AZ ELEKTROMOS AUTÓBUSZOKBAN HASZNÁLT AKKUMULÁTOROK DEGRADÁCIÓJÁNAK HATÁSA A JÁRMŰVEK TELJES ÉLETTARTAMÁRA

Kruchina Vince[1], Tamás Péter[2], Illés Béla[3], Sárközi György Tibor[4]
[1]okl. energetikai közgazdász, PhD hallgató, [2,3]egyetemi tanár,
[4]Prof. hc. Dr., közlekedési szakértő
[1,2,3,4]Logisztikai Intézet, Gépészmérnöki és Informatikai Kar
[1]vince.kruchina@student.uni-miskolc.hu, [2]tamas.peter@uni-miskolc.hu,
[3]bela.illes@uni-miskolc.hu, [4]gyorgy.tibor.sarkozi@uni-miskolc.hu

ABSTRACT

Az elektromos járművek (Electric Vehicles – EV's) elterjedésében fontos szerepet játszott az, hogy karbon lábnyomuk sokkal kisebb, mint a belsőégésű motorral működő társaiké. Ez a tendencia érvényesül a hazai közösségi közlekedésben is, az elektromos autóbuszok (Battery Electric Bus – BEB) fokozatosan beépülnek a jelentős, személyszállítással foglalkozó operátorok járműparkjába. A teljes élettartam költség (total cost of owneship -TCO) megítélésében a hajtáslánca integrált – jellemzően litium-ion - akkumulátorok mindenkori ára, kapacitása, életciklusa és degradációja játszik fontos szerepet, tekintettel arra is, hogy az akkumulátorok második életciklusa (second life) és újra hasznosítása (reuse) jelentősen javíthatja a TCO értékét. A degradációs folyamat nyomonkövetése és mérése erre tekintettel a flottát üzemeltető közlekedési szolgáltatók számára is jelentőséggel bír. A szakcikk a Volánbusz Zrt. ezzel kapcsolatos stratégiáját és mérési eredményeit mutatja be.

1. AZ ELEKTROMOS JÁRMÜVEK TÉRHÓDÍTÁSA A KÖZÖSSÉGI KÖZLEKEDÉSBEN

Az elektromos járművek (Electric Vehicles – EV's) – bár már nagyon korán megjelentek a közúti közlekedésben – igazán a 2020-as évek elején robbantak be a hazai közösségi közlekedésben kialakult flottákban. Elterjedésükben fontos szerepet játszott az, hogy karbon lábnyomuk sokkal kisebb, mint a belsőégésű motorral működő társaiké, és így az Európai Unió klímavédelmi erőfeszítéseinek nyomán kialakult jogszabályoknak és környezetvédelm elvárásoknak megfelelnek.

Az elektromos autóbuszok (Battery Electric Bus – BEB) fokozatosan beépülnek a jelentős személyszállítással foglalkozó operátorok járműparkjába [1], jellemzően vegyes flották [2] kialakulásához vezetve. A fosszilis energiával működő autóbuszok megtartása a flottákban elsősorban az elektromos járművek hatótávolságával függ össze, és ez határozza meg azokat a fordatípusokat, amelyekben az akkumulátorok kapacitása és töltési módja figyelembe vételével biztonságosan tudják teljesíteni a menetrendi távolságot. [3]

A hazai helyközi autóbuszközlekedés mellett az elővárosi és helyi közösségi közlekedésben domináns szerepet játszó Volánbusz Zrt. járműparkjában a 2000-es évek elejétől kezdve fokozatosan emelkedik az elektromos autóbuszok száma. [4-8]

2. AZ ELEKTROMOS JÁRMŰVEK TELJES ÉLETCIKLUS KÖLTSÉGÉNEK SZÁMÍTÁSA

A teljes életciklus költség, amelynek elnevezése az angol nyelvű szakirodalomban "Total Cost of Ownership", és rövidítése TCO, alapvetően a

jármű megszerzésére fordított tőkekiadások (Capital Expenses, azaz CAPEX) és üzemeltetési költségek (Operation Expenses, azaz OPEX) összege. A TCO számítása szempontjából lényeges, hogy az adott jármű üzemeltetését a vállakozás milyen élettartamre tervezi, és ezen időtartam alatt milyen változásokat prognosztizál az üzemeltetési költségek tekintetében. [9-11]

2.1 Az elektromos járművek beszerzési árára vonatkozó prognózisok

Az elektromos autóbuszok beszerzési ára jelenleg még jelentősen drágább, mint a belső égésű motorral működő társaiké. Az CAPEX-et növeli, hogy ki kell alakítani az akkumulátorok töltési infrastruktúráját, a töltési technológia és fordaszerkezetnek megfelelően a telephelyen, illetve megállóhelyeken vagy járati útvonalon.

A prognózisok szerint az elektromos autóbuszok ára – a beszerzési költségek mintegy 50%-át kitevő akkumulátorok árának csökkenése következtében is – várható csökken. Ez a gyártási költségeket befolyásoló technológiák fejlődésének is köszönhető. Ezek az árváltozások elsősorban a beszállítói oldal befolyásolható hatások, de jelentős tényezőként tekinthetünk rájuk a TCO számítása során.

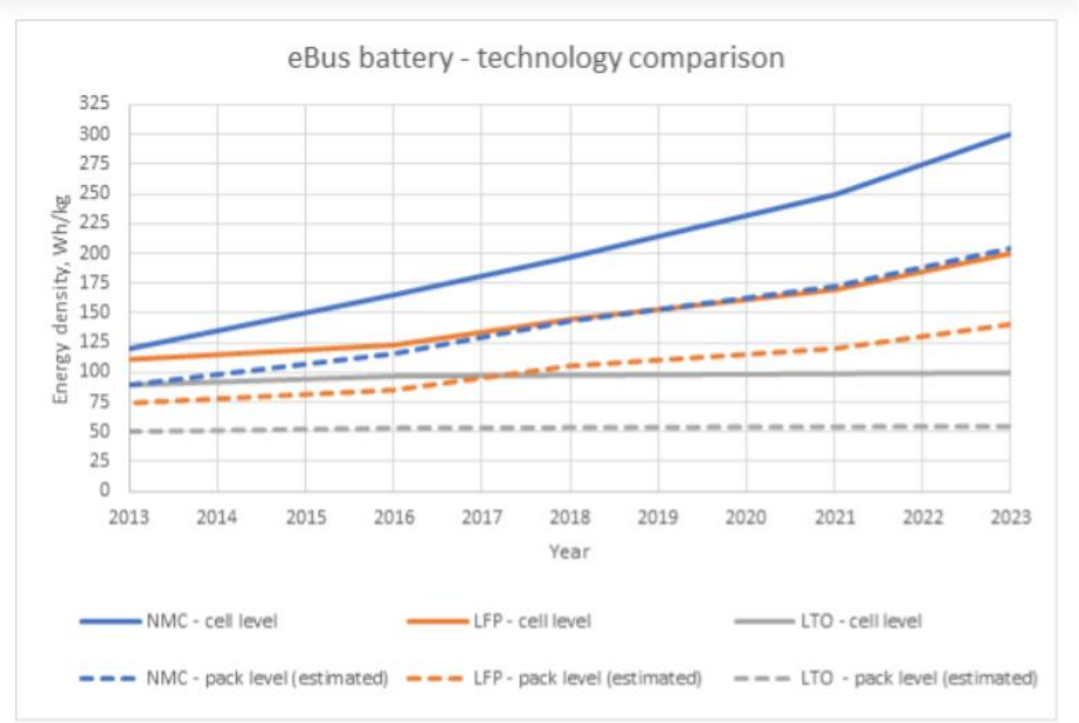
2.2 Az elektromos járművek üzemeltetési költségei

Az elektromos autóbuszok költségei között egyik lényeges tétel a hajtóanyag költsége. Erre vonatkozóan a jelenlegi energetikai helyzetben nehéz közép- ill. hosszű távú prognózist készíteni, viszont rendelkezése állnak a Volánbusz Zrt. adatain alapuló összehasonlító kiértékelések.

2.3 Az akkumulátoros elektromos autóbuszok (BEB) akkumulátoranek jellemző típusai

Mint ahogyan az élet minden szegmensében, a lítium-ion akkumulátorok az elektromos járművekben is alkalmazást nyertek, és a technológia fejlődésével megindult a verseny a kWh/km-ben mért energiafogyasztás, akkumulátorok össztömegének csökkentése és a legmagasabb energiasűrűség elérése érdekében.

A lítium-ion technológiák három legnépszerűbb típusát jelző mozaikszavak a sejtkémiában használt ásványi anyagok angol nyelvű rövidített megnevezéséből származnak, azaz LTO (Lithium Titanium Oxid) , az LFP (Lithium iron phosphate) és az NMC (Nickel Manganese Cobalt). Az 1. ábra mutatja, hogy a BMZ Poland elemzése [12] szerint az NMC az energiasűrűség, de az egységsúly és térfogat tekintetében is vezető szerepet tölt be.



1. ábra
Az NMC, LFP és LTO technológiák fejlődésének összehasonlítása az energiasűrűség tekintetében cella és akkumulátor csomag szinten. [12]

2.4 *Az elektromos járművek akkumulátorainak szerepe a TCO számításában*

Az elektromos járművek és az akkumulátorik élettartama asszinkronitást mutat. Egy hosszabb élettartamra tervezett elektromos autóbusz (BEB) használatával egy operátor akár tíz évet meghaladó időtartamban is számolhat, míg az akkumulátorok élettartamára vonatkozóan kevés érdemi információ áll rendelkezésre. Ha azonban a BEB élettartama alatt az akkumulátort cserélni kell, az olyan mértékben megnöveli a TCO-t, hogy kérdésessé teszi az elektromos jármű versenyképességét a belsőégésű társaival szemben.

3. AZ ELEKTROMOS JÁRMŰVEK AKKUMULÁTORAINAK DEGRADÁCIÓJA

Az akkumulátorok degradációja számos összetett folyamat következménye, ahol a ciklikus öregedés és a naptári öregedés együttesen játszanak szerepet és a belső ellenállás növekedésével járnak. A ciklikus öregedés során az akkumulátor kapacitása csökken, főleg a töltési és kisütési ciklusok gyakoriságának növekedése miatt. Ennek hátterében az áll, hogy a belső szilárdelektrolit-interfázis réteg növekszik, az elektródok degradálódnak és ciklikus lítiumveszteség következik be. Ellenben a naptári öregedés a töltési állapot, az idő és a hőmérséklet hatására jelentkező önkisülési reakciókat írja le, ami szintén kapacitásvesztéshez vezet. Ezek a jelenségek különösen fontosak az elektromos járművek esetében, mivel az akkumulátorok jelentős degradációja növelheti az elektromos járművek teljes energiafogyasztását és az azonos vezetési ciklusban megtett kilométerenként az elektromos járművekhez kapcsolódó üvegházhatású gázkibocsátást.

ési állapot, az idő és a hőmérséklet hatására jelentkező önkisülési reakciókat írja le, ami szintén kapacitásvesztéshez vezet. Ezek a jelenségek különösen fontosak az elektromos járművek esetében, mivel az akkumulátorok jelentős degradációja növelheti az elektromos járművek teljes energiafogyasztását és az azonos vezetési ciklusban megtett kilométerenként az elektromos járművekhez kapcsolódó üvegházhatású gázkibocsátást.

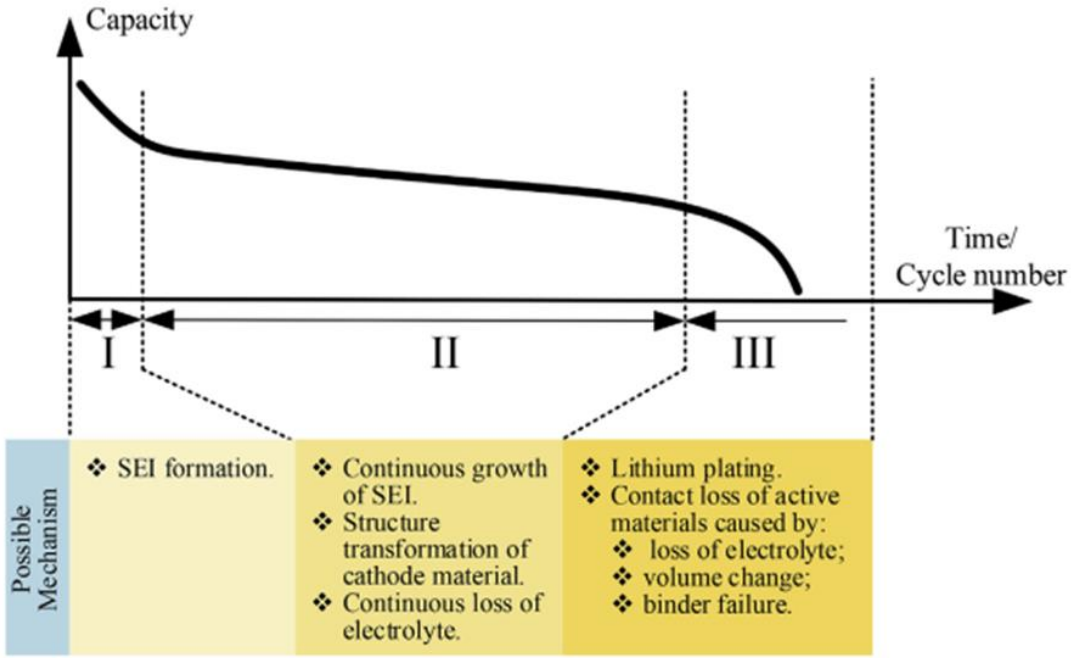
Az elektromos buszok terjedése és a hozzájuk kapcsolódó akkumulátorok élettartamának teljes mértékben való megismerése szükségessé teszi a további kutatásokat (Bloomberg New Energy Finance, 2018) [13]. Egyes tanulmányok szerint az akkumulátorok élettartama 2500-9000 töltési/kisütési ciklus között változhat (Preger et al.,2020) [14]. Erre a buszok földrajzi elhelyezkedése is hatással lehet, mivel az akkumulátorok degradációjának egyik legfontosabb oka a nem megfelelő környezeti hőmérséklet, így élettartamuk jelentősen függhet a helyi hőmérsékletviszonyoktól, vagyis az éghajlati adottságoktól.

A földrajzi elhelyezkedés hatásai nem csupán a járművek élettartamát befolyásolják, hanem az üzemeltetési költségeket is. A töltési költségek évszaktól és napszaktól függően változhatnak, és a buszok szén-dioxid kibocsátása az adott ország hálózati energia összetételétől is függ. (McGrath, 2022) [15]

Az akkumulátorok élettartam-garanciája gyártóktól függően 5 és 10 év közötti időtartamot jelent. A garanciát a gyártók a kémiai összetétel, az üzemeltetés és a töltés függvényeként határozzák meg.

Az akkumulátoros elektromos buszok üzemeltetésének és töltésének optimalizálását célzó tanulmányok 8 éves (Wang et al., 2017) [16], 9 éves (Lee et al., 2021) [17], 12 éves (Li, Lo és Xiao, 2019 [18] és 3000 töltési/kisütési ciklusú akkumulátor-élettartamot feltételeztek (Ke et al., 2020) [19]. A degradáció hatásainak részletes elemzése azonban elengedhetetlen a beruházások hosszú távú megtérülésének és a flottaüzemeltetési hatékonyságnak értékelése szempontjából. Mindezt befolyásolja több tényező, mint például a töltési sebesség, hőmérséklet, kisütési mélység, idő/kisülési ciklus, valamint az akkumulátorok tervezése, gyártása és üzemeltetési körülményei.

Amennyiben nem csak egy cella, hanem egy egész akkumulátorrendszer degradációját szeretnénk vizsgálni, elmondható, hogy a rendszer teljesítményét az egyes cellák teljesítménye határozza meg, így a cellák öregedése vezethet a rendszer öregedéséhez, viszont az az akkumulátor-rendszer teljesítményét nagyban befolyásolják a cellák közötti ellentmondások, különbségek. HAN, X. et al., 2019) [20]



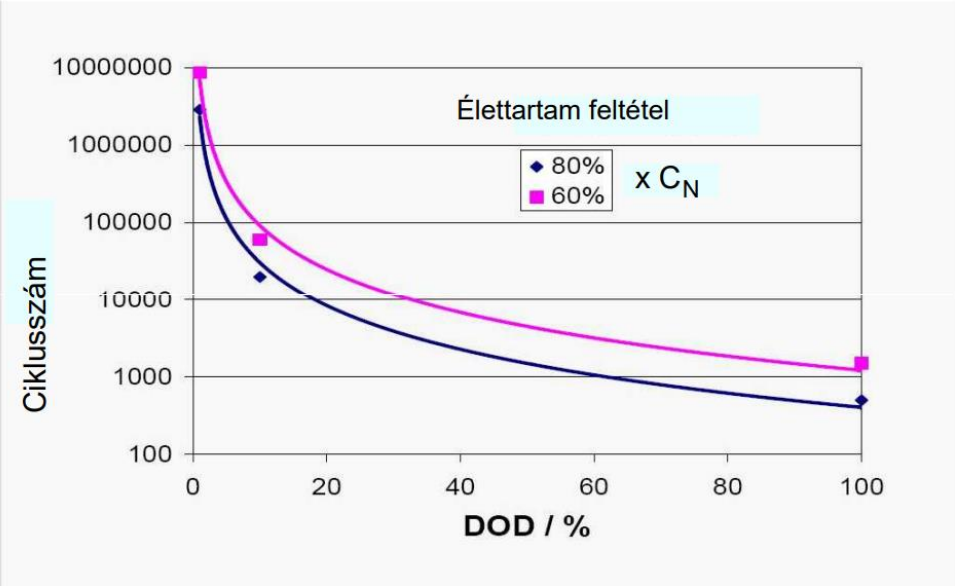
2. ábra
2. A degradáció mechanizmusa [20]

Az akkumulátorok nemlineáris öregedése három szakaszra bontható:

1. szakasz: szilárd elektrolit határréteg képződés; hirtelen, gyors degradáció
2. szakasz: további szilárd elektrolit határréteg képződés, katód anyag strukturális elváltozása, elektrolit vesztés; lineáris szakasz
3. szakasz: lítium galvanizáció, folyamatos anyagvesztés; hirtelen, gyors degradáció

Általánosságban elmondható, hogy az elektromos járművekben jelenleg használt legtöbb akkumulátor általában nemlineáris öregedési jellemzőt mutat, amely nagyjából három szakaszra osztható, ahogy azt a 2. ábrán láthatjuk. Az első szakaszban az akkumulátor kapacitása gyorsan csökken az első néhány töltési ciklus során. A második szakaszban az akkumulátor teljesítménye folyamatosan csökken a különböző reakciók miatt, amelyek az akkumulátoron belül zajlanak. A harmadik szakaszban az élettartam végéhez közeledve gyors kapacitáscsökkenés és ellenállásnövekedés következik be. Ennek oka lehet a lítiumion-készlet gyors elvesztése és/vagy az aktív anyagvesztés az elektrolit elvesztése miatt, a kötőanyag meghibásodása és a térfogatváltozás miatt.

gyors kapacitáscsökkenés és ellenállásnövekedés következik be. Ennek oka lehet a lítiumion-készlet gyors elvesztése és/vagy az aktív anyagvesztés az elektrolit elvesztése miatt, a kötőanyag meghibásodása és a térfogatváltozás miatt.



3. ábra
A töltés hatása az akkumulátor degradációjára [21]

Az akkumulátor töltöttségi állapota, azaz az SOC (State of Charge), jelentős hatással van az akkumulátor élettartamára. Az SOC értéke azt mutatja meg, mennyi a tárolt rendelkezésre álló kapacitás az akkumulátorban. Fontos megjegyezni, hogy az akkumulátor SOC értéke és a feszültsége egymástól függő értékek. Az akkumulátor SOC és az áram ismeretében az akkumulátor feszültsége levezethető. Általánosságban elmondható, hogy magasabb SOC magasabb kapocsfeszültséget eredményez, ami alacsonyabb anódpotenciált és magasabb katódpotenciált jelent. Ez felgyorsíthatja az akkumulátor öregedési folyamatait. Az alacsonyabb SOC viszont magasabb anódpotenciált és alacsonyabb katódpotenciált jelent, ami általában előnyös az akkumulátor élettartamára. Azonban túl alacsony SOC esetén az anód réz áramgyűjtőjének korróziója és a katód aktívanyag szerkezetének szétesése negatívan befolyásolhatja az akkumulátor élettartamát.

lettartamát.

ettartamát.

A DOD (Depth of Discharge), azaz a kisütés mélysége, szintén komplex hatással van az akkumulátor élettartamára. A szakmai vélemények szerint elmondható, hogy létezik egy optimális DOD az akkumulátor élettartamát tekintve, azonban ez a DOD általában túl kicsi ahhoz, hogy megfeleljen a vezetési tartományra vonatkozó követelményeknek.

Tegyük fel, hogy egy elektromos autóbusz akkumulátor 400 kW-os. A szakirodalmi ajánlás szerint ideális alkalmazás során az akkumulátorok töltöttsége 85% és 25% között mozog. A 6. ábra alapján ezen üzemeltetési paraméterek mellett az akkumulátor élettartama 8000 ciklus, míg eléri azt a degradációs értéket, amikor már nem tudja kiszolgálni a közlekedési feltételeket. Amennyiben azt feltételezzük, hogy egy busz évente 300 napot van üzemeltetve és naponta egyszer töltjük fel és sütjük ki, ez azt jelenti, hogy 8000 ciklust több, mint 26 év alatt tesz meg. Ez egy szuboptimális eset, ilyen hosszú élettartamot nem várnak el az autóbuszoktól. Amennyiben 15 éves élettartammal számolunk évi 300 napos üzemidővel, napi

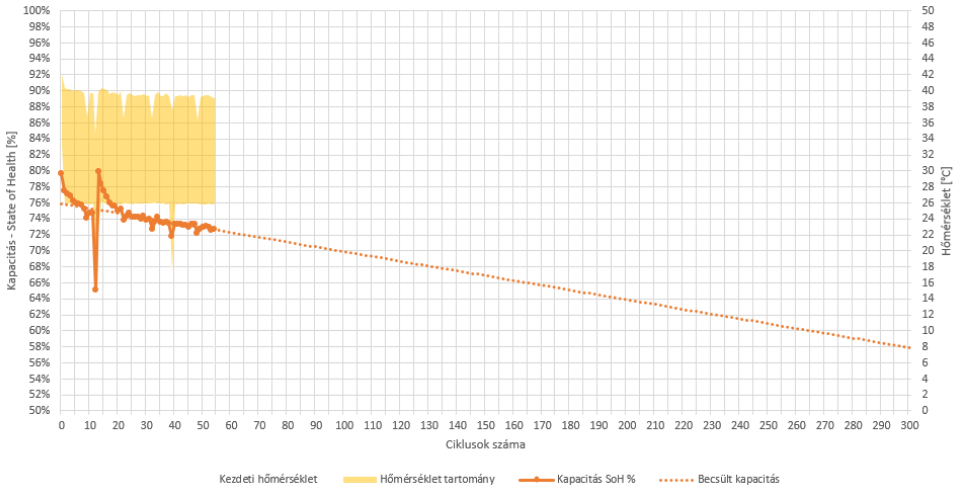
egszeri töltés-kisütéssel, úgy 4500 ciklus élettartamot várhatunk egy el elektromos autóbusz akkumulátortól. Az 1. táblázat alapján az üzemeltetés során 25% és 100% között kell tartanunk az akkumulátor töltöttségi szintet, hogy ezt az élettartamot elérhessük. Ebben az esetben az akkumlátorban 300kW telesjítmény marad, amely kapacitás 1 kWh/km fogyasztás esetén megfelel egy átlagos napi fordának. (Saját üzemeltetési tapasztalat ugyanis, hogy időjárástól függetlenül az elektormos autóbuszok fogyasztása átlagosan körülbelül 1 KWh/km. Ez a kihasználási arányt is növeli, az előbbi 60%-ról 75%-ra. Az elsődleges élettartam végén az akkumulátor kapacitása még mindig 300-320 kW, amit további alkalmazásokban, plédául tárolóként, hasonló töltöttségi körülmények között használva további 3900 ciklusig alkalmazhatunk. Ez hasonlóan évi 300 ciklussal számolva további 13 évnyi tárolási kapacitást jelent.

4. A VOLÁNBUSZ ZRT. DEGRADÁCIÓRA VONATKOZÓ MÉRÉSEI

A VOLÁNBUSZ Zrt. mint autóbuszos közösségi közlekedési közszolgáltatást végző társaság stratégiai alternatívaként már kidolgozta elektromos járműfejlesztési koncepcióját és ennek keretében autóbusz állományának jelentős fiatalítását és fejlesztését tűzte célul. Ezen járműfejlesztés mentén társaságunk már 102 db tisztán elektromos hajtású autóbuszt üzemeltet.

Az elektromobilizáció jegyében történő fejlesztés egyik fő mozgatórugója a technológiai fejlődés és a szolgáltatási színvonal növelésének igénye, az energiafelhasználás hatékonyságának javítása, valamint a károsanyag kibocsátás csökkentése mellett az, hogy a villamos energiát, mint üzemanyagot a társaság saját maga számára is meg tudja termelni, mindezzel csökkentve a fosszilis üzemanyagfelhasználásának mértékét, valamint növelve az energiabiztonságát és energiafüggetlenségét.

A saját energiatermelési képesség kialakításának vizsgálata mentén és ahhoz kapcsolódóan társaságunk kutatási célú projektet indított, melynek keretében piaci szereplőkkel és egyetemekkel együttműködve vizsgálja, hogy pl. az elektromos autóbuszokból kikerülő akkumulátorok a körforgásos működés elve mentén, másodlagos hasznosítás keretében az infrastruktúrába épített storage-ként hogyan tudják tovább szolgálni a Társaság működését és érdekeit. Ezen továbbhasználatnak a hasznossága többes. Az autóbuszokban lévő akkumulátorokat - melyek jelentős beszerzési költséggel bírnak - a gyártói és a felhasználói tapasztalatok alapján elvileg 10 évente cserélni szükséges azok kapacitásvesztése okán. Ezen gyártói garanciavállaláson túli, de működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre tudja az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, így javítva a beruházási költségek megtérülését. Az előző fejezetben láthattuk, hogy ha az akkumulátorok 15 éves optimális felhasználása esetén még lehetősége van másoldalgos felhasználásra, amely elősegíti a körforgásos gazdasági modellünk alkalmazhatóságát. A VOLÁNBUSZ Zrt. elvégzett egy akkumulátorokkal kapcsolatos degradációs mérést, amely az alábbi eredményekkel zárult.



4. ábra
Valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 1. mérés

A 4. ábra a VOLÁNBUSZ Zrt. által végeztetett használt akkumulátor teszteltetés akkumulátor mérését összegzi. Az X tengely a teljes ciklusok számát jeleníti meg. A ciklusok 0.5C töltéssel és 1.0C merítéssel kerültek elvégzésre. A bal oldali Y tengelyen az eredeti kapacitáshoz viszonyítva látható az akkumulátor megmaradt kapacitása, azaz százalékos állapota, a mérési pontokat a narancssárga pontok ábrázolják. A narancssárga szaggatott vonal az adatok lineáris extrapolációját mutatja, azaz egy becslést, hogy ugyanilyen ütemű töltés-merítés esetén milyen további kapacitásvesztés várható. (Az akkumulátorok kapacitáscsökkenése azonos körülmények között lineárisnak mondható.)

Nagyjából 60%-os megmaradt kapacitásig igaz ez a linearitás, onnantól fokozatosan erőteljesebbé válik a kapacitás csökkenése (az akkumulátor öregedése), majd egy bizonyos szintnél teljesen összeesik az. Így általában azt érdemes szem előtt tartani, hogy mikor csökken le a kapacitás 60% alá.

A tesztelés során 55 teljes ciklus került a mérés során az akkumulátorba. A tesztelt akkumulátornál a 60% alá csökkenés várhatóan a ~265. ciklusnál fog bekövetkezni, azaz az akkumulátor a mostani állapotához képest még ~210 ciklust tud. Attól, hogy 60% alá esik a megmaradt kapacitása, attól még használható marad az akkumulátor, akár 40-50%-os szintig is lehet használni, viszont a jelenlegi mérésből a 60% alatti intervallumra nem lehet becslést adni. A kimért kapacitásvesztési trendet lehet erre a szakaszra egy felső becslének venni.

210 ciklust tud. Attól, hogy 60% alá esik a megmaradt kapacitása, attól még használható marad az akkumulátor, akár 40-50%-os szintig is lehet használni, viszont a jelenlegi mérésből a 60% alatti intervallumra nem lehet becslést adni. A kimért kapacitásvesztési trendet lehet erre a szakaszra egy felső becslének venni.

egy felső becslének venni.

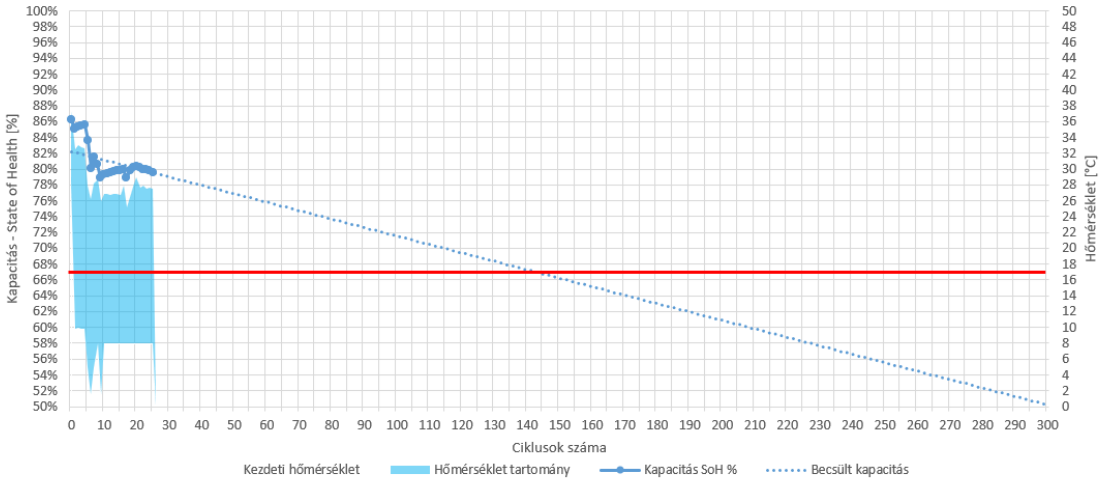
Az elvégzett mérés alapján 100 ciklus alatt ~6%-nyi kapacitást veszít az akkumulátor, így arra lehet következtetni, hogy 60%-os megmaradt kapacitásról 40%-os megmaradt kapacitásra kevesebb, mint 333 ciklusra lesz szükség. Ezek alapján ha a tesztelt akkumulátor a mostani 72.6%-os állapotáról további használatra kerül 40%-os állapotig, akkor legfeljebb ~210+333 = ~543 teljes (100%-0%-100%) merítési-töltési ciklusra lehet számítani. Ennél valószínűleg

kevesebb lesz, de erre a jelenlegi adatokból nem lehet pontosabb becslést adni. Ez abból is következik, hogy nem mindegy, hogy milyen szintre kerül feltöltésre és lemerítésre az akkumulátor. Például ha nem 100%-0%-100% merítés-töltési ciklusban történik az akkumulátor használat, hanem mondjuk 75%-25%-75%, akkor akár duplájára is lehet növelni az akkumulátor élettartamát (felére lehet csökkenteni az öregedését, kapacitásvesztését).

tosabb becslést adni. Ez abból is következik, hogy nem mindegy, hogy milyen szintre kerül feltöltésre és lemerítésre az akkumulátor. Például ha nem 100%-0%-100% merítés-töltési ciklusban történik az akkumulátor használat, hanem mondjuk 75%-25%-75%, akkor akár duplájára is lehet növelni az akkumulátor élettartamát (felére lehet csökkenteni az öregedését, kapacitásvesztését).

osabb becslést adni. Ez abból is következik, hogy nem mindegy, hogy milyen szintre kerül feltöltésre és lemerítésre az akkumulátor. Például ha nem 100%-0%-100% merítés-töltési ciklusban történik az akkumulátor használat, hanem mondjuk 75%-25%-75%, akkor akár duplájára is lehet növelni az akkumulátor élettartamát (felére lehet csökkenteni az öregedését, kapacitásvesztését).

A jobb oldali Y tengely a hőmérsékletet mutatja. A citromsárga terület pedig azt mutatja, hogy az egyes mérési ciklusok során milyen hőmérséklet tartományban volt az akkumulátor. (A mérési ciklusok során az akkumulátor javarészt 26-40°C-os tartományban üzemelt.)



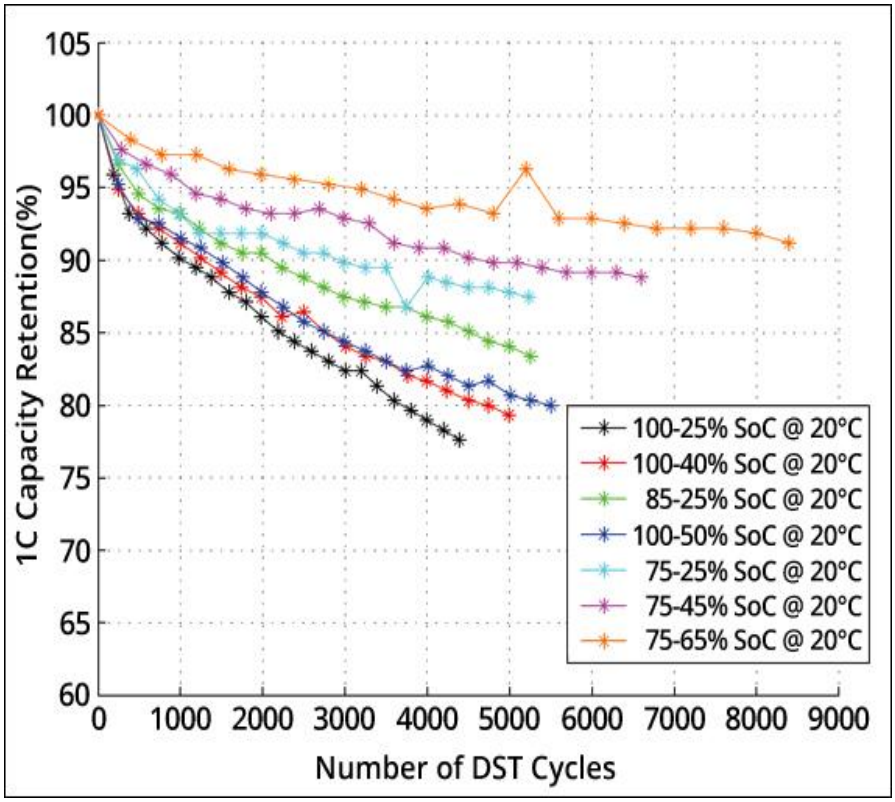
5. ábra
Valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 2. mérés

Az 5. ábra a hűtött közegben történt akkumulátor tesztelés akkumulátor mérését összegzi. A tengely jelölések és a diagram elemek ugyanazt jelentik, mint a 4. ábrán, csak a mérési értékek különbözőek.

A tesztelés során 39 teljes ciklus került az akkumulátorba. A tesztelt akkumulátornál a 60% alá történő kapacitás csökkenés körülbelül a 210. ciklusnál fog bekövetkezni, azaz az akkumulátor a mostani állapotához képest még körülbelül 170 ciklust tud. Az elvégzett mérés alapján 100 ciklus alatt ~10.6%-nyi kapacitást veszít az akkumulátor, így arra lehet következtetni, hogy 60%-os

megmaradt kapacitásról 40%-os megmaradt kapacitásra kevesebb mint 188 ciklusra lesz szükség. Ezek alapján ha a tesztelt akkumulátor a mostani 78%-os állapotáról további használatra kerül 40%-os állapotig, akkor legfeljebb ~170+188= ~358 teljes (100%-0%-100%) merítési-töltési ciklusra lehet számítani.

A grafikon világoskék területe azt mutatja, hogy az egyes mérési ciklusok során milyen hőmérséklet tartományban volt az akkumulátor. (A mérési ciklusok során az akkumulátor javarészt 8-28°C-os tartományban üzemelt.)



6. ábra
Optimális akkumulátorfelhasználás

A 6. ábra a dinamikus stressztesztet (DST) szemlélteti, amely különféle töltési és kisütési sávszélességeken mutatja a kapacitásveszteséget a Li-ion akkumulátorban. A legnagyobb kapacitásveszteség akkor fordul elő, ha egy teljesen feltöltött Li-ion akkumulátort 25%-ig (fekete) merítenek. A 85 és 25 százalék közötti (zöld) hosszabb élettartamot biztosít, mint a 100 százalékos és 50 százalékos (sötétkék) töltés. A legkisebb kapacitásveszteséget akkor lehet elérni, ha a Li-ion akkumulátort 75% -ig töltik, és 65% -ig merítenek. Ez azonban nem használja ki az akkumulátort.

A Li-ion töltése és kisütése csak részben hosszabbítja meg az akkumulátor élettartamát, de csökkenti a kihasználtságot.

- 75–65% SoC a leghosszabb ciklusidővel rendelkezik, de 10% - os akkumulátorhasználattal.
- 75–25% -os SoC 50% -os akkumulátorhasználattal.

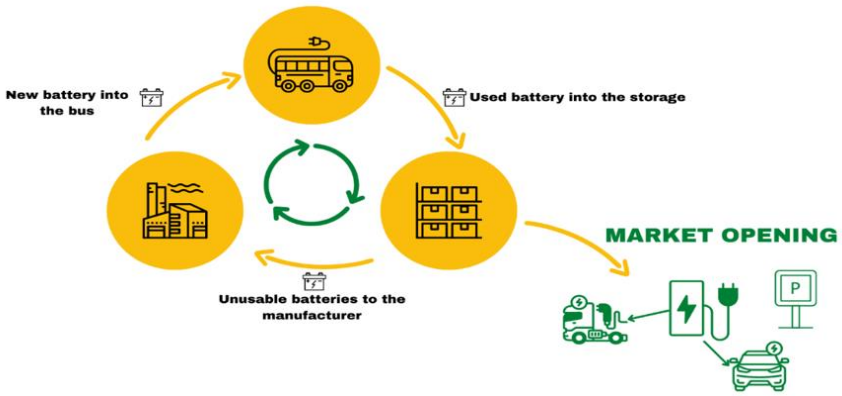
- 85–25% -os SoC, 60% -os akkumulátorhasználattal.
- 100–25% SoC; hosszú üzemidő, 75% -os akkumulátorhasználattal. Rövid életű.

1. táblázat
Optimális akkumulátorfelhasználás

	Kihasználtság	Kapacitásvesztés	Élettartam (SoH < 60%):
100-25%	75%	5%/1400 ciklus	8400 kapacitásegység
100-40%	60%	5%/2000 ciklus	9600 kapacitásegység
85-25%	60%	5%/2500 ciklus	12000 kapacitásegység
100-50%	50%	5%/2000 ciklus	9600 kapacitásegység
75-25%	50%	5%/4000 ciklus	16000 kapacitásegység
75-45%	30%	5%/5000 ciklus	12000 kapacitásegység

A mérések alapján levonható következtetések
- 20-80% SoC között a belső ellenállás nagyjából állandó, azon kívül nagyobb értékű
- A belső ellenállás az akkumulátor élete során folyamatosan nő
- Magasabb hőmérsékleten (>25°C) az akkumulátor gyorsabban öregszik (gyorsabban nő a belső ellenállása, és gyorsabban csökken a kapacitása)
- Alacsony hőmérsékleten (<10°C) az akkumulátor belső ellenállása nagyobb, használható kapacitása kisebb
- A nagyobb terhelés (magasabb C érték) jobban öregíti az akkumulátort
- A hosszú élettartam végett az akkumulátorokat 20-80% vagy 30-70% töltöttségi szint között érdemes használni

5. AZ AKKUMULÁTOROK DEGRADÁCIÓJÁN ALAPULÓ ÜZEMELTETÉSI MODELL



7. ábra
Akkumulátorok második életciklusának kialakítása

A 7. ábra azt az elképzelést mutatja be, mellyel a VOLÁNBUSZ Zrt. a járművekből kikerülő használt, üzemképes, azonban járműben történő használatra már gazdaságosan nem alkalmas akkumulátorokat további használatra fogná be, ezzel második életciklust adva az akkumulátoroknak.

A koncepció szerint a járművekben üzemelő akkumulátorok a kapacitásvesztésük okán kb. 6-8 év után kikerülnek a járművekből, azonban ahelyett, hogy hulladékká válnának, az egyes telephelyeken storageként kerülnének használatra a telephelyen megtermelésre kerülő villamos energia eltárolása érdekében. Az eltárolásra kerülő villamos energia ezáltal bármikor felhasználható.

A járművekből kikerülő, ámde működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre tudja az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, így javítva a beruházási költségek megtérülését. Ezen túlmenően a hulladékká válás időszaka is évekkel kitolható, ezzel is csökkentve a környezeti terhelést. A storage-ként funkcionáló akkumulátorok ezeken felül jövedelemtermelő képességgel is bírhatnak, hiszen a társaság a megtermelt, de felhasználásra nem kerülő villamos energiát akár értékesítheti is a lakosság, vagy piaci szereplők számára rendelkezésre bocsátott töltő infrastruktúra által.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektromos járművek (Electric Vehicles – EV's) elterjedése a közlekedésben tartós és visszafordíthatlan tendenciának tartható, amit az Európai Unió klímavédelmi erőfeszítéseinek nyomán kialakult jogszabályok és környezetvédelm elvárások is felerősítenek. A Volánbusz Zrt. autóbuszparkja már jelenleg is ún. vegyes flottának (mixed fleet) számít, a menetrendszerinti közlekedésben használt elektromos autóbuszok részaránya a jelenlegi 0,9%-ról 2032-re elérhetői az 50%-ot. Az elektromos autóbuszok üzemeltetésében egyre kiemeltebb szerepet kap az akkumulátorok kapacitása, élettartama és öregedési folyamata (degradációja). A Volánbusz Zrt. ezért már most is figyelmet szentel a fenntartható üzemeltetést jelentősen befolyásoló újrahasznosítási stratégia megvalósításának, és ezen belül a litium-ion akkumulátorok második életciklusa megtervezésének. Az akkumulátorok körforgásos modellbe illesztésének fontos előfeltétele a degradáció folyamatának pontos ismerete, ezért erre vonatkozóan saját mérések elvégzésére és a keletkező adatok folyamatos kiértékelésére kerül sor. A megszerzett tapasztalatok nagyban elősegítik a hazai személyszállítási közszolgáltatásban vezető szerepet betöltő cégcsoport környezettudatos és energiahatékony működését.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] LI, X. et al.: **How to enable electric bus adoption in cities worldwide.** World Resources Institute, Ross Center, 2019.

[2] LI, L. et al.: **Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints**. Transp. Res. C , 2019. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X18303668

[3] DIRKS, N.: **On the integration of battery electric buses into urban bus networks.** 2022.

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X22000730?via%3Dihub
[4] KRUCHINA, V.: **The industrial revolution of our age: the opportunities in the electrification of public transport buses.** Advanced Logistic Systems – Theory and Practice, Vol. 17, No. 1, pp. 21-26, 2023. https://doi.org/10.32971/als.2023.002,
[5] KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T.: **Az elektrifikáció térnyerése és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepe a fenntartható közösségi közlekedésben, I. rész**. Közlekedéstudományi Szemle, LXXIII. évf. 3. sz., 2023, 17-34. oldal, https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.3.2
[6] KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T.: **Az elektrifikáció térnyerése és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepe a fenntartható közösségi közlekedésben, II. rész.**, Közlekedéstudományi Szemle, LXXIII. évf. 4. sz., 2023. 4-12. oldal, https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.4.1
[7] KRUCHINA, V.: **The possibility of electrification in public transport bus services.** Győr, XIII. International Conference on Transport Sciences, 2023. ISBN 978-615-6443-17-5
[8] KRUCHINA, V.: **The possibility of electrification in public transport bus services.** Acta Technica Jaurinensis, 2023.
[9] HARRIS, A. et al.: **Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies**, 2018. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118306294
[10] JEFFERIES, D., GÖHLICH D.: **A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure Optimisation**, World Electric Vehicle Journal, 2020.
[11] AGER-WICK ELLINGSEN, L. et al.: **Life cycle assessment of battery electric buses**, 2022. https://www.researchgate.net/publication/364975811_Life_cycle_assessment_of_battery_electric_buses
[12] **Lithium-ion battery technology in e-buses, according to BMZ Poland**, Sustainable Bus, E-Magazine, 2021. https://www.sustainable-bus.com/news/bmz-poland-lithium-ion-battery-technology-electric-buses/
[13] Bloomberg: **E-Buses to Surge Even Faster Than EVs as Conventional Vehicles Fade**. 2018. Bloomber New Electric Finance, https://about.bnef.com/blog/e-buses-surge-even-faster-evs-conventional-vehicles-fade/
[14] PREGER, Y. et al.: **Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions**. Journal of The Electrochemical Society, 2020. https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/abae37/pdf
[15] MC. GRATH, T.: **UK battery electric bus operation: Examining battery degradation, carbon emissions and cost** , 2022. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920922002012

[16] WANG, Y. et al.: **Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis**. World Transit Research, 2017. https://www.worldtransitresearch.info/research/6514/
[17] LEE, J.: **Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations**. World Transit Research, 2021. https://www.worldtransitresearch.info/research/8698/
[18] LI, L. et al.: **Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints**. 2019. https://www.researchgate.net/publication/333532047_Mixed_bus_fleet_scheduling_under_range_and_refueling_constraints
[19] KE, J. et al.: **Optimal charging scheduling and management for a fast-charging battery electric bus system.** 2020. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554520307079
[20] HAN, X. et al.: **A review on the key issues of the lithium ion battery degradation.** 2019. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2590116819300050
[21] HOMAN, J.: **Description of a S-N Curve.** Fatec Engineering, 2018, https://www.fatec-engineering.com/2018/02/20/description-of-a-s-n-curve/