
NEVROBRANJE

NEVRO-KOGNITIVNI VIDIKI BRANJA IN UČENJA S PAPIRJA IN Z ZASLONOV

Avtorji: doc. dr. Amanda Saksida, prof. dr. Igor Ž. Žagar, mag. Laura Blaznik, mag. Ana Špacapan

Vodja raziskave: prof. dr. Igor Ž. Žagar

POVZETEK	4
1.0 UVOD	6
1.1 Ozadje raziskave	6
1.1.1 Študije bralnega razumevanja	6
1.1.2 ET, GSR, in EEG, kot objektivne mere kognitivnega napora in pozornosti	7
1.1.3 Učinki bralnega medija na pozornost, kognitivni napor in pomnjenje, merjeni z ET, GSR in EEG	9
1.2 Cilji raziskave	10
2.0 METODE	11
2.1 Udeleženci	11
2.2 Uporabljeno gradivo	11
2.2.1 Besedila in testi bralnega razumevanja	11
2.2.2 Vprašalnik SES in vprašanja pred in po testiranju	11
2.3 Načrt in postopek	12
2.4 Spremenljivke in predobdelava surovih podatkov v končne spremenljivke	13
2.5 Analiza podatkov	14
3.0 REZULTATI	16
3.1 Test bralnega razumevanja	16
3.2 Sledenje pogledu: mežikanja, fiksacije, sakade	19
3.3 GSR: tonični signal in število vrhov (fazični odzivi)	21
3.4 EEG: spektralna analiza moči signala	23
3.5 Povezave med signali	26
3.6 Klasifikacijska analiza	27
4.0 DISKUSIJA	28
4.1 Vloga SES in hipoteze o njegovem vplivu na bralno razumevanje	29
4.2 Primerjava po posameznih senzorjih v luči obstoječe literature	30
4.3 Vpliv medija na pozornost in napor glede na starost	31
4.4 Omejitve, odprta vprašanja in predlogi za nadaljnje delo	31

5.0 SKLEP	32
6.0 NOVE RAZISKAVE IN PRIPOROČILA	32
7.0 DODATEK: REZULTATI SES VPRAŠALNIKA V GRAFIH (BRANJE IN UPORABA ZASLONSKIH MEDIJEV)	34
8.0 ČLOVEŠKI MOŽGANI ILUSTRATIVNO: DELITEV, FUNKCIJE IN OSCILACIJE	47
8.1 Deli človeških možganov	47
8.2 Pet različnih možganskih valovanj	48
UPORABLJENA LITERATURA	49

Povzetek

Digitalizacija šolskega dela je v zadnjem desetletju branje z zaslonov iz izjemne prakse spremenila v bolj ali manj privzeti način učenja in preverjanja znanja. Kljub temu ostaja odprto vprašanje, ali in na kakšen način branje na zaslonu vpliva na bralno razumevanje ter ali se, neodvisno od tega, spremenijo tudi kognitivni in nevrofiziološki procesi, ki podpirajo razumevanje besedila. Številne predhodne študije kažejo na razlike v pozornosti, vizualni in kognitivni obremenitvi ter metakognitivnem nadzoru,¹ vendar so podatki pri otrocih in mlajših mladostnikih (kakor tudi pri starejših od 50 let) relativno skopi, zlasti za kompleksne, šolsko relevantne naloge. Pilotna študija Nevrobranje poskuša zapolniti to vrzel z integracijo vedenjskih in nevrofizioloških mer v ekološko bolj relevantnem šolskem kontekstu.

V raziskavi so sodelovali učenci dveh starostnih skupin: mlajša skupina (približno 9–10 let), ki je reševala naloge tipa PIRLS, in starejša skupina (približno 14–15 let), ki je reševala naloge tipa PISA. Udeleženci so brali besedila in reševali pripadajoča vprašanja v dveh medijskih pogojih (papir, zaslon). Bralno razumevanje je bilo merjeno s številom pravih odgovorov, metakognitivni vidiki pa z napovedmi lastne uspešnosti in porabljenega časa. Domače bralne in digitalne navade so bile ocenjene z vprašalnikom SES. Nevrofiziološke mere so vključevale sledenje pogledu (ET, frekvenca mežikanja, trajanje fiksacij, sakade), elektrodermalno aktivnost (tonična komponenta in fazični odzivi GSR) ter EEG (spektralna moč v standardnih frekvenčnih pasovih na različnih elektrodah).

Na ravni dosežkov v bralnem razumevanju ni bilo statistično pomembnih razlik med branjem na papirju in na zaslonu, niti pri zahtevnejših vprašanjih, ki terjajo globlje razumevanje besedila, so pa razlike med branjem zaslona in branjem z ekrana bile, in sicer je bilo branje zaslona v povprečju manj uspešno.² Starejši učenci so bili pri reševanju testov uspešnejši od mlajših, neodvisno od medija, kar je verjetno mogoče pripisati tako večjim bralnim izkušnjam kot daljšim izkušnjam pri delu z zasloni (adaptacija). Udeleženci so, kakor kažejo tudi številne druge študije, precenjevali svojo sposobnost napovedovanja uspešnosti in časa reševanja; subjektivna preferenca papirja se ni sistematično odražala v boljših objektivnih rezultatih. Domače bralne navade so se pri mlajši in mejno pri starejši skupini pokazale kot pozitiven napovednik dosežkov, medtem ko sama pogostost digitalne rabe (oz. nerabe) morda ni bila neposredno povezana z boljšim razumevanjem, je pa, predvsem skupaj z bralnimi navadami, k boljšemu razumevanju verjetno ključno/odločilno prispevala.³ Nevrofiziološki podatki so razkrili izrazite razlike glede na medij: pri starejši skupini je bilo na zaslonu zaznati nižjo

¹ Samooceni, kako uspešni (hitri, natančni ...) smo pri izpolnjevanju določene naloge.

² PIRLS vse naloge skupaj

Zaslon: M = 64,50 %, Papir: M = 69,72 %; Zaslon: Me = 65,00 %, Papir: Me = 64,71 %

- PISA vse naloge skupaj

Zaslon: M = 78,21 %, Papir: M = 79,10 %; Zaslon: Me = 80,00 % Papir: Me = 83,33 %

- PIRLS težje naloge skupaj

Zaslon: M = 59,06 %, Papir: M = 65,87 %; Zaslon: Me = 57,14 % Papir: Me = 64,29 %

- PISA težje naloge skupaj

Zaslon: M = 76,50 %, Papir: M = 75,90 %; Zaslon: Me = 75,00 % Papir: Me = 77,78 %.

³ Povsem naključno, tako da so se učenci in učence, predvsem pa njihovi starši, prostovoljno odločali za sodelovanje v raziskavi, smo zbrali izjemno homogeno – pa demografsko precej nereprezentativno – skupino (odličnjakov), kjer ima večina staršev magisterij ali doktorat, kjer ima gospodinjstvo več 100 knjig, kjer otroci redno dnevno berejo (tiskane knjige), tudi po 2 uri na dan, preživljanje prostega časa pred zasloni pa je izrazito omejeno ali ga celo ni (skoraj polovica učenek in učencev, še posebej v mlajši skupini, določenih družbenih omrežij ali aplikacij sploh ni poznala).

Podrobnejše rezultate SES vprašalnika predstavljamo v 7. poglavju (Dodatek).

frekvenco mežikanja, pri obeh skupinah pa daljše fiksacije med branjem vprašanj na zaslonu; daljše fiksacije ponavadi napovedujejo slabše rezultate. GSR je pokazal različne vzorce vznemirjenja glede na starost in medij, EEG pa medijsko specifične razlike, zlasti v alfa in theta območjih (ki sta povezani z zmanjšanjem pozornosti in koncentracije ter tvorbo spominov) na centralnih in posteriornih elektrodah, izrazitejše pri starejši skupini. Kombinacija EEG, GSR in ET spremenljivk je omogočila nadnaključno klasifikacijo medija branja.

Rezultati kažejo, da je lahko končni vpliv na bralno razumevanje na prvi pogled podoben na papirju in na zaslonu, vendar kognitivna pot do tega rezultata ni enaka. Branje na zaslonu je povezano z drugačnimi vzorci pozornosti, vizualne obremenitve in fiziološkega vznemirjenja, kar nakazuje, da medij ni nevtralno »okno«, temveč aktiven dejavnik pri oblikovanju bralnih strategij. Kratka, strukturirana besedila z jasno določeno nalogo morda še ne razkrijejo morebitnih »stroškov« branja zaslona, ti pa bi se lahko izrazili pri daljših, manj strukturiranih besedilih ali pri ranljivejših skupinah učencev. Metodološko študija potrjuje dodano vrednost kombinacije več nevrofizioloških mer za odkrivanje subtilnih razlik, ki jih vedenjski podatki sami ne zaznajo. V pedagoškem smislu rezultati, skupaj z najnovejšimi raziskavami, ki jih povzemamo na koncu, kažejo in opozarjajo na previdno, premišljeno in omejeno integracijo zaslonov v pouk ter usmerjajo prihodnje raziskave k vprašanju, v katerih pogojih in za katere učence zaslonsko branje postane kognitivno manj ugodno in kaj (če sploh kaj) pridobimo z uvajanjem zaslonov kot učnega pripomočka v šole.

Ključne besede: branje na papirju in zaslonu; bralno razumevanje; kognitivni napor; EEG, GSR, sledenje pogledu; osnovnošolski otroci in mladostniki

1.0 Uvod

Pričujoči elaborat opiše ozadje, zasnovo in rezultate pilotne študije Nevrobranje – nevro-kognitivni vidiki branja in učenja s papirja in z zaslonov (Nevrobranje). Gre za primerjalno študijo kognitivne obremenitve, pozornosti in bralnega razumevanja pri branju na papirju in zaslonu z uporabo sledenja pogledu (ET), elektrodermalne aktivnosti kože (GSR) in elektroencefalograma (EEG), ki zajema dva vzorca osnovnošolskih otrok. Zasnovana je bila kot preverjanje osnovnih hipotez, zbranih na podlagi doslej objavljenih empiričnih raziskav in sistematičnih pregledov literature na to temo. Cilj je bil s kombinacijo vedenjskih mer in fizioloških signalov preveriti, ali in kako se branje na papirju razlikuje od branja na zaslonu ter ali so razlike odvisne od starosti in zunanjih dejavnikov (npr. bralne navade, socio-ekonomski status (SES)).

1.1 Ozadje raziskave

1.1.1 Študije bralnega razumevanja

V zadnjih tridesetih letih, odkar so zasloni v široki uporabi, so bile objavljene številne študije, ki so raziskovale vpliv medija na bralno razumevanje in pomnjenje prebranega pri otrocih in odraslih.⁴ Rezultati so, poleg številnih člankov na to temo, povzeti v nedavnih sistematičnih pregledih literature, ki jih tu podrobneje navajamo. Pregled Delgado in sod. (Delgado et al., 2018) zajema 54 študij s primerljivimi besedili na papirju in digitalnih napravah, od leta 2000 do 2017. Povprečna velikost učinka je pokazala na majhno, a statistično pomembno prednost branja s papirja pri bralnem razumevanju (Hedge's $g = -.21$), ki se je povečala pri branju z omejenim časom. Prednost branja na papirju je bila večja pri bolj nedavnih študijah. Pri študijah, ki so uporabljale samo pripovedna besedila, prednosti niso našli. Ista skupina je v preteklem letu objavila še en sistematični pregled (Salmerón et al., 2024), v katerem najdejo majhne, a statistično pomembne prednosti branja s papirja v primerjavi z branjem s tablic ($g = -.11$). Učinek bralnega medija je večji pri študentih kot pri osnovno- in srednješolcih. O podobnih ugotovitvah kot Delgado in sod. poroča tudi Clinton (Clinton, 2019), ki za pregledanih 29 poročil in 33 študij ugotavlja podobno prednost branja s papirja ($g = -.26$) in prav tako ne najde prednosti za pripovedna besedila, pa tudi ne razlik med otroki in odraslimi (vendar pa je bilo odraslih udeležencev bistveno več). Tudi ona je v preteklem letu objavila še en sistematični pregled 15 študij skupnega branja leposlovnih besedil z otroki (Clinton-Lisell et al., 2024). Rezultati kažejo, da so otroci enako zavzeti pri branju s papirja in tablic, branje s tablic pa lahko spodbudi nekoliko večjo raven vizualne pozornosti, če gre za interaktivne e-knjige ali knjige, ki se berejo same. Podobne rezultate najdejo tudi Schwabe in sod. (Schwabe et al., 2022), ki po pregledu 32 študij z leposlovnimi besedili ugotavljajo, da razlik v bralnem razumevanju ni, multimedijske in interaktivne funkcije digitalnih besedil pa lahko, če gre za leposlovna besedila, celo pozitivno vplivajo na razumevanje branega, ne glede na vrsto interaktivne funkcije.

Sistematični pregled študij ($N = 23$), objavljenih med 2015 in 2022, ki obravnavajo osnovno- in srednješolce, so naredili tudi Peras in sod. (Peras et al., 2023). Boljše rezultate bralnega razumevanja pri branju s papirja najdejo samo pri nekaterih študijah, ugotavljajo pa, da so za bralno razumevanje pomembni tudi individualni prediktorji, kot so splošno bralno razumevanje in bralne navade, število knjig doma in uporaba virov IKT v šoli. Socio-ekonomski status je pozitivno povezan z dosežki pri branju pri obeh medijih, pri čemer je večji učinek viden pri branju na papirju. Podoben vpliv SES,

⁴ Prva tovrstna študija sega že v leto 1988: Dillon, A., McKnight, C., & Richardson, J. (1988). Reading from paper versus screens: A critical review of the empirical literature. *The Computer Journal*, 31(3), 257–277.

bralnih navad in števila knjig doma na bralno razumevanje ugotavljamo tudi v našem, izrazito homogenem vzorcu.

1.1.2 ET, GSR, in EEG, kot objektivne mere kognitivnega napora in pozornosti

Ocenjevanje razumevanja branega besedila je zahtevno in težavno zaradi številnih kognitivnih procesov, ki sodelujejo pri razumevanju branega besedila, in popolnega instrumenta, ki bi natančno razkril realnost razumevanja branega besedila, ni (Leslie & Caldwell, 2014). Ker je torej možno, da testi bralnega razumevanja ne razkrijejo vseh učinkov medija na branje, so nekatere študije ugotovljale učinke medija na branje tudi s pomočjo merjenja nevrofizioloških odzivov. Kot osnovo so vzele mere, ki so se predhodno pokazale kot potencialni objektivni pokazatelji kognitivnega napora in preobremenitve pozornosti pri nalogah, ki niso bile povezane z branjem z različnih medijev. Zato v tem razdelku najprej povzamemo nekatere raziskave, ki ocenjujejo uspešnost ET, GSR in EEG kot mer kognitivnega napora in pozornosti na splošno.

Pri analizah sledenja pogledu (ET) so kot indikatorji kognitivnega napora uporabljene predvsem mere mežikanja, medtem ko se analize fiksacij (in ponekod sakad) nanašajo bolj na raziskave tehnik branja, tekočnosti branja in bralnega razumevanja. Pri GSR so analizirane tako počasne, tonične fluktuacije elektrodermalne aktivnosti, kot tudi nenadna, fazična povečanja elektrodermalne napetosti. Pri elektroencefalogramu pa je za ugotavljanje povečane pozornosti ali kognitivne obremenitve običajno uporabljena sprektralna analiza moči signala, ki na videz neperiodično časovno napetostno krivuljo pretvori v frekvenčno (običajno s Fourierovo transformacijo), kar omogoča merjenje moči nihanja v posameznih frekvenčnih pasovih, ki so bila empirično prepoznana kot pomembna za delovanje človeških možganov (delta, theta, alpha, beta, in gamma), ali pa celo na posameznem ozkem frekvenčnem pasu.⁵

Glede na tesno povezavo med kognitivno obremenitvijo in kognitivnimi kapacitetami, ki usmerjajo pozornostni sistem (Kahneman, 1973), ter ob dejstvu, da s spremembo zunanjih dejavnikov, kot sta težavnost naloge ali kompleksnost stimulacije, lažje vplivamo na kognitivno obremenitev kot na kognitivne kapacitete, se večina novejših raziskav osredotoča na objektivne pokazatelje kognitivne obremenitve v povezavi z različnimi nalogami. **Povečana pozornost** pri tibetanskih debatah menihov, na primer, brez posebne opredelitve kognitivne obremenitve, je bila v študiji Kaushika in sod. (Kaushik et al., 2022) izražena kot *povečanje moči nižjih frekvenčnih območij valovanja*, tj. frontalno-temporalno v delta, centralno-parietalno v alpha, parietalno levo v theta ter centralno-frontalno v beta območju.⁶

Antonenko in sod. (Antonenko et al., 2010) pa povzemajo poročila o vrsti eksperimentov, pri katerih je povečana **kognitivna obremenitev** povzročila supresijo elektromagnetnega valovanja (tj. *desinhronizacijo*) v *alpha območju* (EEG). Naloge so bile: matematične operacije, vaje letenja (pri pilotih), naloge prostorskega in verbalnega spomina ter motorične naloge. Na splošno kognitivno obremenitev, izraženo v alpha desinhronizaciji, pa ne vpliva samo kompleksnost naloge, temveč nanjo učinkujejo splošne kognitivne kapacitete udeležencev (Gerlič & Jaušovec, 1999; Grabner et al., 2006). Pri tem velja poudariti, da se večja moč v nižjih frekvencah (theta/alfa), ponavadi povezana z branjem z zaslonov, interpretira kot znak večjega kognitivnega napora in zmanjšane pozornosti ter

⁵ Slabost te pretvorbe je njena atemporalnost: izgubi se namreč podatek, kdaj oz. ob katerem elementu ali aktivnosti (AOI = Area of Interest) se pojavi večja moč v posameznem oscilacijskem spektru (ERP = Event Related Potential).

⁶ V 8. poglavju, Dodatek 2, za namene lažjega razumevanja podajamo pregledni, zelo shematični prikaz: 1) delov človeških možganov, 2) funkcionalne razdelitve in 3) različnih možganskih oscilacij.

koncentracije, moč v višjih frekvencah pa kot znak fokusirane pozornosti in senzorično-motorične integracije, ki podpira poglobljeno branje in razumevanje (ponavadi pri branju s papirja).

Supresijo v alpha in beta območju, hkrati s povečanimi vrednostmi v visokem gamma območju, najdejo tudi Dalal in sod. (Dalal et al., 2009) pri intrakranialnem EEG in MEG pri epileptičnih bolnikih, kot pozornostni odziv med poslušanjem besed. Niso pa vse študije merile podobne alpha desinhronizacije in theta sinhronizacije. Puma in sod. (Puma et al., 2018) na primer poročajo o *povečanju moči tako v alpha kot theta območju* pri povečani kognitivni obremenitvi ob sočasnem izvajanju več nalog (multitasking). Nedavna študija, v kateri so pri igranju igre tetris na različnih težavnostnih stopnjah merili odzive fNIRS, EEG, EKG in GSR, ugotavlja *povečanje dejavnosti v prefrontalni skorji* (fNIRS) ter *povečanje moči v alpha in theta območju okcipitalno*⁷ pri težjih nalogah, kardiovaskularna in elektrodermalna aktivnost (ECG in GSR) pa se pri različnih težavnostnih stopnjah ni razlikovala (Dybvik et al., 2025). Razlike v GSR po drugi strani najdejo Nourbakhsh in sod. (Nourbakhsh et al., 2017), ki poročajo o *povečani frekvenci GSR vrhov* in *povečani amplitudi GSR signala (toničnega)* pri povečani težavnosti aritmetičnih nalog ter o *hkratnem zmanjševanju očesnega mežikanja*. Razlike v GSR najdejo tudi Giuliani in sod. (Giuliani et al., 2021), ki poročajo o *zvišanju amplitude vrhov* med težjimi nalogami poslušanja (kar se prav tako zdi pričakovano, saj so zvišanja GSR amplitudnih vrhov povezana z večjo vznemirjenostjo/napetostjo).

Sočasno merjenje različnih senzorjev je sicer še najbolj pogosto pri raziskavah ene od različnih kognitivnih obremenitev, t. i. slušnega napora, ki se pojavi pri poslušanju govora ali pri besedilnih ali nebesedilnih nalogah (dual task) ob prisotnosti ozadnega hrupa (enakomernega široko- ali ozkopasovnega ali pa neenakomernega hrupa, sestavljenega iz kompleksnih zvokov, t. i. cocktail party noise); slušni napor je bolj izrazit pri populacijah z izgubo sluha (Saksida et al., 2022). Tudi pri slušnem naporu študije poročajo o *zmanjšani alpha dejavnosti* ter *povečani zenici* ob bolj zahtevnem poslušanju (Giuliani et al., 2021; Miles et al., 2017).

Objektivne nevrofiziološke mere se v splošnem kažejo kot bolj zanesljive v primerjavi z vedenjskimi merami in samoocenami, čeprav so GSR meritve pogosto prepoznane kot manj zanesljive ali nezanesljive v primerjavi z EEG in meritvami zenice (Alhanbali et al., 2019; Dybvik et al., 2025; Giuliani et al., 2021). Tako Miles in sod. kot tudi Alhanbali in sod. (Alhanbali et al., 2019; Miles et al., 2017) hkrati poročajo o tem, da nevrofiziološke mere kažejo *šibke medsebojne korelacije, kar bi lahko nakazovalo na multidimenzionalnost* slušnega napora (oz. kognitivnega napora nasploh) kot dela multidimenzionalnega pozornostnega sistema, ki vključuje kognitivno-vedenjske spremembe, spremembe v možganski aktivnosti, spremembe v avtonomnem živčevju, pa tudi subjektivno samooceno (Pichora-Fuller et al., 2016).

Za razliko od doslej omenjenih raziskovalnih tehnik so analize pogleda, predvsem očesnih fiksacij in sakad (ET), usmerjene bolj v raziskovanje **tehnike branja**, bralnega razumevanja ter tekočnosti branja in ne toliko v povezave med očesnim premikanjem in kognitivno obremenitvijo ali pozornostjo. Za bolj tekoče branje so značilne krajše in manj pogoste fiksacije, kar je posledica hitrejše in bolj avtomatizirane vizualne prepoznave besed ali besednih zvez (Hautala et al., 2024; Loberg et al., 2019). V skladu s teorijo dvotirnega branja (dual-route view of reading; Dehaene & Cohen, 2011) je prepoznavanje pogostejših oz. bolj znanih in krajših besed avtomatizirano, tj. besedo prepoznamo kot vizualno celoto, kar pelje do krajših fiksacij, medtem ko daljše in manj pogoste besede obravnavamo po grafemih, kar vodi do daljših fiksacij. Med eno in drugo fiksacijo se oči premaknejo (sakade). Število sakad je pri tekočem branju odraslega cca. 4 na sekundo. Med intersakadskim intervalom, ki

⁷ Kjer se procesirajo vizualni signali, kar je za igranje igre tetris ključno.

traja v povprečju približno 250 ms, morajo naši možgani obdelati fiksirano besedo, hkrati pa načrtovati naslednjo sakado (Rayner, 2009), kar pomeni, da morata biti okulomotorni in vizualni sistem tesno koordinirana. Pan in sod. tako pokažejo, da so za časovno usklajevanje obdelave med okulomotornim in vizualnim sistemom med naravnim branjem odgovorne alpha oscilacije v parietalnih in okcipitalnih predelih,⁸ pri čemer ta koordinacija postane bolj izrazita pri zahtevnih besedah (O. Jensen et al., 2021; Pan et al., 2023).

1.1.3 Učinki bralnega medija na pozornost, kognitivni napor in pomnjenje, merjeni z ET, GSR in EEG

Do sedaj objavljene študije nevrofizioloških odzivov na branje v splošnem poročajo o večji kognitivni in vizualni obremenitvi ter zmanjšani pozornosti pri branju na zaslonu, ki se kaže v daljših in manj pogostih očesnih fiksacijah, več mežikanja in povečani zenici (ET), višji tonični elektrodermalni aktivnosti (EDA) in razlikah v elektromagnetnem valovanju po posameznih frekvenčnih pasovih (EEG). Te razlike se lahko kažejo tudi, kadar razlike med bralnim razumevanjem pri branju z zaslona ali papirja niso statistično pomembne.

O *daljših in manj pogostih fiksacijah* pri branju z ekrana poročajo tako Jeong & Gweon (Jeong & Gweon, 2021) kot tudi Brishtel et al. (Brishtel et al., 2018). Slednji poleg slabših rezultatov bralnega razumevanja in daljših fiksacij poročajo tudi o *povečani zenici in višjih vrednostih tonične EDA*, kar, vzeto skupaj, ponavadi kaže na večjo **kognitivno obremenitev** in **slabše takojšnje razumevanje na zaslonu**. Strouse in sod. (Strouse et al., 2022) so tonične vrednosti EDA izmerili tudi pri predšolskih otrocih med skupnim branjem, ko se je tonična EDA med branjem z zaslona zvišala, med branjem papirja pa znižala, ni pa neposredno vplivala na bralno razumevanje.

O *zmanjšani stopnji mežikanja* pri branju z zaslona v primerjavi s papirjem poročajo tudi nekatere oftalmološke študije. Branje zmanjša spontano frekvenco mežikanja v primerjavi z izhodiščno vrednostjo (baseline), stopnja mežikanja pa se še dodatno zmanjša pri branju z zaslona, kar lahko privede do sušenja oči (Blehm et al., 2005). Raziskave, kjer so pogoji branja na papirju in zaslonu primerljivi, tega dodatnega upada mežikanja ne beležijo in zato predpostavijo, da bi upad mežikanja v drugih raziskavah lahko nakazoval večjo **utrujenost** pri branju z zaslona (Chu et al., 2014). Pri branju z zaslona pa se poveča tudi število nepopolnih mežikov v primerjavi s tiskanim gradivom, kar lahko kaže na večjo obremenitev očesne površine pri uporabi zaslonov, lahko pa tudi na večjo kognitivno obremenitev (Argilés et al., 2015; Chu et al., 2014). Do podobnih sklepov pridejo tudi Benedetto in sod. (Benedetto et al., 2013), ki prav tako ugotavljajo znižano število mežikov pri branju z zaslona v primerjavi s papirjem.

Študije, v katerih so uporabili EEG, večinoma uporabijo spektralno analizo moči signala (power spectral analysis) in povišane vrednosti v posameznih frekvenčnih pasovih povezujejo s povečano **kognitivno obremenitvijo** ter z upadom oz. **preobremenitvijo pozornosti**. Scharinger in sod. tako poročajo o povečani zenični dilataciji ter *zmanjšani moči v frekvenčnem pasu alpha* (8–12 Hz) pri branju in uporabi hiperpovezav na zaslonu, kar bi lahko nakazovalo povečano potrebo po oz. uporabo izvršilnih funkcij (Scharinger et al., 2015). Podobno raziskavo, z uporabo EEG in sledilca pogleda, so izvedli tudi Kretzschmar in sod. z mlajšimi in starejšimi odraslimi ter ugotavljali, da pri mlajših odraslih ni najti razlik, medtem ko so pri starejših odraslih pri branju z zaslona zaznali krajše fiksacije (za razliko od Jeong & Gweon, 2021, ter Brishtel et al., 2018) ter nižjo moč elektromagnetnega delovanja možganov v theta območju (Kretzschmar et al., 2013). Tudi slednji rezultat se razlikuje od preostalih dveh študij, ki obravnavata oscilacijske odzive na medij branja. Zivan in sod. (Zivan et al.,

⁸ Kjer se procesirata razumevanje govora (temporalno-parietalno – Wernickejevo območje) in vizualnega (okcipitalno).

2019, 2023) v dveh študijah obravnavajo mlajše otroke, ki jim odrasli berejo ali ki se šele učijo brati (4–6 in 6–8 let). Mlajši otroci so bili 6 tednov izpostavljeni pripovedim z ekrana ali pa živemu pripovedovanju; prvi so po intervenciji kazali višje razmerje med theta in beta konektivnostjo v mirovanju, kar naj bi nakazovalo na zmanjšano usmerjeno pozornost, pri drugih pa se je izboljšala vizualna pozornost (Zivan et al., 2019). Pri starejših otrocih so merili elektromagnetno valovanje med branjem kratkega besedila (100 besed) brez ilustracij, na zaslonu ali na papirju. Medtem ko razlik v bralnem razumevanju (5 zaprtih vprašanj) niso našli, so rezultati pokazali *višje vrednosti v alpha območju* (centralne, posteriorno okcipitalne in desne elektrode), *višje vrednosti v theta območju* na levih, desnih in posteriorno-okcipitalnih elektrodah in *višje razmerje med theta in beta valovanjem* (TBR) med branjem zaslona ter *višje vrednosti v beta in gamma frekvenčnem območju* pri branju s papirja (*gamma: posteriorno okcipitalno, beta: posteriorne in leve temporalne elektrode*). TBR je bil poleg tega obratno sorazmeren z rezultati bralnega razumevanja in s časom reševanja testa. Skupno takšni rezultati kažejo na **slabšo vizualno pozornost** pri branju zaslona ter bolj osredotočeno branje pri branju s papirja (Zivan et al., 2023). Višje vrednosti v alfa območju na centralnih in parietalnih elektrodah pa bi lahko nakazovale tudi povišan **kognitivni napor** pri branju z ekrana.

Nekaj je tudi člankov, ki obravnavajo vpliv medija na semantično kodiranje prebranih informacij, kar sodi nekoliko izven obravnavanega obsega raziskave. Froud in sod. primerjajo t. i. odziv N400 (ERP⁹ analiza EEG signala) na besede, ki so semantično bolj ali manj povezane s prebranim besedilom, ter ugotavljajo manjši odziv pri branju zaslona, kar kaže na bolj plitvo branje (Froud et al., 2024). Na **bolj plitvo branje** kaže tudi *povečanje števila vračanj z vprašanj na besedilo pri branju z ekrana* (Jensen et al., 2024). In še kot zanimivost: skupno branje tiskanih knjig je spodbudilo večjo nevralno sinhronizacijo, merjeno s hiperskeniranjem (tj. sočasnim merjenjem elektromagnetne dejavnosti pri odraslem in otroku), v primerjavi z branjem na elektronskem mediju (Jomaa et al., 2025). Preostalih člankov, ki merijo elektrofiziološke odzive na branje zaslona in papirja z ostalimi metodami (fNIRS, fMRI, MEG, melatonin + PSG), pričujoči elaborat ne obravnava, ker ne sodijo v obravnavani obseg raziskave.

1.2 Cilji raziskave

Pričujoča pilotna raziskava je imela namen ugotovitve zgoraj opisanih člankov in sistematičnih pregledov preveriti na gradivih Mednarodne raziskave bralne pismenosti PIRLS (Progress in International Reading Literacy Study) pri 10-letnih otrocih ter na gradivih Programa mednarodne primerjave dosežkov učencev PISA (Programme for International Student Assessment) pri 14–15-letnih otrocih. Bralno razumevanje je bilo preverjeno s pripadajočimi testi bralnega razumevanja za posamezna besedila, elektrofiziološke odzive pa smo izmerili s sledilcem pogleda (ET), elektroencefalogramom (EEG) in merilcem elektrodermalne aktivnosti kože (GSR). Med analizo, izvedeno v letu 2025, smo odgovarjali na naslednja raziskovalna vprašanja:

- 1) Ali lahko potrdimo znane oz. pričakovane razlike med papirjem in zaslonom, če uporabimo vzorce mednarodnih testov bralne pismenosti PIRLS in PISA? Bolj natančno: ali tudi pri osnovnošolskih otrocih in najstnikih lahko pri branju z ekrana izmerimo a) upad bralnega razumevanja, b) več vračanj nazaj proti izvirnemu tekstu med odgovarjanjem, c) podaljšane fiksacije in manj mežikanja (ET), d) povišane fazične in tonične vrednosti GSR, e) spremembe v theta in alpha območju (EEG)?
- 2) Ali in kako se razlikujejo 9–10-letni (PIRLS) in 14–15-letni otroci oz. najstniki (PISA)?

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Event-related_potential

- 3) Kako k učinkom prispevajo zunanji dejavniki oz. kako so z njimi povezani (sposobnosti samoocenjevanja, bralne navade, SES)?
- 4) Ali lahko iz fizioloških signalov prepoznamo medij branja?

2.0 Metode

2.1 Udeleženci

Skupina PIRLS je obsegala 17 učencev četrtega razreda (8 deklic; povprečna starost = 9,68), skupina PISA pa 13 učencev: 12 iz devetega razreda (5 deklic; povprečna starost = 14,33) in enega dijaka prvega letnika srednje šole (starost = 15,25). Izključitvena merila so bila: nezmožnost branja brez pomoči (brez očal) in diagnosticirane razvojne, učne ali druge motnje. En udeleženec iz skupine PIRLS je bil izključen, ker ni opravil naloge; vsi udeleženci iz skupine PISA so jo uspešno opravili.

Pred raziskavo so bili starši oz. skrbniki in otroci seznanjeni z osnovnim namenom raziskave ter celotnim postopkom, starši oz. skrbniki pa so pred raziskavo podpisali pisno soglasje, v katerem so dovolili anonimizirano obdelavo in objavo podatkov. Testiranje je potekalo od oktobra 2024 do februarja 2025. Soglasje etične komisije Pedagoškega inštituta je bilo pridobljeno dne 30. 8. 2024.

Vsi udeleženci so govorci osrednjeslovenskega narečja, z visoko homogenim SES, za katerega so značilni visoka izobrazba staršev, pogosto branje tiskanih medijev (knjige, časopisi) v domačem okolju ter omejena uporaba digitalnih medijev. Rezultati SES vprašalnika so podrobneje predstavljeni v poglavju 7 (dodatek 1). Povprečna ocena pri slovenščini in matematiki v preteklem šolskem letu je bila 4,62 oz 4,87 za skupino PIRLS ter 4,38 oz 4,31 za skupino PISA.

2.2 Uporabljeno gradivo

2.2.1 Besedila in testi bralnega razumevanja

Za test bralnega razumevanja smo uporabili sproščena besedila in vprašalnike mednarodnih testov PIRLS (https://www.pei.si/wp-content/uploads/2025/02/sproscena_besedila_naloge_PIRLS2021.pdf; dovoljenje za uporabo pridobljeno s strani International Association for the Evaluation of Educational Achievement) in PISA (<https://www.pei.si/raziskovalna-dejavnost/mednarodne-raziskave/pisa/pisa-2018/>; posebno dovoljenje ni bilo potrebno). V skupini PIRLS smo uporabili neleposlovno besedilo Kje je med (5 strani, dolžina 697 besed) in leposlovno besedilo Prazen lonec (5 strani, dolžina 721 besed). Obe besedili sta bili opremljeni s slikami. Test bralnega razumevanja je bil mešanica odprtih in zaprtih vprašanj, 17 vprašanj za besedilo Prazen lonec (maksimalno število točk na testu: 20), 13 vprašanj za besedilo Kje je med (maksimalno število točk na testu: 17). V skupini PISA smo uporabili dve neleposlovni besedili, Mleko (4 strani, dolžina 749 besed, maksimalno število točk na testu: 10) in Velikonočni otok (4 strani, dolžina 824 besed, maksimalno število točk na testu: 12). Slik v besedilih skupine PISA ni bilo. Test bralnega razumevanja za obe besedili je vseboval po 7 vprašanj, dve odprti in pet zaprtih.

2.2.2 Vprašalnik SES in vprašanja pred in po testiranju

Vsi udeleženci so, zaradi vedno bolj razširjene rabe zaslonsko občutljivih naprav (tablice in pametni telefoni), odgovorili tudi na vprašanja o rabi (fizične) tipkovnice:

- 1) Si že kdaj prej uporabljal/-a računalniško fizično tipkovnico (ne na tablici ali pametnem telefonu)?

2) Kolikokrat oz. kako pogosto?

- Nikoli;
- Zelo redko (nekajkrat na leto);
- Včasih (enkrat na mesec);
- Vsak teden;
- Vsak dan.

Vsi udeleženci so odgovorili na dve metakognitivni vprašanji, ki sta zajeli subjektivno oceno uspešnosti pri reševanju testa bralnega razumevanja ter porabljenega časa pred (Meta_1) in po testiranju (Meta_2)):

1) Misliš, da boš/si nalogo hitreje opravil/-a na papirju ali na računalniku?

2) Misliš, da boš/si nalogo uspešneje opravil/-a na papirju ali na računalniku?

Udeleženci so pred ali po testiranju izpolnili tudi 22-delni vprašalnik o socioekonomskem statusu (SES), ki je bil prirejen iz SES vprašalnika za mednarodno raziskavo PISA. Štirinajst točk je zajemalo demografske podatke (starost, izobrazba staršev, premoženje gospodinjstva), šest jih je obravnavalo bralne navade (pogostost, trajanje, vsebina in čas branja). Odvzeta so bila vprašanja o delu v šoli ter dodani vprašanji o rabi digitalnih medijev doma. Dodani sta bili dve vprašanji, ki sta se nanašali na uporabo zaslonov (Koliko časa dnevno preživiš pred zasloni? ter Kaj najraje počneš pred zasloni in koliko časa?). Skupina PISA je odgovorila na dodatno vprašanje o svojem najljubšem mediju za branje (papir ali zaslon).

2.3 Načrt in postopek

Vsak udeleženec je opravil testiranje v dveh blokih, v vsakem bloku je prebral eno zgodbo, na papirju ali na zaslonu. Pri vsakem od blokov je bila uporabljena ena zgodba. Vsak blok je trajal največ 40 minut in je vseboval samostojno tiho branje in pisni test bralnega razumevanja. Med prvim in drugim blokom so imeli udeleženci krajši odmor (10–15 min.). Vrstni red medija branja in uporabljenih zgodb je bil psevdo randomiziran, tako da je četrtnina udeležencev pričela test na papirju z besedilom 1 in četrtnina z besedilom 2, druga polovica pa enako na ekranu. Dodelitev štirih možnih zaporedij predstavitve (pogoj × zgodba) je bila naključna, s čimer smo želeli zmanjšati morebitne učinke vrstnega reda in zagotoviti enakovrednost izhodišč med skupinami.

Udeleženci so opravili testiranje v ločeni sobi, v tišini, bodisi pred računalniškim zaslonom bodisi pred stojalom, namenjenem branju s papirja, razdalja do bralnega medija je bila približno 50 cm. Svetilnost zaslona in osvetlitev prostora sta bili med sejami konstantni, da so bili pogoji osvetljenosti enaki za oba načina predstavitve (290 lumnov). Pred začetkom testiranja, ko so bili nameščeni in kalibrirani vsi senzorji ter je bilo sproženo snemanje signalov, so udeleženci za približno eno minuto zaprli oči in se umirili (faza mirovanja). Ko je zazvonil zvonček, so odprli oči in začeli z branjem besedila, dolgega 4 ali 5 strani (faza branja). Neposredno po branju besedila so udeleženci pisno odgovorili na vprašanja o razumevanju, bodisi z uporabo tipkovnice ob branju zaslona bodisi z ročnim pisanjem na papir (faza branja vprašanj in odgovarjanja).

Fiziološki in vedenjski podatki so bili zbrani z uporabo treh senzorjev: brezžičnega sistema EEG (Brain Vision Live-Amp, ActiCAP Xpress Twist, 16 aktivnih suhih elektrod (10–20), zajem: 500 Hz), senzorja za galvanski odziv kože, GSR (Shimmer3, zajem: 10 Hz) in sledenja pogledu s pomočjo očal

Tobii Glasses 3 za sledenje pogledu in pupilometrijo (zajem: 50 Hz). EEG elektrode so bile nameščene na naslednjih mestih, v skladu s standardiziranim sistemom za nameščanje elektrod na glavo, »10–20«: F7, F3, Fz, F4, F8, T7, C3, Cz, C4, T8, P7, P3, Pz, P4, P8, Oz, in nanesene s prevodnim gelom med kožo in elektrodo, s čimer se je zagotovila impedanca, nižja od 40 $\mu\Omega$. Sistem Tobii je bil pred vsakim snemanjem kalibriran z enotočkovnim kalibracijskim postopkom. Senzor GSR je bil pritrjen na kazalec in srednji prst nedominantne roke (leve za desničarje in obratno); kakovost signala je bila preverjena pred zbiranjem podatkov, kalibracija ni bila potrebna. Zbiranje podatkov in začetna predobdelava sta bila izvedena z uporabo programske opreme iMotions (različica 10.2), vse nadaljnje statistične analize pa so bile izvedene v R (različica 4.1).

2.4 Spremenljivke in predobdelava surovih podatkov v končne spremenljivke

Bralno razumevanje. Ocenjevanje testa bralnega razumevanja je potekalo v skladu z uradnimi kodirnimi shemami za posamezno besedilo, ki pa smo jih za potrebe nadaljnje analize in primerljivosti med obema skupinama pretvorili v normalizirane odstotke od vseh možnih točk za posamezno besedilo (spremenljivka Comprehension). Težavnostne stopnje posameznih vprašanj (štiristopenjska lestvica za vprašanja pri nalogah PIRLS in petstopenjska za vprašanja pri nalogah PISA) so bile prevzete iz smernic za posamezni test (PIRLS: <https://pirls2021.org/results/international-benchmarks#benchmark-area>; PISA: <https://www.oecd.org/en/about/programmes/pisa/pisa-data.html>). Lažja vprašanja (prvi dve oziroma tri stopnji težavnosti) smo združili v spremenljivko Low_demand, težja vprašanja pa v spremenljivko High_demand. Pri obeh smo ponovno izračunali maksimalno število točk in pri nadaljnji analizi uporabili normalizirane vrednosti (odstotke od maksimalnega števila točk).

Bralne navade in uporaba digitalnih medijev doma. Spremenljivke o bralnih navadah in uporabi medijev smo pridobili iz rezultatov SES vprašalnika, uporabljena so bila vprašanja o bralnih navadah doma ($N = 6$) in o uporabi digitalnih medijev ($N = 2$). Pri vsakem vprašanju so bili odgovori numerično kodirani. Višje število točk je bilo dodeljeno za več uporabe in bolj pozitiven odnos. Skupino odgovorov na vprašanja, ki so se nanašala na bralne navade in odnos do branja, smo združili v spremenljivko SES.paper (seštevek točk), skupino odgovorov na vprašanja, ki so se nanašala na uporabo digitalnih medijev, pa v spremenljivko SES.screen (seštevek točk). Rezultati so bili za nadaljnjo analizo normalizirani v odstotke od maksimalnega števila točk po posamezni spremenljivki.

Sledenje pogledu. Podatki iz sledilnika pogleda so bili predobdelani za zaznavanje mežikanja, sakad in fiksiranja. *Mežikanje* je bilo zaznано s pomočjo merjenja odprtosti vek. Podatki so bili označeni kot mežikanje, ko je odprtost vek padla pod 50 % mediane celotnih podatkov o vekah. Podatkovne točke z oceno kakovosti pod 0.1 so bile izključene. Mežikanja, ki so se pojavila v razmiku < 100 milisekund, so bila združena. Dogodki, ki so trajali manj kot 100 milisekund ali več kot 400 milisekund, so bili odstranjeni, da se izločijo lažni pozitivni rezultati in napake sledenja. Po teh korakih so bile izračunane metrike mežikanja – število, število na minuto in povprečni interval med mežiki. Podatki, pri katerih je bilo zabeleženo mežikanje, hitrejša od 60/min (fiziološko malo verjetni podatki), so bili izločeni iz analize. *Podatki o sledenju pogleda* so bili predobdelani z uporabo vgrajenega filtra I-VT (Velocity-Threshold Identification) za razvrščanje fiksiranja in sakad. Za vsak vzorec pogleda algoritem izračuna kotno hitrost v kratkem gibljivem oknu in jo primerja s predhodno določeno mejno hitrostjo (30°/s); zaporedni vzorci s hitrostmi pod tem pragom in trajanjem vsaj 100 ms so bili združeni v fiksacije, medtem ko so se vzorci, ki presegajo ta prag, razvrstili kot sakade. Kratke (< 100 ms) vrzeli v signalu pogleda (npr. kratke izgube sledenja) so bile interpolirane, kar je zagotovilo neprekinjeno pot pogleda za nadaljnjo analizo. Zanesljivost IV-T filtra se pri zajemih ≤ 60 Hz zmanjša, a je še vedno primerljiva



z alternativnim filtrom Duration Dispenser (Olsen, 2012). Uporabljene izhodne spremenljivke sledenja pogledu so: dolžina, število fiksacij in sakad, število mežikov na minuto za posamezni dražljaj (počivanje, branje posamezne strani, branje posameznega vprašanja, odgovarjanje na vprašanje).

GSR. Kalibrirani signal (v mikrosiemensih) je bil ocenjen glede na kontinuiteto, pri čemer so bile vrzeli pod 1000 milisekund linearno interpolirane; pri daljših vrzelih so bili segmenti analizirani vsak posebej. Fazna komponenta je bila določena z uporabo 8000-milisekundnega tekočega medianega filtra (median filter). Fazni signal se izračuna tako, da se od kalibriranega signala odšteje tekoča mediana, konca signala pa se izravnata z uporabo simetričnih median z zaporedno manjšo pasovno širino, razen za prvo in zadnjo vrednost, kjer se uporabi Tukeyjevo robustno pravilo končnih točk. Več podrobnosti o uporabljenem medianem filtru je mogoče najti v dokumentaciji funkcije R runmed: <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/stats/html/runmed.html>. Signal je bil dodatno očiščen šumov z nizkoprepustnim Butterworthovim filtrom (mejna frekvenca = 4 Hz). Uporabljene izhodne GSR spremenljivke so: povprečna moč toničnega signala, število vrhov na minuto in povprečna amplituda vrhov na posamezni dražljaj (počivanje, branje posamezne strani, branje posameznega vprašanja, odgovarjanje na vprašanje).

Vrhovi dejavnosti so bili določeni na faznem signalu na podlagi določenih pragov: začetek in konec vrha 0,01 μ S oziroma 0 μ S, minimalna amplituda 0,005 μ S in minimalno trajanje 700 milisekund. Vsak par začetka-končanja definira okno, največja vrednost, ki jo kalibrirani signal doseže v oknu, pa je označena kot možen vrh. Amplituda možnega vrha je definirana kot razlika med največjo vrednostjo kalibriranega signala v oknu in njegovo vrednostjo v točki začetka. Veljavni vrhovi so bili zabeleženi skupaj z njihovimi časovnimi oznakami in amplitudami. Tonična komponenta je bila določena kot počasi spreminjajoča se osnovna linija, izločena s medianim filtrom (oziroma: tonični signal = surovi podatki – fazna komponenta).

EEG. Preprocesiranje: filtriranje nizkih in visokih frekvenc (v tem primeru frekvenc med 0.1 in 90 Hz) z uporabo pasovnega filtra Butterworth z ničelnim faznim zamikom; Notch filtriranje šuma električnega omrežja z uporabo filtra Butterworth z ničelnim faznim zamikom (50 Hz); odstranitev artefaktov (>120 nV), ki je v povprečju rezultiralo odstranitev 10 % signala (razpon: 10–60 %, pri čemer je bilo največ artefaktov pri vseh udeležencih na okcipitalni elektrodi Oz). *Izračun spektralne gostote moči signala (power spectral analysis, PSD):* hitra Fourierova transformacija (FFT) (splošni opis FFT: <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/eeg/>, splošni matematični opis: https://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform). Rezultatne frekvence so v razponu [0, F_n]:

$$F_n = 0,5 * \text{samplingRate} = \text{Nyquistova frekvenca}.$$

Filtrirani signal je bil razdeljen na 2-sekundne časovne serije (z 1-sekundnim prekrivanjem). Če so bile podatkovne točke za dano 2-sekundno okno neveljavne (tj. so štele za artefakt), se je dana časovna serija odstranila iz izračuna. Izbrani frekvenčni pasovi so bili: delta (0.1–3.49 Hz), theta (3.5–7.4 Hz), alpha (7.5–12.4 Hz), beta (12.4–30 Hz) in gamma (30–45 Hz). Za vsako izmerjeno elektrodo je bil narejen izračun povprečnih vrednosti spektralne moči za vsakega od izbranih frekvenčnih pasov za trajanje posameznega dražljaja (počivanje, branje posamezne strani, branje posameznega vprašanja, odgovarjanje na vprašanje) in nato logaritmično pretvorjen v enoto decibel ($\text{dB} = \mu\text{V}^2/\text{Hz}$)

2.5 Analiza podatkov

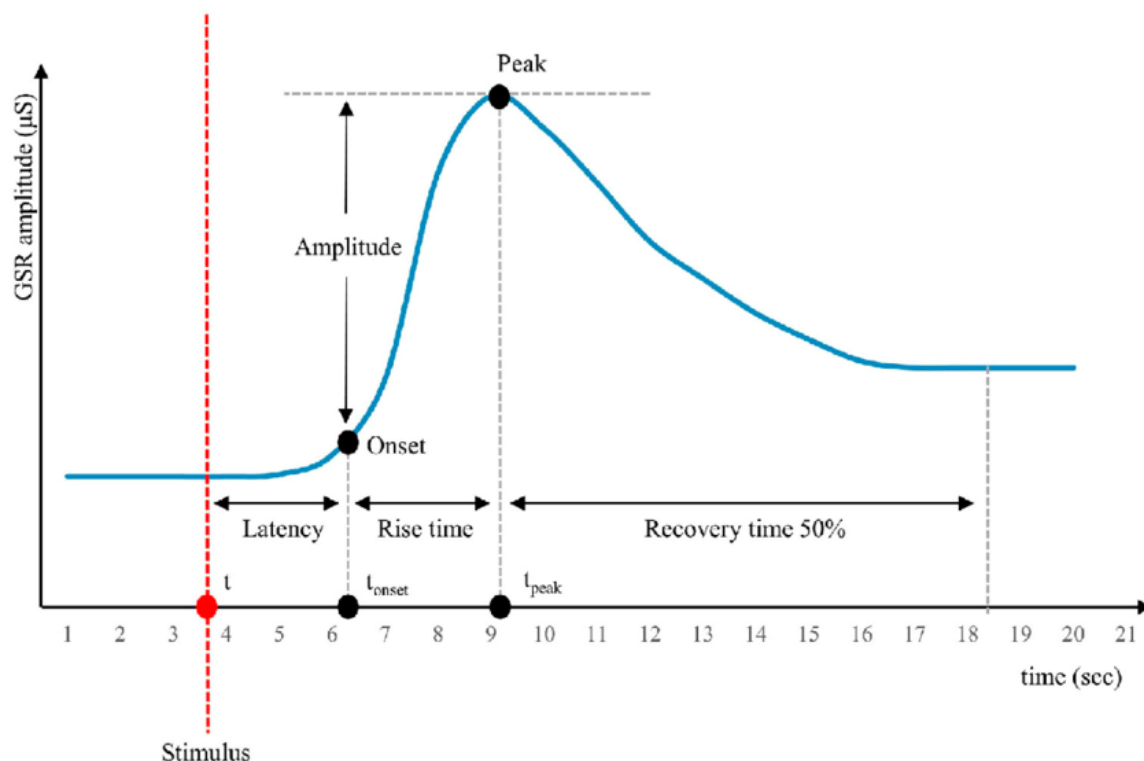
Podatki so predstavljeni za vsako skupino posebej ter v naslednjem vrstnem redu. Najprej so predstavljeni podatki testa bralnega razumevanja, za analizo je bila uporabljena serija linearnih in generaliziranih linearnih regresijskih modelov. Za preverjanje natančnosti subjektivne ocene časa in

uspešnosti pri testu bralnega razumevanja smo uporabili matrice zmede (confusion matrix) ter z njihovo pomočjo izračunali natančnost (sensitivity) in specifičnost (specificity) metakognitivnih ocen pred in po testiranju. Za ugotavljanje povezanosti med SES vprašalnikom in testom bralnega razumevanja je bila uporabljena korelacijska analiza.

Nato so predstavljeni podatki o fiksacijah, mežikih (ET), tonični ter fazični komponenti GSR ter spektralni analizi EEG signala. Podatke za posamezni dražljaj (resting, branje posamezne strani, branje posameznega vprašanja, odgovarjanje na vprašanje) smo povprečili v štiri faze oz. dejavnosti znotraj posameznega testiranja: počivanje, branje besedila, branje vprašanj, odgovarjanje oz. pisanje odgovorov (Activity: resting, reading, questions, answering). Pri analizi toničnega GSR signala smo zaradi velike variabilnosti med udeleženci uporabili korekcijo signala glede na osnovno vrednost (baseline correction), ki smo jo izračunali tako, da smo povprečno osnovno vrednost med fazo počivanja (resting) pred začetkom branja odšteli od vrednosti med ostalimi dejavnostmi. Zajem: mirovanje (ca. 1 min.), branje (4 oz. 5 strani), branje vprašanj (7–17 vprašanj), odgovarjanje 7–17 odgovorjani).

Permutacijski test (cluster-based permutation test) za ugotavljanje potencialne razlike med močjo EEG signala glede na medij je bil izveden po posameznih frekvenčnih pasovih (delta, theta, alpha, beta, gamma), med vsako od dejavnosti na testiranju (branje, vprašanja, odgovarjanje), za vsako elektrodo posebej. Test smo izvedli tako, da smo za vsako časovno točko, za vsako od obeh skupin, za vsak frekvenčni pas ter za vsako elektrodo najprej izračunali razliko moči signala glede na medij (*razlika moči = zaslon – papir*) ter preverili vrednosti t (one sample wilcoxon signed – rank test razlike od vrednosti 0). Nato smo za vsako od 500 permutacij: a) vsakemu udeležencu naključno dodelili faktor preobrata +1 ali -1 (en preobrat na udeleženca, ki se uporabi za vse podatke tega udeleženca), s čimer smo ustvarili permutirane vrednosti razlike v moči; b) za vsak tak nov klaster ponovno izračunali Wilcoxonovo statistiko za posamezno elektrodo; c) izračunali povprečne ničelne t vrednosti ter d) p -vrednost za vsako skupino s primerjavo dejanske t vrednosti z ničelnimi ocenami: za vsako skupino je p -vrednost delež ničelnih ocen, katerih absolutna vrednost je večja ali enaka absolutni kumulativni t -vrednosti v dejanskih podatkih (dvostranski test) (Maris & Oostenveld, 2007).

Klasifikatorski algoritmi. Za ugotavljanje, ali lahko podatke, ki smo jih pridobili z nevrofiziološkimi senzorji, uspešno klasificiramo glede na to, ali so bili pridobljeni med testiranjem na papirju ali zaslonu, smo izvedli nadzorovano klasifikacijo (R paket caret) s petimi klasifikatorskimi algoritmi: logistična



revesa s povečanim vector machine with sifikatorji so široko ie odločevalne meje, ajo komplementarne

ajočega se vzorčenja tov uporabljenih za ohranjena razmerja odela in nastavitve površine pod krivuljo go izključeni iz vseh

Pet klasifikacijskih algoritmov – logistična regresija, naključni gozd, podporni vektorski stroj z radialnim jedrom, drevesa s povečanim gradientom in k-najbližji sosedje – je bilo usposobljenih z uporabo identičnih postopkov ponovnega vzorčenja in ocenjevanja. Za vsak model in iteracijo je bila napovedna zmogljivost na izločenem testnem nizu količinsko opredeljena z uporabo natančnosti, Cohenovega κ in AUC, kar je zagotovilo dopolnilne indekse razlikovalne sposobnosti in robustnosti za neravnovesje razredov. Ta zasnova ponavljajočega ponovnega vzorčenja daje empirične porazdelitve zmogljivosti zunaj vzorca za vsak razvrščevalnik, kar ponuja stabilno in pregledno oceno natančnosti generalizacije.

3.0 Rezultati

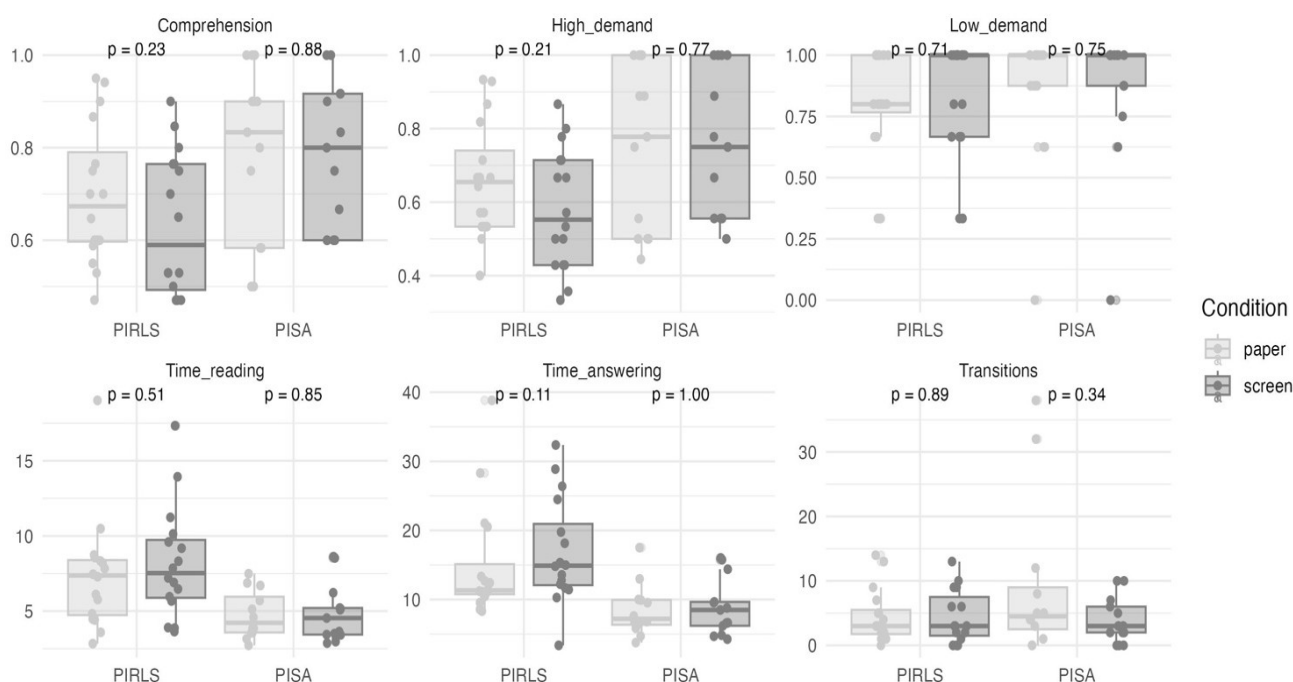
3.1 Test bralnega razumevanja

Pri testu bralnega razumevanja smo analizirali tako natančnost odgovorov kot tudi čas, porabljen za branje in za reševanje testa. Ker nas je posebej zanimalo še, ali je do razlik glede na medij branja morebiti prišlo še posebej pri težjih nalogah, ki so zahtevale bolj poglobljeno razumevanje besedila, smo posebej označili tista vprašanja, ki so bila v kodirnih shemah označena kot najtežja (spremenljivka *High_demand*). Na bolj ali manj plitvo branje z ekrana bi lahko kazalo tudi število vračanj nazaj v besedilo med iskanjem odgovorov, zato smo analizirali tudi število vračanj za vsako skupino in vsak medij. Slika 1 vsebuje rezultate za vse omenjene spremenljivke, predstavljene v obliki boxplot distribucijskih grafov. Statistično značilnih razlik¹⁰ glede na medij branja nismo našli za nobeno od omenjenih spremenljivk. Skupina PISA je test bralnega razumevanja rešila bolje kot skupina PIRLS ($F(54) = 7.88$, $p(\text{adj}) = 0.032$) ter porabila manj časa tako za branje ($F(53) = 13.4$, $p(\text{adj}) = 0.005$) kot za odgovarjanje ($F(53) = 17.2$, $p(\text{adj}) = 0.002$), neodvisno od medija branja, kar je najverjetneje posledica tako daljših izkušenj z branjem kakor tudi večje izkušnosti pri pisanju, tako z roko kot s pomočjo tipkovnice.

Pri obeh skupinah smo preverjali tudi notranjo konsistenco odgovorov na test bralnega razumevanja, tj., ali so bili pri obeh nalogah enako uspešni oziroma neuspešni, neodvisno od medija branja. Analiza notranje konsistence rezultatov med dvema testiranjema (Pearsonova korelacija med testom na papirju in testom na zaslonu) je pokazala, da udeleženci med enim in drugim testiranjem **niso bili**

¹⁰ Statistično pomembne razlike imajo pri tako majhnem vzorcu omejeno vrednost.

konsistentni. Skupina PIRLS: $r^2 = 0.29$, $t(14) = 1.45$, $p = 0.27$; skupina PISA: $r^2 = 0.291$, $t(11) = 0.71$, $p = 0.49$.



Slika 1. Boxplot grafi po posamezni skupini (PISA, PIRLS) in glede na medij branja (Condition: »paper«, »screen«). Spremenljivke Bralno razumevanje (Comprehension) ter Bralno razumevanje težjih (High demand) in lažjih (Low demand) nalog so izražene v odstotkih. Spremenljivki Čas branja in Čas odgovarjanja (Time reading in Time answering) sta izraženi v minutah. Za vsak par glede na medij branja je bil izveden neparametričen Wilcoxonov signed rank test; p vrednosti so izpisane na vrhu grafov za vsak par posebej.

Confusion matrix		Predicted Class		
		Positive	Negative	
Actual Class	Positive	True Positive (TP)	False Negative (FN) Type II Error	Sensitivity $\frac{TP}{(TP + FN)}$
	Negative	False Positive (FP) Type I Error	True Negative (TN)	Specificity $\frac{TN}{(TN + FP)}$
		Precision $\frac{TP}{(TP + FP)}$	Negative Predictive Value $\frac{TN}{(TN + FN)}$	Accuracy $\frac{TP + TN}{(TP + TN + FP + FN)}$

Nadalje smo ugotavljali natančnost subjektivne ocene časa in uspešnosti pri testu bralnega razumevanja pred in po izpolnjevanju testa. Za izračun smo uporabili matrice zmede (confusion matrix, slika levo), (Tabela 1) ter z njihovo pomočjo izračunali natančnost (sensitivity) in specifičnost (specificity) samoocen pred in po testiranju. Glede uspešnosti pri testu sta bili v skupini PIRLS natančnost in specifičnost 0.8 in 1 pred, po reševanju nalog pa 0.8 in 0.2. Skupina PISA

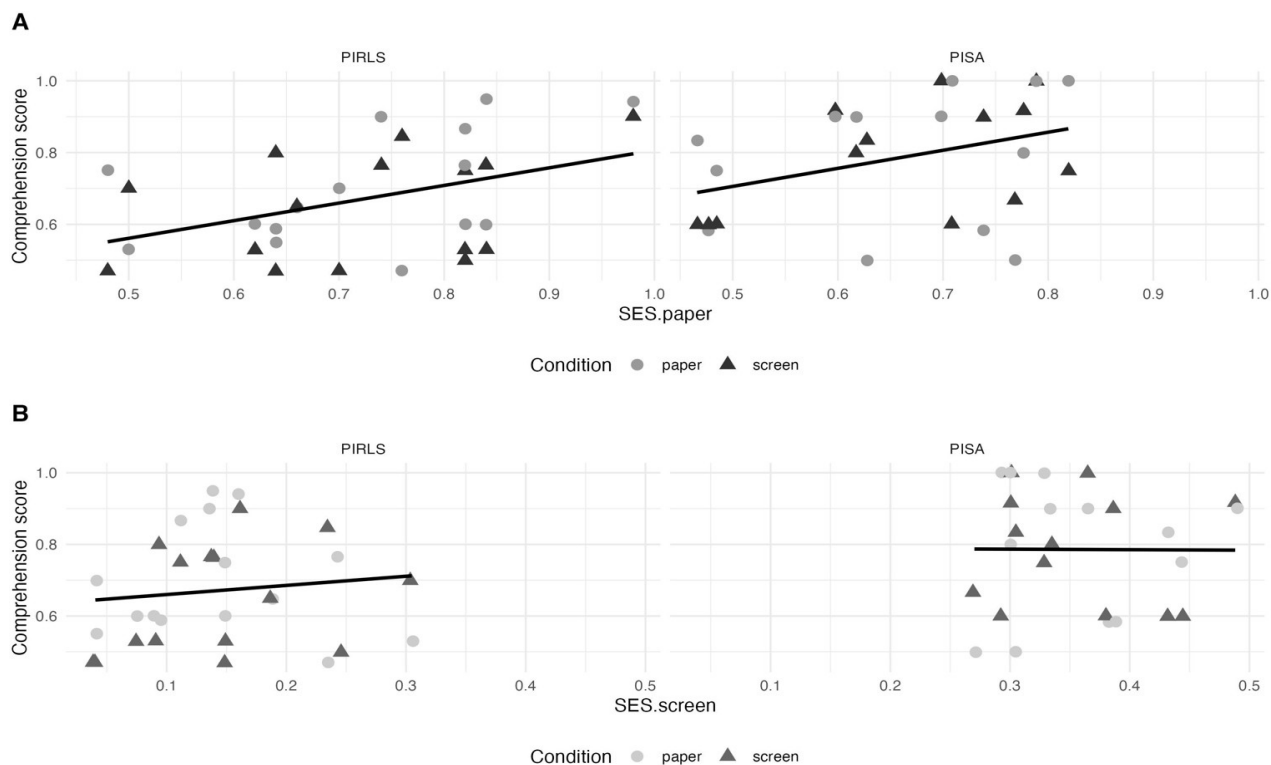
je bila pri samooceni manj uspešna: natančnost 0.3 in specifičnost 0.5 pred in enako po testiranju. Pri samooceni porabljenega časa je bila uspešnost v obeh skupinah nizka: v skupini PIRLS sta bili natančnost in specifičnost 0.18 in 0 pred, po reševanju nalog pa 0 in 0.5, v skupini PISA pa natančnost in specifičnost 1 in 0.4 pred, po reševanju nalog pa 0.3 in 0.

Pri oceni te samoocene (metakognitivna regulacija) je treba upoštevati, da gre za specifično homogeno skupino, izstopajočo glede na povprečje, ki ima občutno več izkušenj z branjem tiskanih kot zaslonskih medijev (glej dodatek 1).

SELF-ASSESSMENT BEFORE TEST				SELF-ASSESSMENT AFTER TEST			
PIRLS				PIRLS			
COMPREHENSION		Truth	Truth	COMPREHENSION		Truth	Truth
		"paper"	"screen"			"paper"	"screen"
Predicted	"paper"	8	2	"paper"	8	2	
Predicted	"screen"	0	1	"screen"	2	2	
TIME		Truth	Truth	TIME		Truth	Truth
		"paper"	"screen"			"paper"	"screen"
Predicted	"paper"	2	9	"paper"	0	8	
Predicted	"screen"	0	0	"screen"	3	3	
PISA				PISA			
COMPREHENSION		Truth	Truth	COMPREHENSION		Truth	Truth
		"paper"	"screen"			"paper"	"screen"
Predicted	"paper"	2	4	"paper"	3	6	
Predicted	"screen"	1	1	"screen"	1	1	
TIME		Truth	Truth	TIME		Truth	Truth
		"paper"	"screen"			"paper"	"screen"
Predicted	"paper"	2	0	"paper"	2	4	
Predicted	"screen"	3	2	"screen"	5	0	

Tabela 1. Matrice zmede ocene časa in natančnosti pred in po testiranju za vsako skupino posebej.

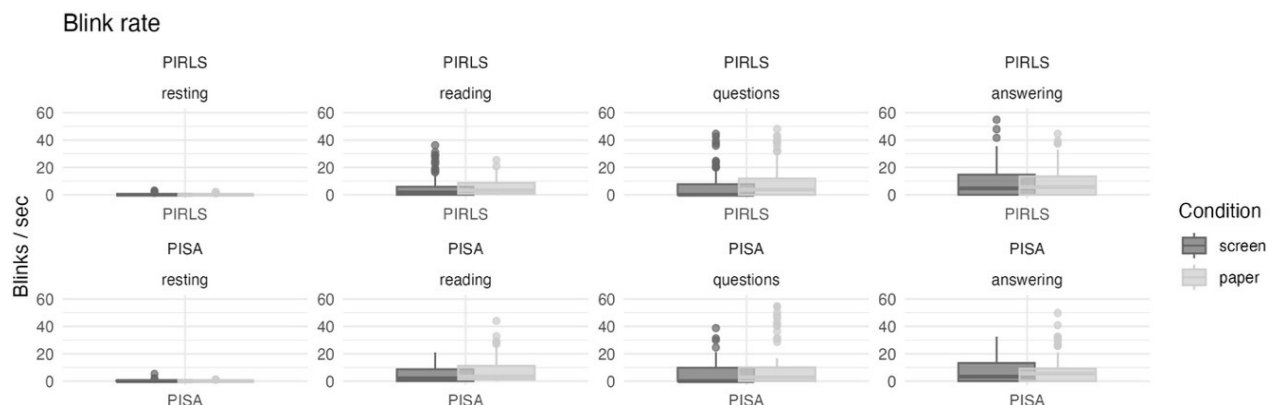
Zanimalo nas je tudi, ali je na njihovo bralno razumevanje vplivalo njihovo domače okolje. Podatke smo imeli na voljo iz vprašalnika SES, ki so ga izpolnili med dvema deloma testa ali po končanem testiranju. Glede na to, da so bili glede izobrazbe staršev relativno homogeni (večina staršev je imela magisterij ali višjo izobrazbo), nas je posebej zanimalo, ali so bralne navade doma oziroma navade uporabe digitalnih medijev vplivale na njihovo uspešnost pri reševanju testa bralnega razumevanja. Tudi v tem primeru smo izvedli vrsto korelacijskih analiz med rezultati testa bralnega razumevanja in bralnimi oziroma digitalnimi navadami za vsak medij posebej in vsako skupino posebej. Rezultati linearnega regresijskega modela so pokazali, da so domače bralne navade (veliko knjig, redno dnevno branje, redka uporaba digitalnih medijev/zaslonov) pozitivno povezane z rezultati testa bralnega razumevanja pri skupini PIRLS (estimate = 0.49, st.err. = 0.19, $t = 2.5$, $p = 0.02$; $r^2 = 0.15$, $F(1,28) = 6.25$, **$p = 0.02$**), pri skupini PISA pa mejno povezane (estimate = 0.5, st.err. = 0.26, $t = 1.9$, $p = 0.07$; $r^2 = 0.09$, $F(1,24) = 3.6$, $p = 0.07$); interakcij med bralnimi navadami in medijem v modelih nismo našli (Slika 2). Statistično pomembnih povezav med digitalnimi navadami in rezultati testa bralnega razumevanja nismo našli, pri čemer je treba ponovno poudariti, da gre za specifično homogeno skupino, ki ima več izkušenj z branjem tiskanih kot zaslonkih medijev.



Slika 2. A. Povezava med rezultati testa bralnega razumevanja in rezultati vprašalnika SES v zvezi z bralnimi navadami doma. B. Povezava med rezultati testa bralnega razumevanja in rezultati vprašalnika SES v zvezi z navadami uporabe digitalnih medijev. Črta predstavlja regresijsko linijo za oba medija skupaj.

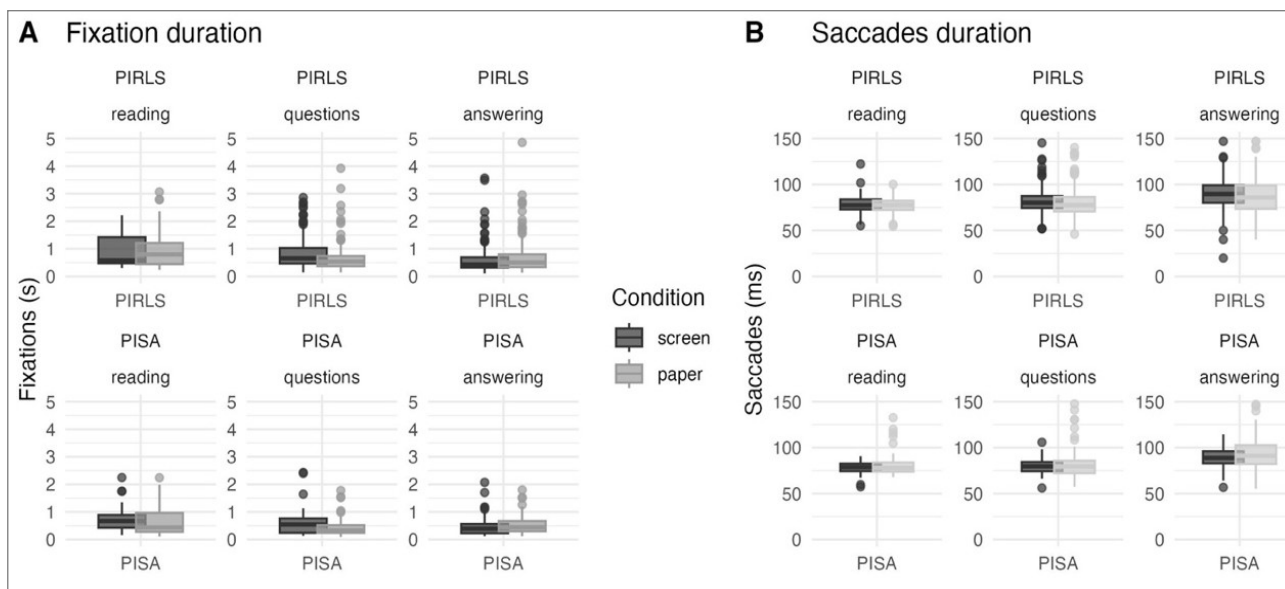
3.2 Sledenje pogledu: mežikanja, fiksacije, sakade

Povprečno število mežikov na minuto se v skupini PIRLS večja glede na dejavnost (branje besedila > branje vprašanj > odgovarjanje), ni pa statistično pomembnih razlik glede na medij. Mešani linearni regresijski model, kjer je odvisna spremenljivka število mežikov na minuto, medij (Condition), dejavnost (Activity) in njuna interakcija fiksni faktorji, naključni faktor pa variabilnost udeležencev, je pokazal na povečanje mežikov glede na dejavnost, ne pa tudi glede na medij (analiza deviance (Type II Wald chisquare test) za dejavnost: $\chi^2(3) = -43.61$, $p < 0.001$; za interakcijo: $\chi^2(3) = 10.75$, $p = 0.01$; za medij: $\chi^2(1) = -2.11$, $p = 0.14$). Pri skupini PISA pa je enaka analiza pokazala na zmanjšanje frekvence mežikanja na zaslonu pri vseh fazah testiranja, hkrati pa se frekvenca mežikanja nekoliko povečuje v času, od branja do odgovarjanja na vprašanja (analiza deviance (Type II Wald chisquare test) za medij: $\chi^2(1) = 23.19$, $p < 0.001$; za dejavnost: $\chi^2(3) = 29.1$, $p < 0.001$; za interakcijo: $\chi^2(1) = 4.60$, $p = 0.14$) (Slika 3). Zmanjšanje frekvence mežikanja na zaslonu sovпада z doslej objavljenimi rezultati (Argilés et al., 2015; Benedetto et al., 2013; Chu et al., 2014), da namreč zmanjšanje števila mežikov ni nujno povezano samo z delom na zaslonih (kakor ugotavljajo nekatere druge študije), ampak je odvisno tudi od drugih kognitivnih obremenitev (večja kognitivna obremenitev > večja frekvenca mežikanja). To potrjujejo tudi rezultati skupine PISA.



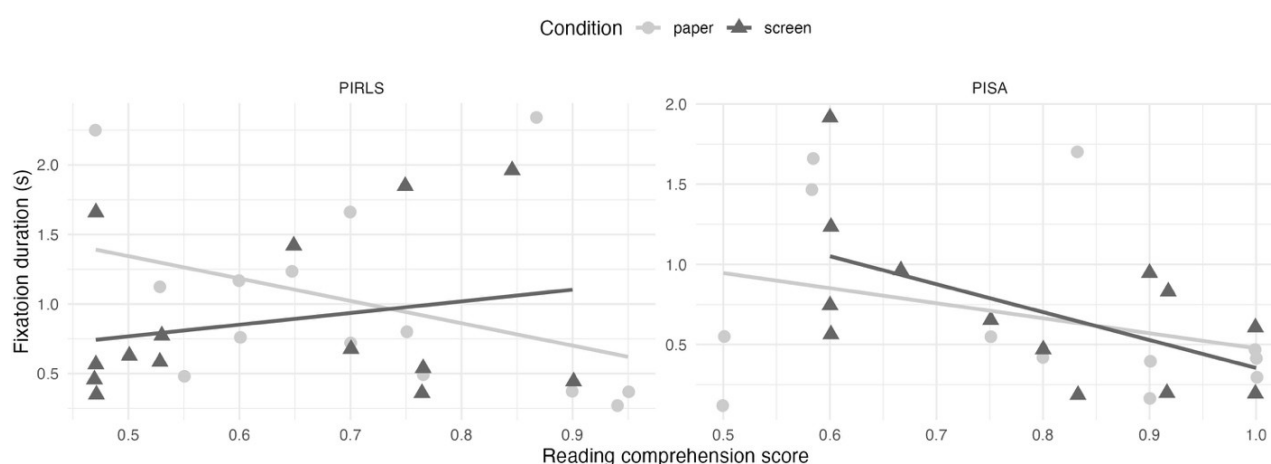
Slika 3. Povprečno število mežikov na minuto glede na skupino (PIRLS, PISA), dejavnost (resting, reading, questions, answering) in medij (papir, zaslon), prikazana z boxplot grafom, kjer srednja črta predstavlja povprečje, zgornji in spodnji rob 25. in 75. percentil distribucije, posamezne pike pa izstopajoče vrednosti (outliers).

Povprečno *trajanje fiksacij* je statistično pomembno daljše pri branju z zaslona v obeh skupinah, med dejavnostjo branja vprašanj. Mešani linearni regresijski model, kjer je odvisna spremenljivka povprečno trajanje fiksacij *med branjem vprašanj*, medij (Condition), skupina (Group) in njuna interakcija fiksni faktorji, naključni faktor pa variabilnost udeležencev, je pokazal na podaljšanje fiksacij glede na medij (analiza deviance (Type II Wald chisquare test): $\chi^2(1) = 35.99$, $p < 0.001$), s tem da so fiksacije v povprečju krajše pri skupini PISA (analiza deviance (Type II Wald chisquare test): $\chi^2(1) = 4.98$, $p = 0.03$). V fazi *branja besedila in pisanja odgovorov* razlik glede na medij nismo našli. Pri analizi sakad statističnih razlik glede na medij nismo našli. Slika 4 prikaže boxplot grafe za obe spremenljivki glede na skupino, dejavnost in medij.



Slika 4. A. Povprečno število dolžine fiksacij na sekundo glede na skupino (PIRLS, PISA), dejavnost (resting, reading, questions, answering) in medij (papir, zaslon), prikazano z boxplot grafom, kjer srednja črta predstavlja povprečje, zgornji in spodnji rob 25. in 75. percentil distribucije, posamezne pike pa izstopajoče vrednosti (outliers). B Enak graf za dolžino sakad.

Daljšje *trajanje fiksacij* pri delu na zaslonu sovpadajo z doslej objavljenimi podatki, ki merijo daljšje trajanje fiksacij med branjem zaslona in ki dolžino fiksacij povezujejo s slabšim takojšnjim razumevanjem z ekrana (Brishtel et al., 2018; Jeong & Gweon, 2021). Čeprav v pričujoči raziskavi ne merimo statistično pomembnih razlik v razumevanju besedila (test bralnega razumevanja), je torej možno, da med razumevanjem in fiksacijami vseeno obstaja povezava. Zato smo izvedli enostavno regresijsko analizo med spremenljivkama *dolžina fiksacij* in *rezultati testa* bralnega razumevanja. Linearni regresijski model s povprečnim trajanjem fiksacij kot odvisno spremenljivko ter bralnim razumevanjem (Comprehension), skupino (Group), medijem (Condition) in njihovo interakcijo kot fiksnimi spremenljivkami je pokazal, da je dolžina fiksacij negativno povezana z bralnim razumevanjem: daljšje, ko so fiksacije pri branju besedila, slabši so rezultati testa bralnega razumevanja (Analiza variance: Sum Sq(1) = 1.29, Mean Sq = 1.29, F = 4.03, **p** = **0.05**; vendar pa model v celoti ne razloži visokega odstotka variance v podatkih: $r^2 = 0.05$, $F(7,45) = 1.40$, $p = 0.23$), kot je razvidno tudi iz Slike 5. Učinek ni odvisen ne od medija branja ne od skupine (tj. ostali faktorji niso statistično pomembno prispevali k analizi variance).

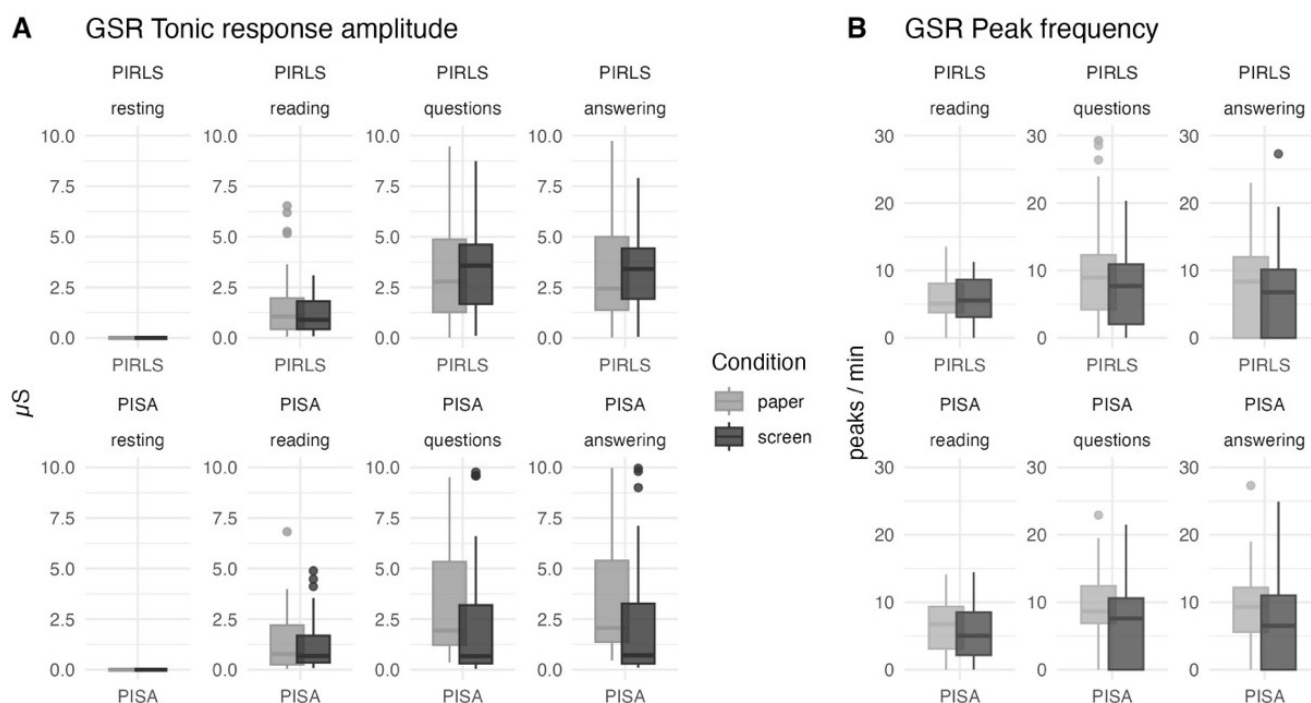


Slika 5. Povezava med rezultati testa bralnega razumevanja in povprečno dolžino fiksacij med branjem besedila. Črte predstavljajo regresijske linije za vsak medij posebej.

3.3 GSR: tonični signal in število vrhov (fazični odzivi)

Na podoben način kot spremenljivke sledenja pogledu smo analizirali tudi tonični in fazični GSR signal, tj. frekvenco vrhov na minuto. Pri dejavnosti *branja besedila* ne najdemo razlik v tonični in fazični GSR dejavnosti glede na medij branja, ne v skupini PIRLS ne v skupini PISA. Pri *branju vprašanj* najdemo razlike v *toničnih vrednostih* GSR glede na medij tako pri skupini PIRLS kot tudi pri skupini PISA, vendar pa je smer razlike obratna – v skupini PIRLS tonična vrednost naraste na zaslonu, pri skupini PISA pa na papirju, kot pokažejo rezultati mešanega linearnega modela, kjer je odvisna spremenljivka tonični GSR signal, medij (Condition), skupina (Group) in njuna interakcija fiksnimi faktorji, naključni faktor pa variabilnost udeležencev (medij: estimate(screen) = -0.42, st.err. = 0.24, $t = -1.77$, $\chi^2(1) = 11.92$, **p** = **0.001**; interakcija med skupino in medijem: estimate(screen, PISA) = -1.44, st.err. = 0.52, $t = -2.81$, $\chi^2(1) = 7.88$, **p** = **0.005**). Zelo podobne rezultate najdemo tudi pri dejavnosti odgovarjanja na vprašanja (medij: estimate(screen) = -0.42, st.err. = 0.25, $t = -1.77$, $\chi^2(1) = 11.65$, **p** = **0.001**; interakcija med skupino in medijem: estimate(screen, PISA) = -1.46, st.err. = 0.53, $t = -2.76$, $\chi^2(1) = 7.61$, **p** = **0.006**). Analizirane razlike so razvidne tudi iz Slike 6A.

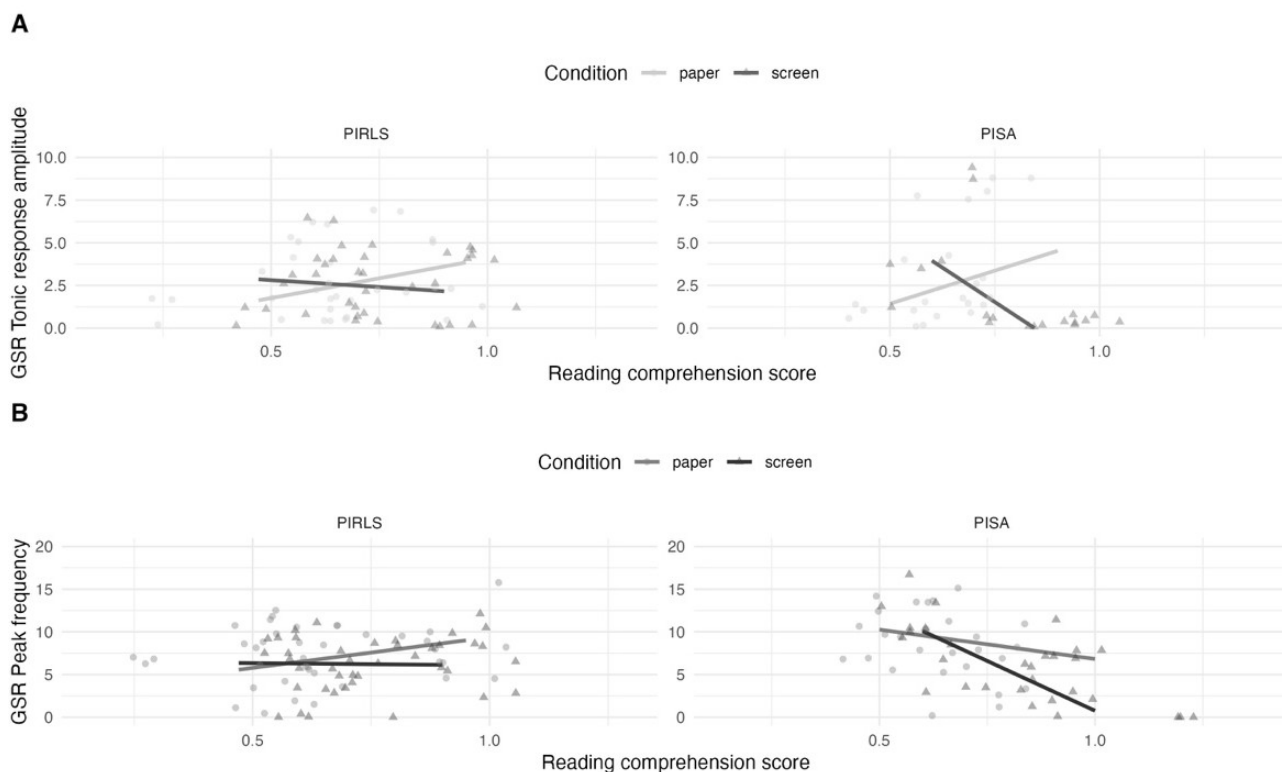
Pri analizi fazične GSR dejavnosti pa ugotavljamo konsistentne razlike glede na medij, tako pri branju vprašanj kot pri odgovarjanju nanje – pri obeh skupinah se število vrhov GSR dejavnosti zgosti pri testiranju na papir v primerjavi z zaslonom –, kot pokažejo tudi rezultati linearnih mešanih modelov, sestavljenih na enak način kot za tonične vrednosti, kjer beležimo samo učinek medija, ne pa tudi skupine ali njune interakcije (branje vprašanj: $\text{estimate}(\text{screen}) = -1.53$, $\text{st.err.} = 0.54$, $t = -2.85$, $\chi^2(1) = 15.87$, $p < 0.001$; odgovarjanje na vprašanja: $\text{estimate}(\text{screen}) = -1.73$, $\text{st.err.} = 0.59$, $t = -2.95$, $\chi^2(1) = 16.09$, $p < 0.001$. Analizirane razlike so razvidne tudi iz Slike 6B.



Slika 6. A Povprečne tonične vrednosti GSR odziva glede na skupino (PIRLS, PISA), dejavnost (resting, reading, questions, answering) in medij (papir, zaslon), prikazane z boxplot grafi, kjer srednja črta predstavlja povprečje, zgornji in spodnji rob 25. in 75. percentil distribucije, posamezne pike pa izstopajoče vrednosti (outliers). B Enak graf za povprečno število vrhov GSR na minuto.

Povečane vrednosti fazičnega signala pri testiranju na papirju pri obeh skupinah ter povečane vrednosti toničnega signala pri testiranju na papirju pri starejši skupini PISA so na prvi pogled v nasprotju s pričakovanimi rezultati glede na razpoložljivo literaturo (Brishtel et al., 2018; Strouse et al., 2022) in bi lahko nakazovale na večje vzemirjenje ali stres ob delu na papirju. Ker pa je valenco vznemirjenja pri GSR signalu nemogoče določiti, ni jasno, ali je rezultat povezan s povečanim stresom ali morda s povečanim navdušenjem ali zadovoljstvom. Da bi dobili vsaj delni vpogled v naravo GSR odziva, smo rezultate povezali z rezultati testa bralnega razumevanja. Kot je razvidno tudi iz Slike 7, je vzorec povezav presenetljiv, saj pri toničnem odzivu opazimo interakcijo med bralnim razumevanjem in medijem testiranja. V mlajši PIRLS skupini beležimo višje tonične vrednosti med delom na zaslonu, pri starejši, PISA, pa med delom na papirju. Hkrati so v obeh skupinah povišane tonične vrednosti povezane z boljšim bralnim razumevanjem pri delu na papirju, pri delu na zaslonu pa so, obratno, povišane tonične vrednosti povezane s slabšim bralnim razumevanjem. Linearni regresijski model s povprečnimi toničnimi vrednostmi med branjem besedila in vprašanj kot odvisno spremenljivko ter bralnim razumevanjem (Comprehension), skupino (Group), medijem (Condition) in njihovo interakcijo kot fiksni spremenljivkami kaže na interakcijo med bralnim razumevanjem in medijem (Analiza variance: $\text{Sum Sq}(1) = 65.27$, $\text{Mean Sq} = 65.27$, $F = 11.03$, $p = 0.001$): branje s papirja > boljši rezultat. Model v celoti razloži 12 % variance ($r^2 = 0.12$, $F(7,81) = 2.65$, $p = 0.02$). Ostali

faktorji in njihove interakcije niso pomembno prispevali k uspešnosti modela. Slika 7 prikazuje regresijske linije ter surove podatke za obe skupini med branjem besedila in vprašanj.



Slika 7. A Povezava med rezultati testa bralnega razumevanja in povprečno jakostjo toničnega signala med branjem besedila in vprašanj. B Povezava med rezultati testa bralnega razumevanja in povprečnim številom GSR vrhov na minuto med branjem besedila in vprašanj. Črte predstavljajo regresijske linije za vsak medij posebej.

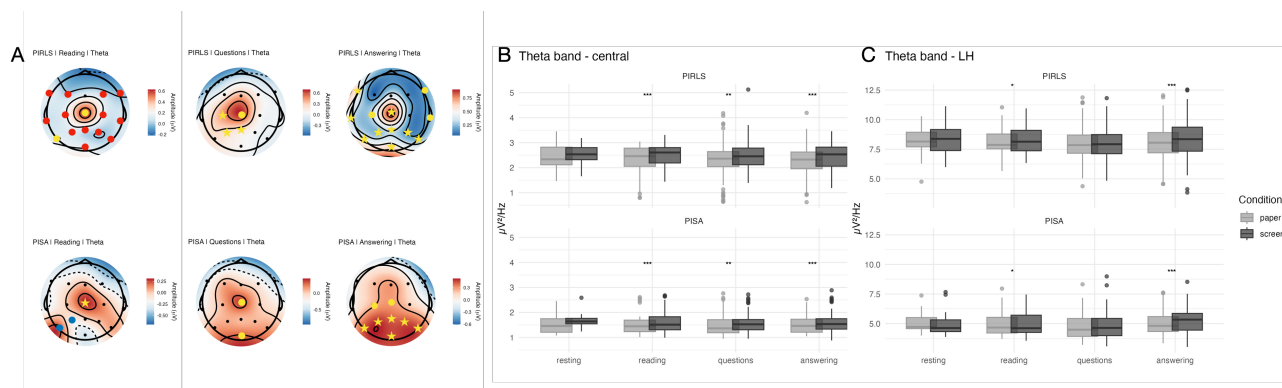
3.4 EEG: spektralna analiza moči signala

Za ugotavljanje potencialne razlike med močjo signala po posameznih frekvenčnih pasovih (delta, theta, alpha, beta, gamma) med vsako od dejavnosti na testiranju (reading, questions, answering) smo najprej za vsako elektrodo posebej izvedli permutacijski test (cluster-based permutation test). Povprečna razlika moči signala glede na medij za vsako od dejavnosti na testiranju je upodobljena na slikah 8–11A v obliki topoloških map za posamezno frekvenčno območje.

Rezultati zgoraj opisane permutacijske analize so bili le delno prekrivni z obstoječimi objavljenimi rezultati. Zivan in sod. (Zivan et al., 2023) na primer poročajo o povišani dejavnosti na ekranu v theta območju na obsežnem delu skalpa (leve, desne, centralne in parietalne elektrode), ko otroci berejo besedilo, medtem ko v pričujoči raziskavi najdemo podobno aktivnost šele pri odgovarjanju na vprašanja.¹¹ Ista raziskava hkrati poroča o višji dejavnosti v alpha območju na večjem delu skalpa (desne, centralne in parietalne elektrode). O povečanju moči v alpha območju na centralnih in parietalnih elektrodah pri povečani pozornosti pri odraslih poročajo tudi Kaushik in sod. (Kaushik et al., 2022). Podobno aktivacijo najdemo v pričujoči raziskavi šele pri odgovarjanju, in to zgolj pri starejši skupini PISA.

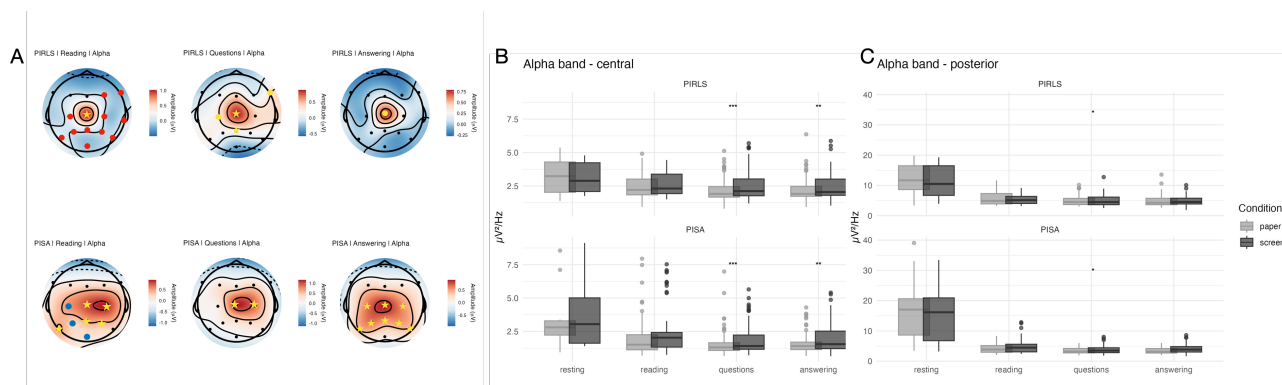
¹¹ Pri tem velja poudariti, da gre pri Zivanu za mlajše otroke, na predoperacionalni stopnji razvoja, ki se šele učijo brati, zato primerjava ni povsem legitimna.

Da bi ugotovili statistično pomembnost prekrivanja med obstoječimi rezultati in rezultati te raziskave, smo ne glede na rezultate permutacijske analize izračunali povprečno vrednost za leve (F3, F7, T7, C3), desne (F4, F8, T8, C4), centralne (Cz, C3, C4) in parietalne (P7, P3, Pz, P4, P8) elektrode za theta območje ter za desne, centralne in parietalne elektrode za alpha območje, da bi zagotovili čimboljšo primerljivost z do sedaj objavljenimi rezultati. Za vsako od novih spremenljivk smo izračunali linearne mešane modele s povprečno močjo signala kot odvisno spremenljivko, s skupino (PISA, PIRLS), medijem (zaslon, papir) in njuno interakcijo kot fiksnimi spremenljivkami ter z variabilnostjo udeležencev kot naključnim faktorjem. Povečano dejavnost pri branju besedila, branju vprašanj in odgovarjanju *na zaslonu* tako najdemo v theta območju na centralnih elektrodah, na levih pa zgolj pri odgovarjanju. Slika 8B zato prikaže vrednosti na teh dveh območjih.



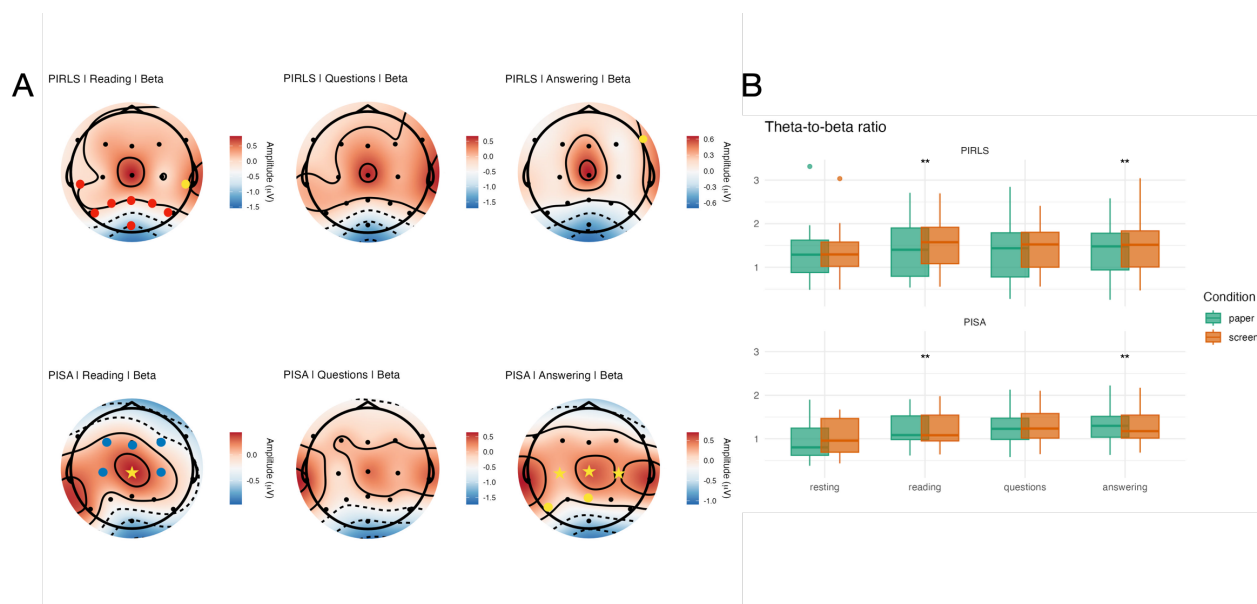
Slika 8. A Topološke mape razlike moči signala glede na medij za vsako od dejavnosti na testiranju za frekvenčno območje **theta**. Elektrode, na katerih je bila s pomočjo permutacijske analize izračunana pomembna razlika glede na medij, so označene z rumeno zvezdico ($p < 0.05$) oz piko ($p < 0.1$). Z rdečimi pikami so označene elektrode na območjih, ki so bila prepoznana kot pomembno različna glede na medij pri otrocih, z modrimi pikami pa so označene elektrode na območjih, ki so bila prepoznana kot pomembno različna pri pozornem branju oz. poslušanju pri odraslih. Polne črte na topoplotih označujejo območja nad vrednostjo 0, črtane pa pod njo. Barvna lestvica (enota je dB) je ob vsaki od topoloških map nekoliko različna, ker odseva rang zabeleženih razlik. B Povprečne vrednosti v območju theta na centralnih elektrodah z označenimi p vrednostmi, pridobljenimi z analizo deviance linearnih mešanih modelov ($p > 0.05 = \text{n.s.}$, $p < 0.05 = *$, $p < 0.01 = **$, $p < 0.001 = ***$), prikazane z boxplot grafi. C Povprečne vrednosti v območju theta na levih elektrodah z označenimi p vrednostmi, prikazane z boxplot grafi.

Enako analizo smo izvedli za alpha območje, kjer najdemo povečano dejavnost *na zaslonu* pri branju vprašanj in odgovarjanju, izmerjeno na centralnih in posteriornih elektrodah, medtem ko predvidene povečane dejavnosti pri branju besedila na zaslonu ne najdemo. Slika 9B prikaže povprečne vrednosti na teh dveh območjih.



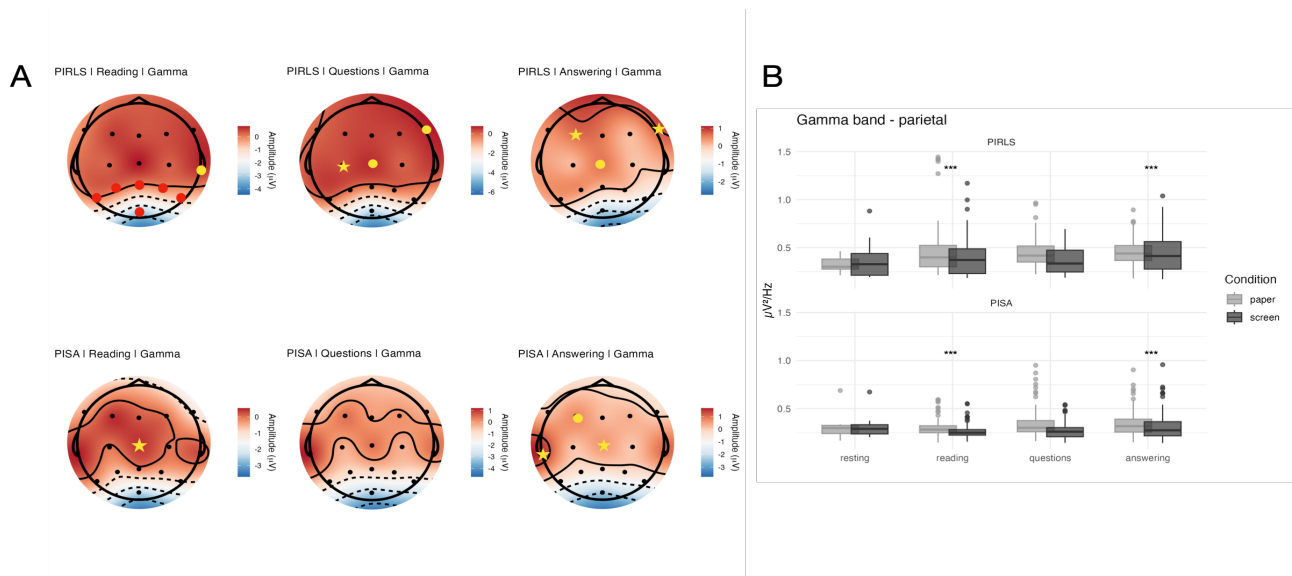
Slika 9. A Topološke mape razlike moči signala glede na medij za vsako od dejavnosti na testiranju za frekvenčno območje **alpha**. B Povprečne vrednosti v območju alpha na centralnih elektrodah z označenimi p vrednostmi, prikazane z boxplot grafi. C Povprečne vrednosti v območju alpha na posteriornih elektrodah z označenimi p vrednostmi, prikazane z boxplot grafi. Ostale oznake so enake kot na Sliki 7.

Zivan in sod. (Zivan et al., 2023) hkrati poročajo o znižani dejavnosti na ekranu v območju beta in gamma ter povečanem razmerju med theta in beta močjo signala (theta/beta ratio (TBR) = theta (dB) – beta (dB)), kar bi utegnilo nakazovati na motnje pozornosti, kognitivne kontrole in miselno tavanje (mind wondering); povečana dejavnost v območju theta in alfa ter podobno povišanje razmerja theta in alfa je bilo namreč že večkrat izmerjeno pri delu z ekrani. V pričujoči raziskavi sicer ne beležimo znižane dejavnosti v frekvenčnem območju beta, vendar pa je TBR med branjem besedila (dejavnost branje) zaslona kljub temu povišan pri obeh skupinah, podobno kot v že omenjeni študiji. Slika 10 prikazuje topološke mape dejavnosti po posameznih dejavnostih za obe skupini v beta območju, kjer ne beležimo posebnih razlik glede na medij, ter povprečne vrednosti TBR, izračunane kot razmerje med povprečnimi vrednostmi moči v theta območju na centralnih elektrodah in povprečnimi vrednostmi moči v beta območju na posteriornih elektrodah.



Slika 10. A Topološke mape razlike moči signala glede na medij za vsako od dejavnosti na testiranju za frekvenčno območje **beta**. B Povprečne vrednosti TBR, prikazane z boxplot grafi. Ostale oznake so enake kot na Sliki 7.

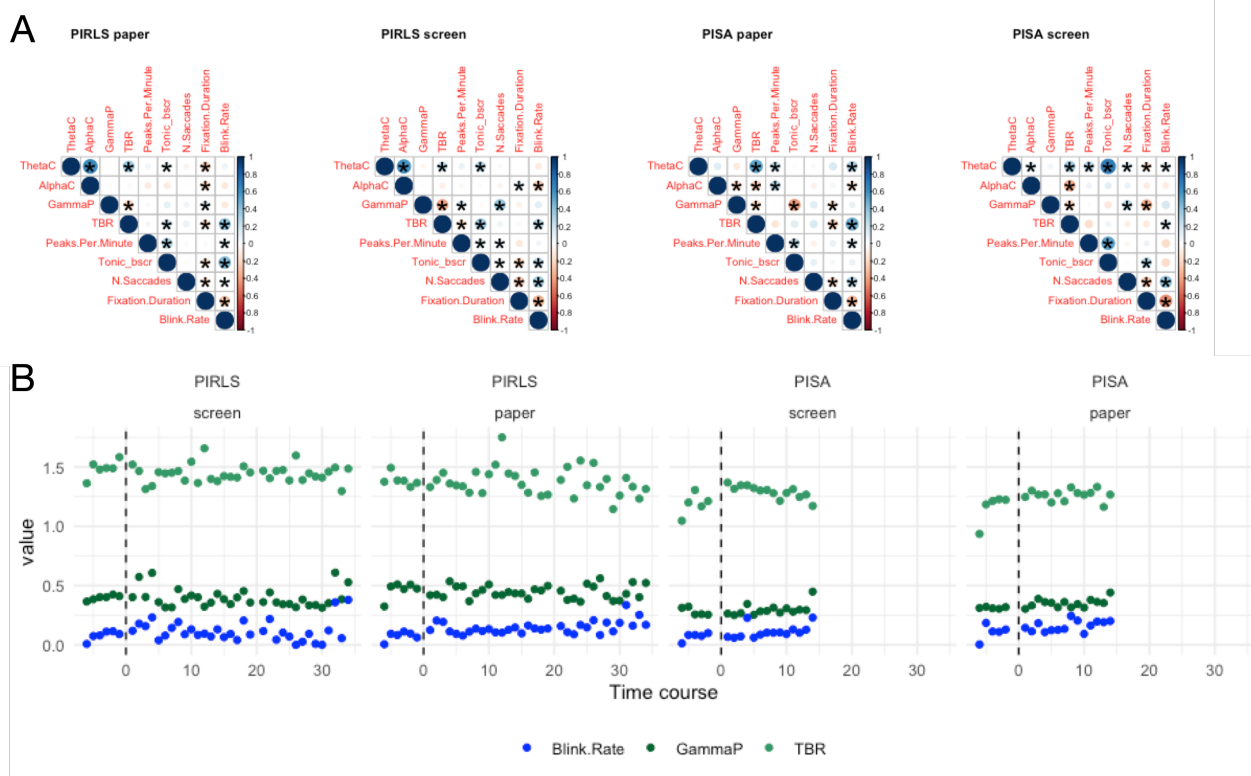
Zmanjšanje dejavnosti v višjem frekvenčnem območju gamma med branjem zaslona, o katerem poroča taista raziskava, najdemo tudi v našem vzorcu. Povprečna vrednost moči v območju gamma na parietalnih in okcipitalni elektrodah je na zaslonu nižja med branjem besedila in med odgovarjanjem, čeprav razlika med medijema ni bila statistično pomembna po posameznih elektrodah (permutacijski test). Slika 11 prikazuje topološke mape dejavnosti po posameznih dejavnostih za obe skupini v gamma območju ter povprečne vrednosti moči v gamma območju na parietalnih elektrodah.



Slika 11. A Topološke mape razlike moči signala glede na medij za vsako od dejavnosti na testiranju za frekvenčno območje **gamma**. B Povprečne vrednosti v območju gamma na parietalnih elektrodah z označenimi p vrednostmi, prikazane z boxplot grafi. Ostale oznake so enake kot na Sliki 7.

3.5 Povezave med signali

Glede na to, da – vsaj za mere slušnega napora, ki ni predmet te raziskave – dosedanje raziskave poročajo o šibki korelaciji med merami slušnega napora z različnimi senzorji (Alhanbali et al., 2019; Dybvik et al., 2025; Miles et al., 2017), nas je seveda zanimalo tudi, v kolikšni meri so v pričujoči raziskavi medsebojno povezane mere, ki bi lahko nakazovale na povečano pozornost/vznemirjenje/napor pri delu, tj. mere mežikanja, tonične in fazične GSR komponente, povečane alpha in theta vrednosti ter znižane gamma vrednosti. Za vsakega udeleženca smo uporabili podatek o povprečnem številu mežikov, fiksacij, GSR vrednostih ter alpha, theta in gama vrednostih po posamezni strani branja in za vsako od branih vprašanj in odgovarjanje nanj, na podlagi česar smo lahko dobili osnovno oceno, ali in kako omenjene spremenljivke medsebojno korelirajo v času procesa testiranja. Za vsako skupino smo torej izvedli po eno korelacijsko analizo za testiranje na papirju in eno za testiranje na zaslonu (Slika 12A). Poleg korelacij, ki nujno sledijo iz načina, kako so pozamezne spremenljivke izračunane (TBR in theta, število sakad, število mežikov in dolžina fiksacij, tonični in fazični GSR signal), najdemo zgolj dve spremenljivki, ki konsistentno korelirata pri vseh štirih korelacijskih analizah. To sta **negativna povezava med TBR in močjo signala v gamma območju ter pozitivna povezava med med frekvenco mežikanja in TBR**. Obe povezavi sta razvidni tudi iz časovnega korelacijskega grafa na Sliki 11B in sta skladni z dosedanjimi ugotovitvami: večje razmerje theta-beta je ponavadi povezano z manjšo močjo signala v gamma, ki kaže na upad koncentracije, povečan kognitivni napor in manjšo zavzetost pri delu s tekstom. Le-to dodatno potrjuje druga korelacija, namreč pozitivna povezava med frekvenco mežikanja in večjim razmerjem theta-gamma, saj povečana frekvenca mežikanja kaže na pomanjkanje koncentracije, negotovost/stres in, posledično, večji kognitivni napor, potreben za izvršitev nalog.



Slika 11. A Korelacijska analiza. B Izbrane spremenljivke v časovni odvisnosti (med potekom testiranja).

3.6 Klasifikacijska analiza

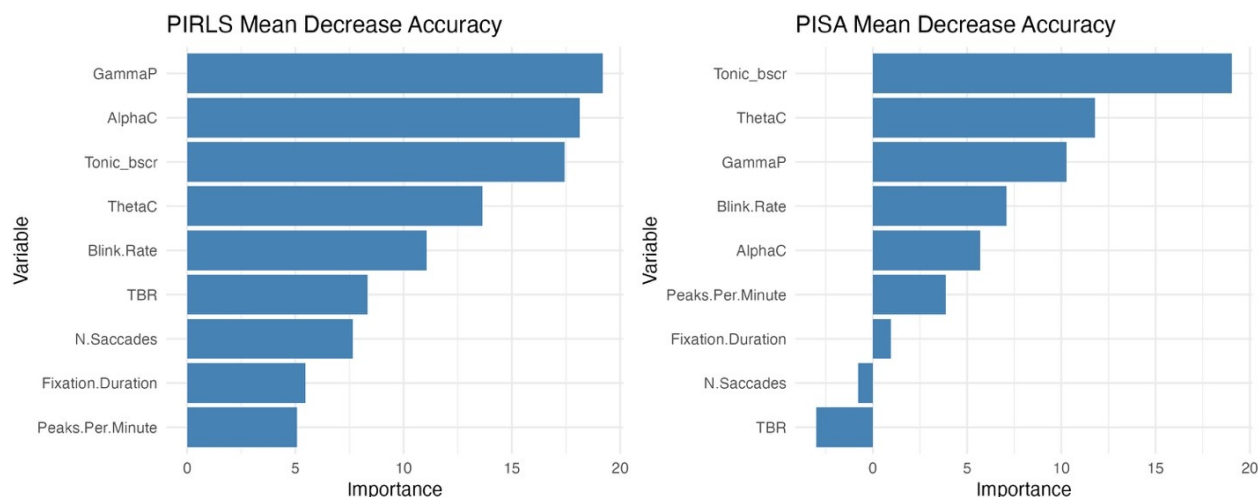
Slednjič nas je zanimalo še, ali lahko podatke, ki smo jih pridobili z nevrofiziološkimi senzorji, uspešno klasificiramo glede na to, ali so bili pridobljeni med testiranjem na papirju ali zaslonu. Do sedaj analizirani podatki namreč kažejo, da so bili otroci sicer relativno uspešni pri reševanju testa bralnega razumevanja (najverjetneje zaradi specifik, ki jih kaže SES) in da bistvenih razlik med medijema ni bilo, da pa so njihovi fiziološki in nevrolški kazalniki kazali na bistvene razlike v procesu dela na zaslonu in na papirju.

V ta namen smo uporabili iste spremenljivke kot v korelacijski analizi, tj. podatke o povprečnem številu mežikov, fiksacij, GSR vrednostih ter alpha, theta in gama vrednostih, povprečene po posameznem udeležencu ter za vsako skupino posebej (PIRLS, PISA), izvedli nadzorovano klasifikacijo s petimi klasifikatorskimi algoritmi: logistična regresija, naključni gozd, podporni vektorski stroj z radialnim jedrom, drevesa s povečanim gradientom in k-najbližji sosedje (logistic regression, random forest, support vector machine with radial kernel, gradient-boosted trees, & k-nearest neighbours), ki smo jih natrenirali z uporabo ponavljajočih se postopkov ponovnega vzorčenja in ocenjevanja. Za vsak model in iteracijo je bila napovedna zmogljivost na izločenem testnem nizu količinsko opredeljena z uporabo natančnosti, Cohenovega κ in AUC. Tabela 2 prikazuje rezultate napovedne zmogljivosti posameznih testov.

Group	Model	MeanAccuracy	MeanKappa	MeanAUC
PIRLS	glm	0,83	0,66	0,89
	knn	0,61	0,22	0,61
	rf	0,92	0,84	0,98
	svmRadial	0,91	0,82	0,98
	xgbTree	0,89	0,78	0,97
PISA	glm	0,92	0,84	0,96
	knn	0,52	0,04	0,51
	rf	0,89	0,79	0,98
	svmRadial	0,87	0,74	0,98
	xgbTree	0,88	0,76	0,97

Tabela 2. Povprečne vrednosti natančnosti, Kappa in AUC za 100 iteracij vzorčenja in klasifikacij.

Kot najbolj uspešen klasifikatorski algoritem v obeh skupinah smo izločili naključni gozd, zato smo zanj izvedli tudi analizo reaktivnega pomena spremenljivk za klasifikator. Kot je razvidno iz Slike 13, je bilo tako za skupino PIRLS kot PISA najbolj pomembnih pet spremenljivk, ki so pripomogle k uspešni klasifikaciji; enakih, a v različnem vrstnem redu po pomembnosti: gamma, theta in alpha ter tonični GSR signal in frekvenca mežikanja.



Slika 13. Oris relativnega pomena spremenljivk za klasifikator naključni gozd.

4.0 Diskusija

Pilotna raziskava je pokazala, da, v danih pogojih, medij sam po sebi ne vodi do jasnega upada bralnega razumevanja: rezultati testa so bili pri obeh starostnih skupinah primerljivi na papirju in zaslonu, tudi pri težjih nalogah (High_demand) statistično pomembnih razlik glede na medij ni bilo. Starejša skupina (PISA) je bila pri reševanju testa nekoliko uspešnejša od mlajše (PIRLS), ne glede na medij, kar je skladno s kognitivnim razvojem (Piaget), kakor tudi z razvojnim napredkom v bralni zmožnosti in strategijah reševanja nalog. Razlike v hitrosti najverjetneje prav tako lahko pripišemo razvojnim razlikam, kakor tudi izkušnjam z branjem in delom z zasloni ter tipkovnico. Poleg tega je imela mlajša skupina več vprašanj (13 oz. 17) kot starejša (7).

Analiza metakognitivnih ocen je pokazala, da so bili udeleženci, kakor kažejo tudi številne druge raziskave, relativno slabi napovedovalci lastne uspešnosti in porabljenega časa – še posebej pri

ocenjevanju časa –, kar nakazuje, da občutek “kako mi gre” ni zanesljiv kazalec dejanske uspešnosti pri branju v nobenem mediju. Vendar pa so za razliko od doslej objavljenih rezultatov samoocen v pričujoči raziskavi udeleženci, tudi tisti iz starejše skupine, večinoma predvidevali, da bodo boljši in hitrejši na papirju, kar je verjetno posledica njihovih pogostejših izkušenj s tiskanimi mediji. Nevrofiziološki in vedenjski kazalniki (ET, GSR, EEG) pa so kljub odsotnosti večjih razlik v razumevanju razkrili sistematične razlike v procesiranju besedila glede na medij in starostno skupino.

4.1 Vloga SES in hipoteze o njegovem vplivu na bralno razumevanje

Verjetno so rezultati prav zaradi zelo homogene in visoko izobražene populacije staršev pokazali, da so domače bralne navade pozitivno povezane z rezultati testa bralnega razumevanja pri mlajši skupini in mejno pri starejši. Spomnimo: izredno homogena skupina, veliko knjig, redno vsakodnevno branje knjig, neuporaba omrežij ... In vendar se ta relativna neuporaba digitalnih medijev ni pokazala kot relevanten napovednik razumevanja: skromna raba zaslonov namreč ni bila ovira, da ne bi bili tudi na ekranu uspešni. Zelo verjetna razlaga se zdi, da pogosta raba tiskanega gradiva (knjige, revije, časopisi) tako okrepi splošne bralne strategije in besedišče, da se z lahkoto prenesejo tudi na drugi medij. Tudi v skladu s pregledom Peras in sod. (Peras et al., 2023) se zdi, da je “kakovost bralnega ekosistema” za bralno in kognitivno odpornost (resilience) pomembnejša od samega medija (glej dodatek 1). Po drugi strani pa je čas pred zasloni pri otrocih in najstnikih pogosto vezan na igre in videe, ne na poglobljeno branje, kakor v naši homogeni skupini. Zato bi v socialno bolj raznoliki populaciji lahko pričakovali, da bo SES (še posebej domača knjižnica, dostop do gradiv in starševske bralne prakse) močnejše moderiral učinek medija ter da bodo pri višjem SES razlike med mediji manjše, pri nižjem SES pa bi lahko delo na zaslonu dodatno obremenilo in oslabilo učence z manj stabilnimi bralnimi strategijami. Ta pilotna študija, predvsem zaradi svojega homogenega vzorca, tako dokazuje, da SES lahko deluje kot močan ojačevalec bralnih zmožnosti, s tem pa tudi kot posredni mediator razlik med papirjem in zaslonom. Če je nekdo izkušen bralec tiskanih knjig, se bo bolje znašel tudi pri branju z zaslonov. Toda: ali se bodo izkušnje pogostega zaslonkega uporabnika družbenih medijev in aplikacij prenesle tudi v učinkovito branje in učenje z zaslonov? Raziskave kažejo, da ne. Mladostniki so namreč sam medij, v katerem so reševali naloge, razumeli kot pokazatelja težavnosti nalog, pri čemer so tiskani medij ocenili kot bolj težaven/zahteven kot elektronski medij/zaslon (Sidi et al. 2017). Zakaj? Zato ker (metakognitivno) elektronske medije razumejo kot primerne za enostavne, prostočasne in zabavne aktivnosti (Facebook, Instagram, YouTube, WhatsApp, Tik Tok ...), medtem ko študijsko branje ponavadi še vedno poteka na papirju oz. s papirja. In ker so v prostem času učinkoviti na zaslonih, so po analogiji sklepali, da bo na zaslonih tudi učenje lažje (Aharony & Bar-Ilan 2018; Foasberg 2011).

Te hipoteze potrjujeta tudi eksperimentalna in kognitivna psihologija: “Široko sprejeto stališče je, da metakognitivne sodbe temeljijo na hevrističnih izhodiščih, ki izhajajo iz prepričanj in izkušenj, povezanih z reševanjem problemov, in ne odražajo nujno dejanske učinkovitosti. Stopnja zanesljivosti naših nadzornih procesov je torej omejena z veljavnostjo izhodišč, na katerih temeljijo.” (Koriat, A. 1997)

“Poznanost/domačnost pa je ... zavajajoče izhodišče: uporaba poznanih vsebin v problemih, ki zahtevajo logično razmišljanje, lahko zmanjša učinkovitost, saj pri ljudeh lahko izzove pristranskost, temelječo na predhodnih izkušnjah.” (Markovits, H. et al. (2015) “Metacognition and abstract reasoning”, Memory and Cognition)

4.2 Primerjava po posameznih senzorjih v luči obstoječe literature

Pri mežikanju se je pri mlajši skupini (PIRLS) kazal verjetno predvsem *učinek dejavnosti* (več mežikanja pri reševanju nalog kot pri branju), brez nedvoumnega učinka medija. Pri starejši skupini (PISA) pa je bilo število mežikov *na zaslonu sistematično nižje kot na papirju*. To je skladno predvsem z optometričnimi, pa tudi z nevrokognitivnimi raziskavami, ki kažejo upad frekvence mežikanja pri delu z zasloni in s tem večjo obremenitev očesne površine ter posledično tudi povečan vizualni napor (Benedetto et al., 2013; Blehm et al., 2005; Chu et al., 2014). Trajanje fiksacij je bilo pri dejavnosti *branja vprašanj* daljše na zaslonu v obeh skupinah, pri branju besedila in pisanju odgovorov pa razlik ni bilo. Hkrati so *daljše fiksacije že napovedovale slabše bralno razumevanje*. Ti vzorci so namreč skladni z raziskavami, ki daljše fiksacije in manj tekoče očesne premike povezujejo s povečano obremenitvijo ter s slabšim takojšnjim razumevanjem na zaslonu (Brishtel et al., 2018; Jeong & Gweon, 2021). Zaslon torej vedno ne poslabša nujno bralnega razumevanja, vendar pa je pot do rešitev in odgovorov pri delu z zasloni manj tekoča in vizualno napornejša, s tem pa kognitivno zahtevnejša.

Pri toničnem GSR signalu se medij pokaže v interakciji s skupino: pri skupini PIRLS se tonična raven med branjem vprašanj in odgovarjanjem dvigne na zaslonu (kar ponavadi zaznamuje večji kognitivni napor), pri skupini PISA pa na papirju. Fazični odzivi (število vrhov na minuto), torej znak vznemirjenja, pa so pri obeh skupinah pogostejši na papirju kot na zaslonu v fazi branja vprašanj in odgovarjanja. To je na prvi pogled v nasprotju z raziskavami, ki poročajo o višji elektrodermalni aktivnosti ob branju na zaslonu (Brishtel et al., 2018; Strouse et al., 2022). Analiza povezave med toničnim GSR in razumevanjem pa pokaže zanimiv "križni" vzorec: pri delu na papirju so namreč v obeh skupinah višje tonične vrednosti povezane z boljšim razumevanjem, pri delu na zaslonu pa z slabšim. To bi lahko nakazovalo, da isti fiziološki signal v različnih kontekstih odraža različne kombinacije napora, motivacije in (pre)obremenitve.

EEG rezultati predstavljajo delno reprodukcijo vzorcev, ki so jih našli Zivan in sod (Zivan et al., 2023): pri branju besedila, branju vprašanj in odgovarjanju je v theta območju na centralnih (in pri odgovarjanju tudi levih) elektrodah moč signala, pričakovano, višja na zaslonu. Na zaslonu beležimo tudi višjo moč v alpha območju na centralnih in posteriornih elektrodah. TBR (theta/beta razmerje) je med branjem besedila na zaslonu povišano v obeh skupinah, kar je skladno z interpretacijo zmanjšane usmerjene pozornosti in večje kognitivne obremenitve. V območju gamma (ki zaznamuje usmerjeno dejavnost in koncentracijo) so vrednosti na parietalnih/okcipitalnih elektrodah pri branju in odgovarjanju na zaslonu nižje, podobno kot v omenjeni študiji.

Medsebojna korelacija kazalcev je, skladno z literaturo o slušnem naporu, relativno nizka; konsistentno se pojavi le negativna povezava med TBR in gamma ter pozitivna med TBR in frekvenco mežikanja.

Vse to močno govori v prid tezi, da branje in reševanje nalog na zaslonu zahteva več kognitivnih virov, večji kognitivni napor in drugačno razporeditev pozornosti kot branje na papirju, tudi če končni rezultat testa bralnega razumevanja ostane podoben. Posebej zgovorno je, da lahko na podlagi kombinacije očesnega sledilca, GSR in EEG kazalcev s klasičnimi klasifikatorji (zlasti "naključnim gozdom") zelo dobro napovemo, ali je udeleženec delal na papirju ali na zaslonu (AUC ~0.96–0.98), k čemur največ prispevajo odčitki gamma, theta in alpha moči, tonični GSR in frekvenca mežikanja. Z drugimi besedami: če bi sodil samo po rezultatih senzorjev, bi računalnik zanesljivo "vedel", ali mladostnik bere knjigo ali zaslon. Kako te razlike zaznajo mladostniki sami, pa bi bilo treba še podrobneje raziskati.

4.3 Vpliv medija na pozornost in napor glede na starost

Na prvo vprašanje – *ali medij vpliva na pozornost in/ali napor* – odgovarjajo predvsem nevrofiziološki kazalci, ki kažejo, da je proces reševanja na zaslonu kognitivno zahtevnejši in pozornostno manj učinkovit, zlasti pri fazah, ki zahtevajo integracijo besedila in vprašanj ter načrtovanje odgovorov. Hkrati pa odsotnost razlik v končnem razumevanju pri relativno kratkih in dobro strukturiranih nalogah nakazuje, da se s klasičnim branjem podprti otroci in najstniki (tako "usmerjeni" sta bili namreč naši testni skupini) tem razlikam uspešno prilagodijo – a očitno z nekaterimi "skritimi stroški" na ravni živčnega sistema. Ali to velja za celotno populacijo, je treba še raziskati.

Med skupinama pa se kaže tudi več pomembnih razlik. Poleg boljših rezultatov testa bralnega razumevanja, ki nakazuje razvojno naprednejše bralne spretnosti in večjo izkušnost s testnimi situacijami, najdemo med skupinama pomembne razlike v nevrofizioloških odzivih. Pri mlajših otrocih je stopnja mežikanja bolj ali manj konstantna, starejši pa že kažejo tipičen "zaslonski" vzorec z znižanim mežikanjem pri delu na zaslonu. To lahko odraža daljše izkušnje in adaptacijo na digitalno delo ter večjo "navajenost" in "sprijaznjenost" z zaslonim okoljem. Pri mlajši skupini PIRLS se povišane tonične vrednosti med vprašanji/odgovarjanjem pojavljajo pri delu z zasloni, pri starejši skupini PISA pa na papirju. Zelo verjetna in večkrat preizkušena interpretacija, ki jo omenjamo na koncu poglavja 4.1.1, je, da ima pri starejših udeležencih papir status "resnejšega" in tradicionalno bolj uporabljanega testnega medija (večja angažiranost, tudi testna anksioznost), medtem ko zaslon ohranja status bolj vsakdanjega, neformalnega, neobvezujočega, pristočnega okolja.

4.4 Omejitve, odprta vprašanja in predlogi za nadaljnje delo

Ta pilotna raziskava ima več pomembnih omejitev. Predvsem gre za pilotno raziskavo z majhnim vzorcem, ki je za nameček še zelo homogen glede na značilnosti SES, kar zmanjšuje možnost generalizacije, opozarja pa, prav zaradi svoje homogenosti, na nekatere morebitne moderacijske učinke SES (razvite bralne navade). Drugič, uporabljena so bila gradiva PIRLS/PISA; gre za besedila in vprašanja, ki so dobro strukturirana, normirana in relativno kratka. V realnem šolskem okolju so besedila in naloge lahko daljše, manj strukturirane in bolj interaktivne (zlasti na zaslonu). Tretjič, vsaka kombinacija medij + zgodba je bila izmerjena enkrat, brez ponovitev ali longitudinalnega sledenja; učinka učenja ali utrujenosti pri ponavljajočem se branju na zaslonu tako ne moremo oceniti. In slednjič, raziskava ima tehnične omejitve: 16-kanalni sistem EEG sistem in analiza klasičnih frekvenčnih pasov omogočata dober, a razmeroma grob pogled; prostorsko bolj goste mreže in naprednejše metode (npr. konektivnost, fazno zaklepanje) bi lahko razkrile dodatne vzorce.

Nadaljnje delo bi zato moralo predvsem vključevati večkratno razširitev testnega vzorca na 1) večje, 2) SES bolj raznolike in 3) starostno bolj raznolike vzorce, da bi tako preverili, ali starost, SES in domače bralne/digitalne navade vplivajo na medijsko posredovano razumevanje in nevrofiziološke kazalce. Vključitev različnih tipov digitalnega gradiva (multimedijsko, interaktivno, hiperpovezave) pa bi po drug strani lahko osvetlila naravo digitalnih funkcij in njihov specifični vpliv na bralno razumevanje. Dodatne informacije o razmerjih med senzorji in bralnim procesom bi nam lahko nudila tudi drugačna eksperimentalna zasnova in drugačna konfiguracija senzorjev, ki bi omogočila merjenje zeničnega odziva in bolj natančne analize sledenja pogledu glede na bralno vsebino, pa tudi drugačne analize EEG in GSR signala.

5.0 Sklep

Skupno gledano pilotna študija kaže, da *medij vsekakor vpliva na branje*: čeprav se razlike v grobem bralnem razumevanju v kontroliranih pogojih morebiti ne pokažejo (na primer, zaradi homogenosti skupine), senzorji zanesljivo zaznajo drugačen "nevrokognitivni odtis" branja na zaslonu, katerega skupni imenovalci bi lahko opredelili kot **večji kognitivni napor**, tako iz notranjih (nevrokognitivnih) kot iz zunanjih vzrokov (značilnosti zaslonov, kot je oddajanje svetlobe, barva svetlobe, osveževanje ...) V naslednjem raziskovalnem koraku bi bilo smiselno preveriti, kdaj in pri katerih skupinah se ti "skriti" stroški začnejo prelivati tudi v opazne razlike v znanju, učnem uspehu in, ne nazadnje, zdravju – ter kako lahko pedagoško-didaktične izbire, odločitve in prakse ta prehod omilijo ali preprečijo.

In v tej smeri so tudi že bile opravljene nove raziskave, izdana poročila in kompleksna navodila, na katera bi želeli na koncu opozoriti.

6.0 Nove raziskave in priporočila

Metaanalize zadnjega desetletja vztrajno kažejo, da branje na zaslonih praviloma vodi do **nižjega razumevanja** kot branje istega besedila na papirju – posebej pri **informativnih (ekspozitornih) tekstih** in ob **časovnih omejitvah**. Ne le klasična metaanaliza (Delgado idr., 2018), ki smo jo že omenili in poroča o jasni, četudi morda ne veliki, **prednosti tiska**, o podobnih ugotovitvah poročajo tudi Singer in Alexander (2017) ter nekateri kasnejši pregledi.

Nova metaanaliza, osredotočena na **tablice/ročne naprave** (Salmerón idr., 2023), tudi potrjuje **vztrajno prednost tiska**, četudi so ročne naprave uporabniško bližje knjigi kot računalniški zasloni. In zaključuje: "Branje s tiskanih medijev je za učence najbolj učinkovit način razumevanja."

Študije tudi dosledno poročajo o **metakognitivni nekalibriranosti** pri branju na zaslonih (učenci precenijo, koliko razumejo), kar pozneje znižuje uspeh na zahtevnejših vprašanjih (Lee, & N. Bosch, 2025). Eksperimenti v razredih in laboratoriju celo kažejo, da **večopravilnost na prenosniku** škoduje tako uporabnikom kot bližnjim sošolcem (učinek, poimenovan "parazitska motnja") (Sana, F. & al., 2013). Študije tudi kažejo, da že **sama prisotnost pametnega telefona** (četudi je izklopljen in nedotaknjen) **zniža razpoložljive kognitivne kapacitete** ("brain drain"), kar so potrdile tudi kasnejše raziskave (Pardo & al., 2022).

Ob vsem tem vzporedne raziskave vedno znova dokazujejo, da **rokopisne zabeležke** vodijo do **boljšega razumevanja konceptov** kot tipkanje, ker učenca/dijaka/študenta prisiljujejo v **generativno (ponovno) obdelavo, računalniški, dobesedni zapiski pa ne** (Lee, B.J., 2021). Najnovejše **nevrofiziološke** študije (EEG) so 2023/2024 pokazale, da je **pisanje z roko**, ki aktivira **bolj razvejane možganske mreže** kot tipkanje, ključno pri **kodiranju informacij v dolgoročni spomin** (tipkanje in tapkanje pa ne). Najnovejša raziskava (2025) o zgodnjem opismenjevanju celo opozarja, da zamenjava **vaje rokopisa s tipkanjem lahko zavira začetne korake v učenju črk in branja** (Ibaibarriaga, G & al.).

Zakaj je tako? Ko se otrok uči pisanja, s svojo roko oblikuje vse oblike, štrline in zavoje posamezne črke **in njene povezave z drugimi črkami**. Črka postopoma nastaja pred njim, kar lahko **čuti, vidi, sliši** in včasih (če, na primer, uporablja flomaster) tudi **voha**. S tem se aktivirajo in med seboj povezujejo številni možganski centri, kar pripomore k boljšemu pomnjenju, oblikovanju spominov in priklicu.

Pri tipkanju (tapkanju) pa **z enakim gibom “oblikujemo” vsako črko, ki se že v celoti izpisana** pojavi na ekranu. Možgani pri tem nimajo veliko dela, kar je še posebej škodljivo tja do 10. leta, ko se otroci še učijo brati in pisati:

»Pisanje na roko zahteva natančen motorični nadzor prstov in prisili učence, da so pozorni na to, kar počnejo. Tipkanje pa temelji na mehanskih in ponavljajočih se gibih, pri katerih je zavedanje zamenjano za hitrost. Naši rezultati kažejo, da se ob vključevanju gibov pisanja na roko kot učne strategije aktivira večji del možganov, kar vodi v oblikovanje bolj zapletenih povezav v možganskih mrežah. Zdi se, da gibi, povezani s tipkanjem, teh mrež povezanosti ne aktivirajo na enak način kot pisanje na roko. Sočasni prostorsko-časovni vzorec vida, motoričnih ukazov in proprioceptivne povratne informacije, ki ga omogočajo natančni gibi roke in prstov, pri tipkanju manjka, saj je za tvorbo celotne želene oblike potreben zgolj preprost pritisk na tipko« (Longcamp idr.)

»Pri pisanju na roko so vzorci možganske povezanosti bistveno bolj zapleteni kot pri tipkanju na tipkovnici, kar potrjujejo razširjeni vzorci theta/alpha koherence povezanosti med mrežnimi vozlišči in točkami v temenskih in osrednjih možganskih regijah. Obstoječa literatura kaže, da so vzorci povezanosti v teh možganskih področjih in pri teh frekvencah ključni za oblikovanje spomina ter kodiranje novih informacij in so zato koristni za učenje. Ugotovitve kažejo, da prostorsko-časovni vzorec iz vizualnih in proprioceptivnih informacij,¹² pridobljenih z natančno nadzorovanimi gibi roke pri uporabi pisala, pomembno prispeva k možganskim povezovalnim vzorcem, ki spodbujajo učenje. Raziskovalci zato poudarjajo, **da morajo biti otroci že od zgodnjega otroštva v šoli izpostavljeni dejavnostim pisanja na roko, da se vzpostavijo nevronske vzorci povezanosti, ki možganom zagotavljajo optimalne pogoje za učenje**« (Van der Weel, Van der Meer, 2020).

Ugotovljeno je bilo tudi, da vadba pisanja na roko ne **izboljšuje zgolj natančnosti črkovanja** (Cunningham in Stanovich, 1990) ter spomina in priključa (Longcamp et al., 2006), temveč tudi **olajša prepoznavanje in razumevanje črk** (Longcamp et al., 2005, 2008; Li in James, 2016). O tovrstnih koristih za učenje poročajo ne glede na to, ali posameznik piše na roko s tradicionalnim pisalom ali svinčnikom ali pa z digitalnim peresom (Osugi et al., 2019). Možganske raziskave prav tako kažejo, da na učenje ne vpliva katera koli motorična dejavnost, temveč da **je ključno natančno usklajevanje zapletenih gibov roke pri skrbnem oblikovanju vsake črke s peresom** (Pei et al., 2021). Očitno pero sproži drugačne osnovne nevrološke procese, ki možganom zagotavljajo optimalne pogoje za učenje in pomnjenje.

Mnogi (predvsem visokošolski) učitelji zato menijo, da računalniki (in internet) delujejo kot moteč dejavnik, saj odvrta pozornost od razprave pri pouku in od učenja študentov (npr. Yamamoto, 2007). V nasprotju s tem pa študenti pogosto poročajo, da verjamejo, da so prenosni računalniki pri pouku koristni (npr. Barak, Lipson in Lerman, 2006). In, zanimiv fenomen, tudi kadar študenti priznajo, da so prenosniki moteči, so prepričani, da koristi presegajo slabosti (Kay in Lauricella, 2011).

V tej (bolj navidezni) dilemi empirične raziskave večinoma podpirajo stališče visokošolskih učiteljev: ugotavljajo, da študenti, ki pri predavanjih uporabljajo prenosnike, **niso osredotočeni na pouk** (Kay in Lauricella, 2011; Sovern, 2013), **dosegajo slabše akademske rezultate** (Fried, 2008; Kraushaar in Novak, 2010) in so celo **sami manj zadovoljni s svojim izobraževanjem kot njihovi vrstniki**, ki pri pouku ne uporabljajo prenosnikov (Wurst, Smarkola in Gaffney, 2008).

Pandemija je digitalizacijo šol še pospešila, vendar je postala tudi nekakšen “naravni eksperiment”, ki je pokazal meje zaslonov v izobraževanju. UNESCO je tako v svojem **Global Education Monitoring**

¹² Propriocepcija je zaznavanje svojega telesa in samega sebe v prostoru.

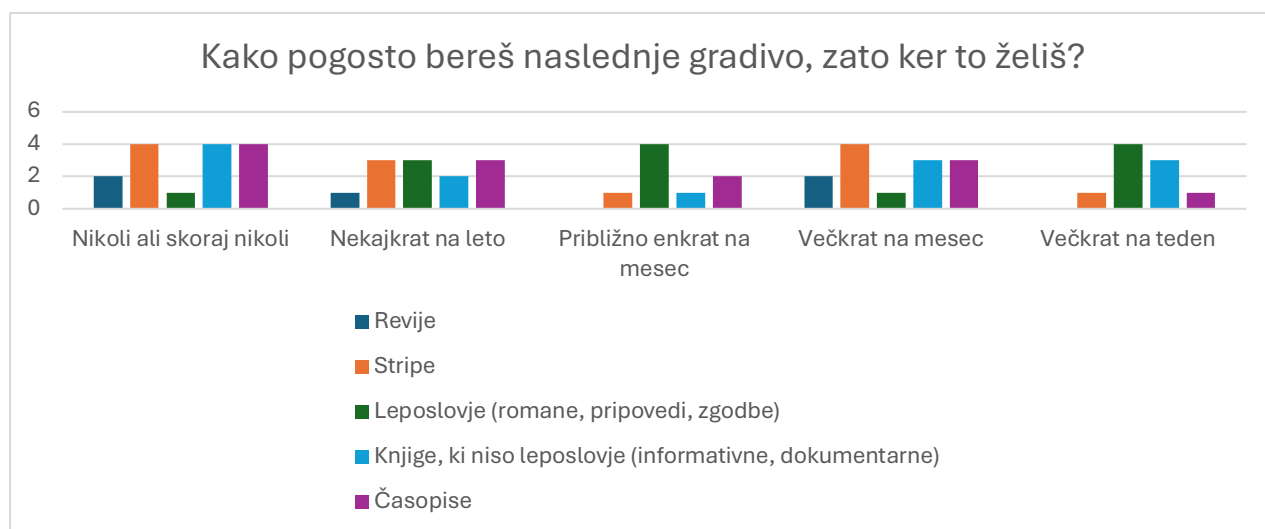
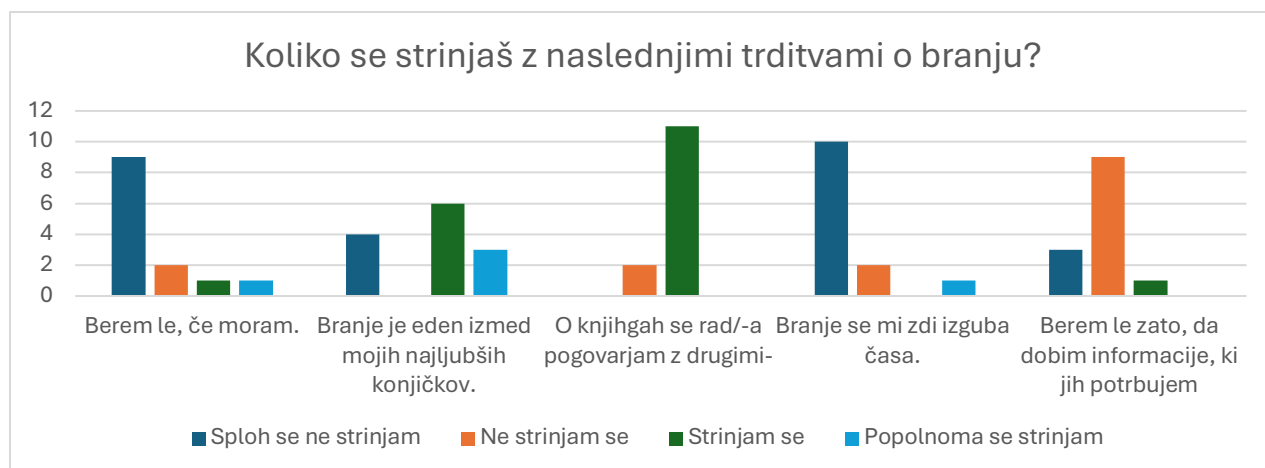
poročilu 2023 izrecno opozoril, da je treba tehnologijo v razrede uvajati **samo takrat, ko verodostojno podpira učne izide**, sicer lahko poveča **neenakosti, razprši pozornost in odpre vprašanja zasebnosti** (Technology in Education: A Tool on Whose Terms, 2023).

V istem obdobju so tudi OECD-evi podatki iz raziskave PISA 2022 pokazali močno **negativno povezanost** med **prostočasno** uporabo digitalnih naprav in dosežki (matematika) ter razširjeno **motenje pozornosti** zaradi lastnih zaslonov in zaslonov vrstnikov. Poročilo navaja, da so **prepovedi pametnih telefonov** ena od redkih šolskih politik z zaznavnim vplivom – seveda pod pogojem, da se dosledno uveljavljajo (Students, digital devices and success, 2024).

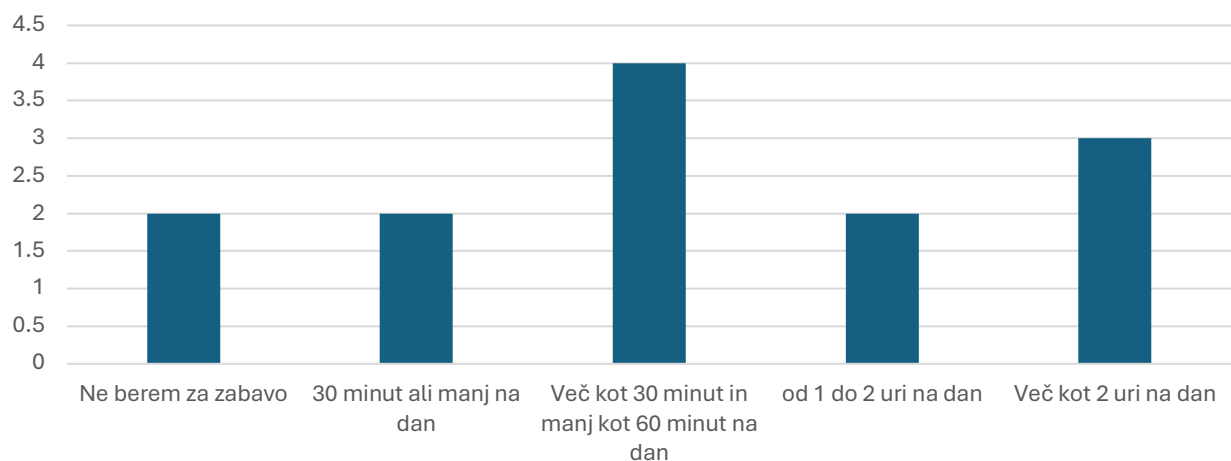
Istočasno nekatere države ponovno vlagajo v **tiskane učbenike in se odpovedujejo digitalnim** (npr. Finska, Švedska; cilj: “en učbenik na učenca na predmet”, dodatna sredstva 2023–2025).

Vsa ta opozorila so slovenske šolske oblasti zaobšle oz. so jih ignorirale. Pametni telefoni so še vedno v učilnicah, in sicer kar v šolskih torbah. Kar pravzaprav pride prav, saj ga Ministrstvo za vzgojo in izobraževanje priporoča celo kot učni pripomoček – za učenje branja (z aplikacijo KOBI). Sapienti sat!

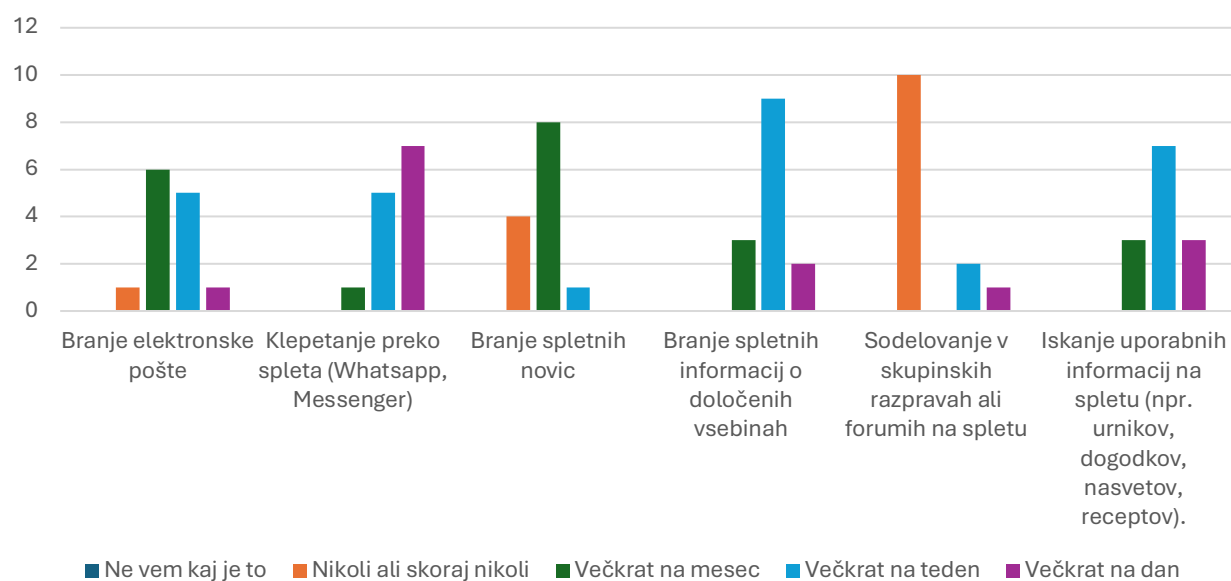
7.0 Dodatek: rezultati SES vprašalnika v grafih (branje in uporaba zaslonских medijev)

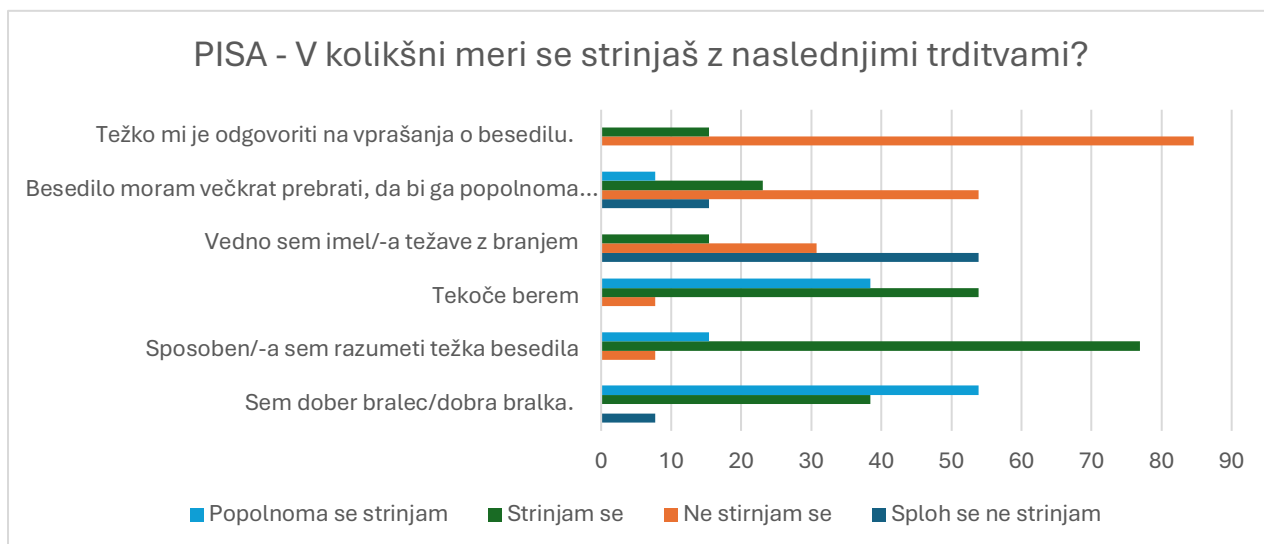
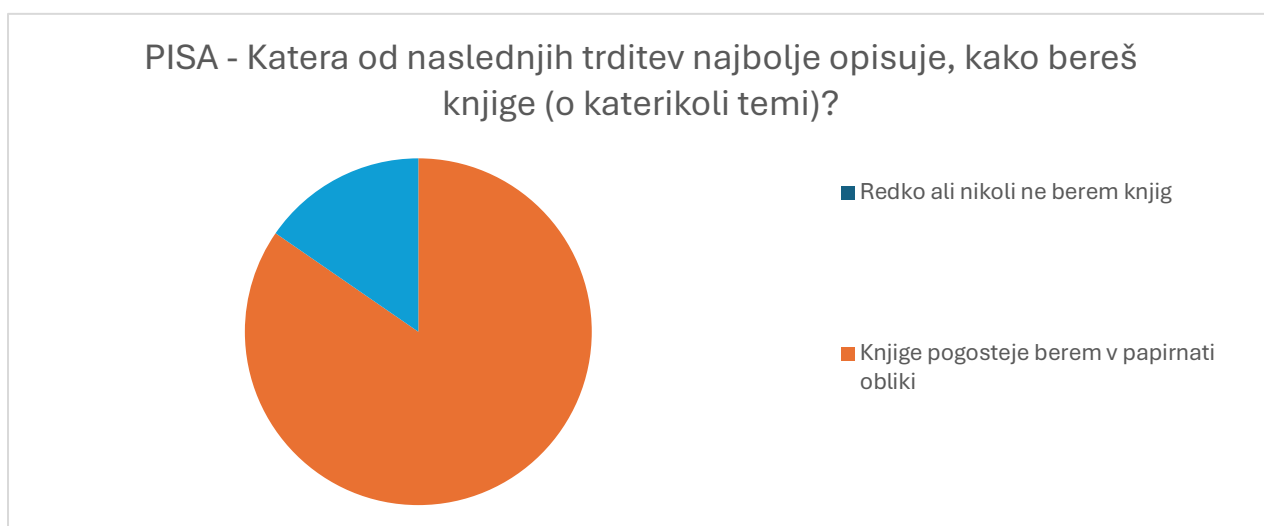
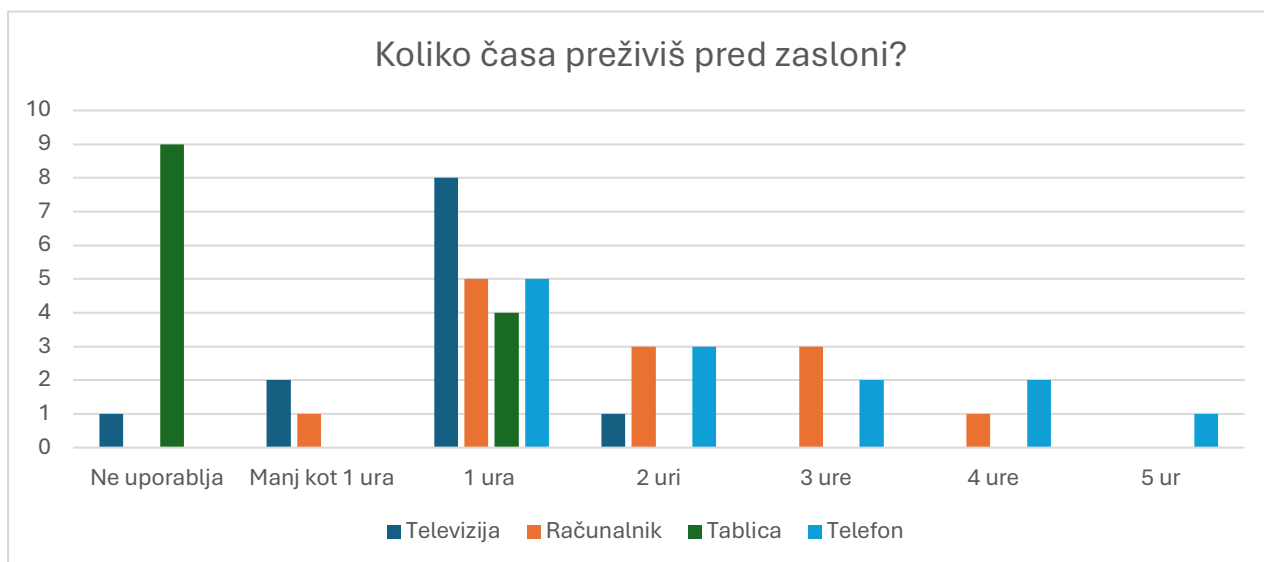


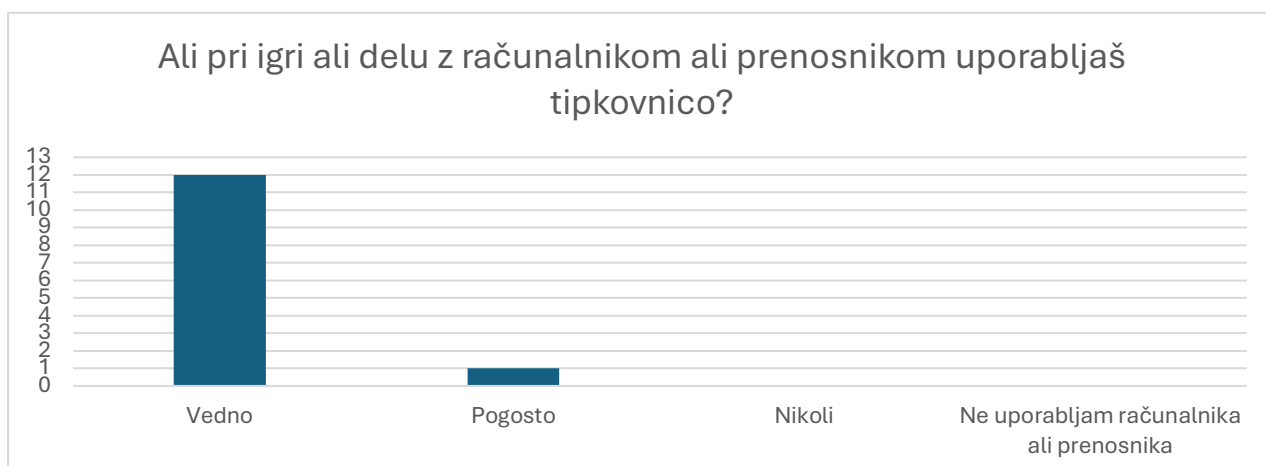
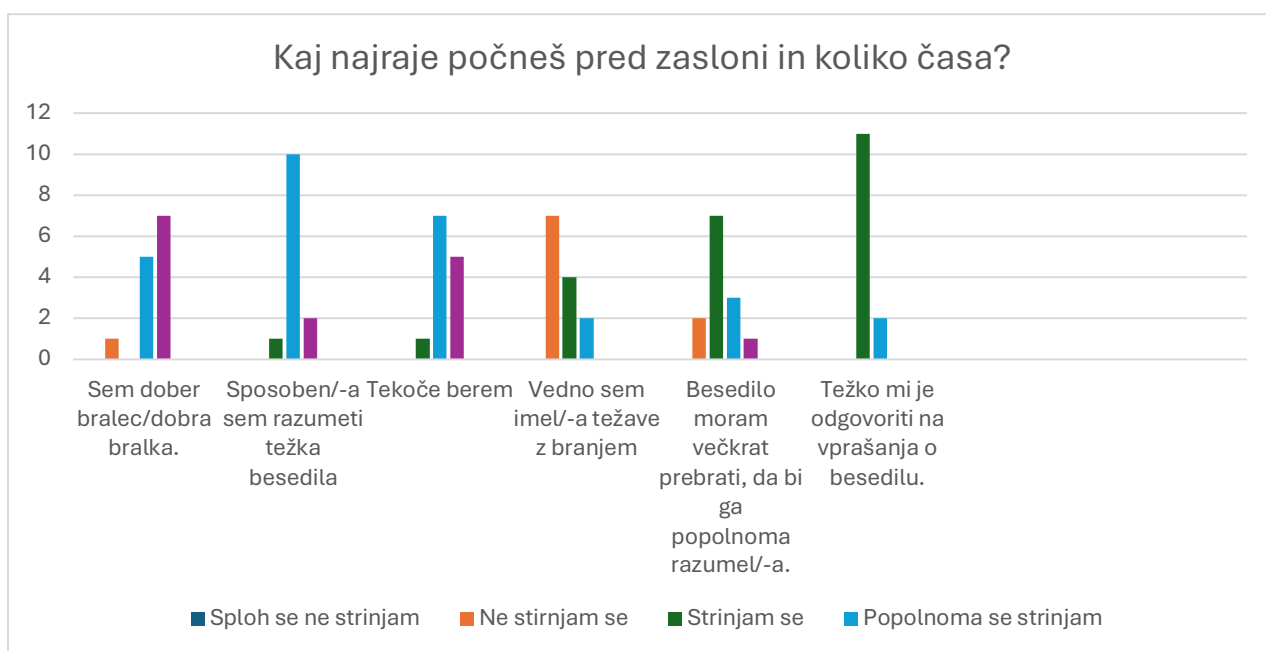
Približno koliko časa navadno nameniš branju za zabavo?

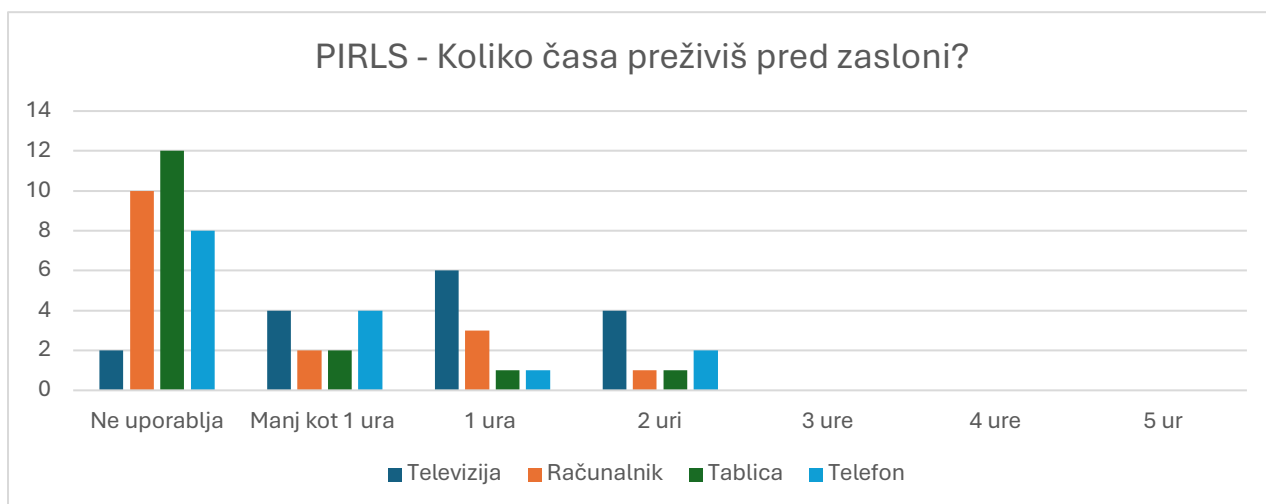
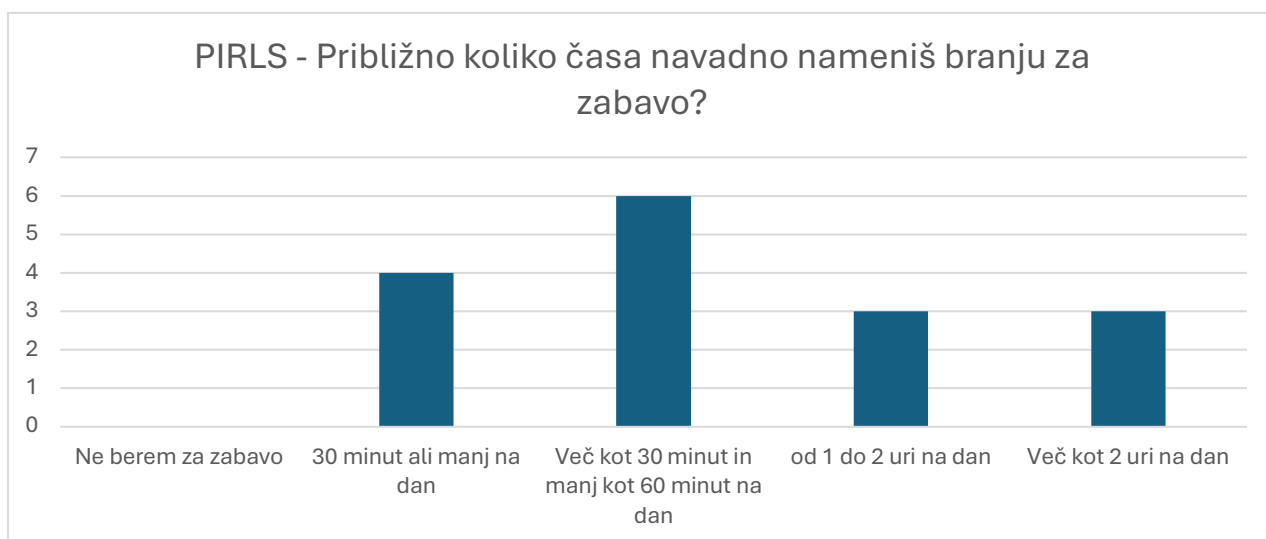
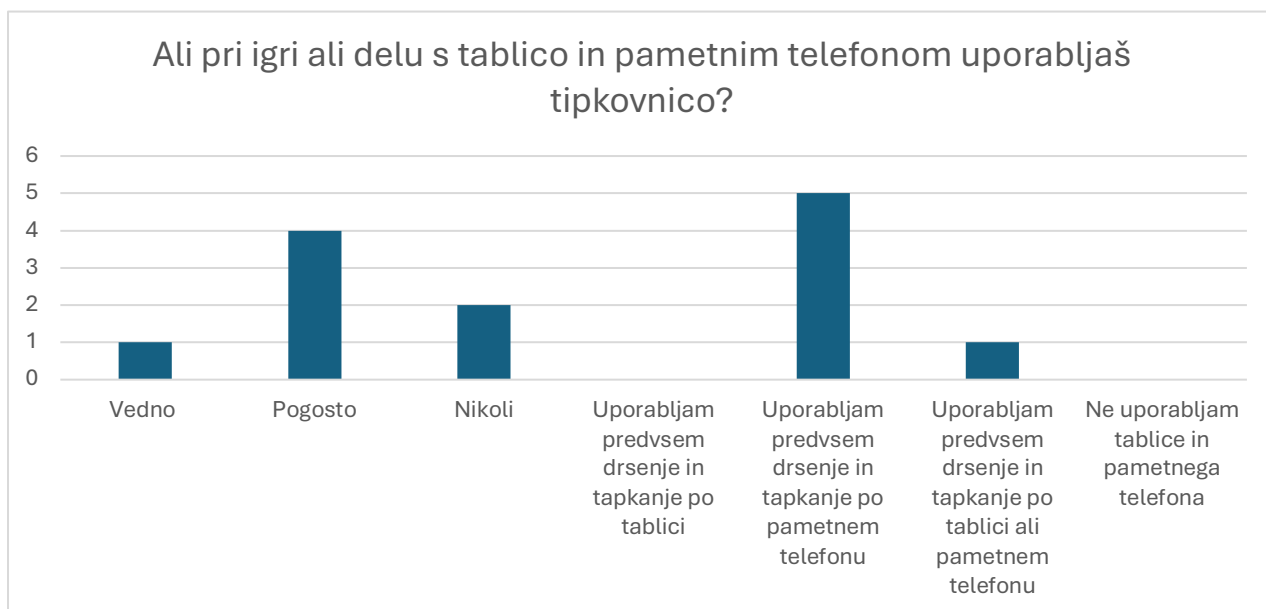


Kako pogosto se ukvarjaš z naslednjimi bralnimi aktivnostmi?

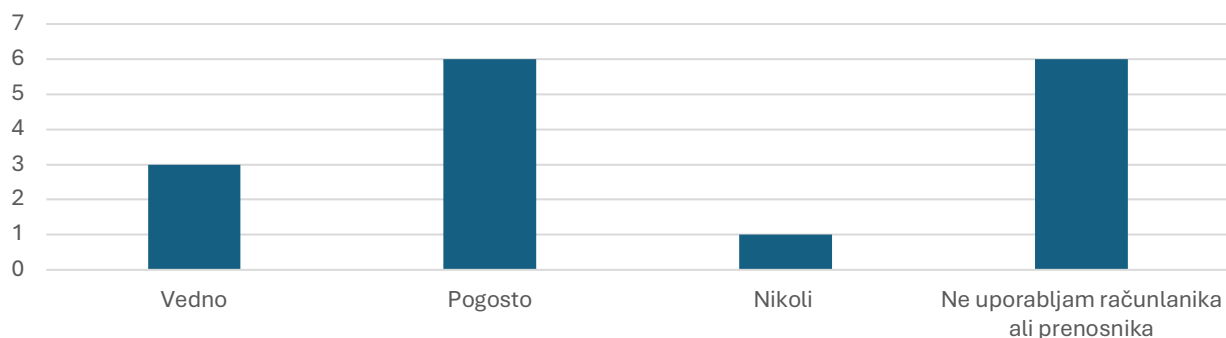




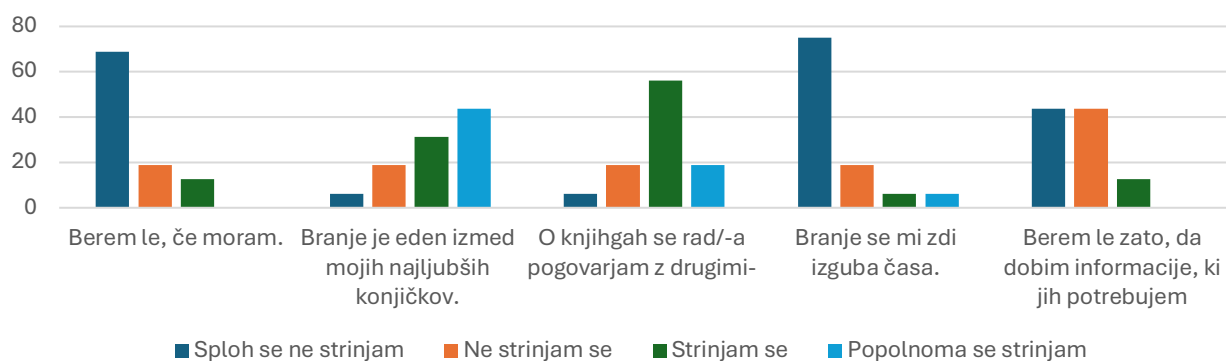




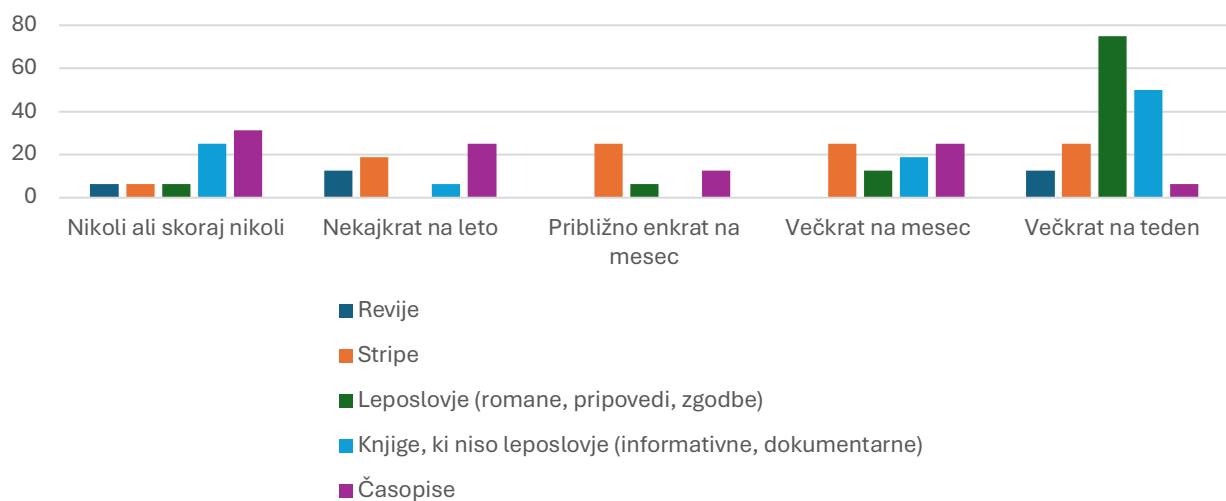
PIRLS - Ali pri igri ali delu z računalnikom ali prenosnikom uporabljaš tipkovnico?



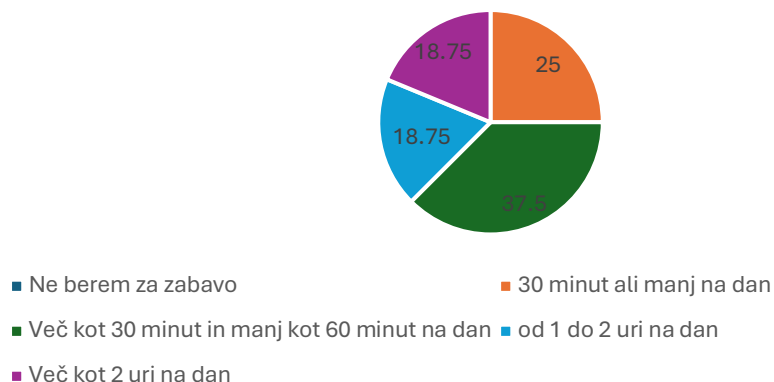
PIRLS - Koliko se strinjaš z naslednjimi trditvami o branju?



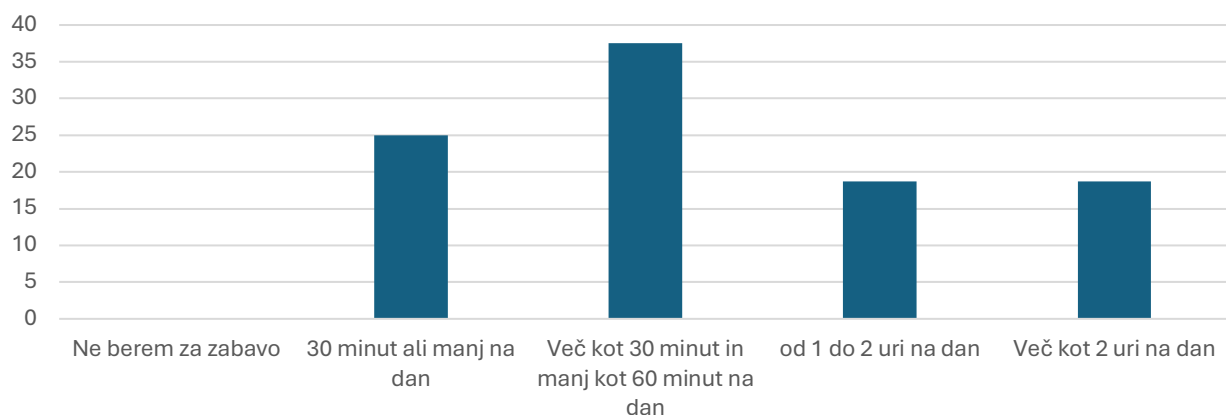
PIRLS - Kako pogosto bereš naslednje gradivo, zato ker to želiš?



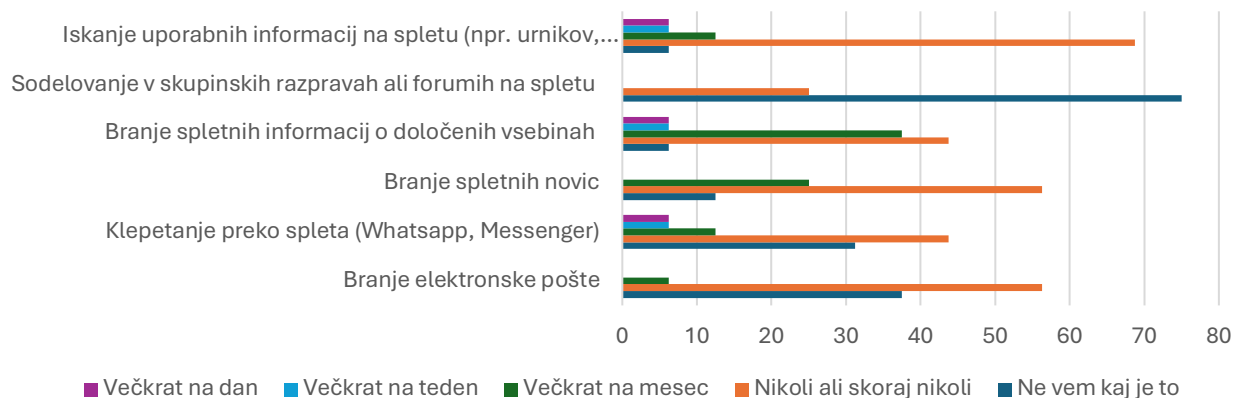
PIRLS - Približno koliko časa navadno nameniš branju za zabavo?



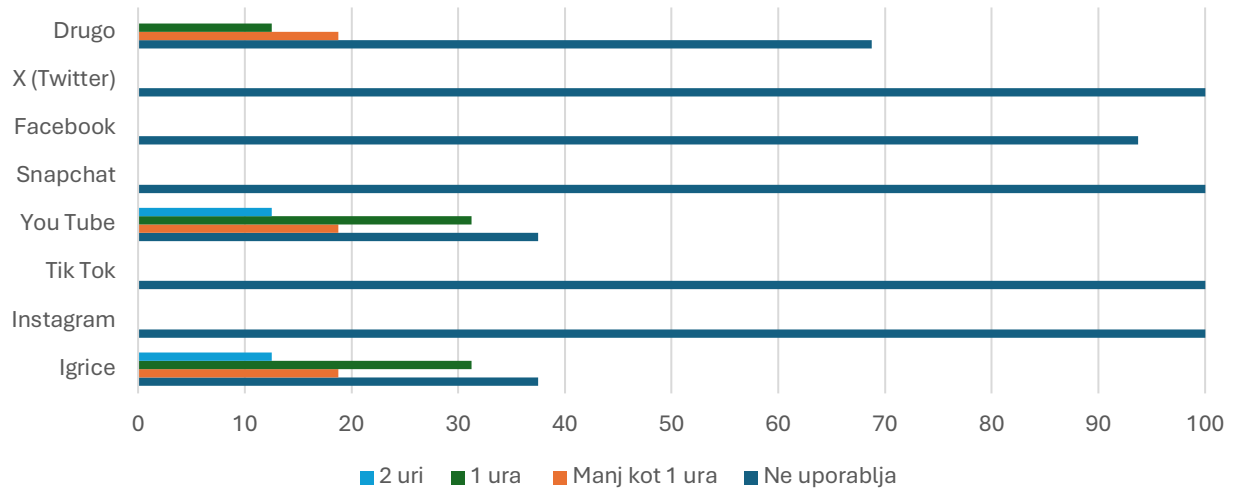
PIRLS - Približno koliko časa navadno nameniš branju za zabavo?



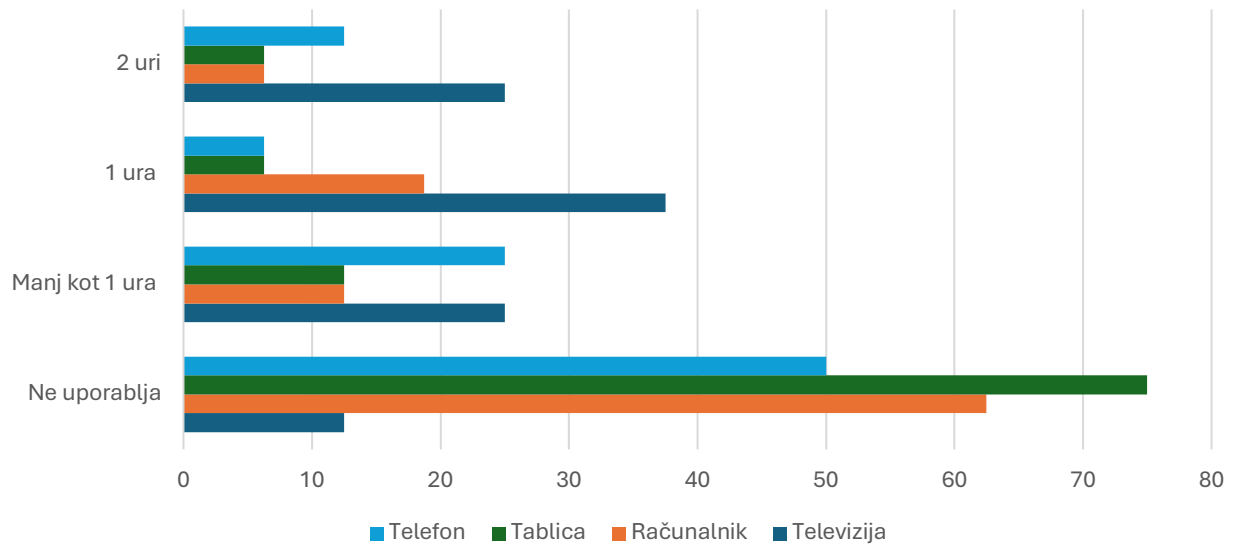
PIRLS - Kako pogosto se ukvarjaš z naslednjimi bralnimi aktivnostmi?



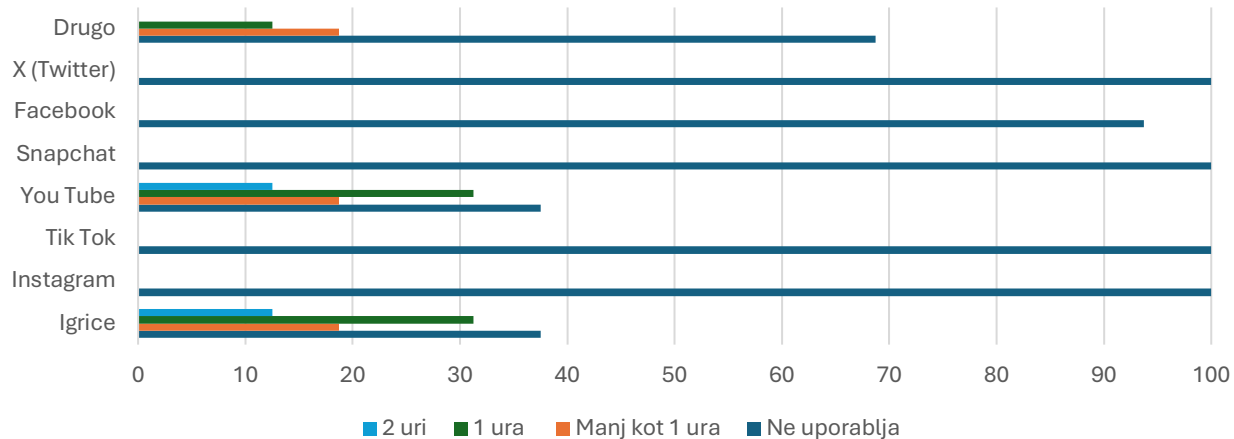
PIRLS - Kaj najraje počneš pred zasloni in koliko časa?



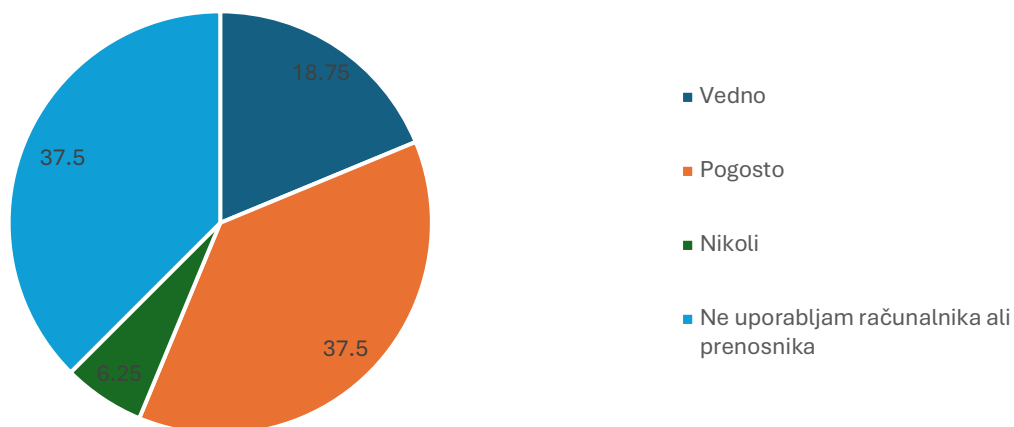
PIRLS - Koliko časa preživiš pred zasloni?



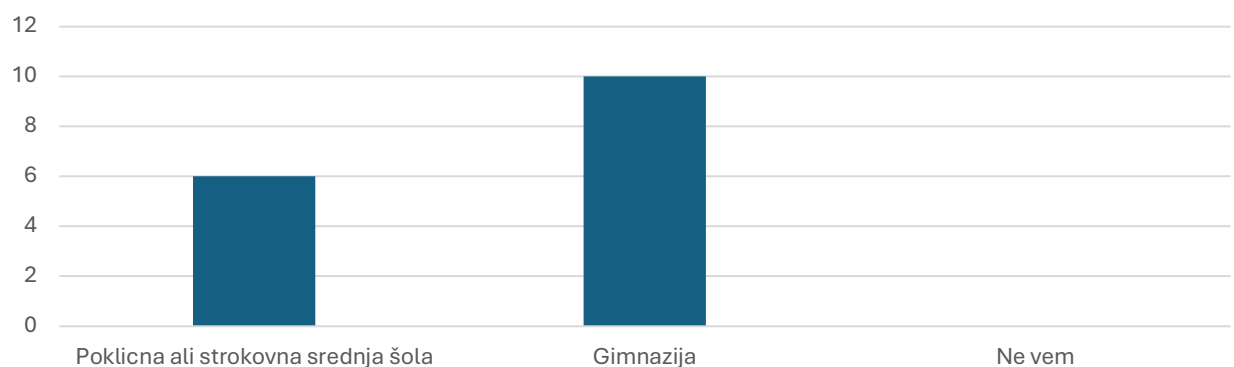
PIRLS - Kaj najraje počneš pred zasloni in koliko časa?

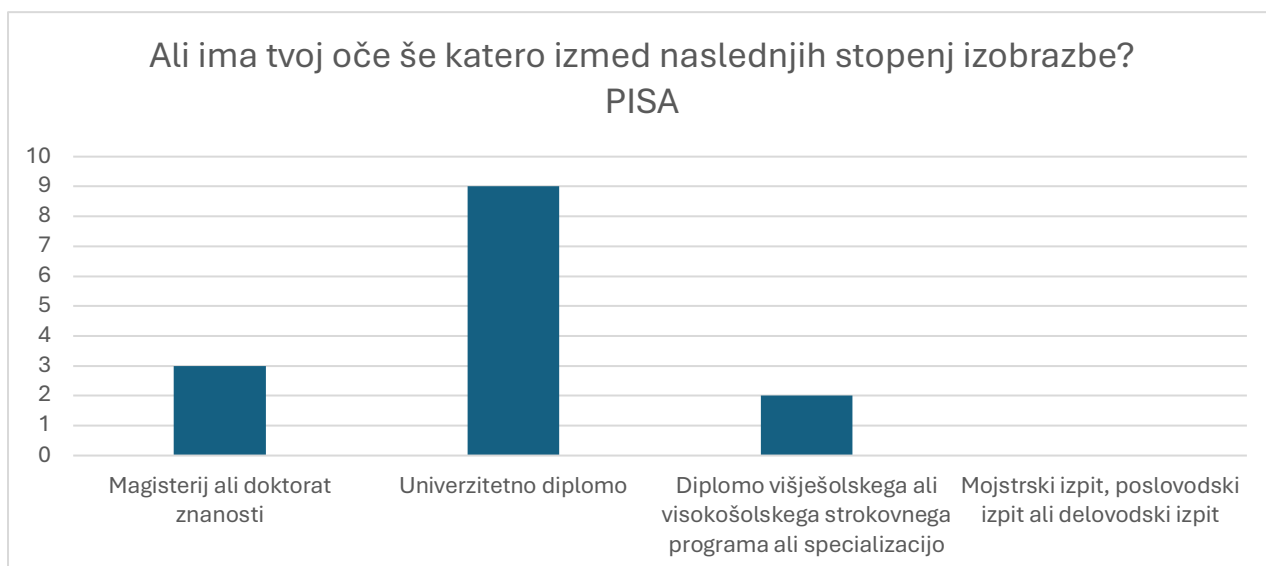
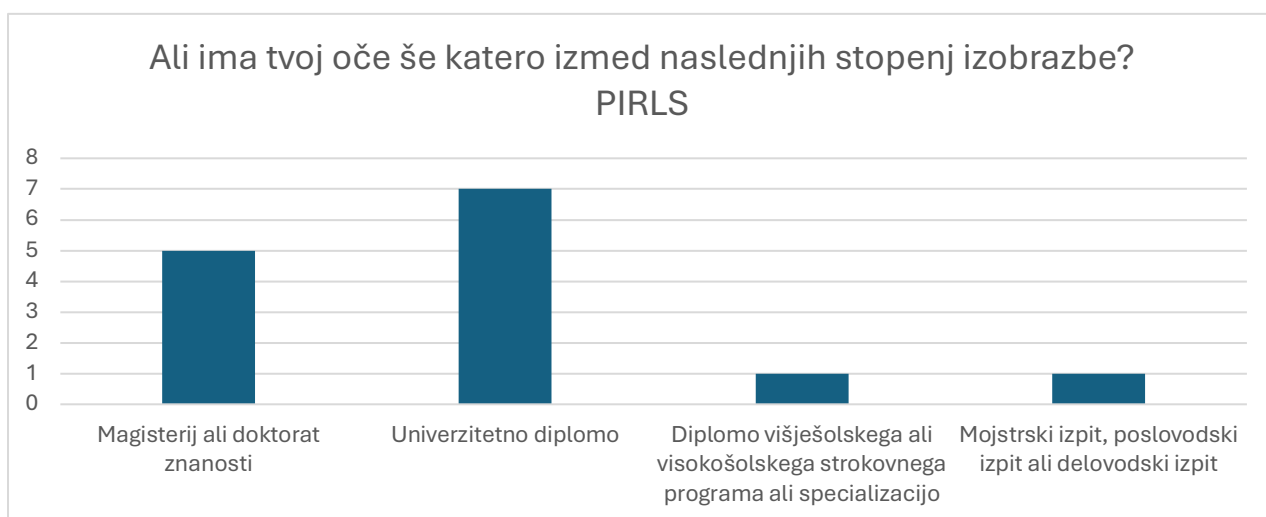
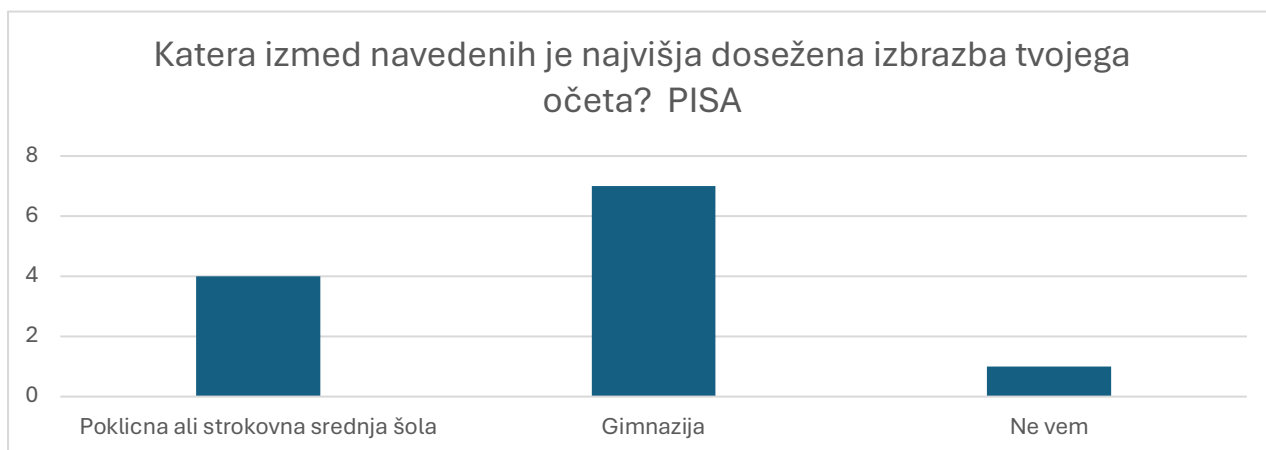


PIRLS - Ali pri igri ali delu z računalnikom ali prenosnikom uporabljaš tipkovnico?

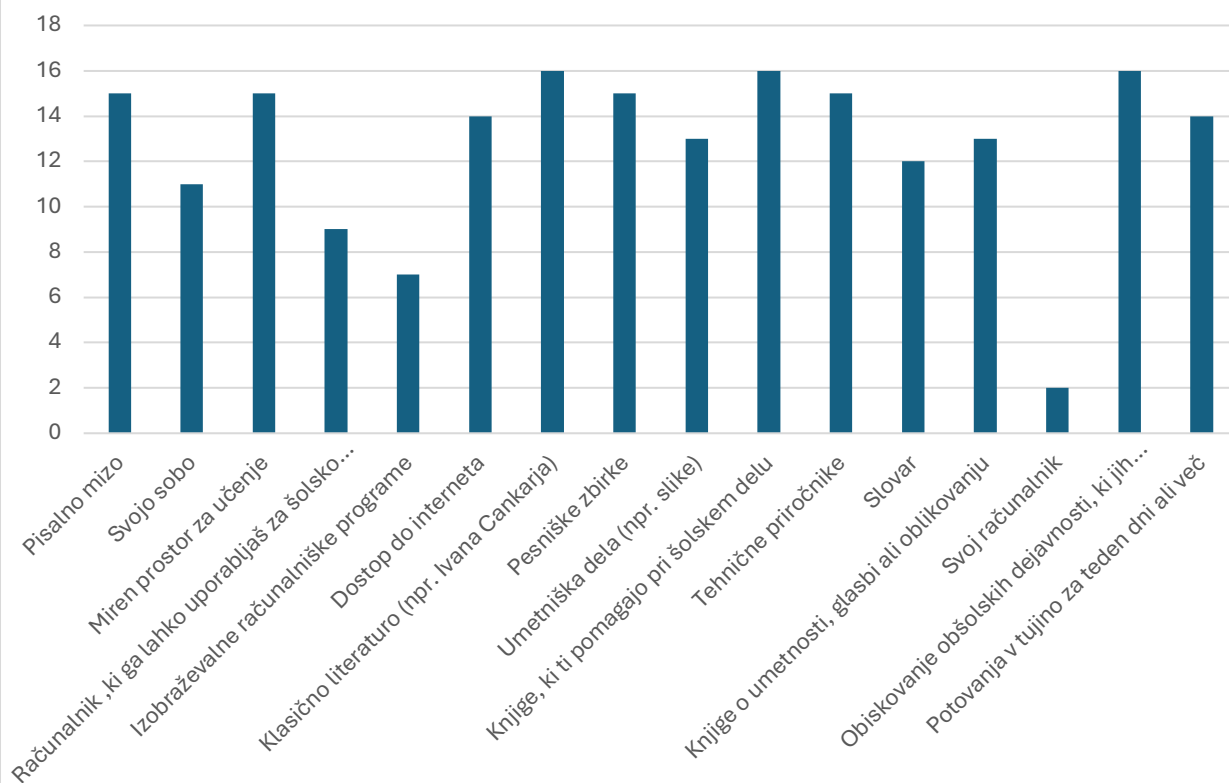


Katera izmed navedenih je najvišja dosežena izkazba tvojega očeta? PIRLS

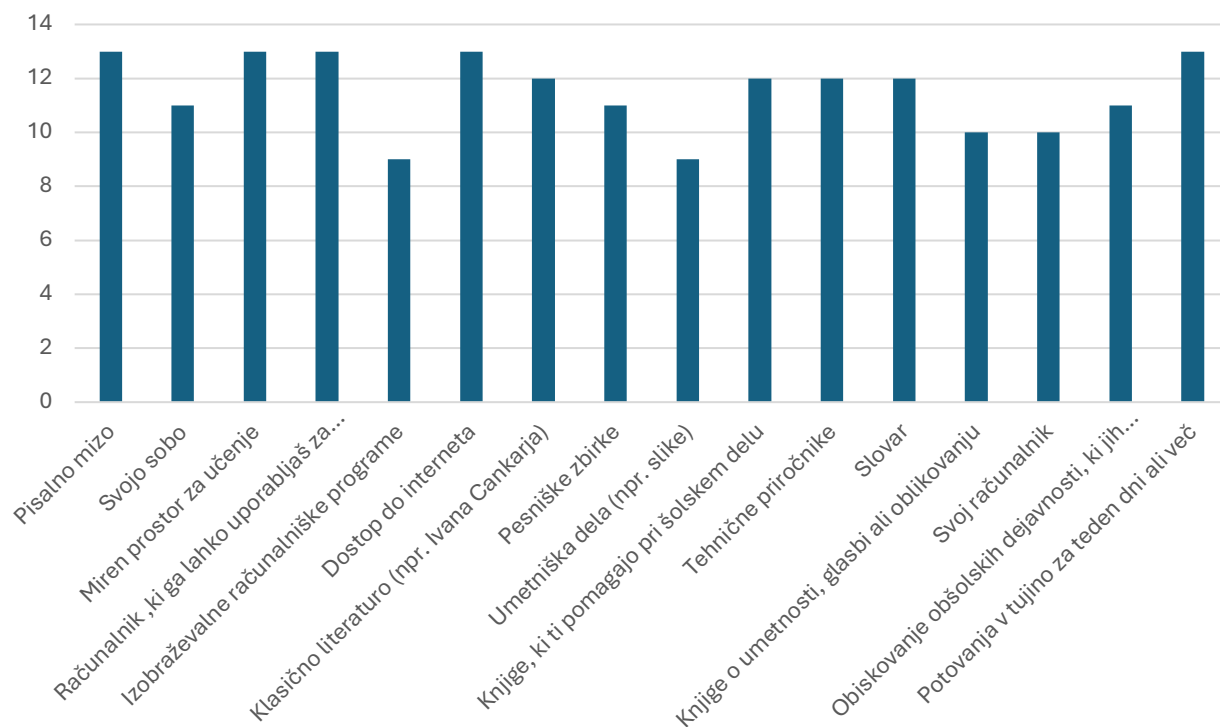




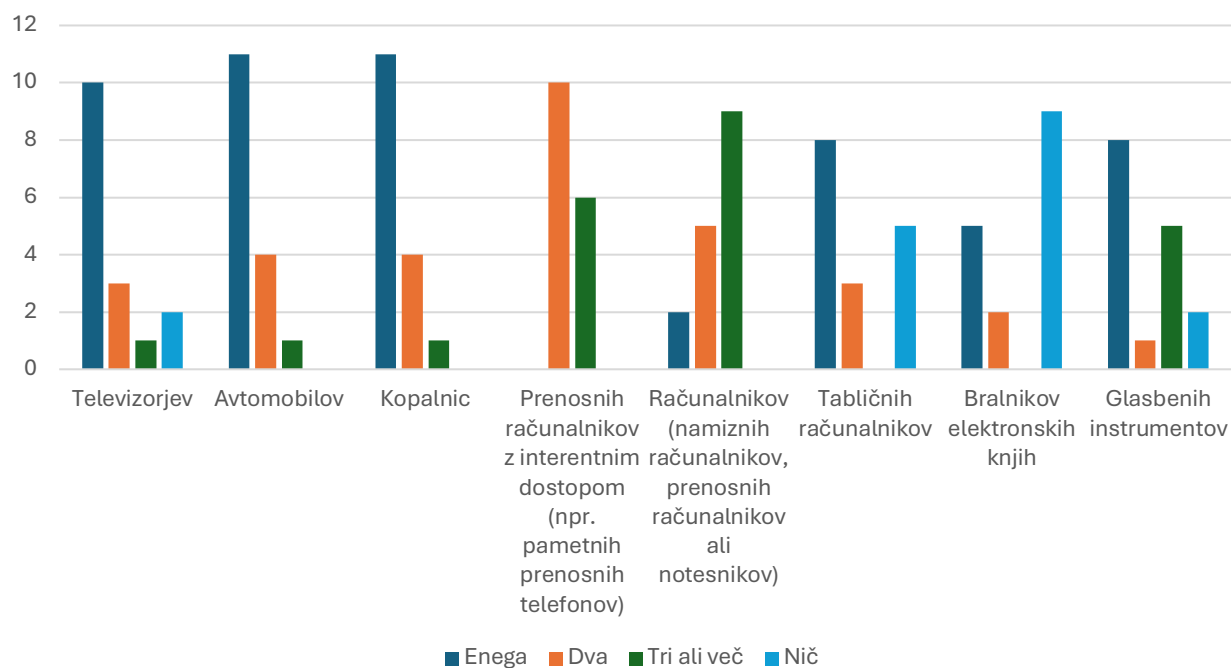
Kaj izmed naštetega imaš oziroma imate dom? PIRLS



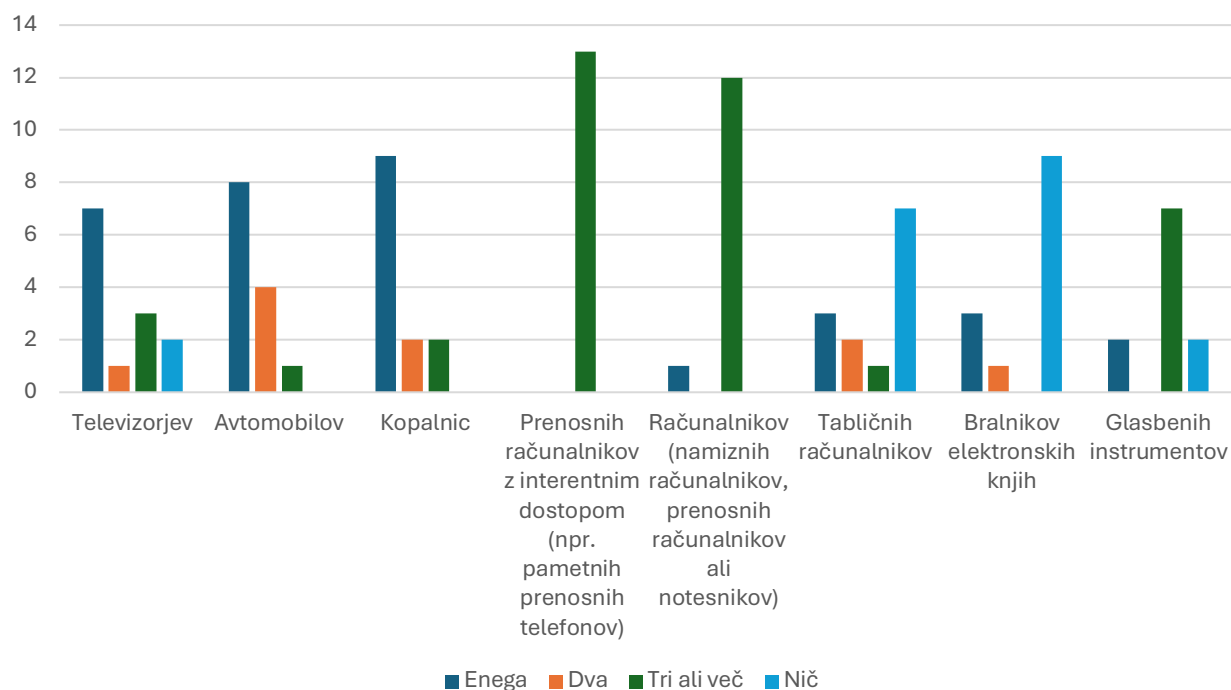
Kaj izmed naštetega imaš oziroma imate dom? PISA

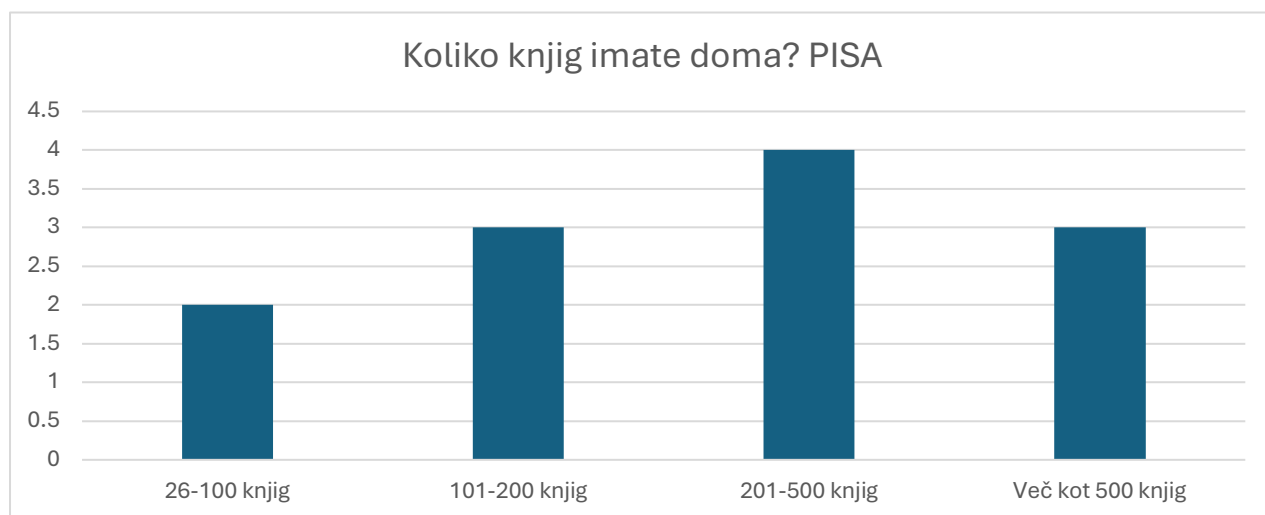
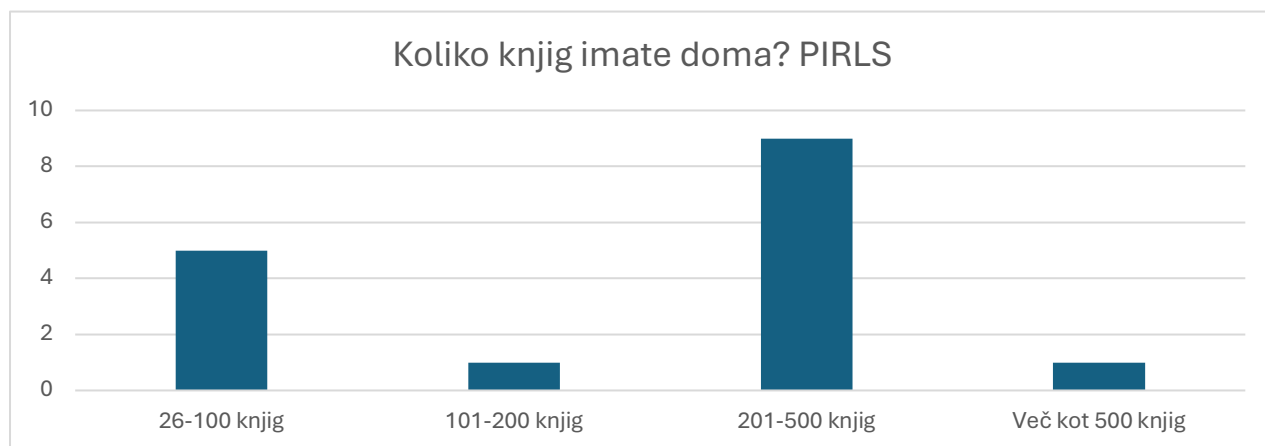


Koliko izmed naštetega imate doma? PIRLS



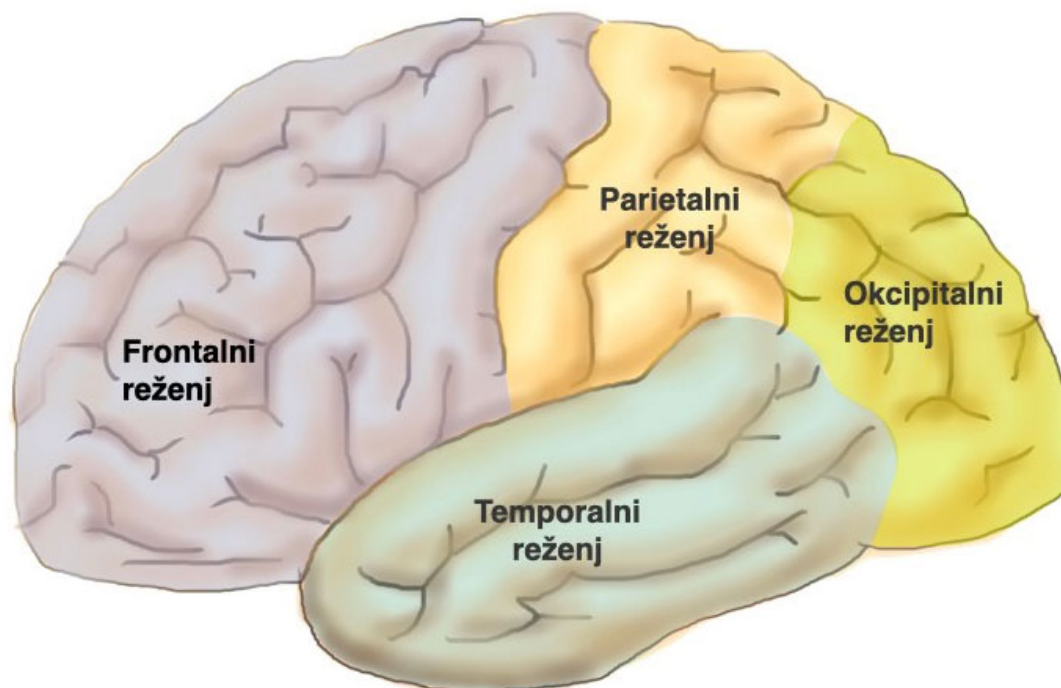
Koliko izmed naštetega imate doma? (PISA)



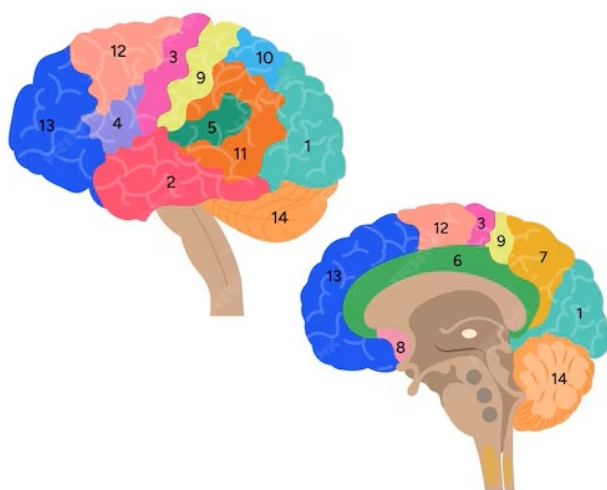


8.0 Človeški možgani ilustrativno: delitev, funkcije in oscilacije

8.1 Deli človeških možganov



Funkcionalna področja možganskega korteksa



1. Vidno področje:

Vid
Prepoznavanje podob
Zaznavanje podob

2. Asociacijsko področje:

Kratkoročni spomin
Ravnotežje
Čustva

3. Motorično področje:

Začenjanje hotenih gibov

4. Brocove področje:

Mišice govora

5. Slušno področje:

Sluh

6. Čustveno področje:

Bolečina
Lakota
-Boj ali bež- odziv

7. Senzorično asociacijsko področje:

Olfaktorno področje:
Voh

9. Senzorično področje:
Voh

10. Somatosenzorično asociacijsko področje:

Vrednotenje teže, teksture,
temperature, itd. za prepoznavanje objektov

11. Wernickejevo področje:

Razumevanje pisanega in govorjenega jezika

12. Motorično funkcijsko področje:

Gibanje oči in orientacija

13. Višje duševne funkcije:

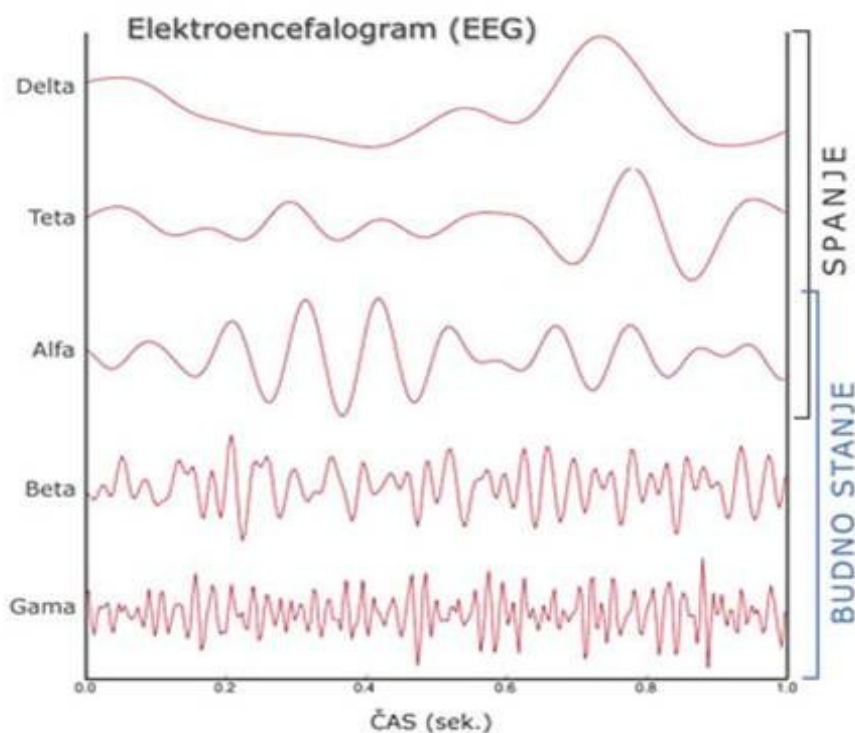
Koncentracija
Načrtovanje
Presoja
Čustveno izražanje
Ustvarjalnost
Zaviranje

Funkcionalna področja malih možganov

14. Motorične funkcije:

Koordinacija gibanja
Ravnotežje in stabilnost
Drža

8.2 Pet različnih možganskih valovanj



Gama frekvence (30 – 100 Hz) so dosežene, ko smo zelo fokusirani, saj imajo možgani visoko tendenco za reševanje problemov in nalog, obenem pa iz vseh delov zbirajo informacije, potrebne v tistem trenutku. Gama valovanje je povezano s spomini in deluje v temporalnem delu možganov. Ljudje z visokimi valovi gama so sposobnejši ohranjati spomine, hitreje rešujejo težave, imajo večjo pozornost in boljši dolgoročni spomin. Gama valovi se žal pojavljajo tudi pri boleznih, kot so Alzheimerjeva, epilepsija, shizofrenija in jih pogosto spremlja visoka stopnja stresa in tesnobe. Vsi deli možganov so povezani s gama frekvencami, saj imajo nalogo združevati informacije iz vseh delov možganov.

Beta frekvence (12–30 Hz) pomenijo stanje aktivne zavesti in se pojavijo v stanju ko se ukvarjamo z aktivnostmi, kot so vožnja avta, delo v službi, računanje in pisanje. Gre za neke vrste delovno temperTo je stanje, ki ga odrasli večinoma doživljajo skozi dan. V tem stanju pride do stresa, težav s pozornostjo, živčnosti in drugih obnašanj, ki negativno vplivajo na naše psihofizično stanje. Lev možganski del, odgovoren za logiko, analitiko in motoriko, je v tem stanju bolj aktiven. V beta stanju se učimo in raziskujemo discipline kot so matematika, fizika, kemija itd. Večina ljudi v ostane v tem stanju vse življenje.

Alfa frekvence (7–12 Hz) predstavljajo stanje je stanje sproščene pozornosti. V tem stanju se aktivira desna hemisfera, ki je odgovorna za jezik, kreativnost, ritem in sintezo. To je stanje, ko se začne meditacija in velja za ugodno stanje za učenje podatkovnega tipa znanja (tuji jeziki). Prednosti tega stanja vključujejo sproščenost, hitro dojemanje dejstev, dobro pomnjenje in dostop do podzavesti. V tem stanju naj ne bi bilo prostora za ego, zamere in očitke. Te frekvence prinašajo naravno udobje, srečo, mir in harmonijo. V tem stanju se krepi imunski sistem, izboljšata se cirkulacija in dihanje,

sprošča se stres. Alfa stanje lahko pomaga pri kreativnem razmišljanju in izražanju. To stanje je pogosto povezano tudi z intuicijo.

Theta frekvence (4–7 Hz). V tem stanju globoke sproščenosti (meja med zavednim in nezavednim) lahko občutimo intenzivne vizualizacije in smo bolj motivirani. Aktivira se tudi proces samozdravljenja. Redna praksa v tem stanju lahko izboljša intuicijo, sposobnost reševanja problemov in tehniko zavestnega manifestiranja. Otroci do 6. leta starosti imajo veliko theta frekvenc, kar pojasnjuje njihovo visoko sposobnost učenja. V theta stanju smo tik pred tem, da zaspimo, aktivnost razmišljanja je krepko manjša. Tudi tukaj ni težav z egom in z ostalimi podzavestnimi programi, ki v beta stanju sabotirajo željene spremembe.

Delta frekvence (0,1–4 Hz) so stanje globokega spanja, zdravljenja in globoke meditacije. Možgani in telo so v tem stanju zelo mirni. V delta stanju se proizvaja hormon za rast in zdravje, zato je zelo pomembno za krepitev telesa in duha. V tem stanju smo najbolj odporni na stres in živčno napetost. Ko spimo v delta stanju, se počutimo popolnoma obnovljene in polne energije. V delta stanju se proizvaja tudi dopamin, kar nas pripelje do občutka zadovoljstva in sreče. Delta stanje nam lahko pomaga, da se počutimo mirne, zadovoljne in da imamo večjo sposobnost učenja in kreativnega mišljenja. Lahko nam pomaga tudi pri zdravljenju telesnih obolenj, kot so bolezni srca, anksioznosti, depresije in druge duševne težave.

Uporabljena literatura

- Alhanbali, S., Dawes, P., Millman, R. E., & Munro, K. J. (2019). Measures of Listening Effort Are Multidimensional. *Ear and Hearing*, 40(5), 1084–1097. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000697>
- Antonenko, P., Paas, F., Grabner, R., & van Gog, T. (2010). Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 22(4), 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9130-y>
- Argilés, M., Cardona, G., Pérez-Cabré, E., & Rodríguez, M. (2015). Blink rate and incomplete blinks in six different controlled hard-copy and electronic reading conditions. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 56(11), 6679–6685. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-16967>
- Barak, M., A. Lipson, and S. Lerman. (2006). Wireless Laptops as Means for Promoting Active Learning in Large Lecture Halls. *Journal of Research on Technology in Education*, 38 (3): 245–263. <https://doi.org/10.1080/15391523.2006.10782459>.
- Benedetto, S., Draï-Zerbib, V., Pedrotti, M., Tissier, G., & Baccino, T. (2013). E-readers and visual fatigue. *PLoS ONE*, 8(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083676>
- Blehm, C., Vishnu, S., Khattak, A., Mitra, S., & Yee, R. W. (2005). Computer vision syndrome: A review. *Survey of Ophthalmology*, 50(3), 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2005.02.008>
- Brishtel, I., Ishimaru, S., Augereau, O., Kise, K., & Dengel, A. (2018). Assessing Cognitive Workload on Printed and Electronic Media using Eye-Tracker and EDA Wristband. *IUI '18 Companion: Companion Proceedings of the 23rd International Conference on Intelligent User Interface*, 45, 1–2. <https://doi.org/10.1145/3180308.3180354>

- Chu, C. A., Rosenfield, M., & Portello, J. K. (2014). Blink patterns: Reading from a computer screen versus hard copy. *Optometry and Vision Science*, 91(3), 297–302. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000157>
- Clinton, V. (2019). Reading from paper compared to screens: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Research in Reading*, 42(2), 288–325. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12269>
- Clinton-Lisell, V., Strouse, G., & Langowski, A. M. (2024). Children's engagement during shared reading of ebooks and paper books: A systematic review. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 39, 100632. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2023.100632>
- Dalal, S. S., Baillet, S., Adam, C., Ducorps, A., Schwartz, D., Jerbi, K., Bertrand, O., Garnero, L., Martinerie, J., & Lachaux, J. P. (2009). Simultaneous MEG and intracranial EEG recordings during attentive reading. *NeuroImage*, 45(4), 1289–1304. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.01.017>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.003>
- Delgado, P., Vargas, C., Ackerman, R., & Salmerón, L. (2018). Don't throw away your printed books: A meta-analysis on the effects of reading media on reading comprehension. *Educational Research Review*, 25(January), 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2018.09.003>
- Dybvik, H., Erichsen, C. K., Snider, C., & Steinert, M. (2025). fNIRS, EEG, ECG, and GSR reveal an effect of complex, dynamically changing environments on cognitive load, affective state, and performance, but not physiological stress. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19(June), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1459653>
- Froud, K., Levinson, L., Maddox, C., & Smith, P. (2024). Middle-schoolers' reading and lexica semantic processing depth in response to digital and print media: An N400 study. *PLoS ONE*, 19(5 MAY), 1–29. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290807>
- Gerlič, I., & Jaušovec, N. (1999). Multimedia: Differences in cognitive processes observed with EEG. *Educational Technology Research and Development*, 47(3), 5–14. <https://doi.org/10.1007/bf02299630>
- GEM report. (2023): *Technology in education: a tool on whose terms?*, UNESCO, Paris
- Giuliani, N. P., Brown, C. J., & Wu, Y. H. (2021). Comparisons of the Sensitivity and Reliability of Multiple Measures of Listening Effort. *Ear and Hearing*, 465–474. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000950>
- Grabner, R. H., Neubauer, A. C., & Stern, E. (2006). Superior performance and neural efficiency: The impact of intelligence and expertise. *Brain Research Bulletin*, 69(4), 422–439. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.02.009>
- Halamish, V., & Elbaz, E. (2020). Children's reading comprehension and metacomprehension on screen versus on paper. *Computers and Education*, 145(July 2019), 103737. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103737>
- Hautala, J., Hawelka, S., & Ronimus, M. (2024). An eye movement study on the mechanisms of reading fluency development. *Cognitive Development*, 69(February 2023), 101395. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2023.101395>

- Ibaibarriaga, G., Acha, J. & M. Perea. (2025). The Impact of Handwriting and Typing Practice in Children's Letter and Word Learning: Implications for Literacy Development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 253 (2025).
- Jensen, O., Pan, Y., Frisson, S., & Wang, L. (2021). An oscillatory pipelining mechanism supporting previewing during visual exploration and reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(12), 1033–1044. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.08.008>
- Jensen, R. E., Roe, A., & Blikstad-Balas, M. (2024). The smell of paper or the shine of a screen? Students' reading comprehension, text processing, and attitudes when reading on paper and screen. *Computers and Education*, 219(September 2023), 105107. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105107>
- Jeong, Y. J., & Gweon, G. (2021). Advantages of Print Reading over Screen Reading: A Comparison of Visual Patterns, Reading Performance, and Reading Attitudes across Paper, Computers, and Tablets. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(17), 1674–1684. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1908668>
- Jomaa, F., Ebraheem, F., & Horowitz-Kraus, T. (2025). Greater Parent–Child Brain Synchronisation During Printed Book Versus Screen Reading Using Hyperscanning Electroencephalograph Data. *Acta Paediatrica, International Journal of Paediatrics*, 114(7), 1633–1641. <https://doi.org/10.1111/apa.70007>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- Kaushik, P., Moye, A., Vugt, M. van, & Roy, P. P. (2022). Decoding the cognitive states of attention and distraction in a real-life setting using EEG. *Scientific Reports*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24417-w>
- Kay, R. H., and Lauricella, S. (2011). Exploring the Benefits and Challenges of Using Laptop Computers in Higher Education. *Canadian Journal of Learning and Technology* 37 (1). <https://doi.org/10.21432/T2S598>.
- Kretzschmar, F., Pleimling, D., Hosemann, J., Füssel, S., Bornkessel-Schlesewsky, I., & Schlewsky, M. (2013). Subjective Impressions Do Not Mirror Online Reading Effort: Concurrent EEG-Eyetracking Evidence from the Reading of Books and Digital Media. *PLoS ONE*, 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056178>
- Koriat, A. (1997). Monitoring one's own knowledge during study: A cue-utilization approach to judgments of learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 126(4), 349–370. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.126.4.349>
- Kraushaar, J. M., and Novak, C.D. (2010). “Examining the Effects of Student Multitasking with Laptops during the Lecture.” *Journal of Information Systems Education* 21 (2): 241–251.
- Lee, B. J. (2021). Comparing factual recall of tapped vs. handwritten text. *Acta Psychologica* 212/103221.
- Lee, H. & Bosch, N. (2025). Calibration Discrepancy Predicts Students' Subsequent Metacognitive Strategy Use in Computer-based Learning Environments. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 35 : 3746-3779.
- Leslie, L., & Caldwell, J. (2014). Formal and informal measures of reading comprehension. In *Handbook of research on reading comprehension* (pp. 427–451). Routledge.

- Li, J. X., and K. H. James. 2016. "Handwriting Supports 4- to 5-Year-Old Children's Letter Recognition." *Journal of Cognition and Development* 17 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1080/15248372.2014.981447>.
- Loberg, O., Hautala, J., Hämäläinen, J. A., & Leppänen, P. H. T. (2019). Influence of reading skill and word length on fixation-related brain activity in school-aged children during natural reading. *Vision Research*, 165(November), 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2019.07.008>
- Longcamp, M., J.-L. Anton, M. Roth, and J.-L. Velay. (2005). Visual Presentation of Letters Activates a Handwriting-Related Brain Area. *Human Brain Mapping* 25 (1): 23–34. <https://doi.org/10.1002/hbm.20134>.
- Longcamp, M., M.-T. Zerbato-Poudou, and J.-L. Velay. (2006). The Influence of Writing Practice on Letter Recognition in Preschool Children. *Acta Psychologica* 119 (1): 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.10.019>.
- Longcamp, M., C. Boucard, J.-C. Gilhodes, and J.-L. Velay. (2008). Remembering the Orientation of Newly Learned Characters Depends on the Associated Writing Knowledge. *Cognitive Neuropsychology* 25 (3): 473–495. <https://doi.org/10.1080/02643290701862345>.
- Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods*, 164(1), 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.03.024>
- Markovits, H. et al. (2015). Metacognition and abstract reasoning, *Memory and Cognition*, 43:681–693.
- Miles, K., McMahon, C., Boisvert, I., Ibrahim, R., de Lissa, P., Graham, P., & Lyxell, B. (2017). Objective Assessment of Listening Effort: Coregistration of Pupillometry and EEG. *Trends in Hearing*, 21, 1–13. <https://doi.org/10.1177/2331216517706396>
- Mueller, P. A., and D. M. Oppenheimer. (2014). "The Pen Is Mightier than the Keyboard." *Psychological Science* 25 (6): 1159–1168. <https://doi.org/10.1177/0956797614524581>.
- Nourbakhsh, N., Wang, Y., Chen, F., Nourbakhsh, N., Wang, Y., Gsr, F. C., Features, B., Kotzé, P., Marsden, G., Lindgaard, G., Wesson, J., & Inter-, M. W. (2017). GSR and Blink Features for Cognitive Load Classification. *14th International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT)*, pp.159-166. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40483-2_11. hal- 01497433
- OECD. 2023. *Students, Digital Devices and Success: Results from PISA 2022*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/71b7b1c5-en>.
- Olsen, A. (2012). The Tobii I-VT Fixation Filter: Algorithm description. *Tobii Technology*, 21. <https://www.tobiipro.com/siteassets/tobii-pro/learn-and-support/analyze/how-do-we-classify-eye-movements/tobii-pro-i-vt-fixation-filter.pdf>
- Osugi, K. et al. (2019). Differences in Brain Activity After Learning With the Use of a Digital Pen vs. an Ink Pen—An Electroencephalography Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019/3.
- Pan, Y., Popov, T., Frisson, S., & Jensen, O. (2023). Saccades are locked to the phase of alpha oscillations during natural reading. *PLoS Biology*, 21(1), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001968>
- Pardo, A.C.R. & J.P. Minda. (2022). Reexamining the "brain drain" effect: A replication of Ward et al. (2017). *Acta Psychologica* 230/103717.

- Peras, I., Mirazchiyski, E. K., Pavešić, B. J., & Recek, Ž. M. (2023). Digital versus Paper Reading: A Systematic Literature Review on Contemporary Gaps According to Gender, Socioeconomic Status, and Rurality. *Eur. J. Investig. Health Psychol. Educ.*, 13, 1986–2005. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ejihpe13100142>
- Pei, W., Q. Ma, M. Wang, and L. Liu. (2021). Writing by Hand Facilitates Learning by Enhancing Neural Activity. *Neuropsychologia* 159: 107955. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107955>.
- Pichora-Fuller, M. K., Kramer, S. E., Eckert, M. A., Edwards, B., Hornsby, B. W. Y., Humes, L. E., Lemke, U., Lunner, T., Matthen, M., Mackersie, C. L., Naylor, G., Phillips, N. A., Richter, M., Rudner, M., Sommers, M. S., Tremblay, K. L., & Wingfield, A. (2016). Hearing Impairment and Cognitive Energy : The Framework for Understanding Effortful Listening (FUEL). *Ear & Hearing*, 37(supp 1), 5S-27S. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000000312>
- Puma, S., Matton, N., Paubel, P. V., Raufaste, É., & El-Yagoubi, R. (2018). Using theta and alpha band power to assess cognitive workload in multitasking environments. *International Journal of Psychophysiology*, 123(October 2017), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.10.004>
- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. In *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (Vol. 62, Issue 8). <https://doi.org/10.1080/17470210902816461>
- Saksida, A., Ghiselli, S., Picinali, L., Pintonello, S., Battelino, S., & Orzan, E. (2022). Attention to Speech and Music in Young Children with Bilateral Cochlear Implants: A Pupillometry Study. *Journal of Clinical Medicine*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/jcm11061745>
- Salmerón, L., Altamura, L., Delgado, P., Karagiorgi, A., & Vargas, C. (2024). Reading comprehension on handheld devices versus on paper: A narrative review and meta-analysis of the medium effect and its moderators. *Journal of Educational Psychology*, 116(2), 153–172. <https://doi.org/10.1037/edu0000830>
- Sana, F., Weston, T. & N. J. Cepeda. (2013). Laptop multitasking hinders classroom learning for both users and nearby peers. *Computers & Education*, 62, 24–31.
- Singer, L., and P. A. Alexander. (2017). Reading on Paper and Digitally. *Educational Researcher* 46 (4): 236–248. <https://doi.org/10.3102/0013189X17731799>.
- Salmerón, L., Altamura, L., Delgado, P., Karagiorgi, A., & Vargas, C. (2024). Reading comprehension on handheld devices versus on paper: A narrative review and meta-analysis of the medium effect and its moderators. *Journal of Educational Psychology*, 16(2), 153–172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1037/edu0000830>
- Scharinger, C., Kammerer, Y., & Gerjets, P. (2015). Pupil dilation and EEG alpha frequency band power reveal load on executive functions for link-selection processes during text reading. *PLoS ONE*, 10(6), 1–24. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130608>
- Schwabe, A., Lind, F., Kosch, L., Boomgaarden, H. G., & Schwabe, A. (2022). No Negative Effects of Reading on Screen on Comprehension of Narrative Texts Compared to Print : A Meta-analysis No Negative Effects of Reading on Screen on Comprehension of. *Media Psychology*, 25(6), 779–796. <https://doi.org/10.1080/15213269.2022.2070216>
- Skolnick, B., and M. Puzo. (2008). Student Engagement through Electronic Response Systems in Higher Education. *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education* 20 (1): 44–55.

- Sovern, M. (2013). The Cost of Convenience: Student and Faculty Perceptions of Laptop Use in the Classroom. *Journal of Legal Education* 63: 589–622.
- Strouse, G. A., Chesnut, S. R., Newland, L. A., Mourlam, D. J., Hertel, D., & Nutting, B. (2022). Preschoolers' electrodermal activity and story comprehension during print and digital shared reading. In *Computers and Education* (Vol. 183). <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104506>
- Van der Weel, F.R.D. & Van der Meer, A.L.H. (2024). . “Handwriting Activates Broader Brain Networks Than Typing.” *Frontiers in Psychology* 15: 1342976. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1342976>.
- Van der Weel, F.R.D. & Van der Meer, A.H.L (2024b). Handwriting but not typewriting leads to widespread brain connectivity: a high-density EEG study with implications for the classroom. *Frontiers in Psychology*, 2023/14.
- Wurst, C., C. Smarkola, and M. A. Gaffney. (2008). Ubiquitous Laptop Usage in Higher Education. *Campus-Wide Information Systems* 25 (1): 24–36. <https://doi.org/10.1108/10650740810849036>.
- Yamamoto, J. (2007). Using Laptop Computers in the Classroom: Student Performance, Use, and Value. *Educational Technology & Society* 10 (1): 1–17.
- Zivan, M., Bar, S., Jing, X., Hutton, J., Farah, R., & Horowitz-Kraus, T. (2019). Screen-exposure and altered brain activation related to attention in preschool children: An EEG study. *Trends in Neuroscience and Education*, 17(March), 100117. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2019.100117>
- Zivan, M., Vaknin, S., Peleg, N., Ackerman, R., & Horowitz-Kraus, T. (2023). Higher theta-beta ratio during screen-based vs. printed paper is related to lower attention in children: An EEG study. *PLoS ONE*, 18(5 May), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283863>