

VLOGA IN POMEN ZNANSTVENO-TEHNOLOŠKE TRANSDISCIPLINARNOSTI PRI VREDNOTENJU RAZVOJNIH POTENCIALOV NOVIH NAPREDNIH TEHNOLOGIJ

Franc Mali

UVOD

Odgovora na vprašanje, kako je tehnološki napredek vplival na družbene spremembe, in obratno, kako je širše družbeno okolje vzpostavljalo pogoje za tehnološki napredek, ni mogoče iskati v poenostavljenih razlagah sočasnega kumulativnega in linearnega tehnološkega in družbenega razvoja. Že bežen pogled v zgodovino razvoja družb v zadnjih treh stoletjih, ko so nova znanstvena in tehnološka odkritja dobila izredno moč in so vplivala na družbene spremembe, razkriva, da ustvarjanje, širjenje in uporaba znanstveno-tehnoloških inovacij v širšem družbenem okolju nikoli niso bili enkratno dejanje, ki se pojavi čez noč in življenje ljudi dobesedno preobrne na glavo. Ravno nasprotno. Vpliv tehnologij na družbene spremembe je dolgoročen, kompleksen in tudi nepredvidljiv proces. Ni se namreč kar vsaka invencija enostavno pretvorila v inovacijo. Včasih je trajalo več desetletij, da so družbe prepoznale razvojne potenciale novih znanstveno-tehnoloških odkritij. Lahko pa do tega sploh ni prišlo.

Glede tega ni nič drugače v tretjem desetletju enaindvajsetega stoletja, ko se soočamo s pravo erupcijo na področju razvoja novih naprednih tehnologij, kot so umetna inteligenca, genomika in nanotehnologija. Gre za najbolj propulzivne tehnologije, ki v dobrem in slabem vplivajo na družbeno okolje, hkrati pa so z njim pogojene in omejene.

Ker nove napredne tehnologije niso od družbe izoliran pojav, ki bi bil potrjen samozadostni in linearni logiki razvoja, morajo biti zlasti v procesih, ki vodijo k njihovi komercializaciji in marketingu, predmet stalnega in kritičnega, na širših družbenih in etičnih kriterijih utemeljenega vrednotenja. Enako velja za vrednotenje tehnoloških tveganj. Ne gre toliko za vprašanje vrednotenja finančnih tveganj z vidika podpornikov tehnologij, ki prihajajo iz podjetniških ali političnih krogov, temveč gre za vprašanje, kaj nove tehnologije prinašajo za celotno družbo in tudi naravno okolje. Ne glede na različne teoretske opredelitve in razlage tudi najbolj znani instrument merjenja novih tehnologij TRL (ang.: technology readiness level) v praksi ni uspel preseči tehnokratskega in ozko marketinško usmerjenega vrednotenja razvojnega potenciala novih tehnologij. Pri ključnih akterjih znanstvene in tehnološke politike je

še vedno premalo zavedanja, da je vsak tehnološki razvoj kot starogrški bog Janus z dvema obrazoma: lahko veliko prispeva k dobrobiti današnjih družb, lahko pa pomeni tudi veliko družbeno tveganje.

V izhodišče prispevka postavljam tezo, da bi (teoretski) modeli tehnološke konvergenca in s tem povezane ideje znanstvene transdisciplinarnosti, ki so se z velikimi pričakovanji pojavili na prizorišču raziskovalnih in inovacijskih politik na začetku tega stoletja, lahko bili ustrezna platforma za preseganje ozko tehnokratskih in marketinških usmeritev TRL. Žal se to ni zgodilo, ko se je TRL v evropskem prostoru začel uporabljati kot metodologija za merjenje zrelosti tehnologije. To se ravno tako ne dogaja danes, skoraj petnajst let po uvedbi TRL. Eden izmed zaviralnih dejavnikov je pretirana vpetost znanosti, tehnologije in ekonomije v tradicionalne modele inovacij. Ti izhajajo iz procesov produkcije in vrednotenja na temelju tržne učinkovitosti posameznih tehnologij, ne zmorejo pa ovrednotiti na celostnejši način vseh znanstvenih, tehnoloških in širših družbenih potencialov, ki prispevajo oziroma bi lahko prispevali k blagostanju človeštva. V prispevku zavzemam stališče, da je paradigmatški »premik« v tej smeri mogoč le ob čim produktivnejšem sodelovanju vseh znanstvenih disciplin, in sicer ne toliko v smislu *ex post* interdisciplinarnega povezovanja, ki poteka v sferi akademske znanosti, temveč *ex ante* integriranja vseh vrst vedenja z namenom reševanja praktičnih problemov. Tako bo tudi lažje uveljaviti premik od »pripravljenosti tehnologije« k »tehnološki pripravljenosti«, o kateri govori akademik Slavko Splichal v *Izhodiščih za SAZU-jev posvet Od tržne konkurenčnosti tehnologije k družbeni tehnološki zrelosti* (Splichal 2024). Ta premik je ključen, kolikor naj tehnološki razvoj predstavlja osnovo za trajnostni družbeni razvoj, socialno pravičnost, družbeno blaginjo ter etično občutljivost posledic razvoja novih in naprednih tehnologij.

V drugem delu prispevka se ukvarjam z vprašanjem, zakaj se je treba v okviru razvoja tehnologije generativne umetne inteligence in tehnologije preoblikovanja človekovega genoma, ki sta danes najnaprednejši novi tehnologiji, soočiti z njuni širšimi družbenimi posledicami. Brez tega soočanja ni mogoče izvajati rekonceptualizacije obstoječega TRL v smeri njegove večje senzibilnosti za današnje ključne družbene in etične probleme. V zaključku podajam kritično oceno, da se Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in inovacije Republike Slovenije, ki sicer želi prevzeti eno ključnih vlog v institucionalni podpori in spodbujanju inovativnosti pri nas, še vedno premalo ukvarja z vprašanjem, kako posodobiti koncept TRL.

KONVERGENTNI RAZVOJ NOVIH NAPREDNIH TEHNOLOGIJ IN ZNANSTVENA TRANSDISCIPLINARNOST

Ko govorimo v okviru raziskovalno-razvojne politike o kategorijah, kot so »tehnološka konvergenca« ali »znanstvena transdisciplinarnost«, se je treba zavedati, da se obe kategoriji medsebojno tesno prepletata. Če govorimo o nastopu današnje transdisciplinarne znanosti, se, kolikor nas zanima njena aplikativna dimenzija, nujno najdemo tudi pri problemu tehnološke konvergenca. In nasprotno, če v izhodišče postavimo vprašanje tehnološke konvergenca, se pri pojasnjevanju njenih bistvenih značilnosti ne moremo izogniti transdisciplinarnosti. V obeh primerih gre za sinergijo med različnimi segmenti znanstvenega in tehnološkega vedenja, ki v medsebojni

povezanosti, ne pa vsak zase, izjemno hitro napredujejo. Konvergentni tehnološki razvoj je pomemben, ker ukinja tradicionalne disciplinarne meje v znanstvenih komunikacijah in spodbuja ne le horizontalne (znotraj akademskega sveta), ampak tudi vertikalne oblike sodelovanja znanstvenikov (v smeri od temeljne k uporabni znanosti in razvoju).

Ameriški teoretik znanosti in ekonomist Rogers Hollingsworth, ki se je ukvarjal z vlogo novih naprednih tehnologij pri ekonomskem razvoju, je še posebej izpostavil, da so napredne tehnologije v prvem desetletju tega stoletja dokončno prešle v fazo razvoja, ki zahteva vzpostavitev močnega skupnega znanstveno-tehnološkega jedra, sestavljenega iz skupnih teoretičnih okvirjev ter skupnega nabora modelov in mehanizmov, ki združujejo širok spekter področij, na katera se nanašajo različne znanstvene discipline in tehnološka področja (Hollingsworth 2011). Medtem ko so se v preteklem stoletju odvijale majhne konvergence v znanstvenem in tehnološkem razvoju, sodobne, na transdisciplinarnem znanstvenem vedenju utemeljene tehnološke konvergence radikalno spreminjajo značaj moderne znanosti in tehnologije. Na začetku leta 2000 se je v okviru razvoja konvergentnih tehnologij veliko stavilo na povezovanje na nanoravni, ko so se tipični pojavi v materialnih nanostrukturah začeli obravnavati kot osnove v bioloških sistemih, nanoprodukciji, komunikacijah in strojnem učenju. Ti procesi spajanja različnih področij vedenja na nanoravni so se v naslednjih dveh desetletjih samo še okrepili. Gradnja sistemov na ravni nanometerskih enot namreč zahteva kombinirano uporabo specifičnih mikrofizikalnih zakonov, bioloških načel, informacijske tehnologije in sistemske integracije. Prizadevanje za združitev tehnologije kvantnega računalništva z umetno inteligenco bo na primer odprlo prostor kompleksnim analizam velikih podatkovnih zbirk. Ravno dvig računalniških kapacitet je ključni steber nadaljnega napredka umetne inteligence.

Iste procese lahko zaznamo v zadnjem desetletju tudi na področju biotehnologije. Razvoj biotehnologije gre vedno bolj v smer celovitih tehnoloških platform, ki ustvarjajo izjemno diferencirano, vendar tesno prepleteno verigo novih inovacij. Med sabo ločeni različni industrijski sektorji, ki dandanes sledijo vsak svojemu cilju, težijo k vedno večjemu poenotenju okrog novih tehnologij, zlasti okrog sintezne biologije in umetne inteligence. Poenotenost na skupnih platformah si lahko predstavljamo na naslednji način: podobno kot so računalniki postali univerzalni stroji, potem ko so znanstveniki razvili ustrezne programe in algoritme, ki simulirajo delovanje vsakega drugega stroja, se tudi biološki organizmi spreminjajo v univerzalne producente, in sicer tako, da lahko z ustreznimi spremembami svojih genskih programiranj ustvarijo praktično katerikoli zamišljeni produkt (Mali 2015, 2024).

Tovrstni trendi znanstvenega in tehnološkega povezovanja so včasih povezani s pretiranimi prihodnjimi pričakovanji (npr. spekulacije o doseganju t. i. točke singularnosti), vseeno pa nazorno prikazujejo osnovno smer razvoja tudi na področju temeljne znanosti. Tu ideja znanstvene transdisciplinarnosti, ki se je začela pojavljati pred konceptom tehnološke konvergence, nekako v 90. letih prejšnjega stoletja, predpostavlja najvišjo stopnjo znanstvenega in zunajznanstvenega povezovanja. Medtem ko se je izvorni pomen transdisciplinarnosti pred letom 1990 sporadično uporabljala za opis skupnih predpostavk, ki naj bi prispevale k sintezi znanstvenega vedenja in naj bi presegle ozke disciplinarne meje, se v tem najnovejšem razumevanju nanaša

predvsem na reševanje praktičnih problemov zunaj ozkega akademskega polja, saj ti zaradi kompleksne narave ne morejo ostati v domeni ozkih disciplinarnih pristopov. Medtem ko gre v okviru interdisciplinarne znanosti za povezovanje teoretskih in metodoloških okvirjev posameznih znanstvenih disciplin znotraj akademske sfere, transdisciplinarnost razširja, neodvisno od kakršnekoli zavezanosti teorijam in metodam znotraj znanstvenih disciplin, obseg svojega vedenja ravno z namenom celostnega reševanja kompleksnih problemov v praksi. V zadnjem desetletju in pol se je natančneje razmejevanje med kategorijami transdisciplinarnosti in interdisciplinarnosti uveljavilo tudi v okviru OECD (OECD 2020).

ODSOTNOST IDEJE TEHNOLOŠKE KONVERGENCE IN ZNANSTVENE TRANSDISCIPLINARNOSTI V EVROPSKEM KONCEPTU TRL

Koncept konvergentnega tehnološkega razvoja je dobil večjo relevantnost v okviru bolj praktično naravnanih razprav o raziskovalno-razvojih in inovacijskih politikah v začetnih letih tega stoletja, in sicer najprej v ZDA. Mihail C. Roco, ki deluje na področju nanotehnologije, in William Sims Bainbridge s področja sociologije sta leta 2002 pod okriljem NSF pripravila obsežno poročilo z naslovom »*Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations – Converging Technologies in Society*«. To je bilo nekaj let pozneje izdano kot monografija pri založbi Springer (Bainbridge in Roco 2006). Kot je razvidno že iz naslova njune monografije, sta oba v sodelovanju z drugimi znanstveniki največ pozornosti namenila procesom spajanja štirih najnaprednejših tehnologij, to je nanotehnologije, biotehnologije, informacijske tehnologije in tehnologije, ki se ukvarja s kognitivnimi procesi v človeških možganih.

Skoraj sočasno se je tudi v strokovnih krogih, ki se ukvarjajo z raziskovalno-razvojno in inovacijsko politiko v EU, začela razprava o kognitivnih in družbenih vidikih razvoja konvergentnih tehnologij. Tu se je, v nasprotju z razpravami v ZDA, manj razpravljalo o viziji krepitev človekovih zmožnosti, ki je pomaknjena bolj v oddaljeno prihodnost, bolj pa je bil v ospredju premislek o takojšnji uporabi konvergentnih tehnologij pri reševanju perečih družbenih problemov. Z nekoliko poenostavitve bi lahko dejali, da je bil ameriški koncept tehnološke konvergenke vezan bolj na notranje tehnološke impulze, evropski koncept pa je ob teh notranjih tehnoloških impulzih v večji meri upošteval tudi družbeni vidik tehnološkega razvoja. Koncept konvergentnih tehnologij, ki se je oblikoval v okviru EU, se torej ni ukvarjal toliko z vprašanjem krepitev človekovih zmožnosti, temveč je izpostavil družbeno dimenzijo razvoja novih naprednih tehnologij, ki je vključevala trajnostni razvoj, socialno vključenost in izboljšano kakovost življenja. Večji pomen je bil pripisan tudi družbenim, etičnim in pravnim implikacijam razvoja teh novih naprednih tehnologij, ki so svoj inovacijski potencial začele pridobivati na podlagi vzajemnega spoja. Ta specifična evropska »filozofija« koncepta konvergentnih tehnologij je bila vključena tudi v poročilo »*Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies*« (Nordman 2004), ki ga je skupina ekspertov pripravila za Evropsko komisijo. Omenjeno delo je predstavljalo najcelostnejši pogled EU na vprašanje prihodnjega razvoja konvergentnih tehnologij. Evropski eksperti so se v tem poročilu ukvarjali predvsem z vprašanjem, kako na podlagi že ustvarjenih inovacij, do katerih je že prišlo z razvojem

konvergentnih tehnologij, doseči najboljše rešitve za evropsko družbo, ob striktnem upoštevanju etičnih načel. Med drugim so zapisali (Nordman 2004, 4),

da pri strategiji razvoja konvergentnih tehnologij za evropsko družbo znanja ne gre za proces, ki poteka od zgoraj navzdol, temveč za avtonomni proces ustvarjalnega tehnološkega razvoja na osnovi t. i. postopne širitve konvergenčnih krogov, ki je rezultat delovanja vseh delov znanosti in tehnologije, vključno z družboslovjem in s humanistiko. Ravno zaradi tega se k etičnim, pravnim in družbenim vprašanjem, ki jih sproža razvoj konvergentnih tehnologij, ne pristopa od zunaj in za nazaj, temveč vedno kot k nečemu, kar predstavlja inherentni del razvoja teh tehnologij.

Poročilo EU je torej v ospredje postavljalo nujnost ustvarjanja inovacijskih potencialov v družbi, ki temelji na sinergiji vzajemnega delovanja vseh znanosti in vseh tehnologij, ob upoštevanju vseh temeljnih etičnih načel. Še več, z vidika razvoja evropske družbe v smeri bolj inovativne družbe se je ta model razvoja konvergentnih tehnologij izpostavljal kot vzorčni primer za spopadanje evropske družbe z izzivi 21. stoletja. Zato je bilo tudi v političnih krogih prisotno veliko pričakovanje, da se bodo ob spremembi v smeri večje konvergence novih naprednih tehnologij v državah članicah EU zgodile relativno hitre institucionalne spremembe.

Nič od teh pričakovanj se ni uresničilo. Koncept razvoja konvergentnih tehnologij, ki je nastal v strokovnih gremijih EU na začetku 21. stoletja, ni pomembneje vplival na raziskovalno-razvojno in inovacijsko politiko v letih, ki so sledila, torej tudi ni vplival na oblikovanje TRL. Ko je Evropska komisija leta 2010 ustanovila še eno izmed številnih ekspertnih komisij po imenu High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies (HLG KET), ki je pripravila poročilo o rabi TRL in predlagala njegovo vključitev v Obzorje 2020 (Horizon 2020), tj. 8. okvirni program EU (European Commission 2011), o konceptu konvergentnih tehnologij ni bilo več govora. V poročilu je bila celotna pozornost namenjena zgolj vprašanju, kako opredeliti mejo med različnimi organizacijskimi in finančnimi vidiki tehnološkega razvoja, »/.../ s ciljem doseganja čim večjih tržnih učinkov« (Héder 2017, 8). Evropski model TRL je bil oprt na devet zaporednih stopenj, ki naj bi pokazale, kako je neka tehnologija že od začetka pripravljena za uporabo v okolju, h kateremu je usmerjena. V tabeli 1 v strnjeni obliki predstavljamo devet stopenj TRL.

Tabela 1: TRL v 8. Okvirnem programu EU Obzorje 2020

TRL	OP EU Obzorje 2020
1	Upoštevanje osnovnih načel
2	Oblikovan tehnološki koncept
3	Eksperimentalni dokaz koncepta
4	Tehnologija, potrjena v laboratoriju
5	Tehnologija, potrjena v ustreznem okolju
6	Tehnologija, prikazana v ustreznem okolju
7	Predstavitev prototipa sistema v delovnem okolju
8	Sistem dokončan in kvalificiran
9	Dejanski sistem, preizkušen v delovnem okolju

LINEARNI MODELI INOVACIJ KOT OSNOVA ZA OZEK TEHNOKRATSKI IN MARKETINŠKI PRISTOP K TRL

Na tehnokratsko in marketinško razumevanje evropskega modela TRL, ki ga predstavlja tabela 1, opozarja med drugim tudi Splichal v *Izhodiščih za SAZU-jev posvet Od tržne konkurenčnosti tehnologije k družbeni tehnološki zrelosti*. Splichal (2024) ugotavlja, da je v okviru pristopa EU bila pot od TRL 1 do TRL 9 predstavljena kot linearno napredovanje od ideje do trga, s čimer se je pojem tehnologije zreduciral na proizvodne artikle, ki jih je mogoče monetizirati na trgu.

Eden izmed ključnih razlogov za odsotnost koncepta konvergentnih tehnologij v evropskem modelu TRL je še vedno nekritično sprejemanje predstave, da inovacije potekajo po linearni poti. Četudi se v današnjih pogojih razvoja novih naprednih tehnologij taki linearni inovacijski modeli izkazujejo kot anahronizem, so še vedno navzoči v glavah številnih akterjev, ki imajo odločilo besedo na področju raziskovalno-razvojne in inovacijske politike.

Za Josepha Schumpetra, ki je opravil pionirsko delo na področju teoretskega in praktičnega preučevanja inovacij, so bile inovacije kot oblika »kreativne destrukcije« motor družbenega in ekonomskega razvoja (Schumpeter 1934/2008). Zato Schumpetra ni mogoče imeti za zagovornika ozkega tehnokratskega pogleda, ki izhaja iz linearnega inovacijskega modela. Prej nasprotno. Schumpeter je pripisoval relevantnost tako tehnološkim kot socialnim inovacijam, saj naj bi obe obliki predstavljali ključni dejavniki družbenega in ekonomskega razvoja. Četudi je postavljaj jasno mejo med njima, kar zadeva namene in cilje, saj so tehnološke inovacije usmerjene k ustvarjanju novih proizvodov in storitev, socialne inovacije pa k neposrednemu spreminjanju družbenih praks, to ne pomeni, da niso tako ene kot druge usmerjene k stalnemu preoblikovanju družbenih struktur in procesov.

Začetki linearnega modela inovacij, najprej v krogu akterjev znanstvene in tehnološke politike v ZDA, pozneje tudi v znanstvenih in tehnoloških politikah vseh drugih razvitih ekonomij v svetu, segajo v obdobje takoj po drugi svetovni vojni. Zagovorniki linearnih inovacijskih modelov so vzore iskali v takrat ravno končanem projektu Manhattan, ki je bil med drugo svetovno vojno vojaški raziskovalni projekt. Ameriški znanstvenik in politik Vannevar Bush je v delu »*Science: The Endless Frontier*« (Bush 1945/1960), ki je izšlo takoj po drugi svetovni vojni, zastopal stališče, da pretok znanstvenih idej v prakso poteka enosmerno in hierarhično od bazičnega raziskovanja (invencija), prek aplikativnega (reševanje specifičnih praktičnih problemov) in razvojnega raziskovanja (prototip) k proizvodnji in h komercializaciji končnih proizvodov. Zdi se, da ima ta shema linearnega inovacijskega modela, kljub vsem spremembam, ki so se zgodile na področju znanstveno-tehnološkega razvoja v naslednjih sedemdesetih letih, tudi še danes veliko zagovornikov.

V pogojih današnjega razvoja novih naprednih tehnologij ni mogoče več pristajati na zastarele linearne inovacijske modele. Inovacijski procesi potekajo danes na osnovi cikličnih in rekurzivnih tokov. Tu ne gre več, tako kot v linearnih inovacijskih modelih, za enosmerni in hierarhični tok od invencij k inovacijam, temveč gre za vsakokratno prepletenost in součinkovanje najrazličnejših dejavnikov. V verižnih (»*chain-link*«) inovacijskih modelih na primer temeljna znanstvena spoznanja (invencije)

ne odigrajo svoje vloge samo v začetnih oziroma vstopnih fazah, temveč vzdolž celotne inovacijske verige (Suarez-Villa 2009; Kline in Rosenberg 1986).

Z vidika bolj odprtega in netehnokratskega pristopa k TRL je »filozofija« verižnih modelov inovacij relevantna, ker poudarja, da brez fleksibilnih in medsebojno povezanih povezav, kjer imajo v procesih inovacij vlogo tudi povratne zanke, ni mogoče razvijati inovativnih proizvodov. Če izhajamo iz verižnih modelov inovacij, bo znotraj lestvice TRL nekaj povsem samoumevnega, da se iz faze 7 ponovno vrnemo v faze 4, 3 ali celo 2, kolikor sploh želimo ponovno napraviti korak naprej, to je v fazo 8. Podobno velja, da če imamo inovativni tehnološki produkt za celoto posameznih delov, posamezni sestavni deli napredujejo z različnimi hitrostmi po predlagani lestvici TRL.

Ni se mogoče izogniti vtisu, da se v evropskem prostoru lestvica TRL namesto za realni opis kompleksnih inovacijskih procesov uporablja bolj kot instrument, ki naj bi omogočal akterjem raziskovalno-razvojne in inovacijske politike priti do ocen finančnih stroškov, ki jih vlagajo v inovacijsko aktivnost. V tem oziru celo obstoječe mednarodne statistične standardizacije merjenja inovativne aktivnosti, kolikor se opirajo na zastarele tipe klasifikacij, niso v veliko pomoč. Kot primer bi lahko vzeli precej tega klasifikacijo treh dimenzij raziskovalno-razvojne dejavnosti (temeljne, aplikativne, razvojne), ki jo vsebuje priročnik Frascati in ki glede na današnji razvoj novih naprednih tehnologij uporablja precej neživiljenjska navodila za ločevanje raziskovanja in razvoja od proizvodnje (Frascati Manual 2015). V tem duhu izzvenijo tudi kritična opažanja Mihályja Héderja, ki svojo analizo evropskega modela TRL zaključuje z oceno, da ta ni v ničemer presegel »filozofije« linearnosti, edino, kar je storil, je, »/.../ da je s svojimi natančneje opredeljenimi merskimi lestvicami nadomestil splošnejše kategorije, ki so bile pred tem v uporabi« (Héder 2017, 21).

Posamezni kritiki linearne logike mišljenja, ki je prisotna v merskih lestvicah TRL, opozarjajo na še eno pomanjkljivost. Ta naj bi se nanašala na nezmožnost TRL, da spremlja razvoj najnaprednejših tehnologij, ki so izjemno kompleksne in hkrati tehnologije, ki se razvijajo zelo hitro. V merskih lestvicah TRL naj bi tako manjkala opredelitev kategorije »tehnološko zastaranje« (Olechowski, Eppinger in Joglekar 2015, 7). Tehnološko zastaranje se lahko zgodi, še preden tehnologija preide vse inovacijske faze, ki so opredeljene v okviru evropskega modela TRL. Tehnološko zastaranje se tako nanaša na situacijo, ko postane tehnologija na nek način neuporabna, ker se je sočasno razvila boljša tehnološka alternativa. Evropska merska lestvica TRL je bila zasnovana pod vplivom instrumentov, ki so bili vezani na vesoljski program Nase. To povzroča težave. Posebnost vesoljskih tehnologij namreč je, da je vesolje, v katerem te tehnologije delujejo, relativno stabilno okolje. V nasprotju s to tehnologijo najnovejše tehnologije generativne umetne inteligence delujejo v dinamičnih kompleksnih virtualnih okoljih. Situacija je tu drugačna. Lahko se zgodi, da neka tehnologija, ki je zdaj na vrhu razvoja, zastara prej, kot preide vse faze TRL. Če se po Moorovem zakonu (leta 1965 ga je formuliral Gordon Moore) zmožljivost računalniške opreme podvaja na vsaki dve leti, »svetlobne« hitrosti sprememb na področju razvoja najnovejše generativne umetne inteligence očitno ne moremo pojasnjevati več z Moorovim zakonom.

Za preseganje tehnokratskega linearnega modela TRL ne zadostujejo dodatne stopnje, kot je na primer stopnja organizacijske zrelosti itd. Izvirna definicija TRL v okviru Nase je predpostavljala sedem stopenj. Faza 1 se je nanašala na oblikovanje

novega koncepta, faza 7 pa na uspešno demonstriranje inovacije. Iz tabele 1 je razvidno, da se je v EU model TRL povečal na devet stopenj. Tudi večina drugih pristopov drugje po svetu se danes opira v glavnem na devetstopenjski model TRL (Voltan et al. 2024). Ne nazadnje je bil eden izmed razlogov za uvajanje in širjenje TRL za namene raziskovalno-razvojne in inovacijske politike tudi prizadevanje, da se doseže standardizacija, ki bo omogočala eksaktnije in enotnejše razprave o tehnični zrelosti različnih vrst tehnologij.

Pod vplivom kritik, da je model TRL v osnovi preveč tehnokratsko zasnovan, pogosto naletimo na predloge, da se število stopenj poveča z devetih na deset, enajst ali več. So pa ti predlogi odvisni tudi od dejstva, s katero vrsto tehnologije imamo opravka. Na primer, Medvladni panel za podnebne spremembe (IPCC 2022) je začel uporabljati enajststopenjsko lestvico. Večje število stopenj za spremljanje zrelosti posamezne tehnologije se v omenjeni mednarodni organizaciji utemeljuje z dejstvom, da inovativne tehnologije, ki so vezane na uporabo nizkoogljične energije, potrebujejo zlasti v fazi pilotskih preizkusov in poznejše morebitne serijske proizvodnje bolj diferenciran pristop. Še bolj diferenciran pristop v okviru evropskega modela TRL zahtevajo avtorji prispevka »*Technology Readiness Revisited: A Proposal for Extending the Scope of Impact Assessment of European Public Services*« (Bruno et al. 2020), ki se ukvarjajo z vprašanjem zrelosti tehnologij na področju javnega sektorja. Predlagajo, da v evropski model TRL vključimo vsaj tri dodatne stopnje, tj. stopnjo družbene pripravljenosti, stopnjo organizacijske pripravljenosti in stopnjo pripravljenosti z vidika pravnih ureditev. Tri nove stopnje naj bi bile še posebej relevantne v delovanju javnega sektorja. Avtorji tega predloga menijo, da mora biti glavni cilj uporabe TRL v javnem sektorju doseganje čim zanesljivejših tehnologij. Ta cilj pa naj bi bil uresničljiv edinole, kolikor je z novimi tehnologijami podprt javni servis namenjen ljudem (stopnja družbene pripravljenosti), ne povzroča motenj v delovanju javnega servisa (stopnja organizacijske pripravljenosti) in na področju pravnih regulacij zna braniti javni interes pred partikularnimi zasebnimi interesi (stopnja pravne pripravljenosti).

Ne glede na različna strokovna in institucionalna prizadevanja po fleksibilnejši interpretaciji in uporabi TRL se zdi, da gre tu še vedno bolj za parcialne poskuse narediti celotni model manj tehnokratsko in manj marketinško ter bolj socialno in ekološko naravnano. V celoti gledano se TRL primarno še vedno uporablja predvsem kot orodje za spremljanje finančnih tveganj vlagateljev finančnih sredstev v posamezno tehnološko inovacijo. Manj pozornosti pa se namenja spremljanju zrelosti tehnologij v luči širših družbenih, ekoloških in etičnih dilem ter vprašanj, ki jih prinaša razvoj novih naprednih tehnologij. To vprašanje podrobneje obravnavam tudi v naslednjem razdelku.

POTREBA PO REKONCEPTUALIZACIJI TRL V LUČI DANAŠNJIH TVEGANJ, KI JIH PRINAŠA RAZVOJ NOVIH NAPREDNIH TEHNOLOGIJ

Razvoj novih najnaprednejših tehnologij ne prispeva samo k dobrobiti človeštva, temveč s sabo prinaša vrsto nepredvidljivih tveganj. Na začetku 20. stoletja je bilo prevladujoče nelagodje in obžalovanje v družbi, da človeštvo še vedno nima zadostnega vedenja, da bi si podredilo naravo. Danes, v tretjem desetletju 21. stoletja, je sodobna družba pred povsem drugačnim izzivom, vendar ne toliko pred po-

manjkanjem vedenja o naravi, temveč bolj pred pomanjkanjem vedenja o tveganjih čezmernega podrejanja narave.

Zelo pomembno je, da se družboslovje in humanistika v čim večji meri vključita v razprave o vseh etičnih vidikih nadaljnjega razvoja novih naprednih tehnologij. Četudi si včasih pogledi o tem, kdaj naj se »mehko«¹ vedenje vključi v razpravo o tveganjih tehnološkega razvoja in s tem povezanih etičnih vprašanj, nasprotujejo, namreč, ali bolj v fazi *ex post* ali bolj v fazi *ex ante* ocenjevanja tehnologij, je najbrž ključnega pomena, da se to vedenje sploh začne dejansko upoštevati. Skratka, da to vedenje postane imanentni del razvoja novih naprednih tehnologij. Včasih se zdi nenavadno, da so ravno v primeru velikih znanstveno-tehnoloških projektov pobude za enakopravno obravnavo vseh področij znanosti prišle s strani raziskovalcev, ki po svojem znanstvenem pedigreju niso bili družboslovci ali humanisti. Lep primer je veliki projekt raziskovanja človeškega genoma (*»Human Genome Project«*), ki je koncem devetdesetih let prejšnjega stoletja združil raziskovalne sile iz različnih držav sveta. Vodja tega megatransnacionalnega projekta je bil James Watson, eden od odkriteljev zgradbe DNK in Nobelov nagrajenec. James Watson je ob prevzemu vodenja omenjenega projekta zahteval, da se del ogromnega proračuna, ki je bil namenjen raziskovanju človeškega genoma, takoj nameni tudi preučevanju njegovih družbenih in etičnih vidikov.

Sodobne družbe so družbe tveganj. Na ta vidik so v svojih delih opozarjali vsi vodilni sociologi 20. stoletja, kot so Ulrich Beck (Beck 1992), Anthony Giddens (Giddens 1991) in Niklas Luhmann (Luhmann 1991). Izhajali so iz razlike med kategorijo nevarnosti, ki je bila značilna za tradicionalne družbe, in kategorijo tveganja, ki je rezultat delovanja sodobnih družb. Medtem ko so bile v tradicionalnih družbah nevarnosti povezane s preteklostjo in z izgubo vere v trdne strukture, je tveganje danes povezano s procesi družbene modernizacije. Ulrich Beck, Anthony Giddens in Niklas Luhmann govorijo o onnipotentnosti tveganj v sodobnih družbah. Če sledimo njihovim spoznanjem, tudi lažje razumemo, zakaj ravno razvoj novih naprednih tehnologij danes predstavlja eno najbolj nepredvidljivih tveganj. Zgodovina znanosti in tehnologije sicer ponuja številne primere, da je znanstveno-tehnološki razvoj že od nekdaj vzbujal številne strahove v družbi. Vzroki za te strahove so bili raznovrstni in jih je mogoče iskati že v predindustrijski dobi. Prišlo je celo do popolnega odklanjanja znanstvenega in tehnološkega razvoja, ki se je v posameznih primerih sprevrglo celo v skrajno obliko tehnofobije. Taki primeri iz preteklosti, ki so v zvezi z znanostjo in s tehnologijo izpostavljali najnevarnejše distopije, nas v ničemer ne odvezujejo od tega, da se kritično soočamo s tveganji, ki jih prinaša današnji razvoj novih naprednih tehnologij. Danes smo namreč v izjemno razburljivem obdobju znanstveno-tehnološkega razvoja. Prvič v zgodovini je tisto, kar je bilo do zdaj obravnavano kot esenca človeka, postalo predmet neposrednih manipulacij znanosti in tehnologije.

V zadnjem času zlasti razvoj na področju tehnologije generativne umetne inteligence in tehnologije preoblikovanja človeškega genoma poraja vedno več strahov v družbi in hkrati vprašanj o tem, ali niso tveganja z vsakim korakom njihovega razvoja že tako velika, da je treba ta razvoj ustaviti ali vsaj upočasniti.

Kar zadeva generativno umetno inteligenco,¹ nekateri avtorji govorijo o tem, da bi se v primeru njenega razvoja brez ustreznega družbenega nadzora človeštvo znašlo

pred eksistenčnim tveganjem. Na eksistenčno tveganje, ki ga prinaša razvoj umetne inteligence, je že pred več kot desetimi leti opozoril filozof Bostrom (2014). Predpostavil je, da bi umetna inteligenca lahko že razmeroma zgodaj v prihodnosti dosegla oziroma presegla zmožnosti človeške inteligence. Taka superinteligenca, h kateri vodi razvoj umetne inteligence, bi lahko po distopičnem scenariju, ki ga je predpostavil Nick Bostrom, v končni konsekvenci pripeljala tudi k iztrebljanju človeške vrste. Predvsem pa bi imeli v primeru takega scenarija opravka z ireverzibilnim tokom dogodkov, pri katerem poti nazaj ne bi bilo več. V tem smislu obstaja pomembna razlika med katastrofičnim in eksistenčnim tipom tveganj. Če katastrofična tveganja ocenjujemo po kriteriju maksimalne razširjenosti (številu ljudi, ki bi bili prizadeti), intenziteti (trpljenju, ki ga povzroča) in trajanja škodljivih družbenih posledic nekontroliranega razvoja posamezne tehnologije, je pri eksistenčnem tveganju, ki naj bi bilo povezano z generativno umetno inteligenco, odločilna vloga samo enega kriterija, tj. nevarnosti iztrebljanja človeške vrste zaradi prevlade stroja nad človekom.

Generativna umetna inteligenca je v zadnjem obdobju z razvojem velikih jezikovnih modelov naredila pravo revolucijo. Še pred nekaj leti so tudi najzmogljivejši veliki jezikovni modeli redko uspeli generirati kako krajše koherentno besedilo. V zadnjem času najnaprednejši veliki jezikovni modeli (GPT, Bard, Claude, Llama, Gemini, DeepSeek itd.) pišejo računalniške programe, samostojno generirajo znanstvena in umetnostna besedila večjega obsega, se vključujejo v neomejene odprte tipe komunikacij itd. Zato ni presenetljivo, da vprašanja o možnem eksistenčnem tveganju generativne umetne inteligence, kolikor se bo njen razvoj dogajal s tako bliskovito hitrostjo, niso v krogih strokovnjakov, ki se ukvarjajo s strojnim učenjem, nič več zavrnjena kot del znanstvene fantastike.

Naj zadevo ilustriramo. Konec letošnjega januarja je bilo v javnost dano poročilo o varnosti generativne umetne inteligence (International AI Safety Report 2025). V tem mednarodnem poročilu, pri katerem je sodelovalo sto strokovnjakov iz tridesetih držav, razen tega pa še predstavniki OZN, OECD in EU, je podan obsežen kompendij tveganj generativne umetne inteligence.

Osnovni cilj tega poročila je podati mnenje strokovnjakov z vsega sveta o tem, kakšna so tveganja, ki jih prinaša razvoj generativne umetne inteligence. Poročilo je sestavni del širšega prizadevanja strokovnjakov in politikov na mednarodni ravni, da se z najbolj perečimi kratkoročnimi in dolgoročnimi tipi tveganj razvoja generativne umetne inteligence sooči svet kot celota. Novembra 2023 je bil sklican prvi globalni vrh o varnosti umetne inteligence, ki je potekal v Londonu. Glavna tema srečanja je bila soočanje z možnim eksistenčnim tipom tveganj, ki ga prinaša razvoj generativne umetne inteligence. Nadaljevanje tega vrha je potekalo maja 2024 v Seulu, tretje srečanje pa v Parizu konec februarja 2025. V letošnjem januarju objavljeno poročilo o varnosti generativne umetne inteligence (ibid.) je bilo osnovna platforma za pariško diskusijo.

Za mednarodno skupino znanstvenikov, ki so pripravili omenjeno poročilo, je scenarij, po katerem bi človek že v zelo kratkem času izgubil nadzor nad enim ali več deli sistema generativne umetne inteligence, še vedno hipotetičen. V glavnem obstaja med njimi soglasje, da trenutno to tveganje ne obstaja. Vendar pa so njihova mnenja, ali se bo to morda zgodilo v naslednjih nekaj desetletjih, bistveno manj

soglasna. Nekateri avtorji, ki so sodelovali pri pisanju poročila, zanikajo to verjetnost, drugi menijo, da je verjetno, da se bo to zgodilo, tretji zopet menijo, da gre za tveganje z zmerno verjetnostjo. Vsi pa se strinjajo, da na globalni ravni potrebujemo ustrezno družbeno regulacijo na področju razvoja generativne umetne inteligence, saj smo zaradi pomanjkanja te že danes pod bremenom množice dezinformacij, ki jih ustvarjajo boti, kibernetских napadov in zlorab na vojaškem področju. Strinjamo se lahko z oceno Yuvala Noaha Hararija, izraelskega zgodovinarja znanosti, ki je v svojem zadnjem delu »*Nexus. A Brief History of Information Networks from the Stone Stage to AI*« (Harari 2024) zapisal, da se je generativna umetna inteligenca, s tem ko sledi delovanju, ki izhaja iz nje same, že dodobra »zažrla« v obstoječi kod človeške civilizacije.

Z velikimi tveganji se v zadnjih letih soočamo tudi na področju razvoja tehnologij preoblikovanja človekovega genoma (»*human genome editing technologies*«), četudi se o teh tveganjih v javnosti morda razpravlja manj. Odkritje tehnologije CRISPR/Cas9 pred nekaj več kot desetimi leti je na tem področju naredilo pravo revolucijo, še posebej zato, ker je ta nova tehnologija odprla pot najrazličnejšim uporabam na področju biomedicinskega zdravljenja (Maresca in Deswal 2022). Vendar tudi razvoj te nove napredne tehnologije predstavlja dvorezni meč. Razvoj in uporaba tehnologij preoblikovanja človekovega genoma na eni strani vodita k vedno večji dobrobiti človeštva, na drugi pa k tveganjem.

Zdi se, da bi bila tu tveganja v primeru zlorab enaka ali celo večja, kot jih lahko zasledimo v povezavi z razvojem generativne umetne inteligence, še posebej, ker se je tu, kolikor so informacije o razvpiti » aferi He Jiankui« (Greely 2019; Sand, Brede-noord in Jongsma 2019) verodostojne, morda že prestopilo rdečo črto. Tehnologija preoblikovanja človekovega genoma je na področju medicine pospešila različne oblike zdravljenja z gensko terapijo. Kolikor se te genske terapije nanašajo na človekove somatske celice, se sicer lahko pojavijo določene etične dileme, vendar se vse te dileme vrtijo okrog klasičnih bioetičnih vprašanj. V tem primeru gre torej za vprašanja, ki ostajajo v domeni trenutno sprejemljivih družbenih norm, saj gre za take zadeve, kot je dosledna izvedba načela obveščenega informiranja pacientov s strani medicinskih strokovnjakov, kolikor se pacienti odločijo za gensko terapijo, upoštevanje avtonomne volje pacientov pri sprejemanju njihovih odločitev za take vrste terapij itd.

Na področju genomske znanosti in biomedicine se je situacija popolnoma spremenila, ko se je začelo v praksi eksperimentirati s tehnologijo CRISPR-Cas9 na človeških zarodnih celicah. Ko je kitajski biogenetik He Jiankui konec leta 2019 obvestil javnost, da sta se na temelju njegovega genskega inženiringa zarodnih celic rodili gensko preoblikovani dvojčici Nana in Lulu, je bila strokovna javnost v svetu šokirana, saj je prestopil rdečo črto. Ne glede na to, da je njegov postopek genske terapije na podlagi preoblikovanja zarodnih celic tudi po petih letih v marsičem zakrit v tančico skrivnosti (to gensko eksperimentiranje se je ne nazadnje izvajalo v informacijsko zaprti in nadzorovani kitajski družbi), je tak genski inženiring, ki si ga je privoščil kitajski genetik, na stečaj odprl vrata novi vrsti družbene evgenike. Preoblikovanje človeškega genoma se je iz medicinske terapije (terapije na somatskih celicah z namenom zdravljenja genskih bolezni) spremenilo v nov tip družbene evgenike, katere končni cilj bi lahko bila trajna in ireverzibilna sprememba človeka kot naravne vrste *homo sapiens*.

Tveganje za človeško vrsto v tem primeru ni prav nič manjše od tveganja, ki ga prinaša nenadzorovan razvoj generativne umetne inteligence.

SKLEP

V zaključku naj poudarim, da se posamezni akterji, ki se v državah članicah EU ukvarjajo z različnim vidiki strategije in vodenja raziskovalne in inovacijske politike, ne izogibajo razpravam o uporabi TRL kot merski skali, ki se uporablja za oceno zrelosti tehnologije, ko gre ta skozi fazo raziskav, razvoja in trženja. Žal pa te razprave ostajajo na precej deklarativni in posplošeni ravni ter ne vključujejo celostnejših premislekov o tem, kako na osnovi družbenih in etičnih izzivov, ki jih prinaša razvoj novih in naprednih tehnologij, pristopiti k temu merskemu »orodju«. Kmalu po objavi odmevnega poročila Maria Draghija o prihodnji konkurenčnosti Evrope (Draghi 2024) so ministrstva in agencije posameznih držav, članic EU, ki skrbijo za podporo raziskovanju, razvoju in inovacijam, objavila svoja izhodišča za 10. okvirni program Evropske komisije. Ta bo začel svojo pot leta 2028. Že bežen pregled spletnih strani nacionalnih ministrstev in agencij, na katerih te ustanove objavljajo vladne dokumente tudi v angleščini, ki so povezani z raziskovanjem, razvojem in inovacijami, zelo hitro razkrije, da v svojih izhodiščnih dokumentih za 10. okvirni program o TRL govorijo zelo malo ali nič. S podobno ohlapno govorico se srečujemo tudi v primeru Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in inovacije Republike Slovenije (2024), ki je 17. 10. 2024 na svojih spletnih straneh objavilo dokument z naslovom *Stališče Republike Slovenije do 10. okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije*, vendar o TRL, ki ga definira kot »raven tehnološke zrelosti«, komajda kaj pove. Kaj več kot to, da je tu izrečena podpora ministrstva vzpostavitvi ravnovesja med načini programiranja TRL in vlogo aplikativnih raziskav na višjih stopnjah TRL, v tem dokumentu ne najdemo. Vsekakor je to premalo, da bi lahko za ključnega institucionalnega akterja raziskovalno-razvojne in inovacijske politike pri nas dejali, da je presegel ozek tehnokratski in marketinško usmerjeni pogled na TRL. Zdi se, da bo treba tudi v Sloveniji vložiti še veliko navora, da bomo dosegli tako rekonceptualizacijo TRL, ki bo vključevala zavedanje o tem, kako pomembna je tudi širša družbena in etična dimenzija razvoja novih naprednih tehnologij.

OPOMBA

- 1 Generativna umetna inteligenca spada v skupino modelov umetne inteligence, ki lahko ustvarjajo nove podatke (informacije) na podlagi vzorcev in struktur, naučenih iz obstoječih podatkov (informacij). Ti modeli lahko generirajo vsebine na najrazličnejših področjih, naj si bo besedil, slik ali glasbe. Pri analizi, razumevanju in ustvarjanju teh vsebin, ki vedno bolj spominjajo na človeške stvaritve, se opirajo na tehnike globokega učenja in nevronske mreže (Ray 2023).

CITIRANA LITERATURA

Bainbridge, William Sims, in Mihail C. Roco. 2006. »Progressive Convergence«. V *Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations – Converging Technologies in Society*, ur. W.

- Bainbridge, 1–9. Dordrecht: Springer Verlag.
- Beck, Ulrich. 1992. *Risk Society: Towards a New Modernity*. London, Newbury Park in New Delhi: Sage Publications.
- Bostrom, Nick. 2014. *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford: Oxford University Press.
- Bruno, Ilenia, et al. 2020. »Technology Readiness Revisited: A Proposal for Extending the Scope of Impact Assessment of European Public Services«. V *Proceedings of the 13th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance (ICEGOV2020)*, 369–380. Dostopno 21. 1. 2025. <https://doi.org/10.1145/3428502.342855>.
- Bush, Vannevar. 1945/1960. *Science: The Endless Frontier*. Washington, D. C.: National Scientific Foundation.
- Draghi, Mario (ur.). 2024. *The Future of European Competitiveness*. Dostopno 3. 2. 2025. https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c152a8232961_en.
- European Commission. 2011. *High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies – Final Report, June 2011*. Dostopno 25. 1. 2025. https://www.eusemiconductors.eu/sites/default/files/uploads/20110607_HLEG-KETs_FinalReport.pdf.
- Frascati Manual. 2015. *Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development*. Pariz: OECD.
- Giddens, Anthony. 1991. *Modernity and Self-Identity – Self and Society in the Late Modern Age*. Stanford: Stanford University Press.
- Greely, Henry. 2019. »CRISPR'd Babies: Human Germline Genome Editing in the 'He Jiankui Affair'«. *Journal of Law and the Biosciences* 6 (1): 111–183.
- Harari, Yuval Noah. 2024. *Nexus. A Brief History of Information Networks from the Stone Stage to AI*. New York: Penguin Random House.
- Héder, Mihály. 2017. »From NASA to EU: The Evolution of the TRL Scale in Public Sector«. *The Innovation Journal – The Public Sector Innovation Journal* 22 (2): 2–23.
- Hollingsworth, Rogers. 2011. *Major Discoveries, Creativity, and the Dynamics of Science*. Complexity Design Society 15. Dunaj: Echoraum.
- International AI Safety Report. 2025. *The International Scientific Report on the Safety of Advanced AI*. AI Action Summit, januar 2025. Dostopno 2. 2. 2025. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/679a0c48a77d250007d313ee/International_AI_Safety_Report_2025.
- IPCC. 2022. *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kline, Stephen, in Nathan Rosenberg. 1986. »An Overview of Innovation«. V *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*, ur. R. Landau in N. Rosenberg, 275–305. Washington, D. C.: National Academy Press.
- Luhmann, Niklas. 1991. *Soziologie des Risikos*. Berlin in New York: Walter de Gruyter & Co.
- Mali, Franc. 2015. »Družbene znanosti in razvoj novih naprednih tehnologij: sintezna biologija«. *Družboslovne razprave* 31 (79): 63–81.
- Mali, Franc. 2024. »Does the Use of Large Language Models in Scientific Research Bring Us Closer to the Point in Time When Machines Will Surpass Humans?«. V *IS 2024 Proceedings of the 27th International Multiconference Information Science*, ur. A. Slana Ozmič et al., 39–43. Dostopno 12. 1. 2025. https://is.ijs.si/wp-content/uploads/2024/11/IS2024_Volume-B.pdf.
- Maresca, Marcello, in Sumit Deswal (ur.). 2022. *Genome Editing in Drug Discovery*. Hoboken, ZDA: John Wiley & Sons, Inc.
- Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in inovacije Republike Slovenije. 2024. *Stališče Republike*

- Slovenije do 10. okvirnega programa Evropske unije za raziskave in inovacije*. Dostopno 3. 2. 2025. <https://www.gov.si/novice/2024-10-17-stalisce-republike-slovenije-do-10-okvirnega-programa-evropske-unije-za-raziskave-in-inovacije>.
- Nordman, Alfred (ur.). 2004. *Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies*. Luksemburg: Office for Official Publications of the European Communities.
- OECD. 2020. *Addressing Societal Challenges Using Transdisciplinary Research*. OECD Science, Technology and Industry Policy Paper 88 (junij). Dostopno 12. 1. 2025. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/06/addressing-societal-challenges-using-transdisciplinary-research_41211835/0ca0ca45-en.pdf.
- Ray, Partha. 2023. »ChatGPT: A Comprehensive Review on Background, Applications, Key Challenges, Bias, Ethics, Limitations and Future Scope«. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* 3: 21–154. Dostopno 24. 1. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.003>.
- Sand, Martin, Annelien Bredenoord in Karin Jongsma. 2019. »After the Fact—The Case of CRISPR Babies«. *European Journal of Human Genetics* 27 (junij): 1621–1624.
- Schumpeter, Joseph. 1934/2008. *The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest and the Business Cycle*. New Brunswick in London: Transaction Publishers.
- Splichal, Slavko. 2024. *Izhodišča za SAZU-jev posvet Od tržne konkurenčnosti tehnologije k družbeni tehnološki zrelosti*. Ljubljana, SAZU, 15. november 2024.
- Suarez-Villa, Luis. 2009. *Technocapitalism: A Critical Perspective on Technological Innovation and Corporatism*. Philadelphia: Temple University Press.
- Voltan, José Luiz Neves, Rômulo Girardi, Juraci Ferreira Galdino in Ronaldo Ribeiro Goldschmidt. 2024. »A Review and Classification of Technology Readiness Assessment Techniques Based on TRL Scale«. *Coleç. Meira Mattos, Rio de Janeiro* 18 (61): 1–28. Dostopno 23. 1. 2025. <https://ebrevistas.eb.mil.br/RMM/article/download/11602/10090/>