PELMOB

University of Pristina
Kosovska Mitrovica

Funded by
the European Union

FACULTY OF
TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

D5.4 Undergraduate/Master Curricula Implemented

Назив наставног предмета

Електротехнички материјали

Наслов презентације

Нове технологије батерија за електрична возила

др Арсић Небојша

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor the granting authority can be."

Partnership for Promotion and Popularization of Electrical Mobility through Transformation and Modernization of WB HEIs Study Programs/PELMOB

Call: ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2

Project Number: 101082860

PELMOB

Funded by the European Union

University of Pristina Kosovska Mitrovica

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

https://pr.ac.rs/

Partnership for Promotion and Popularization of Electrical Mobility through Transformation and Modernization of WB HEIs Study Programs / PELMOB

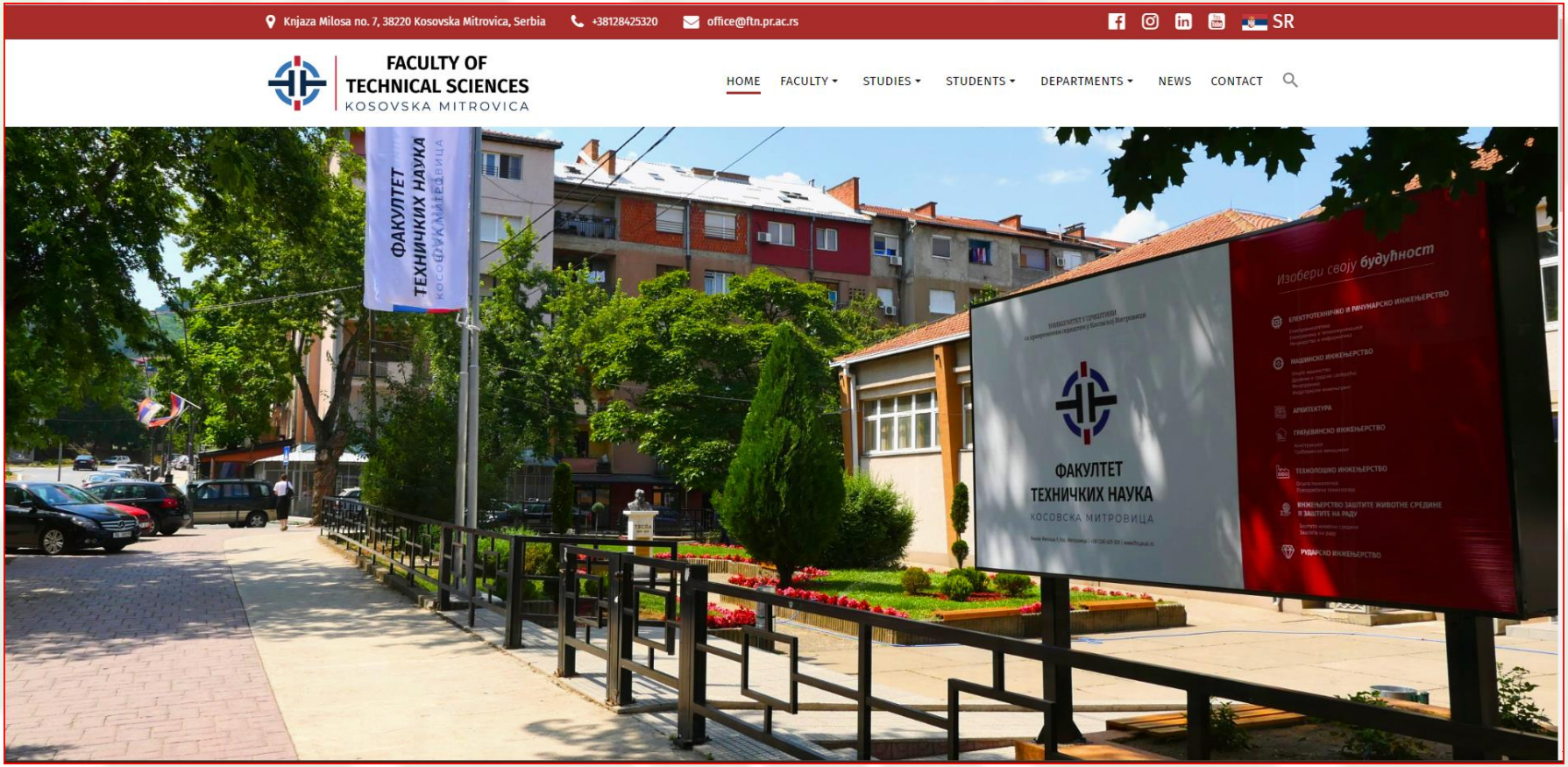
PELMOB

Funded by the European Union

University of Pristina Kosovska Mitrovica

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

https://ftn.pr.ac.rs/



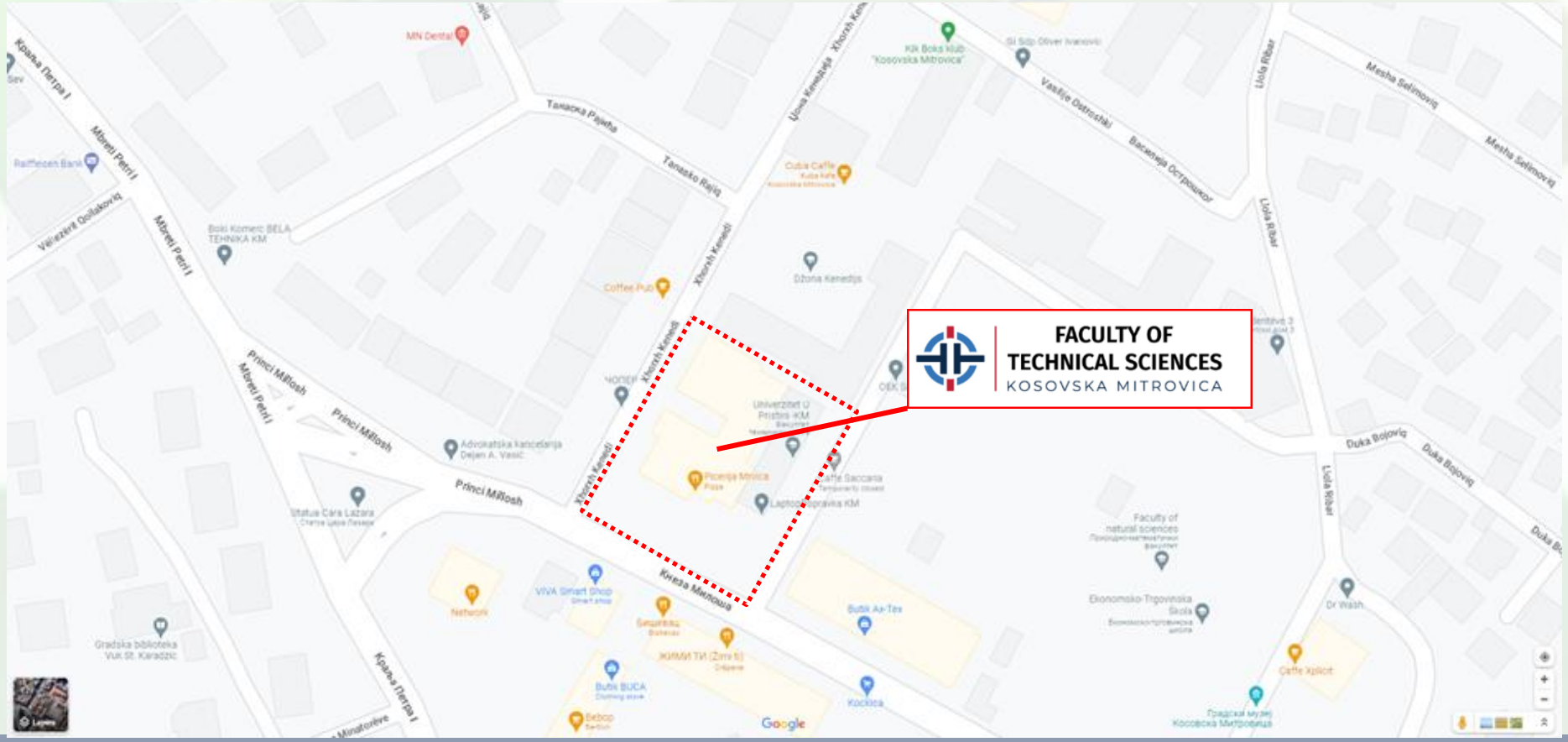
PELMOB

Funded by the European Union

University of Pristina Kosovska Mitrovica

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

https://www.google.rs/maps/@42.8979479,20.8656299,19z



PELMOB

Funded by the European Union

University of Pristina Kosovska Mitrovica

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Partnership for Promotion and Popularization of Electrical Mobility through Transformation and Modernization of WB HEIs Study Programs / PELMOB

Садржај

1. Чврстосталне батерије
2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије
3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије
4. Калијум-јонске (K-Ion) батерије
5. Силицијумске анодне батерије, верзија (Li-Ion)
6. Батерије без кобалта, берзија (Li-Ion)
7. Графенске батерије
8. Самообнављајуће батерије
9. Двоструко-угљеничне батерије

1. Чврстосталне батерије

Како раде батерије у чврстом стању

За разлику од конвенционалних литијум-јонских батерија, које користе течни или гел електролит, батерије у чврстом стању користе чврсти електролит (керамику, полимер или стакло). Ова фундаментална промена доноси неколико предности:

- Анода: Типично, литијум метал (уместо графита), што омогућава већу густину енергије.
- Електролит: Чврст (нпр. сулфид, оксид или на бази полимера).
- Катода: Може бити традиционална (NMC, LFP) или напредна (сумпор, ваздух).

Електротехнички материјали
Нове технологије батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

1. Чврстосталне батерије

Литијум-јонске батерије са традиционалним течним електролитом

Бакар 10 μm

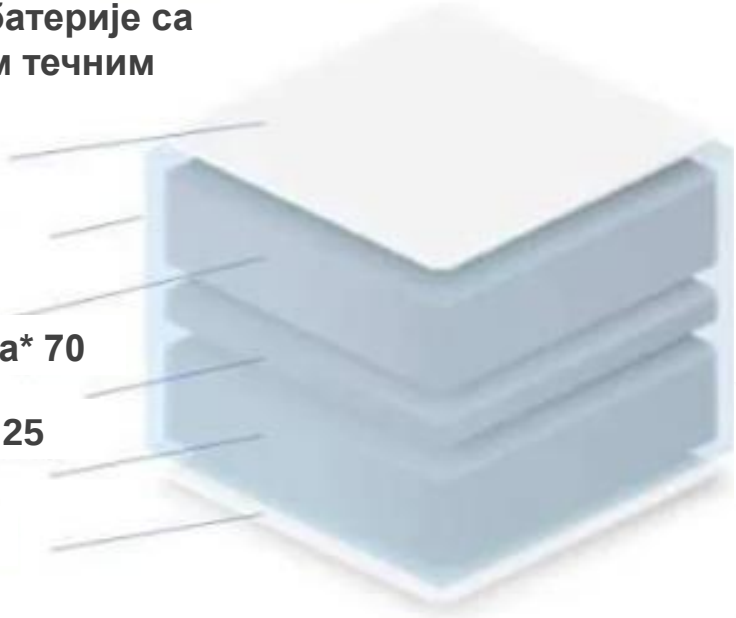
Течни електролит

Угљенична анода* 70 μm

Полипропилен 25 μm

Катода** 80 μm

Алуминијум 15



*Анодни носач са течним електролитом

** Катода са течним електролитом

Литијум-метална батерија са Nuvvon чврстим електролитом

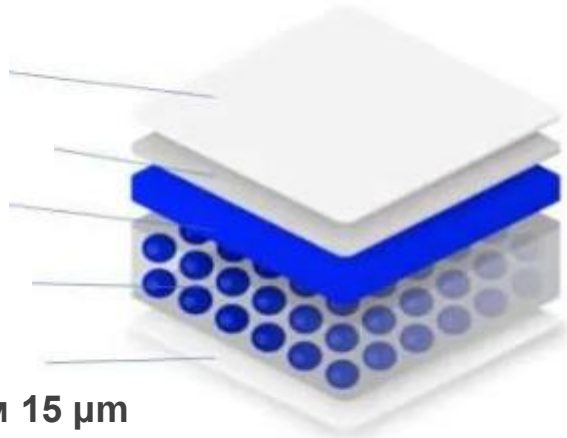
Бакар 10 μm

Литијум 20

SPE+ 25 μm

Катода EPE++ 80–150 μm

Алуминијум 15 μm



+ SPE: Слој чврстог полимерног електролита који служи и као сепаратор

++ Катода EPE: Унапред мешани електродни полимерни електролит као чврсти католит

Данашњи Li-јонски ћелије имају композитну катоду и носач аноде, раздвојене порозним полимерним слојем. Течни електролит се убризгава и полако пролази кроз целу ћелију

Nuvvon чврсти полимерни електролити обезбеђују и активни сепаратор и католит. Без течности, гелова или наночестица. Јонски проводљиви у широком температурном опсегу (тренутно од -10°C до 80°C).

PELMOB

University of Pristina Kosovska Mitrovica

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

1. Чврстосталне батерије

Поређење литијум-јонских и чврстосталних батерија

Критеријум	Литијум-јонске батерије (Li-ion)	Чврстосталне батерије
Материјал електролита	**Користе течне или гел електролите који омогућавају кретање литијумових јона између електрода.**	**Користе чврсте електролите, обично керамичке или полимерне материјале, који олакшавају транспорт јона.**
Безбедност	**Постоји мали ризик од термички неконтролисане ланчане реакције (thermal runaway) и цурења електролита, што у екстремним случајевима може довести до пожара или експлозије.**	**Сматрају се безопаснијим јер немају запаљиве течне електролите, што смањује ризик од цурења и термички неконтролисане ланчане реакције.**
Густина енергије	**Технологија са релативно високом енергетском густином, што омогућава складиштење значајне количине енергије у малом волумену.**	**Имају потенцијал за још већу енергетску густину од Li-ion батерија, што може довести до батерија са дужим временом рада.**
Брзина пуњења	**Спорије пуњење због ограничења у покретљивости јона у течном електролиту.**	**Потенцијално брже пуњење захваљујући побољшаној јонској проводљивости у чврстим електролитима.**
Животни циклус	**Коначан животни циклус; капацитет се постепено смањује током времена услед пуњења и пражњења.**	**Потенцијално дужи животни циклус, што значи да могу издржати више циклуса пуњења и пражњења без значајног губитка капацитета.**
Комерцијална доступност	**Широко распрострањене и комерцијално доступне у разним величинама и конфигурацијама за бројне примене.**	**Још увек у фази истраживања и развоја, са ограниченом комерцијалном доступношћу. Масовна производња и тржишна адапција тек треба да се реализују.**

PELMOB

University of Pristina
Kosovska Mitrovica

Електротехнички материјали
Нове технологије батерија за ЕВ
1. Чврстосталне батерије

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Карактеристика	Литијум-јонске батерије	Чврстосталне батерије
Тип електролита	Течност или гел (запаљив)	Чврст (незапаљив)
Енергетска густина (Wh/kg)	150-250 (тренутно)	300-500+ (потенцијално)
Домет за електромобиле	До 400+ km (тренутно)	600+ km (потенцијално)
Време пуњења	20-60 минута (тренутно)	10-15 минута (потенцијално)
Безбедност	Нижи ниво (ризик од термичког неконтролисаног ланчаног реакција)	Виши ниво (смањен ризик од термичког неконтролисаног ланчаног реакција)
Број циклуса	1,000-3,000 (типично)	8,000-10,000+ (потенцијално)
Цена	У опадању, LFP је економски исплативији (тренутно)	Виша (тренутно), потенцијал за изједначење до средине 2030-их
Технолошка зрелост	Зрела технологија, широко доступна	У фази развоја и ране производње
Инфраструктура	Успостављена, робусна	У развоју, изазови у увећању производње и набавци материјала

Главне предности чврстосталних батерија у односу на литијум-јонске батерије

Карактеристика	Литијум-јонске (тренутно)	Чврстосталне (будућност)
Енергетска густина	~250-300 Wh/kg	400-500+ Wh/kg (дупло побољшање)
Брзина пуњења	20-80% за ~30 мин	0-80% за ~10 мин
Безбедност	Запаљиви течни електролит	Незапаљиви чврсти електролит
Животни век	~1,000-2,000 циклуса	5,000+ циклуса (очекивано)
Температурни опсег	Лошије перформансе на екстремним температурама	Боље перформансе на екстремним температурама

Зашто су чврстосталне батерије револуционарне за електрична возила?

Већи домет – Са 2-3 пута већом густином енергије, електрична возила би могла да постигну **600-1.000+ km по пуњењу** (у поређењу са ~300-400 km данас).

Брже пуњење – Батерија у возилу се може напунити за неколико минута, слично као са пуњењем горива.

Безбедније – Одсуство течног електролита значи **нема пожара/експлозија** (велики проблем код садашњих батерија).

Мање и лакше – Виша енергетска густина омогућава **мање батеријске пакете**, ослобађајући простор у возилима.

Дужи век трајања – Очекује се да ће трајати **2-3 пута дуже** од литијум-јонских батерија, смањујући трошкове замене.

Стање развоја чврстосталних батерија код водећих произвођача?

Компанија	Напредак	Процењена масовна производња
Toyota	Прототип са дометом преко 900 km, циљ 2027-2030	2027-2030
QuantumScape (подр шка VW)	Тестирано преко 800 циклуса, циљ 2025-2026	2025-2026 (ограничен обим)
Solid Power (BMW-Ford)	Пилот производња 2024, електромобили до 2026	2026-2028
Nissan	Планира пилот погон до 2025, електромобили до 2028	2028
Samsung SDI	Прототипови са 500 Wh/kg, циљ 2027+	2027+

1. Чврстосталне батерије

Изазови који успоравају развој чврстосталних батерија

1.Сложеност и висока цена производње

Чврсти електролити (нпр. керамички) су скупи за производњу.
Тренутни прототипи коштају **5-10 пута више** од литијум-јонских батерија.
Повећање производње је изазов (Toyota и QuantumScape раде на решењима).

2.Проблеми са трајношћу

Литијумске металне аноде могу формирати **дендрите** (игличасте израслине), што изазива кратке спојеве. Чврсти електролити могу пуцати услед понављајућих циклуса пуњења.

3.Ограничења материјала

Проналажење **хемијски стабилног, високо проводљивог чврстог електролита** је изазов.
Неки материјали (нпр. на бази сулфида) се разграђују у влажним условима, што компликује производњу.

- **Када се очекују електрична возила са чврстосталним батеријама?**

2025-2027: Ограничена производња (за луксузне и високе перформансе).

2028-2030: Очекује се широка употреба на тржишту.

После 2030: Потенцијална доминација ако се смање трошкови.

- **Прва електрична возила са чврстосталним батеријама:**

•**Toyota** (2027-2030)

•**BMW** (у сарадњи са Solid Power, ~2026-2028)

•**Lucid Motors** (истражује ову технологију за моделе са изузетно дугим дометом)

Будућност чврстосталних батерија

Чврстосталне батерије могу да направе технолошку револуцију у свету електричних возила **удвостручавајући домет**, **драстично скраћујући време пуњења** и **повећавајући безбедност возила**. Међутим, **високи трошкови и производни изазови** морају бити превазиђени пре него што ова технологија постане широко распрострањена.

Перспектива:

•**Кратак рок (2025-2027):** Ограничена употреба у елитним електричним возилима

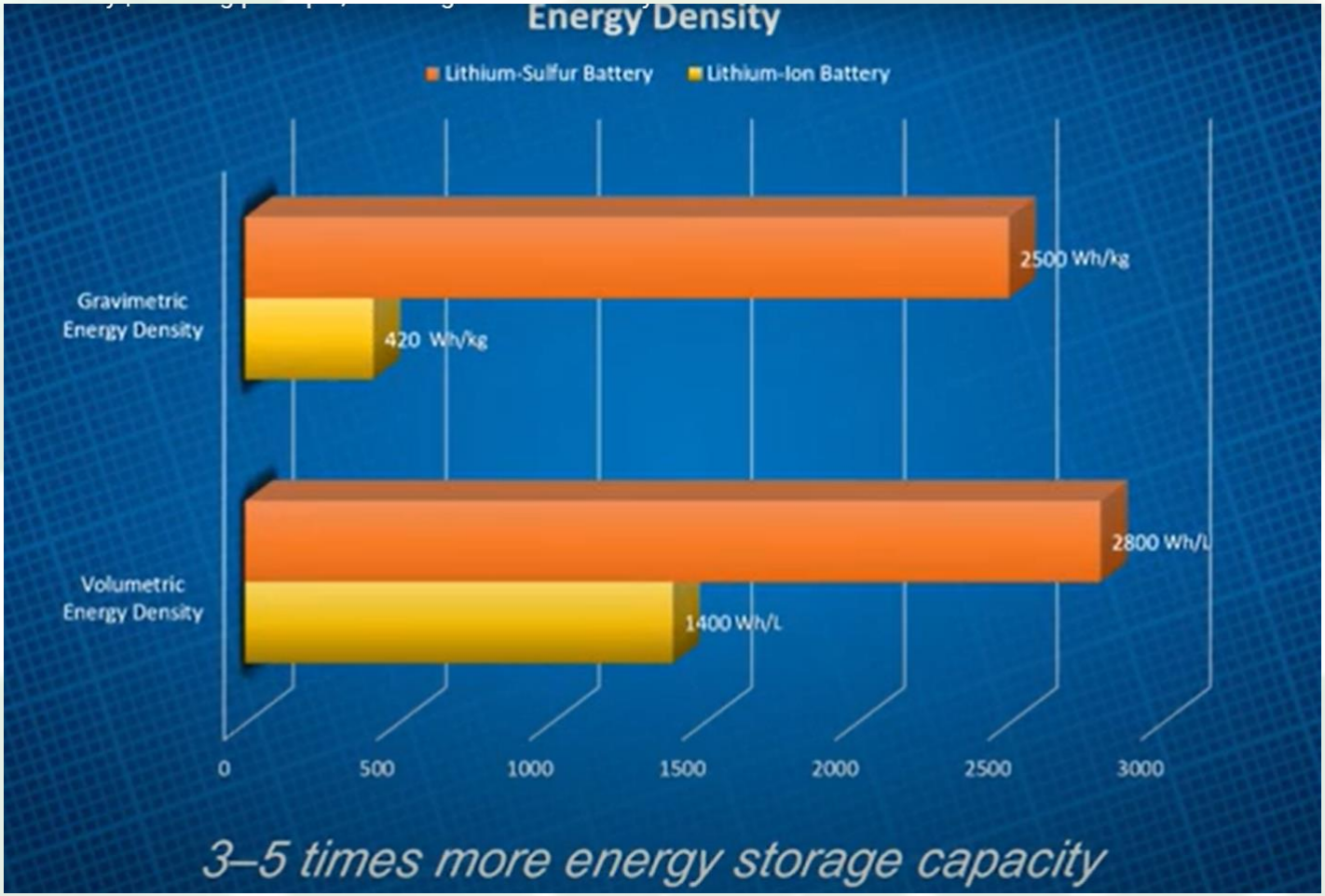
•**Дуг рок (2030+):** Потенцијал да потпуно замене литијум-јонске батерије

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



Електротехнички материјали

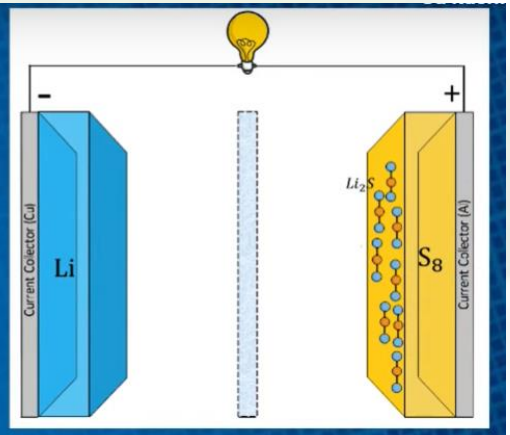
Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

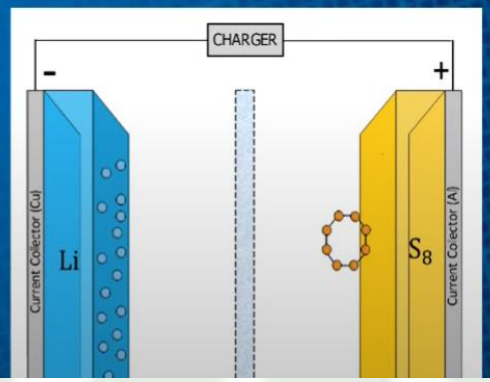
At negative electrode:

$$Li \underset{\text{Charging}}{\overset{\text{Discharging}}{\rightleftharpoons}} Li^+ + e^-$$



At positive electrode:

$$S_8 + 16Li^+ + 16e^- \underset{\text{Charging}}{\overset{\text{Discharging}}{\rightleftharpoons}} 8Li_2S$$

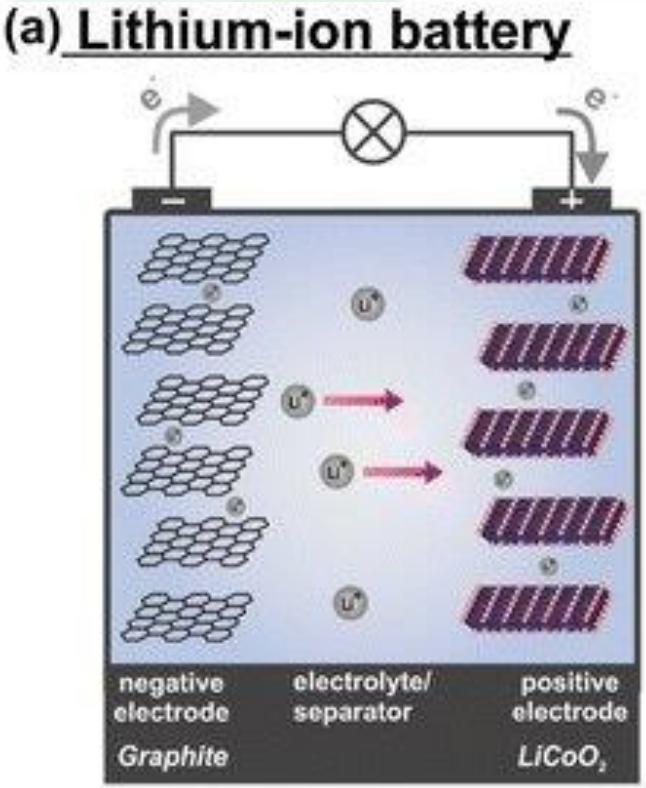


Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

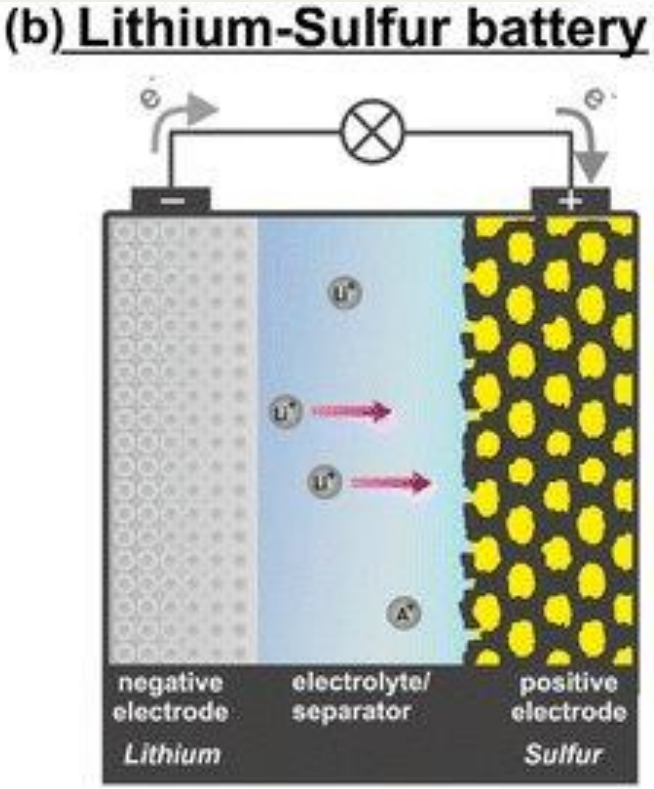
Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



$$\ominus\ LiC_6 \longrightarrow 6\,C + Li^+ + e^-$$

$$\oplus\ 2\,Li_{0.5}CoO_2 + Li^+ + e^- \longrightarrow LiCoO_2$$

$$\Sigma\ 2\,Li_{0.5}CoO_2 + LiC_6 \xrightarrow{\text{Discharge}} 2\,LiCoO_2 + 6\,C$$



$$\ominus\ 2\,Li \longrightarrow 2\,Li^+ + 2\,e^-$$

$$\oplus\ \tfrac{1}{8}S_8 + 2\,Li^+ + 2\,e^- \longrightarrow Li_2S$$

$$\Sigma\ 2\,Li + \tfrac{1}{8}S_8 \xrightarrow{\text{Discharge}} Li_2S$$

(а) концепта литијум-јонске батерије са графитом и LiCoO2 као електродним материјалима

(б) аналогне литијум-сумпорне ћелије

Код литијум-сумпорне батерије:

• **Позитивна електрода** се обично састоји од сумпора распоређеног у порозној угљениковој структури која обезбеђује електронско повезивање

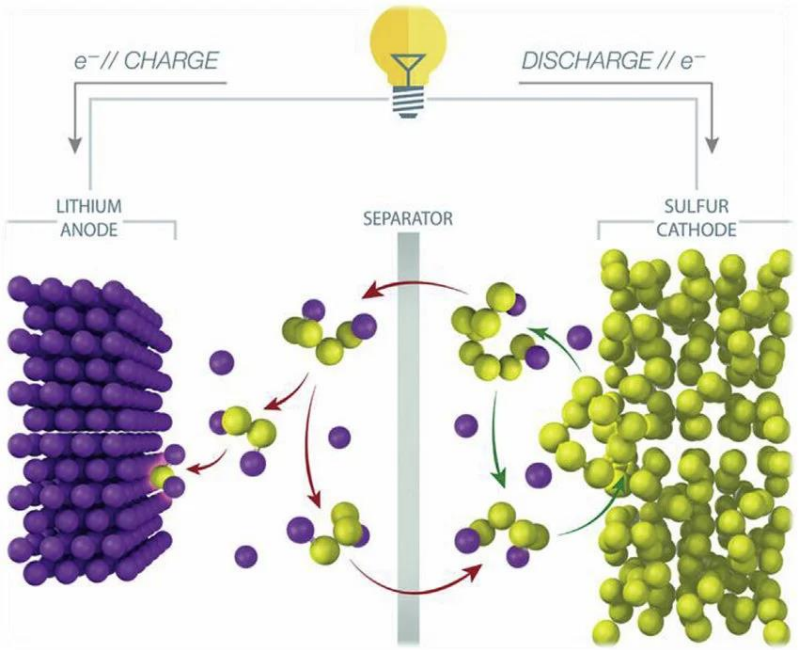
• Уместо литијума, за позитивну електроду могу се користити и други метали као што су Na (натријум), K (калијум) или Mg (магнезијум)

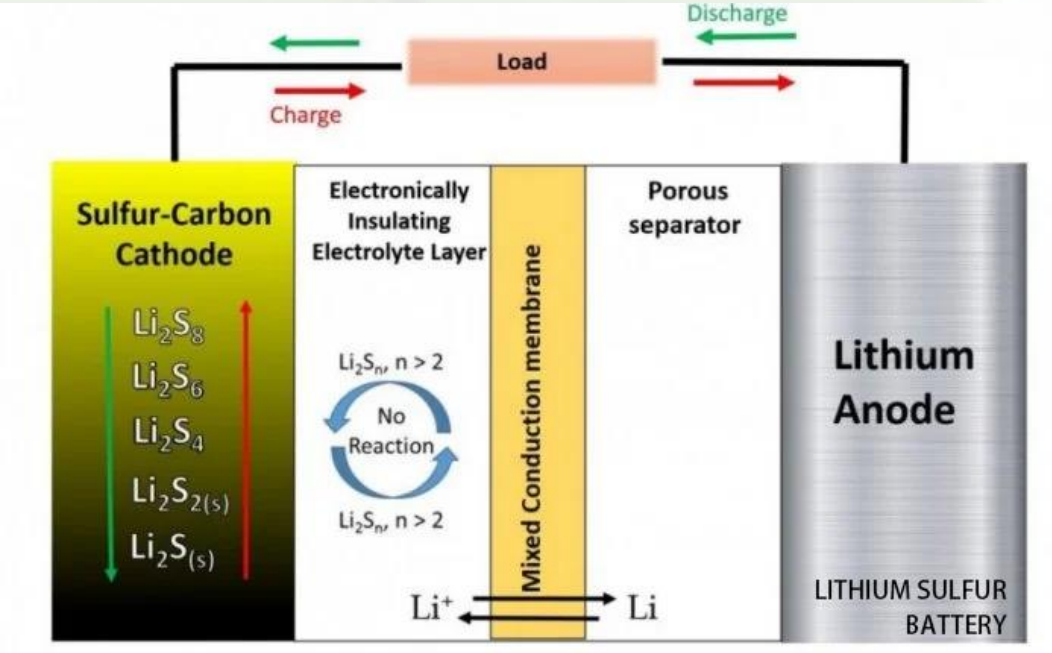
Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

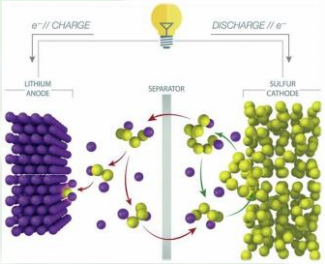


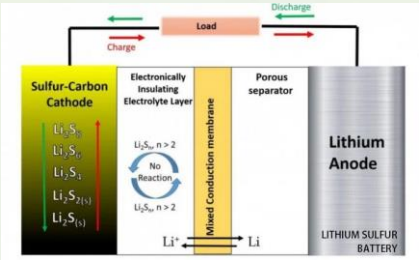


Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије





Литијум-сумпорна батерија је пуњива батерија која користи литијум као аноду и сумпор као катоду. У поређењу са другим батеријама, литијум-сумпорне батерије су познате по својој **високој енергетској густини** и **потенцијално ниским трошковима** производње.

Принцип рада:

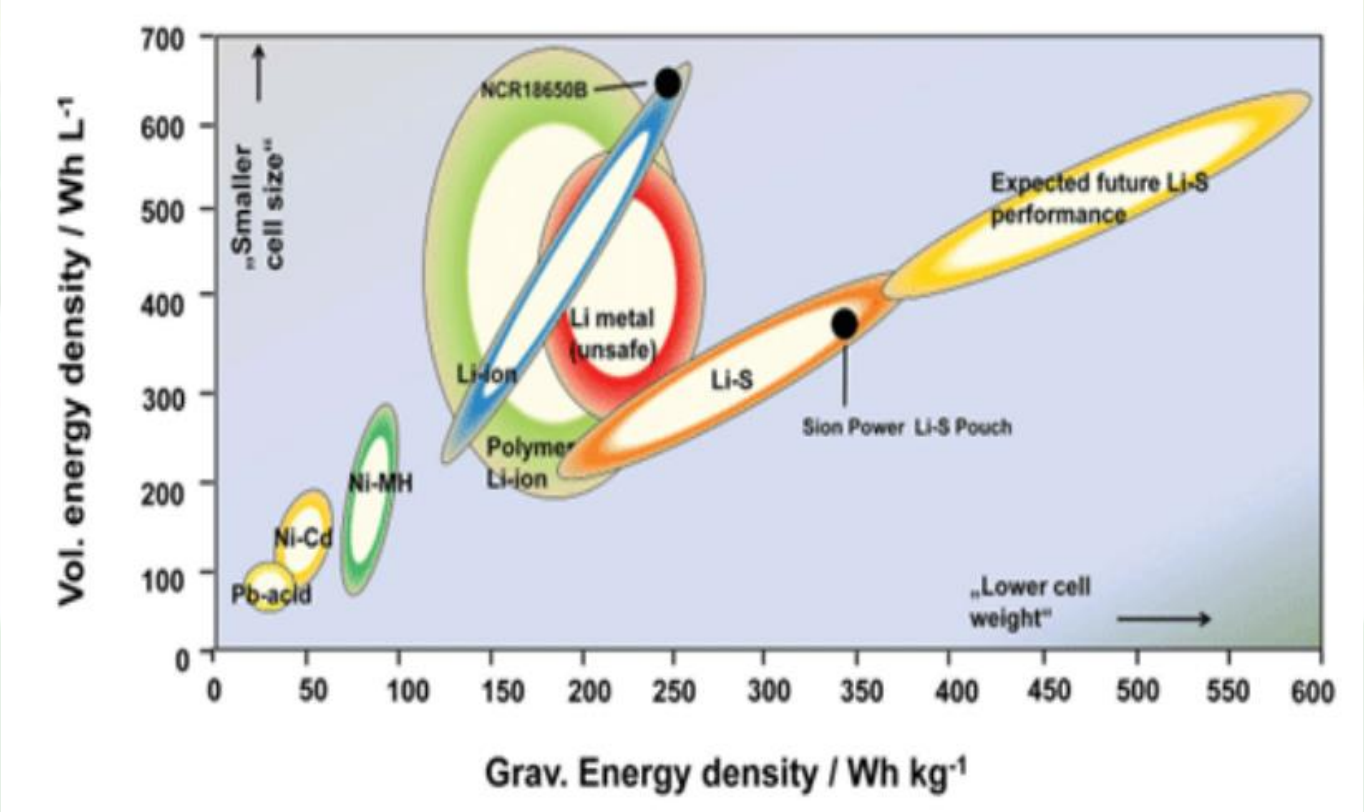
•**Током пражњења:** Литијумови јони из аноде реагују са сумпором у катоди, образујући литијум-сулфид и ослобађајући електроне.

•**Током пуњења:** Овај процес се обрће, што омогућава батерији да се поново пуни и користи.

Ова технологија нуди значајне предности у погледу капацитета и економичности, што је чини обећавајућом алтернативом за будућност складиштења енергије.

Густине енергије различитих типова батерија, према: Hagen и сар., 2015.

Мања величина ћелија – већа специфична енергија по јединици запремине Wh/L



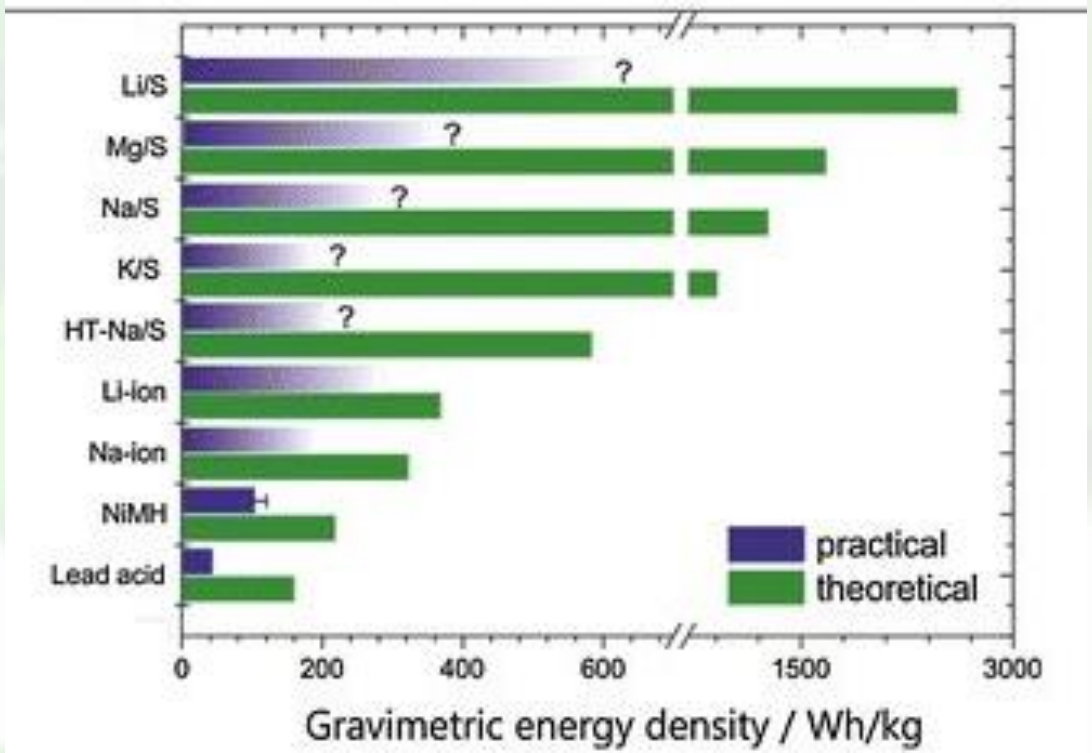
Мања тежина ћелија – већа специфична енергија по јединици масе Wh/kg

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

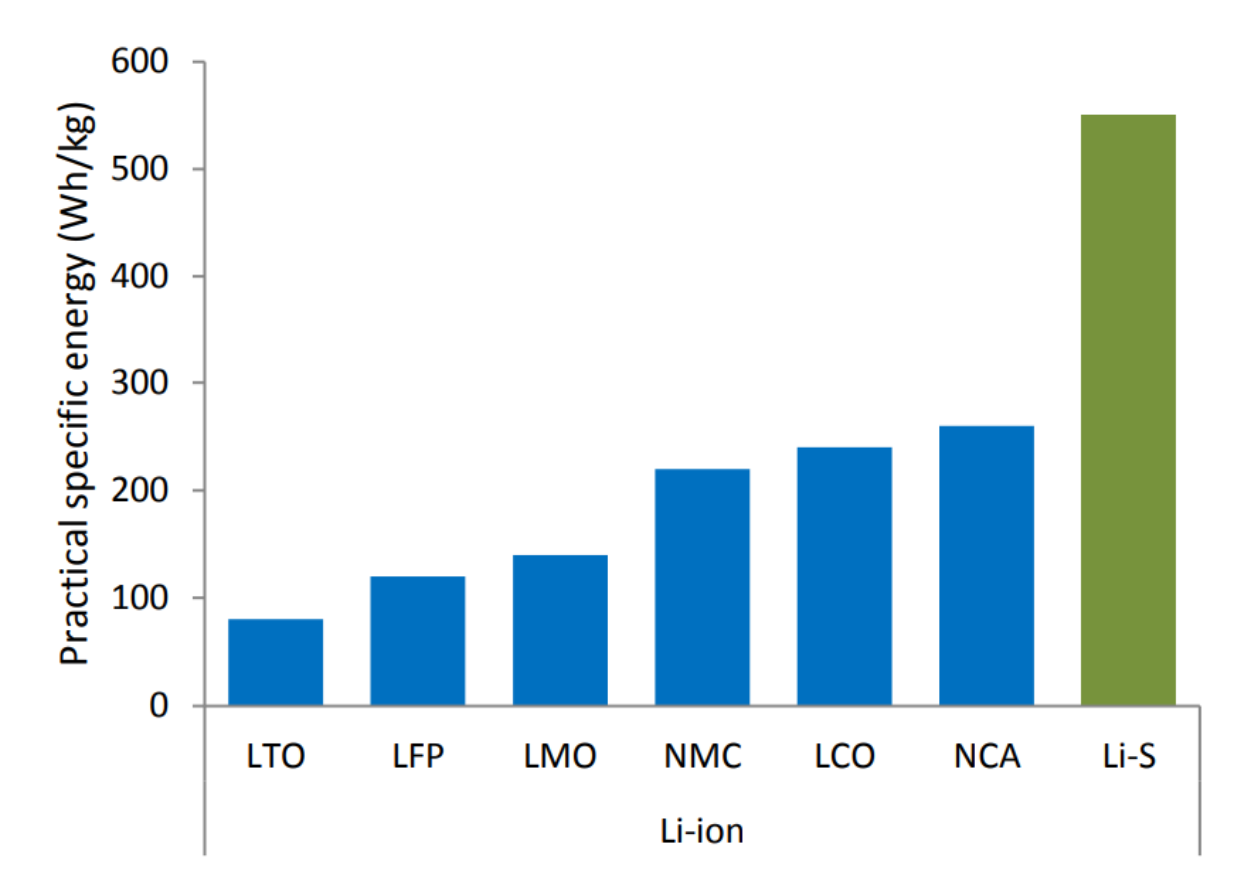
Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



Графикон приказује поређење теоријских и практичних енергетских густина за разне типове батерија (на нивоу ћелије). До данас, комерцијално су доступне само оловно-кисела, никад-метал-хидридна (NiMH), литијум-јонска (Li-ion) и високотемпературна Na/S батерија.

Практичне енергетске густине за метал-сумпорне ћелије представљају процене.

Поређење практичних специфичних енергија по тежини (Wh/kg) за Li-ion и Li-S



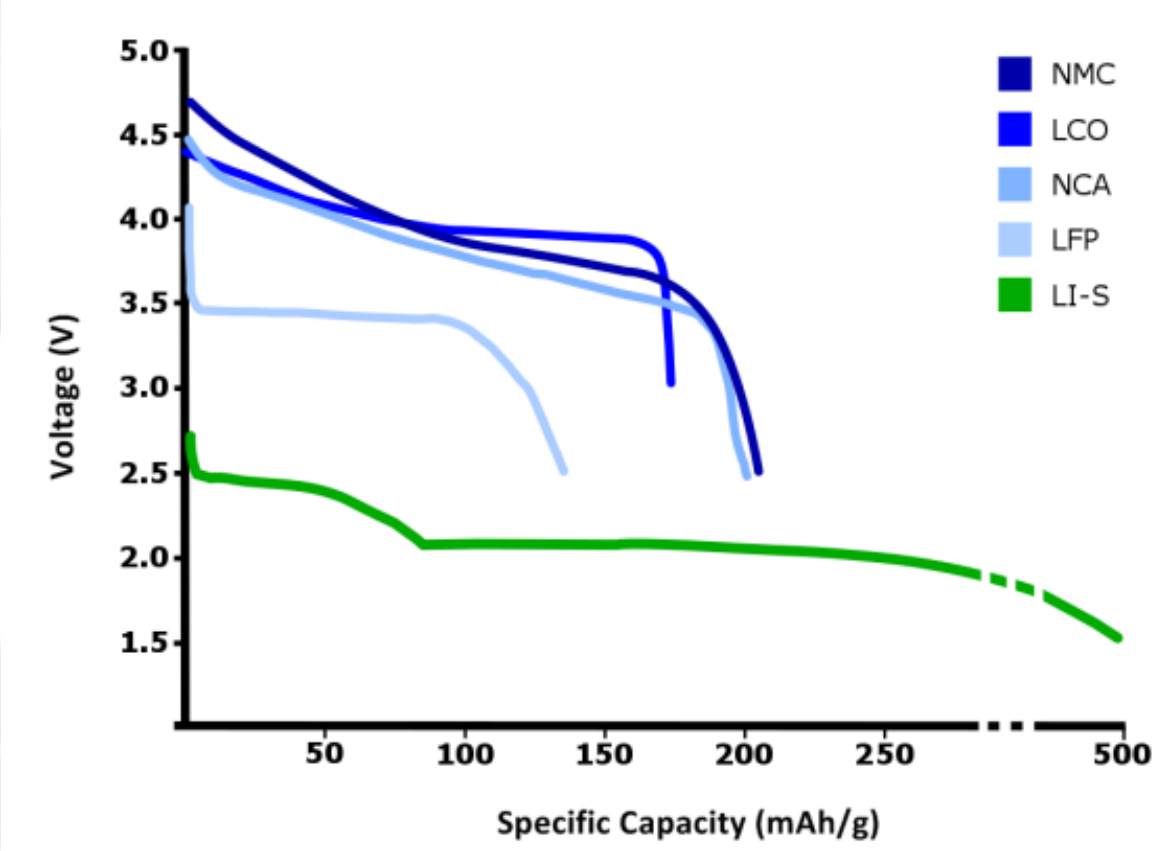
Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Криве пражњења литијум-сумпорних (Li-S) и различитих типова литијум-јонских батерија



Електротехнички материјали
Нове технологије батерија за ЕВ
2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

Поређење карактеристика Li-ion и Li-S ћелија и батерија

Параметар	NMC	Li-ion	LCO	LFP	Li-S
Напон ћелије (V)	3,70	3,60	3,65	3,20	2,15
Теоријска специфична енергија (Wh/kg)	400-600	400-600	400-600	300-400	2600
Практична специфична енергија (Wh/kg)	220	260	240	120	200–550
Однос практична/теоријска	≈1/2,5	≈1/2,5	≈1/2,5	≈1/2	≈1/10
Густина снаге (W/L)	320	270	450	200	100-200
Животни циклус (циклуса)	1000–2000	500	≈700	1000–2000	≈50
Стопа самопражњења (месечно)	1%	1%	1%	1%	8-15%
Термички неконтролисана ланчана реакција (°C)	210	150	150	270	120
Радни опсег (SOC)	15–95%	15–95%	15–95%	15–95%	0–100%
Ефекат памћења	Не	-	-	Да	-
Карактеристике	Висок напон, добар капацитет, висок ризик, добар животни век	Висока енергија, висока густина, скупо	Висок ризик, добар животни век	Дуг животни век, висока стабилност, ниска цена	Висока енергетска густина, јефтино, мали еколошки утицај, низак ризик
Примене - Аутомобилска индустрија	ЕВ, ХЕВ, ПХЕВ	ЕВ, ХЕВ, ПХЕВ	ЕВ, ХЕВ	ЕВ, ХЕВ, ПХЕВ	ЕВ

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

Прегледна табела перформанси различитих типова Литијумских батерија

Параметар	Li-ion				
	NMC	NCA	LCO	LFP	Li-S
Енергетска густина	+	+	+	+ -	+++
Густина снаге	++	++	++	+	+ -
Животни век	++	+ -	+	++	+ -
Самопражњење	++	++	++	++	+ -
Безбедност	+	-	-	+ -	+ -
Цена	-	+ -	+ -	+	++
Модел	++	++	+	+ -	+ -
Еколошки утицај	-	-	-	+ -	++

Литијум-сумпорне (Li-S) батерије имају боље карактеристике од литијум-јонских (Li-ion) у погледу:

- **безбедности** (боље перформансе)
- **цене** (нижа)
- **еколошког утицаја** (мањи)

Међутим, ови позитивни аспекти нису довољни да Li-S батерије замене Li-ion код електричних возила (ЕВ).

Да би заиста имале шансу да замене Li-ion батерије, Li-S технологија мора да се приближи Li-ion батеријама у најмање три кључна параметра:

1. **Трајност** (дуговечност)
2. **Стопа самопражњења**
3. **Моделирање** (предвидивост рада)

Иако Li-S батерије нуде одређене предности, њихова масовна примена у електричним возилима захтева додатна побољшања у наведеним областима.

Листа цена елемената који се користе у анализираним батеријама (USGS, 2017)

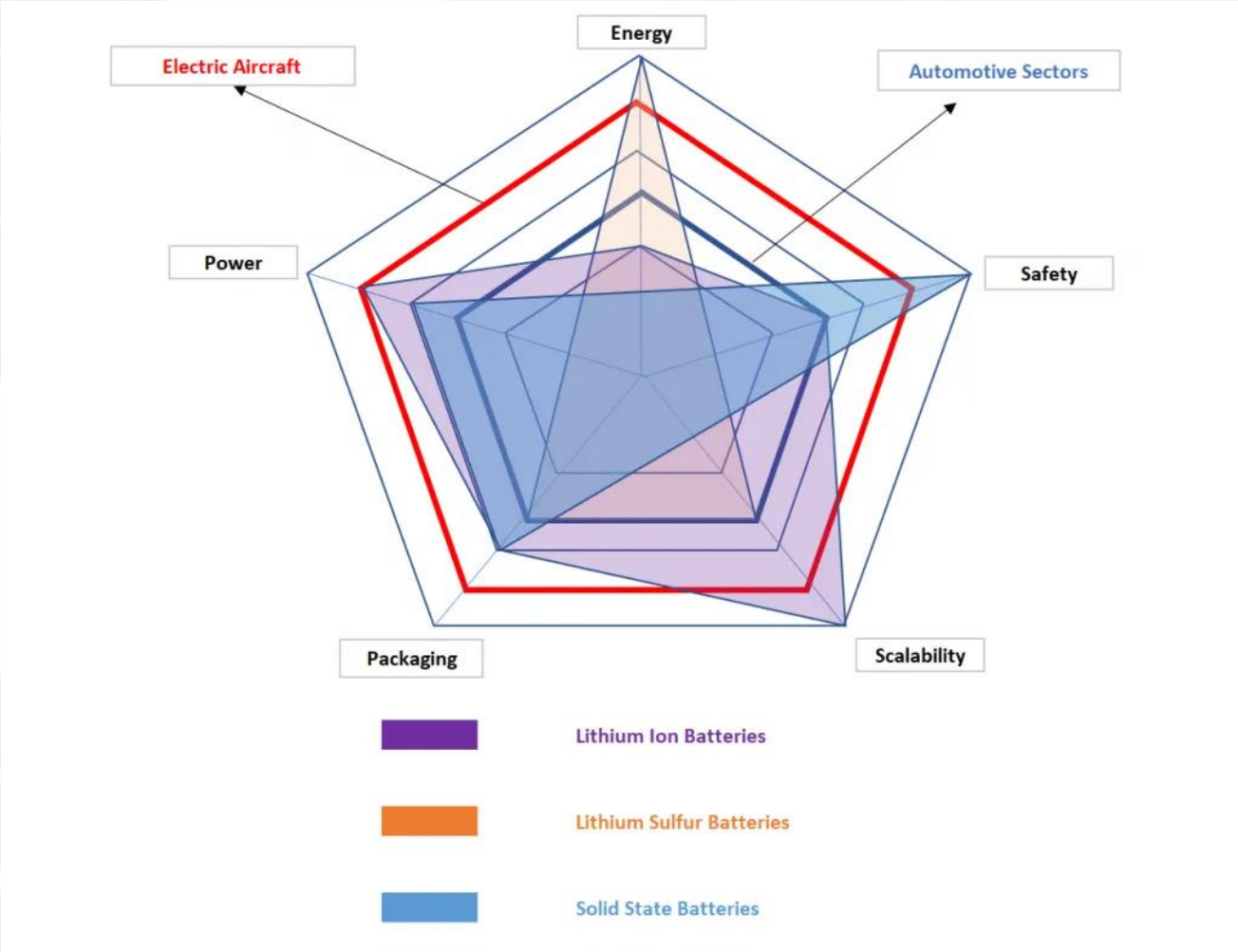
Unit value ($/t)						
Year	**Lithium**	**Aluminium**	**Cobalt**	**Nickel**	**Manganese**	**Sulphur**
2000	4.470	1.640	29.700	8.640	582	24,70
2001	1.490	1.520	23.300	5.950	529	10,00
2002	1.590	1.430	17.100	6.770	471	11,80
2003	1.550	1.500	20.600	9.630	599	28,70
2004	1.720	1.850	43.400	13.800	1.090	32,60
2005	1.460	2.010	33.600	14.700	712	30,80
2006	2.320	2.680	30.700	24.200	800	32,90
2007	3.530	2.690	54.600	37.200	1.190	32,90
2008	4.440	2.660	68.400	21.100	2.380	264
2009	4.530	1.750	34.200	14.600	1.370	1,70
2010	4.350	2.300	39.700	21.800	1.500	70,20
2011	3.870	2.560	36.100	22.900	1.460	160,00
2012	4.220	2.230	30.500	17.500	1.400	124,00
2013	6.800	2.080	28.400	15.000	1.620	68,70
2014	6.690	2.300	31.900	16.900	1.350	80,10
2015	6.500	1.940	29.600	11.800	1.210	87,60
2016	8.650	1.800	26.400	9.500	1.780	37,88
2017	13.900	2.200	58.600	10.100	1.900	60,00
Average	**4.560**	**2.063**	**35.378**	**15.672**	**1.219**	**64**

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



"0.1 C"

Израз "0.1 C" у терминологији батерија односи се на брзину пуњења/пражњења у односу на укупни капацитет батерије.

Шта значи "0.1 C"?

Дефиниција:
C-стопа показује колико брзо се батерија пуни или празни у односу на њен укупни капацитет.

•**1 C** = Потпун капацитет испражњен за **1 сат** (нпр., батерија од 100Ah се празни са 100A).

•**0.1 C** = Празни се за **10 сати** (нпр., батерија од 100Ah се празни са 10A).

Формула:
Струја (A) = C-стопа × Капацитет батерије (Ah)

Пример: За батерију од **50Ah**, при **0.1 C пражњењу, Струја је** 0,1 × 50 = **5A**.

"0.1 C"

C-стопа	Време пражњења	Струја (за 100Ah)	Примена
0,1 C	**10 сати**	**10A**	**Прецизна тестирања, дуготрајне примене**
1 C	**1 сат**	**100A**	**Електрична возила, електрични алати**
2 C+	**<30 минута**	**200A+**	**Високе перформансе, специјализоване примене**

Компромис:

Веће **C-стопе** → Више топлоте, нижа ефикасност, краћи век трајања.

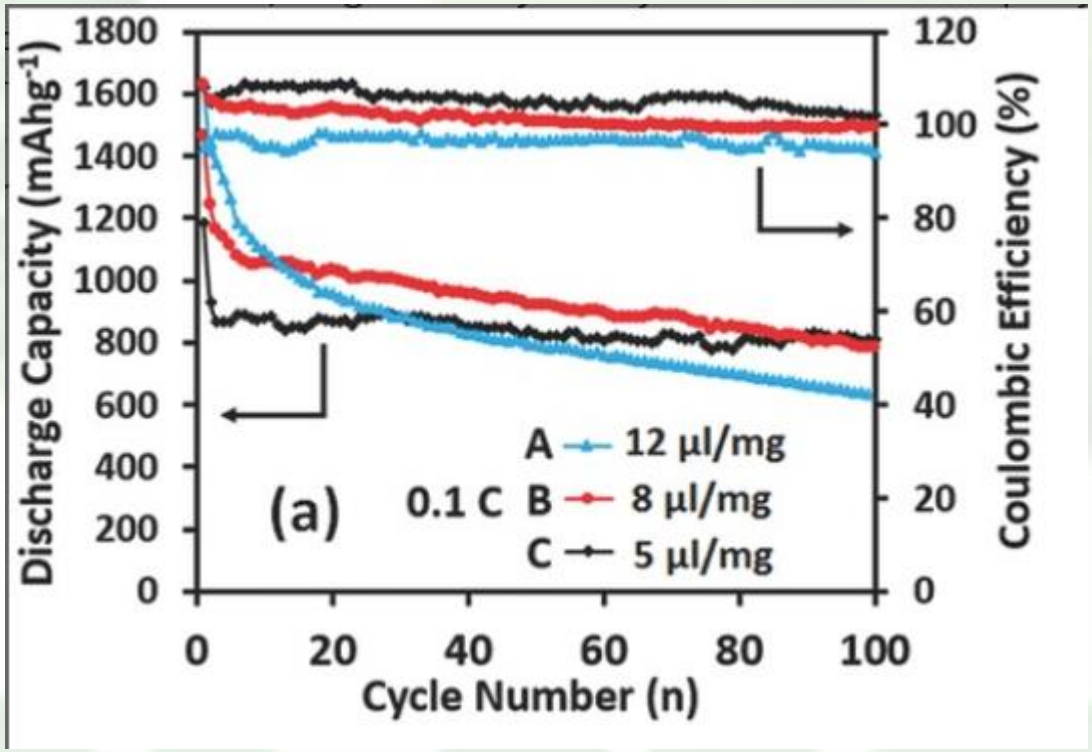
0,1 C → Већа прецизност, али непрактично за брзо пуњење.

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



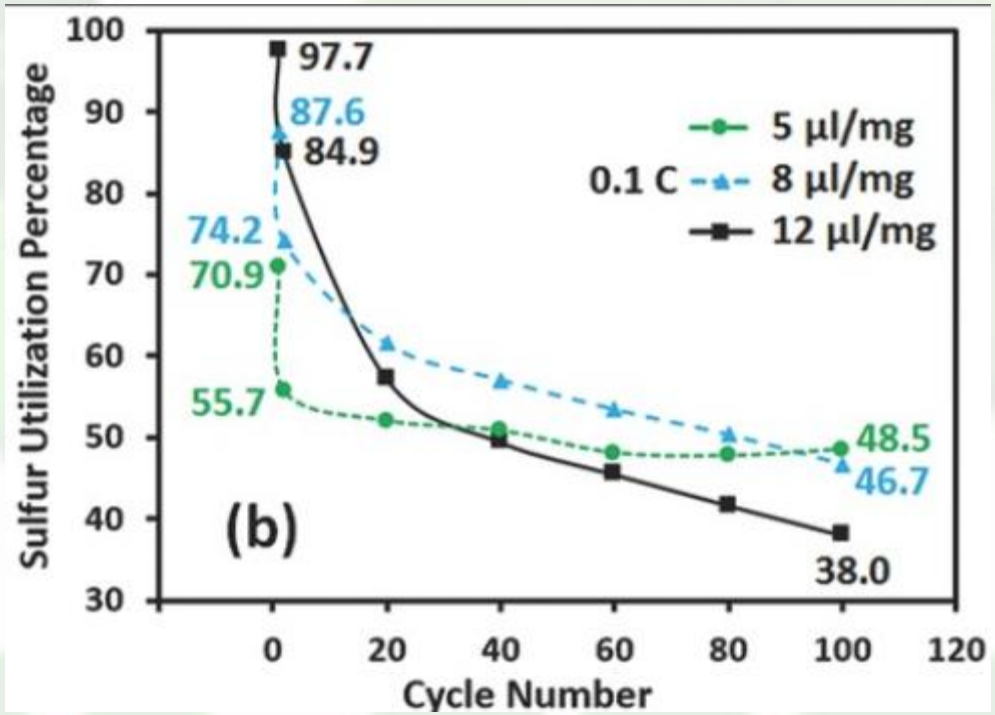
Перформансе дугог циклуса при 0,1 C, Li-S батерије са различитим количинама електролита.

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

2. Литијум-сумпорне (Li-S) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



Искоришћење сумпора у зависности од броја циклуса, Li-S батерије са различитим количинама електролита.

PELMOB

University of Pristina
Kosovska Mitrovica

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Зашто су Na-Ion батерије сада важне

Обилни материјали:
Натријум је 500 пута чешћи у природи од литијума (2,6% Земљине коре у поређењу са 0,002%).

Без критичних минерала:
Отпада потреба за кобалтом, никлом или литијумом.

Ценовна предност:
Пројектовано су 20–30% јефтиније од Li-ion батерија при масовној производњи.

Сигурносна предност:
Мањи ризик од пожара захваљујући стабилнијој хемији.

Поређење перформанси натријум - јонске Na-Ion и литијум-јонске Li-Ion

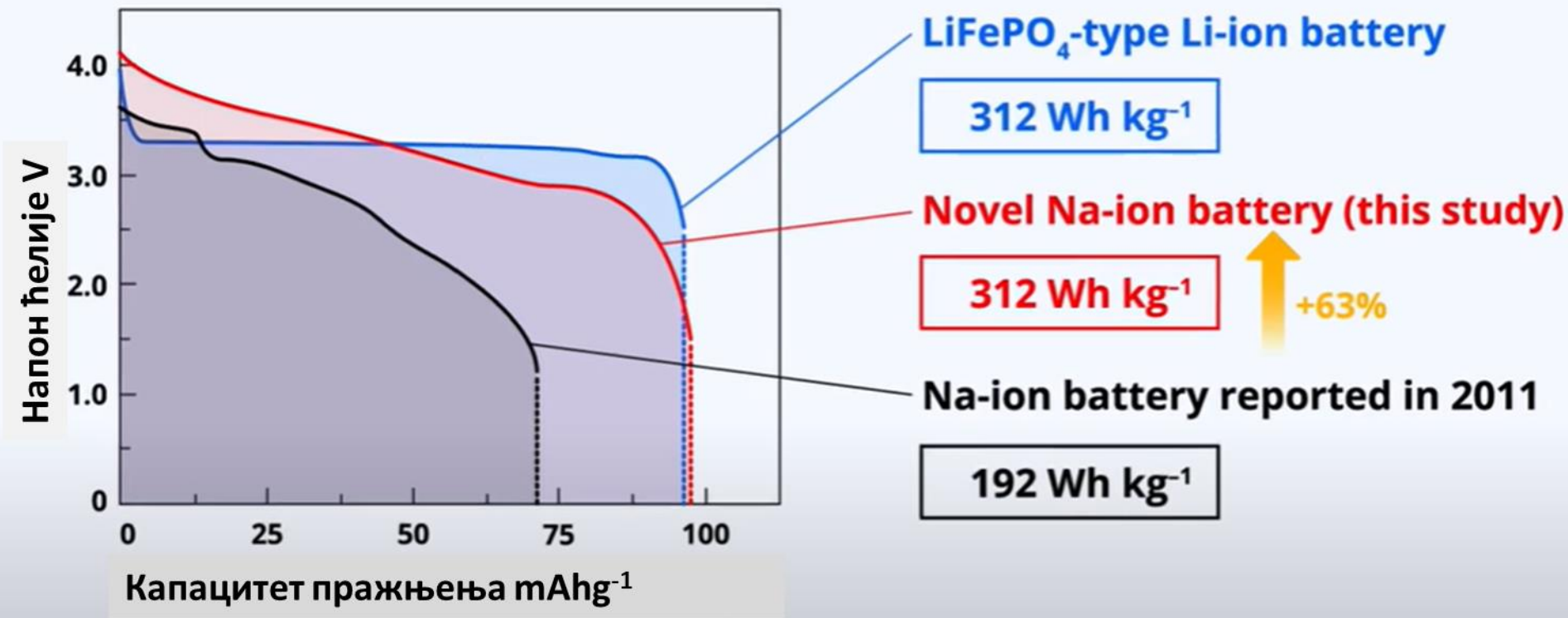
Parameter	Na-Ion	Li-Ion	Победник
Густина енергије	100-160 Wh/kg	250-300 Wh/kg	Li-ion
Животни век	2,000-5,000 циклуса	1,000-2,000 циклуса	**Na-ion**
Јединична цена ($/kWh)	$50-80 (пројектована цена)	$100-130	**Na-ion**
Хладно време	Рад до -30°C	Рад до -20°C	**Na-ion**
Време пуњења	15-30 min (fast)	20-40 min	

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

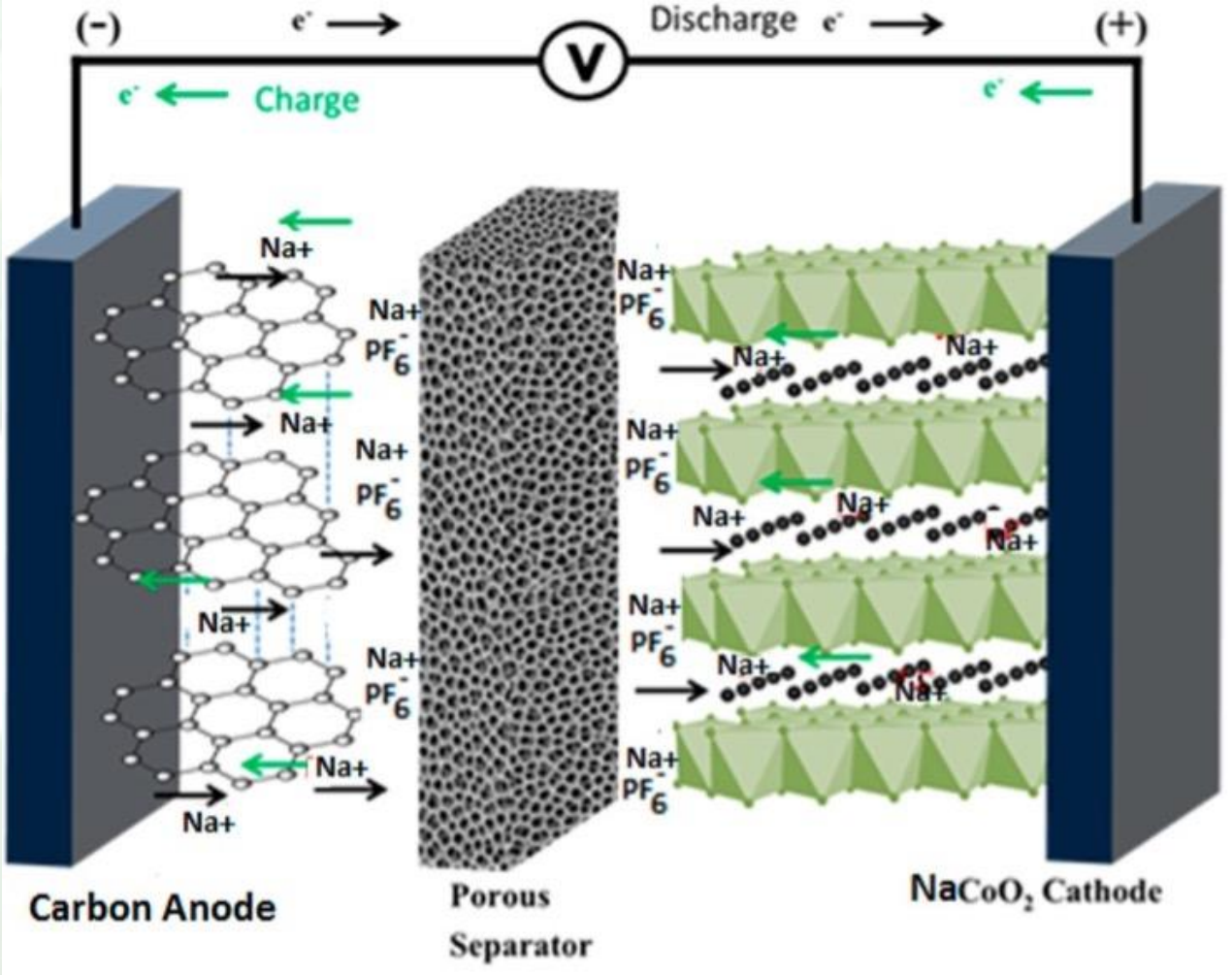


Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



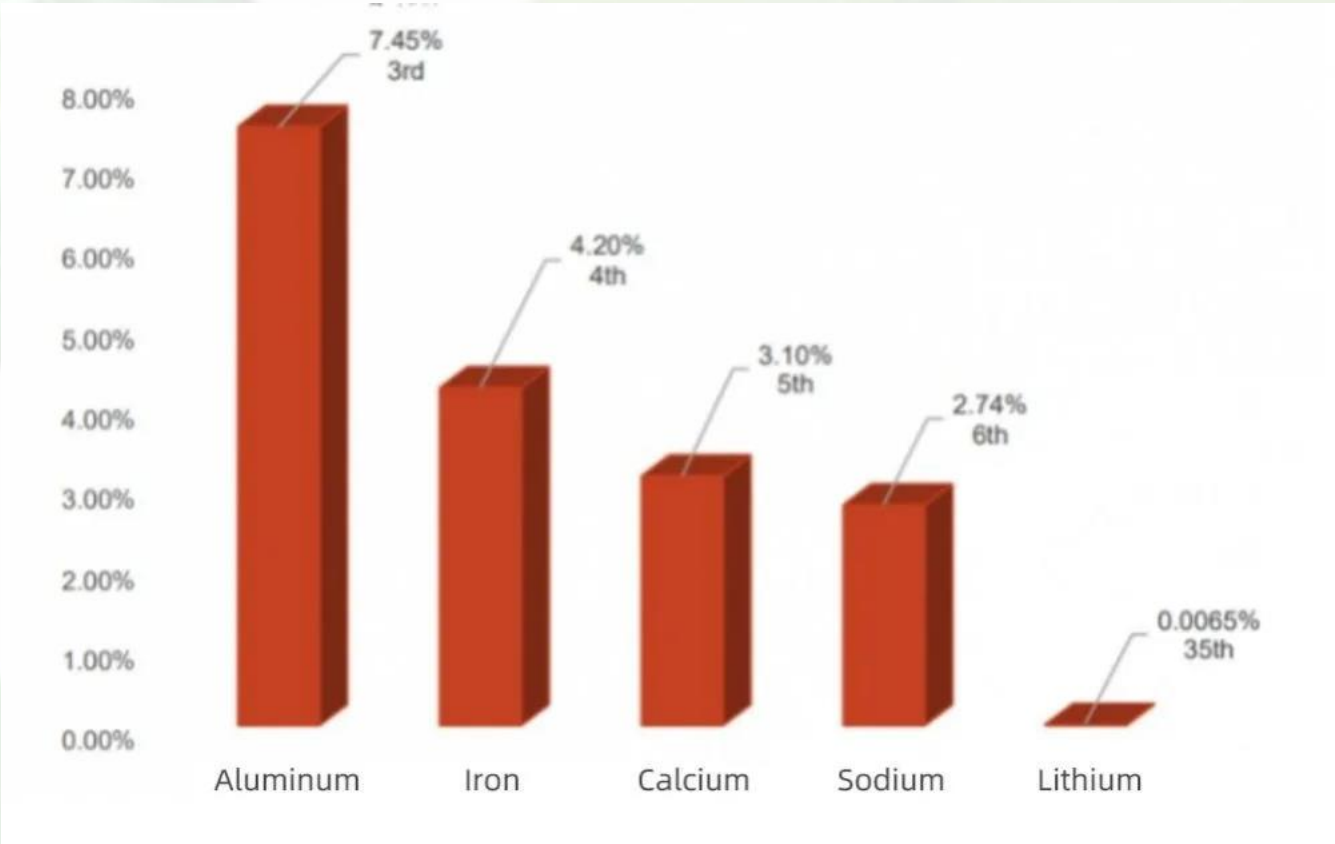
Презентација натријум-јонске батеријске ћелије

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



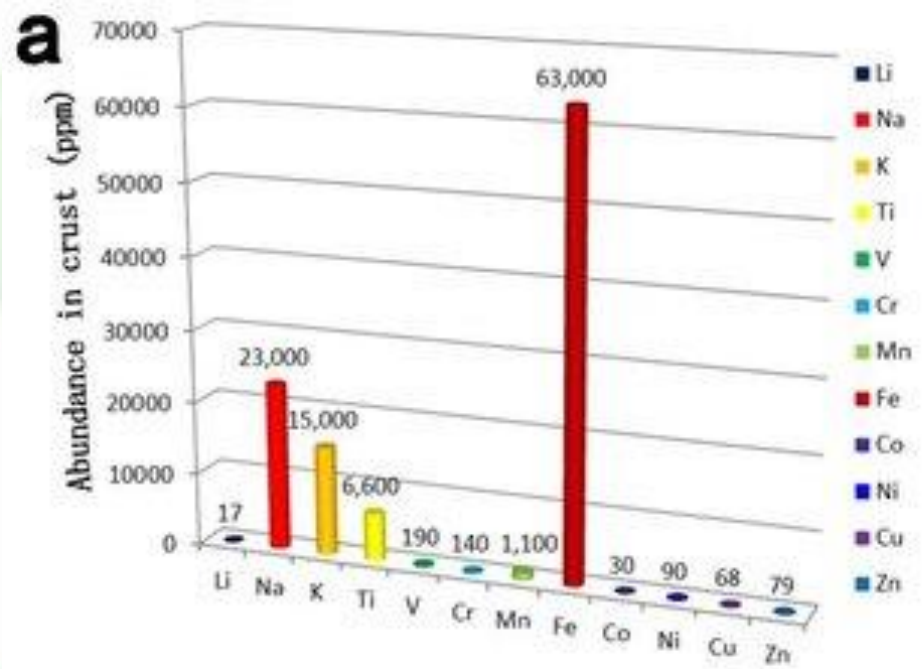
Поређење присуства елемената у Земљиној кори

Електротехнички материјали

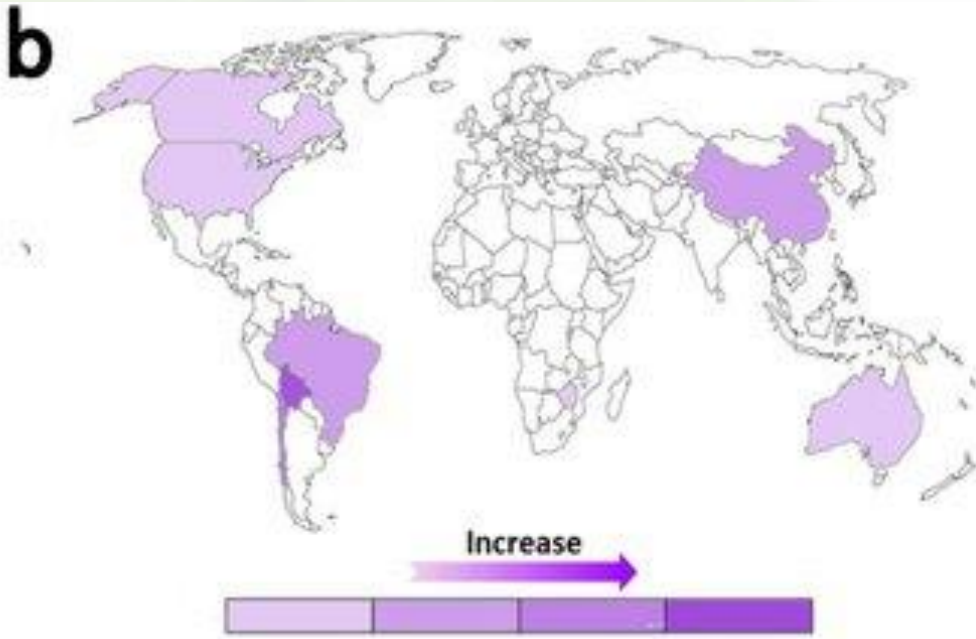
Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

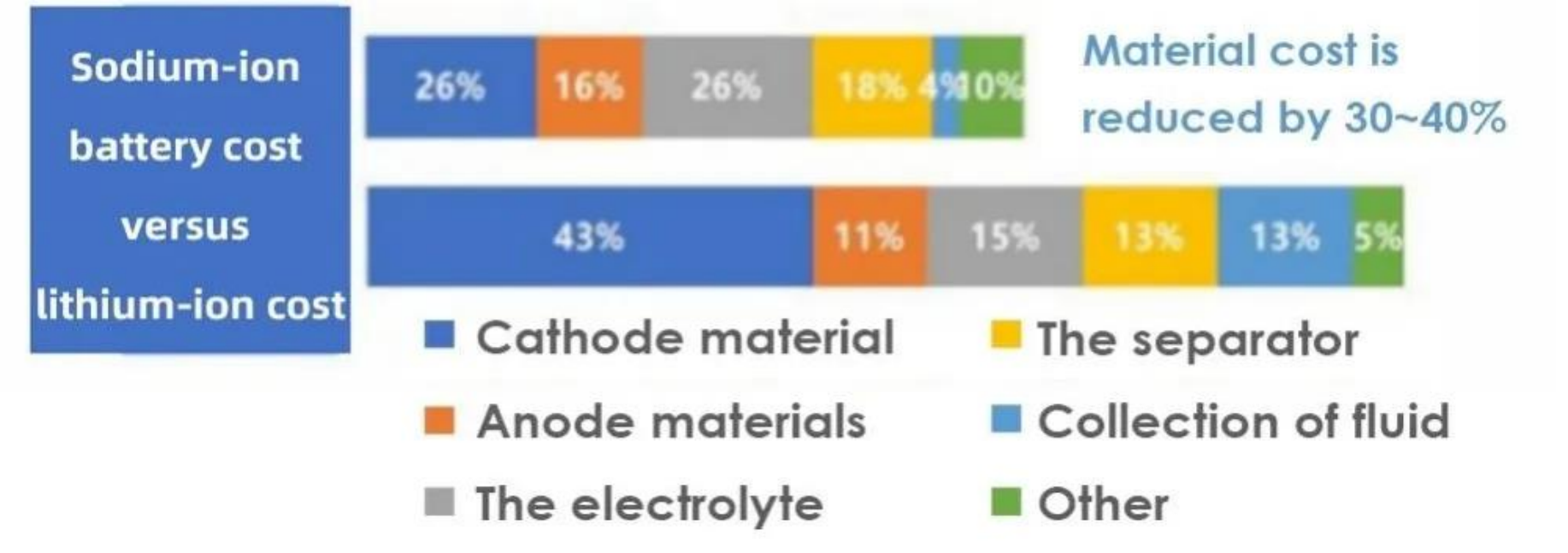


Поређење присуства елемената у Земљиној кори



Географска распрострањеност

Цена натријум-јонских батерија у поређењу са литијум-јонским батеријама



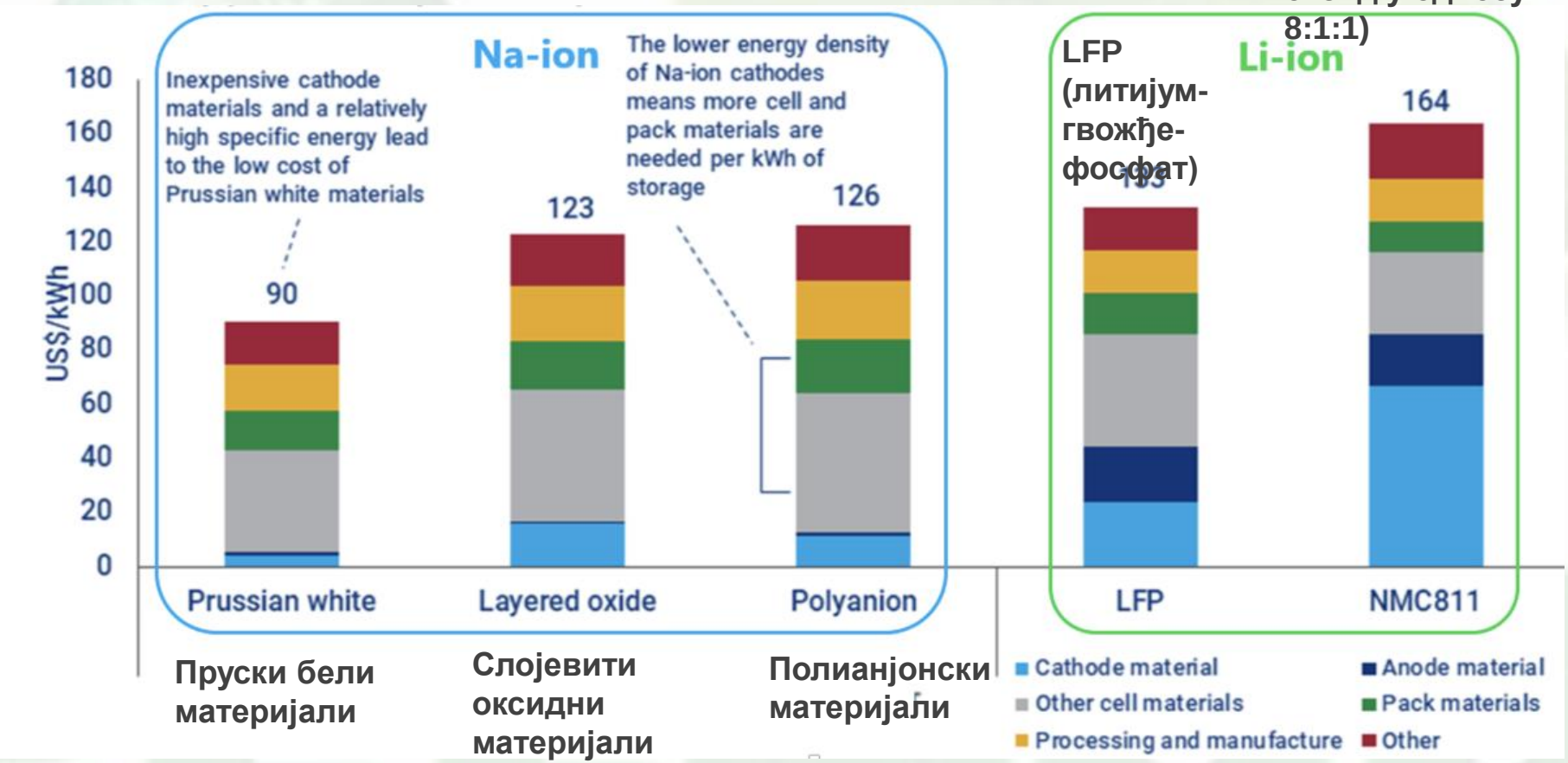
Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union

NMC811 (никел-манган-кобалтни оксид у односу 8:1:1)



Цене различитих типова батерија по јединици ускладиштене енергије

Електротехнички материјали

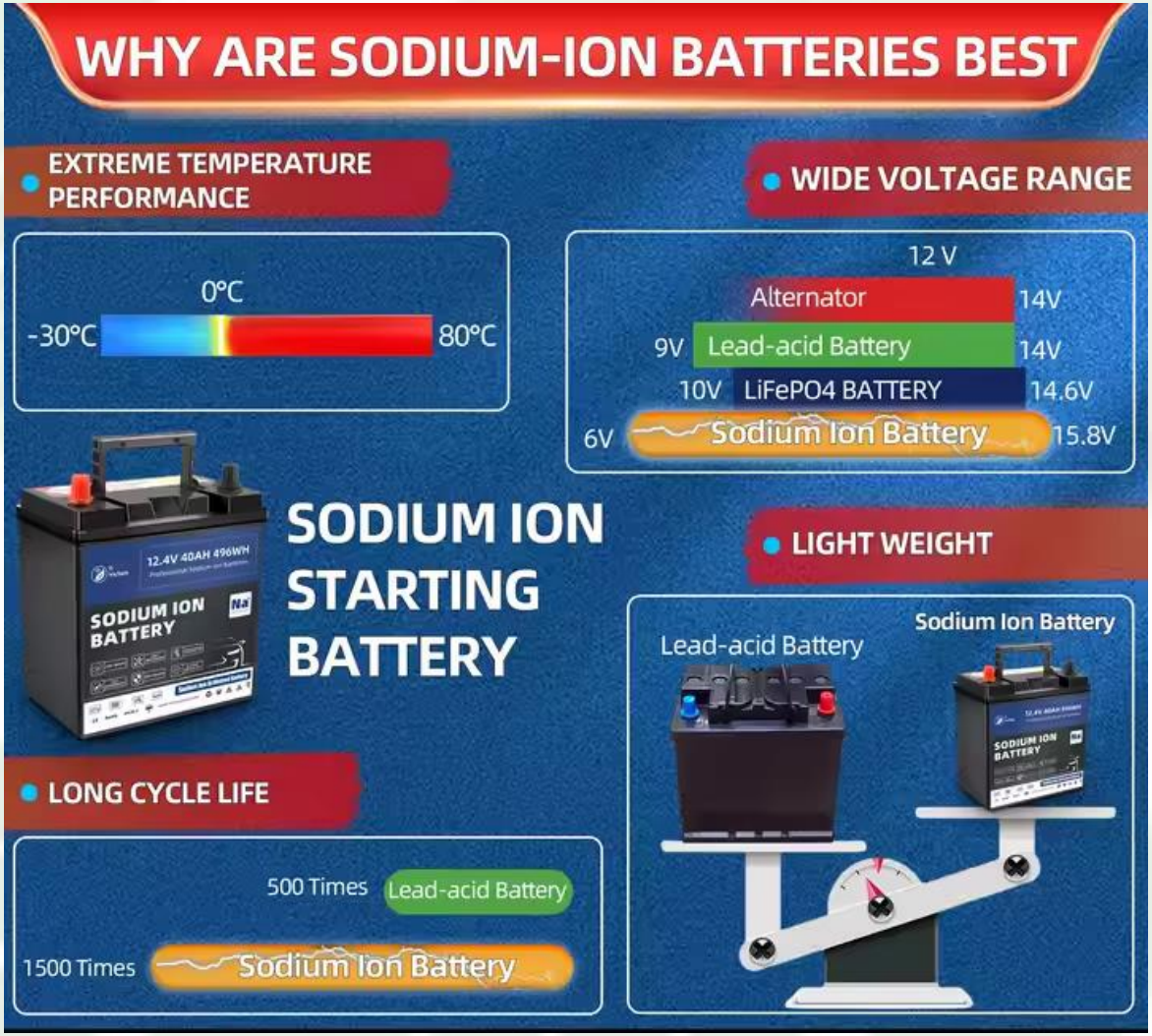
Нове технологије батерија за ЕВ

3. Натријум-јонске (Na-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Широк опсег радних температура

Широк опсег напона



Мања тежина

Дужи радни век

Зашто калијум-јонске батерије привлаче пажњу

Доступност:
Калијум је 880 пута распрострањенији од литијума (2,1% Земљине коре).

Трошкови:
Калијум карбонат кошта само 2 долара по килограму, док литијум карбонат кошта 30 долара по килограму.

Напонски потенцијал:
K^+ има редокс потенцијал од -2,93 V (близу вредности Li^+ од -3,04 V).

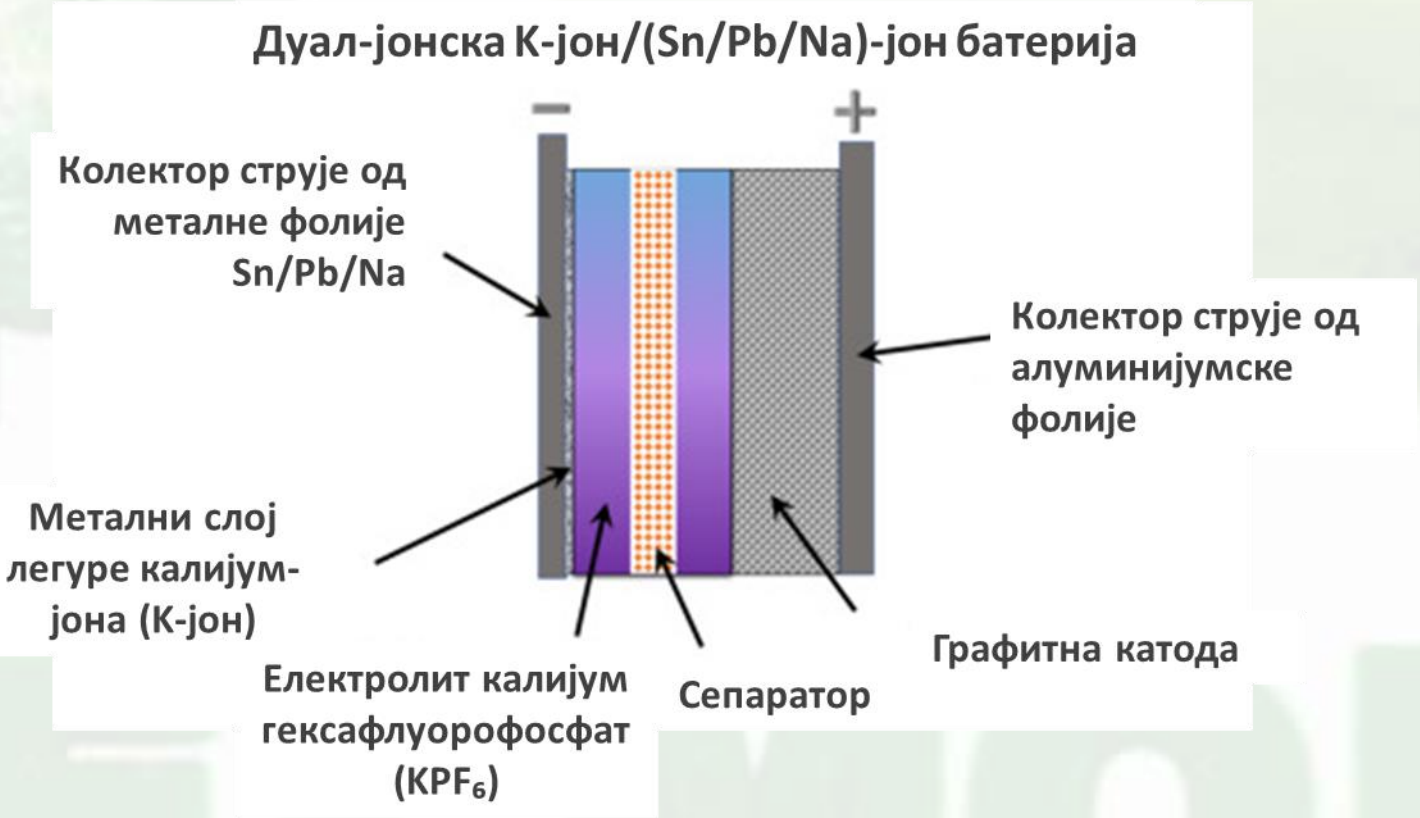
Одрживост:
Користе биолошки изведене материјале за аноде (нпр. угљеник из љуске банане).

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

4. Калијум-јонске (K-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

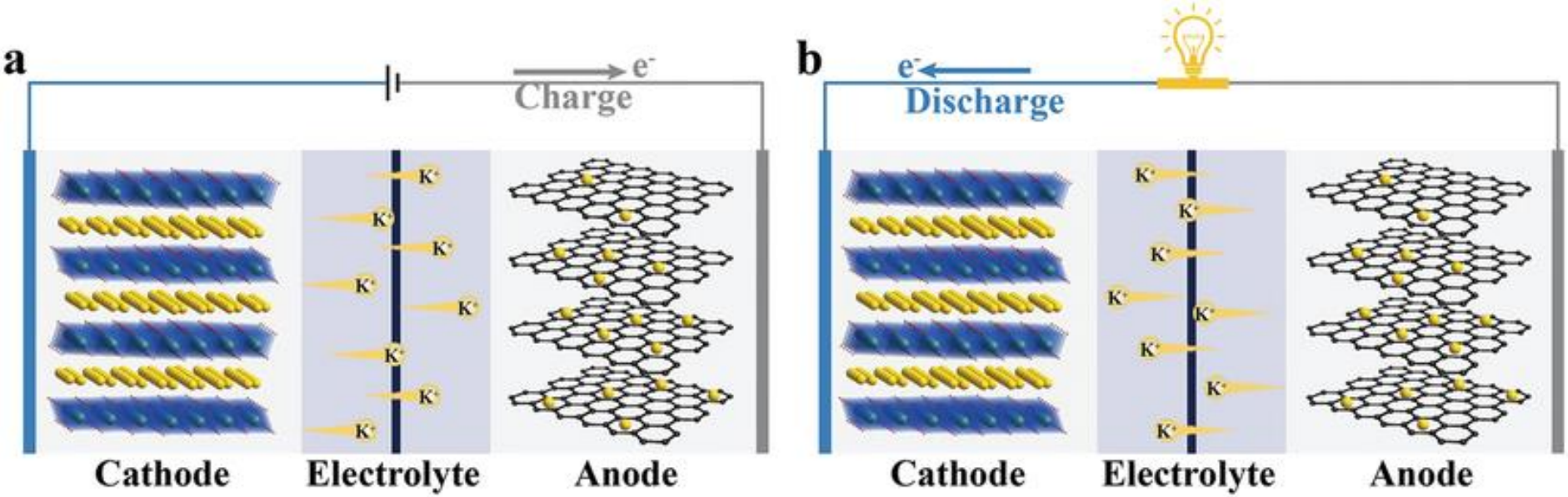


Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

4. Калијум-јонске (K-Ion) батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



Шематски приказ типичне калијум-јонске батерије са P2-типом слојевитих оксида као катодом и графитом као анодним материјалом

Параметар	K-јон	Na-јон	Li-јон
Густина енергије	100-200 Wh/kg	100-160 Wh/kg	250-300 Wh/kg
Животни циклус	500-2.000 циклуса	2.000-5.000	1.000-2.000
Ценовни потенцијал	45-70 USD/kWh	50-80 USD/kWh	100-130 USD/kWh
Покретљивост јона	Бржа од Na^+	Умерена	Најбржа
Безбедност	Одлична	Добра	Умерена

Кључне предности

Брже пуњење:

- K^+ се креће **25% брже** од Na^+ у електролитима
- Постиже **80% пуњења** за <10 минута у прототиповима

Флексибилност материјала:

- Користи **конвенционалне графитне аноде** (за разлику од Na-јонских)
- **Пруска плава катода** избегава употребу ретких метала

Отпорност на температуре:

- Ради у опсегу од **-40°C до 60°C**
- Надмашује Li-јонске батерије у **екстремној хладноћи**

Технички изазови

Стабилност електролита:

• Калијум бурно реагује са водом (неопходна сува производња)

Отечање катоде:

• K^+ је 55% већи од Li^+, што изазива структурни напон

Густина енергије:

• Тренутни прототипи достижу само ~60% капацитета Li-јонских батерија

Истраживачки пробоји (2023-2024)

Иновације на аноди:

- Азотом допирани угљеник постиже капацитет од **300 mAh/g**
- Самоопорављајући полимери спречавају формирање дендрита

Напредак у катодама:

- **$KVPO_4F$** омогућава просечни напон од **3,9V**
- Органске катоде достижу **500 циклуса** са **90% задржаног капацитета**

Електролити:

- Концентрисани "water-in-salt" електролити обезбеђују побољшану безбедност

Дендрити (енгл. *dendrites*) су игличасти или **гранасти метални кристални** (обично литијумови или калијумови) настајаји који се формирају на аноди током пуњења батерија.

Електротехнички материјали

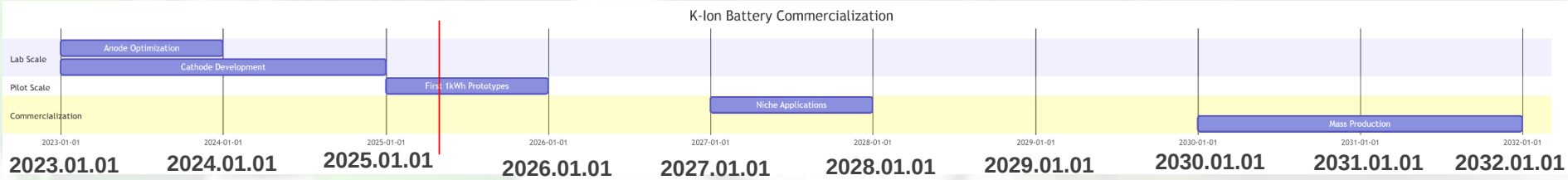
Нове технологије батерија за ЕВ

4. Калијум-јонске (K-Ion) батерије

Funded by the European Union

Процес комерцијализације калијум-јонских батерија

Оптимизација аноде



Развој катоде

Први прототип 1kWh

Ограничене примене

Масовна производња

Електротехнички материјали

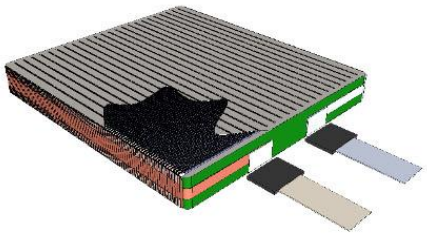
Нове технологије батерија за ЕВ

5. Li-ion батерије са силицијумском анодом

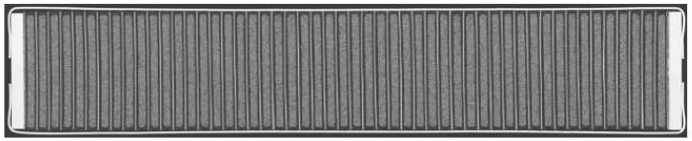
Силицијумске аноде побољшавају Li-ion батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Enovix 3D силицијумска литијум-јонска ћелија



Фотомикрографски попречни пресек



Капацитет силицијумског анодног материјала

1800 mAh/cc²

Конвенционална намотана литијум-јонска ћелИлустровани попречни пресек

Капацитет графитног анодног материјала

800 mAh/cc³

Силицијумске аноде побољшавају Li-ion батерије

Кључне предности:

1. Већи капацитет:

- Силицијум може да складишти **10x више литијумових јона** од графита
- Теоретски капацитет: **3,600-4,200 mAh/g** (vs. 372 mAh/g за графит)

2. Брже пуњење:

- Смањено ограничење дифузије јона

3. Еколошке користи:

- Силицијум је **безопаснији и распрострањенији** од кобалта

Шта су литијум-јонске батерије са силицијумском анодом?

Литијум-јонске батерије са силицијумском анодом су тип пуњивих батерија у којима **силицијум замењује конвенционални графит у аноди**. Ове батерије имају за циљ да искористе **супериорни капацитет складиштења литијума** код силицијума како би постигле:

- **Вишу енергетску густину**
- **Потенцијално дужи животни век**
- **Боље перформансе** у поређењу са традиционалним Li-ion батеријама

Зашто се силицијум користи као анода?

Силицијум се користи као анодни материјал због свог **изузетног теоријског капацитета** за складиштење литијумових јона.

Кључни разлози:

1.Висок капацитет:

1. Силицијум може да **задржи око 10 пута више литијума** од графита (стандардног анодног материјала)
2. **Теоријски капацитет:**
   1. Силицијум: **~4.200 mAh/g**
   2. Графит: **372 mAh/g**

2.Повећана енергетска густина:

1. Овај значајан пораст капацитета чини силицијум **изузетно атрактивним материјалом** за унапређење перформанси литијум-јонских батерија

Која је разлика између силицијумских и литијумских анода?

Силицијумске и литијумске аноде се углавном разликују по својим материјалним својствима и карактеристикама перформанси.

Литијумске аноде:

- Пружају **високу густину енергије**
- Склоне су **формирању дендрита**, што може довести до:
  - **Кратких спојева**
  - **Безбедносних проблема**

Силицијумске аноде:

- Нуде **знатно већи капацитет** за складиштење литијум-јона у поређењу са графитом
- Међутим, имају своје изазове:
  - **Знатно ширење запремине** током циклуса пуњења
  - Потреба за **напредним решењима** за стабилизацију структуре

Зашто батерије са силицијумском анодом?

Силицијумске аноде се сматрају бољим од традиционалних графитних аноди због свог **већег капацитета складиштења енергије**.

Кључне предности:

1. Повећана енергетска густина:

- Омогућавају **складиштење више литијумових јона по јединици тежине** у поређењу са графитом
- Резултат: **дужи животни век батерије** и **већа количина енергије у истом волумену**

2. Идеалне за захтевне примене:

- **Електрична возила:** Продужавају **домет по једном пуњењу**
- **Оптимизација пуњења:** Обезбеђују **дуже време коришћења између пуњења**

Cobalt-Free Batteries: The Future of Ethical and Affordable EVs

Cobalt-free batteries represent a major shift in lithium-ion (Li-ion) technology, eliminating **cobalt**—a costly, scarce, and ethically controversial material—while maintaining performance. Companies like **Tesla, CATL, and Panasonic** are aggressively developing these batteries to reduce costs, improve sustainability, and avoid supply chain risks.

Cobalt-Free Batteries: The Future of Ethical and Affordable EVs

Why Eliminate Cobalt?

✅ **Ethical Concerns** – ~70% of cobalt comes from the **Democratic Republic of Congo (DRC)**, where mining involves child labor and unsafe conditions.

✅ **Cost Reduction** – Cobalt is expensive (~$30–50/kg), making up **10–20% of battery costs**.

✅ **Supply Chain Stability** – Cobalt is geopolitically sensitive (China controls most refining).

✅ **Performance** – New chemistries can match or exceed cobalt-based batteries.

Cobalt-Free Batteries: The Future of Ethical and Affordable

Chemistry	Cathode Material	Energy Density	Advantages	Challenges	Adoption Status
LFP (Lithium Iron Phosphate)	$LiFePO_4$	120–160 Wh/kg	Cheap, safe, long lifespan	Lower energy density	**Widely used** (Tesla Model 3, BYD)
LNMO (Lithium Nickel Manganese Oxide)	$LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$	~200 Wh/kg	High voltage (~4.7V), fast charging	Needs electrolyte optimization	**Pilot production** (CATL, LG)
NMA (Nickel Manganese Aluminum)	$LiNiMnAlO_2$	220–250 Wh/kg	Balanced performance, lower cost	Still needs refinement	**In development** (Pana sonic, Tesla)
Lithium-Rich Layered Oxide	$Li_{1.2}Mn_{0.6}Ni_{0.2}O_2$	250–300 Wh/kg	Very high capacity	Voltage fade issues	**Lab stage**

Green Cell CUBE LiFePO4 20Ah 12.8V 256Wh Lithium Iron Phosphate Battery for Tractor, Lawnmower, Electric Vehicles

PELMOB

University of Pristina
Kosovska Mitrovica

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

Батерије без кобалта

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Батерије без кобалта: Будућност етичких и приступачних електричних возила

Предности у односу на батерије на бази кобалта

✓ Нижа цена – LFP је 20–30% јефтинији од NMC ($LiNiMnCoO_2$).

✓ Дужи век трајања – LFP издржи 2–3 пута више циклуса пуњења од NMC.

✓ Термална стабилност – Мања склоност прегревању (безбедније за електрична возила).

✓ Брже пуњење – LNMO подржава ултра-брзо пуњење (10–15 минута).

Изазови и ограничења

✕ Компромис у густини енергије – Већина батерија без кобалта (осим LNMO/NMA) има нижу густину енергије у поређењу са NMC/NCA.

✕ Ограничења напона и снаге – Неке хемијске варијанте (као LFP) имају нижи радни напон (~3,2V уместо 3,7V код NMC).

✕ Зависност од никла – Многе алтернативе (NMA, LNMO) и даље захтевају никл, чија је доступност такође ризична.

Ко води развој батерија без кобалта?

Tesla – Користи **LFP** у основним моделима 3/Y и системима за складиштење енергије (Megapack).

CATL – Масовно производи **LFP** и развија **M3P** (LFP са додатком мангана).

LG Energy Solution – Ради на **LNMO** технологији за високоперформансна електрична возила.

BYD – **Blade Battery (LFP)** са побољшаном густином енергије у пакету.

Перспективе у будућности

2024–2026:

- **LFP** доминира у јефтинијим електричним возилима
- **NMA/LNMO** технологије улазе на тржиште премијум возила

2028–2030:

- **Катоде обогаћене литијумом** могли би смањити јаз у густини енергије

Након 2030:

- Могућа појава **чврстосталних батерија без кобалта** (нпр. литијум-сумпорне)

Електротехнички материјали

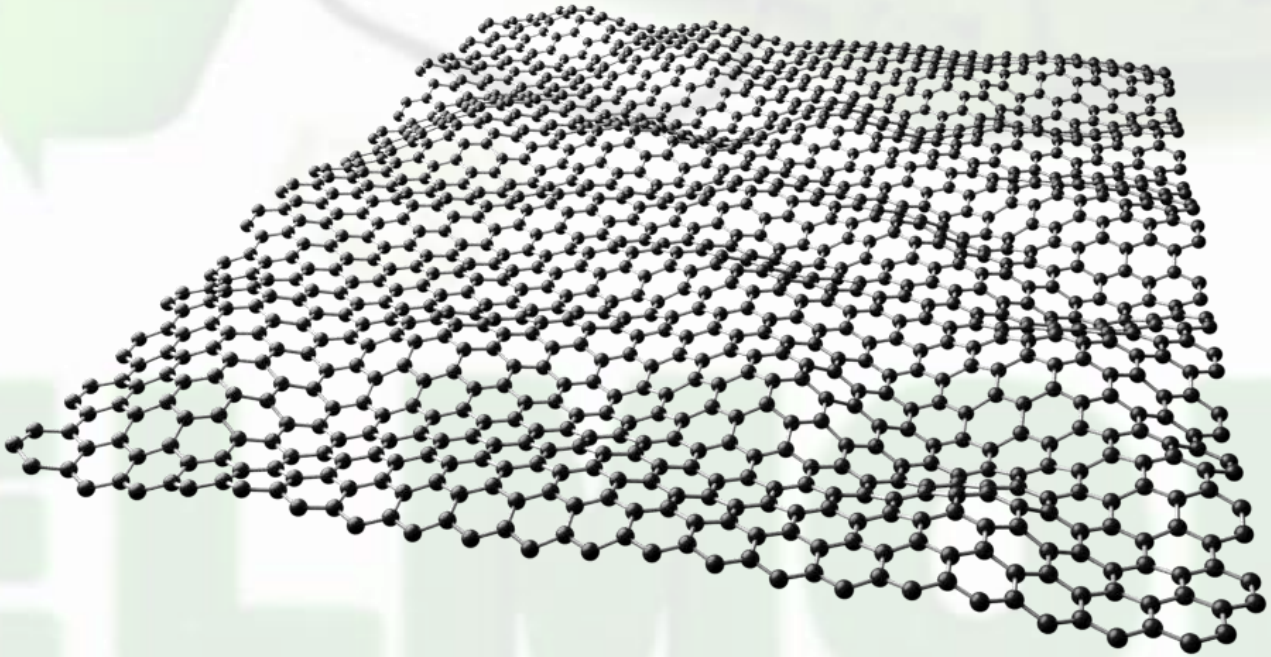
Нове технологије батерија за ЕВ

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union

Графенски лист: један слој графена има дебљину од само једног атома угљеника.

Графенске батерије су нова технологија складиштења енергије која користи јединствена својства графена (један слој угљеникових атома у хексагоналној решетки) да постиже боље перформансе од стандардних батерија. Захваљујући изузетној проводљивости, термичкој стабилности и чврстоћи, графен је идеалан материјал за батерије будућности.



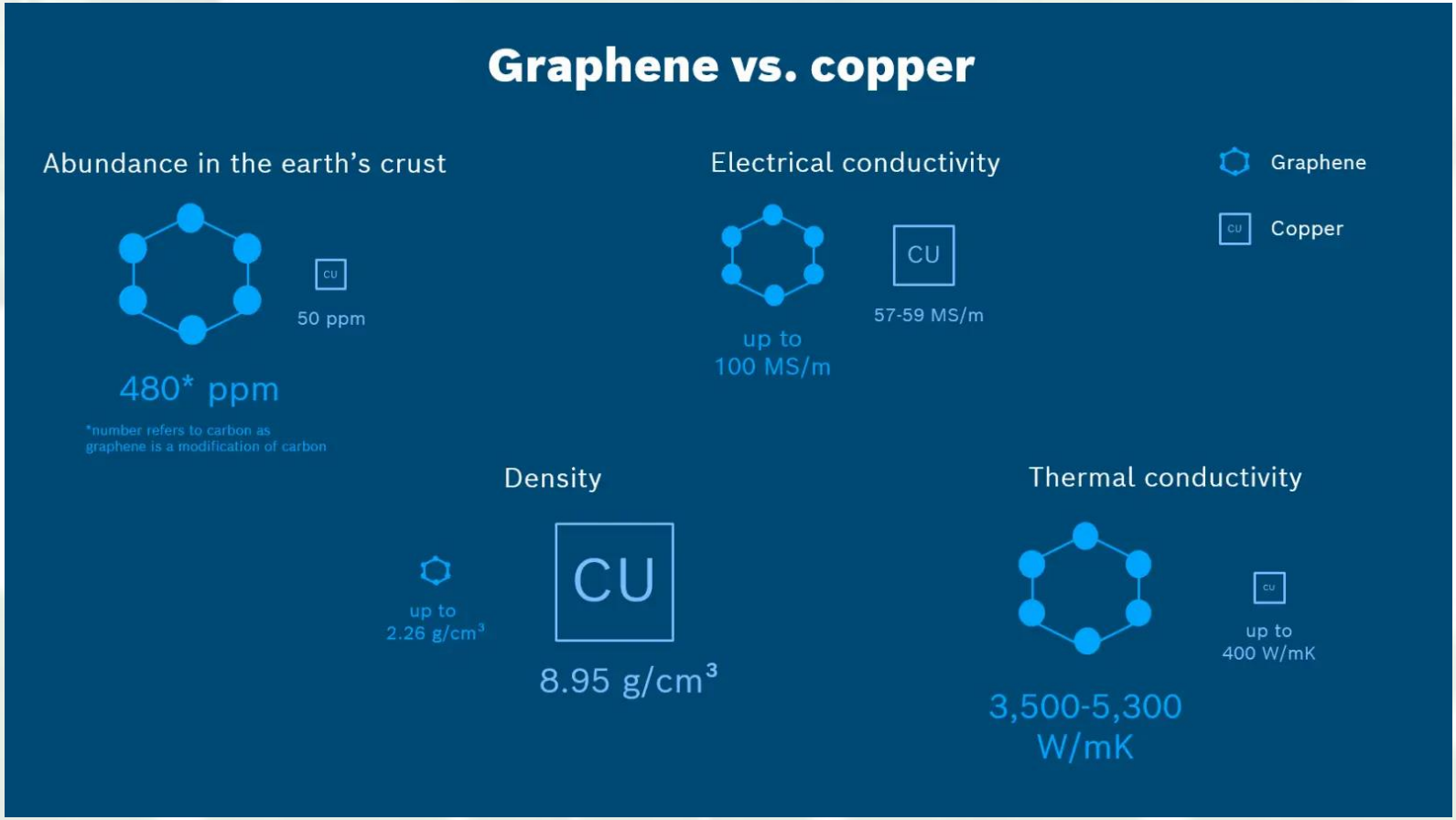
Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union

Графен и бакар - поређење



Графен и бакар - поређење

Садржај у Земљиној кори

•**Cu (бакар)**
50 ppm (делова на милион)

•**Графен**
480 ppm*
Број се односи на угљеник, јер је графен његова модификација

Густина

•**Графен:** до **2,26 g/cm³**

•**Cu (бакар): 8,95 g/cm³**

Топлотна проводљивост

•**Графен:** до **400 W/mK**

•**Cu (бакар): 3.500–5.300 W/mK**

Електрична проводљивост

•**Графен: ~10^8 S/m** (на собној температури)*

•**Cu (бакар): 59×10^6 S/m**

"ppm" (parts per million - делови на милион) је јединица концентрације

• **"Бакар: 50 ppm"** = 50 делова бакра на 1.000.000 делова Земљине коре.

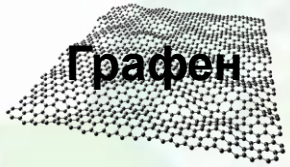
• **"Графен (угљеник): 480 ppm"** = 480 делова угљеника (у облику графена) на 1.000.000 делова Земљине коре.

Електротехнички материјали

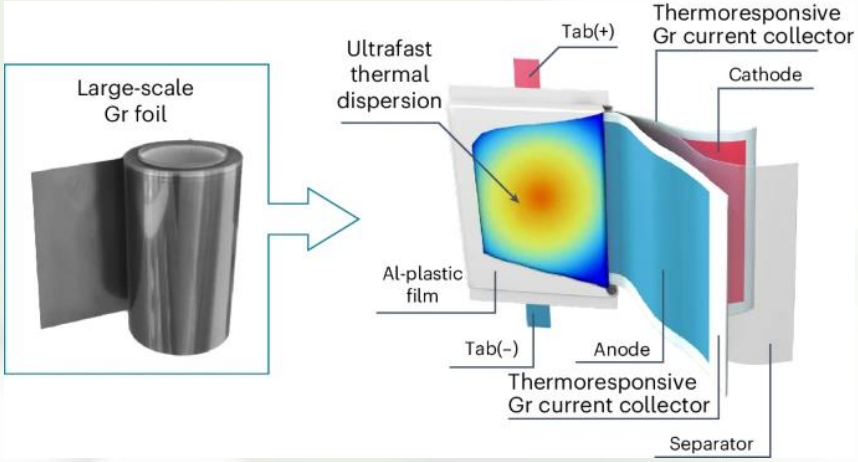
Нове технологије батерија за ЕВ

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



Практични значај за литијум-јонске батерије



Литијум-јонске батерије су изложене кључном ризику званом **термални побег**. Овај феномен се јавља када се у делу батерије акумулира прекомерна топлота, што често изазива отказ батерије, праћен опасним пожарима или чак експлозијама.

Термални побег се углавном јавља на колекторима струје батерије, тачкама где је концентрација енергије највећа. У савременим литијум-јонским батеријама, колектори струје се обично израђују од алуминијума или бакра.

Графенски колектори струје које су развили истраживачи са својом **графенском фолијом** могу постићи **топлотну проводљивост** од чак **1.400,8 W m⁻¹ K⁻¹**. За поређење, ово је скоро **10 пута више** од топлотне проводљивости колектора струје на бази бакра и алуминијума.

Због изузетно брзог расипања топлоте које показује **графенска фолија**, елиминише се ризик од локалне концентрације топлоте приликом протока струје.

Ово заузврат уклања ризике од алумино-термијских реакција и реакција ослобађања водоника, који су критични кораци који доводе до ширења квара на батерији и опасности од пожара.

Кључне предности графенских батерија:

Висока проводљивост

Графенова висока покретљивост електрона омогућава **брже пуњење и пражњење**, значајно скраћујући време пуњења (нпр. са сати на минуте).

Повећана густина енергије

Графен може да складишти **више енергије по јединици масе** у поређењу са конвенционалним електродним материјалима, што потенцијално доводи до батерија са дужим трајањем.

Продужени век трајања

Графенова стабилност смањује деградацију током циклуса пуњења, што продужава животни век батерије.

Побољшано управљање топлотом

Графен ефикасно **расипа топлоту**, смањујући ризик од прегревања и повећавајући безбедност.

Лака и флексибилна конструкција

Графенске батерије могу бити **тање, лакше и чак савитљиве**, што их чини идеалним за **носиву електронику** и **електрична возила (ЕВ)**.

Предности графенских батерија у односу на Li-ion батерије

Графенске батерије нуде бројне предности у поређењу са конвенционалним Li-ion батеријама, чинећи их изузетно перспективним за индустрију електричних возила.

Брже пуњење:
Графен омогућава брзо кретање електрона, значајно скраћујући време пуњења. Док Li-ion батеријама треба 30-60 минута за потпуно пуњење, графенске батерије се потенцијално могу напунити за само неколико минута.

Већа густина енергије:
Li-ion батерије имају ограничен капацитет складиштења енергије. Захваљујући великој површини и изузетној проводљивости, графенске батерије могу да складиште више енергије у истом волумену, чиме се повећава долет електричних возила.

Дужи животни век:
Традиционалне батерије се оштећују услед понављајућих циклуса пуњења. Графенске батерије показују мању хабаност, што резултира дужим радним веком и смањеном потребом за честим заменама.

Побољшана ефикасност:
Графен побољшава транспорт јона, смањујући губитке енергије током пуњења и пражњења. То доводи до бољих перформанси батерије и повећане ефикасности возила.

Повећана безбедност:
Прегревање и термални побег су чести проблеми код Li-ion батерија. Изврсна топлотна проводљивост графена ефикасно расипа топлоту, минимизирајући ризик од пожара и експлозија.

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

Поређење перформанси Li-Ion и Графенске батерија

	Опис	Литијум – јонска батерија	Графенска батерија
Први уређај		1976	**2011**
Капацитет (mAh)	Количина хемијске енергије у батерији:	~ 2700 - 3300 mAh	~ 1000 mAh
Брзина пуњења	Колико брзо се може 100% напунити батерија	1-2 hours	**27 minutes**
Густина енергије (Wh kg^{-1})	Количина енергије коју батерија може ускладиштити по јединици масе	~250 Wh kg^{-1}	**~1000 Wh kg^{-1}**
Животни век	Број циклуса колико се пута батерија може поново пунити док задржи 80% оригиналног капацитета.	~ 500	**~ 2500**
Безбедност	Неке батерије се могу прегрејати и изазвати пожар.	Запаљива	**Незапаљива**
Одрживост	Многе батерије садрже компоненте и материјале који су опасни, и јако се тешко рециклирају.	Ископано	У лабораторји

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Велика специфична површина

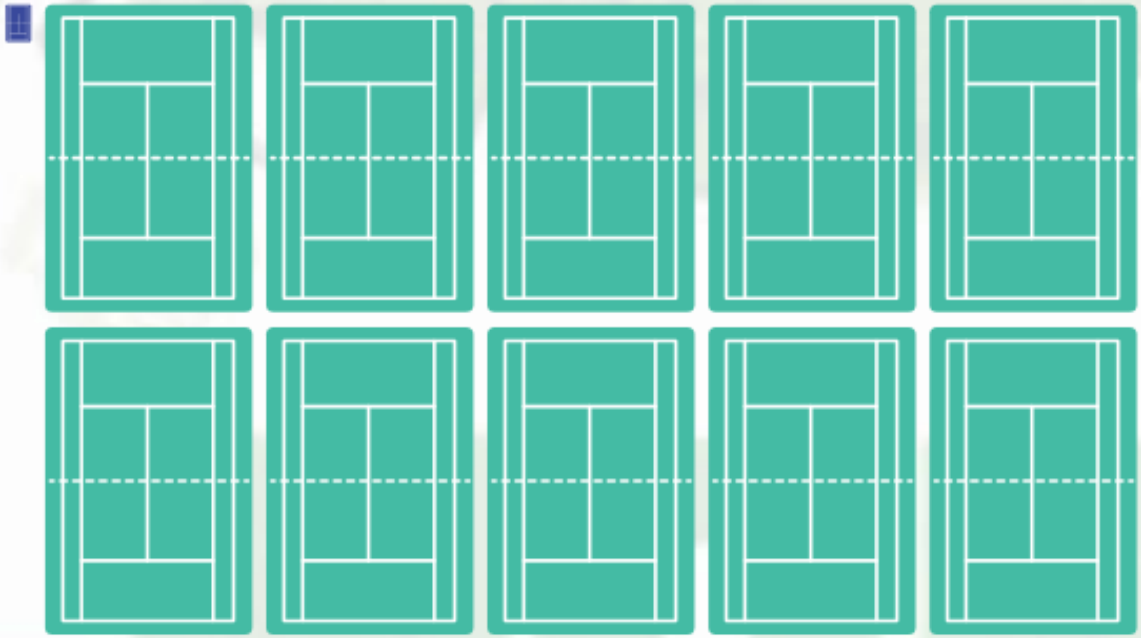
Графен има огромну површину од 2630 m^2 по граму.

Li 4 m^2g^{-1}

1 Table Tennis Top (2.74m x 1.525m)

Graphene 2630 m^2g^{-1}

10 Tennis Courts (23.774m x 10.973m Each)



Графен и литијум: површина
1 грам графена може да покрије површину од 10 тениских терена!

Врсте графенских батерија:

1. Графеном побољшане литијум-јонске батерије

Графен се користи као додатак електродама за побољшање проводљивости и капацитета.

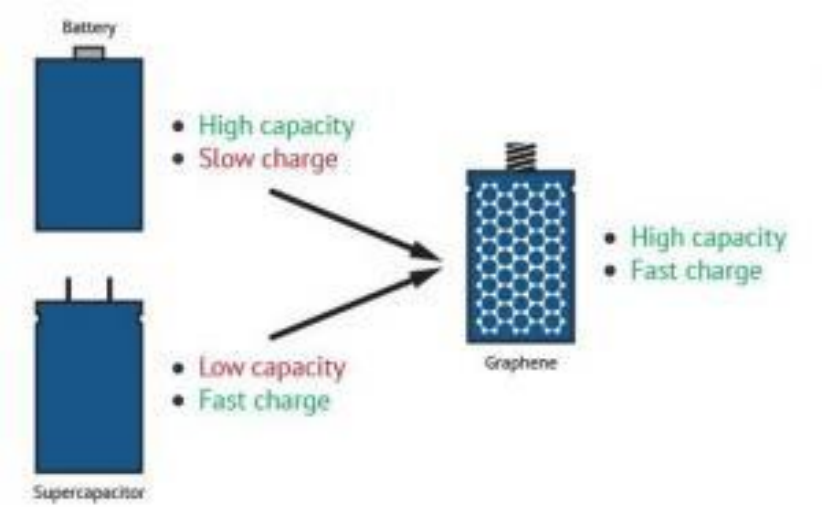
2. Графенски суперкондензатори

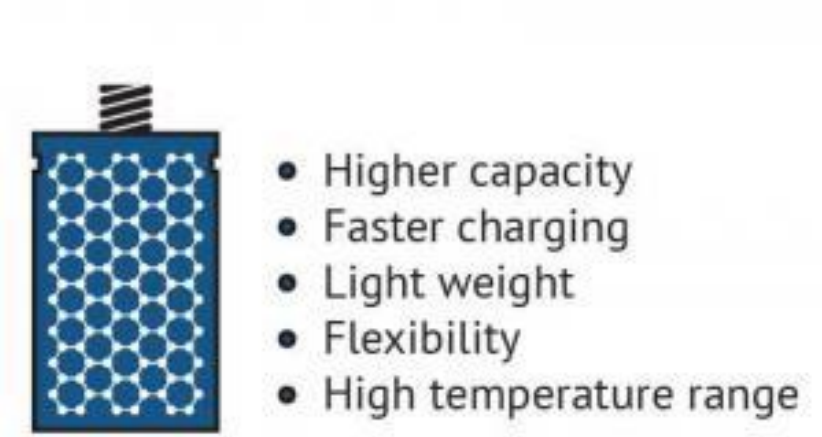
Комбинују брзо пуњење/пражњење суперкондензатора са високим капацитетом складиштења енергије графена.

3. Чисте графенске батерије *(још у истраживању и развоју)*

Теоријске батерије које користе графен као примарни материјал за електроде.

Графенске батерије комбинују предности и батерија и суперкондензатора





Суперкондензатор се користи када је енергија потребна у кратким периодима са великом снагом пуњења и пражњења. Комбиновањем брзог снабдевања енергијом суперкондензатора и великог капацитета складиштења батерија, недостаци оба система се могу превазићи у хибриду батерија-суперкондензатор (BSH).

$Li_4Ti_5O_{12}$ (титанијум-литијум оксид) се често користи као електрода у кондензаторима. Када се повеже са N-допираним графеном, може се формирати BSH који је постигао капацитет складиштења од до 70 Wh kg^{-1}.

Графенске батерије

Уграђивањем графена у **литијум-јонске батерије**, најчешће на електродама, могу се побољшати бројна својства батерија.

Предности у односу на традиционалне Li-ion батерије:

✓ **Виша густина енергије** – већи капацитет складиштења
✓ **Брже пуњење** – значајно скраћено време пуњења
✓ **Нове карактеристике**:

•**Флексибилност** – могућност савијања

•**Незапаљивост** – повећана безбедност

Графенске батерије представљају **револуционарну технологију** која комбинује најбоље особине савремених батерија и суперкондензатора.

https://www.ossila.com/pages/lithium-ion-vs-graphene-batteries

Мане литијум-јонских батерија

Упоређивање Li-ion и графенских батерија јасно показује да су Li-ion батерије инфериорне у неколико кључних аспеката. Главна ограничења литијум-јонских батерија су:

- **Нижа густина енергије**
- **Спорије пуњење**
- **Краћи животни век**
- **Проблеми токсичности**
- **Запаљивост**

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

У ближој будућности, већа густина енергије графенских батерија очекује се да омогући електричним возилима (ЕВ) **знатно већи домет** по једном пуњењу, чинећи их погоднијим за дуже путовања.

Како графенска технологија напредује, **побољшана снага** вероватно ће унапредити:

- **убрзање** (перформансе сличне спортским возилима)
- **укупну ефикасност** (мањи губици енергије)

Ово ће **приближити ЕВ** карактеристикама високо перформансних спортских аутомобила.

Осим тога, очекује се да ће **изузетна проводљивост графена** обезбедити:

- **Стабилну испоруку енергије** (конзистентнији проток)
- **Смањене перформансне флуктуације** (равномернији рад)
- **Оптимизовано управљање снагом** (прецизнија контрола)

Ово ће резултирати **благом и поузданијом вожњом**, смањујући осећај "трзања" код убрзања или кочења.

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

7.0 Графенске батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Ултрабрзо пуњење графенских батерија представља једну од њихових најзначајнијих предности.

Кључне користи:

⚡ **Пуњење за минуте** (уместо сати) – практичност упоредива са **пуњењем горива** код традиционалних возила

⚡ **Смањено оптерећење** на инфраструктуру пуњења – више доступности и ефикасности у мрежама за ЕВ

Графенске батерије могу допринети **одрживијем екосистему електричних возила**. Њихов **дужи животни век** смањује количину батеријског отпада, а садрже **мање штетних материјала за животну средину** у поређењу са литијум-јонским батеријама.

Додатне еколошке предности:

♻ **Графен се може добити из обилних извора угљеника** (нпр. биомаса, отпаци)

♻ **Смањена зависност од ретких земних метала**

♻ **Мањи еколошки утицај производње**

Како графенске батерије унапређују 1C пуњење

Графеном побољшане батерије могу **безбедно да премаше 1C брзину пуњења** захваљујући следећем:

1. Изузетно високој проводљивости

- Графен смањује унутрашњи отпор, омогућавајући **бржи проток електрона** без прегревања.

2. Термалној стабилности

- Графен **боље расипа топлоту** од традиционалних материјала, спречавајући оштећења при високим струјама.

3. Дужем животном веку

- Чак и при **5C–10C** (пуно пуњење за **6–12 минута**), графенске батерије се **спорије разарају** од конвенционалних Li-ion батерија.

Изазови и ограничења графенских батерија

Иако имају велики потенцијал, бројни изазови отежавају ширу примену графенских батерија у електричним возилима.

• **Високи трошкови производње** – Производња висококвалитетног графена је и даље скупа, што представља значајан изазов за масовну производњу.

• **Проблеми при увећању производње** – Увећање производње графенских батерија како би се задовољиле потребе индустрије електричних возила захтева значајна побољшања у техникама производње.

• **Интеграција у постојеће системе** – Већина садашњих електричних возила је дизајнирана за литијум-јонске батерије. Прелазак на графенске системе захтевао би ажурирање система за управљање батеријама и инфраструктуре за пуњење.

• **Ограничења у ланцу снабдевања** – Производња графена зависи од специјалних материјала и процеса. Нагли пораст потражње могао би да оптерети ланац снабдевања.

• **Временски оквир за комерцијализацију** – Иако истраживања напредују, можда ће бити потребно још неколико година пре него што графенске батерије буду спремне за масовно усвајање, углавном због потребе за додатним тестирањима и смањењем трошкова.

Самообнављајуће батерије: Будућност дуготрајнијег складиштења енергије

Самообнављајуће батерије су нова технологија која је осмишљена да **аутоматски поправља оштећења** (као што су пукотине, формирање дендрита или деградација електрода) која настају током циклуса пуњења и пражњења. Ова иновација могла би да **продужи животни век батерија**, побољша њихову **безбедност** и смањи отпад.

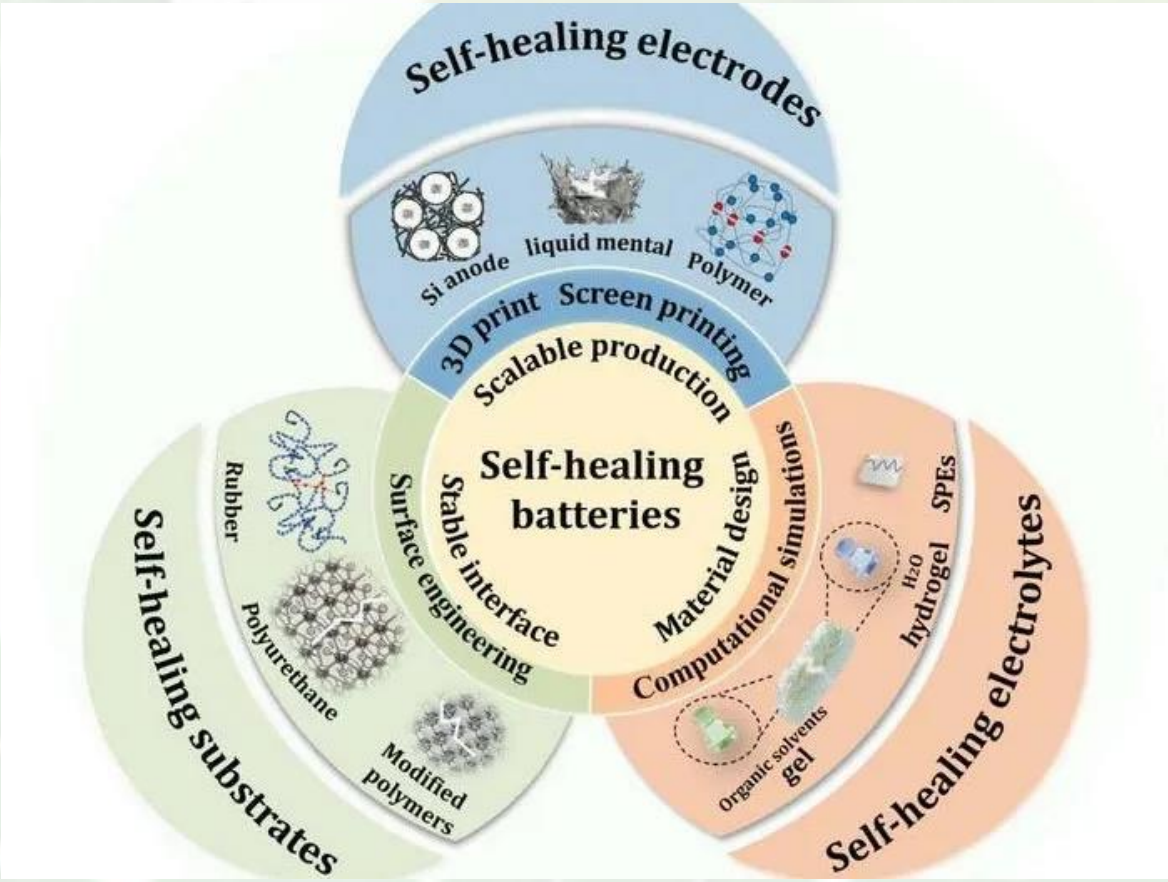
Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

8.0 Самообнављајуће батерије

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Кључне компоненте и стратегије дизајна самообнављајућих батерија



Главне компоненте самообнављајућих батерија

(A) Самообнављајуће електроде

Материјали:

- **Силицијумске аноде:** Отпорне на пукотине захваљујући еластичним везивима.
- **Течни метали (нпр. галијум):** Способни да се преталоже и поправе пукотине.
- **Проводљиви полимери (нпр. PEDOT:PSS):** Обнављају везе након оштећења.

Функција: Аутоматско поправљање пукотина насталих услед ширења материјала (честа појава у Li-јонским батеријама).

Главне компоненте самообнављајућих батерија

(B) Самообнављајући електролити

Материјали:

•**Хидро-гелови:** Флексибилни и јонски проводљиви.

•**Модификовани полимери (нпр. полиуретан):** Способни за зарастање пробоја.

•**Чврсти керамички материјали:** Отпорни на пробој дендрита.

Функција:
Спречавају цурење, сузбијају дендрите и одржавају проток јона након оштећења.

Главне компоненте самообнављајућих батерија

(C) Самообнављајући супстрати

Материјали:

- **Графенски/NTC слојеви**: Омогућавају проводљивост при савијању.
- **Еластомери (нпр. ПДМС)**: Растезљиви и отпорни на кидање.

Функција: Штите структуру батерије од механичког напрезања (нпр. савијања, удара).

Стратегије дизајна и Технологије производње

(A) Напредни дизајн материјала

Динамичке везе: Реверзибилне хемијске везе (нпр. водоникове, дисулфидне) које се обнављају након прекида.

Нанокомпозити: Уграђивање агенса за самоопоравак (нпр. микрокапсуле са проводљивим пуниоцима).

(B) Рачунарске симулације

Моделовање вештачке интелигенције: Предвиђање слабих тачака и оптимизација механизама за самоопоравак.

Мултифизичке симулације: Тестирање расподеле напрезања и топлоте у реалним условима.

(C) Скалабилна производња

3D штампа: Прецизна депозиција слојева са способношћу самоопоравака.

Штампа преко мреже: Нискотрошковна израда електрода на великој скали.

Предности и примена

(A) Трајност:
2–3 пута дужи животни век у поређењу са конвенционалним батеријама.

(B) Безбедност:
Смањен ризик од цурења и експлозија.

(C) Примене:
Електрична возила (EV): Отпорне на екстремне циклусе пуњења.
Флексибилна електроника: Преносиви уређаји, телефони са савијљивим екранима.
Свемирска/аеронаутичка техника: Отпорне на зрачење, захтевају минимално одржавање.

8.0 Самообнављајуће батерије

Како раде самообнављајуће батерије?

1. Самообнављајуће електроде

Микрокапсуле или полимери – Неке батерије садрже **агенсе за поправку** (нпр. проводљиве полимере или гелове) који се ослобађају при настанку пукотина, затварајући оштећења.

Реверзибилне хемијске везе – Одређени материјали (нпр. **супрамолекуларни полимери**) могу да **обнове везе** након прекида, враћајући проводљивост.

2. Сузбијање дендрита (за литијумске и чврстосталне батерије)

Литијумови дендрити (разгранати кристали) изазивају краће спојеве у Li-јонским батеријама.

Самообнављајуће премази (нпр. графен, еластомери) могу да **растварају и поново таложе литијум**, спречавајући формирање дендрита.

3. Вештачка интелигенција и паметно управљање батеријама

Неки системи користе **сензоре + вештачку интелигенцију** да открију оштећења и покрену механизме за поправку (нпр. загревање, подешавање напона).

Предности самообнављајућих батерија

✅ **Дужи век трајања** – Способне да се опораве од оштећења, смањујући учесталост замене.

✅ **Безбеднији рад** – Спречавају опасне кварове (нпр. пожаре изазване дендритима).

✅ **Већа густина енергије** – Стабилније електроде омогућавају интензивније пуњење.

✅ **Одрживост** – Мањи број батерија за одлагање = мање е-отпада.

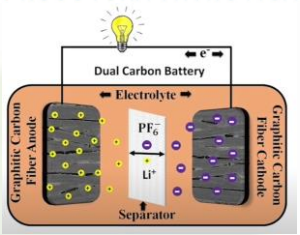
Текућа истраживања и изазови

Технологија	Истраживачи/Компаније	Статус
Самообнављајуће литијум-јонске	Stanford, U. of Illinois, Tesla (patents)	Лабораторијска фаза
Дендрито-отпорне чврстосталне	QuantumScape, Toyota	Prototypen
Графенске самообнављајуће	Samsung, Huawei	Early R&D

Изазови

Проблем	Опис
Трошкови	Самоопоравајући материјали су скупи за производњу.
Скалабилност	Тешко их је масовно производити са поузданошћу.
Компромиси	Неки механизми опоравка смањују густину енергије.

Двоструко-угљеничне батерије : Погодна алтернатива за литијум-јонске батерије



Двоугљеничне батерије (познате и као угљеничне батерије или потпуно угљеничне батерије) су нова технологија складиштења енергије која користи угљеничне материјале и за аноду и за катоду, чиме се елиминише потреба за металима као што су литијум, кобалт или никла.

Ове батерије користе процес интеркалације (уметање јона) у угљеничне структуре за складиштење енергије, нудећи јефтинију, еколошки прихватљивију и брже пуњење алтернативу у односу на традиционалне литијум-јонске батерије.

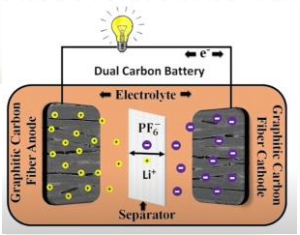
Електротехнички материјали

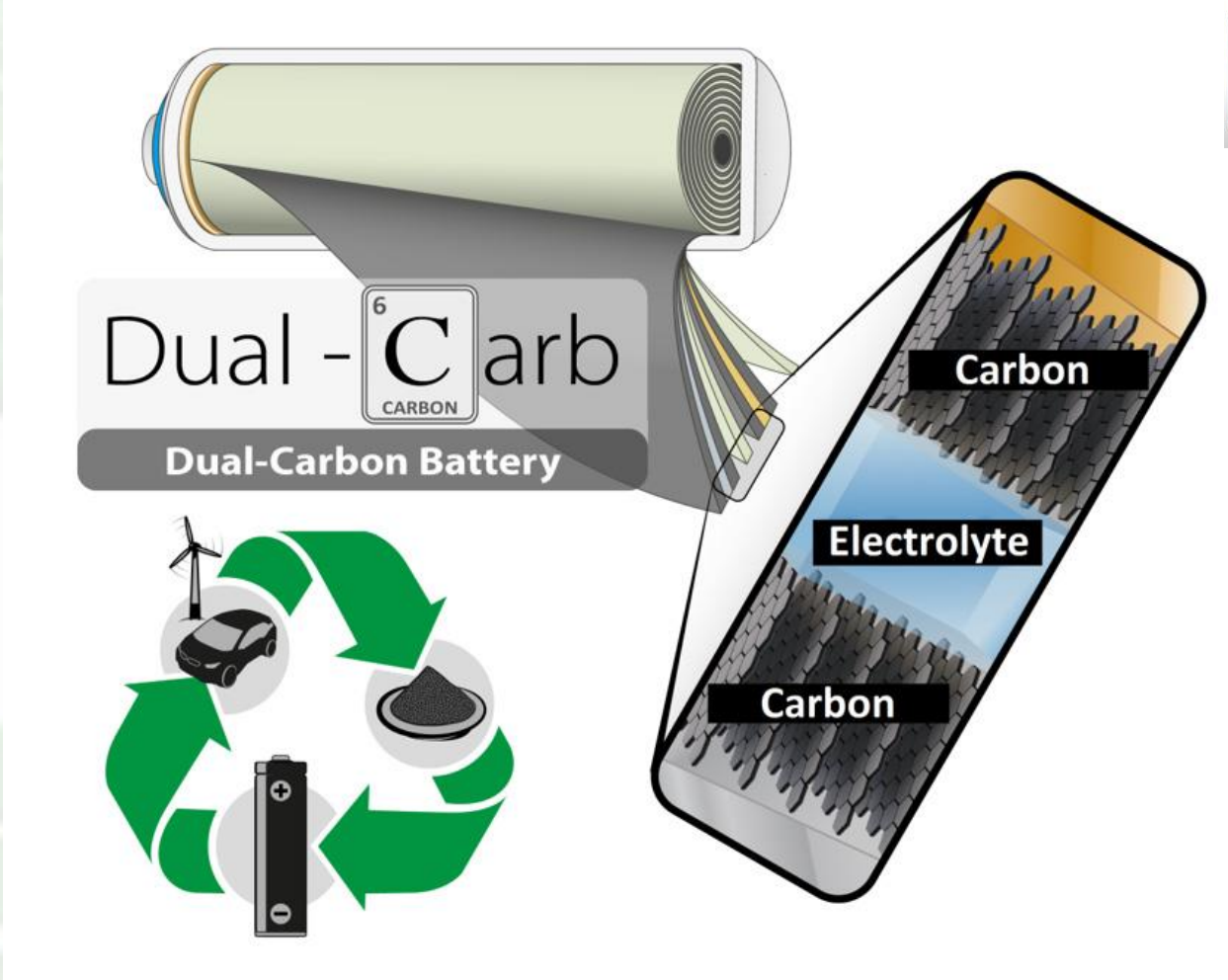
Нове технологије батерија за ЕВ

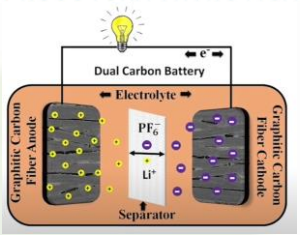
9.0 Двоструко-угљеничне батерије

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA







Како функционишу двоугљеничне батерије

Електроде:

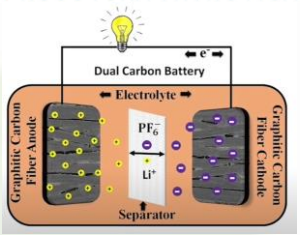
Анода и катода: Обе су направљене од **порозног угљеника** (нпр. графита, графена или активног угља).

Електролит: Обично **органски растварач са литијумским или натријумским солима** (нпр. $LiPF_6$, $NaPF_6$).

Механизам пуњења/пражњења:

Приликом пуњења, **анијони (нпр. PF_6^-)** се интеркалирају у катоду, док се **катјони (Li^+/Na^+)** интеркалирају у аноду.

Пражњењем се процес обрће, ослобађајући енергију.



Предности у односу на литијум-јонске батерије

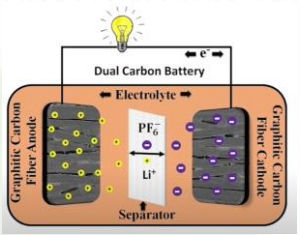
✅ **Брзо пуњење** – Могу се пунити са **5C–10C** (нпр. 6–12 минута за потпуно пуњење) због високе проводљивости угљеника.

✅ **Дужи животни век** – **Преко 50.000 циклуса** (у поређењу са ~1.000 за Li-јонске) јер се угљеник минимално деградира.

✅ **Безбедност** – Нема запаљивих течних електролита нити ризика од дендрита.

✅ **Еколошка исплативост** – Без ретких метала (Li, Co, Ni); лакше се рециклирају.

✅ **Широк температурни опсег** – Раде од **-30°C до 100°C** (боље од Li-јонских).

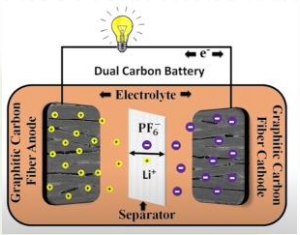


Изазови и ограничења

✕ **Нижа густина енергије** (~100–200 Wh/kg у поређењу са 250–300 Wh/kg код Li-јонских батерија).

✕ **Ограничења напона** (~3,8V максимум, у поређењу са 4,2V код Li-јонских).

✕ **Скалабилност** – Још увек у фази ране комерцијализације (мало масовно произведених модела).



Перспективе и потенцијалне примене

Потрошачка електроника – Телефони и лаптопови са брзим пуњењем.

Електрична возила и мрежно складиштење – Дуготрајно, јефтино складиштење обновљиве енергије.

Медицински уређаји – Безбедне, дуготрајне батерије за имплантате.

Очекивана комерцијализација:

2025–2030. за мањом применом, са широм употребом ако се побољша густина енергије.

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

Општи закључци о будућим технологијама батерија за електрична возила

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Будућност батерија за електромобиле се брзо развија, са бројним новим технологијама које се такмиче да замене конвенционалне **литијум-јонске (Li-ion)** батерије.

Испод је приказана **упорена анализа** кључних технологија, њихових предности, изазова и предвиђених рокова за масовну примену у електромобилима:

PELMOB

University of Pristina Kosovska Mitrovica

Електротехнички материјали

Нове технологије батерија за ЕВ

Упоредна табела будућих технологија

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

Технологија	Густина енергије	Брзина пуњења	Животни век	Безбедност	Цена	Комерцијализација
Чврстосталне	★★★★★ (400–500 Wh/kg)	★★★★ (Брзо)	★★★★ (Дуг)	★★★★★ (Врло безбедно)	$$$$ (Висока)	2026–2030
Литијум сумпорне (Li-S)	★★★★ (500+ Wh/kg)	★★★ (Умерено)	★★ (Кратак)	★★ (Дендрити)	$$ (Умерена)	2025–2028
Натријум-јонске (Na-Ion)	★★ (100–160 Wh/kg)	★★★ (Умерено)	★★★ (Добар)	★★★★ (Безбедан)	$ (Ниска)	Сада (Кина)
Калијум-јонске (K-Ion)	★★ (Слично као Na-Ion)	★★ (Споро)	★★ (Умерен)	★★★ (Безбедан)	$ (Ниска)	2030+
Литијум – јонске (Li-Ion) са силицијумском анодом	★★★★ (350–400 Wh/kg)	★★★★ (Брзо)	★★★ (Умерен)	★★★ (Добра)	$$$ (Умерена)	2024–2026
Литијум – јонске (Li-Ion) без кобалта	★★★ (250–300 Wh/kg)	★★★ (Умерено)	★★★★ (Дуг)	★★★ (Добра)	$$ (Средња)	Сада (Tesla, CATL)
Графенске батерије	★★★★ (300–500 Wh/kg)	★★★★★ (Врло брзо)	★★★★ (Дуг)	★★★★ (Безбедан)	$$$$ (Висока)	2025–2030
Самообнављајуће батерије	★★★ (Зависи од базне технологије)	★★★ (Зависи)	★★★★★ (Брло дуг)	★★★★ (Безбедан)	$$$ (Висока)	2028–2035
Двоугљеничне батерије	★★ (100–200 Wh/kg)	★★★★★ (Врло брзо)	★★★★★ (50k+ циклуса)	★★★★★ (Врло безбедно)	$$ (Средња)	2025–2030

Кључни трендови и закључци

А. <u>Лидери по енергетској густини (већи домет за ЕВ)</u>

Чврстосталне, Li-S и графенске батерије воде по енергетској густини (~400–500+ Wh/kg), омогућавајући домет од 800–1000 km.

Силицијумске аноде (у Li-ion) нуде краткорочно побољшање (~350–400 Wh/kg).

Б. <u>Решења за брзо пуњење (пуњење за 5–15 минута)</u>

Графенске, двоугљеничне и чврстосталне батерије подржавају екстремно брзо пуњење (стопа 5C–10C).

Садашње Li-ion батерије са силицијумским анодама могу постићи пуњење за 15–20 минута.

В. <u>Победници у цени и одрживости</u>

Натријум-јонске и кобалт-фри Li-ion батерије су јефтиније, етичке алтернативе (без ретких метала).

Двоугљеничне батерије су врло рециклирајуће и безбедне, али имају мању енергетску густину.

Кључни трендови и закључци

Д. Безбедност и дуговечност

Чврстосталне, двоугљеничне и самообнављајуће батерије се истичу по безбедности (нема ризика од пожара/цурења).

Самообнављајуће и двоугљеничне батерије нуде преко 50.000 циклуса, што их чини идеалним за мрежно складиштење.

Е. Временски оквир комерцијализације

2024–2026: Силицијумске аноде, Li-ion без кобалта, Na-ion (Кина).

2026–2030: Чврстсталне, графенске, Li-S, двоугљеничне.

2030+: Калијум-јонске, напредне самообнављајуће.

Коначни закључак: Која технологија ће доминирати у ЕВ-има?

Краткорочно (2024–2028):
Литијум-јонске са **силицијумским анодама** + **без кобалта** (Тесла, CATL).

Средњорочно (2028–2035):
Чврстосталне (Тојота, QuantumScape) и **графенске** (Самсунг, Хуавеј).

Дугорочно (2035+):
Li-S или **Самообнављајуће** - ако се побољша трајност.

Специјалне улоге:

Натријум-јонске за јефтиније ЕВ-е, **двоугљеничне** за апликације са брзим пуњењем.