

Razlike med posameznimi vozniki pri stabilizaciji po prevzemu vodenja pogojno avtomatiziranega vozila

Timotej Gruden, Grega Jakus

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: timotej.gruden@fe.uni-lj.si

Differences among Individual Drivers at Stabilizing after Take-Over of a Conditionally Automated Vehicle

Abstract. *In conditionally automated driving mode (SAE Level 3) vehicles are allowed to handle all driving tasks, while the driver must be ready to intervene when necessary. A key aspect in studying the transition from automated to manual driving is the stabilization time required after a take-over is performed. This study extends previous research by examining the impact of demographic diversity on post-takeover stabilization. We analyzed data from two studies using a driving simulator, involving 58 drivers aged 21-57, assessing variables like speed, deceleration, and physiological responses across the first 14 seconds following a take-over. Our findings indicate significant differences in stabilization times based on age, gender, driving experience, and simulator familiarity. Middle-aged drivers quickly reduce speed but accelerate again, while younger drivers maintain reduced speed. Male drivers decelerate sooner than females, and drivers with more simulator experience exhibit sharper deceleration initially. In conclusion, our study underscores the need for tailored approaches in the development and implementation of automated vehicles.*

1 Uvod

Avtomatizirana vozila prinašajo številne prednosti, ki lahko bistveno izboljšajo cestni promet. Med njimi so večja prometna varnost, saj avtomatizirani sistemi zmanjšujejo tveganje človeških napak, ki so pogosto vzrok za prometne nesreče. Prav tako omogočajo večjo pretočnost prometa, saj lahko z medsebojno komunikacijo vozila sama izberejo primernejše poti. Poleg tega avtomatizirana vozila prispevajo k zmanjšanju emisij, saj optimizirajo porabo goriva in zmanjšujejo potrebo po nenadnih pospeševanjih in zaviranjih. Nenazadnje, tudi udobje in kakovost življenja se občutno izboljšata z zmanjšanjem stresa med vožnjo in sproščanjem časa za druge aktivnosti.

Pogojno avtomatizirana vožnja (SAE stopnja 3) [1] pri tem predstavlja pomemben korak naprej od trenutnega – večinoma ročnega načina vožnje. Ta raven avtomatizacije omogoča vozilu, da prevzame vse vozne naloge v določenih okoljih, kot so avtoceste ali mestna okolja z namensko dodatno infrastrukturo, medtem ko mora biti voznik še vedno vsak trenutek pripravljen prevzeti vodenje, če vozilo to zahteva. V tem načinu

lahko voznik svojo pozornost posveti drugim dejavnostim, dokler ne prejme zahteve za prevzem vodenja (ZPV). Pogojno avtomatizirana vozila tako združujejo prednosti avtomatizirane vožnje z varnostjo in zanesljivostjo, ki jo zagotavlja človeški nadzor, a po drugi strani prinašajo edinstvene izzive med procesom prevzema njihovega vodenja.

1.1 Prevzem vodenja pogojno avtomatiziranega vozila

Koristi pogojno avtomatiziranih vozil so močno odvisne od gladkega prehoda med avtomatiziranim in ročnim načinom vožnje. Predhodne raziskave so pokazale kar nekaj izzivov, povezanih s scenariji prevzema, odzivnimi časi, zmanjšanim situacijskim zavedanjem in povečanim tveganjem nesreč zaradi neprimerne ravnanja.

Reakcijski čas voznika je merjen od podane ZPV do trenutka, ko voznik zavrti volan ali pritisne na zavoro. Ta proces se lahko dodatno razdeli na faze preusmeritve pogleda, zbiranje informacij in sprejemanje odločitev [2]. Teorija situacijskega zavedanja, pogosto uporabljena pri proučevanju interakcije med človekom in vozilom, nadalje deli zavedanje na ravni zaznave, razumevanja in pričakovanja [3].

Mnoge raziskave so pokazale, da zvočni signali v ZPV sprožijo najhitrejše odzive, medtem ko taktilni vzorci in ambientalna svetloba izboljšujejo situacijsko zavedanje in zmanjšujejo napor [4], [5]. Na splošno se najbolje izkažejo večmodalni vmesniki, ki s specifičnimi zvočnimi toni, vizualnimi znaki in taktilnimi vzorci izboljšajo kakovost prevzema vodenja [6].

1.2 Stabilizacija po prevzemu vodenja

Za nadaljnji razvoj avtomatizirane vožnje ostaja ključno razumevanje človeških dejavnikov pri prehodu z avtomatiziranega na ročni način vodenja. Pomemben a pogosto spregledan vidik je čas stabilizacije: obdobje, ki ga voznik potrebuje, da po predaji popolnoma prevzame vodenje ter pokaže stabilno in varno vožnjo.

V kontekstu učinkovitega prehoda med avtomatizirano in ročno vožnjo je bilo v preteklosti opravljenih že kar nekaj raziskav ter podanih ugotovitev in priporočil. Ma idr. tako priporočajo večstopenjske ZPV [7]. Pipkorn idr. predlagajo samodejno ustavitve vozila v zahtevnih situacijah [8]. Kim idr. poročajo o časih stabilizacije med 11,5 in 28,7 sekundami, odvisno od scenarijev in demografskih lastnosti voznikov [9]. Kerautret idr. in Gruden idr. so opazovali fiziološke odzive: premer zenice kot indikator kognitivne obremenitve se je spreminjal v prvih 10 sekundah,

prevodnost kože v 20 sekundah, srčni utrip kot indikator avtonomnega živčnega sistema pa v 60 sekundah po prevzemu vodenja [10], [11].

V eni svojih zadnjih raziskav so Gruden idr. analizirali dinamiko stabilizacijskega časa [11]. Ugotovili so, da se zaviranje in voznikovi pogledi izven ceste stabilizirajo dokaj hitro, približno dve sekundi, premer zenice pa šest sekund po prevzemu vodenja. Vozni parametri kot sta vijuganje in hitrost se stabilizirajo v osmih oziroma desetih sekundah po ZPV. Srčni utrip voznika po drugi strani odraža posledice prevzema vodenja dalj časa, saj se ni stabiliziral znotraj časa opazovanja (14 sekund).

1.3 Raziskovalna vprašanja

Prejšnje raziskave so se večinoma osredotočale bodisi na povprečni čas stabilizacije, bodisi na vpliv starosti [12] na celoten proces prevzema vodenja. Vpliv demografske raznolikosti na proces stabilizacije pa je bil deležen manjše pozornosti. Prilagojeni programi usposabljanja in uporabniški vmesniki, ki upoštevajo demografske razlike, lahko bistveno izboljšajo varnost in uporabniško izkušnjo v okolju avtomatizirane vožnje.

Ta študija dopolnjuje prejšnje raziskave na način, da dodatno raziše vpliv različnih demografskih značilnosti voznikov na stabilizacijo po prevzemu vodenja. Naš cilj je odkriti vzorce in razlike v časih stabilizacije med različnimi demografskimi skupinami. Raziskovalno vprašanje se torej glasi: »Kako se obdobje stabilizacije po prevzemu vodenja pogojno avtomatiziranega vozila razlikuje med različnimi demografskimi skupinami?«

2 Metodologija

Za analizo smo združili podatke iz dveh uporabniških študij, v katerih so Stojmenova Pečecnik idr. ter Strle idr. preučevali različne tipe projekcijskih zaslonov na vetrobranskem steklu (ang. head-up display – HUD) za podajanje zahteve za prevzem vodenja [13], [14]. Študiji sta potekali v podobnih pogojih: vožnja je potekala po mestnih cestah, vsaka vožnja je vključevala štiri zahteve za prevzem vodenja, študiji pa sta potekali v istem simulatorju vožnje.

V obeh študijah je bil uporabljen simulator vožnje Nervtech™ (Nervtech d.o.o., Ljubljana, Slovenija), sestavljen iz treh zaslonov, premične platforme s štirimi prostostnimi stopnjami, volana in fizične armaturne plošče. Za simulacijo smo uporabili programsko opremo SCANeR Studio 1.7 (AVSimulation, Bolonja, Francija).

Scenarij vožnje je posnemal vožnjo v službo. Vključeval je 13 km mestne vožnje od doma do službe, ki je trajala približno 16 minut. Vožnja se je začela na dvopasovni cesti z omejitvijo 50 km/h in gostim prometom. Prevzem vodenja vozila je bil potreben na več ključnih točkah: pred prehodom za pešce po 3 km vožnje, kompleksnim petpasovnim križiščem po 6 km in območjem šole s prehodi za pešce po 10 km vožnje. Vožnja se je zaključila s parkiranjem na parkirišču ob cesti. Vse štiri zahteve za prevzem vodenja so bile

podane z opozorilnim piskom in vidnim obvestilom na projekcijskem zaslonu. Voznik je lahko prevzel vodenje bodisi z zasukom volana ali s pritiskom na zavoro.

Nabor zbranih podatkov skupaj vsebuje 704 poskusov prevzema vodenja s strani 58 voznikov (30 moških, 28 žensk), starih od 21 do 57 let (povprečno $33,7 \pm 10,3$ let). Vozniki so morali oceniti svoje izkušnje z vožnjo na 4-stopenjski lestvici (vsak dan, nekajkrat na teden, na mesec ali na leto). Prav tako so morali na 4-stopenjski lestvici izraziti, ali so pred sodelovanjem v študiji že vozili v simuliranem okolju (nikoli, enkrat, nekajkrat ali večkrat). Poleg demografskih podatkov podatkovni nabor vključuje številne vozne podatke, kot so položaj vozila, hitrost, pospešek, razdalja do naslednjega vozila itd., ter fiziološke podatke, kot so premer zenice, smer pogleda, delež časa brez pogleda na cesto, prevodnost kože, spremenljivost srčnega utripa itd. Obravnavane podatke podrobneje predstavljamo v naslednjem podpoglavju. Več informacij o postopku zbiranja podatkov je na voljo v Stojmenova Pečecnik idr. [13] in Strle idr. [14].

2.1 Neodvisne in odvisne spremenljivke

Za razvrščanje voznikov v skupine glede na njihovo demografsko ozadje smo uporabili štiri spremenljivke, podane v tabeli 1.

Tabela 1. Demografski podatki voznikov, katerih vpliv na stabilizacijo smo preučevali.

Spremenljivka	Možne vrednosti
Starost	21–57 let
Spol	moški, ženski
Vozniške izkušnje (Odgovor na vprašanje: »Kako pogosto vozite?«)	vsak dan, nekajkrat na teden, nekajkrat na mesec, nekajkrat na leto
Izkušnje s simulatorji (Odgovor na vprašanje: »Ali ste že kdaj prej vozili v simulatorju vožnje?«)	nikoli, enkrat, nekajkrat, večkrat

Pri vsakem prevzemu vodenja smo opazovali povprečja merjenih odzivov, predstavljenih v tabeli 2, v sedmih zaporednih časovnih intervalih po prevzemu vodenja. Posamezen interval opazovanja je trajal dve sekundi brez prekrivanja. Skupaj smo tako opazovali potek v prvih 14 sekundah po prevzemu vodenja vozila.

Tabela 2. Merjene (opazovane) spremenljivke

Spremenljivka	Opis	Enote
Vijuganje	Standardni odklon kota volana	rad
Hitrost	Povprečna hitrost	m/s
Pojemek	Povprečni pojemek	m/s ²
Pogledovanje s ceste	Delež vzorcev, kjer voznikov pogled ni bil usmerjen na cesto	
Premer zenice	Povprečni premer zenice	mm
Srčni utrip	Povprečni srčni utrip	1/min

2.2 Analiza

Za primerjavo izmerjenih odzivov med različnimi demografskimi skupinami voznikov med sedmimi časovnimi intervali smo pripravili t. i. mešane linearne modele. Za vsako merjeno spremenljivko je bil zgrajen lasten model. V modele so vključene izmerjene vrednosti iz tabele 2, obravnavane kot odvisne spremenljivke, zaporedna št. časovnega intervala in štiri demografske spremenljivke kot fiksni dejavniki, ID voznika je slučajni dejavnik. Da bi ugotovili, ali se razlike med demografskimi skupinami voznikov spreminjajo med časovnimi intervali, smo v modelu upoštevali tudi morebitne interakcije med časovnimi intervali in demografskimi spremenljivkami. V pridobljenih modelih torej:

- *interakcije* kažejo, ali se razlike v vedenju voznikov (npr. vijuganje) med demografskimi skupinami spreminjajo s časom,
- *fiksni dejavniki za demografske spremenljivke* kažejo, ali obstajajo splošne razlike v odzivih med demografskimi skupinami,
- *fiksni dejavnik časovnih intervalov* kaže, kako se vedenje voznikov spreminja v povprečju skozi časovne intervale,
- *slučajni dejavniki* pa upoštevajo individualne razlike med vozniki in njihovimi poskusi

3 Rezultati

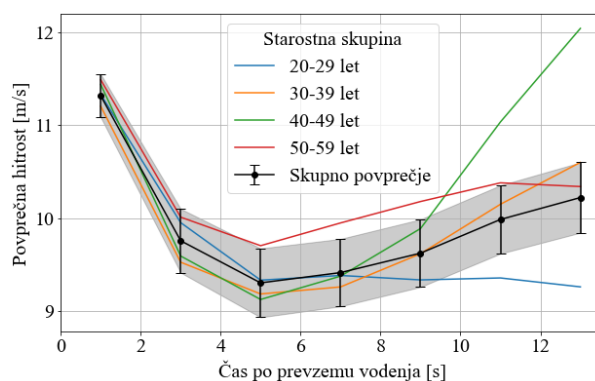
V nadaljevanju so prikazani le tisti rezultati, kjer voznikovo demografsko ozadje odraža statistično pomembne razlike (F-test) med meritvami v posameznih intervalih opazovanja. Čeprav je mešani model sicer nakazal vpliv voznikov izkušenj na pogledovanje s ceste ($p = 0,012$) in premer zenice ($p = 0,041$) ter vpliv izkušenj s simulatorji na srčni utrip ($p = 0,012$), pa naknadna (t.i. *post-hoc*) primerjava parov (t-test) v posameznih intervalih opazovanja ni pokazala statistično pomembnih razlik med demografskimi skupinami.

3.1 Hitrost

Mešani model je pokazal, da na hitrost v posameznih časovnih intervalih statistično pomembno vplivajo starost ($F(6, 3989,2) = 4,02, p < 0,001$), voznike izkušnje ($F(18, 3987,9) = 2,38, p < 0,001$) in izkušnje s simulatorji ($F(18, 3990,9) = 2,09, p = 0,004$).

Za primerjavo učinka starosti smo voznike naknadno razporedili v štiri starostne skupine. S slike 1 lahko razberemo, da vozniki srednjih let (30–50) najhitreje in najbolj znižajo hitrost vožnje, a po nekem času ponovno pospešijo. Starejši vozniki najmanj znižajo hitrost. Najmlajši vozniki po prevzemu vodenja zmanjšajo hitrost vozila in vožnjo tudi nadaljujejo z enakomerno, zmanjšano hitrostjo.

Naknadna primerjava parov ni pokazala statistično pomembnih razlik med vozniki z različnimi voznimi izkušnjami ali izkušnjami s simulatorji znotraj posameznih intervalov.



Slika 1. Povprečna hitrost voznikov po prevzemu vodenja vozila glede na starostno skupino voznika. Senčeni del predstavlja +/- dve standardni napaki.

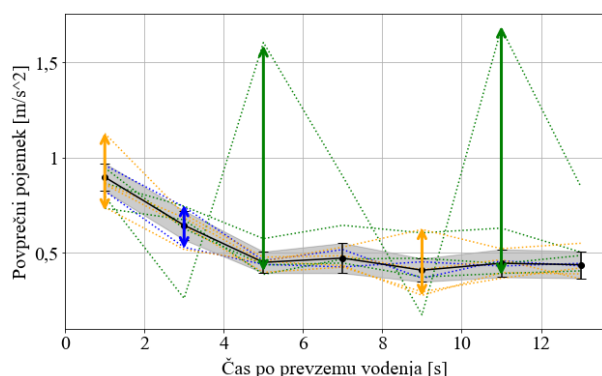
3.2 Pojemek

Mešani model je pokazal, da na povprečni pojemek v posameznih časovnih intervalih statistično pomembno vplivajo spol ($F(6, 2125,5) = 2,23, p = 0,038$), voznike izkušnje ($F(18, 2167,3) = 2,06, p = 0,005$) in izkušnje s simulatorji vožnje ($F(18, 2113,1) = 2,45, p = 0,001$). Rezultati so grafično predstavljeni na sliki 2.

Primerjava parov je pokazala, da spol vpliva na pojemek samo v časovnem intervalu od 2 do 4 sekund po prevzemu vodenja ($p = 0,001$), pri čemer so ženske voznice izkazale povprečno $0,25 \text{ m/s}^2$ manjše pojemeke ($p = 0,001$), moškim voznikom pa so se pojemki pri podobnih vrednostih stabilizirali šele kasneje.

Poleg tega smo ugotovili, da voznike izkušnje vplivajo na pojemek v časovnem intervalu med 4 in 6 sekundami po prevzemu vodenja ($F(3, 1286,1) = 2,77, p = 0,041$). Pri tem so bili pojemki voznikov, ki vozijo le nekajkrat letno, povprečno $1,21 \text{ m/s}^2$ manjši od pojerkov tedenskih voznikov ($p = 0,038$). V časovnem intervalu med 10 in 12 sekundami ($F(3, 1399,6) = 5,85, p = 0,001$) so bili pojemki voznikov, ki vozijo le nekajkrat na leto, v povprečju $1,10 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov mesečnih voznikov ($p = 0,015$); $1,32 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov tedenskih voznikov ($p = 0,002$); in $1,38 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov dnevnih voznikov ($p = 0,001$).

Podobno je primerjava parov pokazala, da izkušnje s simulatorji statistično pomembno vplivajo na pojemek v časovnem intervalu med 0 in 2 sekundami po prevzemu vodenja ($F(3, 560,5) = 5,26, p < 0,001$). Pri tem so bili pojemki voznikov, ki so simulator uporabljali že večkrat, v povprečju $0,29 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov voznikov, ki so simulator uporabljali le nekajkrat ($p = 0,008$); $0,27 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov voznikov, ki so simulator uporabljali le enkrat ($p = 0,032$); in $0,42 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov voznikov, ki niso še nikoli uporabljali simulatorja vožnje ($p < 0,001$). V časovnem intervalu med 8 in 10 sekundami po prevzemu vodenja ($F(3, 1277,2) = 4,84, p = 0,002$) so bili pojemki voznikov, ki niso še nikoli uporabljali simulatorja, v povprečju $0,37 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov voznikov, ki so že enkrat uporabljali simulator ($p = 0,026$); in $0,38 \text{ m/s}^2$ večji od pojerkov voznikov, ki so že nekajkrat uporabljali simulator ($p = 0,002$).



Slika 2. Pojemek voznikov po prevzemu vodenja vozila glede na demografske skupine. Modra barva predstavlja razlike glede na spol, zelena razlike glede na vozniške izkušnje, oranžna razlike glede na izkušnje s simulatorji, črna pa skupno povprečje. Senčeni del predstavlja $\pm$ dve standardni napaki. Navpične puščice označujejo statistično pomembne razlike.

4 Razprava in zaključek

S to študijo smo želeli razumevanje dogajanja pri prevzemu vodenja pogojno avtomatiziranih vozil razširiti še na čas po dejanskem prevzemu vodenja. Posebej smo se osredotočili na vprašanje, ali se obdobje stabilizacije po prevzemu razlikuje glede na različne skupine voznikov, kar bi lahko vplivalo na splošno varnost v cestnem prometu.

Naše ugotovitve kažejo, da mlajši in srednje stari vozniki izkazujejo različne vzorce v hitrostih v primerjavi s starejšimi vozniki, kar nakazuje potrebo po upoštevanju starostnih razlik, saj lahko vplivajo na zmožnost varnega prevzema vodenja, kot so opozorili že Kim idr. [9]. Gruden idr. [11] so ugotovili, da je pojemek eden izmed parametrov, ki se stabilizirajo že 2–4 sekunde po prevzemu, kar je ključnega pomena za preprečevanje trkov. Naše ugotovitve kažejo, da ženske voznice nižje in stabilne pojemke verjetno dosežejo že pred tem, kar zmanjšuje tveganje za nevarne situacije. Poleg tega so vozniki, ki imajo več izkušenj s simulatorji, takoj po prevzemu zavirali hitreje kot tisti z manj izkušnjami, kar nakazuje na pomen izkušenj in vnaprejšnjih treningov za učinkovito in varno ravnanje pri prevzemu vodenja vozil.

V zaključku naša študija poudarja potrebo po prilagojenih pristopih pri razvoju in implementaciji avtomatiziranih vozil. Z upoštevanjem demografske raznolikosti lahko izboljšamo varnost in učinkovitost prevzema vodenja, s čimer zagotovimo bolj vključujočo in prilagojeno izkušnjo za vse uporabnike ter tako pripomoremo k izboljšanju kakovosti življenja.

Prihodnje raziskave bi se lahko osredotočile na uvedbo prilagojenih programov usposabljanja za vožnjo z avtomatiziranimi vozili glede na specifične demografske skupine. Upoštevanje dodatnih dejavnikov, kot sta kognitivna obremenitev in situacijsko zavedanje, lahko pri tem še dodatno izboljša modele obnašanja voznikov v avtomatiziranih vozilih.

Zahvala

Raziskavo je delno financirala ARIS v okviru raziskovalnega programa ICT4QoL (P2-0246).

Literatura

- [1] SAE International, „J3016_202104: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“. Pridobljeno: 28. januar 2023. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/
- [2] K. Zeeb, A. Buchner, in M. Schrauf, „What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving“, *Accident Analysis & Prevention*, let. 78, str. 212–221, maj 2015.
- [3] M. R. Endsley, „Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems“, *Hum Factors*, let. 37, št. 1, str. 32–64, mar. 1995.
- [4] S. M. Petermeijer, S. Cieler, in J. C. F. de Winter, „Comparing spatially static and dynamic vibrotactile take-over requests in the driver seat“, *Accident Analysis & Prevention*, let. 99, str. 218–227, feb. 2017.
- [5] A. G. Mirnig idr., „Enlightening mode awareness“, *Pers Ubiquit Comput*, let. 27, št. 6, str. 2307–2320, dec. 2023.
- [6] S. Petermeijer, P. Bazilinskyy, K. Bengler, in J. de Winter, „Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop“, *Applied Ergonomics*, let. 62, str. 204–215, jul. 2017.
- [7] S. Ma idr., „Take over Gradually in Conditional Automated Driving: The Effect of Two-stage Warning Systems on Situation Awareness, Driving Stress, Takeover Performance, and Acceptance“, *International Journal of Human–Computer Interaction*, let. 37, št. 4, str. 352–362, feb. 2021.
- [8] L. Pipkorn, M. Dozza, in E. Tivesten, „Driver Visual Attention Before and After Take-Over Requests During Automated Driving on Public Roads“, *Hum Factors*, str. 00187208221093863, jun. 2022.
- [9] H. Kim, W. Kim, J. Kim, S.-J. Lee, D. Yoon, in J. Jo, „A Study on Re-Engagement and Stabilization Time on Take-Over Transition in a Highly Automated Driving System“, *Electronics*, let. 10, št. 3, Art. št. 3, jan. 2021.
- [10] L. Kerautret, S. Dabic, in J. Navarro, „Exploration of driver stress when resuming control from highly automated driving in an emergency situation“, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, let. 93, str. 222–234, feb. 2023.
- [11] T. Gruden, S. Tomažič, in G. Jakus, „Post-Takeover Proficiency in Conditionally Automated Driving: Understanding Stabilization Time with Driving and Physiological Signals“, *Sensors*, let. 24, št. 10, Art. št. 10, maj 2024.
- [12] Y. Wu idr., „Age-related differences in effects of non-driving related tasks on takeover performance in automated driving“, *Journal of Safety Research*, let. 72, str. 231–238, feb. 2020.
- [13] K. Stojmenova Pečecnik in J. Sodnik, „Evalvacija projekcijskega zaslona za pogojno avtomatizirana vozila“, *Elektrotehniški vestnik*, let. 89, št. 5, str. 269–274, dec. 2022.
- [14] G. Strle, A. Košir, J. Sodnik, in K. Stojmenova Pečecnik, „Physiological Signals as Predictors of Cognitive Load Induced by the Type of Automotive Head-Up Display“, *IEEE Access*, let. 11, str. 87835–87848, 2023.