

KVANTNA INFRASTRUKTURA I KVANTNI EKOSISTEM: VISOKO OBRAZOVANJE KAO KLJUČNI FAKTOR TRANSFORMACIJE I GENERATOR STRUČNIH KOMPETENCIJA

Nebojša Ralević¹, Vladimir Đaković², Bojana Velečković Gajinović³

^{1,2,3}Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

¹nralevic@uns.ac.rs, ²v_djakovic@uns.ac.rs, ³veleckovic.gajinovic.dtl.2024@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Rad razmatra transformaciju visokog obrazovanja u kontekstu razvoja kvantnih tehnologija i nastanka kvantnog ekosistema u Evropi. Polazeći od strategije Evropske komisije „Quantum Europe“ analizirana je uloga fakulteta kao ključnih generatora znanja koji povezuju teorijsku nauku, digitalnu infrastrukturu i praktične primene. Poseban fokus stavljen je na razvoj stručnih kompetencija kroz digitalne cloud-based platforme, sa naglaskom na QuantConnect kao virtuelni most ka kvantnoj infrastrukturi. Rad ukazuje na značaj razvoja tehničkih, analitičkih i istraživačko-inovacionih veština, kao i na etičke aspekte tehnologija dvojne namene. U zaključku se ističe da integracija ovakvih platformi u visokom obrazovanju predstavlja održiv model za razvoj kadrova u kvantnoj eri i jačanje institucionalne relevantnosti fakulteta.

Ključne reči: kvantna tehnologija, visoko obrazovanje, digitalna obrazovna platforma, Quantum Europe, QuantConnect

QUANTUM INFRASTRUCTURE AND THE QUANTUM ECOSYSTEM: HIGHER EDUCATION AS A KEY TRANSFORMATION FACTOR AND GENERATOR OF PROFESSIONAL COMPETENCIES

Abstract: This paper examines the transformation of higher education in the context of quantum technology development and the emergence of the European quantum ecosystem. Starting from the European Commission's "Quantum Europe" strategy, the role of universities was analyzed as key generators of knowledge that connect theoretical science, digital infrastructure, and practical applications. Particular emphasis is placed on the development of professional competencies through digital and cloud-based platforms, with QuantConnect highlighted as a virtual bridge to quantum infrastructure. The paper underscores the importance of developing technical, analytical, and research and innovation competencies, as well as addressing the ethical implications of dual-use technologies. The conclusion emphasizes that integrating such platforms into higher education represents a sustainable model for workforce development in the quantum era and for strengthening the institutional relevance of universities.

Keywords: quantum technology, higher education, digital educational platform, Quantum Europe, QuantConnect

1. UVOD

Razvoj kvantnih tehnologija označava početak nove tehnološke paradigme koja značajno prevazilazi klasične digitalne sisteme. Kvantna infrastruktura, koja obuhvata kvantne računare, komunikacione mreže, simulatore i cloud-based pristupne tačke, postaje ključni element budućeg tehnološkog i ekonomskog razvoja. U tom kontekstu, visoko obrazovanje se nalazi pred izazovom duboke transformacije – od tradicionalnog prenošenja znanja ka aktivnom oblikovanju kompetencija za kvantnu eru[1].

Osnovna teza ovog rada jeste da visoko obrazovanje deluje kao pokretač kvantnog ekosistema, jer povezuje fundamentalna teorijska znanja (matematika, fizika, informatika) sa praktičnim inovacionim okruženjem, industrijom i institucionalnim razvojem. Fakulteti ne predstavljaju samo obrazovne institucije, već čvorišta znanja koja omogućavaju nastanak i održivost kvantne infrastrukture.

Ova uloga visokog obrazovanja direktno je u skladu sa evropskim modelom „Quantum Europe“, koji kvantne tehnologije posmatra kroz pet međuzavisnih stubova: kvantum ekosistem, infrastruktura, istraživanje i inovacije (R&I), veštine (Skills) i tehnologije dvojne namene (Dual-use)[2]. U tom okviru, razvoj veština predstavlja pokretačku silu koja omogućava efikasno korišćenje infrastrukture i transfer inovacija u realni sektor.

2. KVANTNI EKOSISTEM I ULOGA DIGITALNIH PLATFORMI – MATEMATIČKE OSNOVE

Kvantni ekosistem funkcioniše kao složen sistem međuzavisnih elemenata, gde nijedan segment ne može

samostalno da obezbedi održiv razvoj. Posebno je izražena veza između veština (*Skills*) i istraživanja i inovacija (*R&I*), dok kvantna infrastruktura, kvantni ekosistem i tehnologije dvojne namene omogućavaju praktičnu primenu i skalabilnost inovacija. Razvoj kvantnih algoritama, hibridnih modela i optimizacionih metoda direktno zavisi od matematičke pismenosti, statističke analize i razumevanja linearne algebre, verovatnoće i teorije informacija.

Matematička osnova kvantnih tehnologija zasniva se na formalizmu linearne algebre i teorije Hilbertovih prostora. Kvantno stanje sistema sa n kubita opisuje se vektorom stanja:

$$|\psi\rangle = \sum_{i=0}^{2n-1} \alpha_i |i\rangle, \quad \sum_{i=0}^{2n-1} |\alpha_i|^2 = 1 \quad (1)$$

gde koeficijenti α_i predstavljaju kompleksne amplitude verovatnoće. Ovakav matematički opis jasno ilustruje zašto razvoj kvantnih veština zahteva snažnu osnovu iz linearne algebre, verovatnoće i statistike, kao i sposobnost interpretacije apstraktnih matematičkih modela kroz digitalnu i cloud-based kvantnu infrastrukturu. [2]

Kao vizuelnu ilustraciju ovih međuzavisnosti, Evropska strategija „*Quantum Europe*“ prikazuje kvantni ekosistem kroz pet ključnih stubova:

1. *Quantum Ecosystem* (Kvantni ekosistem) – mreža istraživača, industrije i akademskih institucija koja omogućava kolaboraciju i transfer znanja.
2. *Quantum Infrastructure* (Kvantna infrastruktura) – kvantni računari, mreže, cloud-platforme i simulatori koji omogućavaju praktičnu primenu teorijskih koncepata.
3. *Skills* (Veštine) – razvoj stručnih kompetencija i algoritamske pismenosti potrebne za rad sa kvantnim i AI sistemima.
4. *R&I* – Research & Innovation (Istraživanje i inovacije) – razvoj novih algoritama, modela i hibridnih rešenja koja povezuju teoriju sa praktičnim izazovima.
5. *Dual-use* (Tehnologija dvojne namene) – primena kvantnih tehnologija u različitim sektorima, uz razmatranje etičkih i regulatornih implikacija.



Slika 1. Model *Quantum Europe*, prilagođeno [3]

Kao što se vidi na slici 1, razvoj veština i istraživanje i inovacije čine osnovu kvantnog ekosistema, dok kvantna infrastruktura, kvantni ekosistem i *dual-use* tehnologije omogućavaju njihovu praktičnu primenu i održivost u industriji i društvu.

U kontekstu istraživanja i inovacija, veliki broj praktičnih problema može se formalizovati kao optimizacioni zadaci pogodni za kvantnu obradu. Jedan od najčešće korišćenih matematičkih modela u kvantnoj optimizaciji je QUBO (*Quadratic Unconstrained Binary Optimization*) model, definisan kao:

$$\min_{x \in \{0,1\}} x^T Q x \quad (2)$$

gde je $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ simetrična matrica koja kodira međuzavisnosti između promenljivih. Ovakva formulacija omogućava mapiranje realnih industrijskih problema – kao što su optimizacija logistike, raspoređivanje resursa i finansijsko modelovanje – na kvantne algoritme i specijalizovane kvantne optimizacione arhitekture zasnovane na principu kvantnog kaljenja (*quantum annealing*), čime se direktno povezuju matematički modeli, kvantna infrastruktura i tehnologije dvojne namene. [4]

Digitalne platforme, kao što je *QuantConnect*, omogućavaju operacionalizaciju apstraktnih matematičkih i AI modela, povezujući teorijsko znanje sa praktičnim eksperimentima. *Cloud-based* pristup omogućava:

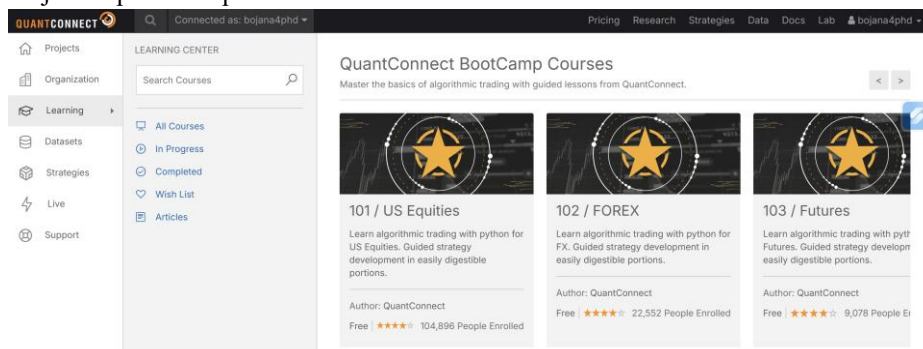
- Široku dostupnost resursa, tako da studenti i istraživači mogu koristiti kvantne simulatore i algoritme bez potrebe za skupim hardverom.
- Masovnu skalabilnost učenja, omogućavajući paralelan rad velikog broja korisnika i brži razvoj kompetencija.
- Fleksibilnu kolaboraciju, gde se znanje i rezultati istraživanja mogu deliti između univerziteta, industrije i istraživačkih centara u realnom vremenu.
- Brzu adaptaciju na nove tehnologije, jer cloud-platforme omogućavaju ažuriranje softverskih alata i simulacija bez fizičke nadogradnje infrastrukture.

Ovakav pristup direktno podržava održivost kvantnog ekosistema i omogućava da visoko obrazovanje postane generator kompetencija koji povezuje teoriju sa inovacijama u praksi.

3. RAZVOJ ADEKVATNIH STRUČNIH KOMPETENCIJA PUTEM QUANTCONNECT PLATFORME

QuantConnect je *cloud-based* platforma namenjena razvoju, testiranju i simulaciji algoritamskih i kvantno-inspirisanih strategija. Omogućava rad u virtuelnom okruženju koje integriše klasične i hibridne (klasično-kvantne) pristupe, bez potrebe za neposrednim pristupom kvantnom hardveru. Na taj način platforma značajno smanjuje tehničke i finansijske barijere, dok istovremeno pruža realističan okvir za učenje, istraživanje i eksperimentisanje.

Zahvaljujući radu u oblaku, studenti imaju pristup velikim skupovima podataka, naprednim simulacionim alatima i mogućnosti testiranja strategija u realnom ili kvazi-realnom vremenu, čime se ostvaruje direktna veza između teorijskih znanja i njihove praktične primene.



Slika 2. Korisnički interfejs *QuantConnect BootCamp Courses* [5]

Tabela 1. Razvoj kompetencija kroz *QuantConnect* platformu

Vrste kompetencije	Opis i obrazovni efekti
Tehničke kompetencije	Studenti razvijaju veštine kvantnog programiranja kroz rad sa simulatorima i hibridnim (klasično-kvantnim) algoritmima. Ovakav pristup omogućava razumevanje kvantnih principa bez neposrednog pristupa kvantnom hardveru, čime se smanjuju troškovi i povećava dostupnost znanja. Dodatno, studenti uče kako da integrišu kvantne algoritme sa postojećim IT sistemima i kako da testiraju različite strategije u virtuelnom okruženju, razvijajući praktične sposobnosti primene kvantnih rešenja u realnim problemima.
Analitičke kompetencije	<i>QuantConnect</i> omogućava rad sa velikim i kompleksnim skupovima podataka, što doprinosi razvoju veština statističkog modelovanja, optimizacije odluka i upravljanja rizikom. Ove kompetencije su od posebnog značaja u kontekstu kvantnih i kvantno-inspirisanih algoritama za optimizaciju i predikciju. Studenti stiču sposobnost interpretacije rezultata simulacija, prepoznavanja obrazaca u podacima i donošenja utemeljenih odluka zasnovanih na kvantno-analitičkim modelima.
Istraživačko – inovacione (R&I) kompetencije	Platforma omogućava brzo eksperimentalnu implementaciju i validaciju inovativnih algoritamskih rešenja, čime se studenti osposobljavaju za istraživački rad direktno povezan sa potrebama industrije i tržišta. Iterativno poboljšanje algoritama i eksperimentisanje sa novim metodama jačaju kreativnost, inovativnost i sposobnost rešavanja kompleksnih kvantnih problema.

Razvoj tehničkih, analitičkih i *R&I* kompetencija kroz *QuantConnect* platformu rezultira formiranjem sledećih ključnih stručnih kompetencija:

- Algoritamska pismenost – razumevanje kvantnih logičkih kola, transformacija i optimizacionih procesa. Studenti uče kako da dizajniraju, analiziraju i testiraju kvantne i kvantno-inspirisane algoritme, što omogućava njihovu primenu u različitim tehnološkim i finansijskim kontekstima.
- Sposobnost hibridnog računarstva – integracija kvantnih rešenja u postojeće IT i finansijske sisteme. Ova kompetencija predstavlja direktan nastavak tehničkih veština razvijenih kroz simulacije i rad u oblaku, pripremajući studente za realna industrijska okruženja u kojima klasični i kvantni sistemi funkcionišu zajedno.
- Etičko upravljanje tehnologijom – razumevanje implikacija tehnologija dvojne namene (dual-use). Studenti postaju svesni etičkih, bezbednosnih i regulatornih izazova i uče kako da kvantne tehnologije primenjuju odgovorno i u skladu sa važećim normama.
- Kvantno-finansijska analitika – primena kvantno-inspirisanih algoritama u optimizaciji investicionih

portfolija, što predstavlja direktnu vezu sa fokusom QuantConnect platforme. Ova kompetencija obuhvata evaluaciju rizika, modelovanje tržišnih scenarija i donošenje informisanih finansijskih odluka zasnovanih na naprednim analitičkim metodama.

4. DUAL – USE POTENCIJAL I INSTITUCIONALNI RAZVOJ

Stečene kompetencije imaju izražen *dual-use* potencijal, jer se mogu primenjivati u različitim sektorima kao što su finansije, bezbednost, logistika i energetika. Upravo zbog toga, institucije visokog obrazovanja imaju odgovornost da obezbede etički i regulatorni okvir za korišćenje kvantnih tehnologija.

Sa institucionalnog aspekta, integracija simulacionih i cloud-platформи u kurikule omogućava fakultetima da:

- osiguraju relevantnost i konkurentnost diploma,
- prate brz razvoj tehnologije,
- uspostave saradnju sa industrijom i istraživačkim centrima.

Dodatno, institucionalni razvoj omogućava kontinuiranu evaluaciju i prilagođavanje obrazovnih programa potrebama tržišta, čime se povezuje akademsko znanje sa praktičnim zahtevima industrije. Obezbeđivanje resursa, podrške i standardizovanih metoda simulacija pomaže univerzitetima da studenti steknu kompetencije koje su odmah primenljive u realnom okruženju i različitim sektorima.

5. ZAKLJUČAK

Visoko obrazovanje, transformisano kroz digitalne i cloud-based platforme poput QuantConnect-a, postaje ključni faktor razvoja kvantne infrastrukture i kvantnog ekosistema. Takav pristup omogućava masovnu skalabilnost znanja, razvoj interdisciplinarnih kompetencija i direktnu vezu između obrazovanja, inovacija i industrije. Razvoj kvantne infrastrukture i kvantnog ekosistema omogućava kvantitativno merljivo povećanje dostupnosti znanja, efikasnosti obrazovnih i istraživačkih procesa i brzine transfera inovacija ka industriji i javnom sektoru. Kvalitativno, on doprinosi jačanju tehnološkog suvereniteta, digitalne otpornosti i društvene odgovornosti, pozicionirajući kvantne tehnologije kao strateški resurs ne samo visokog obrazovanja već i šire društvene zajednice.

Kao pravac daljih istraživanja, preporučuje se razvoj održivog modela kvantnog obrazovanja koji će kontinuirano pratiti potrebe industrije, regulatorne zahteve i etičke izazove tehnologija dvojne namene.

Na taj način, fakulteti se pozicioniraju ne samo kao korisnici kvantne infrastrukture, već kao aktivni akteri njenog razvoja unutar evropskog kvantnog ekosistema. Integracija platformi poput QuantConnect-a omogućava sistemsku pripremu kadrova za rad u hibridnim klasično-kvantnim okruženjima, čime se direktno podržavaju strateški ciljevi inicijative Quantum Europe.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija i Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Unapređenje kvaliteta nastave na studijskim programima Departmana kroz implementacija rezultata naučno-istraživačkog rada u oblasti Industrijskog inženjerstva i menadžmenta".

Autori su finansijski podržani i od strane projekta Departmana za opšte discipline u tehnički, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu "Veštačka inteligencija i mogućnosti njene primene u cilju unapređenja nastavnog procesa u opštim disciplinama".

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacije (br. ugovora: 451-03-34/2026-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Naučnoistraživački i umetničkoistraživački rad istraživača u nastavi i saradničkim zvanjima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu 2026" (br: 01-3609/1).

6. LITERATURA

- [1] Bojana Velečković Gajinović, Nebojša Ralević, Vladimir Đaković, *Mogućnosti i rizici primene veštačke inteligencije u obrazovnom sistemu Republike Srbije*, XXXI Skup Trendovi Razvoja: „Budućnost visokog obrazovanja: kvalitet, internacionalizacija, digitalizacija i inovacije. 3-5.12.2025, 178-180.
- [2] Michael Nielsen, Isaac Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, 2010.
- [3] Izvor: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/881430/Factsheet%20Quantum%20Strategy.pdf>
- [4] Fred Glover, Gary Kochenberger, Yu Du, *A Tutorial on Formulating and Using QUBO Models*, 4OR: A Quarterly Journal of Operations Research, 2019.
- [5] Internet stranica: <http://quantconnect.com>