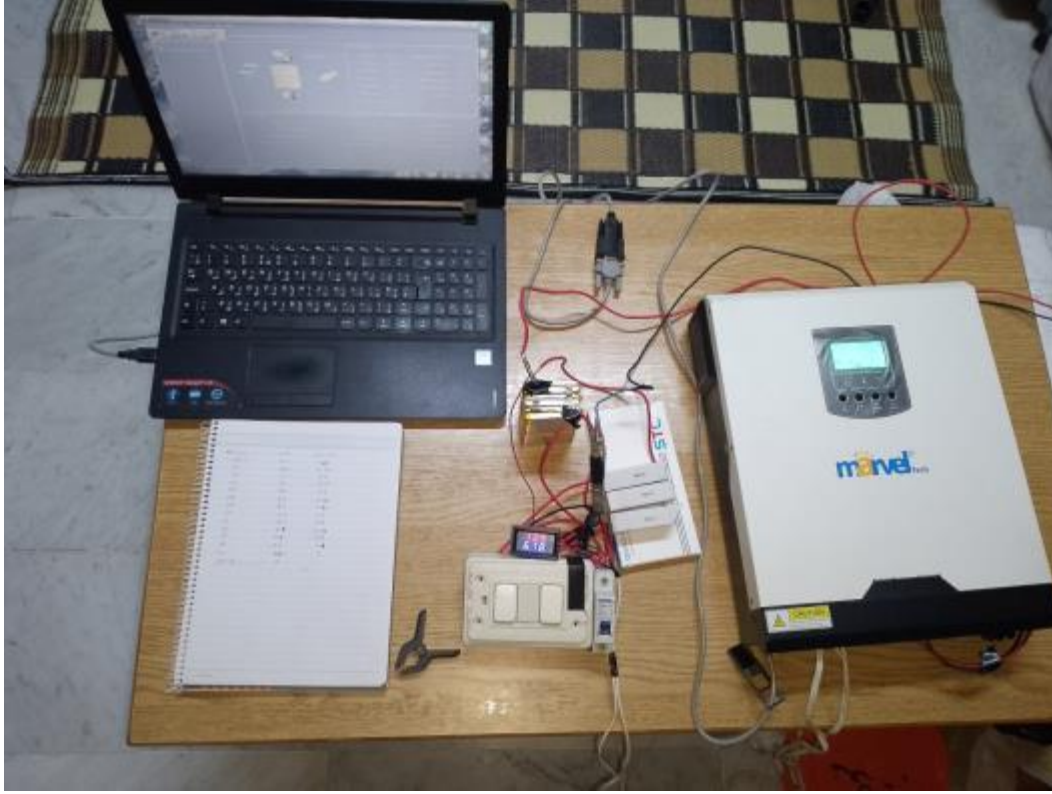
يتم تفريغ المدخرات المذكورة بنفس الطريقة بعد كل شحنة وذلك لملاحظة أثر سرعة الشحن والتبريد على

عمر المدخرة وتكون طريقة التفريغ عن طريق حمل أومي مكون من ٣ مقاومات موصولة على التفرع قيمة

كل منها 6.8 أوم وذلك من الشحن الكامل حتى الوصول إلى توتر 8V (توتر القطع المذكور من قبل

المصنع هو 9V وتم التفريغ إلى 8V لأن التيار التفريغ كبير ويشكل هبوط جهد أكبر).

ملاحظة: بعد كل شحن وكل تفريغ يتم ترك المدخرة فترة استراحة حتى تعود درجة حرارتها إلى 25°C.



الشكل (٨-٤) دائرة التجربة

تم تسجيل النتائج باستخدام برنامج watchpower على الكمبيوتر حيث تم ربط الإنفيرتر مع الكمبيوتر باستخدام وصلة (USB-RS232) ووصلة (LAN-RS232) كما يمكن مشاهدة النتائج على موقع www.dessmonitor.com الذي يسجل النتائج بشكل أوتوماتيكي للإنفيرترات التابعة لشركة VOLTRONIC والتي تحتوي كرت WIFI ، في الفترة من (٢٠٢٤/١٠/١٢) وحتى (٢٠٢٤/١٢/١)

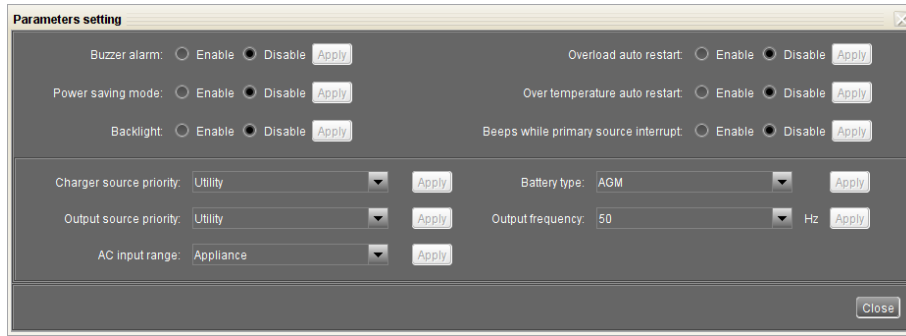
٣-٤ ميزات برنامج WATCHPOWER:

١- تحديد الفترة الزمنية التي يتم فيها تسجيل النتائج

٢- برمجة جميع قيم الإنفيرتر بما فيها تيار الشحن وتوتر الشحن ونوع المدخلة المستخدمة

تحسين أداء مدخرات شوارد الليثيوم أثناء الشحن السريع

عبدالباسط خالد شباط



الشكل (٩-٤) واجهة ضبط القيم المرجعية للإنفيرتر في برنامج watchpower

٣- تسجيل جميع قيم المدخلة في حالة الشحن عبر الزمن وإمكانية تصديرها إلى برنامج إكسل.

Device mode	Time	AC voltage	AC frequency	PV input voltage	AC output asp	AC output asv	Battery voltage	Battery capacity	Charging curve	Output voltage	Output frequency
Standby Mode	207.7	49.5	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0
Standby Mode	207.8	49.4	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0
Standby Mode	207.5	49.2	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0
Standby Mode	208.4	49.3	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0
Standby Mode	208.6	49.3	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0
Standby Mode	208.1	49.4	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0
Standby Mode	208.3	49.4	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0	0.0	0.0	0.0

الشكل (١٠-٤) واجهة أرشفة قيم المتحولات في برنامج watchpower

ويوضح الشكل التالي موقع www.dessmonitor.com الذي يقوم بتسجيل جميع قيم الإنفيرترات التابعة

لشركة voltronic والتي تحتوي على شريحة واي فاي.

Timestamp	Grid Voltage(V)	Grid Frequency(Hz)	Battery Voltage(V)	Battery Capacity(%)	Battery Charging Current(A)	Battery Discharge Current(A)	Output Active Power(W)	Output L1
2024-11-25 22:55:45	211.4	49.3	34.1	95	5	0	0	
2024-11-25 22:50:50	211.1	48.8	34.1	95	5	0	0	
2024-11-25 22:46:55	211.1	49.3	34.2	95	5	0	0	
2024-11-25 22:40:55	210.9	49.0	34.2	95	5	0	0	
2024-11-25 22:35:59	210.8	49.5	34.2	95	6	0	0	
2024-11-25 22:31:01	210.7	49.8	34.2	95	7	0	0	
2024-11-25 22:26:05	210.5	49.1	33.6	0	0	0	0	
2024-11-25 20:20:46	211.1	49.0	34.1	95	5	0	0	
2024-11-25 20:15:45	211.1	49.1	34.1	95	5	0	0	
2024-11-25 20:10:46	210.9	48.9	34.1	95	6	0	0	
2024-11-25 20:05:44	209.5	49.0	34.1	95	6	0	0	
2024-11-25 20:00:43	209.5	49.4	34.1	95	7	0	0	
2024-11-25 19:55:42	209.5	48.9	34.1	95	7	0	0	
2024-11-25 19:50:42	209.6	48.8	33.0	0	0	0	0	

الشكل (٤-١١) موقع (dessmonitor) لتسجيل قيم المتحولات للإنفيرترات

٤-٤ طريقة التبريد (Cooling Method):

تم تجريب طريقتين للتبريد الطريقة الأولى تم فيها غمر المدخرة بالماء حيث كانت درجة حرارة الماء 23°C ودرجة حرارة الوسط الخارجي 25°C بحيث يصل مستوى الماء إلى منتصف المدخرة تقريباً وتم وضع مجس مقياس الحرارة في أعلى المدخرة لقياس درجة حرارتها (لم يتم تجريب التبريد المائي القسري لأن سعة المدخرة صغيرة وتشغيل مضخة لتدوير الماء سيستهلك نسبة جيدة من سعة المدخرة) كما في الشكل التالي:



الشكل (٤-١٢) التبريد المائي المستخدم

أما الطريقة الثانية فتم فيها تبريد المدخرة باستخدام مروحتين متوضعتين فوق بعضهما وينفثان الهواء من جانب المدخرة ليدخل بين الخلايا المدروسة استطاعة كل مروحة 1.2Watt وتكون زاوية دخول الهواء بين الخلايا تساوي الصفر أي أن شعاع سرعة الهواء موازي لسطح الخلايا الكبير كما في الشكل التالي:



الشكل (١٣-٤) التبريد الهوائي القسري المستخدم

كما تتراوح سرعة الهواء بين 1.35m/s و 1.55m/s وذلك حسب تغير توتر المدخرة خلال فترة الشحن كما في الشكلين التاليين:



الشكل (١٤-٤) قياس سرعة هواء التبريد عندما تكون المدخرة فارغة

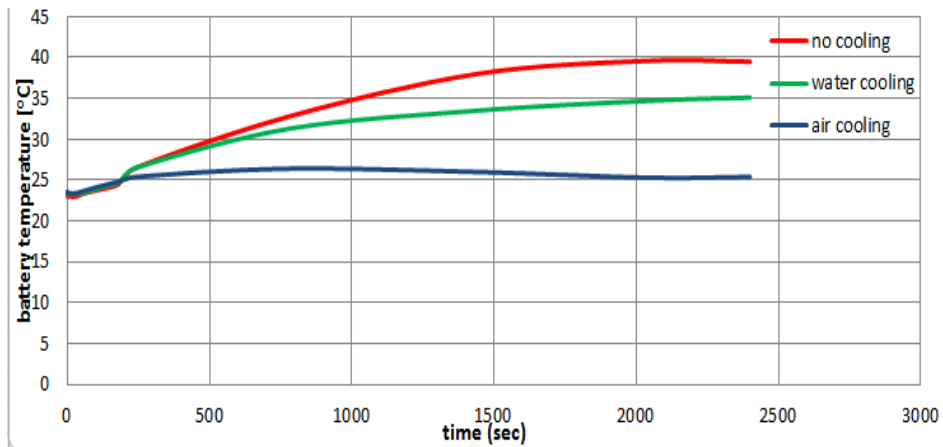


الشكل (٤-١٥) قياس سرعة هواء التبريد عندما تكون المدخرة ممتلئة

٤-٥ نتائج مقارنة طرائق التبريد (Cooling Methods Compare Results):

تم شحن المدخرة شحناً سريعاً بطريقة الشحن المذكورة (بتوتر ثابت قيمته 14.1 V حيث يصل التيار في بداية فترة الشحن إلى 8.9A ويتناقص تدريجياً حتى الوصول إلى 4.6A) مع تبريدها مرة تبريد مائي ومرة تبريد هوائي وتسجيل نتائج ارتفاع درجة حرارة المدخرة ومقارنتها مع حالة الشحن السريع بنفس الطريقة بدون تبريد كما في

الشكل التالي:



الشكل (٤-١٦) مقارنة تغير درجة حرارة المدخرة مع وبدون تبريد أثناء الشحن السريع

تبيّن من الشكل السابق أن درجة حرارة المدخرة ارتفعت أثناء الشحن السريع بدون تبريد بمقدار 17 درجة مئوية (حيث بدأنا عند درجة حرارة 23 ووصلت درجة الحرارة إلى 40 في آخر التجربة) مقابل 12 درجة عند التبريد المائي و 5 درجات فقط عند التبريد الهوائي وبالتالي سيتم اعتماد التبريد الهوائي القسري أثناء تجارب التبريد لأنها الأكثر فعالية.

الجدول (٤-١) مقارنة درجة الحرارة لطرائق التبريد

طريقة التبريد	تبريد هوائي	تبريد مائي	بدون تبريد
درجة الحرارة العظمى	28°C	35°C	40°C

٤-٦ حساب القيم الابتدائية للمدخرة تجريبياً (The Initial Values Calculaion Experimentally):

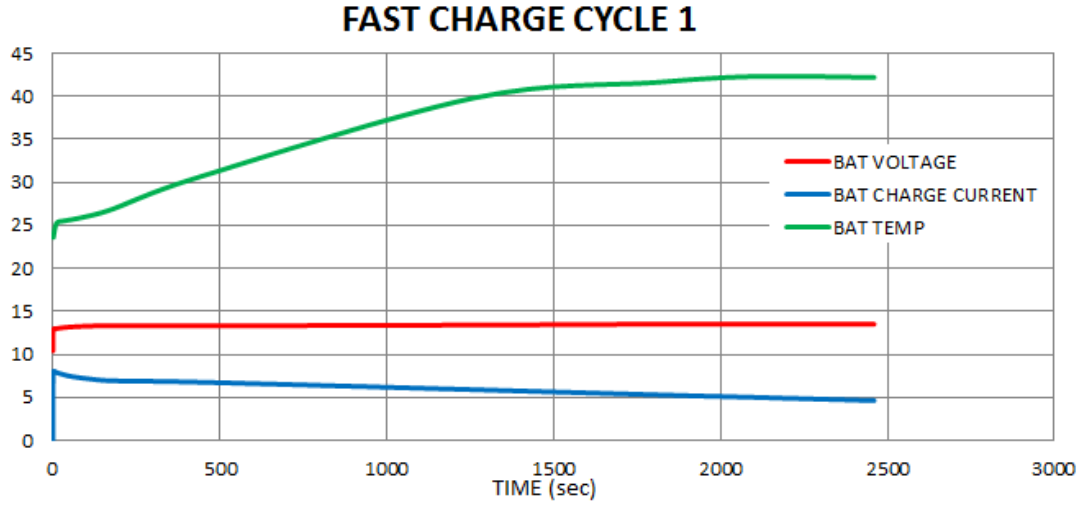
٤-٦-١ حساب المقاومة الحرارية للمدخرة تجريبياً (Battery Thermal Resistance Experimentally Calculation):

مقاومة انتقال الحرارة من الخلية إلى الوسط الخارجي: وتساوي تغير درجة الحرارة للمدخرة مقسوماً على كمية

الحرارة المنقولة أثناء هذا التغير: (Mousavi, M., 2011). ولحساب المقاومة الحرارية تجريبياً يتم اتباع

الخطوات التالية:

١- يتم شحن المدخرة شحناً سريعاً بدون تبريد كما في الشكل التالي:



الشكل (١٧-٤) منحنى شحن المدخرة وتغير درجة حرارتها خلال الشحن

٢- يتم قياس درجة حرارة المدخرة قبل وبعد الشحن وحساب الفرق الحاصل أثناء عملية الشحن فيكون

$$\Delta T = 18.6 [C] \quad (4-1)$$

٣- يتم حساب الاستطاعة المحقونة في المدخرة أثناء عملية الشحن والتي تساوي جداء القيمة الوسطية للتيار بالقيمة الوسطية للتوتر:

$$Q = V \times I = 6.6 \times 13.3 = 87.78 [Watt] \quad (4-2)$$

٤- يتم حساب المقاومة الحرارية بقسمة تغير درجة الحرارة على كمية الحرارة المنقولة أثناء هذا التغير وفق

العلاقة التالية:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{18.6}{87.78} = 0.2 [C/W] \quad (4-3)$$

٤-٦-٢ حساب الثابت الزمني الحراري للمدخرة تجريبياً (Battery Time Constant Experimentally)
:(Calculation)

الثابت الزمني الحراري هو الزمن اللازم لوصول حرارة المدخرة إلى 63.21% من الحرارة الابتدائية عند

تبريدها بالهواء الخارجي

(MECH CONTENT. *Thermal time constant in heat transfer*.2022)

تم رفع درجة حرارة المدخرة عن طريق الشحن إلى 40.3 درجة مئوية وقياس الزمن اللازم لانخفاض درجة

حرارتها إلى 25.47 مئوية بدون تبريد خارجي حيث استغرقت مدة 29 دقيقة و 38 ثانية وهي تعادل:

$$t_c = 1778[\text{sec}] \quad (4 - 4)$$



الشكل (٤-١٨) حساب الثابت الزمني الحراري تجريبياً

٤-٦-٣ حساب المقاومة الداخلية للمدخرة تجريبياً (Battery Internal Resistance) :(Experimentally Calculation)

١- يتم قياس توتر الدارة المفتوحة للمدخرة

٢- يتم تحميل المدخرة بحمل 2.2 أوم والذي يعادل تيار حوالي 5[A]

٣- يتم قياس توتر المدخرة بعد التحميل و تيار الحمل

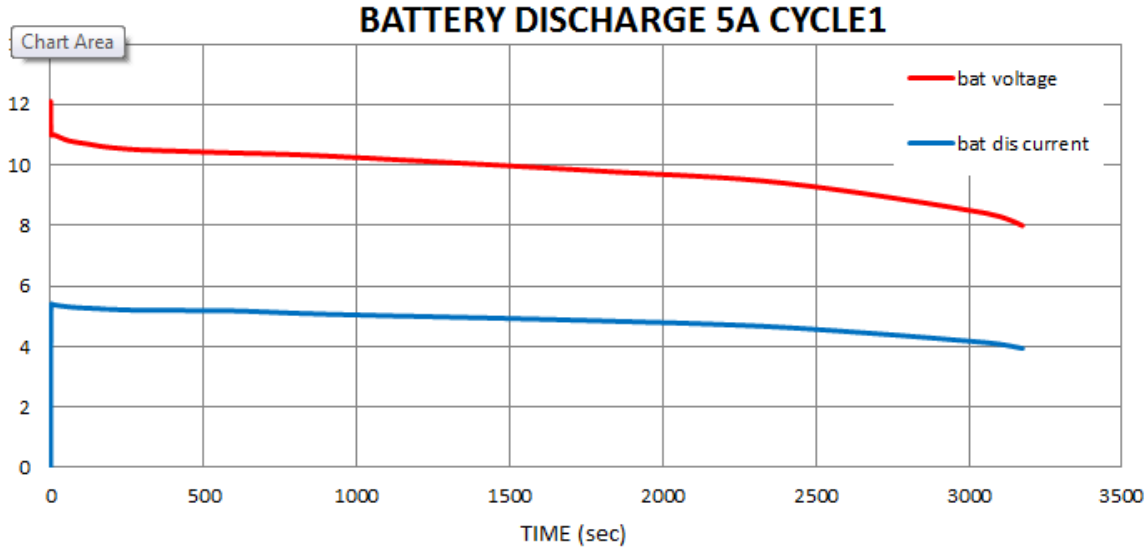
٥- يتم حساب المقاومة الداخلية للمدخرة من العلاقة التالية:

$$R_i = \frac{V_{OC} - V}{I_{dis}} = \frac{12.1 - 11}{5.39} = 0.2\Omega \quad (4-5)$$

٤-٦-٤ حساب السعة الابتدائية للمدخرة تجريبياً (Battery Initial Capacity Experimentally)
:(Calculation

١- يتم تفريغ المدخرة عن طريق (حمل 2.2 أوم والذي يعادل تيار حوالي 5[A)

يظهر الشكل التالي منحنى التفريغ للمدخرة عند تحميلها بالحمل المذكور



الشكل (١٩-٤) منحنى التفريغ للمدخرة تجريبياً

٢- يتم حساب متوسط تيار التفريغ

$$I_{dis-ave} = 5[Ah] \quad (4-6)$$

٣- من الشكل السابق تبين أن زمن التفريغ:

$$\Delta t = 3175[sec] = \frac{3175}{3600} = 0.88[h] \quad (4-7)$$

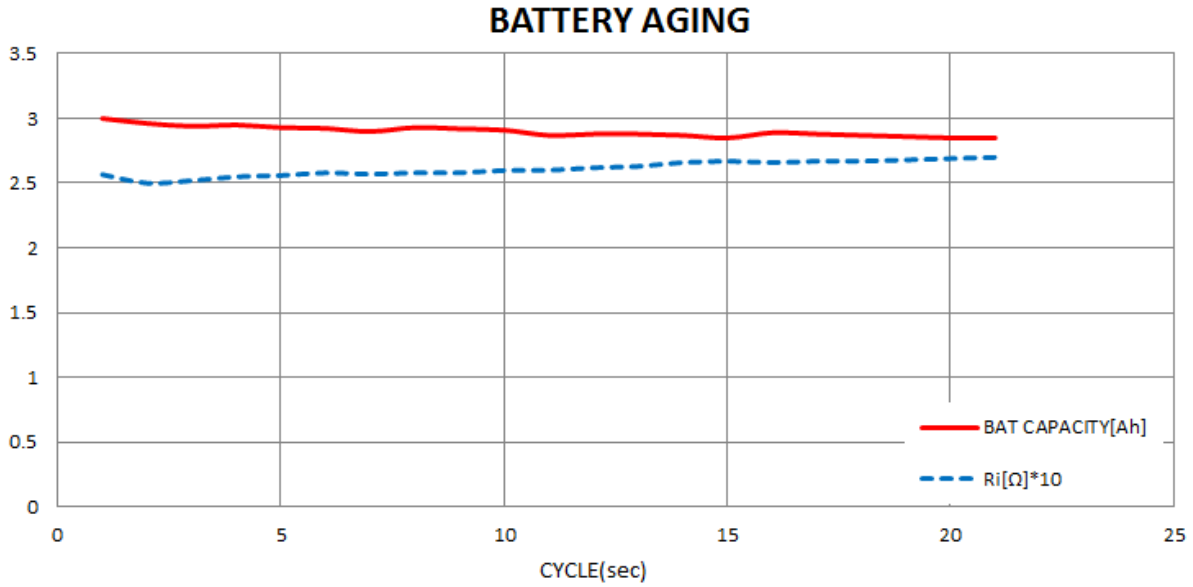
٤- يتم حساب جداء متوسط تيار التفريغ في زمن التفريغ لنحصل على السعة الابتدائية للمدخرة كما في

العلاقة التالية:

$$Q_i = 5 \times 0.88 = 4.259[Ah] \quad (4-8)$$

٧-٤ تغير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن الطبيعي (Change In Capacity) (And Internal Resistance During Normal Charging):

يتم شحن المدخرة بتيار طبيعي قيمته 1.2A وتفرغها عن طريق حمل أومي قيمته 2.2 أوم وتكرار هذه التجربة 21 مرة . ويظهر الشكل التالي كل من سعة المدخرة ومقاومتها الداخلية بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ.



الشكل (٢٠-٤) تغير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن الطبيعي

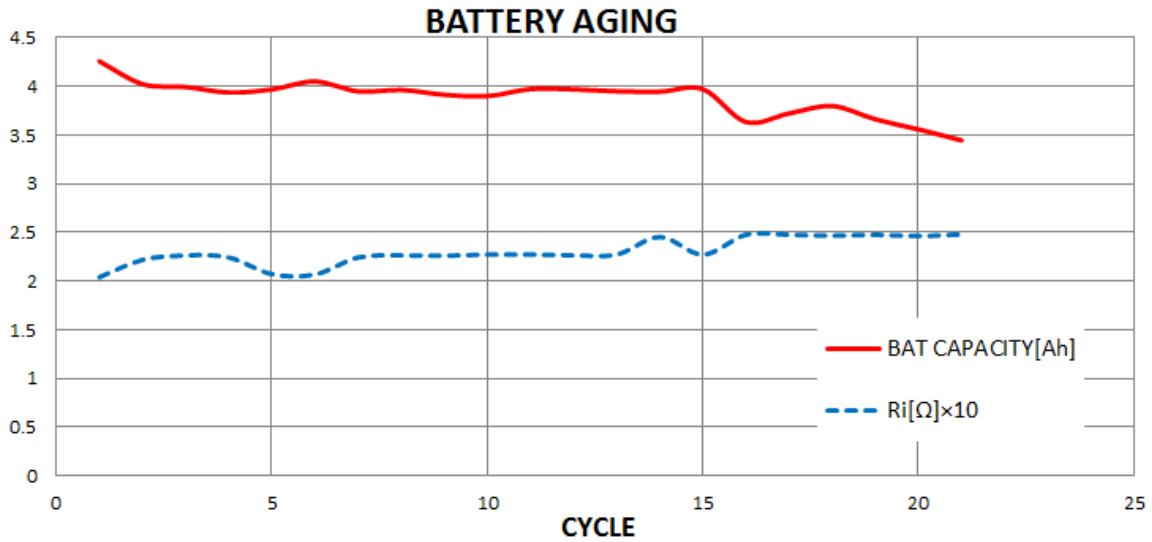
يمثل المنحني بالخط المستمر سعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ والمنحني بالخط المتقطع المقاومة الداخلية للمدخرة مضروبة ب 10 وذلك لإظهارها مع السعة على نفس الشكل.

تبين أن الخلايا المستخدمة في تشكيل المدخرة لم تعط سعتها الفعلية في بداية دورات الشحن والتفريغ لها وذلك بسبب سوء التصنيع وطول فترة التخزين لذلك تم اعتبار السعة في أول دورة شحن وتفرغ هي السعة الابتدائية.

نلاحظ من الشكل السابق انخفاض سعة المدخرة لتصبح 0.95 من السعة الابتدائية وارتفاع المقاومة الداخلية للمدخرة لتصبح 1.05 من المقاومة الداخلية الابتدائية وذلك خلال 21 دورة شحن وتفريغ.

٤-٨ تغير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن السريع (Change In Capacity And Internal Resistance During Fast Charging):

يتم شحن المدخرة شحناً سريعاً بتوتر ثابت قيمته 14.1 V حيث يصل التيار في بداية فترة الشحن إلى 8.9A ويتناقص تدريجياً حتى الوصول إلى 4.6A، وتفريغها عن طريق حمل أومي قيمته 2.2 أوم وتكرار هذه التجربة 21 مرة (بعد كل فترة شحن يتم الانتظار حتى هبوط درجة حرارة المدخرة إلى 20C وبعد كل فترة تفريغ يتم الانتظار حتى هبوط درجة حرارة المدخرة إلى 20C) ويظهر الشكل التالي كل من سعة المدخرة ومقاومتها الداخلية بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ.



الشكل (٤-٢١) تغير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن السريع

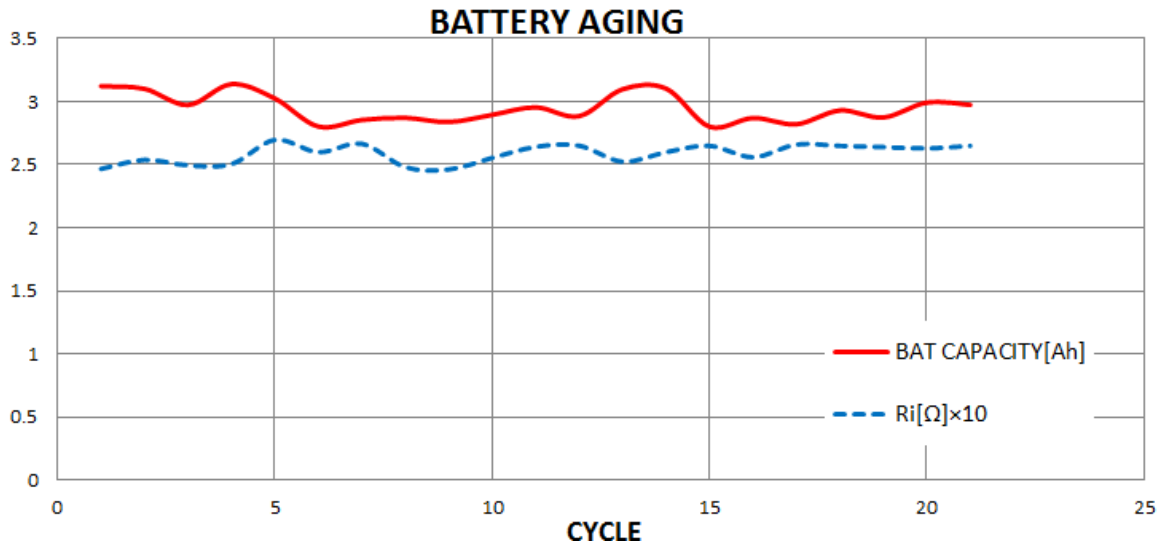
يمثل المنحني بالخط المستمر سعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ والمنحني بالخط المتقطع المقاومة الداخلية للمدخرة مضروبة ب 10 وذلك لإظهارها مع السعة على نفس الشكل.

نلاحظ من الشكل السابق انخفاض سعة المدخرة لتصبح 0.809 من السعة الابتدائية وارتفاع المقاومة الداخلية للمدخرة لتصبح 1.215 من المقاومة الداخلية الابتدائية وذلك خلال 21 دورة شحن وتفريغ.

٩-٤ تغير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن السريع مع تبريد (Change In)

:(Capacity And Internal Resistance During Cooled Fast Charging

يتم شحن المدخرة شحناً سريعاً بتوتر ثابت قيمته 14.1 V حيث يصل التيار في بداية فترة الشحن إلى 8.9A ويتناقص تدريجياً حتى الوصول إلى 4.6A، مع تبريدها باستخدام مروحتين استطاعة كل منهما 1.2W وتفرغها عن طريق حمل أومي قيمته 2.2 أوم وتكرار هذه التجربة 21 مرة. ويظهر الشكل التالي كل من سعة المدخرة ومقاومتها الداخلية بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ.



الشكل (٢٢-٤) تغير السعة والمقاومة الداخلية أثناء الشحن السريع مع تبريد

تبيّن من الشكل السابق انخفاض سعة المدخرة لتصبح 0.914 من السعة الابتدائية وارتفاع المقاومة الداخلية للمدخرة لتصبح 1.07 من المقاومة الداخلية الابتدائية خلال 21 دورة شحن وتفريغ.

سبب التوقف عند ٢١ دورة شحن وتفريغ:

عند شحن وتفريغ المدخرة بطريقة الشحن السريع بدون تبريد انتهى العمر الافتراضي للمدخرة بعد ٢١ دورة شحن وتفريغ (أصبحت سعتها تساوي 80% من السعة الابتدائية) حيث تم التوقف عند نفس دورات الشحن والتفريغ عند استخدام طريقة الشحن الطبيعي والشحن السريع مع تبريد لمقارنة تأثير طريقة الشحن على عمر المدخرة.

بمقارنة تغيّر السعة والمقاومة الداخلية بدلالة دورات الشحن والتفريغ في الحالات الثلاث نجد:

الجدول (٤-٢) تغيّر السعة والمقاومة الداخلية للمدخرة في الحالات الثلاث

Charging Method	Normal	Fast	Cooled Fast
Capacity Decrease	5%	20%	9%
Internal Resistance Increase	5%	21%	7%

وهذا يعني أننا استطعنا تخفيف تقادم المدخرة عن طريق التبريد الهوائي القسري حيث تقادمت المدخرة مع

التبريد بمقدار 9% مقابل 20% بدون تبريد خلال 21 دورة شحن وتفريغ.

٤-١٠ مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة (Comparison Of

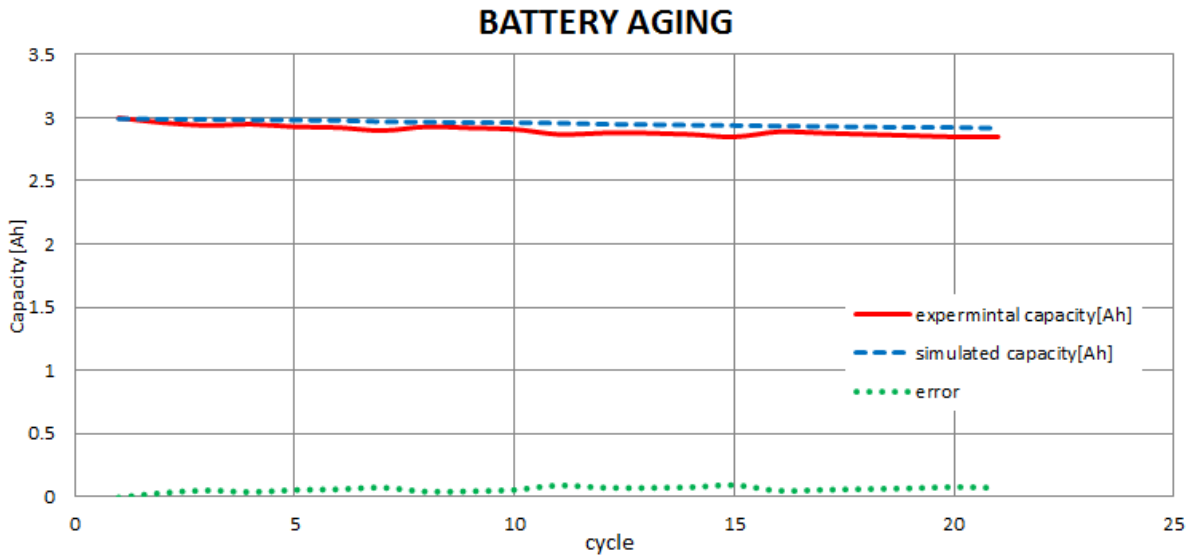
:Experimental Results With Modeling Results)

تمت إعادة نمذجة المدخرة السابقة بناءً على محدداتها الجديدة (سعة - مقاومة داخلية) والتي يتم حسابها تجريبياً بعد نهاية كل دورة شحن وتفريغ كما ذكرنا سابقاً حيث تبين أن الخلايا المستخدمة غير مطابقة للمحددات المصنعية من مقاومة داخلية وسعة ابتدائية وذلك بسبب التخزين وسوء التصنيع، وبعد ذلك تمت

مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة بعد تصدير نتائج النمذجة من برنامج ماتلاب إلى برنامج إكسل

ورسم منحنى الخطأ خلال 21 دورة شحن وتفريغ كما في الأشكال التالية:

٤-١٠-١ تغير السعة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في حالة الشحن الطبيعي (Change In Capacity as a Function of Cycles In Normal Charging)



الشكل (٤-٢٣) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة لتغير سعة المدخرة أثناء الشحن الطبيعي

يمثل المنحنى بالخط المستمر القيم التجريبية لسعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ والمنحنى المتقطع

قيم النمذجة لسعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ، بينما يمثل الخط المنقط قيمة الخطأ بين

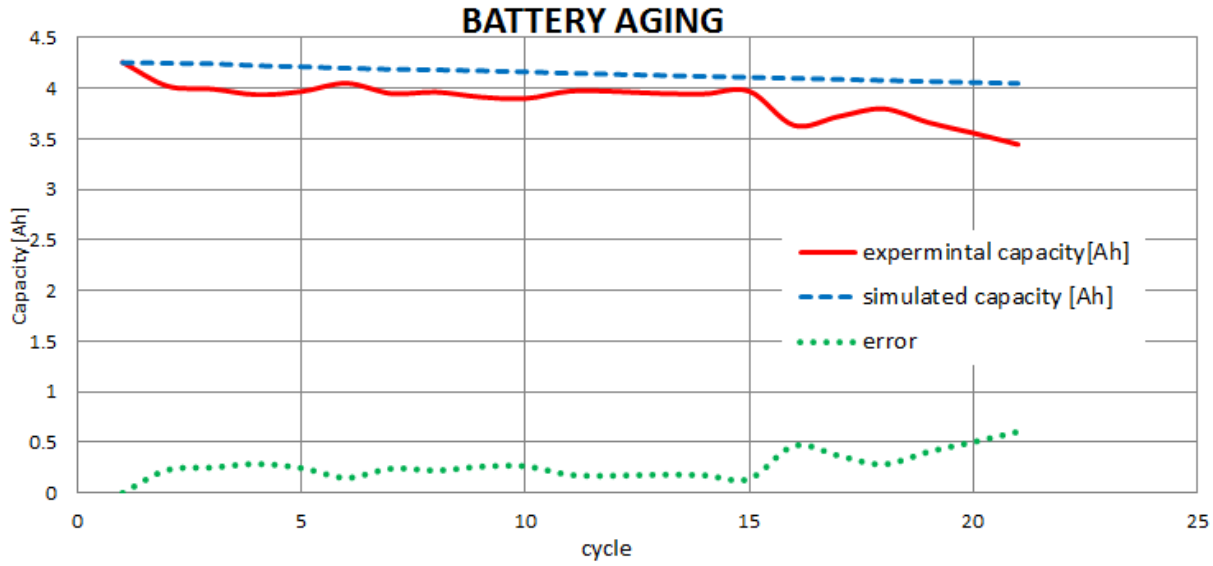
المنحنيين.

لنلاحظ أن أكبر فرق بين سعة النمذجة والسعة التجريبية يصل إلى 3% وهذا يدل على تقارب النموذج مع النتائج

التجريبية.

٤-١٠-٢ تغير السعة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في حالة الشحن السريع بدون تبريد

:(Change In Capacity as a Function of Cycles In Fast Charging)



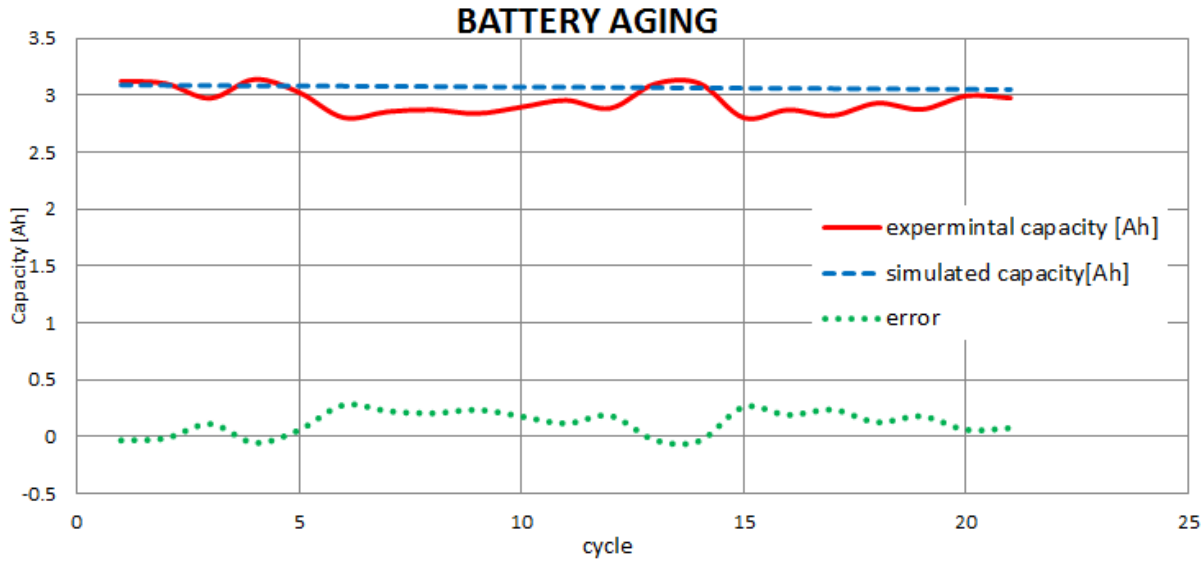
الشكل (٤-٢٤) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة لتغير سعة المدخرة أثناء الشحن السريع

يمثل المنحني بالخط المستمر القيم التجريبية لسعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ والمنحني المتقطع قيم النمذجة لسعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ، بينما يمثل الخط المنقط قيمة الخطأ بين المنحنيين.

نلاحظ من الشكل أن قيم النمذجة لسعة المدخرة قريبة من القيم التجريبية حيث بلغ الاختلاف بينهما في أسوأ حالاته 15% (ويعود الاختلاف إلى سوء تصنيع المدخرات وتطبيق تيارات شحن وتفريغ عالية).

٤-١٠-٣ تغير السعة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ في حالة الشحن السريع مع تبريد

:(Change In Capacity as a Function of Cycles In Cooled Fast Charging)



الشكل (٤-٢٥) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة لتغير السعة أثناء الشحن السريع مع تبريد

يمثل المنحني بالخط المستمر القيم التجريبية لسعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ والمنحني المنقطع قيم النمذجة لسعة المدخرة بدلالة عدد دورات الشحن والتفريغ، بينما يمثل الخط المنقط قيمة الخطأ بين المنحنيين. نلاحظ من الشكل أن قيم النمذجة لسعة المدخرة قريبة من من القيم التجريبية حيث بلغ الاختلاف بينهما في أسوأ حالاته 10%.

وبمقارنة نسبة الخطأ العظمى في النموذج الرياضي عن القيمة التجريبية لسعة المدخرة بدلالة عدد الدورات في الحالات الثلاث نجد:

الجدول (٤-٣) مقارنة نسبة الخطأ في سعة المدخرة في الحالات الثلاث

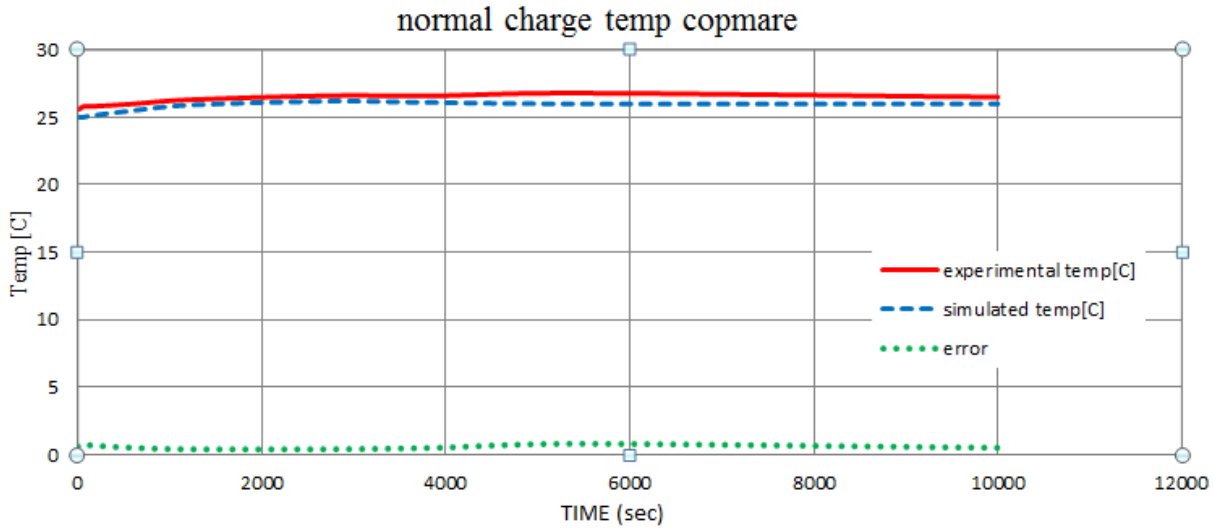
Charging Method	Normal	Fast	Cooled Fast
Capacity Error	3%	15%	10%

من القيم السابقة تبين أن نسبة الخطأ في النموذج كانت أكبر في حالة الشحن السريع بدون تبريد وهذا يعود إلى الارتفاع السريع في درجة الحرارة أثناء الشحن السريع بدون تبريد.

٤-١٠-٤ تغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة أثناء الشحن الطبيعي (Change

:(In Temp During Cycle In Normal Charging

يمثل الشكل التالي القيم التجريبية وقيم النمذجة لتغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة والانحراف الحاصل بين قيم النمذجة والقيم التجريبية:

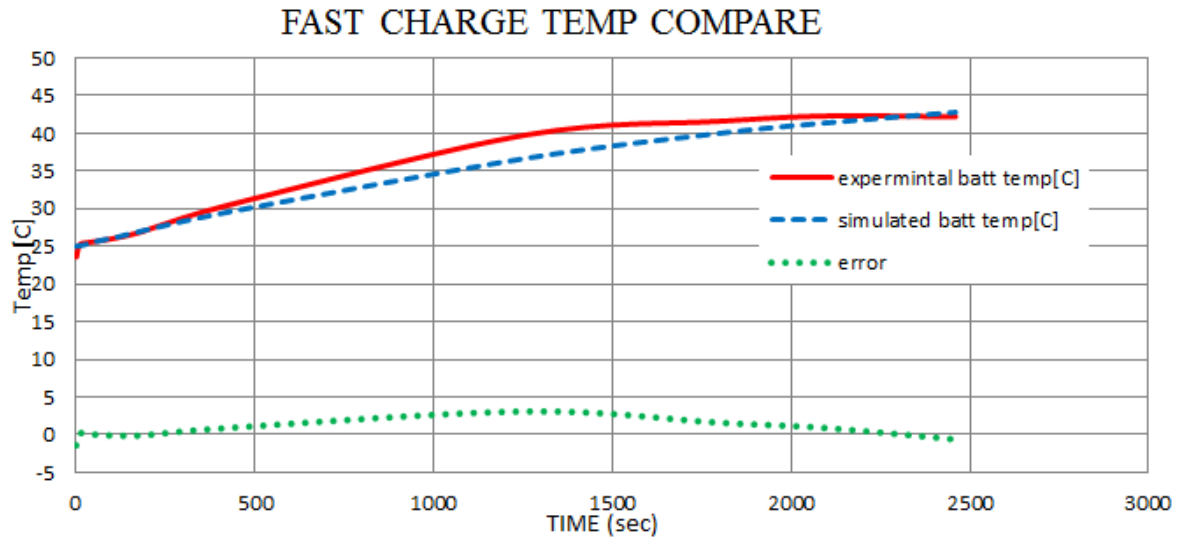


الشكل (٤-٢٦) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة لتغير درجة حرارة المدخرة أثناء الشحن الطبيعي

لوحظ أن أكبر فرق بين درجة حرارة النمذجة ودرجة الحرارة التجريبية يصل إلى 3% وهذا يدل على تقارب النموذج مع النتائج التجريبية.

٤-١٠-٥ تغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة أثناء الشحن السريع بدون تبريد

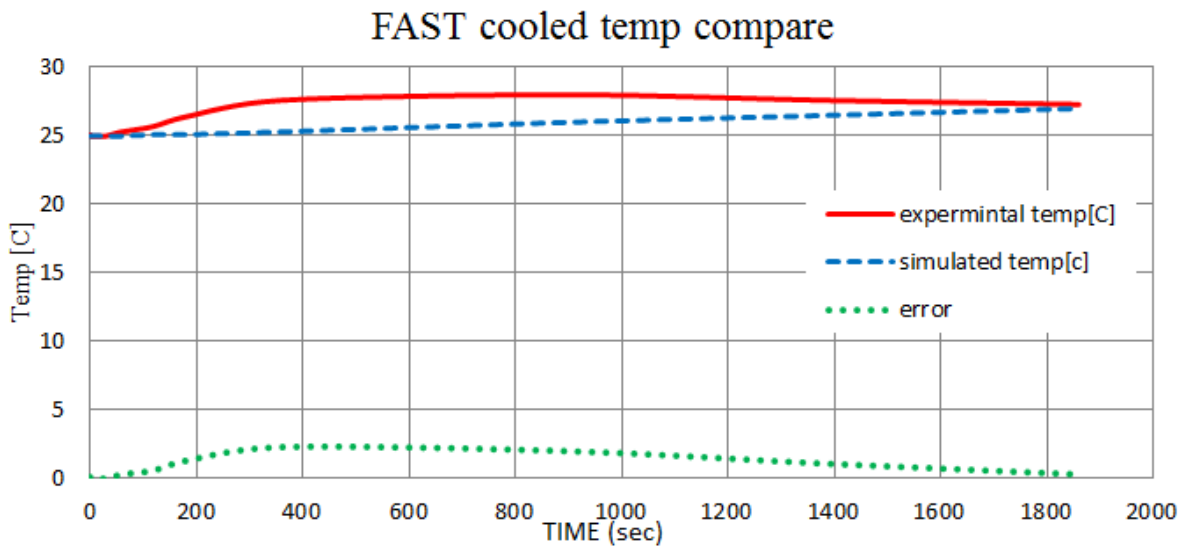
:(Change In Temp During Cycle In Fast Charging)



الشكل (٤-٢٧) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة لتغير درجة حرارة المدخرة أثناء الشحن السريع

لوحظ أن أكبر فرق بين درجة حرارة النمذجة ودرجة الحرارة التجريبية يصل إلى 8% وهذا يدل على تقارب النموذج مع النتائج التجريبية.

٤-١٠-٦ تغير درجة حرارة المدخرة خلال دورة شحن واحدة أثناء الشحن السريع مع تبريد
:(Change In Temp During Cycle In Cooled Fast Charging)



الشكل (٤-٢٨) مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج النمذجة لتغير درجة حرارة المدخرة أثناء الشحن السريع مع

تبريد

لوحظ أن أكبر فرق بين درجة حرارة النمذجة ودرجة الحرارة التجريبية يصل إلى 8% وهذا يدل على تقارب النموذج مع النتائج التجريبية. وبمقارنة نسبة الخطأ العظمى في النموذج الرياضي عن القيمة التجريبية لدرجة حرارة المدخرة أثناء دورة شحن واحدة في الحالات الثلاث نجد:

الجدول (٤-٤) مقارنة نسبة الخطأ في النموذج الرياضي عن القيمة التجريبية لدرجة حرارة المدخرة

Charging Method	Normal	Fast	Cooled Fast
Capacity Error	3%	8%	8%

نلاحظ أن قيم الخطأ في حساب درجة الحرارة لجميع الحالات مقبولة ولا تتجاوز 8%، لكن الخطأ يكون أكبر في حالة الشحن السريع سواء مع تبريد أو بدون تبريد وهذا يرجع إلى عدم قدرة النموذج الرياضي على مواكبة التغيرات السريعة في درجة الحرارة التي تحدث أثناء الشحن السريع، حيث أن قيم التيارات المطبقة في حالة الشحن السريع كانت عالية وتؤدي إلى ارتفاع سريع في درجة حرارة المدخرة خاصة أن المدخرة لم تعط سعتها الحقيقية نتيجة التقادم وسوء التصنيع.

تم في هذا الفصل توضيح التجهيزات المستخدمة في التجارب العملية، والدارات اللازمة لشحن وتفريغ المدخرة، كما تم فيه إظهار النتائج العملية للمقارنة بين طريقتين من طرائق التبريد في التخفيف من ارتفاع درجة حرارة المدخرة أثناء الشحن السريع، وإظهار النتائج العملية التي تبين مقارنة درجة حرارة المدخرة وعمرها عند شحنها بالطرق الثلاث (شحن طبيعي - شحن سريع - شحن سريع مع تبريد)، ومقارنة النتائج العملية مع نتائج النمذجة وبيان مقدار الانحراف في النموذج عن القيم التجريبية.

النتائج والتوصيات (Results And Recommendations)

النتائج

- تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية لدراسة تأثير الشحن السريع على درجة حرارة المدخرة وعمرها.
- أدى الشحن السريع إلى ارتفاع درجة حرارة المدخرة وقد راعينا في سرعة الشحن عدم وصول درجة الحرارة إلى حد يؤدي إلى إتلاف المدخرة. (حيث تشير المراجع إلى أن مدخرات الليثيوم قد تتعرض للتلف أو الانفجار عند تجاوز درجة حرارتها 60 درجة مئوية)
- أدى الشحن السريع إلى انخفاض سعة المدخرة إلى 80% من سعتها الاسمية خلال 21 دورة بينما انخفضت إلى 95% في حالة الشحن الطبيعي.
- عند شحن وتفريغ المدخرة بطريقة الشحن السريع بدون تبريد انتهى العمر الافتراضي للمدخرة بعد 21 دورة شحن وتفريغ (أصبحت سعتها تساوي 80% من السعة الابتدائية) حيث تم التوقف عند نفس دورات الشحن والتفريغ عند استخدام طريقة الشحن الطبيعي والشحن السريع مع تبريد لمقارنة تأثير طريقة الشحن على عمر المدخرة.
- انخفضت سعة المدخرة خلال 21 دورة من الشحن السريع مع تبريد إلى 91% من السعة الابتدائية.
- استطعنا مضاعفة عمر المدخرة من خلال التبريد أثناء الشحن السريع.
- كان عمر المدخرة قصيراً في حالة الشحن السريع مع تبريد (٢١ دورة فقط) بسبب ظروف الشحن والتفريغ القاسية التي تم تطبيقها لتسريع تقادم المدخرة لملاحظة أثر التقادم عليها بشكل سريع، حيث تم تطبيق تيار شحن يتراوح بين 2C (ضعفي السعة الابتدائية للمدخرة نسبةً إلى سعتها الحالية) في بداية

فترة الشحن و IC (يساوي السعة الاسمية للمدخرة) في نهاية فترة الشحن، كما تم تطبيق تيار تفريغ

يساوي 1.2C لتفريغ المدخرة.

- تعتبر الطاقة التي استهلكت في التبريد صغيرة جداً مقارنةً بسعة المدخرة حوالي 2% كما أنها يتم استجراؤها من الشاحن وليس من المدخرة.
- أظهرت نتائج النمذجة المبنية على النموذج المكافئ للمدخرة تقارباً كبيراً مع النتائج التجريبية في جميع حالات الشحن المدروسة وكان الفرق حوالي 12% في أسوأ أحواله وهذا يُعزى إلى عدم انتظام ظروف التشغيل وكيميائية المدخرة.
- تبين أن نموذج المدخرة المستخدم يحاكي أغلب الظواهر التي تحدث في مدخرات شوارد الليثيوم بوليمير وأهمها تأثير درجة الحرارة والتقدم في المدخرة.
- يمكن تعميم النموذج المستخدم في نمذجة المدخرة لجميع أنواع مدخرات شوارد الليثيوم بعد حساب قيم المتحولات المذكورة في المعادلات بالطريقة المذكورة.

التوصيات

- اعتمدت الدراسة على تبريد المدخرة في تحسين عمر المدخرة أثناء الشحن السريع يمكن اعتماد آليات أخرى لهذا الغرض مثل التغيير في كيميائية المدخرة أو اعتماد طرق تبريد أخرى.
- من الطرائق الفعالة في تبريد المدخرات طريقة التبريد المائي القسري لكن هذه الطريقة تعتبر غير مجدية في تجربتنا لأن استطاعة المضخة التي ستستخدم في تدوير المياه تعتبر كبيرة مقارنةً بسعة المدخرة المستخدمة حيث أن أقل استطاعة مضخة موجودة في السوق 8Watt.
- يمكن التطوير في نمذجة المدخرة لمراعاة التغيير المفاجئ في ظروف التشغيل وكيميائية المدخرة.

- يمكن اعتماد النموذج العملي المدروس (المكون من ٣ خلايا ومروحتي تبريد) بعد تعليبيه في بكج مناسب وطرحه في الأسواق أو استخدامه لتشكيل مدخرات كبيرة وهو جاهز للتنفيذ في حال توفر جهة صناعية داعمة مواصفاته الاسمية (مدخرة سعتها السمية 10Ah توترها الاسمي 11.1V مزودة بمروحتين استطاعة كل منهما 1.2W، الأبعاد (130*70*80)mm).

المراجع (references):

- [1] Brain, M., Bryant, C. W., & Pumphrey, C. (2015). How batteries work. *Battery Arrangement and Power—HowStuffWorks*, <http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/battery6.htm/printable>, accessed Dec, 14.
- [2] Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Manwell, J. F., Abdulwahid, U., Baring-Gould, I. (2005) "Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries", Riso National Laboratory, ISBN 87-550-3441-1.
- [3] Kiehn, H. A. (2003) "Battery Technology Handbook", Second Edition, Marcel Dekker, Inc.
- [4] Pavlov, D. (2011). Lead-acid batteries: science and technology. Elsevier.
- [5] Faddouli, A., Labrim, H. A. M. R., Fadili, S. A. L. A. H., Hartiti, B. O. U. C. H. A. I. B., Habchi, A., Ertugrul, M., ... & Ntsoenzok, E. S. I. D. O. R. (2019). Feasibility and performance investigation of a new smart system integrating planar/tubular thermoelectric generators with solar flat plate collector. *Energy conversion and management*, 199, 111980.
- [6] Vasebi, A., Partovibakhsh, M., & Bathaee, S. M. T. (2007). A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 174(1), 30-40.
- [7] Nguyen, T. H., Fraiwan, A., & Choi, S. (2014). based batteries: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 54, 640-649.
- [8] Lighting Global. **Lithium-ion Batteries Part I: General Overview and 2019 Update**. 15, June, 2019. <https://www.lightingglobal.org>.
- [9] Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O'kane, S., Liu, X., Chen, J., ... & Wu, B. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1, 100011.

- [10] Nicholas, M., & Hall, D. (2018, July). Lessons learned on early electric vehicle fast-charging deployments. icct.
- [11] Trivedi, N., Gujar, N. S., Sarkar, S., & Pundir, S. P. S. (2018, March). Different fast charging methods and topologies for EV charging. In *2018 IEEMA engineer infinite conference (eTechNxT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [12] Das, S., Salim, K. M., Chowdhury, D., & Hasan, M. M. (2019). Inverse sinusoidal pulse width modulation switched electric vehicles' battery charger. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 9(5).
- [13] Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854.
- [14] Rallabandi, S., & Issac Selvaraj, R. V. (2024). Advancements in battery cooling techniques for enhanced performance and safety in electric vehicles: a comprehensive review. *Energy Technology*, 12(5), 2301404.
- [15] Wei, Y., & Agelin-Chaab, M. (2018, June). Novel hybrid cooling concept for battery thermal management design. In *International Conference of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*.
- [16] A. Kamel, A., Rezk, H., Shehata, N., & Thomas, J. (2019). Energy management of a DC microgrid composed of photovoltaic/fuel cell/battery/supercapacitor systems. *Batteries*, 5(3), 63.
- [17] Caldeira, C. A., Schlickmann, H. R., de Almeida, A. D., Hartmann, L. V., Gehrke, C. S., Salvadori, F., & da Paz, G. F. (2019, December). Modeling and simulation of the battery energy storage system for analysis impact in the electrical grid. In *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)* (pp. 1-6). IEEE.

- [18] C-Therm Technologies. *Thermal resistance and Thermal Conductance*.2022:
.https://ctherm.com/resources/helpful-links-tools/thermalresistanceandconductivity
- [19] MECH CONTENT. *Thermal time constant in heat transfer: Definition, Unit, Formula*. 2022. link:https://mechcontent.com/thermal-time-constant.
- [20] https://i2.kknews.cc/e5P4BB51m1T4WwiVGMdmsNBOYl6P6GEkmw/0.jpg
- [21] Chen, S. C., Wan, C. C., & Wang, Y. Y. (2005). Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 140(1), 111-124.
- [22] Mousavi, M., Hoque, S., Rahnamayan, S., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2011, June). Optimal design of an air-cooling system for a Li-Ion battery pack in Electric Vehicles with a genetic algorithm. In *2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1848-1855). IEEE.
- [23] BATTERY ENERGY, BATTREY Specification Sheet.
- [24] **Battery and Energy Technologies(Battery Life and DEATH)** .
Electropaedia.14/5/2009. http://www.mpoweruk.com/life.htm._
- [25] Lai, C. P. Y., Law, K. H., & Lim, K. H. (2020, October). Photo-voltaic Powered Electric Vehicle Fast Charger. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 943, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- [26] Wang, G., Gao, Q., Yan, Y., & Wang, Y. (2020). Thermal management optimization of a lithium-ion battery module with graphite sheet fins and liquid cold plates. *Automotive Innovation*, 3, 336-346.
- [27] Chen, X., Shen, W., Vo, T. T., Cao, Z., & Kapoor, A. (2012, December). An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. In *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)* (pp. 230-235). IEEE.

- [28] Kim, B. G., Tredeau, F. P., & Salameh, Z. M. (2008, July). Fast chargeability lithium polymer batteries. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* (pp. 1-5). IEEE.
- [29] Chae, W., Kim, B., Ryoo, W. S., & Earmme, T. (2023). A brief review of gel polymer electrolytes using in situ polymerization for lithium-ion polymer batteries. *Polymers*, 15(4), 803.
- [30] Liu, J., Zhang, Y., Bai, J., Zhou, L., & Wang, Z. (2023). Influence of lithium plating on lithium-ion battery aging at high temperature. *Electrochimica Acta*, 454, 142362.
- [31] Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418.
- [32] Bandara, T. T. A., Viera, J. C., & González, M. (2022). The next generation of fast charging methods for Lithium-ion batteries: The natural current-absorption methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112338.
- [33] Zhao, L., Li, W., Wang, G., Cheng, W., & Chen, M. (2023). A novel thermal management system for lithium-ion battery modules combining direct liquid-cooling with forced air-cooling. *Applied Thermal Engineering*, 232, 120992.
- [34] Jin, S., Youn, M. S., & Kim, Y. J. (2021). Optimization of air-cooling system for a lithium-ion battery pack. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 321, p. 02018). EDP Sciences.
- [35] Iyer, V. M., Gulur, S., Gohil, G., & Bhattacharya, S. (2018, March). Extreme fast charging station architecture for electric vehicles with partial power processing. In *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 659-665). IEEE.

- [36] Trentadue, G., Lucas, A., Otura, M., Pliakostathis, K., Zanni, M., & Scholz, H. (2018). Evaluation of fast charging efficiency under extreme temperatures. *Energies*, 11(8), 1937.
- [37] Leng, F., Tan, C. M., & Pecht, M. (2015). Effect of temperature on the aging rate of Li ion battery operating above room temperature. *Scientific reports*, 5(1), 12967.
- [38] Buchmann, I. **Ultra fast battery charging and whats the implications**. Cadix. June,2012.[http:// www.BatteryUniversity.com](http://www.BatteryUniversity.com).
- [39] Trentadue, G., Lucas, A., Otura, M., Pliakostathis, K., Zanni, M., & Scholz, H. (2018). Evaluation of fast charging efficiency under extreme temperatures. *Energies*, 11(8), 1937.
- [40] Narula, A. (2014). Modeling of ageing of lithium-ion battery at low temperatures.
- [41] Xie, W., Liu, X., He, R., Li, Y., Gao, X., Li, X., ... & Yang, S. (2020). Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 32, 101837.
- [42] Klusmann, A. (2016). Battery Simulation and Investigation Utilizing Matlab Simulink. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- [43] Shirk, M., & Wishart, J. (2015). Effects of electric vehicle fast charging on battery life and vehicle performance (No. INL/CON-14-33490). Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States).
- [44] Neubauer, J., Wood, E., Burton, E., Smith, K., & Pesaran, A. (2015). Impact of Fast Charging on Life of EV Batteries; NREL (National Renewable Energy Laboratory) (No. NREL/PR-5400-63700). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [45] Bauer, P., Stembridge, N., Doppler, J., & Kumar, P. (2010, September). Battery modeling and fast charging of EV. In *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010* (pp. S11-39). IEEE.

[46] Joos, G., De Freige, M., & Dubois, M. (2010, August). Design and simulation of a fast charging station for PHEV/EV batteries. In 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference (pp. 1-5). IEEE.

Abstract

One of the most important obstacles to batteries fast charging is the high temperature resulting from the quick chemical reactions in batteries. This leads to a decrease in the discharged capacity of the battery, and contributes to reducing its age (the number of cycles before reaching 80% of the nominal capacity). It can also cause battery explosion if its temperature rises significantly. Therefore, a mechanism must be found to cool the battery to avoid these problems.

The results showed that fast charging led to an increase in the battery temperature. We carefully considered the charging current to ensure that the battery temperature did not reach a point that could damage the battery. Fast charging also significantly reduced the battery age compared to normal charging. The results also showed that using two fans for forced air cooling was better than natural water cooling when the lower half of the battery was immersed in water. This cooling doubled the battery age during fast charging compared to fast charging without cooling. Modeling results based on the equivalent battery model showed a close match with experimental results in calculating both temperature and battery age.