

НУКЛЕАРНА ЕНЕРГИЈА КАО СИСТЕМ ЗНАЊА, БЕЗБЕДНОСТИ И ДИГИТАЛНИХ ТЕХНОЛОГИЈА: ЗАШТО ЈЕ ВИСОКО ОБРАЗОВАЊЕ КРИТИЧНА ИНФРАСТРУКТУРА

Мирослав Весковић¹, Ивана Лончаревић², Борис Думнић³

^{1,2,3} Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Србија

¹veskovic@uns.ac.rs, ²ivanalon@uns.ac.rs, ³dumnic@uns.ac.rs

Кратак садржај: Нуклеарна енергија представља сложен социо-технички систем који почива на интеграцији знања, безбедности и дигиталних технологија. Рад показује да се високо образовање у овој области мора посматрати као критична инфраструктура, јер обезбеђује континуитет компетенција, културу безбедности и одрживост нуклеарног сектора. Анализирају се улога универзитета, управљање нуклеарним знањем, значај експерименталних капацитета и интердисциплинарних профила, као и препоруке међународних организација (IAEA, OECD/NEA, JRC, ENEN). Закључује се да су системско образовање, дигиталне компетенције и комуникација са јавношћу предуслов безбедног и одговорног развоја нуклеарне енергетике у Србији.

Кључне речи: нуклеарна енергија, високо образовање, критична инфраструктура, управљање нуклеарним знањем, култура безбедности, дигиталне технологије, развој кадрова

NUCLEAR ENERGY AS A SYSTEM OF KNOWLEDGE, SAFETY AND DIGITAL TECHNOLOGIES: WHY HIGHER EDUCATION IS CRITICAL INFRASTRUCTURE

Abstract: Nuclear energy is a complex socio-technical system based on the integration of knowledge, safety, and digital technologies. The paper argues that higher education in this field should be treated as critical infrastructure, as it ensures continuity of competences, safety culture, and long-term sustainability of the nuclear sector. The role of universities, nuclear knowledge management, experimental facilities, and interdisciplinary profiles is analysed, together with recommendations of international organizations (IAEA, OECD/NEA, JRC, ENEN). The paper concludes that systemic education, digital competences, and public communication are prerequisites for the safe and responsible development of nuclear energy in Serbia.

Key Words: nuclear energy, higher education, critical infrastructure, nuclear knowledge management, safety culture, digital technologies, workforce development

1. УВОД

Савремена нуклеарна енергетика почива на високом нивоу знања, јакој култури сигурности и безбедности и све интензивнијој примени дигиталних технологија, укључујући симулације, дигиталне близанце, вештачку интелигенцију и системе за управљање знањем. Ови елементи захтевају континуирано образовање кадрова, систематски пренос знања између генерација и јасну институционалну подршку.

Нуклеарна енергетика такође, све више почива на примени дигиталних технологија. Дигитални близанци реакторских система, напредне симулације, вештачка интелигенција у анализи података, као и сложени информациони системи за управљање знањем, постају саставни део пројектовања, рада, одржавања и регулаторног надзора нуклеарних објеката. Истовремено, системи радијационе заштите, мониторинга и ванредне спремности све више се ослањају на дигиталне платформе и аутоматизовану обраду података. Ово додатно повећава захтеве за новим, интердисциплинарним профилима кадрова који повезују класично инжењерско знање са дигиталним компетенцијама.

Посебно место у овом систему има заштита од зрачења, као темељ безбедности, поверења јавности и регулаторне стабилности. Заштита од зрачења није изолована техничка дисциплина, већ интегрални део целокупног система знања који обухвата дозиметрију, биолошке ефекте, мониторинг животне средине, управљање ванредним ситуацијама и комуникацију ризика. Квалитет образовања и континуиране обуке у овој области директно утиче на безбедност људи, животне средине и институционалну кредибилност државе.

У таквом контексту, високо образовање мора се посматрати као критична инфраструктура нуклеарне енергетике, упоредива по значају са електранама, преносним системима или регулаторним телима. Универзитети нису само места преноса знања, већ центри у којима се граде компетенције, развија култура

безбедности, интегришу дигиталне технологије и обезбеђује међугенерациски континуитет експертизе. Без снажних универзитетских програма, истраживачке базе и институционализованог управљања знањем, није могуће одговорно планирати, а камоли реализовати било који нуклеарни програм.

Поред инжењерских и техничких профила, нуклеарна енергетика захтева и високообразоване правне и економске стручњаке, који разумеју специфичности нуклеарног права, лиценцирања, међународне конвенције, финансијске моделе, управљање ризицима и дугорочни економски одрживост. Ови профили су неопходни за доношење информисаних одлука и за интеграцију нуклеарне енергетике у шири енергетски, економски и друштвени контекст.

Из свих ових разлога, питање нуклеарне енергетике није пре свега питање „да ли“, већ питање како и са којим знањем. Ово излагање има за циљ да покаже да је улагање у високо образовање, развој кадрова, дигиталне капацитете и управљање нуклеарним знањем предуслов сваке будуће, одговорне и безбедне одлуке о нуклеарној енергетици у Србији.

У том контексту, улога универзитета превазилази класичну наставу. Универзитети постају носиоци националног знања, центри за развој компетенција, места где се повезују наука, безбедност, регулатива и дигитална трансформација.

2. МЕЂУНАРОДНЕ ПРЕПОРУКЕ

Нуклеарна енергија је „knowledge-intensive system“ – не може се „учити“ фрагментарно.

Међународна пракса полази од чињенице да је нуклеарна енергетика систем са:

- дугим животним циклусом (60–80 година),
- високом регулаторном и безбедносном сложености,
- критичном зависношћу од људских фактора.

Због тога изоловано образовање (само теорија или само тренинг) није довољно.

Овај став је експлицитно уграђен у приступе које промовишу International Atomic Energy Agency, OECD Nuclear Energy Agency и European Commission Joint Research Centre.

IAEA: Milestones Approach и Nuclear Power Human Resource Model

IAEA у свом Milestones Approach и Nuclear Power Human Resource Model јасно дефинише да:

- универзитети обезбеђују основу знања и аналитичко размишљање,
- истраживачка постројења (реактори, лабораторије, симулатори) омогућавају експерименталну и практичну обуку,
- индустрија и регулаторна тела обезбеђују оперативно и безбедно искуство.

IAEA наглашава да ниједна од ових компоненти није довољна сама за себе и да земље које су покушале да прескоче једну од њих имају дугорочне проблеме са безбедношћу и кадровима.

OECD/NEA: „From Concern to Capability“

OECD/NEA у извештају From Concern to Capability истиче да су земље са успешним нуклеарним програмима:

- институционализовале сарадњу универзитета – истраживачких центара – индустрије,
- користиле истраживачке реакторе и експерименталне установе као кључни део едукације,
- развијале кадрове кроз дугорочне, кохерентне програме, а не краткорочне курсеве.

Посебно се наглашава улога истраживачких постројења у:

- обуци за заштиту од зрачења,
- експериментално разумевање реакторске физике,
- развој културе безбедности.

OECD аргумент: Без приступа истраживачким постројењима, нуклеарно образовање остаје теоријско и непотпуно.

Европска унија: JRC, EHRO-N и ENEN

JRC / EHRO-N

EHRO-N анализе показују да је највећи кадровски ризик у ЕУ управо:

- недовољна повезаност образовања и праксе,
- губитак експерименталних капацитета,
- недовољна мобилност студената и младих инжењера.

JRC препоручује:

- националне и регионалне knowledge hub-ове повезане са универзитетима,
- систематско коришћење истраживачких инфраструктура за обуку.

ENEN (European Nuclear Education Network)

ENEN kao standard evropske prakse промовише:

- заједничке студијске програме,
- обавезне практичне модуле,
- тренинг у истраживачким реакторима и лабораторијама,
- директну везу са индустријом.

Европски консензус: Нуклеарно образовање без експерименталног и практичног сегмента није у складу са европским стандардима.

Међутим, нуклеарна енергетика је део ширег енергетског сектора и у том смислу, кључна међународна лекција гласи: Нуклеарна енергетика није „алтернатива“ класичној енергетици — она је њен високо регулисани, технолошки најзахтевнији облик.

Због тога земље са успешним нуклеарним програмима:

- не граде посебне „нуклеарне елите“,
- већ системски надограђују постојеће инжењерске дисциплине нуклеарно-специфичним знањима.

Овај приступ:

- смањује ризик,
- омогућава флексибилност кадрова,
- олакшава дугорочну одрживост сектора.

Изградња нуклеарног енергетског сектора подразумева изградњу читавог спектра инжењерских капацитета – од машинства и термотехнике, преко електроенергетике и електронике, до дигиталних система и управљања. Нуклеарна енергија није уска специјалност, већ најкомплекснији облик савремене енергетике.

На основу поређења образовних система за потребе нуклеарног сектора у неколико карактеристичних земаља (САД, Кина, Словенија, УАЕ, Русија, Пољска, Бугарска, Чешка, Словачка, Мађарска и Финска), уочене су рањивости (старење кадрова, фрагментација програма, сигурносни ризици), али и добре праксе: национални акредитивни системи (на пр. француски I2EN), партнерства приватног и јавног сектора (на пр. УАЕ–Кореја), и државне законске иницијативе. Кључне препоруке за политике у овој области су: формирање Центра за управљање нуклеарним знањем као националне платформе знања, оснивање националног савета или центара за координацију нуклеарног образовања; обезбеђивање посебних фондова за финансирање лабораторија и стипендија; развој националних дигиталних платформи за обуку; и увођење стандардизованих сертификата за нуклеарне програме. Ова тела, а пре свега национални савет односно центар за координацију нуклеарног образовања у Србији треба да обухватају координацију наставних програма и акредитацију (по узору на I2EN-ову ознаку квалитета), контролу квалитета и стандарде, пројектовање потреба кадрова (у складу са моделима ЕУ/ENRO-N), стратегије очувања знања (према IAEA смерницама о управљању нуклеарним знањем) и међународну сарадњу (са IAEA, WANO и добављачима).

Нуклеарна енергија се данас широко препознаје као једно од кључних средстава за сузбијање климатских промена и постизање циљева декарбонизације. Међутим, у Србији је јавност и даље скептична према нуклеарној енергији, што је често последица друштвених забринутости и заблуда о њеним ризицима. Због тога је неопходно успоставити ефикасну комуникацију са грађанима како би се водио информисан дијалог, изградило поверење и повећала подршка нуклеарној енергији као безбедном и одрживом извору. Образовање у овом сектору на свим нивоима, треба да да приоритет транспарентним, на чињеницама заснованим стратегијама комуникације које отклањају страхове јавности, прецизно објашњавају користи и мере безбедности нуклеарне технологије и активно укључују локалне заједнице кроз образовање и информативне програме. Јачање јавног ангажмана ће побољшати перцепцију нуклеарних ризика и подржати успешан развој нуклеарног сектора Србије, уз осигурање да се друштвене бриге уваже у свим фазама доношења одлука и имплементације пројеката.

Треба због тога да се нагласи да су комуникацијске вештине део обуке и образовања у области нуклеарне енергије. Уз техничке, правне и економске теме, наставни планови и програми требало би да укључују модуле о ангажовању јавности, комуникацији ризика и дијалогу са заинтересованим странама. На пример, неки успостављени програми нуклеарног образовања и шеме акредитације (као што је француски модел I2EN) почели су да препознају важност друштвених аспеката. Будућим нуклеарним инжењерима, менаџерима у нуклеарном сектору и регулаторима потребна је обука о томе како да објасне сложене нуклеарне концепте лаичкој публици и медијима. Укључивање медијске писмености, планирања рада са заједницом, па чак и кризне комуникације у универзитетским курсевима или професионалном развоју помоћи ће у стварању свестраних професионалаца. Ова интеграција осигурава да образовни програми не само да граде техничку стручност већ и припремају дипломце да постану ефикасни амбасадори индустрије.

Комуникација и образовање у нуклеарном сектору су тесно повезани и представљају критичну инфраструктуру. Ефикасне вештине комуникације омогућују стручњацима да сложене техничке и безбедносне информације јасно пренесу јавности и заинтересованим странама, градећи тако поверење и

подстицајући информисани дијалог. Укључивање комуникацијских компетенција у наставни програм нуклеарних студија обезбеђује да будући експерти, уз техничко знање, развијају и способност ангажовања заједнице, управљања перцепцијом ризика и транспарентног доношења одлука. Овај свеобухватни приступ јача друштвену прихватљивост нуклеарних технологија и подупиरे одрживи развој нуклеарног сектора као виталног дела националне инфраструктуре. Увођењем обуке о комуникацији уз техничке, правне и економске аспекте, нуклеарни програми граде отпорне системе знања који обезбеђују поверење јавности и оперативну извршност.

3. ЗАКЉУЧАК

Нуклеарна енергија представља један од најкомплекснијих технолошких система савременог друштва. Њена безбедна и одржива примена не заснива се искључиво на техничким решењима, већ на дугорочно изграђеном систему знања који обухвата инжењерске, безбедносне, регулаторне, дигиталне, правне, економске и комуникационе компоненте. Управо због тога, образовање, а посебно високо образовање у области нуклеарне енергетике треба посматрати као критичну инфраструктуру, упоредиву по значају са физичким енергетским објектима.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Knowledge Management, Vienna, Austria. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-knowledge-management>
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA), Knowledge Management and Its Implementation in Nuclear Organizations, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-6.11, Vienna, Austria, 2016. [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1724_web.pdf
- [3] Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), Nuclear Education and Training: From Concern to Capability, Paris, France, 2012. [Online]. Available: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nuclear-edu-training-ex.pdf>
- [4] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Assuring Nuclear Safety Competence into the 21st Century, Paris, France, 2000. [Online]. Available: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2000/08/assuring-nuclear-safety-competence-into-the-21st-century_g1gh1cf9/9789264182400-en.pdf
- [5] Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), The Safety Culture of an Effective Nuclear Regulatory Body, Paris, France, 2016. [Online]. Available: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2016/03/the-safety-culture-of-an-effective-nuclear-regulatory-body_g1g65f5a/9789264252967-en.pdf
- [6] Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), Nuclear Education, Skills and Technology (NEST) Framework, Paris, France. [Online]. Available: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_21786/nuclear-education-skills-and-technology-nest-framework
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA), Computer Security at Nuclear Facilities, IAEA Nuclear Security Series No. 17, Vienna, Austria, 2011. [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1527_web.pdf
- [8] A. Ayodeji, "Cyber security in the nuclear industry: A closer look at threats and vulnerabilities of digital assets at nuclear power facilities," Nuclear Engineering and Technology, vol. 55, no. 10, pp. 3365–3374, 2023, doi: 10.1016/j.net.2023.07.018.
- [9] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Digital Security and Resilience in Critical Infrastructure and Essential Services, Paris, France, 2019. [Online]. Available: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/04/digital-security-and-resilience-in-critical-infrastructure-and-essential-services_5593c149/a7097901-en.pdf
- [10] Idaho National Laboratory (INL), "Nuclear cybersecurity researchers and industry unite to protect next-generation reactors," 2025. [Online]. Available: <https://inl.gov/feature-story/nuclear-cybersecurity-researchers-and-industry-unite-to-protect-next-gen-reactors/>
- [11] European Nuclear Education Network (ENEN), "Digital Nuclear Safety Culture," course description. [Online]. Available: <https://nuclear-education.eu/course/digital-nuclear-safety-culture/>
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Knowledge Management for Research Reactors, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-6.2, Vienna, Austria, 2011. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/publications/8361/nuclear-knowledge-management-for-research-reactors>
- [13] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Education, Training and Knowledge Management for Nuclear Safety, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108983>

- [14] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Maintaining and Developing Nuclear Competences in the European Union, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116139>
- [15] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Nuclear Safety and Security Knowledge Management, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. [Online]. Available: <https://joint-research-centre.ec.europa.eu>
- [16] European Commission, European Human Resources Observatory for the Nuclear Energy Sector (EHRO-N): Strategic Agenda and Activities, Brussels, Belgium, 2018. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/european-human-resources-observatory-nuclear-energy-sector-ehro-n_en
- [17] European Commission, Strategic Energy Technology (SET) Plan – Education and Training Roadmap for Nuclear Energy, Brussels, Belgium, 2017. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/strategic-energy-technology-plan_en
- [18] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Digitalisation and Innovation in the Nuclear Energy Sector, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. [Online]. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu>
- [19] European Commission, Council Directive 2014/87/Euratom amending Directive 2009/71/Euratom establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations, Official Journal of the European Union, L219, pp. 42–52, 2014. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0087>
- [20] European Commission, Skills Agenda for Europe: Sustainable Competences for Strategic Technologies, Brussels, Belgium, 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=1223>
- [21] L. Cizelj, C. Pesznyák, J. Starflinger, G. L. Pavel, F. Wastin i E. Michailidou, “Towards strategic agenda for European nuclear education, training, and knowledge management”, Nuclear Engineering and Design, vol. 420, p. 113001, 15 Apr. 2024.
- [22] E. Michailidou, “Nuclear education and training activities of the Joint Research Centre of the European Commission: Maintaining and enhancing nuclear skills and competences”, 2024 — opisuje JRC programe i inicijative za razvoj kompetencija stručnjaka u nuklearnoj sigurnosti, zaštiti, dekomisiji i drugim oblastima.
- [23] “Competence mapping at industry level”, ENEN2PLUS Deliverable D6.1 (2024) — praktičan primjer kompetencijskog mapiranja i razvojnih modula za nuklearne profesionalce.
- [24] European Human Resources Observatory for the Nuclear Sector — opis EHRO-N u sklopu JRC / DG Energy: zajednički rad na metodologijama procjene radne snage, znanja i kompetencija, podrška za obrazovanje i trening te razvoj standarda i modela za nuklearno tržište rada.
- [25] ENSREG prezentacija (2024) pokazuje i nove tokove rada EHRO-N: modele procjene radne snage, strategije za praćenje kompetencija i planiranja edukacije u EU nuklearnom sektoru.
- [26] “About us: International Institute for Nuclear Energy (I2EN),” I2EN, Paris, France. [Online]. Available: <https://www.i2en.fr/en/about-us/> [Accessed: Jan. 30, 2026].
- [27] “I2EN: Strengthening key skills for the nuclear sector,” I2EN, Paris, France. [Online]. Available: <https://www.i2en.fr/en/> [Accessed: Jan. 30, 2026].
- [28] “I2EN Label certifying quality of nuclear training,” I2EN, Paris, France. [Online]. Available: <https://www.i2en.fr/en/the-i2en-label/> [Accessed: Jan. 30, 2026].
- [29] International Institute of Nuclear Energy (I2EN), “I2EN represents and coordinates the French nuclear education and training offer,” Energierecte.com, Apr. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.energierecute.com/en/energy-and-environment-company/company-i2en-international-institute-of-nuclear-energy-695/presentation> [Accessed: Jan. 30, 2026].
- [30] “French nuclear education and training overview,” Joint Research Centre — EHRO-N: Member States Info (France), European Commission. [Online]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/ehro-n/member-states-info/france_en [Accessed: Jan. 30, 2026].
- [31] S. Bilbao y León, “We have no time to lose in delivering a realistic, proven approach to the clean energy transition,” *World Nuclear News*, 7 Sept. 2023. [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/> (Accessed: Feb. 05, 2026).
- [32] V. Cvetković et al., “Nuclear Power Risk Perception in Serbia: Fear of Exposure to Radiation vs. Social Benefits,” *Energies*, vol.14, no.9, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2464> (Accessed: Feb. 05, 2026).
- [33] International Institute for Nuclear Energy (I2EN), “Nuclear Training and Education,” I2EN (2025). [Online]. Available: <https://www.i2en.fr/en/nuclear-training/> (Accessed: Feb. 05, 2026).