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

Технологије Li-ion 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

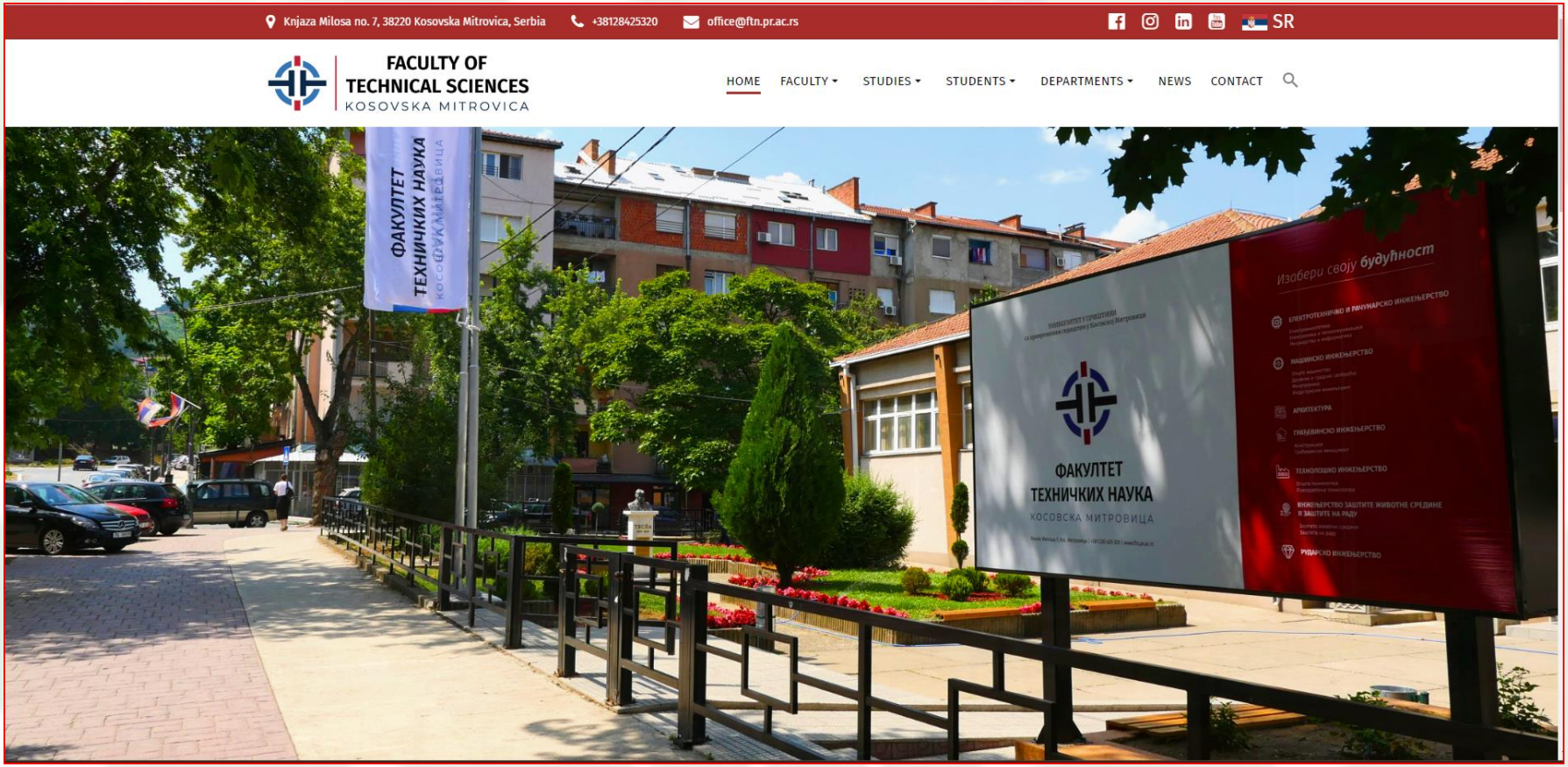
PELMOB

Funded by the European Union

University of Pristina Kosovska Mitrovica

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

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



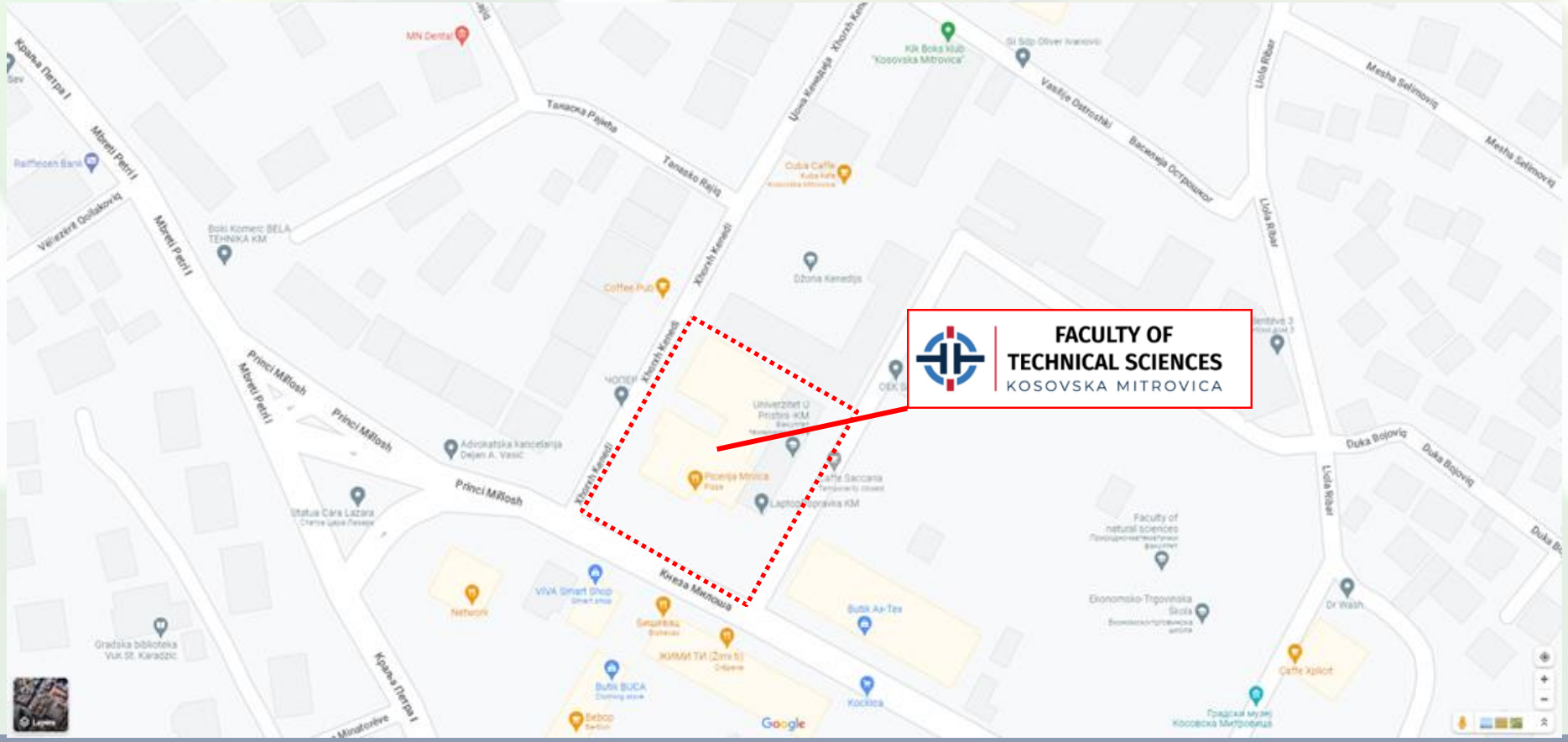
PELMOB

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

Предности Li-ion батерија за ЕВ

Литијум-јонске (Li-ion) батерије су доминантна технологија за складиштење енергије у електричним возилима (ЕВ) због својих врхунских перформанси у поређењу са другим типовима батерија.

1. Висока густина енергије

Ли-јон батерије складиште велику количину енергије по јединици тежине и запремине, што омогућава електричним возилима да постигну већи долет (300–500+ km са једним пуњењем). Ово је кључно за смањење тежине возила уз одржавање перформанси.

2. Висока густина снаге

Оне пружају јако убрзање захваљујући високој излазној снази када је то потребно, побољшавајући перформансе електричних возила.
Ефикасно пражњење енергије подржава регенеративно кочење, враћајући енергију током успоравања.

3. Дуг животни циклус

Модерне Li-јон батерије могу издржати **1.000–2.000+ циклуса пуњења** пре значајнијег опадања капацитета (губитак од ~20%).
Нова достигнућа у хемији батерија (нпр. LFP батерије) додатно продужавају њихов век трајања.

4. Могућност брзог пуњења

Li-ion батерије подржавају **DC брзо пуњење**, омогућавајући електричним возилима да се напуне до **80% за 20–30 минута** (у зависности од величине батерије и снаге пуњача).

Новији дизајни (нпр. силицијумске аноде, технологија ултра-брзог пуњења) имају за циљ да још више скрате ову временску дужину.

5. Лагане и компактне

У поређењу са алтернативама попут оловно-киселих или никл-метал-хидридних (NiMH) батерија, Li-ion батерије су знатно лакше, што побољшава ефикасност и управљивост возила.

6. Ниска стопа саморазграђивања

Губе само **~1–2% наелектрисања месечно** када су у празном режиму, за разлику од старијих типова батерија које се брже пражне. Ово обезбеђује да електрична возила задрже наелектрисање чак и када су дуже време паркирана.

Предности Li-ion батерија за ЕВ

7. Висока ефикасност

Li-ion батерије имају **ефикасност пуњења/пражњења од 90–95%**, што значи да се минимална количина енергије губи у виду топлоте. Ово обезбеђује максимално искоришћење енергије од мреже до точкова.

8. Скалабилност и флексибилност

Користе се у свим сегментима електричних возила — од малих аутомобила (нпр. Nissan Leaf) до великих камиона (нпр. Tesla Semi). Модуларни дизајн омогућава произвођачима да прилагоде величину батерије за различите моделе.

9. Пад цена

Цене су се смањиле за **~90% од 2010. године** (са ~1.200 /kWhна∗∗100–130/*kWh*на∗∗100–130/kWh у 2024.**).
Економија обима и технолошки напредак настављају да смањују трошкове.

10. Еколошке предности

Нема емисија издувних гасова када се користе у електричним возилима.
Могућност рециклаже се побољшава захваљујући посвећеним програмима за рециклажу батерија (нпр. Redwood Materials, Li-Cycle).

Будућа унапређења

Батерије са чврстим електролитом: Већа густина енергије, брже пуњење и побољшана безбедност.

Силицијумске аноде: Повећавају капацитет и скраћују време пуњења.

LFP (Литијум-гвожђе-фосфат): Јефтиније, дуговечније и без кобалта (користе се у Tesla Model 3, BYD електричним возилима).

1. NMC (Никл-Манган-Кобалт оксид)

Предности ✅

•**Висока густина енергије** → Већи домет (идеално за премијум електрична возила).

•**Добра излазна снага** → Јако убрзање и високе перформансе.

•**Избалансиран хемијски састав** (никл повећава енергију, манган побољшава стабилност).

Недостаци ❌

•**Садржи кобалт** → Етички проблеми (рад деце у рудницима) и висока цена.

•**Умерен животни век** (~1.000–2.000 циклуса) — брже се распада од LFP.

•**Термални ризик** → Захтева напредне системе хлађења да би се спречило прегревање.

2. NCA (Никл-Кобалт-Алуминијум оксид)

Предности ✅

• **Највећа густина енергије** међу комерцијалним батеријама → Максимални домет (нпр. Tesla Long Range).

• **Добра могућност брзог пуњења** → Оптимално функционише са Supercharger-има.

• **Мања тежина** у поређењу са NMC истог капацитета.

Недостаци ❌

• **Мање стабилна** од NMC → Већи ризик од термичког неконтролисаног распада (thermal runaway) у случају оштећења.

• **И даље садржи кобалт** → Скупа и етички проблематична.

• **Краћи животни век** (~1.000–1.500 циклуса) у поређењу са LFP.

3. LFP (Литијум-гвожђе-фосфат)

Предности ✅

• **Без кобалта и никла** → Јефтина, етички прихватљива и еколошки погодна опција.

• **Изузетно дуг животни век** (~3.000–5.000+ циклуса) → Траје дуже од самог возила.

• **Максимално безбедна** → Отпорна на пожаре и експлозије чак и у случају злоупотребе.

• **Може се пунити до 100% дневно** без значајног оштећења.

Недостаци ❌

• **Мања густина енергије** → Теже батерије или краћи домет (користе се у Tesla Standard Range, BYD).

• **Лошији перформансе на ниским температурама** → Губи ~20–30% домета на ниским температурама.

• **Мања густина снаге** → Нешто спорије убрзање у поређењу са NMC/NCA.

4. Батерије са чврстим електролитом (технологија будућности - још увек није у масовној производњи)

Предности ✅

- **2–3 пута већа густина енергије** → потенцијални домет преко 800 km
- **Брже пуњење** → могућност пуњења за неколико минута
- **Нула ризика од пожара** → без течног електролита

Недостаци ❌

- **Деценије удаљене** од масовне примене (вероватно после 2030. године)
- **Изузетно скупе** због производних изазова
- **Проблеми са трајношћу** → још увек нестабилне у реалним условима

Кратак резиме

Хемијски састав	Најбоље за	Главна предност	Главни недостатак
NMC	Спортска ЕВ	Баланс енергије и снаге	Зависност од кобалта
NCA	ЕВ са великим долетом	Највећа густина енергије	Безбедносни ризици
LFP	Буџетски/градски ЕВ	Јефтина, безопасна, дуговечна	Смањен домет на ниским температурама
Чврст електролит	ЕВ будућности	Револуционарни потенцијал	Још увек није примењива

Главна предност

Ово значи да овај тип батерије може да складишти велику количину енергије у односу на своју величину и тежину, што значајно повећава домет електричних возила. Виша густина енергије омогућава ЕВ-има да пређу веће удаљености са једним пуњењем, чинећи их практичнијим и привлачнијим за потрошаче. Ово је посебно важно за кориснике који дају приоритет путовањима на велике удаљености без честих стајања на пуњење.

Главни недостатак

Ово се односи на ризик од прегревања и могућег запаљивања, посебно ако је батерија оштећена или неправилно рукована. Иако се безбедносни стандарди непрестано унапређују, инциденти везани за пожаре батерија могу изазвати забринутост и код потрошача и код произвођача. Обезбеђивање безбедног рада и смањење ових ризика су кључни аспекти дизајна и употребе батерија..

Трендови у хемијском саставу батерија за електрична возила

Доминација LFP у основним моделима – Tesla, BYD и други произвођачи прелазе на LFP технологију због јефтинијих и дуговечнијих батерија.

Високо-никл NMC/NCA за премијум ЕВ – Користе се за максимални домет (нпр. Lucid Air, Tesla Long Range).

Смањење кобалта – Произвођачи прелазе на NMC 811 или LFP технологију без кобалта.

Чврст електролит у развоју (2030+) – Toyota, BMW и компаније улажу знатна средства у истраживање.

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Кобалт - етички проблеми

1. Кршење људских права у рударству

Дечји рад и опасни услови рада:

~70% светске производње кобалта потиче из **Демократске Републике Конго (ДРК)**, где:

- **Преко 40.000 деце** ради у опасним рудницима (подаци UNICEF-а)
- Рудари (укључујући децу) копају ручним алатима без заштите, ризикујући од урушавања тунела и излагања отровим
- Наднице су често **мање од 2$ дневно**, а радници су изложени експлоатацији

Ризоци модерног ропства:

Истраге указују на везе између експлоатације у рудницима кобалта и:

- **Присилног рада**
- **Трговине људима**

2. Штете по животну средину

Загађење услед рударства, Екстракција кобалта загађује воду и земљиште:

- **Сумпорна киселина**
- **Тешки метали**
- **Радиоактивни уранијум** (који се често налази уз кобалт)
- **Крчење шума** и уништавање екосистема у ДР Конгу

Емисије угљеника:

- Прерада кобалта захтева велике количине енергије, што повећава **укупне емисије** током производње батерија

Кобалт - етички проблеми

3. Геополитички и снабдевни ризици

ДРК доминира снабдевањем (преко 70% глобалне производње кобалта), што ствара:

- **Нестабилност цена (нпр. цена кобалта је порасла 300% у периоду 2017–2018)**
- **Ризике од политичке нестабилности (корупција, конфликтни минерали)**

Кина контролише прераду (око 80% прерађеног кобалта), што изазива забринутост код западних произвођача аутомобила због:

- **Превелике зависности од кинеских добављача**
- **Стратешких ризика у глобалним ланцима снабдевања.**

Нагли пад трошкова литијум-јонских батерија

Цена литијум-јонских (Li-ion) батерија је пала за око 90% током последње деценије, са око 1.200 долара/kWh у 2010. години на само 100–130 долара/kWh у 2024. години. Овај драматичан пад цена један је од кључних разлога зашто електрична возила постају приступачнија и све чешћа.

1. Зашто су цене батерија толико опале?

А. Економија обима

•**Масовна производња**: Са растом продаје електричних возила (са ~50.000 ЕВ продатих глобално 2010. на преко **10 милиона у 2023.**), произвођачи батерија су увећали производњу.
Пример: Tesla-ине **Гигафабрике** (Невада, Шангај, Берлин) смањиле су трошкове кроз **производњу великих количина**.

•**Оптимизација ланца снабдева**: Веће поруџбине сировина (литијум, никла, графита) омогућиле су попусте при куповини на велико.

Нагли пад трошкова литијум-јонских батерија

Б. Технолошка унапређења

Повећана густина енергије:

Нови хемијски састави (нпр. **NMC 811**, **LFP**) складиште више енергије по килограму, смањујући трошкове материјала по kWh.

Иновације у производњи:

• **Суво премазивање електрода** (Tesla-ине 4680 ћелије) смањује број производних корака и потрошњу енергије.

• **Дизајн ћелија-у-пакету (CTP)** (BYD-јева **Blade батерија**) уклања модуле, штедећи простор и материјале.

Ц. Пад цена сировина (до 2022. године)

Цене литијума, кобалта и никла су падале **(2010–2020)** због:

• **Повећане рударске производње** (нпр. литијум из Аустралије и Чилеа)

• **Смањене употребе кобалта** (прелазак са NMC 111 на NMC 811 или LFP)

Кратак скок цена 2022–2023:

• Пост-COVID пораст потражње и геополитички проблеми изазвали су привремено повећање цена

• **Дугорочни тренд** и даље показује пад

Нагли пад трошкова литијум-јонских батерија

D. Конкуренција и инвестиције у индустрији

Више играча на тржишту:
Компаније као што су CATL, LG Energy Solution, Panasonic и BYD жестоко се такмиче, што подстиче иновације и смањење трошкова.

Владине субвенције:

• Кинеске **субвенције за електрична возила и батерије** убрзале су домаћу производњу.

• Амерички **Закон о смањењу инфлације (IRA)** подстиче локалну производњу батерија.

2. Тренд цена у протеклом периоду

Година	Просечна цена по kWh	Кључни развојни догађаји
2010	~1.200$	Ране ЕВ батерије (Nissan Leaf, Tesla Roadster)
2015	~350$	Отварање Гигафабрике 1, планирано лансирање Tesla Model 3
2020	~137$	Ширења употребе LFP технологије, ефекти економије обима
2022	~150$	Поремећаји у ланцу снабдевања након пандемије
2024	100–130$	LFP доминира буџетским ЕВ-има; увођење Tesla 4680 ћелија

Пројекције за 2030. годину:

60–80$/kWh (према BloombergNEF анализи) када батерије са чврстим електролитом и натријум-јонске батерије почну масовно да се производе.

3. Утицај на усвајање електричних возила

А. Јефтинија електрична возила

•**Једнаке цене са возилима са МММ** (мотором са унутрашњим сагоревањем): При цени од **100$/kWh, батеријски сет од 60kWh кошта 6.000$** (у поређењу са ~72.000 $ у 2010.години).Електрична возила као што су BYDSeagull (10.000$) и **Tesla Model 3** (35.000$) сада су доступнија.

Б. Већи домет за исту цену

•**2010.**: 1.200$/kWh = батерија од ~24 kWh (Nissan Leaf, долет од 117 km).

•**2024.**: 100$/kWh = батерија од 100 kWh (Tesla Model S, долет преко 640 km).

Ц. Мрежно складиштење енергије постаје изводљиво

•Низе цене батерија омогућавају **складиштење енергије из соларних и ветропаркова** на великој скали (нпр. Tesla Megapack).

4. Изазови за будућност

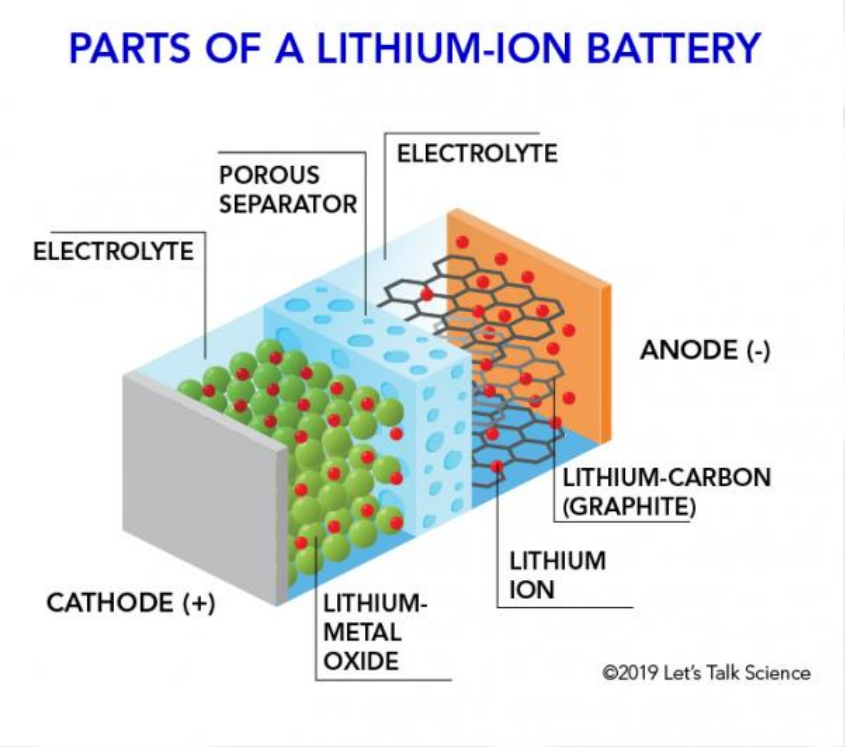
А. Нестабилност цена сировина
Цене литијума су знатно колебале (2021–2023), али ће рециклажа и нови рудници (нпр. у Невади) стабилизовати снабдевање.

Б. Геополитички ризици
Кина доминира у производњи батерија (око 75% глобалног капацитета), што је навело САД и ЕУ да развијају локалне ланце снабдевања.

В. Потреба за новим генерацијама батерија
Батерије са чврстим електролитом и натријум-јонске морају се масовно производити да би се цена снизила испод 60$/kWh.

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ
Различите компоненте Li-ion батерија

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA



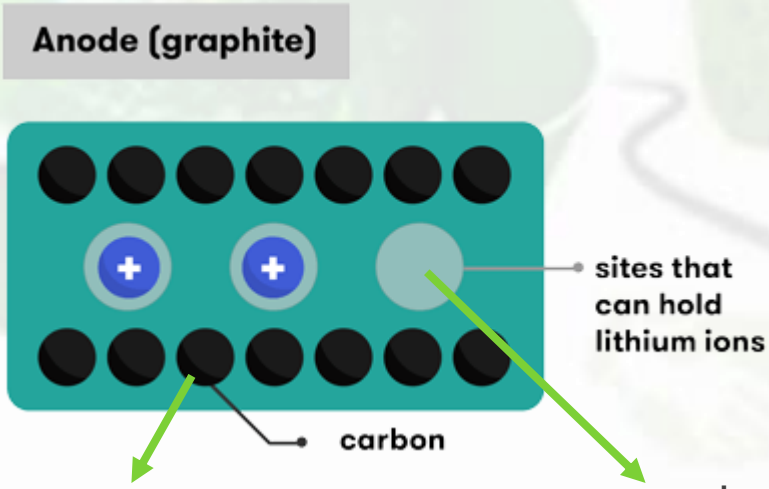
ENGLISH TERM	СРПСКИ ПРЕВОД	ТЕХНИЧКО ОБЈАШЊЕЊЕ
ELECTROLYTE	Електролит	Течност или гел који проводи јоне
POROUS SEPARATOR	Порозни сепаратор	Мембрана која спречава кратки спој
CATHODE (+)	Катода (+)	Позитивни електрода (обично литијум-метал оксид)
LITHIUM-METAL OXIDE	Литијум-метал оксид	Катодни материјал (нпр. $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$)
ANODE (-)	Анода (-)	Негативни електрода (обично графит)
LITHIUM-CARBON (GRAPHITE)	Литијум-угљеник (графит)	Анодни материјал
LITHIUM ION	Литијум-јон	Наелектрисани атом литијума (Li^+)

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Различите компоненте Li-ion батерија

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

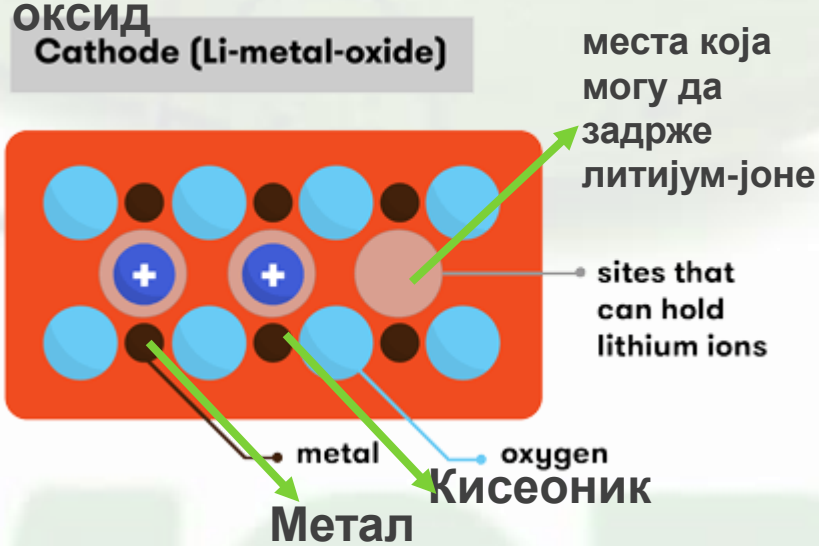
Анода (-) (графитна)



Угљеник

места која могу да задрже литијум-јоне

Катода (+) - литијум-метал оксид

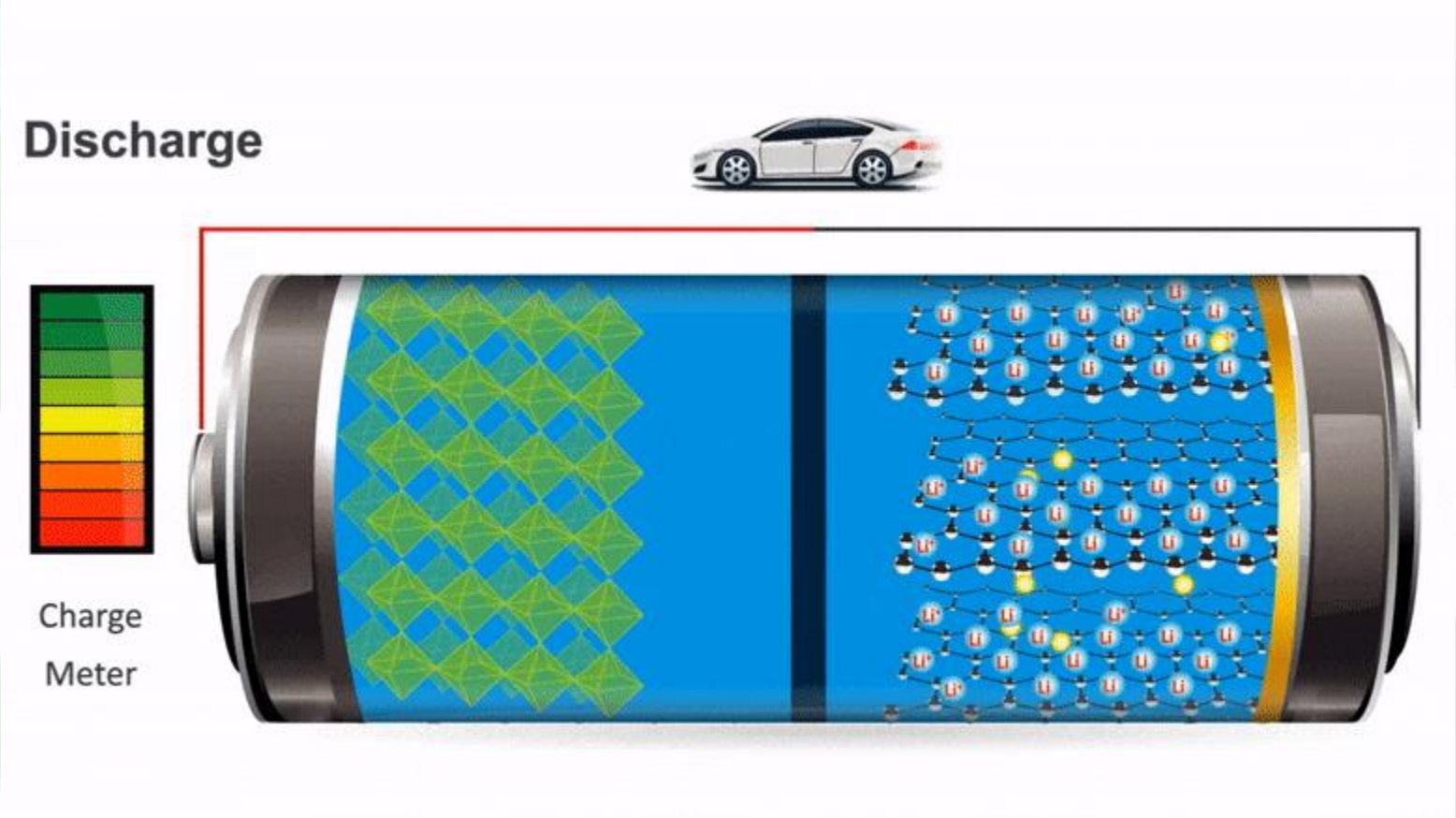


Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

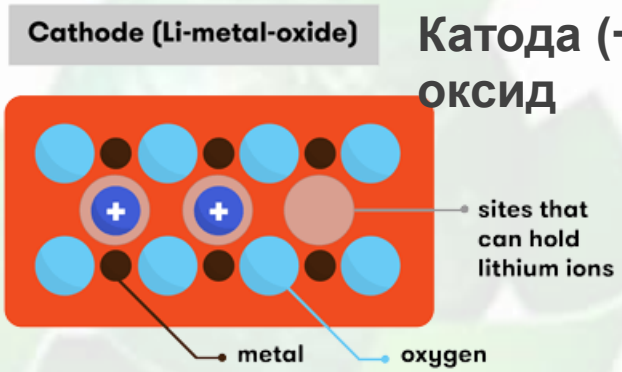
Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Различите компоненте Li-ion батерија

Видео анимација пуњења и пражњења Li-ion батерије



Различите компоненте Li-ion батерија



Катода (+) - литијум-метал оксид

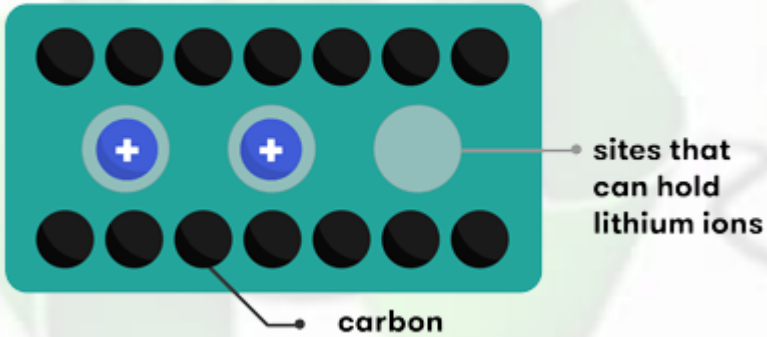
Различита хемијска једињења која се користе за катоду с

- **LCO** - Литијум-кобалт оксид ($LiCoO_2$)
- **LFP** - Литијум-гвожђе фосфат ($LiFePO_4$)
- **LMO** - Литијум-манган оксид ($LiMn_2O_4$)
- **NMC** - Литијум-никл-манган-кобалт оксид ($LiNiMnCoO_2$)
- **NCA** - Литијум-никл-кобалт-алуминијум оксид ($LiNiCoAlO_2$)
- **LTO** - Литијум-титанијум оксид ($LiTiO_3$)

Различите компоненте Li-ion батерија

Anode (graphite)

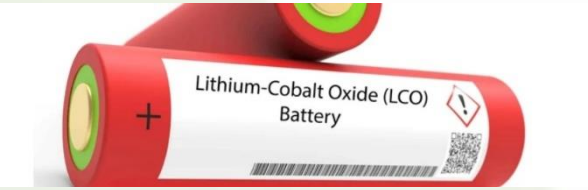
Анода (-) (графитна)



Материјали који се обично користе за аноду:

- **Графит**
- **Тврди угљеник** (Hard carbon)
- **Литијум-титанат** (Lithium Titanate)
- **Легура калај/кобалт** (Tin/cobalt alloy)
- **Силицијум-угљеник** (Silicon/carbon)

(1) LCO - Литијум-кобалт оксид ($LiCoO_2$)



(1) LCO (Lithium Cobalt oxide):

На аноди:

$$LiC_6 \rightarrow C_6 + Li^+ + e^-$$

На катоди:

$$CoO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LicoO_2$$

Укупни однос:

$$LicoO_2 + C_6 \rightarrow LiC_6 + CoO_2$$

PELMOB

University of Pristina
Kosovska Mitrovica

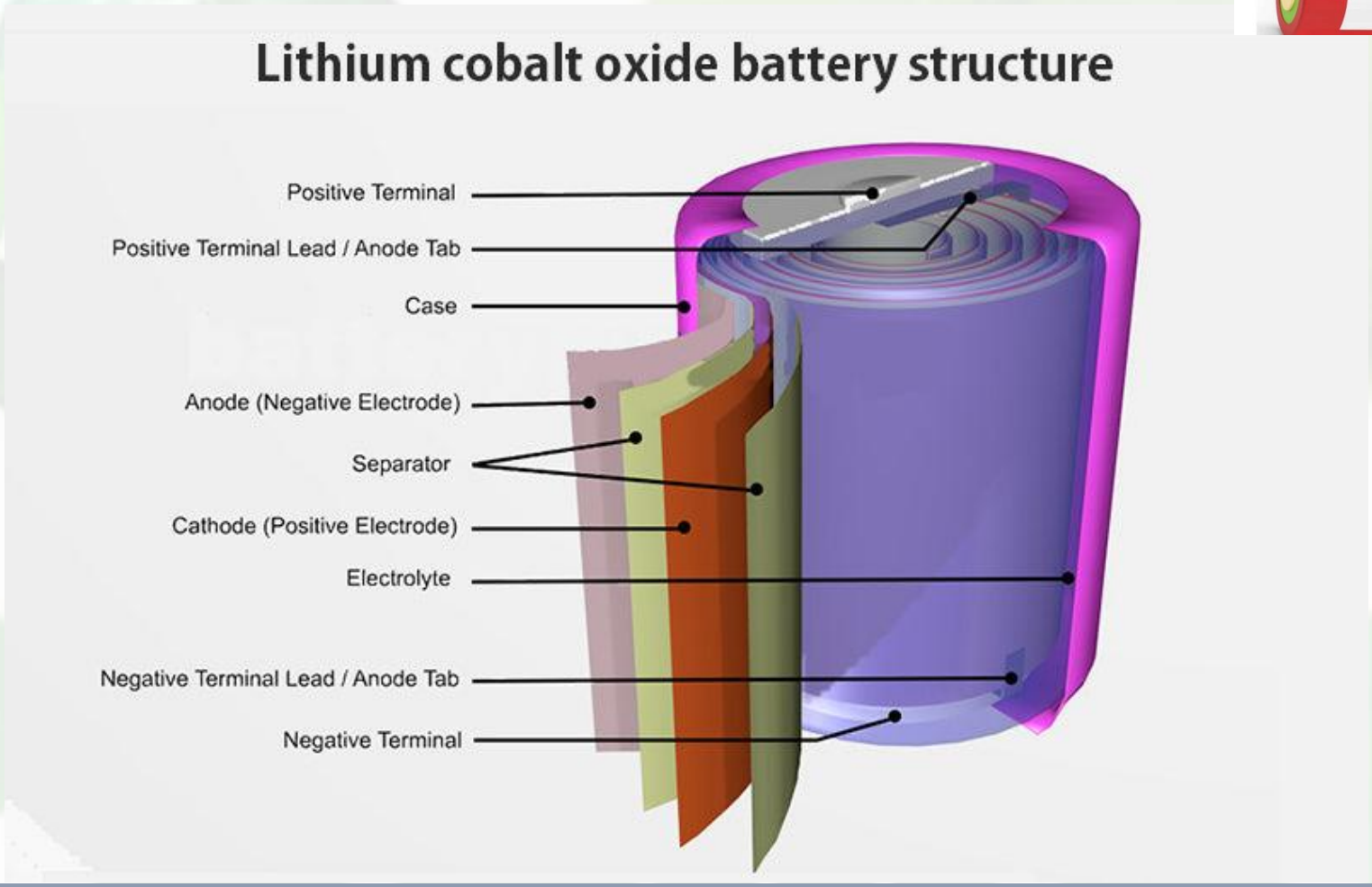
Електротехнички материјали

Технологије Li-ion батерија за ЕВ

(1) LCO - Литијум-кобалт оксид ($LiCoO_2$)

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



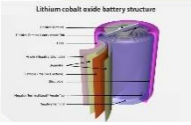
PELMOB

University of Pristina
Kosovska Mitrovica

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ
(1) LCO - Литијум-кобалт оксид ($LiCoO_2$)

Funded by the European Union

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

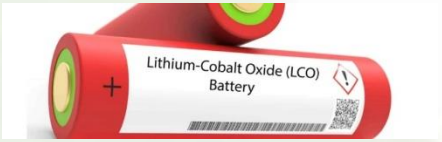


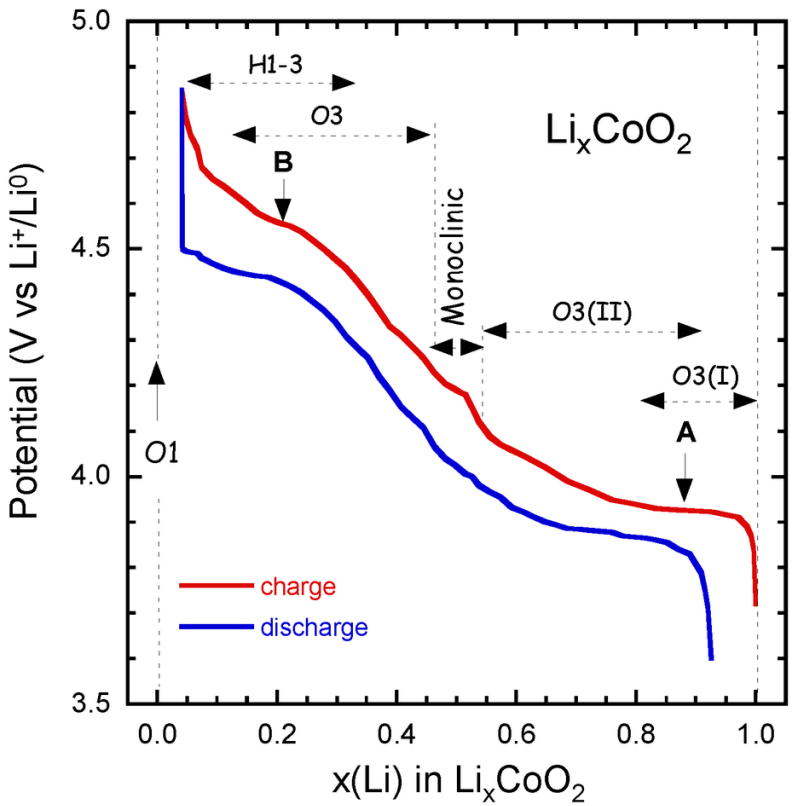
ENGLISH TERM	СРПСКИ ПРЕВОД	ОБЈАШЊЕЊЕ
Positive Terminal	Позитивни прикључак	Спољни контакт за "+" пол
Positive Terminal Lead / Cathode Tab	Позитивни вод / катодни извод	Повезује катоду са прикључком
Case	Кућиште	Спољна заштитна облога
Anode (Negative Electrode)	Анода (негативна електрода)	Графит или други материјал
Separator	Сепаратор	Порозна мембрана
Cathode (Positive Electrode)	Катода (позитивна електрода)	Литијум-кобалт оксид
Electrolyte	Електролит	Јонски проводник
Negative Terminal Lead / Anode Tab	Негативни вод / анодни извод	Повезује аноду са прикључком
Negative Terminal	Негативни терминал	Спољни контакт за "-" пол

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ
(1) LCO - Литијум-кобалт оксид ($LiCoO_2$)

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Криве пуњења и пражњења за Li_xCoO_2 (C/24 режим), у опсегу 3.6–4.85 V у односу на Li0/Li+





Напон (V)	Фаза	Догађај
3.9–4.0	O3(I) → O3(II)	Реорганизација кристалне решетке
4.5+	O3(II) → Monoclinic	Прелазак у високонапонску фазу
3.5	O3(II) → O1	Деградација структуре (нежељено)

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ
(1) LCO (Lithium – Cobalt – Oxide, LiCoO 2)

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Номинални напон: 3,6 V
Типични радни опсег: 3,0 – 4,2 V/ћелији.
Специфична енергија (капацитет): 150–200 Wh/kg.
Специфична снага: Способност да обезбеди високу струју, која је код ових батерија на умереном нивоу.

Пуњење (C-брзина): Пуњење брзином од 0,7C до 1C за 3 сата (типичан случај). Пунити до 4,2 V. Струја пуњења изнад 1C скраћује век трајања батерије.
Пражњење (C-брзина): 1C. Гранични напон при пражњењу је 2,5 V, а струја пражњења изнад 1C скраћује век батерије.

Животни циклуси: 500–1000 циклуса. Ово зависи од дубине пражњења, оптерећења и температуре.
Термални пробој : Потпуно пуњење може изазвати термални пробој, при томе максимална температура износи 150 °C.

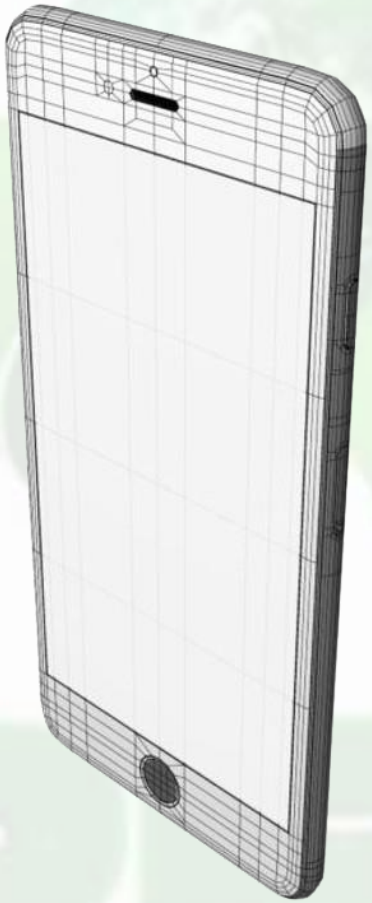
Цена: Због високих трошкова кобалта, ове батерије су нешто скупље.
Иако имају висок специфични енергетски капацитет, мања специфична снага и краћи животни век чине их мање погодним за операције са већим оптерећењима.

C-брзина (C-rate) - однос струје пуњења/празњења у односу на номинални капацитет

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

1) LCO (Lithium – Cobalt – Oxide, LiCoO 2)

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA



Литијумске батерије са LCO хемијом су најстарије и углавном се користе за електронске уређаје и мобилне апликације. Оне се састоје од:

- **катоде (позитивна електрода)** од **кобалт оксида** ($LiCoO_2$)
- **аноде (негативна електрода)** од **графитног угљеника**

Номинални напон: 3,6 V

Гравиметријска густина енергије: 200 Wh/kg

Волуметријска густина енергије: 400 Wh/l

Пун животни циклус: 500–1.000 пуна пуњења/празњења

Степен пражњења: 1C

C-брзина (C-rate) - однос струје пуњења/празњења у односу на номинални капацитет

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

2) LMO (литијум-манган оксид, Li-MnO2)

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

На аноди:

$$LiC_6 \rightarrow C_6 + Li^+ + e^-$$

На катоди:

$$MnO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LiMnO_2$$

Укупни однос :

$$LiMnO_2 + C_6 \rightarrow LiC_6 + MnO_2$$

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

2) LMO (литијум-манган оксид, Li-MnO2)

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

Номинални напон: 3,7 V
Типични радни опсег: 3,0–4,2 V/ћелији
Специфична енергија (капацитет): 100–150 Wh/kg

Пуњење (C-брзина):

- Типично: 0,7–1C
- Максимално: до 3C
- Напон пуњења: до 4,2 V (типичан ниво)

Празњење (C-брзина):

- Стандардно: 1C
- Гранични напон: 2,5 V
- Код неких ћелија: могуће празњење до 10C

Животни циклуси: 300–700 пута (зависи од дубине пражњења и температуре)
Термални пробој: До 250°C у типичним условима. Високо пуњење изазива термални пробој.

C-брзина (C-rate) - однос струје пуњења/празњења у односу на номинални капацитет

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ
2) LMO (литијум-манган оксид, Li-MnO2)

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Својство	$LiMn_2O_4$ (кристална структура)	$LiMnO_2$ (слојевит)
Енергетска густина	**Умерена (~120–140 mAh/g)**	**Нижа (~100–120 mAh/g)**
Напон	**~3.7–4.0 V**	**~3.0–3.5 V**
Стабилност	**Добра (мање растворљивости Mn)**	**Лоша (тенденција ка распаду)**
Животни век	**~500–1000 циклуса**	**~300–500 циклуса (нестабилан)**
Примена	**ЕВ, електроника**	**Ретко (због нестабилности)**

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

2) LMO (литијум-манган оксид, Li-MnO_2)
Lithium – Manganese – Oxide ($LiMn_2O_4$)

LMO батерије имају **бољу термичку стабилност** у поређењу са LCO хемијом, али су ограничене **нижим капацитетом** од кобалтних система.

Номинални напон: 3,7 V

Специфична енергија: 150 Wh/kg

Густина енергије: 350 Wh/l

Пун животни циклус: 300–700 пуних циклуса

Степен пражњења: 1C, 10C

Ове батерије се често користе за:

- Електричне бицикле
- Баштенско алатке
- Медицинску опрему
- Електро алате (бушилице, шрафцигери)

(3) NCA (Литијум-никл-кобалт-алуминијум оксид)

На аноди:

$$LiC_6 \rightarrow C_6 + Li^+ + e^-$$

На катоди:

$$NiCoAlO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LiNiCoAlO_2$$

Укупни однос :

$$C_6Li + NiCoAlO_2 \rightarrow LiCoAlO_2 + C_6$$

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

(3) NCA (Литијум-никл-кобалт-алуминијум оксид)

Типични радни опсег: 3,0–4,2 V/ћелији
Специфични енергетски капацитет: 200–260 Wh/kg, до 300 Wh/kg

Пуњење (C-брзина):

- 0,7C
- Пуњење до 4,2 V (већина ћелија)
- Трајање пуњења: 3 сата (типичан случај)
- Могуће је брзо пуњење

Пражњење (C-брзина):

- Типично: 1C
- Гранични напон: 3,0 V
- Високе струје пражњења скраћују век трајања батерије

Животни циклуси: 500 (зависи од дубине пражњења и температуре)
Термални пробој: 150 °C (типично), високо пуњење изазива термални пробој
Цена: Око 350 USD по kWh

C-брзина (C-rate) - однос струје пуњења/празњења у односу на номинални капацитет

(4) NMC (Литијум-Никл-Манган-Кобалт Оксид, Li-NMC)

На аноди :

$$LiC_6 \rightarrow C_6 + Li^+ + e^-$$

На катоди:

$$NiMnCoO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LiNiMnCoO_2$$

Укупни однос :

$$LiC_6 + NiMnCoO_2 \rightarrow LiNiMnCoO_2 + C_6$$

(4) NMC (Литијум-Никл-Манган-Кобалт Оксид, Li-NMC)

Номинални напон: 3,6–3,7 V
Типични напонски опсег: 3,0–4,2 V/ћелији (може бити и више)
Специфична енергија: 150–220 Wh/kg

Пуњење (C-брзина):

- 0,7–1C
- Максимално пуњење до 4,2 V, али и до 4,3 V
- Струја пуњења изнад 1C скраћује век трајања батерије

Пражњење (C-брзина):

- 1C–2C
- Гранични напон: 2,50 V

Животни циклуси: 1000–2000 пута (зависи од дубине пражњења и температуре)
Термални пробој: 210 °C – високо пуњење изазива термални пробој
Цена: Око 420 USD по kWh

C-брзина (C-rate) - однос струје пуњења/празњења у односу на номинални капацитет

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES KOSOVSKA MITROVICA

(4) NMC (Литијум-Никл-Манган-Кобалт Оксид, Li-NMC)

NMC111 = 1:1:1 (једнаки удели, никла Ni, мангана Mn и кобалта Co)

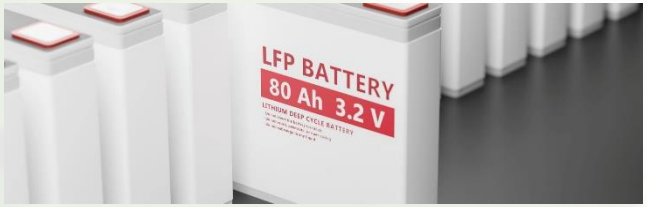
NMC811 = 8:1:1 (80% никла Ni, 10% мангана Mn, 10% кобалта Co)

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

(4) NMC (Литијум-Никл-Манган-Кобалт Оксид, Li-NMC)

Карактеристика	NMC 111	NMC 811
Састав (Ni:Mn:Co)	1:1:1 (33% Ni, 33% Mn, 33% Co)	8:1:1 (80% Ni, 10% Mn, 10% Co)
Енергетски капацитет	~160 mAh/g	~200 mAh/g
Термичка стабилност	Врло добра (због уравнотеженог састава)	Нижа (висок Ni садржај смањује стабилност)
Цена	Виша (због већег удела кобалта)	Нижа (мање кобалта)
Примена	Стабилни системи (нпр. складиштење енергије)	Електрична возила (Tesla, VW)

5) LFP (Литијум-гвожђе-фосфат, $LiFePO_4$)



На аноди :

$$LiC_6 \rightarrow C_6 + Li^+ + e^-$$

На катоди :

$$FePo_4 + Li^+ + e^- \rightarrow LiFePO_4$$

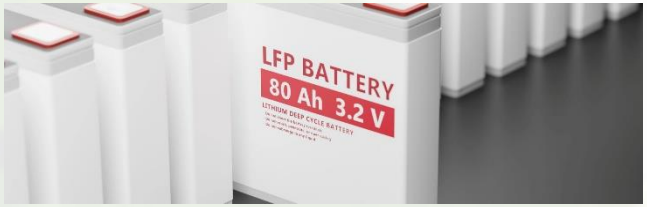
Укупни однос :

$$LiC_6 + FePo_4 \rightarrow LiFePO4 + C_6$$

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

5) LFP (Литијум-гвожђе-фосфат, $LiFePO_4$)



Номинални напон: 3,20–3,30 V

Типични радни опсег: 2,5–3,65 V/ћелији

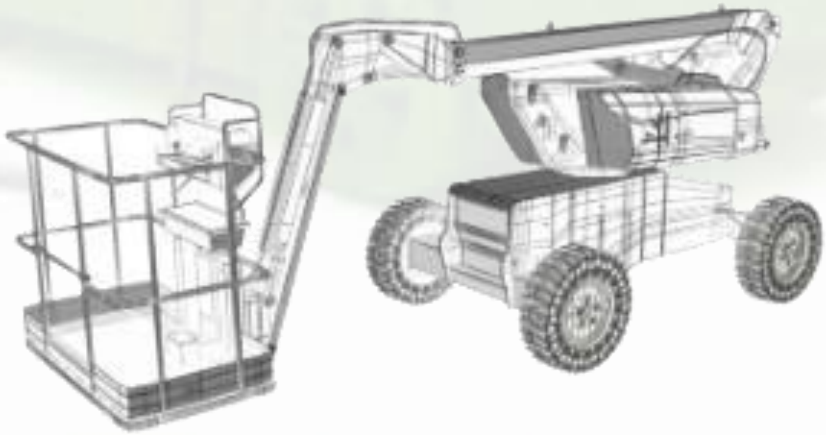
Специфична енергија: 90–120 Wh/kg

Пуњење (C-брзина):

- Типично: 1C
- Пуњење до: 3,65 V
- Време пуњења: 3 сата

Празњење (C-брзина):

- 1C–25C (за неке ћелије)
- Гранични напон: 2,50 V
- Напон испод 2 V оштећује батерију



Животни циклуси: 2000 и више (зависи од дубине празњења и температуре)

Термални омот: 270 °C (потпуно безбедне чак и при пуним пуњењу)

Цена: Око 580 USD по kWh

(6) LTO (Литијум-титанијум-оксид, $Li_4Ti_5O_{12}$)

На аноди:

$$Li_2TiO_3 \rightarrow TiO_2 + Li^+ + e^-$$

На катоди:

$$Mn_2O_4 + Li + e^- \rightarrow LiMn_2O_4$$

Укупни однос :

$$Li_2TiO_3 + 2\ Mn_2O_4 \rightarrow 2LiMn_2O_4 + TiO_3$$

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

(6) LTO (Литијум-титанијум-оксид, $Li_4Ti_5O_{12}$)

Номинални напон: 2,4 V
Типични радни опсег: 1,8–2,85 V/ћелији
Специфична енергија: 50–80 Wh/kg

Пуњење (C-брзина):

•1C–5C (максимално)

•Пуњење до: 2,85 V

Празњење (C-брзина):

•До 10C

•Гранични напон: 1,80 V (за LCO/LTO батерије)

Животни циклуси: 3000–7000 пуних циклуса
Термални омот: Најбезбедније међу литијумским батеријама
Цена: Око 1005 USD по kWh

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

(6) LTO (Литијум-титанијум-оксид, $Li_4Ti_5O_{12}$)

Кључне карактеристике LTO батерија:

- **Најдужи животни век** (7+ пута дужи од стандардних Li-ion)
- **Рад на екстремним температурама** (-30°C до +60°C)
- **Могућност ултрабрзог пуњења** (5-10 минута)
- **Нула ризика од експлозије** (термички најстабилнија опција)

Главне примене:

•Електрични аутобуси

•Медицински уређаји

•Критична индустријска опрема

•Војна и свемирска технологија

Електротехнички материјали
Технологије Li-ion батерија за ЕВ

Funded by the European Union
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
KOSOVSKA MITROVICA

Упоредна табела к-ка Li-ion батерија

Тип реакције	LCO	LMO	NCA	NMC	LFP	LTO
Анода	Графит	Графит	Графит	Графит	Графит	Литијум-титанијум-оксид
Катода	Литијум-кобалт-оксид	Литијум-мангана-оксид	Литијум-никел-кобалт-оксид	Литијум-никел-мангана-кобалт-оксид	Литијум-гвожђе-фосфат	Мангана-оксид
Електролит	Етилен карбонат + Li со	Метилен карбонат + Li со	Пропилен карбонат + Li со	Метилен карбонат + Li со	Пропилен карбонат + Li со	Пропилен карбонат + Li со
Сепаратори	Полиолефин	Полиолефин	Полиолефин	Полиолефин	Полиолефин	Полиолефин
Номинални напон	3,6 V	3,7 V	3,6 V	3,6–3,7 V	3,2–3,3 V	2,4 V
Примена	Мобилни телефони, лаптопи, камере	Електро алати, медицински уређаји, погонски системи	Електропогони, медицински уређаји, индустрија	Е-бицикли, електрична возила, медицински уређаји, индустријска употреба	Опрема захтевајућа високу струју и издржљивост	-