

Lityum-iyon Pil Bozulma Testlerinin Hızlandırılması İçin Yeni Bir Yaklaşım

New Approach to Acceleration of Li-ion Battery Degradation Testing

Cansu İçöz¹, Mehmet Aksoy², Çiğdem Ezgi Arer³

 0009-0000-5333-2736  0009-0009-0218-816X  0009-0009-3855-0378

¹ Tasarım & Ürün Kalitesi Kıdemli Uzman, Beko, Tekirdağ, Türkiye
cansu_icoz@beko.com

² Test ve Sertifikasyon Merkezi Kıdemli Lider, Beko, Tekirdağ, Türkiye
mehmet_aksoy@beko.com

³ Veri Analitiği Kıdemli Lider, Beko, İstanbul, Türkiye
cigdemezgi.arer@beko.com

Özet

Lityum-iyon piller için standart komponent ömür testleri uzun süreli olmakla birlikte, pillerin yaşlanmayla bozulma performansını anlayabilmek için gereklidir. Degradasyon testleri, ürünlerin zamanla kalite, yapı veya performansındaki azalma veya bozulmayı tespit etmek amacıyla yapılan güvenilirlik testleridir. Bu çalışmada li-iyon pillerin zamanla bozulma testlerini hızlandırmak için degradasyon testinin kullanılması önerilmektedir. Hasarsız degradasyon testinde örnekler, pek çok güvenilirlik test türlerinden farklı olarak, tamamen arızalanana kadar test edilmediği için, bu yaklaşım doğal olarak testlerin daha hızlı tamamlanma avantajını sunar. Ancak, bu yöntemi kullanırken dikkate alınması gereken kritik bir nokta, testin durdurulması gereken uygun aşamanın belirlenmesidir. Test süresi, modelin, testin orijinal süresini tamamladığında elde edilecek sonuçlar ile uyumlu ve doğru sonuçlar tahmin etmesini sağlayabilmelidir. Bu çalışma, pil ömür test sürelerinin farklı oranlarda kısaltılması koşullarındaki model tahminleri ile klasik ömür testi sonuçları arasındaki doğruluk oranını incelemektedir. Çalışma sonucunda, %30'luk bir kısaltmanın, klasik ömür testi ile istatistiksel olarak benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler- Pil Bozulması, Bozulma Analizi (DEG), Yaşam Döngüsü Testleri, Lityum-iyon Piller, Test Süresi Azaltma, Weibull Analizi (WEI)

Abstract

Standard lifespan tests for lithium-ion batteries are essential for understanding ageing and degradation but are time-consuming. Degradation tests are reliability tests conducted to detect the decrease or deterioration in the quality, structure, or performance of a product over time. This study explores using non-destructive degradation testing to accelerate battery lifespan tests. Unlike traditional methods, samples in this approach are not tested to complete failure, enabling faster results. A key challenge is determining the optimal stopping point to ensure accurate predictions aligned with full-duration test outcomes. The study compares model predictions from reduced-duration tests with classical lifespan

test results and finds that a 30% reduction produces statistically similar outcomes. This method provides a practical way to save time while maintaining test accuracy.

Keywords - Battery Degradation, Degradation Analysis (DEG), Life Cycle Testing, Li-ion Batteries, Test Duration Reduction, Weibull Analysis (WEI)

1. Giriş

Günümüzde hızla gelişen teknolojik yenilikler; insansız hava ve su altı araçları, robotik sistemler, otonom cihazlar, hibrit ve elektrikli araçlar, taşınabilir bilgisayarlar, akıllı telefonlar, dijital kameralar, askeri sistemler, kablosuz iletişim teknolojileri ve akıllı ev uygulamaları gibi pek çok alanda ileri teknolojiye sahip elektronik cihazların yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Bu sistemlerin kesintisiz, güvenilir ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için yüksek enerji yoğunluğuna, uzun ömre ve güvenli çalışma koşullarına sahip enerji depolama çözümlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [1]. Bu bağlamda, geleneksel enerji depolama sistemlerinden farklı olarak, özellikle lityum-iyon (Li-ion) batarya teknolojileri; yüksek enerji yoğunluğu, düşük kendiliğinden deşarj oranı, uzun çevrim ömrü, hafiflik ve geniş çalışma gerilim aralığı gibi avantajları nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan sistemler arasında yer almaktadır [2]–[5]. Lityum-iyon bataryalar, her ne kadar çok sayıda avantaj sunsa da, zaman içinde çeşitli çevresel etkiler ve kullanım şartları nedeniyle performanslarında ciddi bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık, yüksek akım, hızlı şarj/deşarj döngüleri ve derin deşarj gibi zorlu çalışma koşulları; kapasite azalması, iç direnç artışı, lityum metali birikimi, elektrot bozulmaları ve elektrolit parçalanması gibi çeşitli yaşlanma mekanizmalarını tetikleyebilir [6]–[9]. Bu yaşlanma süreçlerinin güvenilir şekilde analiz edilmesi ve ömür boyunca performans değişimlerinin tahmin edilebilmesi hem ürün güvenliği hem de sistem verimliliği açısından kritik öneme

sahiptir. Literatürde batarya yaşlanmasını değerlendirmek ve kalan kullanım ömrünü tahmin etmek amacıyla kullanılan pek çok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki, bataryaların ömrünü daha kısa sürede tahmin edebilmek amacıyla stres faktörlerini artırarak gerçekleştirilen Hızlandırılmış Ömür Testleri (Accelerated Life Testing - ALTA) yöntemleridir. ALTA kapsamında sıcaklık, voltaj ve akım gibi parametreler yükseltilerek bataryaların hızlı biçimde yaşlandırılması sağlanır ve yeni hücre tasarımları daha kısa sürede değerlendirilebilir [6], [10], [14], [15]. Bu tür testler, özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji talepli sistemler için zaman avantajı sağlayan bir araç olarak görülmektedir. Hızlı şarj-deşarj döngüleri de bu yaklaşıma dâhil olarak; bataryaların yüksek C-rate değerleri altında davranışlarını test etmeye olanak tanır. Örneğin Han ve arkadaşlarının çalışmasında [17], bu tür yüksek hızlı döngülerin batarya kapasitesinde hızlı düşüşe neden olduğu ortaya konulmuştur. Her ne kadar ALTA, batarya performans değerlendirmelerinde zaman kazandıran etkili bir yöntem olarak öne çıksa da, bu yaklaşımın bazı sınırlamaları da göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek sıcaklık veya akım gibi ekstrem stres koşullarında yapılan bu testler, bataryaların gerçek kullanım senaryolarını her zaman doğru bir şekilde yansıtmayabilir. Ayrıca, bu koşullar altında ortaya çıkan bozulma mekanizmaları, normal çalışma koşullarında gözlemlenenlerden farklılık gösterebilir. Bu da model geçerliliği açısından belirsizliklere neden olabilir [4], [16], [18], [27]. ALTA yöntemlerinin kısıtlarını tamamlayıcı nitelikte geliştirilen bir diğer yöntem ise, bataryaların yaşlanma süreçlerini daha gerçekçi kullanım senaryoları altında ve uzun vadeli olarak inceleyen degradasyon temelli ömür tahmini yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımlar, batarya hücresinin iç yapısında zamanla oluşan fiziksel ve kimyasal değişimleri takip eder. Degradasyon analizlerinde kapasite kaybı, iç direnç artışı, aktif malzeme kaybı, elektrot bozulmaları ve lityum kaynaklarının tükenmesi gibi parametreler sistematik olarak izlenir. Bu tür analizler empirik regresyon modelleri [19], elektrokimyasal empedans spektrumu tabanlı modeller [12], termodinamik değerlendirmeler [6] ve makine öğrenmesi algoritmaları gibi farklı yöntemlerle yürütülebilmektedir [20], [25]. Ayrıca, ömrü tamamlanan bataryalar üzerinde gerçekleştirilen post-mortem analizler, batarya hücresinin iç yapısında meydana gelen faz değişimleri ve mikroyapısal bozulmaları ortaya koyarak, ömür tahmin modellerinin doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır [11], [24]. Son yıllarda geliştirilen çalışmalarda, hızlandırılmış testlerin sunduğu zaman avantajı ile degradasyon analizlerinin sunduğu doğruluk bir arada kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin Ren ve arkadaşları [23], batarya bozulma mekanizmalarının eşdeğerliğine dayalı olarak kontrollü stres koşulları altında hızlandırılmış test yöntemleri geliştirerek, hem zamandan tasarruf etmiş hem de model geçerliliğini artırmayı başarmıştır. Paarmann ve arkadaşları [24] ise kısa süreli testlerle uzun vadeli yaşlanma senaryolarını simüle ederek, ömür tahmin süreçlerini optimize etmeyi amaçlamıştır. Fricke ve arkadaşları tarafından oluşturulan veri seti [26], sabit ve değişken yüklem koşullarında gerçekleştirilen hızlandırılmış testlere dayanmakta olup, literatürde sıkça başvurulan güvenilir bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Literatürde öne çıkan hızlandırılmış test ve

modelleme yöntemlerinin avantajları ve sınırlılıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Hızlandırılmış Batarya Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Test Türü	Avantajları	Sınırlılıkları	Örnek Kaynaklar
ALTA (Accelerated Life Testing)	Kısa sürede ömür tahmini, istatistiksel modelleme imkanı	Gerçek kullanım koşullarını sınırlı temsil eder	[6], [10], [13], [27]
Hızlı Şarj-Deşarj Testleri	Gerçekçi döngü senaryoları, termal etkilerin değerlendirilmesi	Termal stres kaynaklı anomaliler diğer faktörlerle ayrıştırılabilir	[4], [7], [8], [17], [18]
Degradasyon Analizi	Gerçek kullanım koşullarında zamana bağlı performans takibi, model geçerliliği	Test süresi uzun olabilir, veri toplama zahmetlidir	[10], [11], [14], [15], [19], [23]
Ampirik / Veri Odaklı Modeller	Hızlı tahmin sağlar; farklı kullanım senaryolarının kolayca entegre edilebilir	Fiziksel temelden yoksun olabilir; genellebilirlik sınırlı kalabilir	[19], [20], [21], [25]
Fiziksel / Termodinamik Modeller	İç yapıya dair detaylı analiz sunar; fiziksel ilkelerle yüksek doğrulukta modelleme yapılabilir	Karmaşık matematiksel yapı ve yüksek veri ihtiyacı nedeniyle uygulanabilirlik zorlukları barındırır	[6], [12], [22]
Post-Mortem (Ömür Sonrası) Analizler	Elektrot, elektrolit ve batarya içi ayırıcı malzeme bozulmaları analiz ederek model doğrulamayı destekler.	Yalnızca ömrünü tamamlamış hücreler üzerinde uygulanabilir; bazı uygulamalar hücre yapısına fiziksel müdahale gerekebilir.	[11], [16], [24]

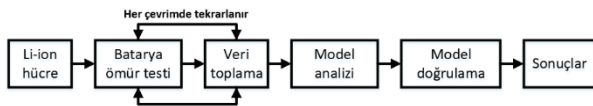
Mevcut literatür incelendiğinde, pek çok çalışmanın yalnızca hızlandırılmış test yöntemlerine odaklandığı ya da

yalnızca veri odaklı modellemelerle degradasyon tahmini yaptığı görülmektedir. Ancak bu yaklaşımlar, özellikle uygulamaya özel sistemler için tek başlarına yeterli olmayabilir. Çünkü bir yandan test süresini optimize etmek gerekirken, diğer yandan ömür tahmininin gerçek kullanım koşullarını yansıtmaması da önemlidir. Sonuç olarak, ALTA ve hızlı döngü testleri zaman avantajı sağlarken; degradasyon analizi yöntemleri, batarya davranışlarını daha kapsamlı ve uzun vadeli olarak anlamamıza olanak tanır. Bu nedenle, özellikle uygulamaya özel ömür modellemelerinde degradasyon temelli yaklaşımlar, hızlandırılmış testlerin sınırlı temsil gücünü tamamlayıcı nitelikte önemli bir rol oynamaktadır [10], [13], [14].

Bu araştırma kapsamında, degradasyon analizlerinin mevcut ömür testlerini nasıl destekleyici ve hızlandırıcı şekilde kullanılabileceği araştırılmıştır. Bölüm 2'de, uygulanan degradasyon temelli test yaklaşımı detaylı biçimde açıklanmış; elde edilen veriler analiz edilerek modelleme süreci ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda modelin geçerliliği ve doğruluğu tartışılmış; Sonuçlar bölümünde ise bulgular bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek çalışmanın uygulamaya yönelik çıkarımları ve önerileri paylaşılmıştır.

2. Metodoloji

Bu çalışmada, lityum-iyon hücreler, ömür ve performans karakteristiklerinin analizine yönelik olarak kapsamlı bir batarya ömür testiyle analiz edilmiştir. Test verileri, çeşitli şarj-deşarj döngüleri süresince toplanmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, ReliaSoft yazılımı [28] kullanılarak değerlendirilmiş; bu kapsamda Weibull ömür dağılımı analizi ve degradasyon modelleri uygulanmıştır. Weibull analizi, hücrelerin belirli bir ömür aralığında arıza verme olasılıklarını inceleyerek sistemin güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Degradasyon modeli ise bataryadaki zamana bağlı kapasite düşüşünü analiz ederek, arızaya yol açan bozulma sürecini karakterize etmektedir. Bu metodolojik yaklaşım, hücre performansındaki zamana bağlı değişimleri ve kapasite kaybını anlamak amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 1, lityum-iyon bataryaların ömür tahminine yönelik önerilen yöntemsel süreci göstermektedir. Süreç, batarya ömür testi ve veri toplama adımlarının her çevrimde tekrarlandığı döngüsel bir yapıya sahiptir. Elde edilen veriler analiz edilmekte, ardından model doğrulama adımıyla değerlendirilerek ömür tahminine yönelik sonuçlara ulaşılmaktadır.

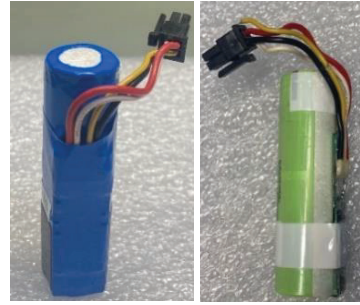


Şekil 1. Çalışmanın özet akışı

2.1. Li – iyon hücre

Şekil 2'de verilen lityum-iyon batarya hücresi, yüksek kapasite ve enerji yoğunluğuna sahip, 18 mm çapında ve 65 mm uzunluğunda olan 18650 tipi Li-iyon şarj edilebilir pil türüdür. Çalışmada kullanılan hücrenin nominal kapasitesi 3400 mAh olup, bu değer, hücrenin tamamen şarj olduğunda 3400

miliamper-saatlik elektriksel yük depolama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Nominal hücre voltajı 3.6V olup, bu değer, hücrenin çalışma voltajını ifade etmektedir. Şarj akımı 1.02A olup, bu değer bataryanın güvenli ve verimli bir şekilde şarj edilmesini sağlamaktadır. Deşarj akımı 3.4 A olup, bu değer bataryanın enerji sağlayarak boşalma sürecinde ilettiği elektrik akımının büyüklüğünü ifade etmektedir. Deşarj kesme voltajı ise 2.5V olup, bataryanın aşırı deşarjdan korunması amacıyla deşarj işleminin sonlandırıldığı voltaj seviyesini belirtmektedir. Deşarj Derinliği (Depth of Discharge- DoD), bataryanın %100 dolu durumundan %0 tam boş duruma kadar olan deşarj oranını ifade eder. Bir bataryanın belirli bir DoD seviyesine kadar deşarj edilip ardından tamamen şarj edilmesi bir çevrim olarak tanımlanır.



Şekil 2. Li-iyon batarya hücresi

2.2. Batarya ömür testi ve veri toplama

Li-iyon bataryaların ömrü ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılan ömür testi, batarya performansını analiz etmek için kritik bir yöntemdir. Bu test, belirli şarj ve deşarj koşulları altında uygulanarak bataryanın zaman içindeki performans değişimleri incelenmiştir. Tablo 2'de verilen IEC 61960-3:2017 test prosedürü taşınabilir uygulamalar için kullanılan lityum bazlı ikincil pillerin (şarj edilebilir bataryaların) özelliklerini belirleyen bir standarttır. Bu standart, özellikle prizmatik ve silindirik lityum ikincil hücreleri ile bu hücrelerden yapılan bataryaların performans gereksinimlerini ve test prosedürlerini kapsamaktadır. IEC 61960-3:2017, bataryaların güvenli kullanımını sağlamak amacıyla elektriksel, mekanik ve çevresel testleri tanımlar. Ayrıca, bu bataryaların taşıma, depolama ve kullanım sırasında güvenliğini artıran tasarım özelliklerini de belirtir. Bu çalışmada, bataryaların veri sayfalarındaki özelliklere dayanarak Tablo 3'de verilen test prosedürleri geliştirilmiştir. Bu prosedürler arasındaki temel farklar, bataryaların test koşullarındaki zorluk seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Farklı döngü sayıları, deşarj akımları ve test sonunda elde edilen kapasite değerleri, bataryaların dayanıklılığını ve performansını daha zorlu koşullar altında değerlendirmeyi hedeflemektedir. Özellikle, bataryaların yüksek deşarj akımları ve fazla sayıda şarj-deşarj döngüsü ile test edilmesi, gerçek kullanım koşullarına daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu tür testler, bataryaların uzun vadeli performansını, kapasite kaybını ve güvenlik sınırlarını daha detaylı bir şekilde analiz etmeyi sağlamaktadır.

Tablo 2. IEC 61960-3:2017 Standardına göre test prosedürü

Özellik	IEC 61960-3:2017 Standardına Göre Hızlandırılmış Test Prosedürü
Döngü Sayısı	400 çevrim
Şarj akımı ve voltajı	Üretici tarafından tanımlanan (1,02A ile 4,2V'a kadar)
Deşarj akımı ve voltajı	0,5 lt A (1,7A) ile 2,5V'a kadar
Kalan kapasite	60%

Tablo 3. Batarya verilerine göre oluşturulan test prosedürü

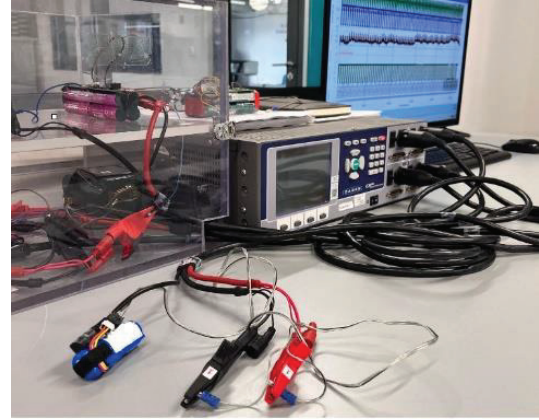
Özellik	Bataryanın Değerlerine Göre Oluşturulan Test Prosedürü
Döngü Sayısı	600 çevrim
Şarj akımı ve voltajı	Üretici tarafından tanımlanan (1,02A ile 4,2V'a kadar)
Deşarj akımı ve voltajı	Üretici tarafından tanımlanan (3,4A ile 2,5V'a kadar)
Kalan kapasite	70%

İlk olarak, batarya 1.02 A akımla şarj edilir ve 4.2 V voltaj seviyesine ulaşana kadar bu işlem devam eder (sabit akım aşaması). Ardından, batarya 170 mA kesme akımına ulaşana kadar sabit voltaj aşamasında şarj edilmeye devam edilir. Sonrasında, bataryanın performansını değerlendirmek için 3.4 A akımla deşarj edilir ve voltaj 2.5 V'ye düşene kadar deşarj işlemi sürdürülür. Endüstri standartlarına göre, bataryanın yaşam döngüsü 600 döngü olarak belirlenmiş olup, kullanılabilir kapasite yüzdesi minimum %70 olarak kabul edilmiştir. Test sonuçları, bataryanın 600 döngü sonunda kapasitesinin %70'in altına düşüp düşmediğini belirler. Eğer kapasite bu seviyenin üzerinde kalırsa, batarya sağlıklı kabul edilir ve performans açısından herhangi bir sorun olmadığı belirtilir. Bataryanın genel durumu, kapasite kaybı, şarj-deşarj döngüleri, sıcaklık değişimleri ve deşarj derinliği (DoD) gibi çeşitli kriterlere dayanarak değerlendirilir. Sonuç olarak, batarya normal işleyiş gösteriyorsa, tüm gerekli voltaj, akım ve kapasite spesifikasyonlarını karşıladığı sonucuna varılır. Aksi takdirde, batarya bu koşulları karşılayamıyorsa, normal çalışmadığı ve kritik arıza modlarına girdiği tespit edilir. Bu kapsamlı test süreci, Li-iyon bataryaların dayanıklılığı ve ömrü hakkında önemli bilgiler sağlar. Batarya ömür testinin değerlendirme kriterleri belirlendikten sonra, bu kriterlere dayalı olarak testin gerçekleştirilme aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada, bataryaların elektriksel bağlantıları ve kullanılan test ekipmanı detaylı bir şekilde düzenlenmiştir. Şekil 2'de gösterilen batarya hücresi Şekil 3'teki Cadex batarya test cihazı ile test edilmiştir. Şekil 4 ise test edilecek hücrenin elektriksel bağlantılarının yapılarak sisteme bağlanma şeklini göstermektedir. Cadex batarya test sisteminin yazılım uygulamasında, test edilecek bataryanın elektriksel ve kimyasal özelliklerine göre şarj ve deşarj döngülerini yöneten bir C kodu

(konfigürasyon kodu) kullanılarak bir test programı hazırlanmıştır. Bu program, Cadex test cihazı aracılığıyla çalıştırılmış ve batarya test süreci başlatılmıştır.



Şekil 3. C8000 batarya test sistemi [29]



Şekil 4. Cadex batarya test cihazı

Tablo 4'te, C kodu bataryanın veri sayfasına göre belirlenen değerleri içermektedir. Ayrıca, nominal kapasite, şarj oranı (bataryanın şarj edileceği akım) ve deşarj oranı (bataryanın deşarj edileceği akım) da belirtilmiştir. Buna ek olarak, kritik parametreler arasında sabit akım aşamasında bataryanın ulaşabileceği en yüksek voltaj olan maksimum şarj voltajı ve deşarj sürecinde bataryanın inebileceği en düşük voltaj olan deşarj bitiş voltajı yer almaktadır. Son olarak, şarj bitiş noktası, sabit voltaj aşamasında şarjın durdurulacağı minimum şarj akımını ifade etmektedir.

Tablo 4. Li – iyon batarya parametreleri

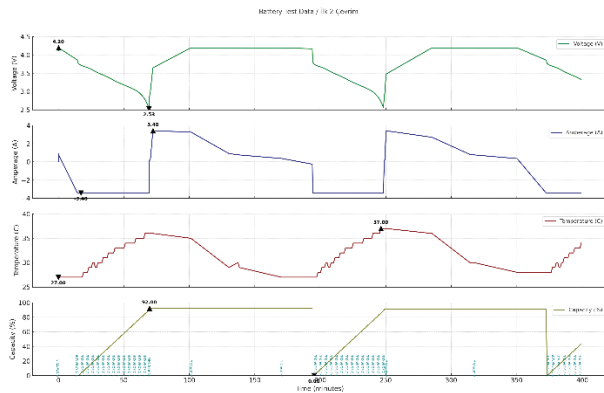
C-Code	
Chemistry (cell kimyası)	Li-ion
Number of cells (cell sayısı)	1 cell
Rating (nominal kapasite)	3400 mAh
Charge rate (şarj oranı)	1020 mA
Discharge rate(deşarj oranı)	3400 mAh
Maximum charge voltage (maksimum şarj voltajı)	4,2 V
End of discharge (deşarj bitiş voltajı)	2,5 V
Charge termination point (minimum şarj akımı)	170 mA
Target capacity (hedef kapasite)	70%

Tablo 5, bataryanın ömür testini gerçekleştiren programın adımlarını özetlemektedir. Program, şarj ve deşarj aşamaları ile diğer döngüsel işlemleri detaylı bir şekilde tanımlar. Her adım belirli bir sırayla uygulanır ve bir döngü tamamlandıktan sonra, herhangi bir hata olmadığı takdirde, bir sonraki döngü otomatik olarak başlar. Bu sayede test, tüm koşullar sağlanana kadar veya manuel olarak sonlandırılana kadar kesintisiz şekilde devam eder.

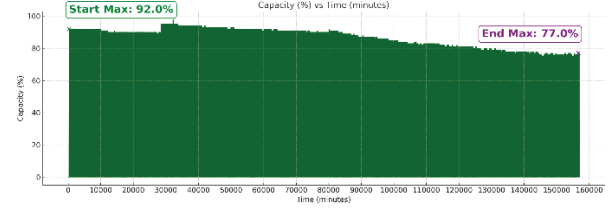
Tablo 5. Cadex Program

Program			
Step	Action	Duration	Test
0	Finished-No Action		No Test
1	Charge		No Test
2	Discharge		Cap > target
3	No Action		Loop
4	Charge	30 mins	No Test
5	Impedance		

Şekil 5'de, test edilen bataryanın şarj ve deşarj döngüleri gösterilmektedir. Bu döngüler sırasında, test sürecinin ilerlemesiyle bataryanın kapasitesinde bir değişiklik gözlemlenmektedir. Bu değişiklik, bataryanın performansındaki değişimi ve ömür sürecindeki kapasite kaybını anlamamıza yardımcı olur. Şekil 5, testin bir kısmında elde edilen verileri sunmaktadır. Öte yandan, Şekil 6, testin sonunda toplanan kapsamlı kapasite kaybı verilerini göstermektedir. Şekil 6'da, başlangıçtaki kapasite değeri %92 iken, testin sonunda %77'ye düşmüştür.



Şekil 5. Şarj-deşarj döngüsü grafiği



Şekil 6. Bataryanın başlangıç ve bitiş kapasite seviyeleri

Tablo 6'da verilen bilgilere göre, test bataryayı belirli bir akıma göre şarj ederek başlar ve batarya maksimum voltaja ulaşana kadar şarj edilmeye devam eder. Ardından, voltaj sabit tutulur ve akım, kesme akımına ulaşana kadar düşer, böylece şarj aşaması tamamlanır. Sonrasında, batarya belirtilen akıma göre deşarj edilir ve kesme voltajına ulaşana kadar devam eder. Deşarjdan sonra, batarya 30 dakika boyunca sabit akımla yeniden şarj edilir ve ardından otomatik bir DC empedans ölçümü yapılır. Eğer koşullar ve kapasite verilen bilgilerin gereksinimleriyle uyumluysa, döngü yeniden başlar ve belirtilen değerler elde edilene kadar işlem tekrarlanır.

Tablo 6. Bir tam test sırası

Test Sırası	Adım
1- Şarj (sabit akım aşaması 1.02A)	
2- Voltaj, maksimum şarj voltajına ulaştı mı?	Evet: Adım 3'e gidin Hayır: Adım 1'e gidin
3- Şarj (sabit voltaj aşaması 4.2V)	
4- Şarj akımı, 0.17A'lik kesme akımına ulaştı mı?	Evet: Adım 5'e gidin Hayır: Adım 3'e gidin
5- Deşarj (3.4A)	
6- Voltaj, 2.5V'lik kesme voltajına düştü mü?	Evet: Adım 7'ye gidin Hayır: Adım 5'e gidin
7- Şarj (sabit akım aşaması 1.02A)	
8- 30 dakika geçti mi?	Evet: Adım 9'a gidin Hayır: Adım 7'ye gidin
9- Otomatik DC Empedans Ölçümü	Başa dönün

Tablo 7'ya göre, test, her döngünün sonunda bataryanın kapasitesinin %70'in üzerinde olup olmadığı kontrol edilerek başlar. Eğer kapasite %70'in altına düşerse, test başarısız olarak işaretlenir ve sonlandırılır. Kapasite %70'in üzerinde ise ve döngü sayısı 600'ün altındaysa, bir sonraki döngüye başlanır. Test, 600 döngüye ulaşır ve kapasite hala %70'in üzerinde ise test başarılı ve tamamlanmış kabul edilir.

Tablo 7. Test tasarım akışı

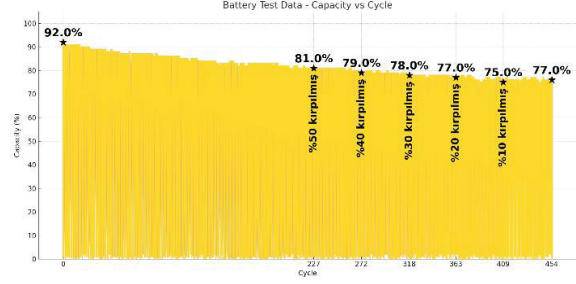
Test Sırası	Adım
1- Bir tam test sırası (Tablo I)	
2- Kapasite < 70%	Evet: Batarya normal şekilde çalışmıyor ve gereken tüm voltaj, akım ve kapasite özelliklerini karşılamıyor. (Test Başarısız) Hayır: Batarya iyi durumda ve herhangi bir arıza veya performans düşüşü belirtisi göstermiyor. (Adım 3'e gidin)
3- < 600 Test döngüsü (varsayım)	Evet: Adım 4'e gidin Hayır: Test başarıyla tamamlandı.
4- Test, bir sonraki döngüyle devam eder.	Başlangıca dön

Veri toplama planında, Cadex'te test edilen üç aynı tip batarya örneği için farklı çevrim miktarları boyunca her bir çevrimde kapasite düşümü ölçülüp kayıt altına alınmıştır. Degradasyon modelinin 600 çevrim sonucunu kısa sürede tahmin edebilmek amacıyla, elde edilen ham verilerden çeşitli kırılmış veri setleri tasarlanmıştır. Tablo 8, her bir batarya örneği için elde edilen başlangıç ham veri miktarlarını ve ham verilere %10, %20, %30, %40 ve %50 kesme işlemleri uygulandıktan sonra kalan çevrim veri sayıları göstermektedir. Örneğin, Batarya 1 için ham veri sayısı 101 olarak belirlenmişken, %10 kesme yapıldığında veri sayısı 90'a düşmekte, %20 kesme ile ise bu sayı 80'e inmektedir. Benzer şekilde, diğer batarya örneklerinde de başlangıç verilerinde çeşitli kesintiler uygulanarak kalan veri sayıları elde edilmiştir.

Tablo 8. Her bir batarya için kırılma oranına göre veri sayıları

Numune	Ham Data	10%	20%	30%	40%	50%
Batarya 1	101	90	80	70	60	50
Batarya 2	188	169	150	132	113	94
Batarya 3	454	409	363	318	272	227

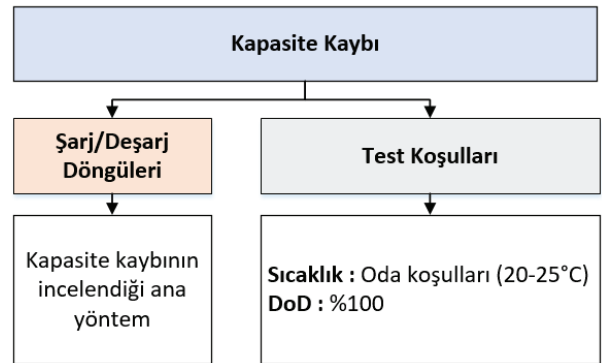
Şekil 7'de, batarya test sürecinde elde edilen ham veriler üzerinden uygulanan farklı kırılma oranları (%10, %20, %30, %40 ve %50) sonrasında ilgili çevrim verileriyle elde edilen kapasite değerleri gösterilmektedir. Her bir kırılma oranı için kapasite düşüşü grafikte ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 7. Kırılmış veri setleri kapasite kaybı grafiği

2.4. Model analizi ve arıza modu tanımı

Bu çalışmada, bataryanın yaşlanmasına etki eden ana faktörler şarj - deşarj döngü sayısı, Deşarj Derinliği (DoD)'dir. Bu faktörler, bataryanın ömrünü etkileyen ve performansını zamanla düşüren önemli parametrelerdir. Şarj-deşarj döngü sayısı arttıkça bataryanın kapasitesinde azalma gözlemlenir. Yüksek Deşarj Derinliği (DoD) bataryanın daha fazla enerji kullanmasına neden olur ve bu da ömrünü kısaltır. Bu çalışmada, şarj ve deşarj döngüleri ile birlikte oda koşullarında sıcaklık (20-25°C) ve %100 DoD kullanılarak testler yapılmıştır. DoD, her döngüde bataryanın ne kadar deşarj olduğunu ölçer. Yüksek DoD değerleri, daha derin deşarjları gösterir ve bu da batarya içinde olumsuz kimyasal reaksiyonları tetikleyebilir. Örneğin, tam deşarj, elektrotlar arasında zararlı değişimlere yol açarak kalıcı kapasite kaybına neden olabilir. Buna karşın, düşük DoD değerleri, döngüler sırasında aşınma ve yıpranmayı azaltarak batarya ömrünü uzatır. Bu çalışma, şarj ve deşarj döngülerinin batarya üzerindeki etkilerini incelemiş ve batarya yaşlanmasının sebeplerini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Şekil 8'de, çalışmada kullanılan test koşullarının özet tablosu verilmiştir.



Şekil 8. Li-iyon batarya çalışma koşulları için belirlenen değişkenler

2.4.1 Analiz modeli tanımı

Bu çalışmada, batarya ömrü ve performansındaki değişimleri analiz edebilmek amacıyla istatistiksel modelleme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Özellikle, batarya sistemlerinde zamanla ortaya çıkan arızaları ve kapasite düşüşünü anlamak amacıyla anlamak için sıkça kullanılan 2P Weibull modeli tercih edilmiştir. Bu model, test verilerinin güvenilirlik açısından değerlendirilmesini ve sistemin zaman içerisindeki arıza olasılıklarının tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. 2P Weibull dağılımının iki parametresi vardır: η (karakteristik ömür) ve β (şekil parametresi). Bu modelin genel formu şu şekilde ifade edilir:

$$f(t; \eta; \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right) \quad (1)$$

Denklem 1'de, t arıza zamanını, η , karakteristik ömrü (ölçek parametresi), β şekil parametresini, arıza oranının eğilimini ifade eder. ($\beta=1$ kullanım ömrünü, $\beta>1$ yaşlanmayı, $\beta<1$ ise erken arızaları gösterir).

İkinci olarak, degradasyon modeli kullanılmıştır. Degradasyon modeli, bataryaların zaman içinde kapasite kaybını analiz eden bir yaklaşımdır ve bataryaların ömrü boyunca kapasite kaybını doğrusal, üssel veya başka bir fonksiyonla modelleyebilir. Bu çalışmada, Reliasoft Degradasyon Model Sihirbazı kullanılarak en uygun degradasyon modeli belirlenmiştir. Sihirbaz, Lineer, Üstel, Power ve Logaritmik dağılımlar arasından veri setine en iyi uyum sağlayan modelin doğrusal (lineer) olduğunu tespit etmiştir. Bataryalar, zamanla kapasite kaybına uğrarlar. Bu kaybın matematiksel modeli, bataryaların iç yapısına ve çalışma koşullarına bağlı olarak çeşitli fonksiyonlarla ifade edilebilir. Lineer degradasyon modeli, bataryanın kapasitesindeki kaybın, zamana doğrusal bir şekilde gerçekleştiği varsayımına dayanır. Bu model, batarya ömrü boyunca kapasite kaybının sabit bir oranda olduğunu öngörür. Lineer Degradasyon modelinin matematiksel formülü şu şekilde ifade edilebilir:

$$C(t) = C_0 - k \cdot t \quad (2)$$

Denklem 2'de, $C(t)$ zaman t 'deki kapasite, C_0 başlangıç kapasitesi ve k kapasite kaybı hızıdır. Bu analizde bataryaların zaman içerisinde ne kadar ve ne hızda kapasite kaybı yaşadığı incelenmiştir. Veri setlerinin analizi, ham ve kırılmış veri setleri üzerinde yapılmıştır. Kırılmış veri setleri, ham verilerin sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında azaltılmasıyla oluşturulmuştur. Kırılmış veri setlerinin Degradasyon modelinde hesaplanan arıza zamanları, 2P Weibull analizi ile işlenmiş ve kontur grafiği oluşturulmuştur. Kontur grafiği, η (karakteristik ömür) ve β (şekil parametresi) değerlerinin %95 güven aralığındaki dağılımını göstererek modelin güvenilirliğini görsel olarak değerlendirmemizi sağlar. Bu grafik, özellikle modelin parametrelerinin veriye ne kadar uyum sağladığını göstermektedir. Bu aşamada, hızlandırılmış ömür testi uygulanarak, kırılmış verilerle elde edilen η değerlerinin, ham verilerle elde edilen η değerleriyle %95

güven aralığında benzer olduğunu ispatlamak amaçlanmıştır. Ayrıca, β parametresi, arıza fiziğini ve bataryanın arıza oranını temsil ettiğinden hem kırılmış hem de ham veriler için β parametresinin tutarlı bir şekilde elde edilmesi beklenmiştir. Bu doğrultuda, modelin doğruluğunu test etme süreci tamamlanmıştır. Modelin doğruluğu, kırılmış veri setleri ile yapılan analizlerle değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, hızlandırılmış yaşlanma testlerinin batarya ömrü üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

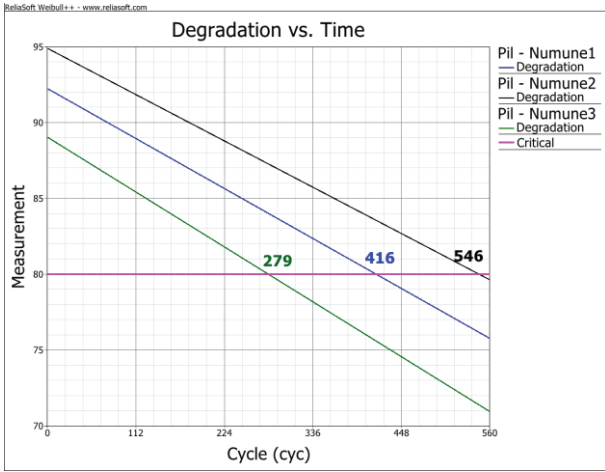
2.4.2 Analiz sonuçları

Şekil 9, bataryaların zaman içindeki degradasyonunu ve test edilen Li-ion bataryalarının β (beta) ile η (eta) parametrelerini göstermektedir. Beta, bataryanın arızalanma hızını ve arıza fiziğini temsil eden önemli bir parametredir. Yüksek beta değeri, bataryanın hızla arızalanma eğiliminde olduğunu, düşük beta değeri ise daha stabil bir performans sergilediğini gösterir. Bu araştırma kapsamında elde edilen $\beta = 2.863$ değeri, bataryanın hızla kapasite kaybedeceğini ve daha dik bir arıza eğrisine sahip olacağını göstermektedir. Eta, bataryanın karakteristik ömrünü belirten bir parametre olup, kapasite kaybının zaman içinde nasıl değişeceğini gösterir. Spesifik olarak, eta değeri, numunelerin %63,2'sinin arızalanma zamanını ifade eder. Yüksek eta değeri, bataryanın daha uzun ömre sahip olduğunu, düşük eta değeri ise bataryanın daha kısa sürede arızalanacağını gösterir. Batarya 1 için elde edilen $\eta = 468,42$ çevrim, bataryanın kapasite kaybının bu çevrimden sonra belirgin şekilde hızlanacağı ve yaklaşık bu çevrimde arızalanma noktasına yaklaşacağı anlamına gelmektedir.

Results Report	
Report Type	Degradation Results
User Info	
Name	26029280 26029280
Company	
Date	5.04.2025
Parameters	
Distribution	Weibull 2P
Analysis	RRX
CB Method	FM
Ranking	MED
Beta	2,862932
Eta (cyc)	468,420398
LK Value	-18,682134
Rho	0,9997
Fail \ Susp	3 \ 0
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=2,149311	CV Eta Beta=-21,143174
CV Eta Beta=-21,143174	Var-Eta=11755,672055

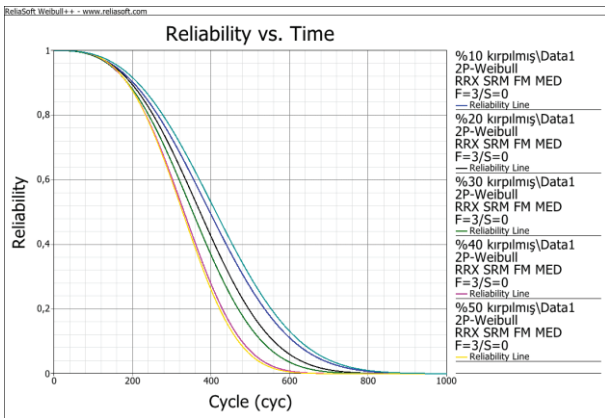
Şekil 9. Eta ve Beta parametreleri için analiz sonuçları

Şekil 10'daki grafikte, batarya degradasyonlarının zamanla nasıl değiştiği gösterilmektedir. Grafikte pembe renkli doğru, bataryanın arızalı kabul edileceği kritik kapasite seviyesini göstermekte olup, bu seviye 70 olarak belirlenmiş olsa da güven marjı bırakmak amacıyla çalışma kapsamında 80 olarak kabul edilmiştir. Grafikte görülen bataryaların sırasıyla 416, 546 ve 279 çevrimlerinde arızalanacağı modelde hesaplanmıştır.



Şekil 10. Ham veri degradasyon vs. zaman grafiği

Şekil 11’de, ham veri ve %10, %20, %30, %40, %50 kırma oranlarına sahip veri setlerinin Reliability vs Time grafiklerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Her bir veri seti için elde edilen beta (β) ve eta (η) değerleri de gösterilmiştir. Beta değerleri incelendiğinde, veri kırma oranı arttıkça beta değeri genellikle artmaktadır. Ham Veri ($\beta = 2.86$) ile %10 kırma ($\beta = 2.79$) değerinin birbirine yakın olduğu görülmekle birlikte %50 kırma ($\beta = 3.33$) değeri belirgin bir şekilde daha yüksek çıkmaktadır. Bu, veri setinde daha fazla kırma yapıldıkça bataryanın daha hızlı arızalanacağı ve kapasite kaybının daha hızlı gerçekleşeceği sonucuna ulaşılmaktadır; dolayısıyla yanılma payının artması beklenmektedir. Eta değeri incelendiğinde, kırma oranı arttıkça eta değeri azalmaktadır. Ham Veri ($\eta = 468.42$ çevrim) ile %10 kırma ($\eta = 452.42$ çevrim) arasındaki fark az olmakla birlikte, %50 kırma ($\eta = 365.73$ çevrim) değerinde belirgin bir azalma görülmektedir. Bu durum, kırma oranı arttıkça, bataryanın daha hızlı kapasite kaybı yaşayacağı değerleri üzerinden istatistiksel fark analizi yapılması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 11. Tüm veri setleri reliability vs. zaman grafiği

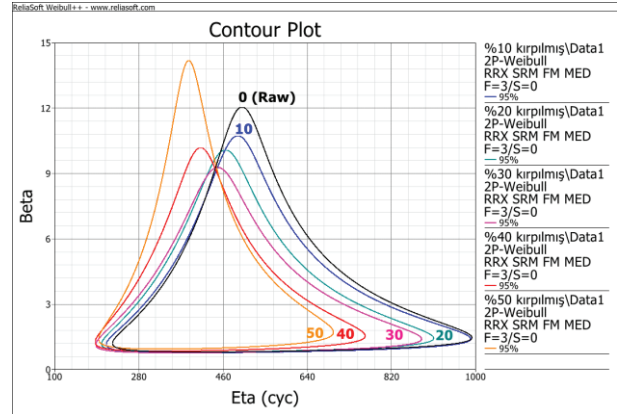
2.5 Model doğrulama

Model doğrulama aşamasında, ReliaSoft yazılımı kullanılarak %10, %20, %30, %40 ve %50 kırılmış veri setleri ile ham veri seti üzerinden degradasyon modelinin hesapladığı arıza zamanları elde edilmiştir. Bu verilerle yapılan 2P Weibull analizi, Şekil 12’de gösterilmiştir.

State F or S	Time to F or S (cyc)	Subset ID 1
F	416,0612467	Battery - Sample 1
F	546,4098585	Battery - Sample 2
F	279,6521062	Battery - Sample 3

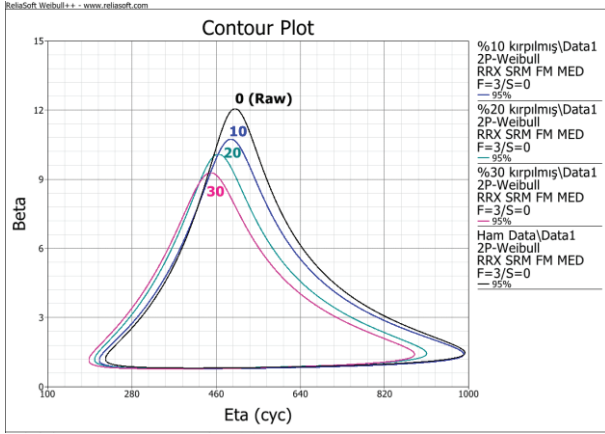
Şekil 12. Modelin hesapladığı arıza zamanı verilerinin 2P Weibull analizine aktarılması

Şekil 13’de, η (karakteristik ömür) ve β (şekil parametresi) değerlerinin %95 güven aralığındaki dağılımı gösterilmiştir. Bu grafik, özellikle modelin parametrelerinin ham veri ile benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Hızlandırılmış ömür testi yapılması amaçlandığı için, kırılmış veri ile elde edilen η değerlerinin, ham verilerle elde edilen η değerleriyle benzerlik göstermesi sağlanmak istenmiştir. Ayrıca, β parametresi, arıza fiziyini ve bataryanın arıza oranını temsil ettiğinden, β parametresinin hem kırılmış hem de ham veriler için benzer sonuçlar vermesi beklenmiştir.



Şekil 13. Kontur grafiğinde %50’ye kadar azaltılan verilerin durumu

Şekil 14’de verilerin %30’a kadar azaltılmasının beta ve eta değerleri açısından %95 güven aralığında ham verilerle istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmadığı gösterilmiştir. Test süresindeki %30’luk azalış, tam döngü testi sonuçlarının doğru bir şekilde simüle etmektedir.



Şekil 14. %30'a kadar azaltılan veri setleri

Tablo 9'da Ham, %10 kırılmış, %20 kırılmış ve %30 kırılmış veri setlerinin %95 güven aralığında Weibull dağılımının karakteristik ömür parametresi olarak tanımlanan eta değerinin aralığı verilmektedir. Kapasite kaybının zamanla değişimini ilişkilendiren bu analizde, farklı veri setlerine ait eta aralıklarının %95 güven düzeyinde örtüşmesi, kapasite kaybı açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir. Bu durum, hipotez testi yaklaşımıyla değerlendirildiğinde, veri setleri arasında güvenilirlik açısından anlamlı bir fark olmadığı sonucunu desteklemektedir. Bu hesaplama, modelin tutarlılığını pekiştirmekte olup, %30'a kadar kısaltılmış ömür testinin Degradasyon modeli ile mevcut ömür testini simüle ettiğini, %95 güvenle doğrulamaktadır.

Confidence Limits:	Lower:	5,00%	Upper	95,00%
---------------------------	--------	-------	-------	--------

Estimates and Confidence Bounds for Distribution Parameters				
Data Set	Parameter	Estimate	Lower Limit	Upper Limit
0% (Raw Data)	Eta	468,42	320,10	685,46
10%	Eta	452,43	308,24	664,06
20%	Eta	421,49	295,52	601,15
30%	Eta	399,66	283,57	563,28

Tablo 9. Ham, %10 kırılmış, %20 kırılmış ve %30 kırılmış veri setlerinin %95 aralığındaki karakteristik ömür parametre (Eta) değerleri

3. Sonuçlar

Bu çalışma, batarya ömrü ve performansını analiz etmeye odaklanarak, ömür testlerini hızlandırmak amacıyla 2P Weibull modeli ve degradasyon modelini kullanarak bir yöntem önermektedir. Weibull modelinin β (şekil parametresi) ve η (karakteristik ömür) parametreleri, bataryaların arıza eğilimlerini ve kapasite kaybını doğru bir şekilde tahmin etmemizi sağlamıştır. Degradasyon modeli ise bataryaların zaman içinde kapasite kaybını doğrusal bir şekilde modelleyerek bu kaybın hızını belirlemiştir. Klasik ömür testleriyle karşılaştırıldığında, bu çalışmada önerilen yaklaşım, batarya ömrü testlerini %30 oranında kısaltarak benzer sonuçlara ulaşmayı başarmaktadır. Kırılmış veri setleri kullanılarak yapılan analizlerde, Weibull analizi, ham verilerin %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında azaltılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, eta ve beta değerleri için istatistiksel fark testi uygulamak amacıyla bir kontur grafiği kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, verilerin %30'a kadar olan azaltılmış setlerinin, %95 güven aralığında ham veriden istatistiksel olarak farklı olmadığı görülmüştür. Bu bulgu, kırılmış veri setlerinin güvenilirliğini ve geçerliliğini doğrulamaktadır. Test sürelerinin %30 oranında kısaltılması, batarya ömrü tahminlerini daha kısa sürede elde edebilmemizi sağlamaktadır ve bu da endüstriyel süreçlerde zaman ve kaynak tasarrufu açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım veri analiz süreçlerinin optimizasyonunu desteklemektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, batarya performans değerlendirmelerinde hem hızlı hem de güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Teşekkür

Araştırma çalışmalarımıza sağladığı test imkanları ve değerli katkıları için BEKO şirketine teşekkürlerimizi sunarız. Şirketimizin bu süreçteki desteği, elde ettiğimiz bulguların doğruluğunu ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırmış, aynı zamanda araştırma sürecimiz boyunca sunduğu teşvik edici yaklaşım ve sürekli desteği, çalışmanın başarısında önemli rol oynamıştır.

Kaynaklar

- [1] K. C. Sezer ve G. Basmacı, "Şarj edilebilir pillere genel bakış", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, cilt 10, no. 1, ss. 297–309, 2022.
- [2] J. Baker, "New technology and possible advances in energy storage," *Energy Policy*, cilt 36, no. 12, ss. 4368–4373, 2008.
- [3] L. Zheng, S. Zhang, H. Huang, R. Liu, M. Cai, Y. Bian, ... ve H. Du, "Artificial intelligence-driven rechargeable batteries in multiple fields of development and application towards energy storage," *Journal of Energy Storage*, cilt 73, 108926, 2023.
- [4] H. Cho, J. Kim, M. Kim, H. An, K. Min, ve K. Park, "A review of problems and solutions in Ni-rich cathode-based Li-

ion batteries from two research aspects: Experimental studies and computational insights," *Journal of Power Sources*, cilt 597, 234132, 2024.

[5] N. Sharmili, R. Nagi, ve P. Wang, "A review of research in the Li-ion battery production and reverse supply chains," *Journal of Energy Storage*, cilt 68, 107622, 2023.

[6] K. P. Lijesh ve M. M. Khonsari, "A thermodynamic approach for characterizing the degradation of Li-ion batteries," *Journal of Energy Storage*, cilt 82, 110565, 2024.

[7] R. Jilte, A. Afzal, S. A. Khan, M. Asif, E. P. Venkatesan, ve A. Munimathan, "Cooling performance of a Li-ion cylindrical battery pack with liquid circulating pipes embedded in phase change material," *Journal of Energy Storage*, cilt 87, 111335, 2024.

[8] Y. Li, X. Gao, H. Wang, G. J. Offer, S. Yang, Z. Zhao, ve M. Ouyang, "Direct venting during fast charging of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, cilt 592, 233926, 2024.

[9] W. Vermeer, G. R. C. Mouli, ve P. Bauer, "A comprehensive review on the characteristics and modeling of lithium-ion battery aging," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, cilt 8, no. 2, ss. 2205–2232, 2021.

[10] C. Kupper, B. Weißhar, S. Reißmann, ve W. G. Bessler, "End-of-life prediction of a lithium-ion battery cell based on mechanistic aging models of the graphite electrode," *Journal of The Electrochemical Society*, cilt 165, no. 14, ss. A3468–A3480, 2018.

[11] M. S. D. Darma, M. Lang, K. Kleiner, L. Mereacre, V. Liebau, F. Fauth, ... ve H. Ehrenberg, "The influence of cycling temperature and cycling rate on the phase specific degradation of a positive electrode in lithium ion batteries: A post mortem analysis," *Journal of Power Sources*, cilt 327, ss. 714–725, 2016.

[12] S. E. Li, B. Wang, H. Peng, ve X. Hu, "An electrochemistry-based impedance model for lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, cilt 258, ss. 9–18, 2014.

[13] O. Mekan, M. Gossen, ve K. P. Birke, "Variation in capacity aging trend of lithium-ion cells regarding sudden death spread," *Energy Reports*, cilt 11, ss. 2003–2010, 2024.

[14] J. M. Reniers, G. Mulder, ve D. A. Howey, "Review and performance comparison of mechanical-chemical degradation models for lithium-ion batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, cilt 166, no. 14, ss. A3189–A3200, 2019.

[15] M. Petit, E. Prada, ve V. Sauvant-Moynot, "Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime," *Applied Energy*, cilt 172, ss. 398–407, 2016.

[16] M. Schimpe, M. E. von Kuepach, M. Naumann, H. C. Hesse, K. Smith, ve A. Jossen, "Comprehensive modeling of temperature-dependent degradation mechanisms in lithium iron

phosphate batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, cilt 165, no. 2, ss. A181, 2018.

[17] X. Han, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, Y. Zheng, and Z. Li, "A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification," *J. Power Sources*, vol. 251, pp. 38–54, Apr. 2014.

[18] Y. Li, W. Guo, D. I. Stroe, H. Zhao, P. K. Kristensen, L. R. Jensen, *et al.*, "Evolution of aging mechanisms and performance degradation of lithium-ion battery from moderate to severe capacity loss scenarios," *Chem. Eng. J.*, vol. 498, p. 155588, 2024.

[19] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, Nov. 2013.

[20] Hu, X., Che, Y., Lin, X., & Onori, S. (2020). Battery health prediction using fusion-based feature selection and machine learning. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 382-398.

[21] S. S. Madani, Y. Shabeer, F. Allard, M. Fowler, C. Ziebert, Z. Wang, *et al.*, "A comprehensive review on lithium-ion battery lifetime prediction and aging mechanism analysis," *Batteries*, vol. 11, no. 4, p. 127, 2025.

[22] Y. Wu, H. Zhao, Y. Wang, R. Li, and Y. Zhou, "Research on life cycle SOC estimation method of lithium-ion battery oriented to decoupling temperature," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4182–4195, 2022.

[23] X. Ren, T. Sun, S. Mao, Y. Zheng, X. Han, and M. Ouyang, "Accelerated aging protocols design for Li-ion batteries based on equivalence of the degradation mechanisms," *J. Energy Storage*, vol. 99, p. 113386, 2024.

[24] S. Paarmann *et al.*, "Short-Term Tests, Long-Term Predictions – Accelerating Ageing Characterisation of Lithium-Ion Batteries," *Batteries & Supercaps*, vol. 7, no. 11, Art. no. e202300594, Nov. 2024.

[25] A. Lanubile, P. Bosoni, G. Pozzato, A. Allam, M. Acquarone, and S. Onori, "Domain knowledge-guided machine learning framework for state of health estimation in Lithium-ion batteries," *Communications Engineering*, vol. 3, no. 1, Art. no. 168, Nov. 2024.

[26] K. Fricke, R. Nascimento, M. Corbetta, C. S. Kulkarni, and F. Viana, "Accelerated life testing dataset for lithium-ion batteries with constant and variable loading conditions," *Int. J. Progn. Health Manag.*, vol. 14, no. 2, Dec. 2023, doi: 10.36001/ijphm.2023.v14i2.3587.

[27] R. Li, L. Bao, L. Chen, C. Zha, J. Dong, N. Qi, R. Tang, Y. Lu, M. Wang, R. Huang, K. Yan, Y. Su, and F. Wu, "Accelerated aging of lithium-ion batteries: Bridging battery aging analysis and operational lifetime prediction," *eTransportation*, vol. 17, p. 100194, 2023, doi: 10.1016/j.etrans.2023.100194.

[28] ReliSoft, *Reliability Analysis Software*. [Çevrimiçi].
Mevcut: <http://www.reliasoft.com>. [Erişim: Aralık 05, 2024].

[29] Cadex Electronics Inc., “Cadex C8000 Battery Analyzer.”
[Online]. Available: <https://www.cadex.com/products/c8000>.
[Accessed: Dec. 5, 2024].

Özgeçmişler



Cansu İçöz, 2019 yılında Yeditepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Lisans eğitimi süresince kontrol sistemleri üzerine yoğunlaştı. Mezuniyetinin ardından, aynı yıl Beko Elektronik İşletmesi Test ve Sertifikasyon Merkezi'nde Proje Mühendisi olarak profesyonel kariyerine başladı. 2021 yılında Kalite Güvence Yöneticiliği birimine geçerek önce Uzman Mühendis, ardından Kıdemli Uzman Mühendis pozisyonlarında görev aldı. Bu süreçte kalite süreçleri konularında aktif rol üstlendi. Yüksek lisans eğitimini Yeditepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği programında tamamladı. Akademik çalışmalarında Lityum-iyon bataryalar üzerine odaklanarak, özellikle Batarya Yönetim Sistemleri (BMS) ve şarj tahmin algoritmaları kapsamında Kalman Filtreleme yöntemleri üzerine araştırmalar yürüttü. Şu anda, Beko Kurutma Makinesi İşletmesi bünyesinde kalite süreçleri alanında çalışmalarını sürdürmektedir.



Mehmet Aksoy, 1985 yılında Tekirdağ'da doğdu. 2010 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektrik&Elektronik Mühendisliği bölümünden lisans derecesi ile mezun oldu. 2022 yılından itibaren Beko'da Merkez Arge Test & Sertifikasyon bölümünde Reliability Mühendisi olarak görev yapmaktadır. İlgi alanları arasında yenilenebilir enerji sistemleri, enerji depolama teknolojileri, lityum-iyon piller ve batarya yönetim sistemleri yer almaktadır.

Özgeçmişler



Çiğdem Ezgi Arer, 1994 yılında Türkiye’de doğdu. 2017 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden lisans derecesi ile mezun oldu.

Kariyerine Beko’da Kurutucu Ar-Ge departmanında Sistem Tasarım Mühendisi olarak başladı ve burada ısı pompalı kurutucuya yönelik bir patent yayımladı. 2019-2022 yılları arasında Küçük Ev Aletleri departmanında Ürün Değerlendirme Uzmanı olarak görev yaptı; bu süreçte güvenilirlik, Altı Sigma ve FMEA metodolojilerine odaklandı. Bu alanlardaki uzmanlığı sayesinde, şu anda Beko Genel Merkezi’nde Merkezi Kalite departmanında Kıdemli Lider olarak görev yapmaktadır. Bu görev kapsamında Güvenilirlik, Altı Sigma, FMEA ve İleri Veri Analitiği konularında eğitim, proje koçluğu ve yol haritası geliştirme faaliyetlerini yürütmektedir.

Çiğdem Ezgi Arer; Altı Sigma Kara Kuşak (Black Belt) ve Güvenilirlik Şampiyonu (Reliability Champion) gibi sertifikalara sahiptir. Güvenilirlik, Altı Sigma, FMEA ve İleri Veri Analitiği alanlarında çok sayıda projeye liderlik etmiştir. “Ticari Üründe Güvenilirlik ve Yaşam Döngüsü Yönetimi” başlıklı makalesi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası tarafından yayımlanan Mühendis ve Makina dergisinde yer almıştır.