

LITIY-ION AKKUMULYATORLARINING ATROF-MUHITGA TA'SIRI: HAYOT SIKLI TAHLILI ASOSIDA MIQDORIY BAHOLASH

Tursunova Firuza

OrCID: 0009-0005-4232-7102

Tel.: +998 97-432-20-15

Annotatsiya: Maqolada litiy-ion akkumulyatorlarning atrof-muhitga ta'sirini miqdoriy baholash maqsadida soddalashtirilgan hayot sikli tahlili (Life Cycle Assessment, LCA) metodologiyasi qo'llanildi. Funktsional birlik sifatida 1 kW·soat saqlash sig'imiga ega NMC (nikel-marganets-kobalt) tipidagi akkumulyator qabul qilindi. Adabiyotlarda keltirilgan chiqindi ko'effitsiyentlari asosida issiqxona gazlari chiqindisi ($G_{iss.gaz}$), suv izi $K_{suv.izi}$ (bu biror shaxs, mahsulot, korxona yoki mamlakat tomonidan ishlab chiqarish va iste'mol qilish jarayonida sarflangan yoki ifloslangan jami chuchuk suv miqdorini o'lchovchi ekologik ko'rsatkichdir) va qayta ishlashning ekologik samarasi hisoblab chiqildi. 60 kW·soat sig'imli elektromobil akkumulyatori misolida ishlab chiqarish bosqichida o'rtacha 5,1 t CO₂ - ekvivalent chiqindi va 79,2 m³ suv sarfi aniqlandi. Qayta ishlangan xomashyodan 30% ulushda foydalanish umumiy chiqindini taxminan 15% ga kamaytirishi ko'rsatildi. Olingan natijalar akkumulyator sanoatida qayta ishlash infratuzilmasini rivojlantirish zarurligini asoslaydi.

Kalit so'zlar: litiy-ion akkumulyator; hayot sikli tahlili; issiqxona gazlari chiqindisi; suv izi; qayta ishlash; elektromobil.

KIRISH

So'nggi o'n yillikda litiy-ion akkumulyatorlarga bo'lgan talab elektromobillar sanoati va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini saqlash tizimlarining jadal rivojlanishi hisobiga bir necha barobar oshdi. Ushbu texnologiya iqlim o'zgarishiga qarshi kurashning muhim vositasi sifatida taqdim etilsa-da, uning butun hayot sikli davomida xomashyo qazib olishdan tortib chiqindiga aylanguncha atrof-muhitga ko'rsatadigan ta'siri to'liq baholanmagan.

Mavjud tadqiqotlar (Ellingsen va boshq., 2014; Romare va Dahllöf, 2017; Kelly va boshq., 2020) akkumulyator ishlab chiqarishning issiqxona gazlari chiqindisi, suv resurslaridan foydalanish va xomashyo tanqisligi bilan bog'liq muammolarni alohida-alohida ko'rib chiqadi. Biroq bu ko'rsatkichlarni bitta metodologik asosda birlashtirib, aniq sig'imdagi akkumulyator uchun amaliy hisob-kitob namunasini keltiruvchi ishlar cheklangan.

Ushbu tadqiqotning maqsadi, soddalashtirilgan LCA yondashuvi asosida litiy-ion akkumulyatorning issiqxona gazlari chiqindisi va suv izini hisoblash formulalarini ishlab chiqish, ularni tipik elektromobil akkumulyatori (60 kW·soat) misolida qo'llash va qayta ishlashning ekologik samarasini miqdoriy jihatdan baholashdir.

Tadqiqot vazifalari: hisob-kitob uchun metodologik asosni belgilash; adabiyotlardagi chiqindi ko'effitsiyentlarini tizimlashtirish; tanlangan sig'imlar uchun $G_{iss.gaz}$ va suv izini hisoblash; qayta ishlashning kamaytiruvchi ta'sirini modellashtirish.

Material va metodlar

Tadqiqot obyekti sifatida NMC (LiNiMnCoO_2) kimyoviy tarkibiga ega litiy-ion akkumulyator paketi tanlandi, chunki bu turdagi akkumulyatorlar hozirda elektromobillar sanoatida eng keng qo'llaniladi. Hisob-kitoblarning qiyoslanuvchanligini ta'minlash uchun funksional birlik sifatida 1 kW·soat saqlash sig'imi qabul qilindi (xomashyo qazib olishdan akkumulyator paketi ishlab chiqarilgunga qadar).

Tahlil quyidagi bosqichlarni qamrab oladi: (a) xomashyo (litiy, kobalt, nikel) qazib olish va boyitish; (b) katod va anod materiallarini sintez qilish; (c) o'zak va paketni yig'ish. Foydalanish bosqichi (ekspluatatsiya) va transport tahlildan chetlashtirildi, chunki ular energiya manbaining tarkibiga (elektr tarmog'i tarkibi, foydalanish rejimi) kuchli bog'liq bo'lib, alohida tadqiqot talab qiladi. Chiqindi bosqichi uchun faqat qayta ishlashning kamaytiruvchi samarasi ssenariy tarzida baholandi.

Issiqxona gazlari chiqindisini baholash uchun quyidagi umumiy tenglama qo'llanildi:

$$\sum G_{iss.gaz}^{um} = K_{i.ch.chiq}^{AKB} \cdot C_{AKB} \quad (1)$$

bu yerda: $\sum G_{iss.gaz}^{um}$ - umumiy issiqxona gazlari chiqindisi [kg $\text{CO}_{2.ekv}$];

$K_{i.ch.chiq}^{AKB}$ – akkumulyatorning ishlab chiqarish chiqindi koeffitsiyenti [kg $\text{CO}_{2.ekv}$ /kW·soat];

C_{AKB} - akkumulyator sig'imi [kW·soat].

Suv izini hisoblash uchun avval litiy karbonat ekvivalenti (LCE) talabi aniqlanadi:

$$M_{LCE} = q_{LCE} \cdot C_{AKB} \quad (2)$$

bu yerda: M_{LCE} - talab qilinadigan litiy karbonat ekvivalenti massasi (kg);

q_{LCE} - 1 kW·soat sig'im uchun LCE me'yori (kg/kW·soat).

So'ngra suv izi quyidagicha topiladi:

$$K_{suv.izi} = M_{LCE} \cdot I_{Li}^{shor} \quad (3)$$

bu yerda: $K_{suv.izi}$ - suv izi [litr];

I_{Li}^{shor} - sho'r ko'l suvidan litiy qazib olishning suv intensivligi [litr/kg LCE].

Qayta ishlashning kamaytiruvchi ta'siri quyidagi tenglama orqali modellashtirildi:

$$\sum G_{iss.gaz}^{sof} = \sum G_{iss.gaz}^{um} \cdot (1 - R \cdot \Delta K_{chiq.kam}^{qayta ishl.}) \quad (4)$$

bu yerda:

R - akkumulyatordagi qayta ishlangan (ikkinchi darajali) xomashyo ulushi (0–1 oralig'ida);

$\Delta K_{chiq.kam}^{qayta ishl.}$ - qayta ishlangan xomashyoning birlamchi xomashyoga nisbatan chiqindi koeffitsiyentining kamayish ulushi.

Hisoblashda qo'llanilgan koeffitsiyentlar ilmiy adabiyotlarda keltirilgan diapazonlarning o'rtacha qiymatlari sifatida qabul qilindi (1-jadval). Bu qiymatlar aniq zavod yoki mintaqaga bog'liq bo'lmagan, umumlashtirilgan ko'rsatkichlar sifatida ko'rib chiqilishi lozim.

1-jadval

Hisob-kitobda qo'llanilgan kirish parametrlari

Parametr	Belgilanishi	Qiymati	O'lchov birligi
Ishlab chiqarish chiqindi koeffitsiyenti	$K_{i.ch.chiq}^{AKB}$	85 (61–106)	kg $CO_{2.ekv}$ /kW·soat
Litiy karbonat ekvivalenti me'yori	q_{LCE}	0,6 (0,5–0,8)	kg/kW·soat
Sho'r ko'l litiysining suv intensivligi	I_{Li}^{shor}	2 200	litr/kg LCE
Qayta ishlangan xomashyo ulushi (ssenariy)	R	0,30	nisbiy birlik
Chiqindi koeffitsiyentining kamayishi (qayta ishlangan)	$\Delta K_{chiq.kam}^{qayta ishl.}$	0,50 (0,40–0,58)	nisbiy birlik
Kobalt tarkibi (NMC622)	mCo	0,25	kg/kW·soat

Manba: Ellingsen va boshq. (2014); Romare va Dahllöf (2017); Kelly va boshq. (2020); Ciez va Whitacre (2019) ma'lumotlari asosida tuzilgan.

NATIJALAR

Issiqxona gazlari chiqindisi hisob-kitobi. 60 kW·soat sig'imli tipik elektromobil akkumulyatori uchun (1)-formula bo'yicha hisoblash quyidagi natijani berdi:

$$\sum G_{iss.gaz}^{um} = 85 \cdot 60 = 5100 \text{ kg} \cdot CO_{2.ekv} \approx 5,1 \text{ t} \cdot CO_{2.ekv} \quad (5)$$

Bu ko'rsatkich, o'rtacha benzinli avtomobilning taxminan 20–25 ming km yurish masofasida chiqaradigan CO_2 miqdoriga taqqoslanadi, ya'ni akkumulyatorning ishlab chiqarish bosqichidagi "karbon qarzi" sezilarli darajada yuqori.

Suv izi hisob-kitobi. (2)- va (3)-formulalar bo'yicha litiy karbonat ekvivalenti talabi va suv izi hisoblandi:

$$M_{LCE} = 0,6 \cdot 60 = 36 \text{ kg} \quad (6)$$

$$K_{suv.izi} = 36 \cdot 2200 = 79200 \text{ litr} \approx 79,2 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Ya'ni bitta 60 kW·soat akkumulyator paketi uchun zarur litiyni qazib olish o'rtacha oilaviy xonadonning bir necha oylik suv sarfiga teng suv resursini talab qiladi.

Qayta ishlashning ekologik samarasi. (4)-formula bo'yicha, agar akkumulyator tarkibidagi metallarning 30% qayta ishlangan xomashyodan ($R = 0,3$) va qayta ishlangan xomashyoning chiqindi koeffitsiyenti birlamchi xomashyoga nisbatan 50% past ($\Delta K_{chiq.kam}^{qayta ishl.}$) bo'lsa:

$$\sum G_{iss.gaz}^{sof} = 5100 \cdot (1 - 0,3 \cdot 0,5) = 5100 \cdot 0,85 = 4335 \text{ kg} \cdot CO_2 - ekv \quad (8)$$

Demak, qayta ishlangan xomashyoning qo'llanilishi umumiy chiqindini 765 kg CO_2 -ekv. ga, ya'ni taxminan 15% ga kamaytiradi. Kobalt bo'yicha esa 60 kW·soat paketda 15 kg kobalt mavjud bo'lib ($0,25 \text{ kg/kW} \cdot \text{soat} \times 60 \text{ kW} \cdot \text{soat}$), gidrometallurgik qayta ishlash usuli orqali (qoplama samaradorligi taxminan 95%) shu paketning umri tugagach 14,25 kg kobaltni qayta olish mumkin.

Sig'im bo'yicha sezuvchanlik tahlili. Turli sig'imdagi akkumulyator paketlari uchun hisob-kitob natijalari 2-jadvalda umumlashtirilgan.

2-jadval

Akkumulyator sig'imiga bog'liq holda $\sum G_{iss.gaz}$ va suv izi ko'rsatkichlari

Sig'im, kW·soat	$\sum G_{iss.gaz}^{um}$, kg CO ₂ -ekv.	$\sum G_{iss.gaz}^{sof}$ (R=0,3), kg CO ₂ -ekv.	Suv izi, m ³
40	3 400	2 890	52,8
60	5 100	4 335	79,2
100	8 500	7 225	132,0

Jadvaldan ko'rinadiki, ko'rsatkichlar akkumulyator sig'imiga chiziqli proporsional bo'lib, sig'im ortishi bilan ekologik ta'sirning barcha ko'rinishlari mos ravishda oshadi.

Muhokama

Olingan natijalar litiy-ion akkumulyatorlarning ishlab chiqarish bosqichidagi ekologik “og'irligi” sezilarli ekanligini tasdiqlaydi. 5,1 t CO_{2.ekv.} ko'rsatkichi Romare va Dahllöf (2017) tomonidan keltirilgan 61–106 kg CO_{2.ekv.}/kW·soat diapazoniga to'liq mos keladi, bu esa qo'llanilgan metodologiyaning adabiyot bilan izchilligini ko'rsatadi.

Suv izi bo'yicha natijalar litiy qazib olishning, ayniqsa Janubiy Amerikaning quruq mintaqalaridagi sho'r ko'llarda, mahalliy suv resurslariga bosim ko'rsatishi mumkinligini tasdiqlaydi. Biroq shuni ta'kidlash lozimki, barcha litiy konlari bir xil suv intensivligiga ega emas - qattiq jinslardan qazib olish boshqacha ekologik profilga ega bo'lib, alohida baholashni talab qiladi.

Qayta ishlash samarasi bo'yicha natija (15% kamayish, R=0,3 da) shuni ko'rsatadiki, qayta ishlangan xomashyo ulushini oshirish chiqindini chiziqli ravishda kamaytiradi. Agar R qiymati 0,6 gacha oshirilsa (ya'ni akkumulyatorning 60% qayta ishlangan xomashyodan tayyorlansa), nazariy jihatdan chiqindi 30% ga qadar kamayishi mumkin - bu Yevropa Ittifoqining yangi akkumulyator reglamenti (EU Battery Regulation) doirasida belgilangan minimal qayta ishlangan tarkib talablariga mos keladi.

Tadqiqotning bir qator cheklovlari mavjud. Birinchidan, qo'llanilgan koeffitsiyentlar adabiyotdagi o'rtacha qiymatlar bo'lib, aniq zavod, texnologiya yoki mintaqaviy energiya tarmog'i tarkibidagi farqlarni hisobga olmaydi. Ikkinchidan, tahlil faqat xomashyo qazib olishdan akkumulyator paketi ishlab chiqarilgunga qadar bosqichini qamrab oladi; foydalanish va transportirovka bosqichlari alohida tahlil talab qiladi. Uchinchidan, $\Delta K_{chiq.kam}^{qayta ishl.}$ parametri turli metallar (litiy, kobalt, nikel) uchun farqlanadi, biroq soddalashtirish maqsadida o'rtacha qiymat qabul qilindi.

XULOSA

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdi:

1) 60 kW·soat sig'imli tipik litiy-ion akkumulyator paketini ishlab chiqarish taxminan 5,1 t CO_{2.ekv.} issiqxona gazlari chiqindisi va 79,2 m³ suv sarfi bilan bog'liq;

2) Ekologik ko'rsatkichlar akkumulyator sig'imiga chiziqli proportsional bo'lib, sig'imning ortishi bilan mutanosib ravishda oshadi;

3) Akkumulyator tarkibida 30% qayta ishlangan xomashyodan foydalanish umumiy issiqxona gazlari chiqindisini taxminan 15% ga kamaytirish imkonini beradi, qayta ishlangan xomashyo ulushini oshirish esa bu samarani yanada kuchaytiradi.

Shu tariqa, litiy-ion akkumulyatorlarning ekologik ta'sirini kamaytirishning eng samarali yo'li - qayta ishlash infratuzilmasini rivojlantirish va akkumulyator ishlab chiqarishda ikkinchi darajali xomashyo ulushini institutsional darajada oshirishdir. Ushbu ishda taklif etilgan formulalar (1)–(4) turli sig'im va parametrlar uchun tezkor baholash vositasi sifatida amaliyotda qo'llanilishi mumkin.

ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Ellingsen, L. A.-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., Strømman, A. H. (2014). Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 113–124.

2. Romare, M., Dahllöf, L. (2017). The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute Report.

3. Kelly, J. C., Dai, Q., Wang, M. (2020). Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25, 371–396.

4. Ciez, R. E., Whitacre, J. F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 2, 148–156.

5. Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Söderman, M. L., Van Mierlo, J. (2019). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 1866–1890.

6. Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., Gallagher, K. G. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8, 158–168.