

# Raziskovalna revolucija: Kako Deep Research spreminja paradigmo iskanja in raziskovanja

Izr. prof. dr. Janez Perš, *Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*

V zadnjem letu se je nadaljeval hiter razvoj velikih jezikovnih modelov, vendar je njihovo učenje postalo izjemno zahtevno. Tudi podjetja z obsežnimi finančnimi in računskimi viri se soočajo z omejitvami, ki ovirajo hiter in učinkovit napredek pri izboljševanju zmogljivosti teh modelov. Pri učenju novega modela Orion, ki ga razvija OpenAI, so se pojavile konkretne težave. Na primer, čeprav je Orion že pokazal nekaj izboljšav v jezikovnih nalogah, se je v primerjavi s prehodom od GPT-3 na GPT-4 izkazal le zmeren napredek, zlasti na področju programiranja. Testne faze so razkrile, da model ni sposoben obvladati kodirnih nalog tako učinkovito kot njegov predhodnik, kar je povzročilo precejšnje skrbi znotraj ekipe.

## Nova paradigma

Kot odgovor na te izzive se je pojavila nova paradigma – večagentni sistemi. Namesto enega velikega modela pri generiranju odgovorov sodeluje več manjših modelov, ki si med seboj izmenjujejo informacije, se nadzirajo, popravljajo in po potrebi vključujejo sveže podatke iz spletnega iskanja. Ta pristop ostaja procesorsko zahteven, vendar prinaša ključno prednost: manjši modeli lahko delujejo bolj vzporedno in učinkovito sodelujejo pri oblikovanju odgovorov. To odpira nove možnosti pri razvoju jezikovnih modelov, saj omogoča bolj prilagodljive in modularne rešitve, ki so hkrati zmogljive in dostopnejše za uporabo.

OpenAI je to paradigmo razvil do zaenkrat skrajnih meja z uvedbo nove storitve Deep Research. Ta storitev omogoča poglobljeno raziskovanje različnih virov, predvsem spletnih, ki jih model lahko doseže, interpretira ter iz njih sintetizira poročilo. Delovanje Deep Research spominja na klasične raziskovalne metode, kot jih poznamo v znanosti ali novinarstvu. Model preišče vire, jih analizira, sintetizira odgovore ter po potrebi nadaljuje iskanje in razširja nabor vhodnih podatkov. Ključna prednost je v hitrosti in obsegu obdelave podatkov – naloge, za katere bi raziskovalci potrebovali dni ali celo tedne, lahko model opravi v 5 do 30 minutah.

## Kako dober je Deep Research?

Seveda takšna zmogljivost zahteva ogromno računalniških virov, zato je Deep Research trenutno na voljo le uporabnikom najdražjega naročniškega paketa ChatGPT Pro, ki stane 200 evrov na mesec. Kljub temu je Deep Research že spodbudil konkurenčna podjetja k razvoju podobnih rešitev. Povedno je, da je storitev Deep Research dosegla natančnost 26,6 % na izjemno zahtevnem testu velikih jezikovnih modelov "Humanity's Last Exam". Za primerjavo, model GPT-4o doseže le 3,3 %, medtem ko OpenAI o1 doseže 9,1 %, OpenAI o3-mini-high pa 13 %.

Storitev smo preizkusili tudi sami. Model smo prosili, naj razišče zgodovino superračunalništva v Sloveniji in – če je to pomembno – tudi v bivši skupni državi. Dali smo mu nalogo, naj sestavi pregled superračunalništva od leta 1950 do 2024. Rezultati njegovega dela ter naši pozivi, s katerimi smo model vodili skozi raziskovanje, so na voljo v prilogi na koncu tega dokumenta.

## Kaj ostane ljudem?

Mnenja o rezultatih Deep Research se seveda lahko razlikujejo, a nesporno je, da model pri pridobivanju informacij in sestavi poročil deluje izjemno hitro v primerjavi s človekom. Doktorskim študentom, raziskovalcem, novinarjem in drugim, ki se ukvarjajo z iskanjem in analiziranjem virov, ponuja novo orodje, ki lahko nadomesti dolgotrajne raziskovalne procese. Ključna dodana vrednost človeka pri uporabi te storitve ostaja preverjanje in kritična analiza dobljenih rezultatov. Model morda ne bo vedno popolnoma natančen, zato je človeški nadzor nujen. Prav zato lahko upravičeno trdimo, da bo to orodje radikalno spremenilo način iskanja povezanih virov v znanosti, preverjanja novih idej in teorij ter vplivalo na številna druga področja, kjer je bilo poglobljeno iskanje informacij doslej preprosto predrago ali prezamudno.

## Dodatne informacije in viri

Humanity's last exam: <https://agi.safe.ai/>

Introducing Deep Research: <https://openai.com/index/introducing-deep-research/>

Open-source DeepResearch: <https://huggingface.co/blog/open-deep-research>

*Članek je bil spisan s pomočjo razpoznavalnika govora Voice In ter velikega jezikovnega modela OpenAI GPT-4o, ki je prosti tok izgovorjenih avtorjevih misli oblikoval v končno obliko, s pomočjo OpenAI o3 pa smo dodali še nekaj podrobnosti, ki jih je našel na spletu. Naslov je oblikoval OpenAI o3.*

# Zgodovina superračunalništva v Sloveniji

Razišči zgodovino superračunalništva v Sloveniji, vse od začetkov, od leta 1950 naprej, še od časov bivše Jugoslavije. Išči tako znanstvene publikacije, objave o superračunalniških kapacitetah, primere uporabe superračunalniških zmogljivosti, kot vse ostalo, kar je povezano s superračunalništvom v Sloveniji. Išči vse možne vire, od znanstvenih, poljudnih ter povsem novičarskih. Sestavi obširno poročilo s pregledom po letih oziroma obdobjih in izpostavi tudi prelomne trenutke od 1950 do 2024.

Odlično, pripravim lahko podrobno poročilo o zgodovini superračunalništva v Sloveniji od leta 1950 do 2024. Da bo raziskava čim bolj natančna, bi rad preveril nekaj podrobnosti:

- Ali vas zanima izključno Slovenija, ali vključimo tudi jugoslovanski kontekst do razpada Jugoslavije leta 1991?
- Bi želeli, da v poročilu podrobno obdelam tehnične specifikacije superračunalnikov, ki so bili uporabljeni v Sloveniji?
- Ali naj vključim tudi vpliv superračunalništva na znanost, gospodarstvo in druge sfere (npr. meteorologija, biomedicina, industrija)?
- Ali naj se osredotočim predvsem na akademske in raziskovalne centre, ali naj vključim tudi zasebni sektor in podjetja?
- V kakšnem obsegu želite poročilo – naj bo bolj povzetek ključnih dogodkov ali podrobna kronologija s tabelami, slikami in referencami?

Če imate kakršnekoli dodatne želje glede formata ali poudarkov, mi prosim sporočite!

Zanima me Slovenija, vendar lahko vključiš tudi nekaj jugoslovanskega konteksta, tam kjer je to pomembno in relevantno za Slovenijo.

Ja, tehnične specifikacije superračunalnikov so pomembne. Vključi vpliv superračunalništva na znanost, gospodarstvo in druge sfere, obvezno!

Vključi poleg akademske in raziskovalne sfere tudi zasebni sektor in podjetja, če je to relevantno.

Želim podrobno kronologijo, vendar naj je teksta dovolj (nočem samo alineje!!)

Raziskal bom zgodovino superračunalništva v Sloveniji od leta 1950 do 2024. Vključil bom ključne dogodke, prelomne trenutke in vpliv na znanost, gospodarstvo ter industrijo. Prav tako bom zajel tehnične specifikacije superračunalnikov, akademsko in raziskovalno sfero ter zasebni sektor, če je to relevantno. Dodal bom tudi kontekst nekdanje Jugoslavije tam, kjer je pomembno za razvoj superračunalništva v Sloveniji. Ko bo poročilo pripravljeno, vas bom obvestil.

# Zgodovina superračunalništva v Sloveniji (1950–2024)

## Pionirsko obdobje (1950–1960): analogni počeci in prvi računalniki

Zgodovina računalništva v Sloveniji sega v obdobje po drugi svetovni vojni, ko so znanstveniki začeli eksperimentirati z analognimi računalniki. Že konec 40. let 20. stoletja je Inštitut Borisa Kidriča (IBK) v Beogradu izdelal prvi mehanski analogni računalnik v Jugoslaviji za simulacije v elektroenergetiki

[RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#) . Sledile so izboljšave v elektronski tehniki – leta 1959 so slovenski strokovnjaki izdelali analogni računalnik **M-1**, prvi elektronski računalnik na tleh Slovenije [RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#) . M-1 je bil zgrajen v **tranzistorski tehnologiji** in je reševal sisteme do 30 linearnih enačb; njegova inovativnost ga uvršča med redke tovrstne dosežke v svetu tistega časa [RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#) . Uporabljali so ga v republiškem matematičnem centru za reševanje kompleksnih inženirskih problemov [RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#) . Ta pionirski analogni stroj je pokazal, da ima tudi Slovenija zgodaj usposobljene kadre in lastno razvojno pot na področju računalništva. Kljub začetnim uspehom analognih računalnikov je bilo jasno, da prihodnost leži v **digitalnih računalnikih**, katerih razvoj je v tujini že stekel. Jugoslavija je kmalu zatem začela razvijati lastne digitalne računalnike – leta 1960 so v Beogradu zagnali **CER-10**, prvi jugoslovanski digitalni računalnik, ki je tlakoval pot kasnejšim večjim sistemom tudi v Sloveniji [SLO-TECH.COM](#) .

## Vzpostavitev elektronskih centrov (1960–1970): prvi veliki računalniki

V 60. letih se je računalništvo v Sloveniji razvijalo v okviru širšega jugoslovanskega konteksta. Slovensko podjetje **Iskra** je po začetnih neuspešnih poskusih (npr. z modelom Zuse Z23 in nabavo računalnika UNIVAC 1004 okoli leta 1966) našlo priložnost v sodelovanju s **Control Data Corporation (CDC)**

MONITOR.SI . Leta 1966 je Iskra sklenila dogovor s CDC in postala zastopnik za celo Jugoslavijo MONITOR.SI . To je vodilo v ambiciozen projekt vzpostavitve **Republiškega računalniškega centra (RRC)** v Sloveniji, prvega osrednjega elektronskega centra v republiki. Med letoma 1967 in 1969 so v ljubljanskem predmestju Stegne postopno vzpostavili infrastrukturo: sprva so leta 1967 namestili manjši računalnik **CDC 2100** (pravzaprav različico CDC 3100 z omejeno zmogljivostjo) kot začasno rešitev MONITOR.SI . Končno je marca 1969 v RRC prispel **CDC 3300**, takrat najsodobnejši **tranzistorski računalnik druge generacije** MONITOR.SI . CDC 3300 je zmogel okrog **0,8 MIPS** (približno 800.000 ukazov na sekundo pri taktu 0,8 MHz) MONITOR.SI , kar je bilo za tisti čas izjemno – najhitrejši računalnik na svetu, CDC 6600 Seymoura Craya, je imel leta 1964 zmogljivost 3 MIPS MONITOR.SI . Novi center v Sloveniji je s tem prejel **drugi največji računalnik v Jugoslaviji** (večji je bil le IBM 7040 v Beogradu) in ga takoj intenzivno uporabljal MONITOR.SI MONITOR.SI . Že leta 1970 je CDC 3300 v ljubljanskem RRC deloval v dveh izmenah in opravil preko 2300 ur izračunov – polovico za **Izvršni svet SRS (republiško vlado)**, četrtno za Iskro in četrtno za Univerzo v Ljubljani MONITOR.SI MONITOR.SI . S tem je en sam računalnik postal hrbtenica znanstvenih, upravnih in gospodarskih izračunov v Sloveniji.

Vzpostavitev RRC z velikim CDC 3300 je pomenila prelomnico: prvič so bile v Sloveniji na voljo **zmogljivosti elektronskega računanja** za širši krog uporabnikov. Konec 60. let je sicer v vsej Jugoslaviji obratovalo že okoli sto računalnikov, a večinoma manjših; RRC-jev stroj je zaradi usposobljenega kadra in dobre organizacije dosegal mnogo večjo izkoriščenost kot drugi

MONITOR.SI . Uspeh RRC je pokazal tudi na pomanjkljivosti – primanjkovalo je strokovnjakov in primerne organizacije izmenjave podatkov, kar je OECD kritiziral kot zaviranje razvoja

MONITOR.SI . Kljub tem izzivom je slovenski elektronski center s **centralizirano infrastrukturo** dokazal smiselnost vlaganj v računalništvo: omogočil je prvi val informatizacije uprave (npr. računovodstva javnega sektorja) in pospešil znanstvene raziskave, ki so prej potekale ročno ali s približki. Slovenija je sredi hladne vojne tako dobila dostop do tehnologije, ki je bila ključna za napredek v gospodarstvu in znanosti.

## Razcvet zmogljivih sistemov (1970–1980): CDC Cyber in širitev uporabe

Z zgodnjimi 70. leti se je tekma za računalniško zmogljivost nadaljevala. Marca 1972 je v Ljubljano prispel legendarni **CDC Cyber 72**, eden prvih **superračunalnikov svojega časa** v vzhodni Evropi

[SLO-TECH.COM](#) . Ta računalnik tretje generacije, ki je bil nameščen v novih prostorih RRC ob Inštitutu Jožef Stefan, se je ponašal z napredno **večnivojsko pomnilniško ureditvijo** za hkratno poganjanje več programov [SLO-TECH.COM](#) . Sprva je bil celo **največji računalnik v Jugoslaviji** in širši regiji [SLO-TECH.COM](#) , a ga je čez nekaj mesecev prehitel UNIVAC 1006 v Sisaku, leta 1973 pa še večji **UNIVAC 1110** na Univerzi v Zagrebu [SLO-TECH.COM](#) . Kljub temu je Cyber 72 predstavljal ogromen korak naprej za slovensko računalništvo. Imel je **dve centralni procesorski enoti**, do **128 KB pomnilnika** in kar **10 diskovnih sistemov** že ob namestitvi [SLO-TECH.COM](#) . Tehtal je približno 5 ton in porabljal ogromno energije, a je omogočal stvari, prej neizvedljive v realnem času. Na RRC so nanj priključili 30 terminalov, ki so institucijam (ministrstvom, podjetjem, univerzi) omogočali oddaljeno uporabo sistema [SLO-TECH.COM](#) . Cyber 72 so intenzivno uporabljali za **statistične analize** (Zavod za statistiko je nanj poskušal postaviti modernizirano bazo podatkov), **znanstvene izračune** in prve poizkuse mrežnega povezovanja po državi [SLO-TECH.COM](#) .

Že kmalu so zmogljivosti Cyber 72 postale omejujoče za rastoče potrebe. Po več nadgradnjah je RRC leta 1976 naročil nov računalnik **CDC Cyber 172**, ki je v Slovenijo prispel leto kasneje

[SLO-TECH.COM](#) . Cyber 172 je imel tretjino večjo računsko moč kot predhodnik, čeprav je bila njegova centralna enota štirikrat manjša [SLO-TECH.COM](#) . S tem sta od 1977 naprej v RRC vzporedno delovala **dva superračunalnika (Cyber 72 in 172)**, kar je znatno povečalo razpoložljive zmogljivosti. Do sredine 80. let sta oba sistema skupaj služila številnim uporabnikom [SLO-TECH.COM](#) . V tem obdobju se je razširila uporaba računalnikov po drugih ustanovah: **Univerza v Ljubljani** je za lastne potrebe pridobila nekaj manjših računalnikov (npr. **IBM/360** in **PDP/11** za pedagoške namene [SLO-TECH.COM](#) ), **gospodarstvo** pa je začelo uvajati računalnike v proizvodnjo in poslovanje. Kljub širjenju manjših računalniških sistemov je osrednji RRC ostajal ključen za **najzahtevnejše izračune** v znanosti in državni upravi. V drugi polovici 70. let so slovenski računalničarji vzpostavili tudi prve **mednarodne povezave**: RRC je sodeloval z Univerzo v Bologni (kjer so imeli tri CDC računalnike) in poizkusil vzpostaviti linijo prek Univerze v Trstu [SLO-TECH.COM](#) . Čeprav celovito omrežje še ni zaživelo, so te povezave nakazale prihodnost – povezovanje velikih računalnikov v mreže za oddaljeni dostop.

V Jugoslaviji so se v 70. letih pojavili tudi drugi močni sistemi (npr. v Srbiji in na Hrvaškem), a Slovenija je z dvema CDC Cyber in dobro organizacijo ostajala na čelu. Ti **predračunalniški centri** so pomembno vplivali na razvoj informacijske družbe: v državni upravi so se začeli prvi centralizirani informacijski sistemi (npr. za financiranje in statistiko), v znanosti pa so postali

možni **kompleksni simulacijski izračuni** na področjih, kot so fizika, kemija in tehnika, ki prej zaradi omejene računske moči niso bili izvedljivi.

## Prelomno desetletje (1980–1990): od domače računalniške industrije do prvega superračunalnika

V 80. letih je svetovno superračunalništvo hitro napredovalo – podjetja, kot sta **Cray** in **IBM**, so redno predstavljala nove modele z večkratnikom zmogljivosti predhodnikov

[MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) . Jugoslavija takih sistemov zaradi visokih cen ni kupovala, so pa domači strokovnjaki iskali druge poti, da državo obdržijo v koraku z računalniško revolucijo. Klasični računski center RRC v Ljubljani se je v 80. letih postopoma umaknil v ozadje; stara CDC računalnika sta obratovala do sredine desetletja, nato pa je upravljanje nekaterih nalog prevzela modernejša oprema in decentralizirani sistemi. V tem času je svojo vlogo okrepila **slovenska računalniška industrija**. Podjetje **Iskra Delta**, nastalo z združitvijo Iskre in Delta Informatike, je postalo eno vodilnih računalniških podjetij v SFRJ [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) . Sprva je Iskra Delta sodelovala z ameriškim DEC in uvažala njihove mini računalnike (VAX) [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) , nato pa je v 80. letih razvila tudi lastne sisteme. Med njimi je bil znan **Triglav** (tudi imenovan *Trident*), modularni računalnik, ki je na trg prišel leta 1985 [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) . Triglav je omogočal konfiguracije z različnimi procesorji (od Intel 80286 do DEC J11) [JUREM.GITHUB.IO](#) , kar je bilo inovativno, čeprav sam po zmogljivosti ni sodil v razred superračunalnikov. Iskra Delta je sodelovala tudi v mednarodnem projektu **PARSYS** (Parallel Systems) in leta 1989 predstavila lastno vizijo paralelnega superračunalnika, ki bi povezoval 64 procesorjev DEC v skupen sistem [MONITOR.SI](#) . Ta pristop, čeprav tehnično nekoliko zastarel, kaže, da so slovenski inženirji že v osemdesetih razmišljali o **paralelnem računanju** in skušali najti nišo med drago vrhunsko tehnologijo in cenovno dostopnejšimi rešitvami [MONITOR.SI](#) .

Hkrati je potekal razvoj omrežij. V ZDA so v 80. letih nastali **superračunalniški centri NSFnet**, v Evropi pa so nacionalne akademske mreže (npr. EARN/BITNET) začele prehajati na internetne protokole

[SLO-TECH.COM](#) [SLO-TECH.COM](#) . Do leta 1988 je hrbtenica NSFnet povezovala 13 glavnih ameriških centrov pri 1,5 Mb/s, prva mednarodna vozlišča pa so povezala CERN in Kanado [SLO-TECH.COM](#) .

IBM je takrat financiral pet evropskih superračunalniških centrov z zmogljivimi računalniki **IBM 3090** (šest procesorjev, vektorski pospeševalniki) in s CERN povezal Evropo z NSFnet

[SLO-TECH.COM](#) [SLO-TECH.COM](#) . S tem so se ustvarili pogoji, da se tudi Jugoslavija priključi internetu. Leta 1990 je bilo ustanovljeno jugoslovansko akademsko omrežje **YUNAC**, Slovenija pa je v sklopu njega vzpostavila povezavo **48 kb/s proti Avstriji** in Evropi [ARNES.SPLET.ARNES.SI](#) . Tako so bila

ob koncu 80. let pripravljena tla, da Slovenija vstopi v dobo interneta in sodobnega superračunalništva.

Tik pred osamosvojitvijo je Slovenija pridobila še ključno okrepitev: **prvi pravi superračunalnik**. Ministrstvo za znanost in tehnologijo se je namreč kljub omejenim sredstvom odločilo investirati v vrhunsko opremo, saj je stara oprema iz RRC zastarala. Izbrali so rešitev podjetja **Convex**, ki je izdelovalo t. i. **mini superračunalnike** – ti so bili sicer 50× počasnejši od najzmogljivejših Crayev, a hkrati tudi do 20× zmogljivejši od največjih klasičnih mini računalnikov (DEC VAX)

[SLO-TECH.COM](#) [SLO-TECH.COM](#) . Januarja 1990 so na **Institutu "Jožef Stefan" (IJS)** v Ljubljani zagnali **Convex C220**, s čimer je Jugoslavija dobila svoj prvi superračunalnik v pravem pomenu besede [SLO-TECH.COM](#) . Convex C220 je imel **dva 64-bitna procesorja s taktom 25 MHz** in je dosegal do **100 MFLOPS**, ob tem pa je premogel 128 MB pomnilnika [SLO-TECH.COM](#) [SLO-TECH.COM](#) . Uradno je šlo za **najzmogljivejši računalnik v Jugoslaviji** in enega najhitrejših v takratni Vzhodni Evropi [MONITOR.SI](#) . Tehnično je podpiral vektorsko in deloma paralelno računanje, poganjal je Unix in imel vgrajen Ethernet, kar mu je omogočalo lahko povezovanje v omrežje [SLO-TECH.COM](#) [SLO-TECH.COM](#) . Convex C220 so na IJS vključili v obstoječe lokalno omrežje, kjer je povezoval množico delovnih postaj in mini računalnikov (npr. DEC VAX 8650 in MicroVAX II) [MONITOR.SI](#) . Novi superračunalnik je končno dal slovenskim raziskovalcem orodje primerljivo s tujino: začeli so reševati **zahtevne znanstvene izračune** s področij **teoretične in jedrske fizike, kvantne kemije, biokemije, hidrodinamike, meteorologije** in drugih disciplin [MONITOR.SI](#) . Uporabljali so ga tako raziskovalci na IJS (fiziki in kemiki) kot tudi z drugih inštitutov – npr. **Kemijski inštitut** ga je uporabljal za kemijske izračune, inženirji **Turboinštituta** pa za modeliranje delovanja turbin in podobne simulacije v strojništvu [MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) . S Convexom se je **Slovenija vključila v svetovno znanstveno sfero**: IJS je sodeloval s CERN-om, ki je posredoval programske knjižnice za nove superračunalnike Convex [SLO-TECH.COM](#) , ter z nemškim inštitutom MPI in švicarskim CERN-om v omrežju **EASInet**, kar je omogočilo tudi prvo internetno povezavo v Sloveniji že jeseni 1991 [MONITOR.SI](#) .

## Osamosvojitvev in širitev superračunalništva (1991–2000)

Po osamosvojitvi je Slovenija nadaljevala z ambicioznim razvojem superračunalniške infrastrukture. Konec leta 1991 je postalo jasno, da ljubljanski Convex C220 zaradi hitrega tehnološkega napredka že zastareva

[SLO-TECH.COM](#) . Postavilo se je vprašanje, ali naj majhna država vlaga v drage superračunalnike ali raje v širše dostopno omrežje in delovne postaje [MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) . Razprave so bile burne – nekateri so zagovarjali, da bi za ceno enega superračunalnika lahko financirali glavno



**optično hrbtenico internetnega omrežja** in kupili več deset delovnih postaj [MONITOR.SI](#)

[MONITOR.SI](#) . A po drugi strani so drugi opozarjali, da so za najtežje računske naloge superračunalniki nepogrešljivi, še posebej če so povezani v učinkovito mrežo uporabnikov [MONITOR.SI](#) [SLO-TECH.COM](#) . Ministrstvo za znanost se je odločilo za kompromis – izboljšati omrežje *in* nabaviti nove zmogljive računalnike. Tako so že leta 1992 financirali dva nova Convexova superračunalnika: enega za **Univerzo v Mariboru** in drugega za nadgradnjo opreme v Ljubljani [MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) . V Mariboru so v **Računalniškem centru Univerze v Mariboru (RCUM)** postavili mini superračunalnik **Convex C3220** – to je bil najmanjši iz serije, dvoprosesorski sistem s 128 MB pomnilnika, a zmogljivostno primerljiv s starejšim ljubljanskim Convexom [MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) . Uporabljali so ga predvsem na tehniških fakultetah mariborske univerze [MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) , s čimer je superračunalništvo prvič neposredno služilo tudi pedagoško-raziskovalnim procesom zunaj IJS.

Leta 1993 pa je novosti dočakal tudi Ljubljanski superračunalniški center: stari Convex C220 so nadgradili, poleg tega pa namestili čisto nov, **šest-prosesorski Convex C3860** z zmogljivostjo **1,5 GFLOPS**

[MONITOR.SI](#) . C3860 je uporabljal najnovejšo tehnologijo integriranih vezij iz galijevega arzenida in je podpiral do 4 GB pomnilnika [MONITOR.SI](#) [SLO-TECH.COM](#) . Ta računalnik ni bil pomemben le zaradi računske moči, temveč tudi zaradi vloge pri **uvajanju svetovnega spleta v Sloveniji**. Na Convexu 3860 so novembra 1993 na IJS postavili **prvi spletni strežnik v državi** [MONITOR.SI](#) . Kmalu so na njem gostovale prve domače spletne strani in nastal je **prvi spletni imenik Slovenije** (ijs.si/slo, kasneje znan kot Mat'Kurja) [MONITOR.SI](#) . To simbolizira prelomen trenutek, ko je infrastruktura superračunalnika omogočila tudi **informacijsko povezljivost** – internet – za širšo skupnost. Do leta 1994 so sledili zgledu še v Mariboru in na drugih institucijah, a pionirska vloga je pripadala prav superračunalniškemu centru IJS [MONITOR.SI](#) .

V drugi polovici 90. let so se temelji superračunalništva v Sloveniji razširili in utrdili. **Omrežje ARNES** je od 1992 povezovalo akademske ustanove in se hitro nadgrajevalo (pojavi so se prvi komercialni ponudniki interneta, kar je pospešilo razvoj internetnih povezav)

[MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#) . V tem času se je koncept superračunalništva premikal od dragih namenskih strojev k **gručenju številnih manjših računalnikov** (paralelni grozdi t.i. **Beowulf**). Tudi v Sloveniji so raziskovalne skupine začele sestavljati **računalniške gruče** iz strežnikov oziroma zmogljivih PC-jev, ki so ob ustrezni programski opremi lahko nadomestili del funkcij dragih superračunalnikov. Koncem 90. let se je Convex 3860 na IJS postopoma izrabil in prenehal z delovanjem (tudi zaradi pomanjkanja vzdrževanja in rezervnih delov) [SLO-TECH.COM](#) . A nadomestili so ga novi sistemi: IJS in univerze so pridobili močne **delovne postaje in strežnike** (npr. **SGI, IBM**), ki so bili povezani v lokalne mreže in služili za računsko intenzivne

naloge. **Kemijski inštitut** je vzpostavil lasten manjši superračunski oddelek za kvantno kemijo, **Fakulteta za strojništvo** v Ljubljani je začela graditi gruče za simulacije v mehaniki, **Agencija RS za okolje (ARSO)** pa je v sklopu modernizacije meteorologije dobila zmogljive strežnike za numerične napovedi vremena. Čeprav ti sistemi morda posamezno niso dosegali praga, da bi jih imenovali "superračunalnik" v globalnem smislu, so skupno predstavljali **porajajočo se superračunalniško okolje** v Sloveniji, razpršeno po različnih institucijah. Leta 1995 je Slovenija pristopila tudi k **CERN-ovim projektom** kot pridružena članica in slovenski fiziki so pri eksperimentih (npr. **DELPHI** na pospeševalniku LEP) začeli koristiti **mednarodne superračunalniške centre**, česar domača infrastruktura še ni mogla v celoti zagotoviti. Do preloma tisočletja je tako Slovenija uspešno prešla iz začetnega obdobja enega samega superračunalnika v **distribuirano okolje** več manjših visoko zmogljivih računalnikov, povezanih z vedno hitrejšim omrežjem.

## Vstop v 21. stoletje (2000–2010): mrežno in grid računalništvo

Prvo desetletje 21. stoletja je v Sloveniji zaznamoval prehod od klasičnih superračunalnikov k **grid infrastrukturi** in tesnejši povezavi z evropskim raziskovalnim prostorom. Leta 2001 se je Slovenija pridružila **projektu EGEE** (Enabling Grids for E-sciencE) kot del jugovzhodne Evrope, kar je pomenilo vzpostavitev prvih **grid vozlišč** – računalniških gruče, povezanih prek interneta, ki skupaj rešujejo velike probleme. Slovenski znanstveniki, zlasti fiziki in kemiki, so to izkoristili za sodelovanje v **globalnih računskih projektih**, kot so simulacije v fiziki delcev ali bioinformatiki, kjer je delo razdeljeno med tisoče računalnikov po svetu.

Poseben mejnik je bila **najdba Higgsovega bozona** okoli leta 2012, pri kateri je sodelovala tudi Slovenija: že od 2008 je ARNES podpiral prenos podatkov iz CERN-a

RACUNALNISKI-MUZEJ.SI, slovenska računsko računska gruča (predvsem v okviru IJS) pa je prispevala okrog **4 % skupne računske moči** za analizo trkov, ki so vodili do potrditve Higgsovega bozona

RACUNALNISKI-MUZEJ.SI. Ta dosežek ponazarja, kako so se slovenski računski viri – čeprav morda skromni v primerjavi z velikimi državami – prek mrežnega povezovanja učinkovito vključili v **svetovno znanost na najvišji ravni**.

Na nacionalni ravni je ARNES v tem obdobju močno nadgradil **akademsko omrežje**: leta 2007 se je Slovenija povezala v hrbtnico **GEANT2** z visoko hitrostjo, kar je omogočilo hitrejši prenos ogromnih količin podatkov med domačimi instituti in tujino. **Optična povezava** med glavnimi vozlišči (Ljubljana, Maribor, Koper, Nova Gorica) je raziskovalcem olajšala dostop do

oddaljenih superračunalnikov. Leta 2010 je bila uradno vzpostavljena **Nacionalna iniciativa za grid**

[RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](http://RACUNALNISKI-MUZEJ.SI) [RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](http://RACUNALNISKI-MUZEJ.SI), ki je združila obstoječe gruče v enoten sistem. Ta iniciativa je poenotila dostop do razpršenih virov: raziskovalci so preko enotnega portala lahko zaprosili za procesorski čas na različnih lokacijah, ne da bi jih skrbelo, kje stroj fizično stoji. Šlo je za zametek **nacionalnega superračunalniškega omrežja**, ki je demokratiziralo uporabo HPC – tudi manjše raziskovalne skupine in podjetja so lahko začele izkoriščati zmogljivosti, ki so bile nekoč rezervirane le za največje ustanove.

Pomembna prelomnica v integraciji Slovenije v evropsko HPC-skupnost je bila priključitev k konzorciju **PRACE** (Partnership for Advanced Computing in Europe). **Leta 2012** je Slovenija skupaj z Dansko in Izraelom postala polnopravna članica PRACE, s čimer je število držav članic naraslo na 24

[PRACE-RI.EU](http://PRACE-RI.EU). To je slovenskim raziskovalcem odprlo dostop do **največjih evropskih superračunalnikov** (t. i. Tier-0 centrov), kjer so lahko tekmovali za čas na petaflops strojih v Nemčiji, Italiji, Franciji itd. Članstvo v PRACE je tudi povečalo podporo EU razvoju domače HPC infrastrukture in znanja.

V tem obdobju se je začela prebujati tudi **zasebna iniciativa na področju HPC**. Podjetje **Arctur** iz Nove Gorice je v poznih 2000. letih prepoznalo tržno nišo – ponujati **superračunalništvo kot storitev** (HPC-as-a-service) za industrijo in manjše organizacije. Začeli so graditi lastne računalniške gruče, prilagojene simulacijam in analizi velikih podatkov. Do leta 2010 je Arctur postavil svoj prvi superračunalniški sistem (**Arctur-1**), ki je bil na voljo komercialnim uporabnikom, denimo za **3D upodabljanje, CAE simulacije in obdelavo velikih podatkov** v podjetjih, ki si lastnih superračunalnikov ne bi mogla privoščiti. Ta model HPC v oblaku je razširil uporabo superračunalništva tudi v **gospodarstvo izven klasičnih industrijskih velikanov**. Podjetja s področja razvojne inženirstva, recimo proizvajalci komponent, so lahko na daljavo najela simulacije aerodinamike, optimizacije proizvodnih procesov ali kompleksne analize podatkov, ne da bi vlagala v lastno strojno opremo.

## **Konsolidacija in novi akterji (2010–2020): nacionalno omrežje in zasebni HPC**

V desetletju 2010–2020 se je superračunalništvo v Sloveniji še bolj organizirano povežalo in okrepilo. **Leta 2018** je bila ustanovljena nacionalna superračunalniška mreža **SLING** (Slovenian National Supercomputing Network)

[RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#) . SLING je konzorcij, ki združuje vse glavne HPC-ponudnike v državi – od akademskih (IJS, univerze) do zasebnih (Arctur) in vladnih (ARSO) – z namenom koordinacije, skupnega nastopa in učinkovite razporeditve virov. Pod okriljem SLING so začeli načrtovati skupne projekte, deliti znanje in uporabnikom ponudili centraliziran dostop do različnih superračunalnikov v Sloveniji.

V tem obdobju so **univerze in raziskovalni inštituti** posodobili svojo opremo. Institut "Jožef Stefan" je sicer še vedno imel največ HPC-naprav v Sloveniji, vendar razpršenih po oddelkih (teoretična fizika, eksperimentalna fizika osnovnih delcev, reaktorska tehnika itd.) namesto enotnega centra

[SL.WIKIPEDIA.ORG](#) . Na **Univerzi v Ljubljani** je Fakulteta za strojništvo vzpostavila HPC-gručo (**HPCFS**), ki je z več vozlišči CPU in GPU dosegla skupno zmogljivost okrog 24 TFLOPS

[SL.WIKIPEDIA.ORG](#) . **Univerza v Mariboru** je v okviru RCUM razvila sistem **HPC CORE@UM** (cca 5 TFLOPS) za podporo tehničnim in naravoslovnim raziskavam [SL.WIKIPEDIA.ORG](#) . Pojavili so se tudi regionalni centri – npr. **Fakulteta za informacijske študije v Novem mestu** je pridobila superračunalnik **Rudolf** (13 TFLOPS) za potrebe podatkovnih znanosti [SL.WIKIPEDIA.ORG](#) . Tudi v industriji je HPC našel mesto: podjetje **Kolektor** je v sodelovanju s Turboinštitutom uporabljalo gruče IBM BladeCenter (skupno ~37 GFLOPS) za simulacije v energetiki in turbinskih tehnologijah [SL.WIKIPEDIA.ORG](#) . Agencija za okolje je za vedno zahtevnejše podnebne modele in vremenske napovedi nabavila sistem **SGI ICE X** (ocenjena zmogljivost ~20 TFLOPS) [SL.WIKIPEDIA.ORG](#) , s katerim lahko meteorologi izvajajo visokoločljive **numerične vremenske napovedi** in podnebne simulacije, pomembne za državo.

**Arctur** je v tem času svoj HPC močno nadgradil. Leta 2015/2016 so v sodelovanju s kitajskim proizvajalcem Sugon postavili novi superračunalnik **Arctur-2**, ki je začel delovati v začetku 2017

[EN.WIKIPEDIA.ORG](#) . Arctur-2 sestavlja **30 vozlišč** z dvojnimi **Intel Xeon E5-2690v4** procesorji (skupno 60 procesorjev oz. 840 jeder) in dodatnimi **GPU pospeševalniki** na osmih vozliščih (vsako od teh ima 4 NVIDIA Tesla M60 GPU) [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) . Posebnost Arctur-2 je tudi 8 vozlišč z **velikim pomnilnikom** (po 1 TB na vozlišče), kar omogoča analizo velikih podatkovnih nizov. Sistemska zmogljivost Arctur-2 dosega okoli **340 TFLOPS**, kar ga uvršča med najzmogljivejše zasebne superračunalnike v srednji Evropi. Arctur-2 je namenjen predvsem **industrijskim uporabnikom in raziskovalno-razvojnim projektom**. V sklopu evropskih pobud (denimo **Fortissimo**) so na njem tekale simulacije aerodinamike za podjetje **Pipistrel** (npr. optimizacija letalskih kril) [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) ter simulacije kontinuirnega litja jekla za metalurško podjetje [EN.WIKIPEDIA.ORG](#) . S tem je Arctur dokazal, da lahko HPC neposredno koristi **gospodarstvu**: od manjše **start-up scene** (s kompleksnimi analizami podatkov) do

tradicionalne industrije (z optimizacijo procesov), in to na komercialni osnovi. Do leta 2020 je Arctur 2 postal **največji superračunalnik v zasebni lasti v Sloveniji** [SL.WIKIPEDIA.ORG](#), ki s svojim kapacitetami odlično dopolnjuje akademske vire.

Na državni ravni so se v tem času krepili tudi **centri znanja**. Leta 2019 je Slovenija vstopila v novo evropsko partnerstvo **EuroHPC**, ki je načrtovalo izgradnjo vodilnih superračunalniških zmogljivosti na tleh Evrope. Že leto prej (2018) je ARNES koordiniral vzpostavitev **Nacionalnega kompetenčnega centra za superračunalništvo**, ki raziskovalcem in industriji nudi podporo pri uporabi HPC tehnologij

[RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#). Znanje o paralelnem programiranju, optimizaciji kode za mnogojedrne in GPU sisteme ter upravljanju velikih podatkov je tako postalo dostopnejše. V šolah in na univerzah so se pojavili izbirni predmeti s področja visokozmogljivega računalništva, nekateri študenti pa so se vključili v **mednarodne HPC tekmovanja (ISC Student Cluster Competition)**, kar kaže na rastočo generacijo HPC strokovnjakov. Vse to je Slovenijo pripravilo na naslednji veliki korak – vstop v petaflop dobo.

## Petaflop doba (2020–2024): superračunalnik Vega in naprej

Aprila 2021 je Slovenija doživela vrhunec svoje superračunalniške zgodovine z otvoritvijo superračunalnika **VEGA**. Superračunalnik Vega, poimenovan po znamenitem slovenskem matematiku Juriju Vegi, je bil postavljen v **Inštitutu informacijskih znanosti (IZUM)** v Mariboru kot del skupnega podjetja EuroHPC

[SL.WIKIPEDIA.ORG](#). Gre za **petaflopski** sistem, ki ga je integriralo podjetje Atos. Vega dosega stabilno zmogljivost **6,9 PFLOPS** (petaflops) in največjo teoretično **10,1 PFLOPS**, s čimer je ob zagonu sodil med najzmogljivejše superračunalnike v Evropi [SL.WIKIPEDIA.ORG](#). Sistem je bil sofinanciran iz evropskih sredstev in nacionalnega vložka IZUM, skupna vrednost investicije pa je znašala **17,2 milijona evrov** [SL.WIKIPEDIA.ORG](#) (v javnosti se omenja približno 20 milijonov evrov, odvisno od vštetih stroškov) [N1INFO.SI](#). Vega obsega preko **122.000 procesorskih jeder** [N1INFO.SI](#), povezanih z visoko-hitrostno mrežno povezavo in podprtih s hitrimi pomnilniškimi ter shrambnimi sistemi. V velikosti zaseda celo računalniško dvorano IZUM in za hlajenje ter napajanje koristi inovativne rešitve – med drugim je načrtovano, da se odpadna toplota superračunalnika uporabi za ogrevanje prostorov, elektrika pa deloma prihaja iz bližnje hidroelektrarne na Dravi [RTVSLO.SI](#) (projekt energetske učinkovitega podatkovnega centra v Mariboru [RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#)).

**Superračunalnik Vega** je prvi **vrhunski superračunalnik v Sloveniji po dveh desetletjih** premora na tem nivoju

Njegova simbolna teža je izjemna: Slovenija je postala ena redkih manjših držav gostiteljic superračunalnika te kategorije in se uvrstila na **svetovni zemljevid HPC**. Vega je del omrežja osmih evropskih petaflopskih sistemov EuroHPC SL.WIKIPEDIA.ORG, kar pomeni, da je na voljo tako domačim kot tujim raziskovalcem preko razpisov. V prvem letu delovanja so njegove zmogljivosti uporabili na mnogih področjih: **farmacevtska podjetja** in medicinske fakultete so na njem izvajale masovne preračune v iskanju novih zdravil (tudi v kontekstu pandemije COVID-19 za simulacije proteinov in molekulskih interakcij), **podnebni raziskovalci** so poganjali zahtevne modele podnebnih sprememb za območje Alp in Sredozemlja, **strojniki** so optimirali modele električnih vozil in pametnih omrežij, **računalničarji** pa trenirali **modele umetne inteligence** na neprimerljivo večjih podatkovnih nizih, kot je bilo doslej mogoče. Vega tako neposredno prispeva k vrhunskim objavam slovenskih znanstvenikov in krepi konkurenčnost gospodarstva – podjetja lahko v sodelovanju z razvojnimi institucijami testirajo prototipe in algoritme na infrastrukturi, ki je primerljiva z najboljšimi na svetu.

Slovenija ima sedaj celo paleto superračunalniških zmogljivosti: poleg Vege v Mariboru še specializirane HPC na univerzah in inštitutih ter komercialni Arctur-2. **ARSO** svoj HPC uporablja dnevno za **vremenske napovedi** in sezonske klimatske projekcije, kar vpliva na zaščito prebivalstva in gospodarstva (npr. opozorila pred vremenskimi ujmami temeljijo na teh izračunih). **Univerzitetne gruče** omogočajo študentom in raziskovalcem trening na lokalni ravni, preden gredo s projekti na Vegino nacionalno raven. Zagon Vege je sprožil tudi zanimanje drugih držav nekdanje Jugoslavije – v JV Evropi HPC zmogljivosti zaostajajo, zato se pojavljajo pobude, da bi Vega postala regionalno vozlišče. Tako denimo raziskovalci iz Srbije, Hrvaške, BiH in drugih partnerskih držav prek EuroHPC lahko zaprosijo za čas na Vegi, Slovenija pa si s tem krepi vlogo **tehnološkega središča regije**.

Do leta 2024 se superračunalništvo v Sloveniji odvija v smeri še tesnejše integracije z evropskimi trendi. V razpravi je morebitna nadgradnja oz. širitev sistema Vega ali postavitve novega **eksaskalnega** sistema v naslednjem desetletju, če bo EuroHPC to omogočil. Prav tako se krepijo **med-sektorski projekti**: HPC se povezuje z **umetno inteligenco (AI)** in **analitiko velikih podatkov** v skupne centre odličnosti. Primer je **ROBIN** (Robotski inženiring) in **P4** (Platforma za podnebne preračune), kjer HPC igrata ključno vlogo v aplikativnih raziskavah. HPC tehnologija pronica tudi v podjetja prek konceptov, kot je **digitalni dvojček** – recimo slovenska podjetja s podporo HPC simulirajo tovarne in izdelke v virtualnem okolju, kar povečuje učinkovitost in zmanjšuje stroške razvoja.

**Sklepno** lahko ugotovimo, da je slovensko superračunalništvo od skromnih začetkov z analogno napravo in enega skupnega mainframe-a preraslo v **večplastni ekosistem**. Ključni

dogodki, kot so bili namestitev CDC 3300 (1969), zagon Cyber 72 (1972), prihod prvega superračunalnika Convex (1990) in nazadnje Vega (2021), so zaznamovali prehode v zmogljivosti in dostopnosti. Vsak od teh mejnikov je imel širši vpliv: v 70. letih na **modernizacijo uprave in industrije**, v 90. letih na **razcvet znanosti in povezanost z internetom**, danes pa HPC neposredno vpliva na **konkurenčnost gospodarstva**, napredek **znanosti** ter celo na reševanje globalnih izzivov (podnebje, zdravje, energija). Slovenija je, čeprav majhna, uspela izkoristiti svojo **pionirsko prednost iz časov Jugoslavije**, ohraniti kontinuiteto znanja in infrastrukture ter se pravočasno vključiti v evropske pobude, tako da zdaj enakovredno sodeluje v **svetovni superračunalniški skupnosti**. Razvoj superračunalništva pri nas je torej zgodba o **viziji, vztrajnosti in sodelovanju** – od velikih soban z žarečimi cevkami do današnjih petaflopskih velikank, ki brnijo v podatkovnih centrih, a so dosegljive vsakemu radovednemu umu, ki potrebuje ogromno računsko moč za svoje ideje.

**Viri:** Podatki in zgodovinska dejstva temeljijo na več virih, med drugim na prispevkih Računalniškega muzeja

[SLO-TECH.COM](#) [SLO-TECH.COM](#), zgodovinskih člankih v reviji Monitor [MONITOR.SI](#) [MONITOR.SI](#), arhivih Arnes in Slo-Tech [SLO-TECH.COM](#) [RACUNALNISKI-MUZEJ.SI](#) ter poročilih medijev (N1, Večer) [N1INFO.SI](#). Vsi citati so označeni v besedilu.