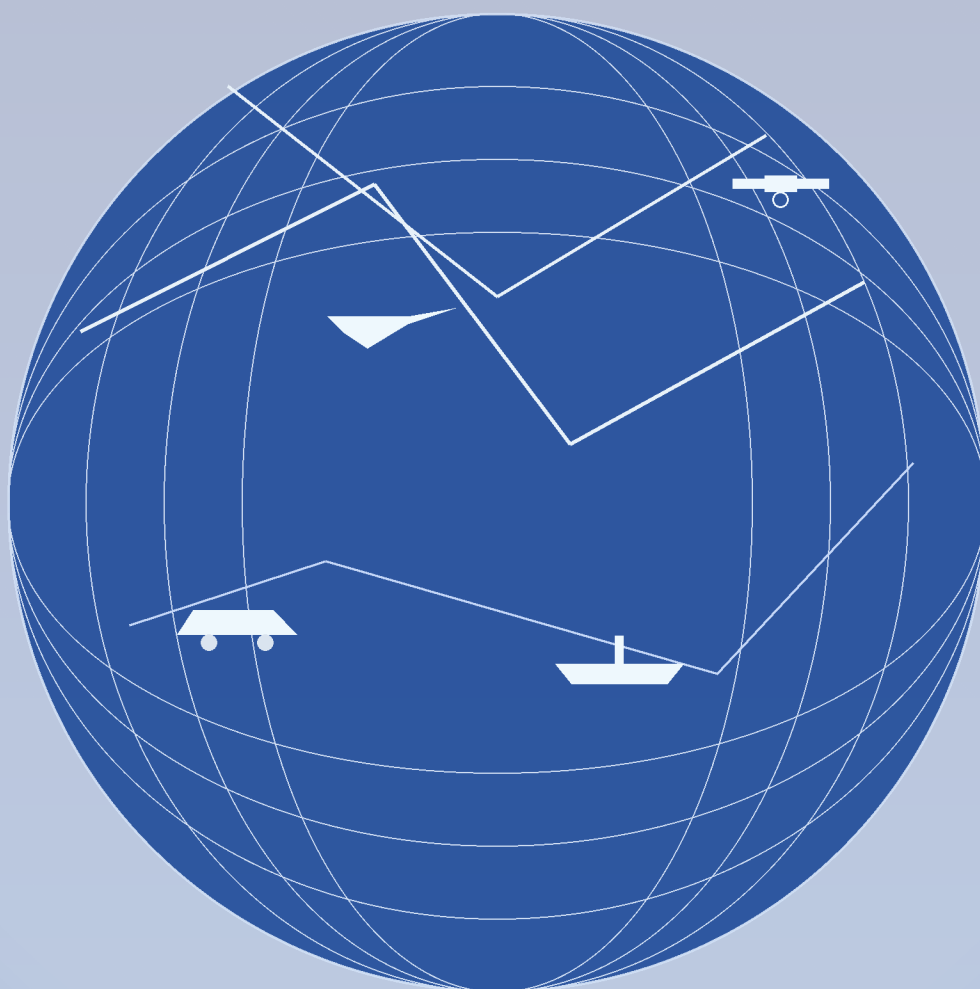




FPP

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za pomorstvo in promet

Izzivi v pomorstvu in prometu 1



Izzivi v pomorstvu in prometu 1

Portorož, 2025

Izzivi v pomorstvu in prometu 1

Urednica: prof. dr. Elen Twrdy
Lektorica: Barbara Ambrožič
Naslovna slika: Microsoft 365 Copilot

Založnik: Založba Univerze v Ljubljani
Za založnika: Gregor Majdič, rektor Univerze v Ljubljani
Izdajatelj: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet
Za izdajatelja: Peter Vidmar, dekan Fakultete za pomorstvo in promet UL

Naklada: 100 izvodov
Tisk: Kubelj d. o. o.
Prva izdaja, prvi natis.
Publikacija je brezplačna.
Ljubljana, Portorož, 2025

Prva e-izdaja.
Publikacija je v digitalni obliki prosto dostopna na: <https://ebooks.uni-lj.si/>
DOI: 10.70587/9789612977429

Kataložna zapisa o publikaciji (CIP) pripravili v
Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

Tiskana knjiga
COBISS.SI-ID 261127683
ISBN 978-961-297-741-2

E-knjiga
[COBISS.SI-ID 261181187](#)
ISBN 978-961-297-742-9 (PDF)

Uvod

Znanstveni razvoj na področju prometa in pomorstva se v zadnjem desetletju pospešeno usmerja v iskanje učinkovitih, trajnostnih in digitalno podprtih rešitev za sodobne izzive mobilnosti, logistike ter upravljanja prometnih in pomorskih sistemov. Dinamične spremembe v globalnih transportnih tokovih, podnebne zaveze Evropske unije ter digitalna preobrazba gospodarstva od raziskovalcev zahtevajo celostne, podatkovno podprte in interdisciplinarne pristope.

V tem okviru raziskovalne dejavnosti programske skupine *Modeliranje in simulacije v prometu in pomorstvu (P2-0394)*, ki jo financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS), pomembno prispevajo k poglobljenemu razumevanju, optimizaciji in strateškemu načrtovanju pomorskih ter prometnih sistemov. Skupina združuje znanja s področij prometa, pomorstva, prometnega inženirstva, logistike, ekonomije in okoljskih ved, kar omogoča celostno obravnavo sodobnih izzivov mobilnosti, digitalizacije in trajnostnega razvoja.

Monografija, ki je pred vami, predstavlja izbor dosežkov članov programske skupine v zadnjih letih. Zbrana poglavja so prevodi izvirnih znanstvenih člankov, ki so bili objavljeni v priznanih mednarodnih znanstvenih revijah. Vsi avtorji so pridobili ustrezna soglasja za prevod in ponovno objavo svojih del. S tem monografija omogoča, da rezultati vrhunskih raziskav, prvotno objavljenih v tujih jezikih, postanejo dostopni slovenski strokovni javnosti, študentom, raziskovalcem in odločevalcem v prometnem in pomorskem sektorju.

Dela, zbrana v tej monografiji, temeljijo na interdisciplinarnih raziskavah, ki povezujejo modeliranje in simulacije, trajnostno načrtovanje, razvoj novih tehnologij ter analize vplivov transportnih sistemov na okolje in družbo. Poseben poudarek je namenjen aktualnim temam, kot so digitalna preobrazba v pomorstvu, zelene logistične verige, avtomatizacija in optimizacija pristaniških terminalov, pametna mobilnost ter povečanje odpornosti prometnih sistemov v luči globalnih izzivov – od podnebnih sprememb do geopolitičnih prekinitev dobavnih verig.

Cilj monografije ni zgolj predstavitev raziskovalne dosežke in razvojne usmeritve programske skupine, temveč tudi spodbuditi poglobljen strokovni dialog med znanstveno skupnostjo, gospodarskimi deležniki in oblikovalci politik na področju trajnostnega razvoja prometa in pomorstva. V ospredje postavljamo znanstveno odličnost, aplikativno vrednost raziskav ter vizijo dolgoročnega razvoja, ki temelji na podatkovno podprtih odločitvah, sistemskem pristopu in inovativnih metodoloških rešitvah.

S tem monografija prispeva k razumevanju smeri, v katere se razvijata pomorska in prometna znanost v Sloveniji, ter potrjuje, da lahko z usklajenim delovanjem raziskovalne skupnosti, izobraževalnih institucij in gospodarstva dosežemo zeleni in digitalni prehod transportnih sistemov, ki bo temelj prihodnje konkurenčnosti in trajnostne blaginje.

Elen Twrdy

Kazalo

1. Eksperimentalna identifikacija pametnih telefonov z uporabo prstnih odtisov vgrajenih mikroelektromehanskih sistemov (MEMS)	
Gianmarco Baldini, Gary Steri, Franc Dimc, Raimondo Giuliani, Roman Kamnik	1
2. Modeliranje pretovora kontejnerjev v severnih jadranskih pristaniščih v obdobju 1990-2013	
Elen Twrdy, Milan Batista	19
3. Razvoj konkurenčno-sodelovalnih odnosov med pristanišči za križarjenja v Mediteranu od leta 2000 do 2017	
Vivien Lorenčič, Elen Twrdy, Milan Batista.....	39
4. Večparametrski odločitveni model izogibanja trčenju plovil: pristop z mehko logiko	
Tanja Brcko, Andrej Androjna, Jure Srše, Renata Boč	59
5. Analiza fizioloških podatkov pilotov med simulacijo vplutja v luko z uporabo navtičnega simulatorja	
Dejan Žagar, Matija Svetina, Tanja Brcko, Marko Perkovič, Franc Dimc, Andrej Košir	83
6. Vpliv starosti pnevmatik in zavornega sistema proti blokiranju koles (ABS) na koeficient trenja in zavorno pot osebne vozila	
Vivien Lorenčič	95
7. Vpliv migracije storitev cestnega tovornega prometa na gospodarske kazalnike v izbranih državah EU	
Marina Zanne, Elen Twrdy, Robert Muha, Milan Batista	111
8. Določanje optimalnega števila internih tovornjakov na manjših kontejnerskih terminalih	
Maja Stojaković, Elen Twrdy.....	125

Eksperimentalna identifikacija pametnih telefonov z uporabo prstnih odtisov vgrajenih mikroeletromehanskih sistemov (MEMS)

Gianmarco Baldini, Gary Steri, Franc Dimc, Raimondo Giuliani, Roman Kamnik

Prevod dela: *Experimental Identification of Smartphones Using Fingerprints of Built-In Micro-Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Sensors, 16(6), 2016. <https://doi.org/10.3390/s16060818>

Povzetek: Pravilna identifikacija pametnih telefonov je uporabna na področju varnosti ali boja proti ponarejanju. Ker se stopnja izpopolnenosti ponarejene elektronike povečuje, morajo postopki odkrivanja postati natančnejši, vendar ne smejo uničiti testiranega pametnega telefona. Za nekatere komponente pametnega telefona je bolj verjetno, da bodo pokazale svojo pristnost tudi brez fizičnega pregleda, saj so zanje značilni prstni odtisi strojne opreme, ki jih je mogoče zaznati s sorazmerno preprostim pregledom podatkov, ki jih zagotavljajo. To velja za komponente MEMS (mikroeletromehanski sistemi), kot so merilniki pospeška in žiroskopi, kjer majhne razlike in nenatančnosti v proizvodnem procesu določajo edinstvene vzorce v izhodnih podatkih komponent. V prispevku predstavljamo eksperimentalno oceno identifikacije pametnih telefonov z vgrajenimi komponentami MEMS. V naši študiji so trije različni telefoni istega modela podvrženi ponovljivim gibanjem (sestavljenim iz ponovljivega scenarija) z natančno robotsko roko. Rezultati vsakega ponovljenega scenarija iz MEMS se zberejo in analizirajo. Identifikacijski algoritem temelji na ekstrakciji statističnih značilnosti zbranih podatkov za vsak scenarij. Funkcije se uporabljajo v klasifikatorju podpornega vektorskega stroja (SVM) za identifikacijo pametnega telefona. Rezultati vrednotenja so predstavljeni za različne kombinacije značilk in izhodov inercialne merilne enote (IMU), ki kažejo, da je mogoče doseči natančnost zaznavanja, večjo od 90 %.

Ključne besede: MEMS; odvzem prstnih odtisov; merilniki pospeška; žiroskopi; ponarejanje; pametni telefon

1. Uvod

Pravilna identifikacija elektronskih naprav, vključno s pametnimi telefoni, je pomembna funkcija v različnih aplikacijah, vključno z bojem proti ponarejanju. Ponarejeno blago je doseglo raven natančnosti in podobnosti s prvotnim blagom, tako da njegovega odkrivanja ni več mogoče omejiti na vizualni pregled zunanjega videza. Danes imajo ponarejevalci elektronskih naprav strokovno znanje in opremo, primerljivo s tistimi, ki so v lasti ali upravljanju proizvajalcev originalnih sestavnih delov. Ponarejeni deli elektronske naprave, vključno z integriranimi vezji, niso le kloni, temveč tudi reciklirani, prekomerno proizvedeni ali (različni) označeni sestavni deli, kot je opisano v nedavni študiji [1]. To pomeni, da so v številnih primerih še vedno sestavni deli, ki prihajajo iz proizvodne linije OCM ali njegovih dobaviteljev, vendar so slabše kakovosti, kar morda povzroča težave v zvezi z zanesljivostjo in varnostjo naprav, o čemer se je že poročalo tudi v avtomobilski, letalski in vojaški industriji.

V teh okoliščinah imajo ponarejeni pripomočki presenetljivo visoko stopnjo podobnosti z izvornimi, tako da je težko odločiti o njihovi pristnosti zgolj z vizualnim pregledom zunanjega ohišja ali s pregledom notranjih komponent. Zato so bile razvite in uporabljene različne tehnike inšpekcijskih pregledov. Vizualni pregled majhne moči (LPVI) z mikroskopi ali povečevalnimi svetilkami, rentgensko slikanje in fluorescenca, skenirna akustična mikroskopija (SAM) in skenirna elektronska mikroskopija (SEM) ter parametrični in strukturni preskusi so le nekateri primeri fizičnih in električnih pregledov, ki jih je mogoče uporabiti. Vendar pa večina teh tehnik zahteva zapleteno in drago opremo, specializirane tehnike in veliko časa za izvedbo. Zaradi večine od naštetih tehnik postane pametni telefon nefunkcionalen, saj le te zahtevajo njegovo odpiranje ali odstranitev določenih komponent. Uporaba tehnike SEM za pregled matrice interoperabilnosti komponente na primer zahteva dekapulacijo sestavnega dela, medtem ko analiza mikro curkov (*micro blast*) zahteva odstranitev oznak na površini pregledanega dela, da bi se našle predhodno morebiti natisnjene oznake.

Glede na doslej navedene premisleke v prispevku preučujemo tehniko za identifikacijo pametnih telefonov, ki ne zahteva razstavljanja pametnega telefona in ki jo je mogoče uporabiti s preprostim postopkom in preprosto preizkusno opremo. Postopek temelji na upoštevanju dejstva, da imajo sodobni pametni telefoni vgrajene senzorje mikroeletromehanskih sistemov (MEMS), kakršni so merilniki pospeška in žiroskopi, za katere so značilni edinstveni prstni odtisi strojne opreme, ki jih ni mogoče reproducirati, kar omogoča celo razlikovanje med dvema izvirnima napravama (tj. različnima serijskima številčkama) istega modela [2]. Pomemben element te tehnike je, da je mogoče te prstne odtise odčitati s preprosto analizo vrednosti, ki jih pridelujejo komponente MEMS in se zbirajo v pomnilniku pametnega telefona, ne da bi bilo treba pametni telefon razstaviti. Praktična uporaba te tehnike lahko izkorišča zbiranje digitaliziranih izhodnih vrednosti MEMS med preskusi zanesljivosti strojne opreme naprave, kakršne je opredelilo Združenje industrije mobilne telefonije (CTIA) (zdaj Združenje za brezžično telefonijo) [3],

pri čemer se za pametne telefone uporabljajo vrtenja ali drugi scenariji gibanja (npr. TumbleBarrel Test). Komponente MEMS, ki so prisotne v pametnem telefonu, so raziskovalci opredelili za različne aplikacije. V [4] so avtorji raziskali potencial MEMS v pametnih telefonih za samodejno zaznavanje padca osebe, ki nosi pametni telefon. To je uporabna aplikacija za zdravstveno varstvo, saj so padci glavni vir poškodb in hospitalizacij starejših oseb. Rezultati preizkusne naprave v [4] kažejo, da so tehnike za ugotavljanje padcev, ki temeljijo na merilniku pospeška, močno odvisne od vzorca sil pri padcu. To je pomemben vidik študije, predstavljene v tem prispevku, ki podpira koncept, da mora biti gibanje, ki se uporablja za odvzem prstnih odtisov pametnega telefona, dobro opredeljeno in ponovljivo. Drug primer uporabe komponent MEMS v pametnem telefonu je predstavljen v [5], kjer so avtorji raziskali, ali je mogoče z visoko natančnostjo razbrati lego telefona z analizo gibanja, orientacije in spremembe hitrosti vrtenja. Pokazalo se je, da z uporabo samo informacije o gibanju, lahko dosežejo natančnost okoli 70 %, to razmerje se poveča do 85 % z uporabo informacij o orientaciji v prostoru in o spremembi vrtenja. Drugi primeri sledenja človeškemu gibanju in ocenjevanja stanja z uporabo MEMS (zlasti merilnikov pospeška in žiroskopov) so v [6,7], kjer isti avtorji izvajajo tridimenzionalno rekonstrukcijo gibanja, namesto da bi analizirali izhodne signale senzorjev kot valovne pojave. Ti rezultati so nas spodbudili, da smo definirali vzorec gibanja s celotnim naborom gibov in vrtenja v tridimenzionalnem prostoru.

Poleg uporabnosti za boj proti ponarejanju ima identifikacija pametnega telefona tudi druge aplikacije na področju varnosti ali zasebnosti. Avtentikacija pametnega telefona na podlagi notranjih funkcij, ustvarjenih med proizvodnim procesom, se lahko uporablja za podporo varnostnim aplikacijam. Identifikacija na podlagi MEMS lahko na primer podpira bolj konvencionalno identifikacijo na podlagi kriptografskih sredstev (npr. potrdila o dodeljevanju javnih ključev). Po drugi strani pa je identifikacija pametnih telefonov in njihovih lastnikov pomemben element, ki ga je treba upoštevati pri analizi tveganj zasebnosti, saj je na ta način možno slediti uporabnikom pametnega telefona, čeprav je zahtevana anonimizacija. Aplikacija bi lahko na primer iz pametnega telefona izvlekla podatke o vsebini, vključno s prstnimi odtisi MEMS, za edinstveno identifikacijo pametnega telefona, tudi če so bili podatki o vsebini anonimizirani, s čimer bi se odstranil identifikator serijske številke pametnega telefona. Očitno je, da je ta grožnja zasebnosti mogoča le, če so bili edinstveni prstni odtisi MEMS že vnaprej zbrani in obdelani.

Izkoriščanje teh značilnosti komponent MEMS je naš prispevek k ocenitvi izvedljivost odvzema prstnih odtisov pametnih telefonov z vgrajenim MEMS s postopkom, ki ga je mogoče deterministično reproducirati v različnih forenzičnih laboratorijih brez potrebe po kompleksni opremi in infrastrukturi. Scenarij uporabe predvideva vzpostavitev arhiva prstnih odtisov naprav, pridobljenih s standardnim zaporedjem premikov (sestavljenim iz ponovljivega scenarija), uporabljenega na napravi z računalniško krmiljeno mehansko platformo, ki med fazo pregleda odvzema prstnega odtisa pregledane naprave, izvede popolnoma enako gibanje in pridobivanje na napravi, da se primerjajo odvzeti prstni odtisi s tistimi, ki jih vsebuje arhiv, s čimer se zelo zmanjšajo napake zaradi zunanjih dejavnikov ali razlik v gibanju pametnega telefona. Statistične značilke pridobimo iz zbranih digitaliziranih izhodov MEMS, za identifikacijo telefonov pa uporabljamo klasifikacijo podpornega vektorskega modela (SVM). Pred izgradnjo ustrezne referenčne knjižnice s prstnimi odtisi številnih različnih telefonov je treba oceniti in sploh identificirati statistične značilke ali algoritme, ki zagotavljajo najboljšo natančnost identifikacije. Ta korak je glavni cilj tega prispevka. Osredotočamo se na eksperimentalno vrednotenje in izbiro statističnih značilk na omejenem naboru telefonov istega modela, ki se razlikujejo le v serijskih številkah. Izvedli smo obsežno oceno različnih komponent MEMS (pospeševalniki, žiroskopi), statističnih značilnosti in različnih funkcij jedra za binarni klasifikacijski algoritem SVM. V primerjavi z rezultati, navedenimi v literaturi, kot je opisano v poglavju 2, uporabljamo obsežnejši sklop statističnih značilk, ki vključujejo tudi značilke, ki temeljijo na entropiji. Menimo, da je ta eksperimentalna ocena pomembna za oceno izvedljivosti identifikacije telefona z MEMS in je koristna za raziskovalce na tem področju.

Preostali del prispevka je organiziran na naslednji način: poglavje 2 vsebuje najsodobnejše tehnike zaznavanja prstnih odtisov senzorjev MEMS, ponarejene elektronike in odkrivanja pametnih naprav. V poglavju 3 je navedena splošna metodologija za zbiranje, analizo in primerjavo podatkov o prstnih odtisih. V poglavju 4 so prikazani rezultati naših preizkusov, v poglavju 5 pa so navedeni končni sklepi in načrti za prihodnje delo.

2. Pregled literature

2.1. Prstni odtisi senzorjev gibanja

Identifikacija naprave na podlagi odvzema prstnih odtisov senzorja MEMS in zlasti merilnikov pospeška je bila predstavljena predvsem v prispevkih [2,8]. Obe študiji se soočata s problemom identifikacije naprav in uporabnikov, ki jo izvajajo aplikacije v oblaku z oddaljenim dostopom do podatkov, ki jih zaznava merilnik pospeška v vozilu.

V študiji [2], ki dejansko analizira tudi samostojne senzorje, se odvzamejo njihovi prstni odtisi, medtem ko naprava vibrira. Analize *sledi*, ki trajajo 2 sekundi, vodijo do ekstrakcije niza funkcij, za katere se uporablja nadzorovano učenje, in preverjanja, ali je mogoče razlikovati med različnimi merilniki pospeška. Rezultati dejansko kažejo skupni odstotek natančnosti (*precision*) in občutljivost (*recall*) nad 87 %, če je klasifikator učen na vzorcih vibracij, dolgih vsaj 30 s. Vendar pa med temi rezultati obstajajo nekatere razlike, povezane z vrsto naprave (samostojni senzorji

ali senzorji, vgrajeni v pametni telefon ali tablični računalnik) in površino, na kateri leži naprava, ter prisotnostjo ohišja na napravi. Vse te spremenljivke so analizirane in največji vpliv ima izvedba ohišja, ki v nekaterih okoliščinah zmanjša natančnost in občutljivost na okoli 60 %, medtem je kljub različnosti površin še vedno mogoče doseči skoraj 80 % natančnost. Poleg tega so na splošno najboljše rezultate dosegli z merilniki pospeška kot samostojnimi čipi, nameščenimi na preizkusno ploščo in za zbiranje podatkov priključenimi na ploščo Arduino. Ta primer ima jasne omejitve v dejanskih scenarijih, saj v njih ni možno kot v našem primeru delovati na napravi, kakršna je, ampak le na enem samem sestavnem delu, ki ga niti ni mogoče enostavno odstraniti za preskušanje.

V prispevku [8], kjer se predlaga tudi odvzem prstnih odtisov zvočnika in mikrofona, se podatki merilnika pospeška zbirajo, ko naprava miruje na površini, ki je pravokotna na os z, najprej je obrnjena navzgor in nato navzdol. V tem primeru premiki niso potrebni, saj se za sprožitev reakcije senzorja in odvzem njegovega prstnega odtisa uporablja samo gravitacijska sila. Občutljivost in odmik (*bias*) senzorjev se upoštevata kot referenčna parametra za izračun razdalje med podatki in identifikacijo naprav. Laboratorijski poskusi s 17 napravami so prinesli delež pravih identifikacij nad 85 %. Kasnejši obsežen poskus v realnem okolju, izveden na več kot tri tisoč napravah, ki pošiljajo svoje podatke prek spletne strani, pa je dosegel le 15 %, ki se je z uporabo niza User-Agent povečal na 58 %. Uporaba identifikatorja programske opreme bi razveljavila vse predpostavke o nepotrebnosti poznavanja identifikatorja strojne opreme v naših in drugih scenarijih.

Problem odvzema prstnih odtisov senzorja gibanja pametnega telefona je spodbudil tudi nekaj raziskav v zvezi s tehnikami za blaženje motenj. V prispevku [9] so avtorji najprej razvili lasten mehanizem za odvzem prstnih odtisov z uporabo merilnika pospeška in žiroskopa pametnega telefona, pri čemer so podatke zbirali s stacionarno napravo z avdio stimulacijo in brez nje. Kombinirani rezultati laboratorijskih in realnih eksperimentov so pokazali uspešnost F (F -score) 96 %, kar kaže tudi, da žiroskop daje boljše rezultate v področju pod (neslišno, 20 kHz) zvočno stimulacijo v primerjavi z merilnikom pospeška. Na podlagi teh rezultatov avtorji predlagajo nekaj protiukrepov, da bi otežili odvzem prstnih odtisov senzorja in nato identifikacijo uporabnika, kar kaže na zmanjšanje uspešnosti F do 30 % po kalibraciji senzorja (veliko manj za žiroskop, ki ga je težje kalibrirati) in do 40 % oziroma 80 % z uporabo prikrievanja podatkov z vključevanjem novih vzorcev podatkov in brez njega. Vendar lahko prikrievanje podatkov in potreba po prirejanju prstnih odtisov na splošno močno prizadeneta funkcionalnost aplikacije.

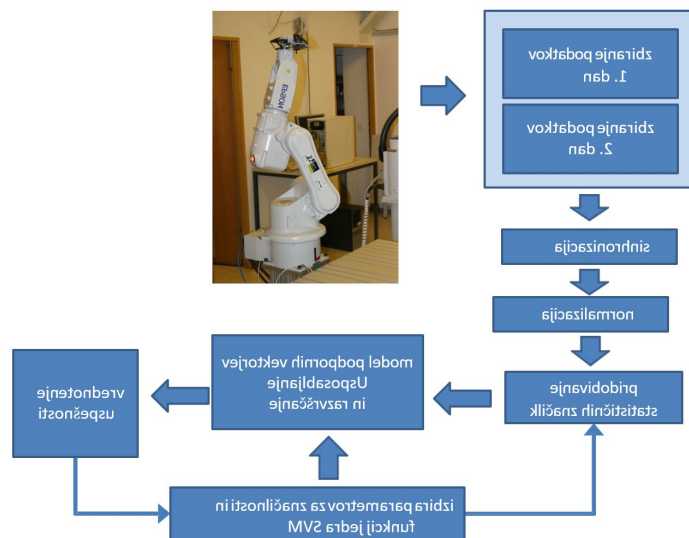
2.2. Odkrivanje ponarejenih pametnih telefonov

Avtorji v prispevku [10] predlagajo ponarejeno identifikacijo mobilnega telefona s tehniko vizualne kriptografske sheme (VCS). Ideja je zaščititi edinstveno serijsko številko naprave, ki uporablja VCS, tako da je ena številka shranjena v telefonu, druga pa v spletni storitvi proizvajalca za preverjanje. Avtorji so spregledali možnost, da bi si ponarejevalec prekopiral binarno sliko, shranjeno v telefonu, kar bi ponaredek omogočilo uspešno preverjanje. Druge tehnike za preprečevanje ponarejanja, ki se ne uporabljajo le za mobilne telefone, temveč potencialno za katero koli napravo, temeljijo na radiofrekvenčnem odvzemu prstnih odtisov. V prispevku [11] so oznake radiofrekvenčnih identifikatorjev (RFID) fizično edinstvene in jih je težko ponoviti s poznavanjem potrdil o radijsko frekvenčni pristnosti (RF-CoAs). Čeprav bi te metode lahko predstavljale veljavne protiukrepe, jih je treba uporabiti za nove naprave in jih ni mogoče izvajati na že izdelanih napravah. Po našem najboljšem poznavanju stanja ni pristopov, ki bi izkoriščali prstne odtise MEMS za odkrivanje ponarejenih pametnih naprav.

Prihodnost tehnik za boj proti ponarejanju se še vedno zanaša na odkrivanje prstnih odtisov; le-ti bodo lahko namenoma vstavljeni med proizvodnim procesom, tako da jih bo mogoče preveriti in tako ugotoviti pristnost izdelka. To velja za fizikalno nekloniranljive (*unclonable*) funkcije (PUF), ki se uporabljajo za silicijeve čipe [12], ki določajo razlike v hitrosti kot odziv na električne signale. Ko se v čip pošlje več parov vzbujalnih vhodnih signalov po različnih poteh, bodo rezultati, ki jih signal v vsakem paru najprej doseže ciljni zapah, dali niz bitov, ki identificirajo čip. Na podoben način, vendar v drugačnem kontekstu, so raziskovalci v [13] razvili tehniko za uporabo prstnih odtisov v nanometrskem merilu v tankih plasteh iz polietilen tereftalata (PET), da bi avtenticirali različne predmete z naključnim vstavljanjem srebrnih nanožičk, katerih razporeditev ima za posledico neponovljive vzorce.

3. Metodologija za pridobivanje in obdelavo podatkov

Skupni metodološki tok, uporabljen v prispevku, za zbiranje podatkov, obdelavo in analizo, je prikazan na sliki 1. Prvi korak je zbiranje podatkov MEMS. Ob upoštevanju drugih študij o odvzemu prstnih odtisov senzorjev gibanja, predstavljenih v poglavju 2, smo opazili, da na raven natančnosti (*precision*) vpliva več dejavnikov, kot so: trajanje in vrsta spodbude (če obstaja), ki se uporablja za senzorje (vibracija ali zvočna stimulacija), položaj senzorjev in način njihove vgradnje v ohišje (samostojni čip ali čip, vgrajen v napravo z morebitnim ohišjem), ocena odmika (*bias*) in sploh občutljivost samih senzorjev. Da bi se izognili vsem tem težavam in izboljšali natančnost klasifikacije, smo se zanašali na mehansko platformo, na kateri je naprava vedno nameščena popolnoma v enakih položajih in je vedno podvržena enako krmiljenim in s tem ponovljivim gibom.



Slika 1. Delovni potek izbrane metodologije.

Scenarij za zbiranje podatkov MEMS iz telefonov je naslednji: robotska roka PS3 EPSON (Nagano, Japonska) s šestimi prostostnimi stopnjami (DOF) je bila uporabljena za manipulacijo vsakega telefona v posebnem scenariju gibanja z znanimi pospeški. Scenarij sestavlja rotacija za 120 stopinj v treh korakih po 40 stopinj v ravnini $x-y$. V vsakem koraku mehanska roka dodatno nagne napravo za dodatnih 30 stopinj. Ko robotska roka doseže končni naklon pri 90 stopinjah in doseže 120 stopinj v ravnini $x-y$, se vrne v začetni položaj. Ti nizi gibanj zagotavljajo, da so vse komponente MEMS spodbujene k odzivanju z značilnimi izhodnimi vrednostmi, ki so primerne za analizo. Slika telefona, pritrjenega na robotsko roko, je prikazana na sliki 2. Pred začetkom vsakega scenarija so pametni telefoni mirovali 20 minut, da bi zagotovili, da so bile začetne nastavitve MEMS enake, prejšnji scenarij pa ni vplival na rezultate naslednjega scenarija. Čeprav se strinjamo, da bi lahko bila robotska roka EPSON PS3 draga oprema za praktične namene, smo v tem prispevku želeli predvsem zagotoviti ponovljivost vzorca gibanja. Rezultati iz literature, kot so opisani v poglavju 2, kažejo, da je mogoče dobro raven natančnosti doseči tudi s cenejšo opremo. Primerjava različnih platform za ustvarjanje scenarijev gibanja je vidik prihodnje raziskave in v tem prispevku ni obravnavana.

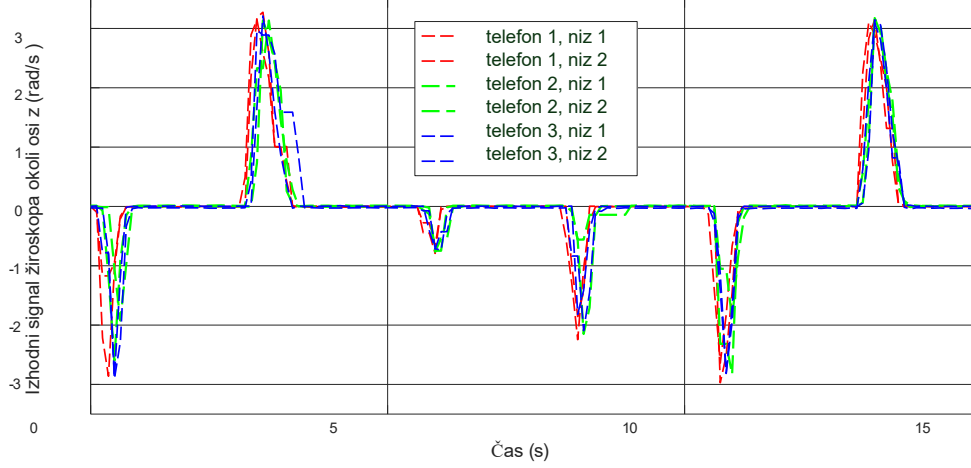


Slika 2. Robotska roka, uporabljena v scenariju z enim od vloženih telefonov.

Podatki vgrajenega MEMS so bili pridobljeni s telefonom z uporabo aplikacije Androsensor, ki je bila konfigurirana za zbiranje podatkov merilnikov pospeška in žiroskopov s hitrostjo 10 Hz. Scenarij merjenja je bil ponovljen 96-krat, da bi zagotovili dovolj podatkov za statistično analizo za vse tri telefone, uporabljene v poskusu v štirih različnih nizih v štirih dneh, da bi ocenili natančnost in robustnost algoritma za odvzem prstnih odtisov za zbiranje vzorcev. Prva dva niza sta bila izvedena s časovnim zamikom nekaj dni. Po štirih mesecih sta bila izvedena še dva niza s časovnim zamikom nekaj dni. Z drugimi besedami, algoritem je treba oceniti tako za (a) razlikovanje med dvema pametnima telefonoma istega modela z različnimi serijskimi številkami kot za (b) zagotavljanje enake odločitve o identifikaciji (npr. isti pametni telefon), čeprav so zbrani vzorci na različne

dneve, ko so lahko okoljski pogoji, ko sta temperatura okolja ali vlažnost, drugačni. Obe merili za ocenjevanje sta pomembni ter se merita za različne sestavne dele in parametre MEMS v poglavju 4.

Drugi korak pri obdelavi podatkov je sinhronizacija in normalizacija zbranih podatkov za vsak scenarij. Oboje je potrebno za zagotovitev, da natančnost algoritma ni pristranska zaradi morebitnih različnih konfiguracij v telefonih. Na sliki 3 je prikazan primer dobljenih normaliziranih izhodnih signalov žiroskopa okoli osi z, tj. rezultatov kotne hitrosti, pridobljenih okoli normalne osi na čelno ravnino telefona.



Slika 3. Izhodni signali Z-izhoda žiroskopa, zabeleženi okoli normalne osi na čelno ravnino treh telefonov.

Tretji korak je uporaba statistične analize za sinhronizirane in normalizirane vzorce. Za vsak scenarij smo uporabili naslednje statistične značilke, pridobljene v časovnem obdobju in s številom podatkov senzorja S_i , pri čemer i označuje zaporedno številko vzorca. Značilnosti entropije so pridobljene z orodjem za valjčno analizo okolja MATLAB.

$$variance(\sigma) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \mu)^2, \quad (1)$$

$$Skewness = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^N (S_i^3 - \mu^3), \quad (2)$$

$$Kurtosis = \frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=1}^N (S_i^4 - \mu^4), \quad (3)$$

$$ShannonEntropy = - \sum_{i=1}^N (S_i^2) * \ln(S_i^2), \quad (4)$$

$$LogEnergyEntropy = \sum_{i=1}^N \ln(S_i^2), \quad (5)$$

$$ThresholdEntropy = 1 \text{ if } |S_i| > P_{Thr} \text{ and } 0 \text{ elsewhere.} \quad (6)$$

$$SureEntropy = N - (i \text{ if } |S_i| \leq P_{Thr}) + \sum_{i=1}^N \min(S_i^2, P_{Thr}^2), \quad (7)$$

$$NormEntropy = \sum_{i=1}^N |S_i|^{P_{Thr}}. \quad (8)$$

Izbrane so bile statistične značilke, ki se pogosto uporabljajo pri identifikaciji naprav in odvzemu prstnih odtisov. Podoben nabor statističnih značilk je na primer uporabil prispevek [14] za klasifikacijo in identifikacijo oznak RFID. Varianca, asimetričnost (*skewness*) in sploščenost (*kurtosis*) so uporabljene tudi v prispevku [15] za jemanje prstnih odtisov 16-bitnih mikrokrmilnikov PIC (Peripheral Interface Controller).

Izračunane statistične značilke so bile uporabljene za digitalne izhode MEMS, pridobljene v 96 ponovitvah, da bi se ustvarila matrika s 96 vrsticami za osem značilk za vsak pametni telefon in vsak scenarij. To pomeni, da smo oblikovali 3×2 matriki dimenzij 96×8 , na katerih smo uporabili nadzorovano učenje. Ustvarjene matrike smo predložili klasifikatorju SVM z različnimi funkcijami jedra. Od 96 ponovitev smo 72 ponovitev uporabili za učenje, 24 ponovitev pa za potrditev. Metrika, uporabljena za naše rezultate, je točnost identifikacije (*accuracy*), ki se izračuna kot $točnost = \frac{Tp+Tn}{celotna\ populacija}$, pri čemer je *Tp* število resnično pozitivnih in *Tn* število resnično negativnih identifikacij. SVM smo uporabili kot binarni klasifikator za primerjavo digitalnih izhodov (*tj. generirane* matrike značilk) vsakega pametnega telefona z drugim pametnim telefonom ali za različne scenarije. Uporabljene so naslednje funkcije jedra (*kernel*) SVM:

1. Gaussovo jedro RBF (*Radial Basis Function*) z različnimi vrednostmi faktorja skaliranja σ .
2. Jedro MLP (*Multilayer Perceptron*), ki je krmiljeni model umetne nevronske mreže s prenosom podatkov, ki prilagaja niz vhodnih podatkov na niz ustreznih izhodnih. Uporabili smo lestvico, ki sega od -1 do 1 .
3. Linearno jedro.
4. Kvadratno jedro.
5. Polinomsko jedro različnih redov.

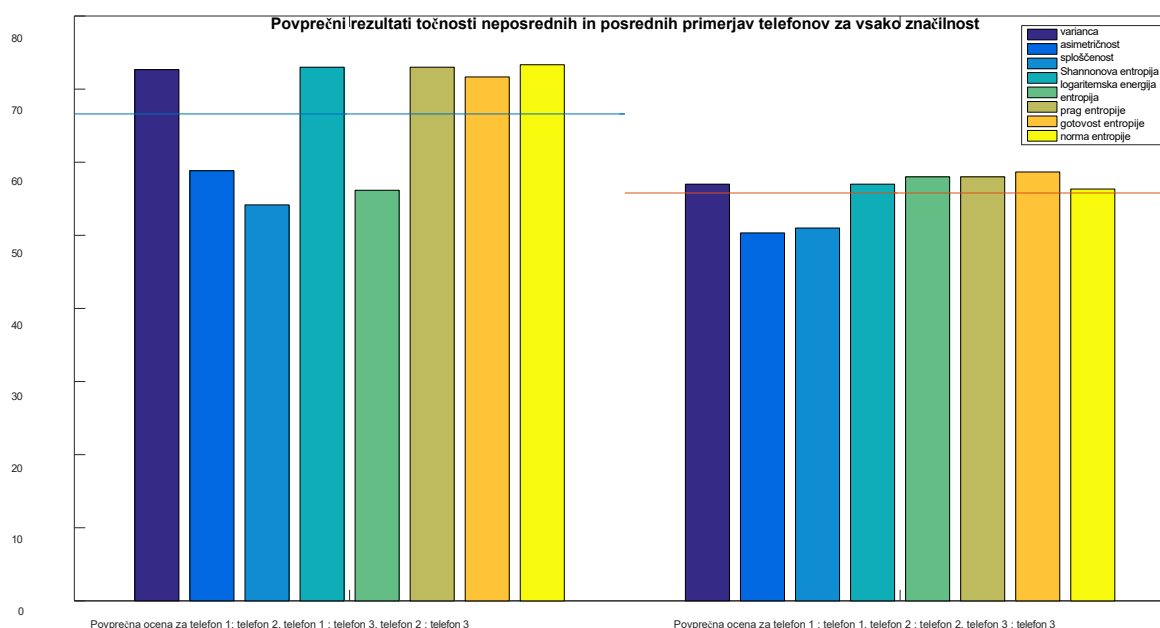
SVM smo uporabili z metodo sekvenčne minimalne optimizacije (SMO), pri čemer smo določili delež spremenljivk (v nadaljevanju prispevka ga označujemo kot raven kkt), ki lahko krši pogoje Karush-Kuhn-Tuckerja (KKT) za metodo učenja SMO.

Teorija SVM je dobro znana, bralec pa si lahko sam ogleda dodatne podrobnosti [16].

4. Eksperimentalni rezultati

V tem razdelku prikazujemo rezultate eksperimentalnih preskusov, s katerimi ocenjujemo, kako je mogoče z različnimi parametri in različnimi funkcijami jedra SVM razlikovati med različnimi telefoni. Kot je opisano v poglavju 3, sta bila dva niza meritev opravljena v različnih dneh, da bi ocenili odpornost algoritma glede na čas.

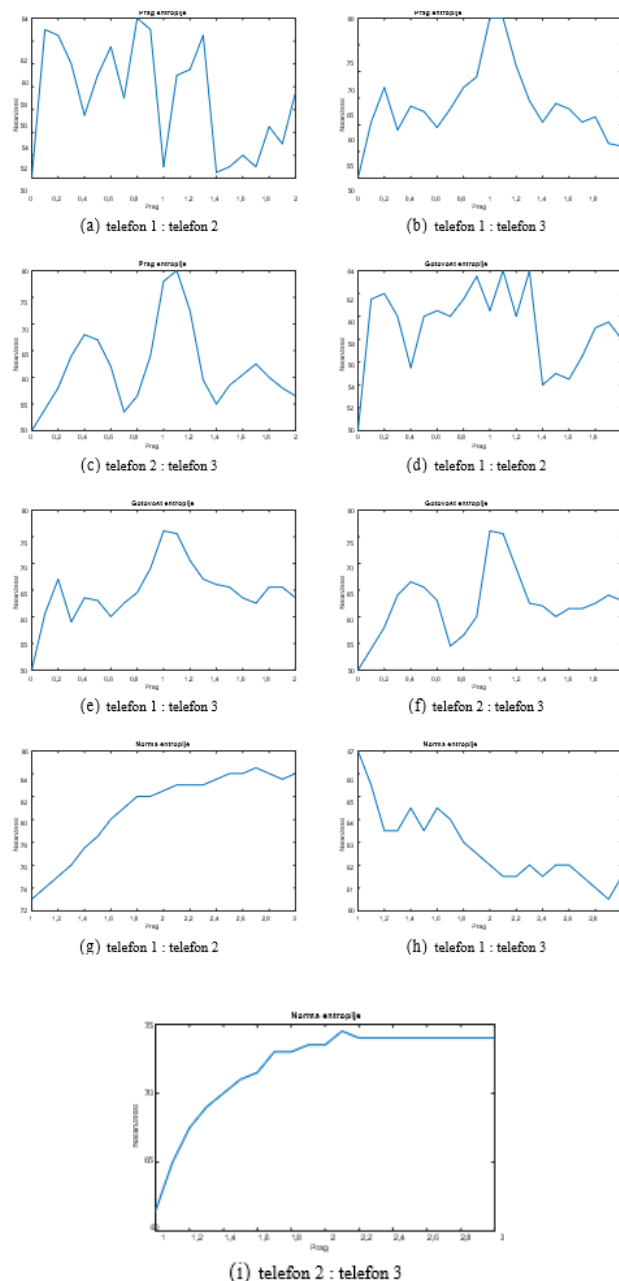
V naslednjih rezultatih ocenjujemo delovanje izhodnega signala merilnika pospeška vzdolž osi X. V poglavju 4.4 ocenjujemo učinkovitost za različne komponente MEMS in druge osi merilnika pospeška. Ker nekatere funkcije delujejo bolje kot druge, moramo, da bi se odločili, katere funkcije so najboljše, te funkcije neposredno primerjati. V ta namen izračunamo povprečno oceno vseh primerjav vsakega telefona z drugimi, kot je prikazano na sliki 4. Rezultate smo dobili z uporabo SVM z Gaussovim jedrom (RBF), z vrednostjo parametra σ 0,5, in stopnjo kkt z vrednostjo 0,1. To je bila le začetna nastavitve, saj bomo v naslednjih razdelkih optimizirali parametra za statistične značilke in funkcije jedra.



Slika 4. Povprečne ocene točnosti primerjav posameznih telefonov med seboj in s samim seboj za različne funkcije: vodoravne črte prikazujejo povprečne vrednosti vseh funkcij (66,6 oziroma 55,7).

4.1. Optimizacija funkcij

Nekatere statistične značilnosti imajo parametre, ki lahko privedejo do različnih rezultatov natančnosti. Zlasti za entropijo praga, gotovo entropijo in entropijo norme je treba določiti mejne vrednosti. Različne vrednosti praga lahko zagotovijo različne vrednosti točnosti. Eksperimentalno smo določili najboljše vrednosti praga. Ocene točnosti, prikazane na sliki 4, so bile izračunane z vrednostjo praga, ki zagotavlja najboljšo povprečno točnost vsake primerjave. Grafi, ki prikazujejo vpliv različnih vrednosti praga na tri značilke entropije, so prikazani na sliki 5. Upoštevajte, da se mora prag za entropijo norme začeti pri 1. Tako kot pri prejšnjih rezultatih smo uporabili jedrno funkcijo RBF s parametrom σ , ki je enak 0,5, in stopnjo kkt 0,1. Ugotavljamo, da je nekatere vrednosti praga težko izbrati za nekatere statistične značilke entropije (npr. entropijo norme) in da bi lahko manjše spremembe v okolju ali v samem MEMS spremenile optimalne vrednosti praga. To lahko postane težava pri aplikacijah, kjer se zahteva visoka in ponovljiva natančnost (npr. varnost). V teh primerih lahko načrtovalec aplikacije rajši izbere druge statistične značilke entropije.



Slika 5. Spremembe praga in rezultati natančnosti za funkcije *entropije praga*, *gotove entropije* in *entropije norme*. Vrednosti, ki zagotavljajo najboljše povprečne natančnosti, so 1,1 (povprečje 73,0), 1,1 (povprečje 71,6) in 2,5 (povprečje 73,3).

4.2. Optimizacija algoritma učenja

Podobno kot lastnosti lahko tudi funkcije jedra SVM optimiziramo s prilagoditvijo nekaterih nastavitev in parametrov. Za jedrno funkcijo RBF lahko na primer ocenimo učinke faktorja σ . Ugotovili smo, da vrednosti σ blizu 0 dajejo najnižje rezultate, medtem ko se po 1, kar je standardna vrednost, povprečje približa maksimumu (67,1), ki ga dosežemo, ko je sigma enak 1,6 (izvedli smo teste s σ do 10).

Na enak način analiziramo vpliv parametra reda v polinomski funkciji jedra. Vrstni red polinoma ne vpliva veliko na povprečno natančnost pri različnih primerjavah telefonov (telefon 1 : telefon 2, telefon 1 : telefon 3 in telefon 2 : telefon 3). Vendar pa red 3, ki je bil uporabljen že v prejšnjih izračunih, daje najboljši rezultat (66,7).

Na podlagi teh parametrov lahko zdaj primerjamo vse funkcije jedra in izberemo tisto, ki zagotavlja najboljšo točnost. Najboljšo povprečno točnost (67,1 %) dosežemo z uporabo jedrne funkcije RBF z optimizirano vrednostjo sigma (1,6). Vendar pa linearna funkcija jedra doseže skoraj enako povprečno točnost (66,7 %).

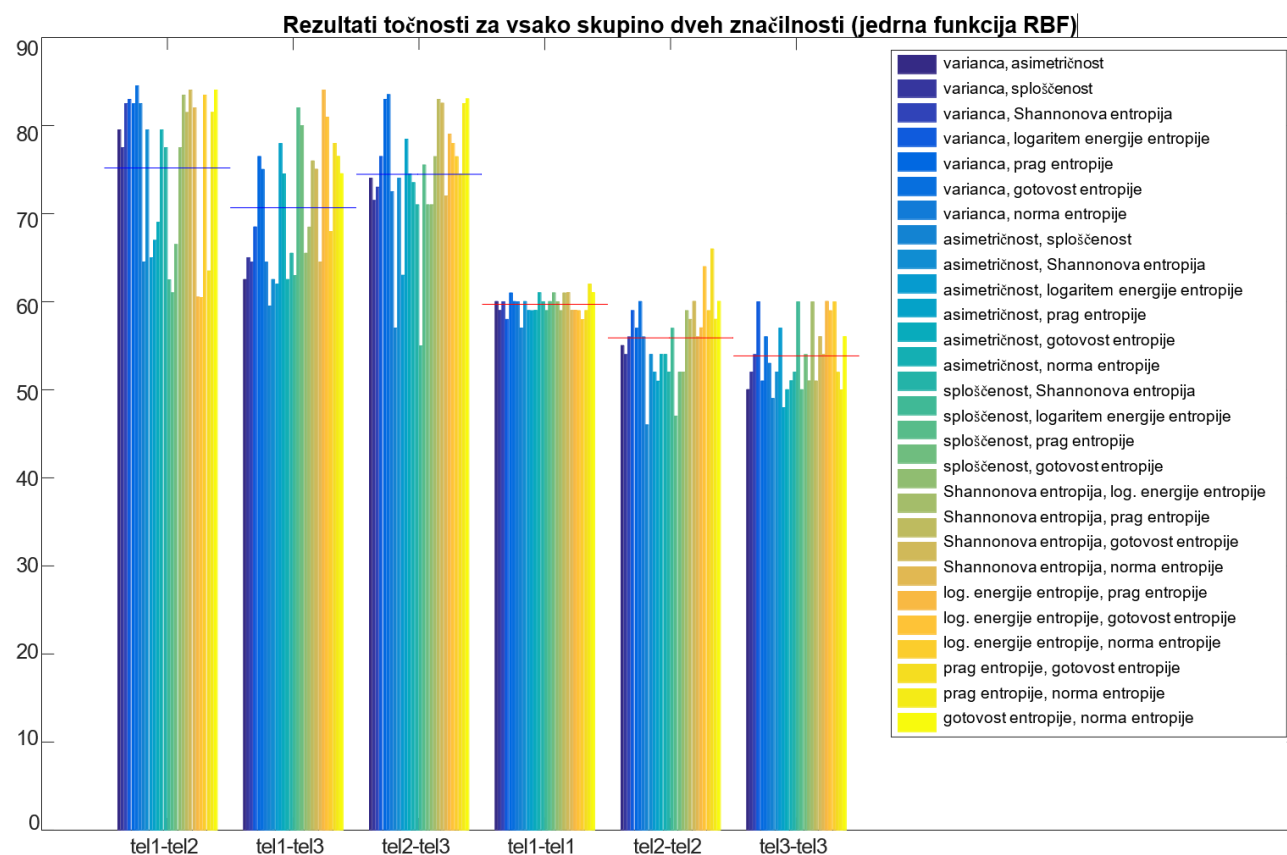
4.3. Kombinacija funkcij

Z uporabo najboljše konfiguracije algoritma, ugotovljene v prejšnjem razdelku, zdaj združimo značilnosti, da bi izboljšali natančnost identifikacije. Že na sliki 4 smo videli, da so variance in entropije (razen logaritma energije entropije) pokazale najboljše povprečne rezultate točnosti. Od skupin dveh značilk do uporabe vseh skupaj prikažemo, katera kombinacija daje najboljše rezultate.

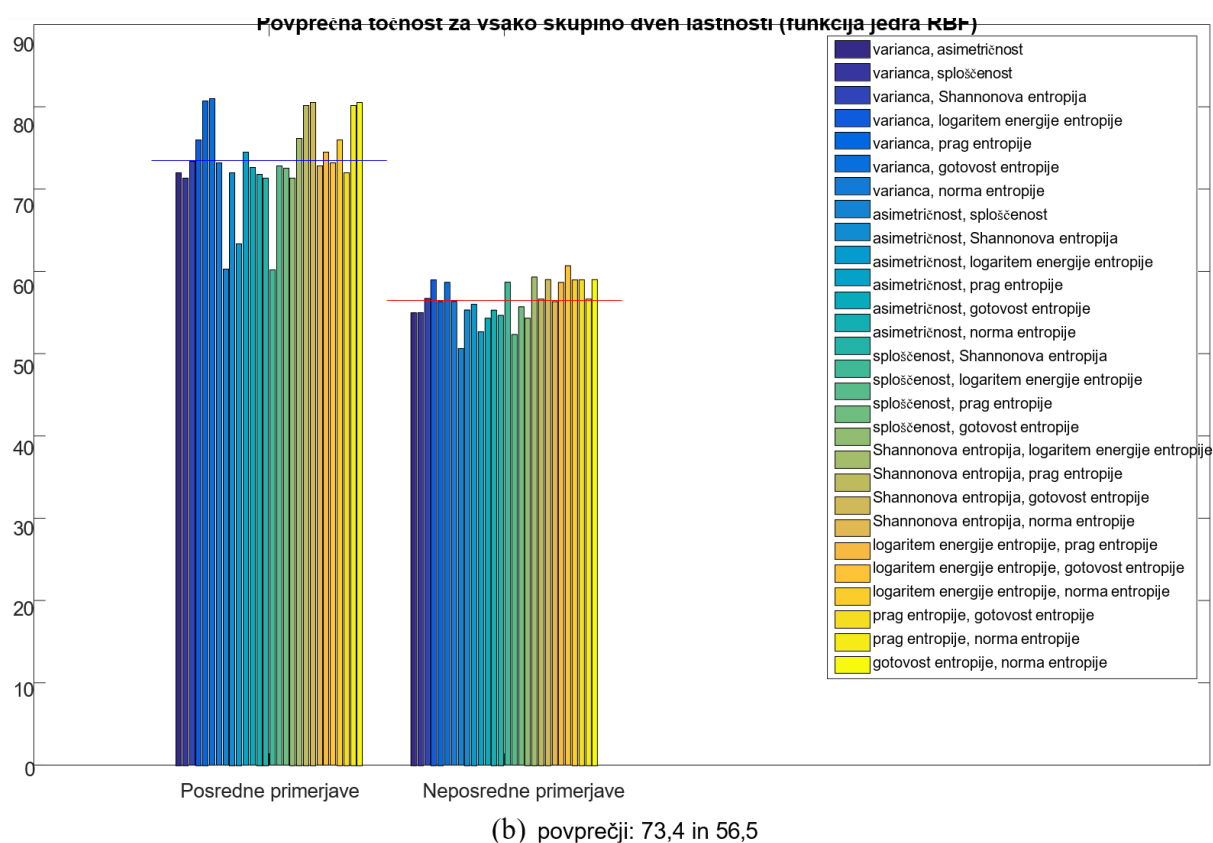
4.3.1. Kombinacija v skupinah, sestavljenih iz dveh, treh, štirih in petih funkcij

Slika 6 prikazuje 28 kombinacij dveh funkcij, razvrščenih po skupinah za primerjavo (telefon 1 proti telefonu 2 itd.), in sicer za posamezne in povprečne rezultate. Že iz tega je mogoče razbrati, da je pri kombiniranju variance in entropije skupaj točnost večja.

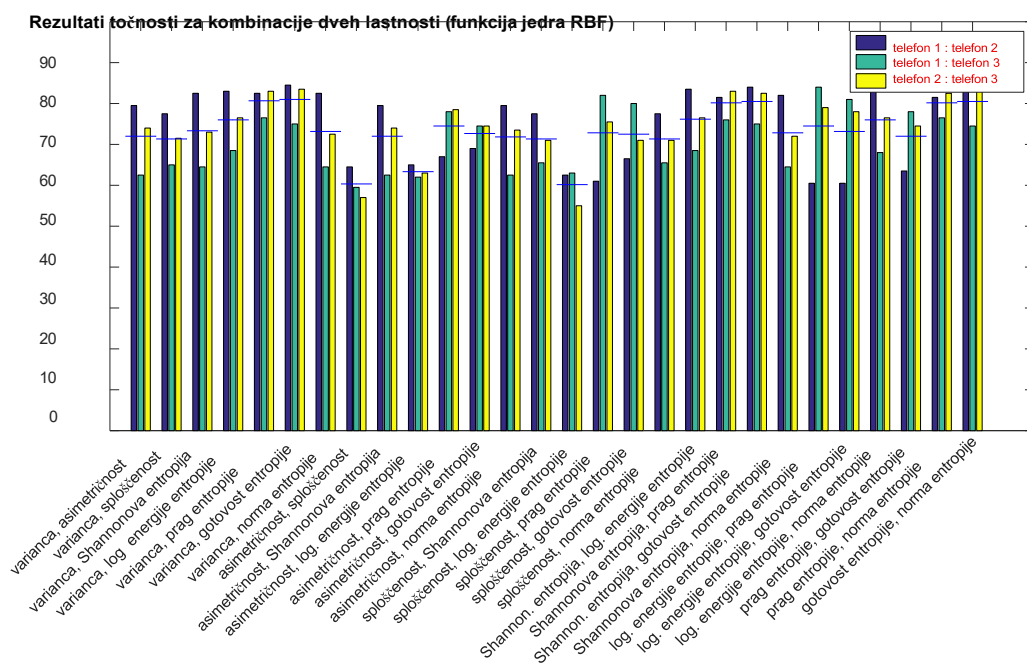
Da bi se prepričali, katera kombinacija je najboljša, iste rezultate prikažemo v skupinah po parih funkcij, kot je prikazano na sliki 7. Najboljši rezultat (zdaj prikazujemo samo posredne primerjave, tj. telefon 1 proti telefonu 2, telefon 1 proti telefonu 3 in telefon 2 proti telefonu 3) je dosežen s parom varianca, gotovost entropije, s povprečno točnostjo za tri primerjave 81 %, kar je bolje od rezultata, dobljenega za posamezne funkcije.



(a) Povprečja točnosti: 75,2, 70,6, 74,5, 59,7, 55,9 in 53,9



Slika 6. Točnost in povprečna točnost za skupine dveh lastnosti (jedrna funkcija RBF (Radial Basis Function)), pri vrednosti $\cdot 1,6$.



Slika 7. Kombinacija funkcij v skupinah po dve za posredne primerjave. Najboljša skupina kombinacij: *varianca, gotovost entropije* doseže povprečno točnost 81 %.

Z enakim pristopom zdaj kombiniramo lastnosti v skupinah po tri (56 kombinacij), pri čemer najboljši rezultat daje skupina, sestavljena iz značilk: varianca, logaritem energije entropije, prag entropije, ki pri primerjavi treh telefonov doseže povprečno natančnost 83,3 %. Značilnosti so oštevilčene po vrstnem redu, predstavljenem v poglavju 3. Tudi v tem primeru se s povečanjem števila funkcij izboljša točnost.

Skupine štirih elementov so najštevilčnejše (70 kombinacij) in omogočajo nekoliko večjo točnost. Najboljša skupina je logaritem energije entropije, prag entropije, gotovost entropije, norma entropije s povprečnim rezultatom 83,6 %. Pomen statističnih značilk entropije za identifikacijo pametnega telefona na podlagi vgrajenih MEMS potrjuje začetne ugotovitve avtorjev [8], ki so opazili pomembne razlike v Shannonovi entropiji merilnikov pospeška v osi z, vendar niso nadaljevali raziskav. Avtorji si [8] namreč v poglavju Sklepi zastavljajo vprašanje, koliko entropije je mogoče na splošno pridobiti iz senzorjev MEMS in kako jo je mogoče uporabiti za identifikacijo. Naš prispevek obravnava to vprašanje in podaja rezultate zanj. Naše ugotovitve temeljijo na obsežnejšem naboru statističnih značilk entropije, podrobneje pa smo primerjali uspešnost točnosti. Ugotavljamo tudi, da uporaba entropijskih statističnih značilk ni bila uporabljena v drugih nedavno objavljenih prispevkih, navedenih v poglavju 2. Avtorji v [2] so na primer uporabili zgolj običajne statistične značilke (npr. varianco, asimetričnost in sploščenost), ki so vključene tudi tukaj, ne pa tudi entropijskih značilk.

S petimi značilkami na skupino se število kombinacij zmanjša (56), vendar se točnost poveča na 84 %, ko vključimo skupine: Shannonova entropija, logaritem energije entropije, prag entropije, gotovost entropije, norma entropije.

4.3.2. Kombinacija v skupinah s šestimi, sedmimi in osmimi značilkami

Pri kombiniranju šestih značilk (28 skupin) se točnost začne zmanjševati. Najboljši rezultat, ki ga daje skupina varianca, sploščenost, logaritem energije entropije, prag entropije, gotovost entropije, norma entropije, je 83,3 %. Na enak način se pri kombiniranju sedmih značilk (osem kombinacij) točnost zmanjša na 82,5 % (varianca, sploščenost, Shannonova entropija, logaritem energije entropije, prag entropije, gotovost entropije, norma entropije). Ko nazadnje združimo vseh osem značilk skupaj, se povprečni rezultat za posredne primerjave zmanjša na 80,3 % (81 % za telefon 1 : telefon 2, 78,5 % za telefon 1 : telefon 3 in 81,5 % za telefon 2 : telefon 3).

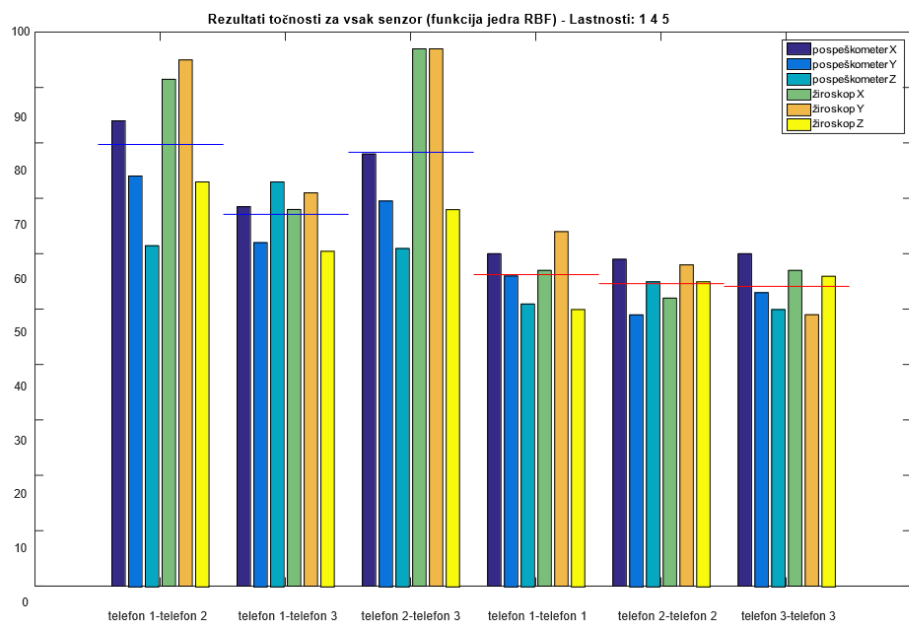
4.4. Analiza komponent MEMS

V prejšnjih rezultatih smo uporabili zbrane in obdelane podatke, povezane z izhodom pospeškometra, ki meri vzdolž osi X. Vendar lahko različni senzorji in izhodi dajo boljše rezultate, saj ima lahko gibanje robotske roke različne učinke zaradi majhnih odstopanj v doseganju pospeškov in rotacij. Zato v tem poglavju primerjamo odzivanje pospeškometra in žiroskopa po posameznih oseh, da bi ugotovili, kateri podatki omogočajo največjo točnost.

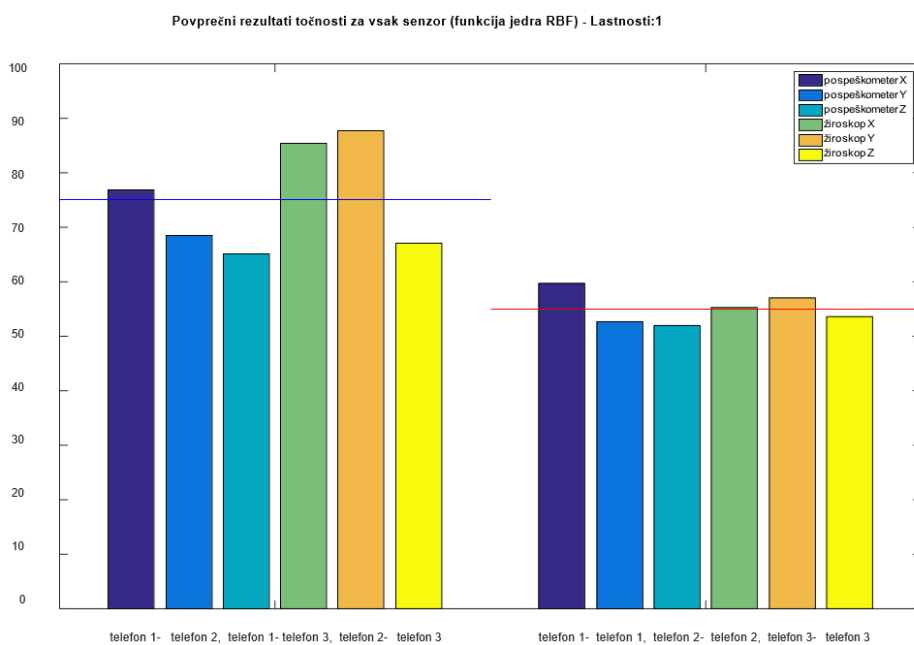
Najprej za komponente MEMS opravimo primerjavo z uporabo skupine treh značilk (variance (1), Shannonove entropije (4) in logaritma energije entropije (5)), ki ne zahtevajo prilagoditve parametrov (npr. praga drugih značilk entropije). Rezultati, prikazani na sliki 8, nakazujejo, da je točnost, pridobljena iz izhodnih signalov x in y žiroskopov, veliko večja kot iz izhodnih signalov pospeškometrov.

Za izhodni signal x pospeškometra optimiziramo vrednost praga za tri značilke entropije (šest, sedem in osem). Rezultati, ki vključujejo vse osi vseh senzorjev, so povzeti v preglednici 1.

S temi nastavitvami lahko na koncu izračunamo točnost izhodov x in y žiroskopa s skupinami petih funkcij, povprečne rezultate za 10 najboljših kombinacij pa prikazujemo na sliki 9 (z 10 najboljšimi kombinacijami pomeni 10 najvišjih rezultatov povprečnih točnosti v posredni primerjavi).



a) povprečja: 79,8, 67,2, 78,4, 56,3, 54,7, 54,2

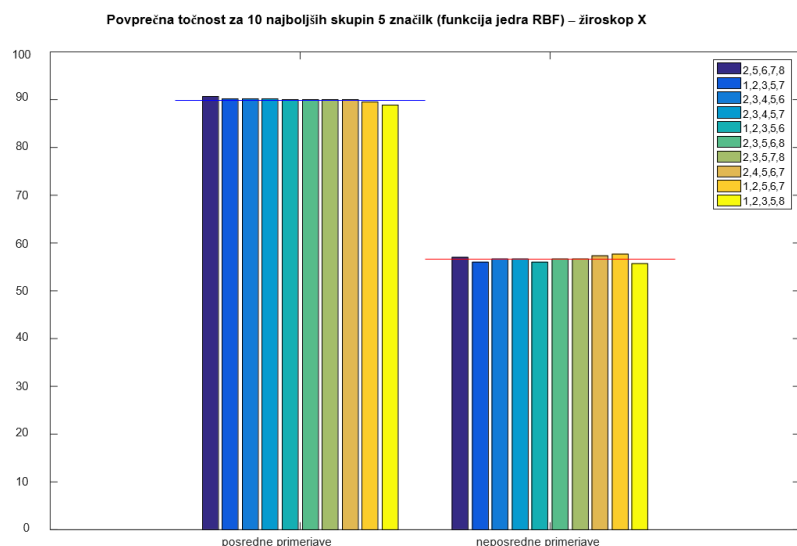


b) povprečji: 75,1 in 55,1

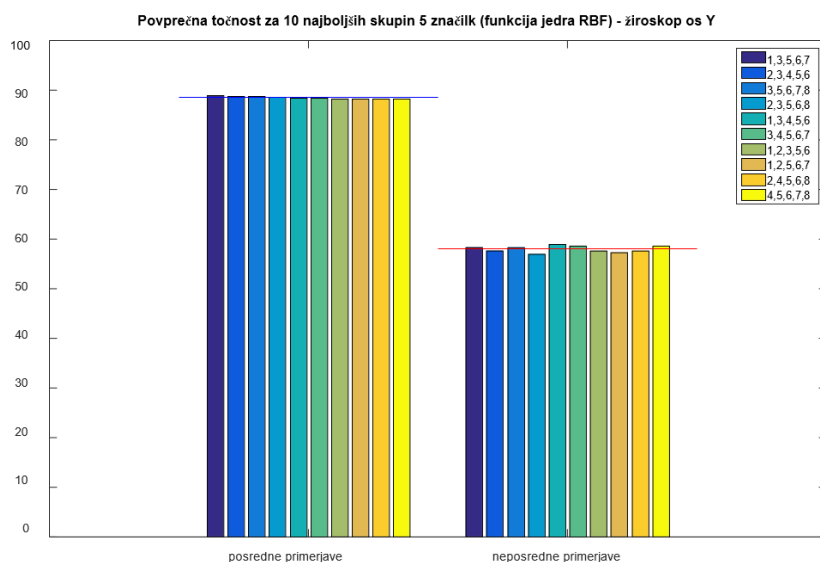
Slika 8. Točnosti za funkcije ena, štiri in pet vseh mikroelektromehanskih (MEMS) komponent.

Tabela 1. Optimalne vrednosti parametra praga za statistične značilke entropije za vsako os merilnika pospeška in žiroskopa.

komponenta-MEMS-in-os	prag-entropije α	gotovost-entropije α	norma-entropije α	
merilnik-pospeška-X α	1,1 α	1,1 α	2,5 α	0
merilnik-pospeška-Y α	2,0 α	2,0 α	2,6 α	0
merilnik-pospeška-Z α	1,8 α	1,9 α	1,1 α	0
žiroskop-X α	0,1 α	0,1 α	2,7 α	0
žiroskop-Y α	0,1 α	0,8 α	2,5 α	0
žiroskop-Z α	0,1 α	0,1 α	3,0 α	0



(a) povprečja: 90,0 in 56,6 (najboljša skupina značilk: *varianca, logaritem energije entropije, prag entropije, gotovost entropije, norma entropije*, 90,7 %)



(b) povprečja: 88,6 in 58,0 (najboljša skupina značilk: *varianca, sploščenost, logaritem energije entropije, prag entropije, gotovost entropije*, 89,0 %)

Slika 9. Točnost za 10 najboljših skupin petih značilk za izhode *x* in *y* žiroskopa.

Prikazani rezultati kažejo, da je mogoče različne pametne telefone istega modela razlikovati z veliko točnostjo, algoritem pa skoraj pravilno zagotavlja točnost naključno izbranih opazovanih podatkov, posnetih v različnih dneh.

Da bi zagotovili splošnost metode, smo ponovili meritve in zbiranje digitalnih izpisov iz MEMS v razmiku štirih mesecev od prvih meritev, na podlagi katerih so bili izračunani zgornji rezultati. Uporabili smo isto preizkusno postavitev (tj. isto platformo in iste scenarije gibanja) in iste mobilne telefone, ki smo jih uporabili v prejšnjem poskusu v dveh različnih dnevih.

Rezultati so prikazani v preglednici 2 za žiroskop X in preglednici 3 za žiroskop Y ter za različne sklope statičnih značilnosti, pridobljenih iz zgornjih skupin, prikazanih na sliki 9.

Tabela 2. Rezultati točnosti drugega kroga meritev štiri mesece po prvih. Podatki za žiroskop X.

nabor značilk	posredna primerjava	neposredna primerjava
[2 5 6 7 8]	62,65	80,24
[1 2 3 5 7]	58,8	76,71
[2 5 6 7 8]	58,33	79,5988

Tabela 3. Rezultati točnosti drugega kroga meritev štiri mesece po prvih. Podatki za žiroskop Y.

nabor značilk	posredna primerjava	neposredna primerjava
[1 3 5 6 7]	58,33	91,09
[2 3 4 5 6]	54,32	83,95
[3 5 6 7 8]	57,09	90,43

Opažamo poslabšanje natančnosti za žiroskop X, približno 80 % točnosti namesto približno 90 % pred štirimi meseci, za žiroskop Y pa so precej podobne vrednostim, pridobljenimi pred štirimi meseci.

Po izbiri najboljših nizov značilnosti podrobneje preučimo točnost klasifikacije na podlagi klasičnih cenilk ROC (*Receiver Operation Curve*) in EER (*Equal Error Rate*). Medtem ko točnost, ki je bila uporabljena za izris prejšnjih grafov, temelji na resnično pozitivnih (TP) in resnično negativnih (TN) rezultatih, dodatni metriki omogočata tudi oceno verjetnosti lažno pozitivnih (FP) in lažno negativnih (FN) rezultatov. FP predstavlja rezultat, ki označuje, da je bil določen pogoj izpolnjen, čeprav dejansko ni bil izpolnjen, FN pa je rezultat preizkusa, ki označuje, da pogoj ni bil izpolnjen, čeprav je dejansko bil.

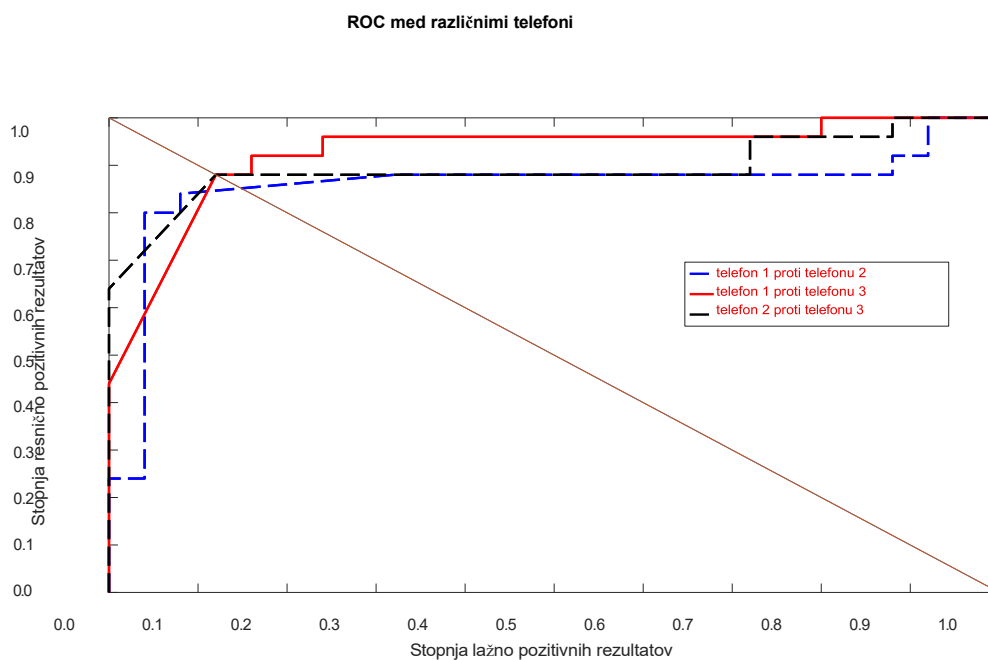
ROC je grafični prikaz, ki ponazarja uspešnost sistema binarnega klasifikatorja (v tem prispevku SVM), če se spreminja njegov prag razločevanja med dvema razredoma. Krivulja ROC izriše odvisnost TPR (*True Positive Rate*) od FPR (*False Positive Rate*) pri različnih izbirah vrednosti praga na intervalu [0,1].

Z metriko ROC je povezana EER, metrika, ki se uporablja za ocenjevanje uspešnosti klasifikacijskega sistema, ki ustreza točki na krivulji ROC, kjer sta vrednosti FNR (kar je enako $1 - \text{TPR}$) in FPR enaki. Ta metrika se pogosto uporablja kot končni povzetek rabe statističnih metod za primerjavo uspešnosti različnih klasifikacijskih sistemov. Na splošno nižja EER pomeni, da sistem uspešnejše klasificira.

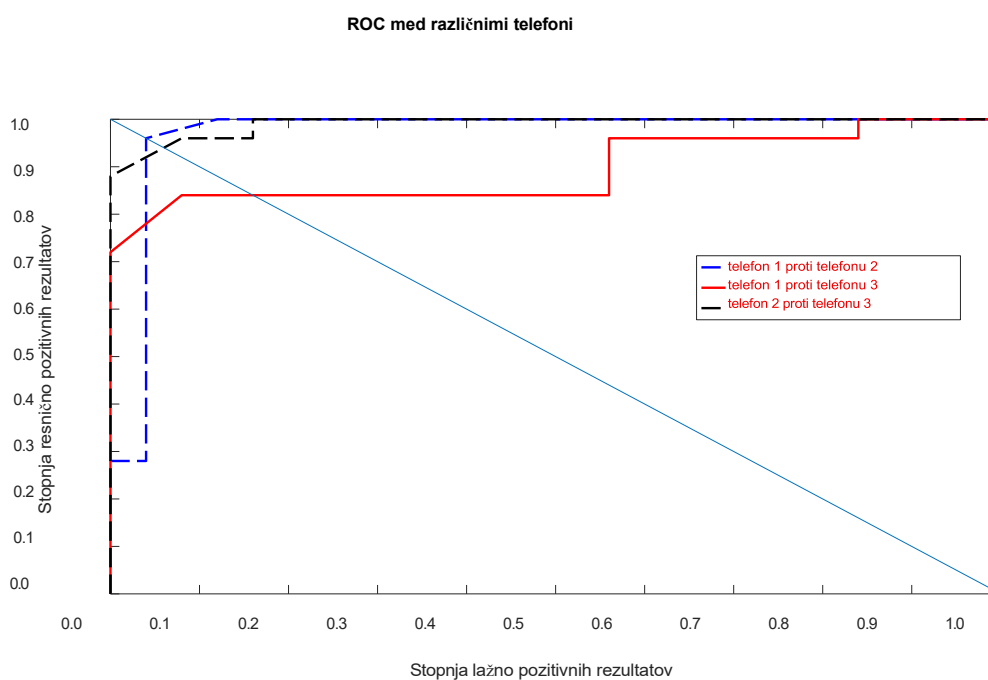
Slika 10 prikazuje ROC z uporabo žiroskopa X za niz značilk (1, 2, 3, 5, 7), ki je bil eden od najboljših nizov značilk. Slika 11 prikazuje ROC z uporabo žiroskopa Y za niz značilk (1, 3, 5, 6, 7), uporabljeni so podatki enega dneva. Oba grafa ROC prikazujeta primerjavo med različnimi telefoni: telefon 1 proti telefonu 3, telefon 2 proti telefonu 3 in telefon 1 proti telefonu 2. Ravna črta je uporabljena za prikaz načina izračuna EER. Dobljene vrednosti EER so prikazane v preglednici 4. Vrednosti EER kažejo, da je delovanje žiroskopa Y za klasifikacijo običajno boljše od delovanja žiroskopa X, kar potrjujejo tudi podatki, pridobljeni v drugem krogu meritev (glejte analizo spodaj).

Tabela 4. EER za žiroskop X in žiroskop Y za podatke za en dan v prvem nizu meritev.

EER	žiroskop X	žiroskop Y
telefon 1 proti telefonu 2	0,15	0,04
telefon 1 proti telefonu 3	0,12	0,17
telefon 2 proti telefonu 3	0,12	0,07

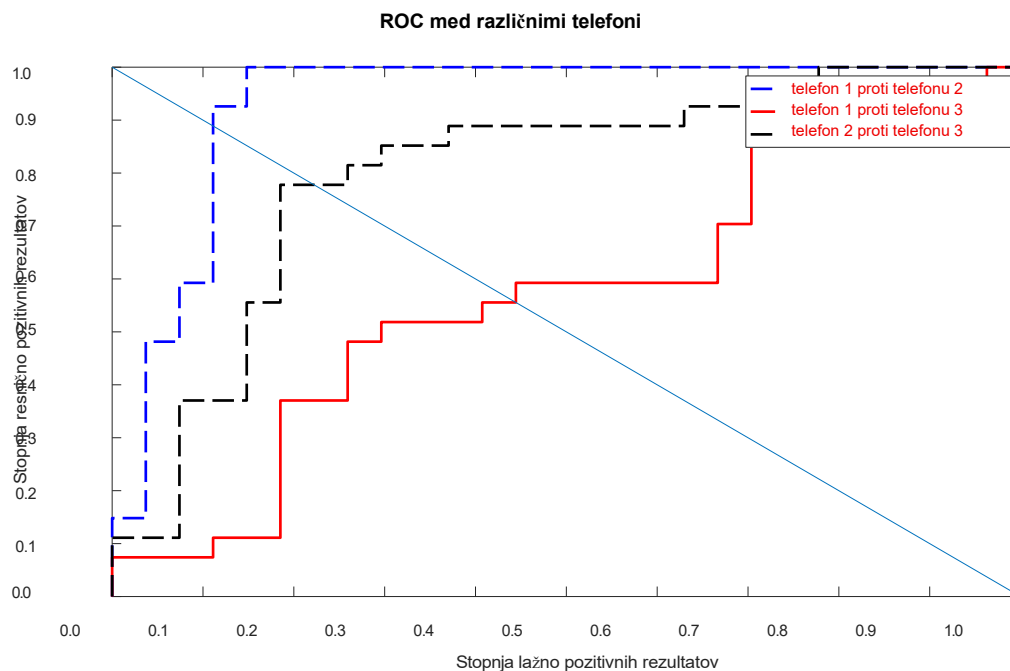


Slika 10. ROC ocene klasifikacije različnih telefonov z uporabo prvega scenarija za žiroskop X za enodnevne podatke v prvem sklopu meritev.

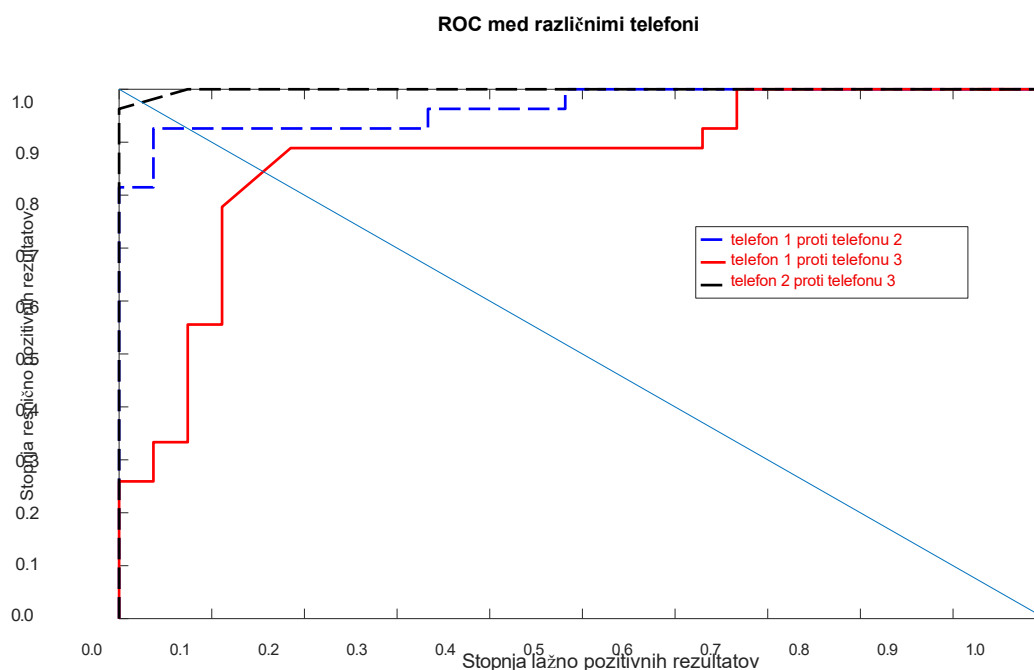


Slika 11. ROC med različnimi telefoni z uporabo prvega scenarija za žiroskop Y za enodnevne podatke v prvem sklopu meritev.

To so potrdile tudi krivulje ROC in z njimi povezane vrednosti EER, ki so izračunane na podlagi merjenja, opravljenega štiri mesece po prvi seji. Krivulje ROC se izračunajo z enakimi parametri, kot so navedeni zgoraj (žiroskop X za sklop značilnosti (1, 2, 3, 5, 7) in žiroskop Y za sklop značilnosti (1, 3, 5, 6, 7)), in so prikazane na slikah 12 in 13.



Slika 12. ROC med različnimi telefoni z uporabo prvega scenarija za žiroskop X za enodnevne podatke v drugem nizu meritev.



Slika 13. ROC med različnimi telefoni z uporabo prvega scenarija za žiroskop Y za enodnevne podatke v drugem nizu meritev.

Kot je bilo že poudarjeno, vrednosti EER iz drugega sklopa meritev (v preglednici 5) kažejo, da je točnost identifikacije z uporabo žiroskopa, ki meri obračanje okoli osi X, slabša, kot z žiroskopom okoli osi Y. To je tudi posledica relativno nizke točnosti pri razlikovanju telefona 1 od telefona 3, kar je bilo prikazano že v prejšnjih grafih (npr. na sliki 6). Ne glede na splošno točnost opazimo, da so tudi vrednosti EER z žiroskopom okoli osi Y precej dosledne in zelo podobne vrednostim, zbranim med prvim nizom meritev (v preglednici 4) in drugim nizom meritev (tj. preglednica 5). Zato priporočamo uporabo žiroskopa okoli osi Y tudi za stabilnost rezultatov klasifikacije.

Tabela 5. Metrika uspešnosti EER za žiroskop X in žiroskop Y za podatke za en dan v drugem nizu meritev.

EER	žiroskop X	žiroskop Y
telefon 1 proti telefonu 2	0,11	0,04
telefon 1 proti telefonu 3	0,44	0,16
telefon 2 proti telefonu 3	0,22	0,07

S tem se konča analiza, predstavljena v tem prispevku, katere cilj je bil ugotoviti najboljšo kombinacijo značilnosti in komponent MEMS za izboljšanje točnosti identifikacije pametnih telefonov. Analizo smo začeli z oceno različnih statističnih značilnosti in različnih funkcij jeder z uporabo merilnika pospeška vzdolž smeri x. Čeprav je bila dobljena točnost dobra (v večini primerov okoli 70 %), smo poskušali določiti optimalne vrednosti za njeno povečanje. Povečanje smo dosegli s kombiniranjem različnih lastnosti, pri čemer smo izčrpali vse možne kombinacije statističnih značilnk. Ocenili smo še žiroskop, drugo komponento vgrajenega MEMS, in dosegli visoko raven točnosti, predstavljeno v tem poglavju, in se omejili na določene kombinacije značilnk. Štiri mesece po prvem nizu meritev smo izvedli še en niz meritev, da bi pokazali, da je algoritem mogoče posplošiti. Čeprav se je uspešnost klasifikacije z uporabo žiroskopa x nekoliko poslabšala, je klasifikacija z uporabo žiroskopa y ohranila skoraj enako raven točnosti. Dobljena raven točnosti je primerna za številne aplikacije, opisane v uvodu. Seveda so ti rezultati pridobljeni na podlagi posebnega scenarija in izbira parametrov je lahko v drugačnem scenariju nekoliko drugačna. Kljub temu menimo, da je izbrani scenarij dobro uravnotežen med potrebo po preprosti konfiguraciji robotske roke in potrebo po ustrezni stimulaciji komponent MEMS v pametnem telefonu.

5. Sklepne ugotovitve

V tem prispevku smo raziskali problem prepoznavanja telefonov na podlagi njihovih komponent MEMS, kakršne so pospeškometri in žiroskopi. Uporabili smo različne statistične značilke z različnimi vrednostmi parametrov in pragov. Glavni cilj študije je bil ugotoviti, katere statistične značilnosti zagotavljajo boljše rezultate točnosti klasifikacije. Za doseg tega cilja smo izvedli izčrpno analizo izbire in kombinacije statističnih značilnk z različnimi parametri in različnimi funkcijami jedra podpornega vektorskega stroja (SVM), ki se uporablja za binarno klasifikacijo. Da bi preverili robustnost algoritma, smo preverili dobljeno točnost s podatki, pridobljenimi iz štirih različnih scenarijev vzbujanja v različnih nizih meritev, ki so bile časovno ločene za štiri mesece. Rezultati so pokazali, da je mogoče doseči zelo visoko točnost pri razlikovanju različnih pametnih telefonov. V primerjavi s predhodno objavljenimi raziskavami smo kot zelo pomembne lastnosti za izboljšanje natančnosti identifikacije opredelili tudi lastnosti statistične entropije. To je pomemben rezultat, saj prejšnja dela niso uporabljala značilnosti statistične entropije ali pa so jih uporabljala v omejenem obsegu. Posledično se lahko uporabi digitalne izhodne signale MEMS pametnega telefona, podvrženega posebnemu ponovljivemu scenariju, za identifikacijo različnih pametnih telefonov istega modela, kar se lahko uporabi v boju proti ponarejanju ali za varnostne in forenzične namene. Načrtujemo preučitev vpliva različnih platform za generiranje vzorcev gibanja na natančnost identifikacije in z večjim številom mobilnih telefonov iste blagovne znamke in modela, ki bodo uporabljeni v poskusu.

V tem rokopisu so uporabljene naslednje okrajšave:

EER	postopek ocenjevanja uspešnosti klasifikacije
KKT	Karush–Kuhn–Tucker
MEMS	mikro-elektro-mehanski sistemi
MLP	večplastni perceptron
PKI	infrastruktura izmenjave javnih ključev
RBF	radialna bazna funkcija
RF	radijska frekvenca
ROC SMO	postopek ocenjevanja uspešnosti klasifikacije
SVM	zaporedna minimalna optimizacija
	ena od metod strojnega učenja

Viri in literatura

- Guin, U.; Huang, K.; DiMase, D.; Carulli, J.; Tehranipoor, M.; Makris, Y. Counterfeit Integrated Circuits: A Rising Threat in the Global Semiconductor Supply Chain. *IEEE Proc.* 2014, *102*, 1207-1228.
- Dey, S.; Roy, N.; Xu, W.; Choudhury, R.R.; Nelakuditi, S. AccelPrint: S: Imperfections of Accelerometers Make Smartphones Trackable. Objavljeno v: Proceedings of the 2014 Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium, San Diego, Kalifornija, ZDA, 23.-26. februar 2014.
- Združenje industrije mobilne telefonije. Načrt testiranja zanesljivosti strojne opreme naprav V1.0, 2015. Dostopno na spletu: <http://www.ctia.org/policy-initiatives/certification/certification-test-plans> (zajeto 18. maja 2016).
- Luque, R.; Casilari, E.; Morón, M.J.; Redondo, G. Comparison and Characterization of Android-Based Fall Detection Systems. *Senzorji* 2014, *14*, 18543-18574.

5. Incel, O.D. Analysis of Movement, Orientation and Rotation-Based Sensing for Phone Placement Recognition. *Sensors* 2015, 15, 25474–25506.
6. Fenu, G.; Steri, G. Two methods for body parameter analysis using Body Sensor Networks. Objavljeno v: Proceedings of the International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops (ICUMT '09), Sankt Peterburg, Rusija, 12.-14. oktobar 2009; str. 1-5.
7. Fenu, G.; Steri, G. IMU-based post-traumatic rehabilitation assessment. Objavljeno v: Proceedings of the 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), Rim, Italija, 7.-10. november 2010; str. 1-5.
8. Bojinov, H.; Michalevsky, Y.; Nakibly, G.; Boneh, D. Mobile Device Identification via Sensor Fingerprinting. 2014, arxiv:abs/1408.1416.
9. Das, A.; Borisov, N.; Caesar, M. Exploring Ways To Mitigate Sensor-Based Smartphone Fingerprinting. 2015, arxiv:1503.01874.
10. Yang, X.C.; Li, J.P.; Mou, J.P. An anti-counterfeiting method based on VCS for mobile phone's identification. Objavljeno v: Proceedings of the 2012 International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP), Chengdu, Kitajska, 17.-19. december 2012; str. 169-172.
11. Lakafosis, V.; Traille, A.; Lee, H.; Gebara, E.; Tentzeris, M.; DeJean, G.; Kirovski, D. RF Fingerprinting Physical Objects for Anticounterfeiting Applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2011, 59, 504-514.
12. Suh, G.; Devadas, S. Physical Unclonable Functions for Device Authentication and Secret Key Generation. Objavljeno v: Proceedings of the 44th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC '07), San Diego, Kalifornija, ZDA, 4.-8. junij 2007; str. 9-14.
13. Kim, J.; Yun, J.M.; Jung, J.; Song, H.; Kim, J.B.; Ihee, H. Anti-counterfeit nanoscale fingerprints based on randomly distributed nanowires. *Nanotehnologija* 2014, 25, 155303.
14. Bertoncini, C.; Rudd, K.; Noursain, B.; Hinders, M. Wavelet Fingerprinting of Radio-Frequency Identification (RFID) Tags. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2012, 59, 4843-4850.
15. Cobb, W.E.; Garcia, E.W.; Temple, M.A.; Baldwin, R.O.; Kim, Y.C. Physical layer identification of embedded devices using RF-DNA fingerprinting. Objavljeno v: Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM 2010), San Jose, Kalifornija, ZDA, 31. oktobar-3. november 2010; str. 2168-2173.
16. Cristianini, N.; Shawe-Taylor, J. *An Introduction to Support Vector Machines and other Kernel-Based Learning*

Modeliranje pretovora kontejnerjev v severnih jadranskih pristaniščih v obdobju 1990-2013

Elen Twrddy, Milan Batista

Prevod dela: Modeling of container throughput in Northern Adriatic ports over the period 1990–2013, Journal of Transport Geography (52), 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.005>

Povzetek: V tej študiji so predstavljeni dinamični modeli za napovedovanje pretovora kontejnerjev v severnojadranskih pristaniščih Koper, Trst, Benetke, Ravena in Reka. Na podlagi pridobljenih podatkov smo pripravili preproste, a učinkovite modele za napovedovanje verjetnosti povečanja ali zmanjšanja prometa iz leta v leto. Modeli so pripravljene na podlagi razpoložljivih podatkov; to so model letne stopnje rasti z markovsko verigo, model trendov časovnih vrst, model trendov časovnih vrst s periodičnimi členi in model »Grey« sistema. V drugem delu študije raziskujemo model za analizo odnosov sodelovanja/konkurence med temi pristanišči z uporabo posplošenega Lotke-Volterjevega dinamičnega sistema.

Ključne besede: Severnojadranska pristanišča, pretovor kontejnerjev, modeliranje

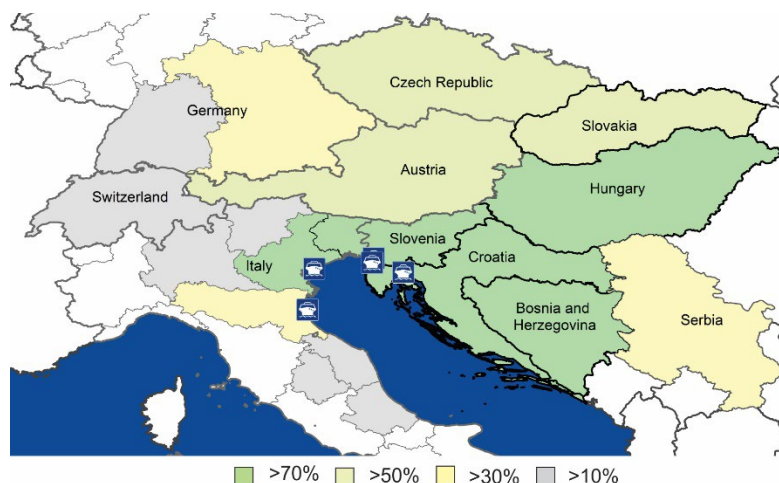
1. Uvod

Pristanišča so eden najpomembnejših členov logistične verige, zlasti v zadnjih letih zaradi izjemne rasti kontejnerskega ladijskega prometa. Ta študija predstavlja pretovor kontejnerjev v severnojadranskih pristaniščih (NAP North Adriatic Ports) in napovedi za prihodnja leta. Pristanišča v tej regiji, ki lahko pretovarjajo kontejnerje, so Reka (Hrvaška), Koper (Slovenija) in tri italijanska pristanišča: Trst, Benetke in Ravena. Nahajajo se na križišču Baltsko-Jadranskega koridorja, Sredozemskega koridorja in V. panevropskega koridorja ter v bližini X. panevropskega koridorja. Po mnenju Nottebooma (2010), so NAP del regije več pristanišč na severnem Jadranu. Na začetku sedanjega desetletja so bila ta pristanišča glavna kontejnerska pristanišča za Hrvaško, Slovenijo, vzhodne italijanske regije (Furlanija-Juljska krajina in Benečija), Madžarsko in Bosno. Strategija trženja za ta pristanišča predvideva, da bodo do leta 2030 postala glavna kontejnerska pristanišča za Avstrijo, Slovaško in Češko ter prodrla v Švico in Bavarsko, to je v regije, ki jih sedaj pokrivajo severnomorska pristanišča (MDS, 2012) (slika 1). Zato so vse nacionalne infrastrukturne mreže v procesu obnove in prenove obstoječih železnic in cest, načrtujejo izgradnjo manjkajočih infrastrukturnih povezav, nekatera pristanišča povečujejo zmogljivost pretovarjanja kontejnerjev in poglobljajo morsko dno. Ker so NAP strateškega pomena za Slovenijo, Hrvaško in vzhodno Italijo, je pomembno pridobiti nekaj vpogleda v to, kako se bo kontejnerski promet spremenil v bližnji prihodnosti. S tem v mislih smo si zastavili prvi cilj članka, kot sledi:

- *raziskati metode napovedovanja, primerne za kratkoročne napovedi celotnega prometa kontejnerjev v NAP, in izbrati optimalno metodo.*

Ugotavljamo, da so vsa pristanišča za pretovor kontejnerjev majhna ali srednje velika pristanišča in da le skupaj lahko delujejo kot veliko pristanišče. Zato ne poskušamo napovedovati prometa za posamezna pristanišča ampak za vsa NAP pristanišča. Poleg tega predvidevamo, da ta pristanišča kratkoročno ohranijo svoj trenutni tržni delež (Brodie in de Kluyver, 1987). Ker imajo NAP enako dejansko in potencialno zaledje, bi lahko obstajala med njimi odvisnost, ki vpliva na njihove tržne deleže. Poleg tega je leta 2010 NAP ustanovil združenje, imenovano North Adriatic Ports Association (NAPA), da bi med drugim "promoviral NAP kot alternativo severnoevropskim pristaniščem" (NAPA). Glede na te potencialno nasprotujoče si sile je drugi cilj članka raziskati metode, primerne za analizo razmerij med konkurenco in delovanjem v NAP.

Z uresničevanjem teh ciljev želimo pridobiti vpogled v dinamiko prometa kontejnerjev v NAP in razviti metodologijo, ki bo uporabna pri sprejemanju strateških odločitev.



Slika 1. Lokacija NAP in napovedani tržni delež v letu 2030 za NAP.

Vir: (MDS, 2012).

1.1. Podatki

Podatki, uporabljeni v tej študiji, so letni pretovor kontejnerjev v izbranih pristaniščih za obdobje 1990- 2013. Podatki so pridobljeni iz statističnih poročil NAP, poročil italijanskega ministrstva za infrastrukturo o pristaniških dejavnostih in ustrezne literature (Twrđy, 2004). Ugotovili smo nekaj razhajanj med podatki, večinoma za pristanišče Reka, vendar je ocenjeno povprečno absolutno razhajanje za skupni prevoz kontejnerjev v NAP v tem obdobju znotraj 2 %.

1.2. Pregled literature

Metode napovedovanja se običajno delijo na kvalitativne ali kvantitativne, pri čemer se slednje lahko nadalje delijo na metode časovnih vrst in vzročne metode (Abraham in Ledolter, 1983; Chambers idr., 1971). V grobem metode napovedovanja časovne vrste ekstrapolirajo obnašanje podatkov iz preteklosti v prihodnost, zato so te metode uporabne za kratkoročno napovedovanje (do 2-3 let). Po drugi strani pa vzročno-posledične metode predpostavljajo povezavo med vključenimi spremenljivkami, na primer med pretokom v pristanišču in bruto domačim proizvodom (BDP), in so uporabne za srednjeročno (do 10 let) in dolgoročno (več kot 10 let) napovedovanje (Carnot idr., 2005; De Langen idr., 2012). Analizo trenutnih metod napovedovanja za kratkoročno napovedovanje pristaniškega tovora so podali Zhang in drugi (2013). Pregled metod za srednjeročno napovedovanje so podali Hui in drugi (2004), medtem ko so Van Dorsser in drugi (2012) pregledali vzročne metode za dolgoročno napovedovanje pretočnosti pristanišč.

V tej študiji so naši podatki sestavljeni izključno iz števila pretovorjenih kontejnerjev, zato smo omejeni na kratkoročno napovedovanje. V literaturi so bile za napovedovanje pretovora kontejnerjev uporabljene različne kratkoročne metode. Na primer, Chou in drugi (2008) so za kratkoročno napovedovanje količin tajvanskih uvoznih/izvoznih kontejnerjev uporabili spremenjen regresijski model. Model vključuje devet makroekonomskih pojasnjevalnih spremenljivk (število prebivalcev, indeks industrijske proizvodnje, bruto nacionalni proizvod, bruto nacionalni proizvod na prebivalca, veleprodajne cene, BDP, kmetijski BDP, industrijski BDP in storitveni BDP). Ugotovili so, da je napovedovanje z njihovim modelom, ki upošteva nestacionarne prispevne koeficiente, ki jih ustvarjajo spremenljivke, natančnejše od napovedovanja s tradicionalnimi regresijskimi metodami. Poleg tega je ta študija vsebovala dober pregled regresijskih modelov. Peng in Chu (2009) sta primerjala šest univariatnih modelov (razgradnja, trigonometrična regresija, regresija s sezonskimi navideznimi spremenljivkami, Grey, hibridni Grey in sezonska avtoregresija z integrirano drsečo sredino, SARIMA) za kratkoročno napovedovanje pretočnosti kontejnerjev na Tajvanu. Ugotovili so, da nobena metoda ni najboljša. Chen in Chen (2010) sta primerjala natančnost kratkoročnega napovedovanja treh modelov (genetsko programiranje, GP, razgradnja in SARIMA). Na podlagi mesečnega nabora podatkov v obdobju 29 let sta ugotovila, da je bila relativna napaka med napovedanimi in dejanskimi podatki pri vseh treh modelih znotraj 4 % in da je bila najboljša napoved dosežena z modelom GP. Huang in drugi (2015) so predlagali algoritemsko metodo, ki za kratkoročno napovedovanje združuje regresijo z zasledovanjem projekcije (PPR) in GP. Z uporabo mesečnega nabora podatkov za obdobje 7 let so ugotovili, da je kombinirana metoda PPR-GP uspešnejša od PPR in SARIMA pri napovedovanju pretovora kontejnerjev v pristanišču Qingdao (Kitajska). Iz tega kratkega pregleda literature je razvidno, da ni najboljših metod za kratkoročno napovedovanje rasti pretovora kontejnerjev. Zato v tej študiji raziskujemo in primerjamo več kratkoročnih metod ter poskušamo najti optimalno metodo za pridobitev uporabnih in realističnih rezultatov za NAP.

V študiji se osredotočamo na konkurenco pristanišč, in ne na konkurenčnost pristanišč, to je, konkurenčne prednosti posameznega pristanišča (Notteboom in Yap, 2012). Podobno kot pri napovedovanju lahko modele konkurence/sodelovanja razdelimo na kvalitativne in kvantitativne. Za kvalitativni pristop k razkrivanju konkurenčnosti pristanišč omenjamo tri študije. Prva je Slackova (1985), ki je s pomočjo vprašalnikov ugotavljal merila, ki jih kontejnerski prevozniki - ladjarji uporabljajo pri izbiri pristanišča. Song (2002) je obravnaval lokalno in regionalno konkurenco ter sodelovanje med pristanišči v Hongkongu in Južni Kitajski na podlagi upravnih in lastniških struktur pristanišč. Ugotovil je, da bi lahko sodelujoča pristanišča, na primer s skupnimi naložbami, dosegla več ciljev, kot so racionalizacija, ekonomija obsega in kooperacija ali oblikovanje strateških zaveznikov s konkurenti proti strankam. De Langen in Nijdam (2009) sta analizirala sodelovanje med pristanišči v Københavnu in Malmöju, zdaj pristanišče København Malmö. Podobno kot Song sta ugotovila več prednosti sodelovanja, kot sta učinkovitejša uporaba pristaniških virov (delovna sila, zemljišče, kapital in infrastruktura) in specializacija, ki med drugim preprečuje dvojne naložbe, ter vodi v ekonomijo obsega.

Iz razpoložljive literature vidimo, da ni edinstvene kvantitativne metode za analizo odnosov med konkurenco in sodelovanjem v pristaniščih; namesto tega se ti odnosi odkrivajo s časovnim vrednotenjem njihovega pretovora, tržnega deleža in drugih indeksov. Notteboom (1997 ; 2010) je kot primer uporabil analizo dinamike kontejnerskega prometa in koncentracije pristanišč v pristaniškem sistemu EU, oceno tržnega deleža, matriko rasti-deleža, analizo premika- deleža in oceno Hirshmann-Herfindahl indeksa (HHI). Le in Ieda (2010) sta obravnavala dinamiko koncentracije pristanišč v vzhodni Aziji v obdobju 1975-2005 z uporabo različice HHI, imenovane geogospodarski indeks koncentracije. Veldman in Buckmann (2003) sta modelirala tržni delež severnomorskih kontejnerskih pristanišč Rotterdam, Antwerpen, Bremen in Hamburg z logit modelom, v katerem so pojasnjevalne spremenljivke, kot so prevozni stroški, tranzitni čas, pogostost storitev in kazalnik kakovosti storitev. Yeo in Song (2006) sta predstavila algoritemsko večkriterijsko metodo, ki sta jo poimenovala hierarhična fuzzy procesna metoda, katere cilj je bil opredeliti konkurenčnost kontejnerskih pristanišč v Aziji. Nekateri avtorji so za analiziranje konkurence v pristaniščih uporabili analizo zmogljivosti slotov. Na primer, Yap in drugi (2006) so analizirali razvoj konkurence kontejnerskih pristanišč med desetimi večjimi pristanišči v vzhodni Aziji v obdobju 1995- 2001, Lam in Yap (2008) pa sta preučevala dinamiko konkurence med pristanišči jugovzhodne Azije Lang, Singapore in Tanjung Pelepas v obdobju 1999-2004. Zondag in drugi (2010) so uvedli model za napovedovanje tržnega deleža pristanišč, ki izrecno modelira konkurenco med pristanišči, pri čemer upošteva izvor in cilj, pa tudi vrsto tovara, velikost ladje, dostop do morja, zmogljivost in učinkovitost pristanišč ter prevoz v zaledje. Ishi in drugi (2013) so z modelom nekooperativne igre preučili konkurenco med pristanišči Busan v Južni Koreji in Kobe na Japonskem. Medtem ko je Hoshino (2010) podal bolj kakovosten pogled na konkurenco in sodelovanje med japonskimi kontejnerskimi pristanišči.

V tem tisočletju je kointegracijska analiza postala priljubljena metoda za analizo razmerij med pristanišči (Juselius, 2006). Fung (2001) je uporabil strukturni model korekcije vektorskih napak za izvedbo podrobne študije konkurence med pristanišči Hongkonga in Singapurja. Yap in Lam (2006) sta analizirala dolgoročno in kratkoročno dinamiko konkurence med 10 večjimi kontejnerskimi pristanišči v vzhodni Aziji od leta 1980 do 2001 z uporabo vektorskega avtoregresijskega modela (VARM - vector autoregressive model) in Johansenovega testa kointegracije. Negativne koeficiente v kointegracijskih enačbah so razlagali kot znak konkurence med pristanišči, pozitivne koeficiente pa kot znak komplementarnih odnosov med pristanišči. Podoben pristop sta uporabila Chiang in Hwang (2010), ki sta analizirala odnose med šestimi glavnimi azijskimi pristanišči z uporabo testa kointegracije in testa Grangerjeve vzročnosti. Pri tem nista ugotovila dolgoročnih povezav, temveč nekaj kratkoročnih povezav. Ma in Qian (2011) sta z modelom VARM preučevala odnose med konkurenco in sodelovanjem med štirimi pristanišči Liaoning (Kitajska). Negativne in pozitivne znake koeficientov v regresijskih enačbah sta razlagala kot pokazatelje konkurence oziroma sodelovanja.

Modeli, podobni VARM, imajo številne pomanjkljivosti. Na primer, v teh modelih morajo biti vključene spremenljivke stacionarne v prvih diferencah, pa še takrat se je treba odločiti o številu zamikov in neobvezno izbrati prestrežanje in trend. Posledično za določen nabor podatkov ni edinstvenega VARM. Še ena težava VARM je razlaga rezultatov: odnosi, ki jih takšni modeli razkrivajo, so statistični in ne nujno realni. V tej študiji, raziskujemo alternativo VARM, dinamični Lotke-Volterjev model (LVM), ali model plena-plenilca (Chukwu, 2005; Gandolfo, 2009; Lee idr., 2005). Ne najdemo literature, v kateri bi ta model uporabili za konkurenco v pristaniščih.

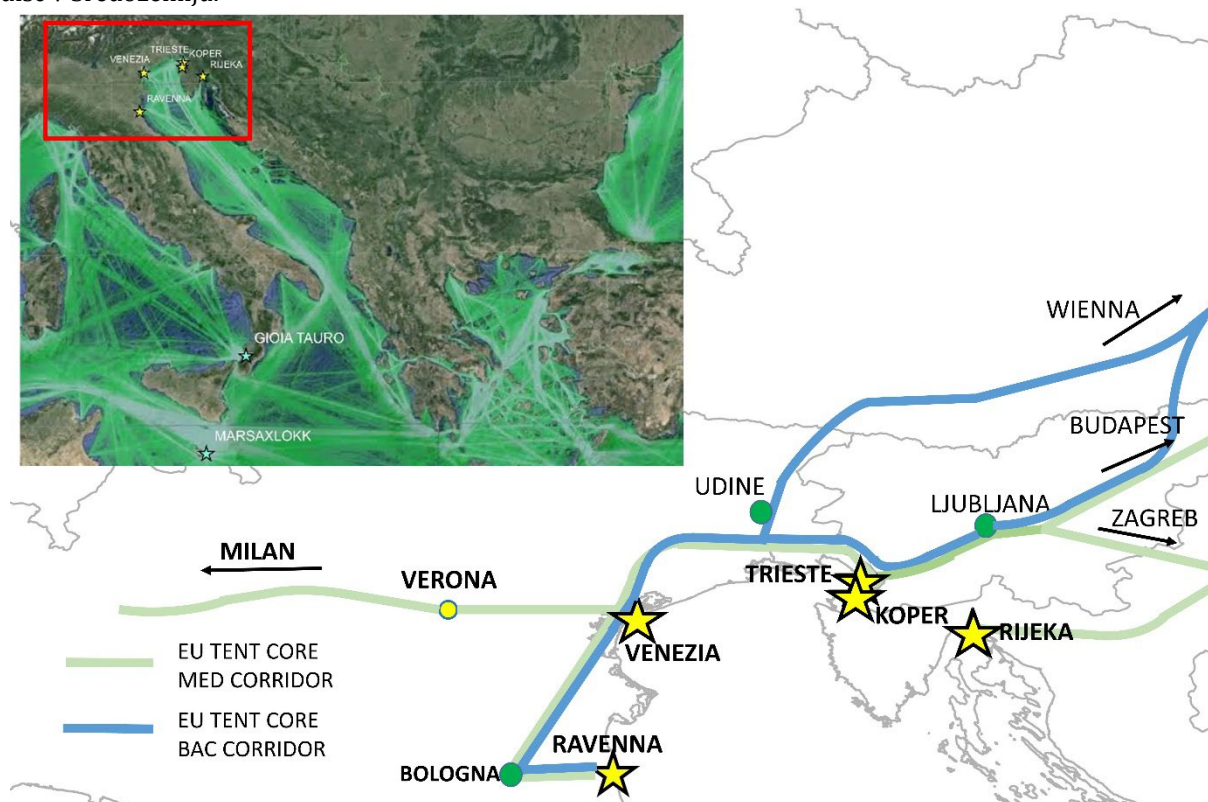
Literatura o NAP je razmeroma redka in večinoma povezana z lokalnim okoljem. Strateški pomen NAPA je na primer obravnaval Trupac (2002). Twrdy in drugi (2012) so obravnavali širitev kontejnerskega prometa v koprskem pristanišču na začetku tega tisočletja. Dragan in drugi (2014) so primerjali tri modele napovedovanja (eksponentno glajenje, klasična dekompozicija in avtoregresijsko integrirano drseče povprečje) za četrtletni kontejnerski prevoz v pristaniščih Koper, Trst, Benetke in Ravena v obdobju 2002-2012. Ugotovili so, da je model ARIMA boljši od drugih modelov za vsako pristanišče v njihovi študiji. Twrdy in Batista (2014) sta za sistem kontejnerskih pristanišč EU pripravila analizo NAP, podobno kot Notteboom (1997).

2. Značilnosti severojadranskih pristanišč NAP

Pristanišča so ključna vozlišča med pomorskim prometom in zaledjem. So del logistične verige, zato ima njihova uspešnost in učinkovitost pomembno vlogo pri globalni konkurenčnosti (Tongzon in Sawant, 2007). Vse nacionalne pristaniške mreže delujejo v razmeroma zaprtem sistemu, v katerem so trg in stranke omejeni, zato so pristanišča prisiljena istočasno sodelovati in tekrovati med seboj. Branderburger in Nalebuff (1996) sta iznašla nekoliko neroden izraz "coopetition", ki združuje sodelovanje in konkurenco, da bi opisala strategijo "win-win", ki jo uporabljajo tista pristanišča, ki so si zelo blizu in morajo hkrati sodelovati in tekrovati za trajnostni tržni delež. NAP imajo veliko skupnega zaledja in številne skupne stranke. V takšnih razmerah je "kooperacija" naraven način za preživetje na trgu kontejnerskega prometa EU (Twrdy in Batista, 2014b). Poleg tega je po Songu (2002) sodelovanje ukrep, s katerim pristanišča sodelujejo, da bi pospešila splošni interes vseh pristanišč, in s katerim pristanišča s sodelovanjem povečajo svojo tržno moč. Vendar trenutno NAP nimajo skupne strategije ali razvojnega načrta - sodelujejo le pri promociji severnojadranske morske poti.

2.1. Položaj NAP v sredozemskem pristaniškem sistemu

Po podatkih Nottebooma (2010) evropski sistem kontejnerskih pristanišč sestavljajo območja Hamburg-Le Havre, ki so najpomembnejša, saj se v njih pretovori skoraj polovica celotnega kontejnerskega prometa v Evropi; sredozemsko območje, ki najhitreje povečuje kontejnerski promet; ter območja Združeno kraljestvo, Atlantik, Baltik in Črno morje. Poleg tega je Notteboom (2010) opredelil skupino vstopnih pristanišč. V Evropi je 12 pristaniščnih regij, od katerih so 3 v sredozemskem območju: španska mediteranska pristanišča, ligurska pristanišča v Italiji in severnojadranska pristanišča. Za vsa ta pristanišča je zelo pomembna pot skozi Sueški prekop, saj je le-ta glavna trgovska povezava med Azijo in Evropo. Okoli te poti se nahajajo najpomembnejša kontejnerska pristanišča »hubi« v Sredozemlju - Gioia Tauro, Malta in Algeciras. Številni kontejnerji s končnim ciljem v NAP se pretovarjajo prek Gioia Tauro in Malte, kot je razvidno iz slike 2, ki prikazuje prometne poti v Sredozemlju, položaj pristanišč NAP in položaj središč v Sredozemlju.



Slika 2. Položaj NAP.

Vir: Promet ladij v severovzhodnem Sredozemlju temelji na podatkih AIS za leto 2012 (levi zgornji kot).

2.2. Geografska lokacija NAP

V Jadranskem morju se blizu drug drugega nahajajo pet pristanišč, vsako s svojimi kontejnerskim terminalom. Hall in Jacobs (2009) sta ugotovila, da bodo "uspešna pristanišča tista, ki lahko sodelujejo z drugimi geografsko bližnjimi pristanišči, da zagotovijo infrastrukturo, ki služi sicer konkurenčnim sistemom dobavne verige (Frémont in Lavaud-Letilleul, 2009). V zadnjih letih so bila glavna zaledja, ki so jih oskrbovala severnojadranska pristanišča, Italija, Slovenija, Hrvaška, Avstrija, Slovaška in južna Nemčija. Čeprav vseh pet pristanišč NAP uporablja skoraj enako

zaledje, so med njimi razlike v izvoru in namembnosti kontejnerjev. Iz tabele 1 je razvidno, da je veliko kontejnerjev, ki se premikajo preko pristanišč NAP, iz Italije. Nimamo podatkov o tem, koliko kontejnerjev se pretovori v italijanskih vozliščih, kot je Gioia Tauro. Največja razlika med pristanišči je v pretoku kontejnerjev, ki izvirajo iz Južne Koreje - skoraj vsi so usmerjeni v Koper. Razlog temu je, da ima neposredna železniška povezava blokirane vlake iz Kopra v Žilino/Slovaško zaradi avtomobilskih tovarn Kia in Hyundai.

Tabela 1. Glavne destinacije za uvoz in izvoz kontejnerjev za NAP.

	NAP		Delež vseh %									
	Skupaj %		Reka		Koper		Trst		Benetke		Ravena	
	IMP	Exp	IMP	Exp	IMP	Exp	IMP	Exp	IMP	Exp	IMP	Exp
Italija	43.8	37.6	14.4	4.4	18.2	18.1	23.1	19.3	28.5	40.0	15.8	18.2
Egipt	12.4	16.0	4.0	4.8	47.2	49.9	31.8	34.2	7.3	6.1	9.8	5.0
Izrael	8.2	10.6	0.6	0.2	51.6	33.9	10.7	14.6	10.7	21.1	26.4	30.2
Južna Koreja	7.6	/	2.6	/	90.5	/	1.7	/	3.1	/	2.1	/
Grčija	5.2	6.0	10.0	2.3	37.1	31.0	10.8	8.9	39.3	34.6	2.8	23.3
Turčija	4.7	6.2	0.1	0.2	16.3	20.0	37.1	16.4	14.3	24.6	32.3	38.9
Malta	3.7	3.0	16.5	9.2	33.4	54.4	20.0	2.0	24.6	26.4	5.5	7.9
Drugi	14.4	20.3										

Vir: Podatki Eurostata za obdobje 2005-2013.

Glavne značilnosti kontejnerskih pristanišč (tabela 2) so v vseh pristaniščih različne. V Kopru in Trstu je pretovor omejen z zmogljivostjo terminalov, medtem ko je na Reki izkoriščenost zelo nizka. Z izjemo povečanja kontejnerskega prometa v skoraj vseh pristaniščih je pričakovati, da se bodo pojavile težave z razpoložljivostjo zemljišč, opremo terminalov in povezavami z zaledjem. V tem pogledu so razmere v severni Evropi še slabše, saj so širitve pristanišč in povečanje njihove zmogljivosti za potrebe naslednjih 10 let izredno drage in počasne. Zato je pomembno, da ugotovimo, kaj lahko pričakujemo na območju severnega Jadrana v bližnji prihodnosti.

Tabela 2. Značilnosti pristanišč v letu 2012.

Pristanišče	Zmogljivost (1.000) TEU	Pretovor (TEU)	Uporaba (%)	Globina morja (m)	Št. terminalov	Lastniška struktura
Reka	450	129.680	28.8	14	1	zasebni
Koper	750	570.744	76.1	13.5	1	država
Trst	600	408.023	68.0	18	1	zasebni
Benetke	800	429.893	53.7	11.4	2	zasebni
Ravena	500	263.461	52.7	10.5	2	zasebni

Vir: Spletne strani NAP

Koncentracija industrije, proizvodnje in logistike v Srednji in Vzhodni Evropi ter vzpostavitev sodobnih intermodalnih terminalov (med katerimi so najpomembnejši v Veroni, Vidmu, Gradcu, na Dunaju, v Budimpešti, Košicah in Aradu), je lahko optimalno oskrbovana preko NAP, saj predstavljajo najkrajšo pot za povezavo Srednje in Vzhodne Evrope z Daljnim vzhodom. V zadnjih letih se je zaradi uvedbe neposrednih prevoznih linij med Azijo in severnim Jadrantom znatno povečal pretok kontejnerjev v NAP. Pomorske povezave med temi pristanišči in Daljnim vzhodom so redne in pogoste. Povezave z Daljnim vzhodom potekajo prek tedenskih linij, ki jih upravljajo največje ladijske družbe, kot so CMA-CGM, Maersk, MSC in druge. Po podatkih (Tavasszy idr., 2011) je izbira ladijske poti za kontejnerje zapleten proces, geografska lokacija izvora in namembnega kraja blaga pa je le eno izmed mnogih meril. NAP imajo dobro lokacijo za pretovor kontejnerjev s poreklom z Daljnega vzhoda, katerih končne destinacije so Srednja in Vzhodna Evropa.

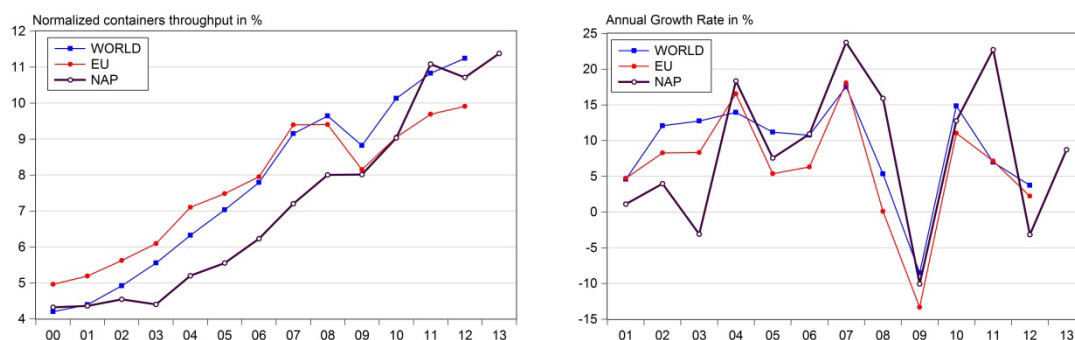
2.3. Primerjava s svetovnimi pristanišči in drugimi pristanišči EU

Globalni prevoz kontejnerjev se je povečal s približno 225 milijonov TEU leta 2000 na približno 602 milijonov TEU leta 2012. Normalizirani pretok kontejnerjev in letna stopnja rasti prometa kontejnerjev za svet, EU in NAP za to obdobje sta prikazana v grafih na sliki 3. Tako EU kot NAP pretovor kontejnerjev približno sledi svetovnemu trendu. Zlasti vse tri krivulje kažejo upad prevoza kontejnerjev v času največje finančne krize v letih 2008-2009. Leta 2011 je NAP zabeležil približno 20 % višjo rast kot EU in svet kot celota. Vendar je bil v količinskem smislu sestavljeni letni prirast (CAGR) v EU v tem obdobju približno 5,9 %, medtem ko je bil svetovni CAGR približno 8,5 %. Zato se je

tržni delež pristanišč EU zmanjšal s približno 21 % leta 2000 na približno 16 % leta 2012. Kljub temu je v tem obdobju NAP uspelo ohraniti tržni delež pretovora kontejnerjev v višini približno 1,5 % (tabela 3) s 7,9 % CAGR, kar je le nekoliko manj od svetovnega CAGR.

Tabela 3. Delež kontejnerskega prometa v % za EU in NAP od leta 2000 do 2012.¹

Leto	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Svetovni (mil. TEU)	225	235	263	297	338	376	417	490	516	472	542	580	602
EU/svet	21.1	21.1	20.4	19.6	20.1	19.0	18.3	18.4	17.5	16.5	16.0	16.0	15.8
NAP/EU	1.48	1.43	1.37	1.23	1.25	1.27	1.33	1.39	1.61	1.67	1.70	1.95	1.84



Slika 3. Normalizirani pretok kontejnerjev v % (levo) in letna stopnja rasti pretoka kontejnerjev v % (desno) za svet, EU in NAP od leta 2000 do 2012.

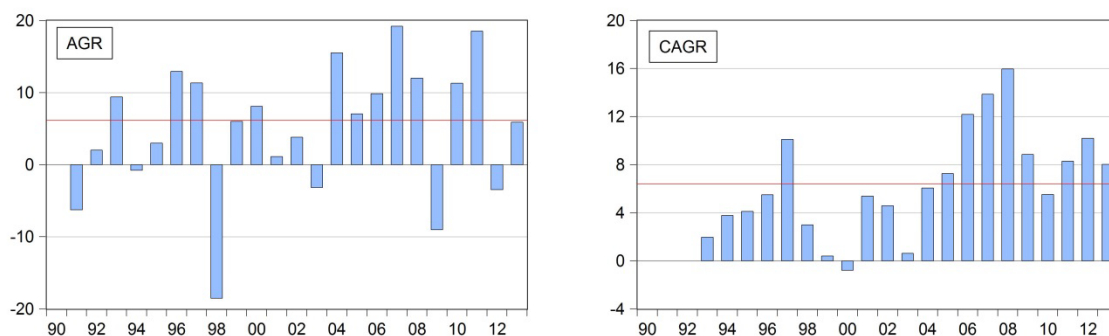
Prevoz kontejnerjev v NAP je bil tudi med svetovno finančno in gospodarsko krizo leta 2008 dokaj stabilen saj je bil padec celotnega pretovora kontejnerjev v NAP neznamen. Razlog za to lahko najdemo v dobri geografski legi NAP. Z drugimi besedami, pomorski promet iz Kitajske v EU je z uporabo NAP krajši za 2000 Nm v primerjavi s severnoevropskimi pristanišči. Ker se je trgovina med Evropo in Daljnim vzhodom povečala in postala pomembnejša od trgovine med Evropo in ZDA, se je pomen NAP povečal. Na uvozni strani je Kitajska, ki zdaj predstavlja več kot 18 % vsega uvoza v EU, in je postala najpomembnejši dobavitelj blaga, uvoženega v EU, medtem ko ZDA ostajajo najpogostejši cilj za blago, izvoženo iz EU. Iz vseh nacionalnih transportnih mrež so tedenske povezave s Kitajsko. Kot primer izpostavljamo storitve družbe CMA CGM med Azijo in Jadranskim morjem; ta upravlja za svoj servis 10 ladij in oskrbuje 14 pristanišč. V Jadranskem morju družba oskrbuje pristanišča Koper, Trst, Reka, Benetke, poleg tega se na poti do Jadranskega morja in nazaj ustavlja na Malti. Celotno potovanje na Kitajsko in nazaj traja 70 dni.

3. Modeli napovedovanja

V tem poglavju predstavljamo modele, ki opisujejo dinamiko pretovora kontejnerjev v NAP in jih mogoče uporabiti za napovedovanje.

3.1. Letne stopnje rasti z Markovo verigo

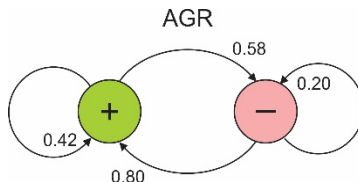
Eden od načinov za opis dinamike pretoka kontejnerjev NAP je uporaba letnega prirasta in rasti CAGR v obdobju 3 let. Na sliki 4 so prikazani stolpčni grafi teh stopenj v obdobju 1990- 2013. Ugotavljamo, da je bil v zadnjih 24 letih letni prirastek negativen v letih 1991, 1993, 1998, 2003, 2009 in 2012 - skupaj šestkrat. Največji padec, okoli 20 %, je bil leta 1998, največje povečanje, prav tako okoli 20 %, pa leta 2007. V opazovanem obdobju nikoli ni bilo negativnega AGR v dveh zaporednih letih. CAGR je bil negativen le leta 2000. Povprečni AGR v opazovanem obdobju je znašal 6,2 %, povprečni 4-letni CAGR pa 6,4 %.



Slika 4. Letna stopnja rasti skupne pretovora kontejnerjev v NAP in sestavljena letna stopnja rasti v štirih letnih obdobjih v % za 1990-2013.

Opomba: vodoravne črte na vsakem grafu označujejo povprečno stopnjo rasti v tem obdobju.

Nekatere kvalitativne napovedi o AGR je mogoče dobiti z uporabo naslednjega modela, podobnega markovski verigi. Če leto, ko je AGR nad vrednostjo prejšnjega leta, označimo z +, leto, ko je AGR pod vrednostjo prejšnjega leta, pa z -, potem za obdobje od 1990 do 2013 dobimo zaporedje 23 opazovanj. Z izvedbo run testa ugotovimo, da zaporedje znakov nima vzorca in ga lahko obravnavamo kot naključno razporejeno (glej dodatek 1). S štetjem prehodov med leti naraščanja in upadanja AGR dobimo model, podoben markovski verigi dveh stanj, prikazan na sliki 5. S tem modelom lahko na primer predvidimo, da če se je v prejšnjem letu AGR povečal, obstaja 58 % verjetnost, da se bo v tem letu zmanjšal. Po drugi strani pa, če se je AGR v prejšnjem letu zmanjšal, obstaja približno 80 % verjetnost, da se bo v tekočem letu povečal. Kot drug primer lahko izračunamo verjetnost, da se bo AGR povečeval vsaj 2 zaporedni leti, če se je v prejšnjem letu zmanjšal. Ta verjetnost je 34 %. In obratno, če se je AGR v prejšnjem letu povečal, je verjetnost, da se bo v naslednjih 2 zaporednih letih zmanjšal približno 12 %.

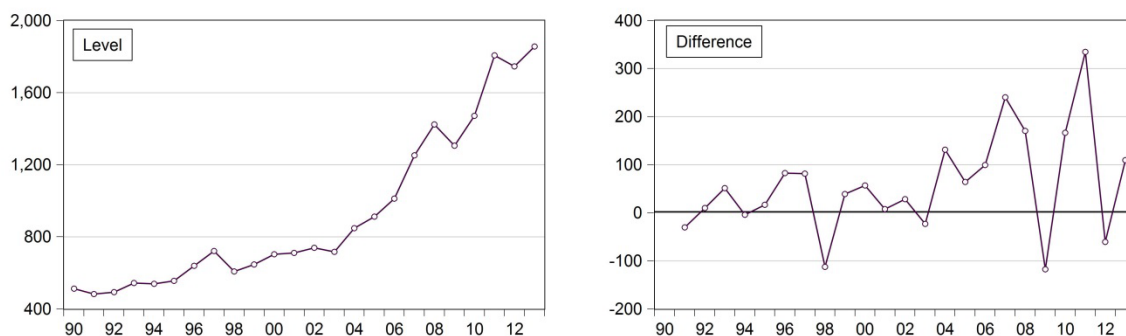


Slika 5. Dvostopenjski model, podoben markovski verigi, za letno stopnjo rasti skupnega pretovora NAP za 1990-2013.

Opomba: država + je država z letno rastjo AGR. Stanje - je stanje, v katerem se letni dohodek iz kmetijstva iz leta v leto zmanjšuje. Številke označujejo verjetnost prehoda.

3.2. Časovni model trendov serije

V tem podpoglavju raziskujemo nekaj modelov časovnih vrst, ki so primerni za opisovanje dinamike pretočnosti kontejnerjev NAP. Slika 6 prikazuje skupni letni pretovor kontejnerjev v NAP in prvo razliko za obdobje 1990-2013. Ugotavljamo, da se skupni letni pretovor v NAP sčasoma na splošno povečuje in da se medletne razlike sčasoma na splošno povečujejo. Da bi se izognili morebitni heteroskedastičnosti podatkov, za prihodnje analize vzamemo logaritem podatkov NAP (Gujarati in Porter, 2009).



Slika 6. Skupni pretovor kontejnerjev (levo) in medletne razlike (desno) v NAP v 1000 TEU za 1990-2013.

Za izbiro modela smo uporabili EViews stopenjsko kombinirano analizo najmanjših kvadratov s kvadratnim trendom in štirimi zamiki za dve vzorčni obdobji: 1990-2007 in 1990-2013. Rezultat analize je, da nobena spremenljivka z zamikom ni pomembna na 5 % ravni, kar pomeni, da podatki izkazujejo le stacionarne kvadratne trende. Tako je najboljši model, ki ga predlaga analiza, podan z

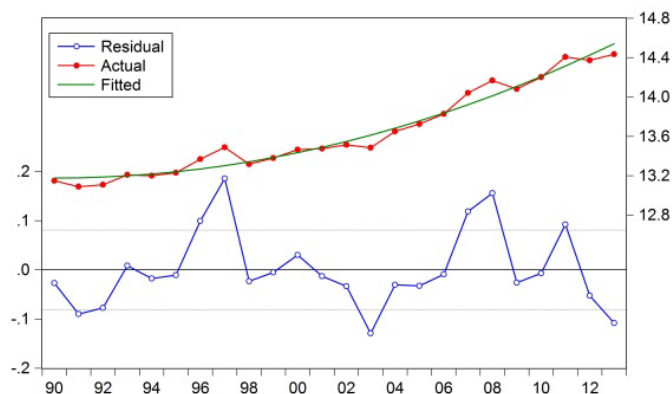
$$\ln x_t = a + bt^2, \quad (1)$$

kjer je t čas, x_t je skupni pretovor kontejnerjev v času t , a in b pa sta regresijska koeficienta, katerih vrednosti so navedene v preglednici 4. Regresijski graf je prikazan na sliki 7. Diagnostika ostankov za kvadratni model kaže, da ostanki tvorijo homoskedastično stacionarno časovno vrsto z normalno porazdelitvijo. Model uspešno opravi test serijske korelacije LM, medtem ko test CSUM kaže, da je stabilen. Zato je model primeren za napovedovanje.

Tabela 4. Ocenjeni regresijski koeficienti za kvadratni model.

Spremenljivka	Vzorec 1990-2007				Vzorec 1990-2013			
	Vrednost	Standardna napaka	t-stat	Verjetnost	Vrednost	Standardna napaka	t-stat	Verjetnost
a	13.17099	0.0215	613.0	0.000	13.17347	0.019	685.1	0.000
b	0.002547	0.0002	15.99	0.000	0.002553	0.000	32.42	0.000
R ²	0.941				0.980			
SER	0.062				0.064			

Opomba: SER = standardna napaka regresije



Slika 7. Logaritem podatkov NAP za 1990-2013.

V tabeli 5 je celoten pretovor kontejnerjev NAP ocenjen za obdobje 2007-2017 z uporabo kvadratnega modela na podlagi podatkov iz obdobja 1990-2007 in podatkov iz obdobja 1990- 2013. Ugotovljeno je bilo, da so napovedane vrednosti na splošno znotraj 10 % relativne napake. Nekoliko presenetljivo je razlika med napovedanimi vrednostmi za 2014-2017 za oba vzorca majhna, to je približno 1 %.

Tabela 5. Celotni pretovor kontejnerjev NAP v 1.000 TEU.

Leto	Vzorec 1990-2007				Vzorec 1990-2013		
	Dejanski	Napoved	2 S.E.	Rerr %	Napoved	2 S.E.	Rerr %
2007	1173	1096	165	-6.6	1101	154	-6.2
2008	1304	1198	188	-8.1	1203	170	-7.7
2009	1305	1316	216	0.9	1323	188	1.3
2010	1472	1454	251	-1.3	1461	210	-0.8
2011	1807	1614	294	-10.7	1622	237	-10.2
2012	1746	1801	348	3.1	1811	269	3.7
2013	1856	2020	415	8.8	2031	307	9.5
2014		2276	498		2290	355	
2015		2579	603		2595	413	
2016		2937	735		2956	484	
2017		3361	901		3385	571	

Opombe: Vrednosti napovedi so izračunane z uporabo kvadratnega modela trenda. Podatki v pravokotnikih predstavljajo napovedi zunaj vzorca (S.E. = standardna napaka; Rerr = relativna napaka).

3.3. Model trenda časovne vrste z izrazi periodičnosti

Kot je prikazano v prejšnjem poglavju 3.2, čisti kvadratni model napoveduje pretovor kontejnerjev s približno 10 % relativno napako. Da bi izboljšali natančnost napovedi, smo modelu dodali dva periodična člena: enega za cikel z dolgim obdobjem in drugega za cikel s kratkim obdobjem.

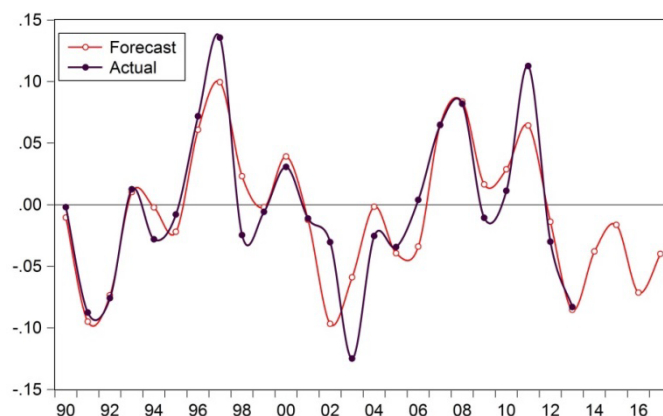
$$\ln x_t = a + bt^2 + A_1 \sin \frac{2\pi(t-t_1)}{T_1} + A_2 \sin \frac{2\pi(t-t_2)}{T_2} \quad (2)$$

Upoštevajte, da je motivacija za uvedbo periodičnih členov oblika ostankov kvadratnega modela, prikazanega na sliki 7. Za izračun regresijskih koeficientov a , b , A_1 , t_1 , T_1 , A_2 , t_2 in T_2 uporabimo postopek nelinearne regresije najmanjših kvadratov EViews. Rezultati izračunov za dve vzorčni obdobji, 1990- 2007 in 1990-2013, so prikazani v tabeli 6. Izkaže se, da imajo vsi koeficienti regresijske enačbe relativno stacionarne vrednosti v obdobju zadnjih 8 let. Model napoveduje, da srednja doba cikla T_1 približno 11,5 leta, kratka doba cikla T_2 pa približno 3,5 leta. Periodični del modela je prikazan na sliki 8.

Tabela 6. Ocenjeni regresijski koeficienti za model kvadratnega trenda s periodičnimi členi.

Spremenljivka	Vrednost	Vzorec 1990-2007			Vrednost	Vzorec 1990-2013		
		Standardna napaka	t-stat	Verjetnost		Standardna napaka	t-stat	Verjetnost
a	13.1845	0.0145	912.36	0.000	13.1809	0.0110	1195.86	0.000
b	0.0025	0.0001	19.81	0.000	0.0025	0.0000	51.59	0.000
A_1	-0.0630	0.0129	-4.90	0.001	-0.0578	0.0103	-5.63	0.000
t_1	-1.0951	0.9120	-1.20	0.257	-1.6026	0.7748	-2.07	0.055
T_1	11.041	0.9786	11.28	0.000	11.5974	0.6063	19.13	0.000
A_2	-0.0406	0.0127	-3.19	0.010	-0.0466	0.0100	-4.67	0.000
t_2	0.2748	0.3546	0.78	0.456	0.45923	0.2437	1.88	0.078
T_2	3.7051	0.1303	28.44	0.000	3.5874	0.0681	52.71	0.000
R^2	0.987				0.996			
SER	0.037				0.035			

Opomba: SER = standardna napaka regresije



Slika 8. Dejanski in napovedani cikli pretovora kontejnerjev v NAP za 1990-2017.

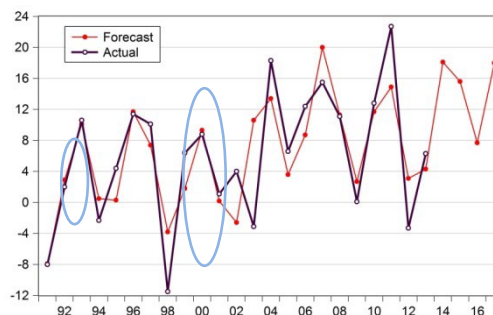
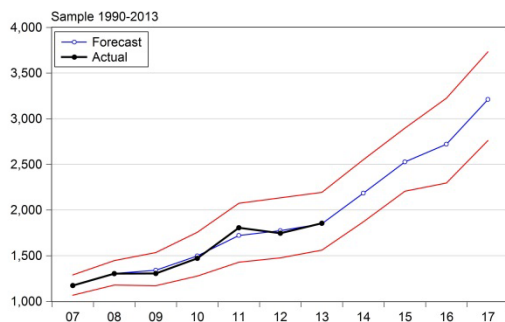
Opomba: Podatki so zglajeni s »spline« aproksimacijo.

V tabeli 7 je prikazan skupni pretovor kontejnerjev NAP izračunan za 2007-2017 z uporabo modela na podlagi vzorcev 1990-2007 in 1990-2013. Iz tabele je razvidno, da so napovedane vrednosti v okviru približno 5 % relativne napake, razen za leto 2011, ko je razhajanje med dejansko in napovedjo pretovora izven vzorca kar 9 %. Grafa napovedanega pretovora in napovedanega AGR sta prikazana na sliki 9. Opozoriti je potrebno, da napovedani AGR sledi dejanskemu vzorcu AGR, razen v 1995, 2002 in 2003.

Tabela 7. Skupni pretovor kontejnerjev NAP v 1.000 TEU.

Leto	Vzorec 1990-2007				Vzorec 1990-2013		
	Dejanski	Napoved	2 S.E.	Rerr %	Napoved	2 S.E.	Rerr %
2007	1173	1157	114	-1.4	1174	99	0.0
2008	1304	1328	143	1.8	1306	109	-0.2
2009	1305	1374	199	5.3	1341	109	2.7
2010	1472	1447	249	-1.7	1498	129	1.8
2011	1807	1644	336	-9.0	1722	145	-4.7
2012	1746	1785	361	2.2	1775	158	1.6
2013	1856	1837	341	-1.0	1851	159	-0.2
2014		2071	348		2186	218	
2015		2521	368		2528	260	
2016		2888	534		2722	325	
2017		3239	526		3211	421	

Opombe: Vrednosti napovedi so izračunane s kvadratnim modelom trenda z dvema periodičnima komponentama. Podatki v pravokotnikih predstavljajo napovedi zunaj vzorca (S. E. = standardna napaka; Rerr = relativna napaka).



Slika 9. Dejanski in napovedan skupni pretovor v NAP za 2007-2017 (levo) in dejanski in napovedan AGR v % za 1990-2017 (desno).

Opomba: Krogi označujejo leta, v katerih dejanski in modelirani AGR sledita nasprotnim vzorcem.

3.4. Model sistema Grey

Zadnji model za napovedovanje, uporabljen v tej študiji, je model Grey sistema (Liu in Lin, 2010). Sistem je siv, če so informacije o njem pomanjkljive ali negotove; zato so sivi modeli primerni le za kratkoročno napovedovanje. Osnovna ideja sivega modeliranja je, da se kopičenje izvirnih podatkov obravnava kot rezultat nekega linearnega dinamičnega procesa. Proces je opisan kot:

$$\frac{dy}{dt} + ay = b. \quad (3)$$

Kjer sta $y = x_0 + \int_0^t x(\tau) d\tau$ in $y(0) = x_0$. V našem primeru obravnavamo x kot skupno pretovor kontejnerjev v NAP. Ta enačba ima analitično rešitev in daje:

$$x = \frac{dy}{dt} = (b - ax_0)e^{-at}. \quad (4)$$

Diskretizacija z enim enotirnim časovnim korakom daje naslednjo enačbo:

$$y_k + az_k = b \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Kjer so $y_k = \sum_{i=0}^k x_i$, $z_k = \frac{1}{2}(y_k + y_{k-1})$ in k spremenljivka trenda (razlika med dejanskim in začetnim letom podatkovne vrste). Neznana parametra a in b v se ocenita z metodo LSQ. Z uporabo so nato napovedne vrednosti x podane z:

$$x_k = Ae^{-ak}. \quad (6)$$

Kjer je $A = \left(x_0 - \frac{b}{a}\right)(1 - e^a)$. Kot predlagajo (Kayacan idr., 2010; Shu idr. 2013), lahko natančnost modela izboljšamo z razširitvijo ostankov modela v trigonometrično vrsto. V tej študiji uporabljamo samo en trigonometrični člen, zato ima model za napovedovanje pretovora obliko:

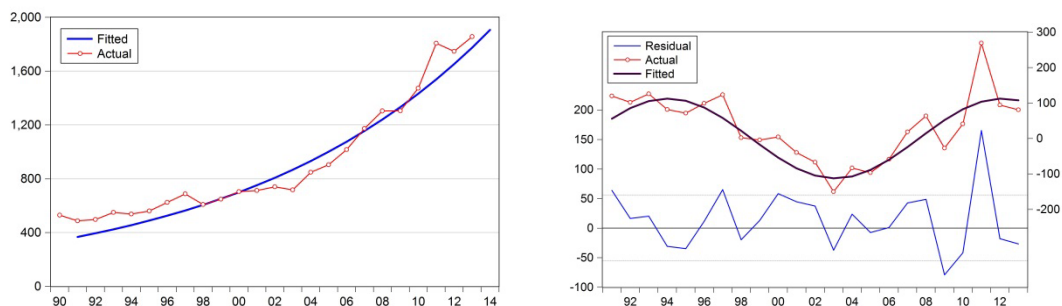
$$x_t = Ae^{-at} + A_1 \cos \frac{2\pi(t-t_1)}{T_1}, \quad (7)$$

kjer so A_1 , t_1 in T_1 dobljeni z nelinearnim LSQ na ostankih modela. Rezultati tega izračuna so prikazani v tabeli 8. Upoštevajte obdobje cikla 18 let. Grafa regresije in trigonometričnega prileganja ostankov modela sta prikazana na sliki 10.

Tabela 8. Ocenjeni koeficienti za sivi model.

Spremenljivka	Vrednost	Standardna napaka	t-Stat	Verjetnost.	Spremenljivka	Vrednost	Standardna napaka	t-Stat	Verjetnost.
a	316000.4	36890.59	8.57	0.000	A_1	112545	15688	7.17	0.000
b	-0.07165	0.003533	-20.28	0.000	t_1	4.0278	0.7189	5.60	0.000
					T_1	18.1213	0.2120	13.61	0.000
R^2	0.951				R^2	0.68504			
SER	99484				SER	55350			

Opomba: SER = standardna napaka regresije



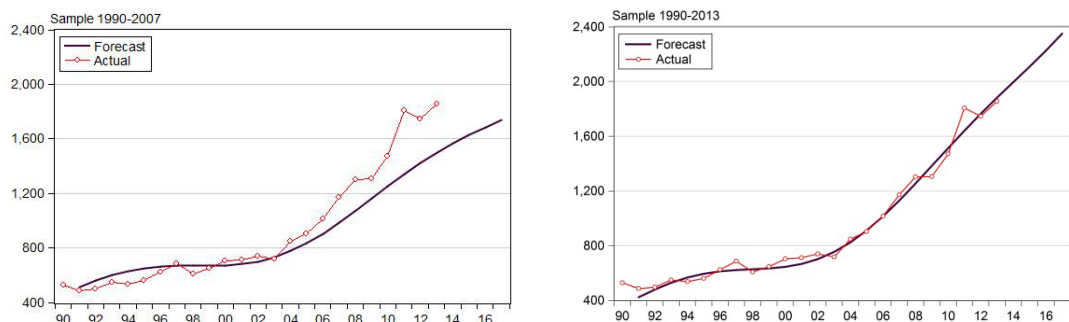
Slika 10. Prilagajanje sivega modela skupnega pretovora kontejnerjev v NAP (levo) in prilagajanje periodičnega člena ostankov sivega modela (desno) za 1990-2013.

V tabeli 9 in na sliki 11 je izračunan skupni pretovor kontejnerjev NAP za 2007-2017 z uporabo modelov (6) in (7). Iz preglednice 9 je razvidno, da so napovedane vrednosti znotraj 6 %, razen za leto 2011, ko je napaka 15 % pri prvem modelu in 9 % pri drugem modelu. Poleg tega na sliki 10 opažamo, da napovedovanje iz vzorca z vzorcem za leta 1990-2007 podcenjuje dejanski pretovor in da so napovedane vrednosti za leta 2014-2017 nižje od vrednosti, podanih s kvadratnim trendnim modelom.

Tabela 9. Skupni pretovor kontejnerjev NAP v 1.000 TEU, dejanska in napovedana s sivimi modeli brez cikličnega izraza (Pred 1) in s cikličnim izrazom (Pred 2).

	Trend	Leto	Dejanski	Pred	rerr %	Pred 2	rerr %
17		2007	1173	1155	-1.6	1131	-3.6
18		2008	1304	1240	-4.9	1255	-3.7
19		2009	1305	1332	2.1	1384	6.1
20		2010	1472	1431	-2.8	1514	2.8
21		2011	1807	1538	-14.9	1641	-9.2
22		2012	1746	1652	-5.4	1764	1.0
23		2013	1856	1775	-4.4	1882	1.4
24		2014		1907		1997	
25		2015		2048		2110	
26		2016		2200		2227	
27		2017		2364		2351	

Opomba: Podatki v pravokotniku predstavljajo napovedi zunaj vzorca.



Slika 11. Dejanski pretovor kontejnerjev NAP in napoved pretovora po Grey modelu s cikličnim členom za 1990-2017.

3.5. Primerjava modelov

Po Pengu in Chu (2009), primerjamo zgoraj navedene štiri modele na podlagi treh meril.

$$MAPE \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{x}_i}{x_i} - 1 \right| \times 100 \quad (\text{mean absolute percent error})$$

$$MAE \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (\text{mean absolute error}) \quad (8)$$

$$RMSE \equiv \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (\text{mean absolute percent error})$$

Kjer je x_i dejanski pretovor $\hat{x}_i$ pa napovedani pretovor v času i . Primerjava treh metod, raziskanih v tej študiji kaže, da je najboljša napoved dosežena z uporabo modela časovnih trendnih vrst z izrazi periodičnosti (tabela 10). Modeli, ki jih uporabljamo, so zasnovani predvsem za kratkoročno napovedovanje, vendar se zdi, da sta trendni model in trendni model s cikličnimi členi lahko uporabna tudi za srednjeročno napovedovanje. Vendar se, kot je razvidno iz tabel 5 in 7, standardna napaka napovedanih vrednosti s časom povečuje, zato je treba biti pri takšnih srednjeročnih napovedih previden.

Tabela 10. Primerjava med različnimi metodami napovedovanja za 2007 do 2009, 2010 in 2013.

Obdobje (leta)	Merila	Model trenda	Model trenda s cikli	Sivi model s ciklom
2	MAPE	4.5	3.6	14.2
	MAE	58.5	46.5	185.3
	RMSE	75.4	51.7	190.7
3	MAPE	3.4	2.9	14.4
	MAE	45.0	39.3	195.6
	RMSE	62.4	44.6	199.6
6	MAPE	5.5	3.5	17.7
	MAE	91.2	56.5	287.8
	RMSE	114.6	75.7	306.5

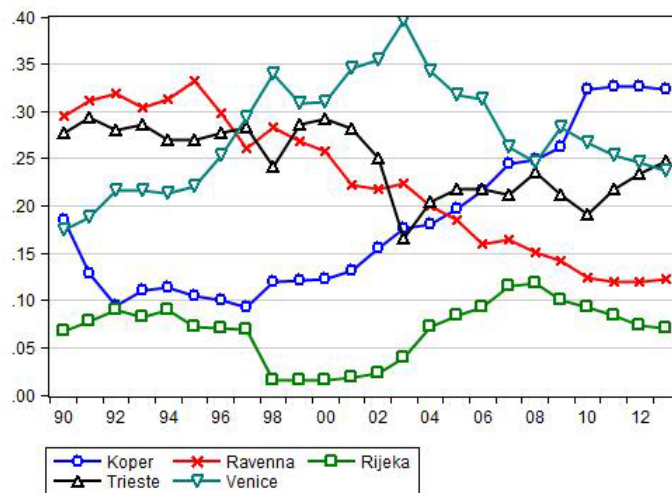
4. Konkurenca in sodelovanje med pristanišči

Prvi kazalnik dinamike odnosov v NAP je sprememba tržnega deleža pretovora kontejnerjev. Na sliki 12 je razvidno, da je tržni delež pristanišča Reka ciklični in se giblje do 12 %. V opazovanem obdobju ima pristanišče Trst 16-29 % tržni delež, pristanišče Benetke pa 17-40 %. Skupen tržni delež teh pristanišč znaša med 45 % in 62 %. Letne spremembe posameznih tržnih deležev kažejo na morebitno konkurenco med temi pristanišči: ko je eno pridobilo tržni delež, ga je drugo izgubilo in obratno. V primeru pristanišč Koper in Ravena, katerih skupni tržni delež je v tem obdobju znašal od 38 % do 48 %, bi bil tak sklep napačen. Pristanišče Koper je v tem obdobju povečalo svoj tržni delež s približno 10 % na približno 32 %, medtem ko se je tržni delež pristanišča Ravena zmanjšal s približno 30 % na 12 %. Čeprav bi to lahko pomenilo, da pristanišče Ravena izgublja tržni delež na račun pristanišča Koper, je v tem obdobju pristanišče Koper dejansko povečalo svojo zmogljivost pretovarjanja kontejnerjev na približno 0,95 milijona TEU, medtem ko je pristanišče Ravena povečalo svojo zmogljivost le na približno 0,25 milijona TEU. To potrjujejo podatki v tabeli 11, ki kažejo, da je bil tržni delež posameznega pristanišča leta 2010 zelo tesno povezan z njegovo zmogljivostjo pretovora kontejnerjev v času (MDS, 2012). Manjša zmogljivost pristanišč Ravena in Reka v primerjavi s pristanišči Koper, Trst in Benetke se odraža v spreminjanju HHI indeksa s časom (slika 13). HHI ima v opazovanem obdobju povprečno vrednost 0,25, kar v grobem pomeni, da so bili v opazovanem obdobju med NAP le štirje glavni igralci. Poleg tega je zanimivo, da je sistem NAP notranje razmeroma stabilen, saj se v povprečju med pristanišči prerazporedi le 4 % skupne letne prevozne zmogljivosti (slika 14).

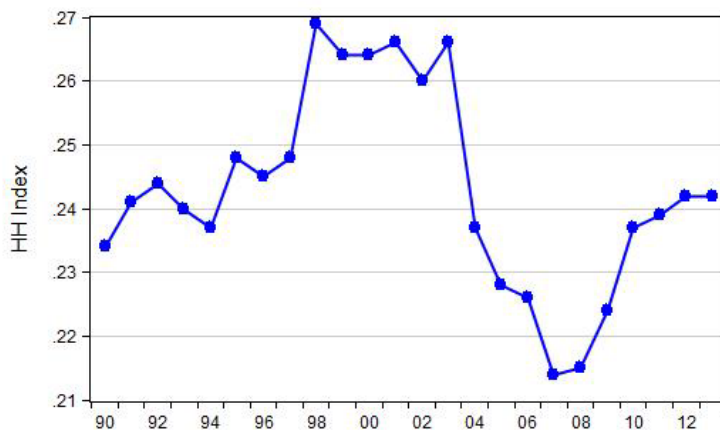
Tabela 11. Zmogljivost NAP in tržni delež v letu 2010.

	Reka	Koper	Trst	Benetke	Ravena	Skupaj
Zmogljivost ravnanja s kontejnerji v 1.000 TEU	0.17	0.7	0.6	0.5	0.3	2.27
Delež zmogljivosti za ravnanje s kontejnerji	0.07	0.31	0.26	0.22	0.13	1.0
Tržni delež	0.09	0.32	0.19	0.27	0.12	1.0

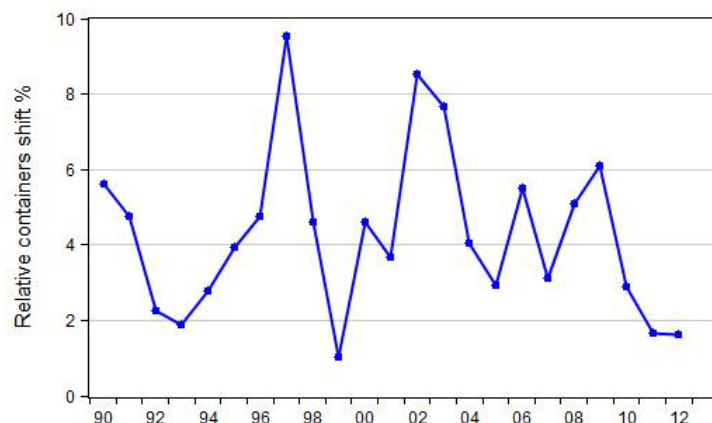
Vir: (MDS, 2012)



Slika 12. Tržni delež kontejnerskega pretovora za NAP za 1990-2013.



Slika 13. HHI za NAP za 1990-2013.



Slika 14. Relativna letna sprememba kontejnerjev za NAP za 1990-2013.
Vir: (Notteboom, 2010)

Da bi dobili globlji vpogled v odnose sodelovanja/konkurence med NAP, je bila naša prva zamisel opredeliti te odnose z vektorsko avtoregresijsko kointegracijsko analizo (Juselius, 2006), po Yap in Lam (2006). Vendar se je izkazalo, da so časovne vrste za pristanišča integrirane v drugačnem vrstnem redu. Poleg tega, Johansenov kointegracijski test EViews ne razkrije nobenih dolgoročnih povezav med pristanišči. Zato so nas Chukwu (2005) in Lee in drugi (2005) spodbudili, da smo poskušali odkriti odnose med pristanišči z uporabo posplošenega LVM ali plenilsko dinamičnega modela v obliki:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_i x_i + \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (i=1, \dots, n). \quad (9)$$

Kjer je x_i skupni pretovor vrat i , n pa je število pristanišč v sistemu. V našem primeru $n = 5$ in

- x_1 TEU pristanišča Reka
- x_2 TEU pristanišča Koper
- x_3 TEU pristanišča Trst
- x_4 TEU pristanišča Benetke
- x_5 TEU pristanišča Ravena

Opozarjamo, da se naša uporaba modela razlikuje od modela, ki ga je uporabil Chukwu (2005), na dva načina: prvič, v tem modelu ni konstantnega člena, to je zunanjega vpliva; drugič pa vključujemo diagonalne člene. Z dodajanjem diagonalnih členov v (8) v posebnem primeru enega pristanišča dobimo logistično enačbo. Za koeficiente sistema sprejmemo naslednjo terminologijo:

- koeficienti a_i so stopnje naravnega propadanja/rasti (logistični parametri),
- koeficienti zunaj diagonale b_{ij} ($i \neq j$) so interakcijski koeficienti (parametri) in
- diagonalni členi b_{ii} določajo zmogljivost pristanišč (parameter omejitve).

Za $i \neq j$ sprejemamo naslednje razlage (Lee idr., 2005):

- če sta $b_{ij} > 0$ in $b_{ji} > 0$, potem obstaja čisto sodelovanje med pristanišči i in j (situacija "win-win");
- če $b_{ij} < 0$ in $b_{ji} < 0$, potem med pristaniščema i in j obstaja čista konkurenca;
- če $b_{ij} > 0$ in $b_{ji} < 0$, potem obstaja situacija plenilca in plena, v kateri je pristanišče i plenilec, pristanišče j pa plen.

Z drugimi besedami: negativen interakcijski koeficient pomeni zmanjšanje pretovora zaradi prisotnosti drugih pristanišč, pozitiven interakcijski koeficient pa pomeni povečanje pretovora zaradi prisotnosti drugih pristanišč. Glavna naloga zdaj je določiti te koeficiente iz empiričnih podatkov, ki nam povedo, katera pristanišča si konkurirajo in katera sodelujejo.

Za ocenjevanje koeficientov uporabljamo dve metodi. Prva in najpreprostejša je trapezno pravilo za diskretizacijo diferencialnih enačb. To metodo je uporabil Chukwu (2005), ki je koeficiente ocenil s povprečenjem rezultatov izračunov z uporabo neposredne, povratne in centralne razlike. V tej študiji uporabljamo dve diskretizaciji s centralno razliko, eno s časovnim korakom $\Delta t = 2$ in drugo s časovnim korakom $\Delta t = 1$. To vodi do naslednjega sistema enačb:

$$x_{i,t} = x_{i,t-2} + 2a_i x_{i,t-1} + \sum_{j=1}^n 2b_{ij} x_{i,t-1} x_{j,t-1} \quad (i=1, \dots, n), \quad (10)$$

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + a_i x_{i,t+\frac{1}{2}} + \sum_{j=1}^n b_{ij} x_{i,t+\frac{1}{2}} x_{j,t+\frac{1}{2}} \quad (i=1, \dots, n), \quad (11)$$

ki ga je mogoče rešiti s programom EViews. Nato so končni koeficienti ocenjeni z Richardsonovo ekstrapolacijo:

$$a_i = \frac{4a_i\left(\frac{1}{2}\right) - a_i(1)}{3} \quad \text{in} \quad b_{ij} = \frac{4b_{ij}\left(\frac{1}{2}\right) - b_{ij}(1)}{3}. \quad (12)$$

Pri čemer je $a_i\left(\frac{1}{2}\right)$, $b_{ij}\left(\frac{1}{2}\right)$ ocenjen z metodo LSQ iz (10) in $a_i(1)$, $b_{ij}(1)$ iz (9). Rezultati teh izračunov so prikazani v tabeli 10.

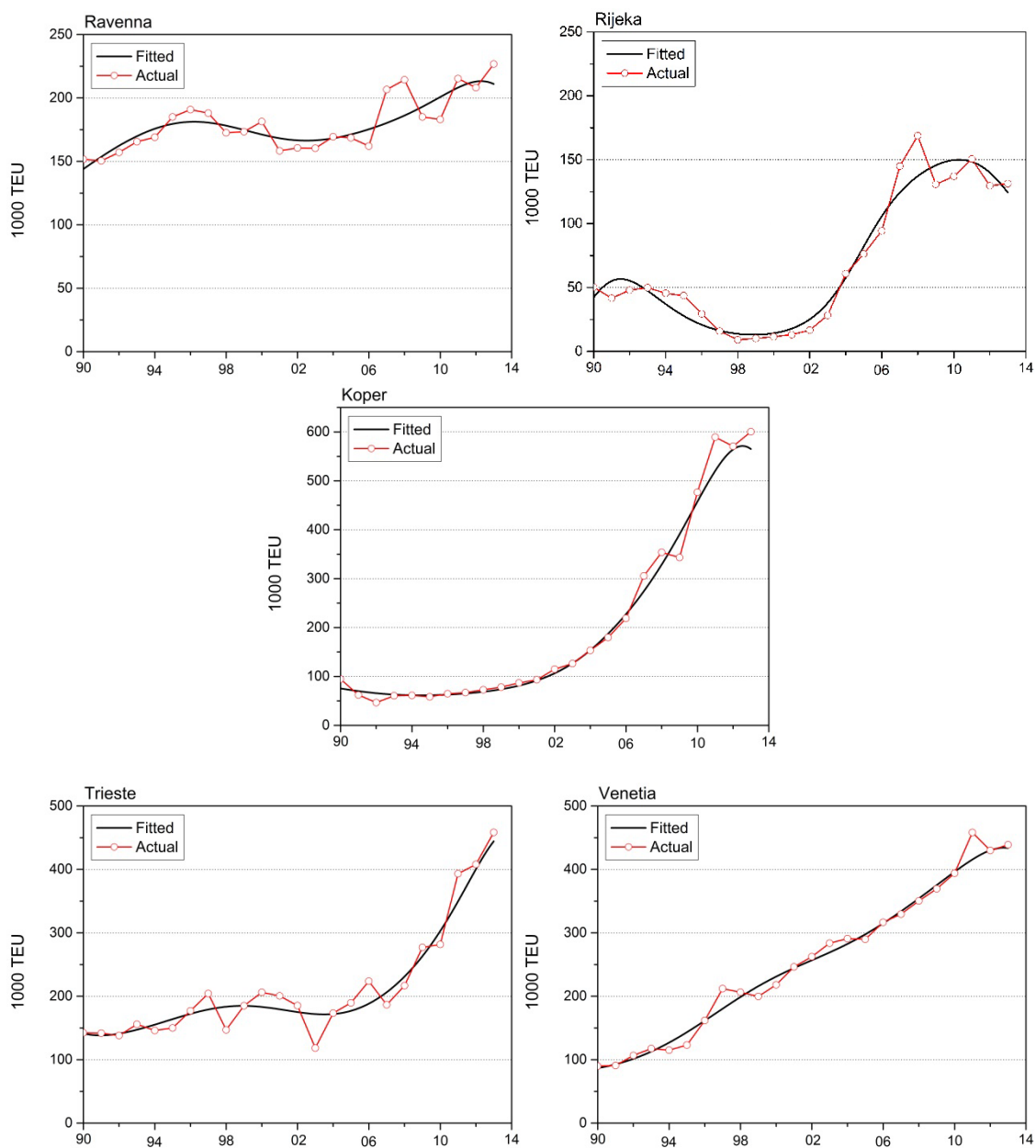
Tabela 12. Trapezoidni približki koeficientov enačbe za 1990-2013.

	Reka	Koper	Trst	Benetke	Ravena	Rast	StdErr	R ²
Reka	-9.42E-06	3.18E-06	-6.75E-06	2.59E-06	1.82E-06	0.6134	13893	0.951
Koper	-1.23E-07	7.37E-07	-1.41E-06	1.01E-06	-6.39E-06	1.1407	30218	0.980
Trst	-1.90E-07	1.00E-06	-1.50E-06	-4.75E-07	2.55E-06	-0.1506	37409	0.868
Benetke	3.85E-08	4.42E-07	-4.67E-07	-6.23E-07	-5.20E-07	0.3348	19035	0.981
Ravena	-1.50E-06	1.55E-06	-1.76E-06	-6.93E-07	6.03E-07	0.2479	15214	0.626

Bolj zapletena metoda za oceno parametrov enačbe je uporaba kolokacijske metode (Varah, 1982). Pri uporabi te metode spremenljivke izrazimo:

$$x_i = \sum_{j=0}^{P-1} c_{ij} \phi_j. \quad (13)$$

Kjer so ϕ_j izbrane funkcije oblike, c_{ij} pa neznani koeficienti, pridobljeni s prilagajanjem podatkov. V tej študiji za izračun uporabljamo kubične B-spline, za določitev koeficientov iz enačbe pa iterativni postopek, ki so ga predlagali Brewer in drugi (2008). Ko so koeficienti izračunani, rešimo sistem z uporabo Runge-Kutta numerične integracije z nadzorom korakov (Hairer idr., 1993). Izračunani parametri enačbe (8) so podani v preglednici 13, medtem ko je napovedan pretovor pristanišč prikazan na sliki 15.



Slika 15. Dejanski in prilagojeni pretovor kontejnerjev v 1.000 TEU, izračunana z modelom Lotke- Voltera za 1990-2013.

Tabela 13. B-spline približki koeficientov enačbe za 1990-2013.

	Reka	Koper	Trst	Benetke	Ravena	Rast	StdErr	R ²
Reka	-8.11E-06	5.07E-06	-5.43E-06	1.93E-06	-2.11E-05	4.0187	11547	0.952
Koper	-1.63E-06	8.18E-07	-2.79E-06	1.44E-06	1.61E-06	-0.0331	18942	0.990
Trst	1.19E-06	-1.26E-07	-3.77E-07	-1.27E-07	3.79E-06	-0.5725	21311	0.944
Benetke	6.82E-08	3.43E-08	-5.80E-07	-2.83E-07	2.86E-06	-0.2603	13347	0.987
Ravena	-3.32E-07	7.86E-07	-1.05E-06	-3.99E-07	-1.84E-08	0.2086	11297	0.727

Iz preglednic 12 in 13 je razvidno, da obe metodi, ki ju uporabljamo za izračun parametrov enačbe, dajeta različne rezultate. Poleg tega se znaki koeficientov v nekaterih primerih razlikujejo. V preglednici 14 prikazujemo razmerja, ki so prisotna v tabelah 12 in 13. Obe metodi predvidevata naslednja razmerja:

- win – win v odnosu: Reka- Benetke, Koper- Benetke;

- čista konkurenca: Trst – Benetke;
- odnos med plenilcem in plenom: Reka- Koper, Trst- Ravena.

Tabela 14. Razmerja med NAP za 1990-2013, ki so skupna tabelam 12 in 13.

	Reka	Koper	Trst	Benetke	Ravena
Reka		Plenilec		Sodelovanje	
Koper	Plen			Sodelovanje	
Trst				Tekmovanje	Plenilec
Benetke	Sodelovanje	Sodelovanje	Tekmovanje		
Ravena			Plen		

Seveda so te napovedi izpeljane iz preprostih modelov, vprašanje pa je, v kolikšni meri odražajo realnost. Obstajata vsaj dva primera, v katerih te napovedi odražajo resničnost. Prvič, konkurenca med pristaniščema Trst in Benetke je zaznavna v spreminjanju njunih tržnih deležev s časom (glej sliko 12). Drugič, model kaže, da pristanišče Ravena tekmuje s skoraj vsemi drugimi pristanišči, in sicer ima negativne koeficiente medsebojnega vplivanja z vsemi pristanišči razen s Koprom (glej preglednici 12 in 13). Ravena je leta 2012 ustrezno izstopila iz programa NAPA. Poleg tega je zanimivo, da ima model LVM (tabela 12) ravnovesno točko. Tržni deleži NAP v točki ravnovesja skupaj z dejanskimi tržnimi deleži v letu 2013 so predstavljeni v preglednici 15, iz katere je razvidno, da je NAP praktično pridobil predvidene ravnovesne tržne deleže.

Tabela 15. Tržni delež NAP.

	Reka	Koper	Trst	Benetke	Ravena	Skupaj
Predvideno ravnovesje na trgu delež v %	4	32		25		100
Dejanski tržni delež v letu 2013 (%)	7	32	25	24	12	100

5. Zaključek

Analiza NAP, opravljena v tej študiji, je pokazala, da dinamika pretoka kontejnerjev kaže trende in ciklične komponente. Rezultati kažejo, da se pričakuje, da bo kvadratni model trenda z dvo-ciklično komponento napovedal pretok kontejnerjev v okviru 5 % stopnje napake vsaj za naslednjih nekaj let.

LVM, uporabljen v tej študiji, je vodil odnose med pristanišči in pokazal, da od leta 1990 do 2013 nobeno pristanišče ni dosledno ohranjalo enakih odnosov z drugimi pristanišči; poleg tega je bilo med NAP več konkurence kot sodelovanja. Poleg tega model LVM kaže, da so NAP verjetno dosegli svoje ravnovesne tržne deleže. Vendar pa moramo poudariti, da uporabljamo avtonomni LVM, kar pomeni, da se to stanje lahko in se bo verjetno v bližnji prihodnosti spremenilo zaradi trenutnih naložb v zmogljivost pretovarjanja kontejnerjev NAP. Te naložbe so priložnost, da NAP prenehajo tekrovati med seboj in začnejo sodelovati. Dejansko LVM predvideva, da bi sodelovanje lahko povečalo pretovor vsakega pristanišča.

Na koncu ugotavljamo, da je v zadnjih 23 letih NAP doživel hitre gospodarske in institucionalne spremembe. Skupaj z globalizacijo so te spremembe močno vplivale na logistična in distribucijska omrežja v zaledju, razvojne načrte pristanišč in konkurenco med temi pristanišči. NAP Reka, Koper, Trst, Benetke in Ravena niso le v treh različnih državah, ampak so tudi v različnih fazah širitve svojih kontejnerskih terminalov. Čeprav se je skupni kontejnerski promet v NAP v zadnjih letih povečal, predstavlja le majhen del celotnega kontejnerskega prometa v evropskih pristaniščih. Ker imajo v zadnjem času v pomorskem prometu zaradi ekonomije obsega prednost velike kontejnerske ladje, bo morala NAP združiti moči, da bi v ta del Sredozemlja privabila ladijske linije. Zato je mogoče pričakovati, da se bo sedanje iskanje ravnovesja med sodelovanjem in konkurenco med NAP nadaljevalo tudi v prihodnosti.

Dodatek 1. Izvedba testa (NIST) za AGR podatkov NAP

S slike 2 za AGR dobimo naslednje zaporedje 23 opazovanj:

- + + + - + + - - + + - + - + - + + - - + + - + .

Ničelna hipoteza je, da je to zaporedje naključno. Ker $|Z| < Z_{0.975}$ (glej tabelo A-1), te hipoteze ne moremo zavrniti na ravni pomembnosti 0,05.

Tabela A-1. Podatki o preskusu izvedbe.

| | | |
|----------------------------------|---------------------------|------|
| Dejansko število voženj | R | 16 |
| Število - | n_- | 10 |
| Število + | n_+ | 13 |
| Dovoljeno število voženj | $\bar{R}$ | 12 |
| Standardni odklon števila izvedb | s_R | 2 |
| Testna statistika | $Z = (R - \bar{R}) / s_R$ | 1.61 |
| Kritična vrednost | $Z_{0.975}$ | 1.96 |

Viri in literatura

1. Abraham, B., Ledolter, J., 1983. Statistical Methods for Forecasting. Wiley, New York u.a. Branderburger, A., Nalebuff, B., 1996. Co-opetition. Doubleday, New York.
2. Brodie, R. J., de Kluyver, C. A., 1987. A comparison of the short term forecasting accuracy of econometric and naive extrapolation models of market share. Int. J. Forecast. 3, 423–437.
3. Carnot, N., Koen, V., Tissot, B., 2005. Economic Forecasting, 1. publ. ed. Palgrave Macmillan, New York.
4. Chambers, J. C., Mullick, S. K., Smith, D.D., 1971. How to Choose the Right Forecasting Technique (Harvard Business Review).
5. Chen, S. H., Chen, J. N., 2010. Forecasting container throughputs at ports using genetic programming. Expert Syst. Appl. 37, 2054–2058.
6. Chiang, C. H., Hwang, C.C., 2010. Relationships among major container ports in Asia region. J. East. Asia Soc. Transp. Stud. 8.
7. Chou, C. C., Chu, C. W., Liang, G.S., 2008. A modified regression model for forecasting the volumes of Taiwan's import containers. Math. Comput. Model. 47, 797–807.
8. Chukwu, E. N., 2005. A Mathematical Treatment of Economic Cooperation and Competition Among Nations: With Nigeria, USA, UK, China and Middle East Examples. First ed. Elsevier, Amsterdam; Boston.
9. De Langen, P. W., Nijdam, M. H., 2009. A best practice in cross-border port cooperation: Copenhagen Malmö Port. In: Notteboom, T., Ducruet, C., Langen, P.W.d. (Eds.), Ports in Proximity: Competition and Coordination Among Adjacent Seaports. Ashgate Pub., Farnham, England; Burlington, VT.
10. De Langen, P.W., van Meijeren, J., Tavasszy, L.A., 2012. Combining models and commodity chain research for making long-term projections of port throughput: an application to the Hamburg–Le Havre range. Eur. J. Transp. Infrastruct. Res. 12, 310–331.
11. Dragan, D., Kramberger, T., Intihar, M., 2014. A Comparison of Methods for Forecasting the Container Throughput in North Adriatic Ports IAME 2014 Conference, Norfolk VAUSA.
12. Fung, K. F., 2001. Competition between the ports of Hong Kong and Singapore: a structural vector error correction model to forecast the demand for container handling services. Marit. Policy Manag. 28, 3–22.
13. Gandolfo, G., 2009. Economic Dynamics. fourth ed. Springer, Berlin.
14. Gujarati, D. N., Porter, D. C., 2009. Basic Econometrics. fifth ed. McGraw-Hill Irwin, Boston.
15. Hall, P. V., Jacobs, W., Lavaud-Letilleul, V., 2009. Ports in proximity, proximity in ports: towards a typology. In: Notteboom, T., Ducruet, C., Langen, P.W.d. (Eds.), Ports in Proximity: Competition and Coordination Among Adjacent Seaports. Ashgate Pub., Farnham, England; Burlington, VT (pp. xxvi, 305 pp.).
16. Hoshino, H., 2010. Competition and collaboration among container ports. Asian J. Shipp. Logist. 26, 31–48.
17. Huang, A., Lai, K., Li, Y., Wang, S., 2015. Forecasting container throughput of Qingdao port with a hybrid model. J. Syst. Sci. Complex. 28, 105–121.
18. Hui, E.C.M., Seabrooke, W., Wong, G. K. C., 2004. Forecasting cargo throughput for the port of Hong Kong: error correction model approach. J. Urban Plann. Dev. 130, 195–203.
19. Ishii, M., Lee, P.T.W., Tezuka, K., Chang, Y. T., 2013. A game theoretical analysis of port competition. Transport. Res. E Log 49, 92–106.
20. Juselius, K., 2006. The Cointegrated VAR Model: Methodology and Applications. Oxford University Press, Oxford; New York.
21. Kayacan, E., Ulutas, B., Kaynak, O., 2010. Grey system theory-based models in time series prediction. Expert Syst. Appl. 37, 1784–1789.

22. Lam, J.S.L., Yap, W. Y., 2008. Competition for transshipment containers by major ports in Southeast Asia: slot capacity analysis. *Marit. Policy Manag.* 35, 89–101.
23. Le, Y., Ieda, H., 2010. Evolution dynamics of container port systems with a geo-economic concentration index: a comparison of Japan, China and Korea. *Asian Transp. Stud.* 1, 46–61.
24. Lee, S. J., Lee, D. J., Oh, H.S., 2005. Technological forecasting at the Korean stock market: a dynamic competition analysis using Lotka–Volterra model. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 72, 1044–1057.
25. Liu, S., Lin, Y., 2010. *Grey Systems Theory and Applications*. Springer, Berlin.
26. Ma, J., Quian, L., 2011. A study on Liaoning ports competition and cooperation. *Adv. Mater. Res.* 181–182, 1050–1053.
27. MDS, T. L., 2012. *NAPA: Market Study on the Potential Cargo Capacity of the North Adriatic Ports System in the Container Sector — Final Report*.
28. NAPA, North Adriatic Ports Association, 2013. <http://www.portsofnapa.com/about-napa>.
29. NIST, Engineering Statistics Handbook, 2013. National Institute of Standards and Technology (U.S.) Gaithersburg, Md.
30. Notteboom, T. E., 1997. Concentration and load centre development in the European container port system. *J. Transp. Geogr.* 5, 99–115.
31. Notteboom, T. E., 2010. Concentration and the formation of multi-port gateway regions in the European container port system: an update. *J. Transp. Geogr.* 18, 567–583.
32. Notteboom, T., Yap, W. Y., 2012. Port competition and competitiveness. In: Talley, W. K. (Ed.), *The Blackwell Companion to Maritime Economics*. Wiley-Blackwell, Malden, MA (pp. Online-Ressource).
33. Peng, W. Y., Chu, C.W., 2009. A comparison of univariate methods for forecasting container throughput volumes. *Math. Comput. Model.* 50, 1045–1057.
34. Shu, M. H., Huang, Y. F., Nguyen, T.I., 2013. Forecasting models for the cargo throughput at Hong Kong Port and Kaohsiung Port. In: Lorca, P., Popescu, C. (Eds.), *Recent Researches in Applied Economics and Management*. WSEAS Press, Chania, Crete Island, Greece, p. 507.
35. Slack, B., 1985. Containerization, inter-port competition, and port selection. *Marit. Policy* 12, 293–303.
36. Song, D. W., 2002. Regional container port competition and co-operation: the case of Hong Kong and South China. *J. Transp. Geogr.* 10, 99–110.
37. Tavasszy, L., Minderhoud, M., Perrin, J. F., Notteboom, T., 2011. A strategic network choice model for global container flows: specification, estimation and application. *J. Transp. Geogr.* 19, 1163–1172.
38. Tongzon, J. L., Sawant, L., 2007. Port choice in a competitive environment: from the shipping lines' perspective. *Appl. Econ.* 39, 477–492.
39. Trupac, I., 2002. The emerging of the Single North Adriatic Port System. *Transp. Eur.* 22, 37–42.
40. Twrdy, E., 2004. Container traffic in European ports. *Promet-Traffic-Traffico* 16, 111–115.
41. Twrdy, E., Batista, M., 2014a. Evaluating the competition dynamics of container ports in the North Adriatic. *Sci. J. Marit. Res.* 28, 88–93.
42. Twrdy, E., Batista, M., 2014b. Evaluating the competition dynamics of container ports in the North Adriatic. *Pomorstvo* 28, 88–93.
43. Twrdy, E., Trupac, I., Kolenc, J., 2012. Container boom in the Port of Koper. *Promet-Traffic-Traffico* 24, 169–175.
44. Van Dorsser, C., Wolters, M., van Wee, B., 2012. A very long term forecast of the port throughput in the Le Havre–Hamburg range up to 2100. *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* 12, 66–87.
45. Veldman, S. J., Buckmann, E. H., 2003. A model on container port competition: an application for the West European container hub-ports. *Marit. Econ. Logist.* 5, 3–22.
46. Yap, W. Y., Lam, J. S. L., 2006. Competition dynamics between container ports in East Asia. *Transp. Res. A Policy Pract.* 40, 35–51.
47. Yap, W. Y., Lam, J. S. L., Notteboom, T., 2006. Developments in container port competition in East Asia. *Transp. Rev.* 26, 167–188.
48. Yeo, G. T., Song, D. W., 2006. An application of the hierarchical fuzzy process to container port competition: policy and strategic implications. *Transportation* 33.
49. Zhang, C., Huang, L., Zhao, Z., 2013. Research on combination forecast of port cargo throughput based on time series and causality analysis. *J. Ind. Eng. Manag.* 6, 307–311.
50. Zondag, B., Bucci, P., Gützkow, P., de Jong, G., 2010. Port competition modeling including maritime, port, and hinterland characteristics. *Marit. Policy Manag.* 37, 179–194.

Razvoj konkurenčno-sodelovalnih odnosov med pristanišči za križarjenja v Mediteranu od leta 2000 do 2017

Vivien Lorenčič, Elen Twrdy, Milan Batista

Prevod dela: Development of Competitive–Cooperative Relationships among Mediterranean Cruise Ports since 2000. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 2020. <https://doi.org/10.3390/jmse8050374>

Povzetek: Križarjenja so bila v zadnjih letih izjemno priljubljena, pri čemer je ena najhitreje rastočih regij za križarjenja Mediteran. V članku ocenjujemo možne konkurenčno-sodelovalne odnose med mediteranskimi pristanišči za križarjenja za obdobje 2000-2017. V ta namen so uporabljeni trije modeli: dinamični model premika tržnega deleža (ang. shift-share), Lotka-Volterrov model (LVM) in logistični model (LM). V analizo je vključena tudi ocena osnovnih tržnih kazalnikov. Analiza je pokazala, da je promet z ladjami za križarjenja v Mediteranu v fazi zasičenosti. Modela shift-share in LVM razkrivata, da interakcija med pristanišči ni pomembna za velika pristanišča, vendar pa je ključna za majhna pristanišča.

Ključne besede: pristanišča za križarjenja; Mediteran; tržni deleži; analiza konkurence; LVM model; LM model

1. Uvod

Znano je, da so križarjenja v zadnjih dveh desetletjih postala pomemben del turizma. Zato je tudi literatura o industriji križarjenj postala precej obsežna. Ta vključuje študije, poročila in akademske članke, ki obravnavajo različne vidike križarjenj, kot so svetovna industrija križarjenj [1-5], turizem križarjenj [6,7], težave množičnega križarjenja [8,9], ekologija in ekonomija križarjenj [10-16], geografija križarskega turizma [17-19], konkurenca in sodelovanje med pristanišči za križarjenja [20-22], upravljanje pristanišč [23,24], varnost in varovanje potnikov in pristanišč [25,26] ter socialno-ekonomska in demografska struktura potnikov na križarjenjih [27]. Kljub obsežni literaturi se zdi, da je premalo prizadevanj pri modeliranju vrednotenja križarskega prometa za ugotavljanje možnega sodelovanja in konkurence na trgu križarjenj. Izjema je študija po [20], kjer je avtor analiziral koncentracijo pretovora med pristanišči oziroma spremembe v tržnem deležu na podlagi podatkov iz pristanišč. Ugotovil je, da je treba položaj vsakega pristanišča preučiti v povezavi s stanjem konkurenčnih pristanišč. Dodana vrednost te raziskave je v tem, da ponuja metodo (premik tržnega deleža, ang. shift-share) za ocenjevanje konkurenčne dinamike pristaniškega območja. Avtorji v [21] so preučevali raven koncentracije med pristanišči v Evropi in ugotovili, da so nedavni razvojni trendi v evropskem pristaniškem sistemu povzročili stagnacijo koncentracije trga križarjenj. Jeronimo in Antonio [22] pa sta prispevala rezultate o konkurenčnih razmerjih med pristanišči za križarjenje, pri čemer sta za določitev vrste razmerij med pristanišči uporabila različne metodologije. Rezultati kažejo na določeno prednost sodelovalnih odnosov med večjimi križarskimi pristanišči, saj ta večja pristanišča druga pristanišča dojemajo kot sodelujoče partnerje. Vendar ta študija ne prikazuje neposrednih konkurenčnih odnosov med posameznimi pristanišči in regijami, temveč njihovo konkurenčnost glede na spremembe v koncentraciji in obsegu prometa.

V tem članku se osredotočamo na evropska pristanišča za križarjenja, ki se nahajajo v Mediteranu. Po navedbah Pallisa in Arapi [28] je Mediteran s sosednjimi morji v obdobju 2000–2015 zaradi globalizacije v industriji križarjenj rasel hitreje kot katera koli druga svetovna regija. Danes je to območje druga najbolj priljubljena destinacija za križarjenja na svetu, takoj za Karibi [24].

Najprej pojasnimo nekaj izrazov, uporabljenih v tem članku. Trg križarjenj sestavljajo ponudniki križarjenj, ki prodajajo poti (destinacije) potnikom, ter pristanišča, ki gostijo križarke. Trg križarjenj je sistem, v katerem delujejo ponudniki tj. ladjarji, potniki in pristanišča. Za ponudnike križarjenj tj. ladjarje pomeni promet križark prevoz potnikov, medtem ko za pristanišča pomenijo gibanje križark in potnikov (vstopni, izstopni in tranzitni potniki, torej potniški promet). V tej študiji se osredotočamo na pristaniški križarski promet.

Danes poročila večine pristaniških uprav vključujejo podatke o potniškem prometu, ki jih obravnavamo kot glavni kazalnik pristaniškega potniškega prometa. Uporabljamo podatke iz poročil pristaniških uprav in podatke o potniškem prometu, ki jih zagotavljajo različne organizacije [29,30]. Obstajajo tudi drugi kazalniki pristaniškega potniškega prometa, kot so število izplutij in število vplutij ladij, vendar so ti podatki pogosto razpršeni ali težko dostopni. Poleg tega so podatki o potniškem prometu pogosto nedosledni – razlikujejo se med različnimi viri in včasih celo znotraj istega vira.

Namen tega članka je preučiti medsebojne odnose med pristanišči in regijami, ki so del trga križarjenj v Mediteranu od leta 2000 dalje. Cilj članka je modelirati oceno prometa križarjenj ter opredeliti možnosti za sodelovanje in konkurenco na trgu križarjenj. Metodologija temelji na treh modelih, ki so uporabljeni v tem članku: dinamični model delitve premikov tržnega deleža (ang. shift-share), Lotka-Volterrov model (LVM) konkurence in logistični

model (LM). Namen modela delitve premika je ugotoviti spremembe v prometu križarjenj ob predpostavki, da konkurenti, tj. pristanišča in regije, ohranijo svoj začetni tržni delež. Nato uporabimo dinamični model premika tržnega deleža [31], ki za razliko od statičnega dvoletnega modela upošteva vsako leto v določenem obdobju. Ta pristop pomaga zmanjšati vpliv izbranih začetnih in končnih let. Drugi uporabljen model je Lotka-Volterra (LVM) model konkurence, omogoča prepoznavanje interakcij med konkurenti glede na njihovo stopnjo rasti. Ker oba modela predstavljata le posnetek odnosov, ki so se razvili v opazovanem obdobju, ju ne smemo obravnavati kot metodo napovedovanja [31]. Vendar pa LVM zagotavlja oceno končne zmogljivosti (kapacitete) konkurentov. Tretji model je logistični model (LM), ki je posebna oblika LVM brez interakcij med konkurenti. LM se uporabi za oceno dejanskih interakcij med konkurenti.

Ta članek je organiziran na naslednji način. V drugem poglavju je podan pregled prometa z ladjami za križarjenja v mediteranskih pristaniščih, vključno z oceno različnih osnovnih tržnih kazalnikov. Izvedena je analiza dinamičnega premika tržnega deleža za regije v Mediteranu, za pristanišča znotraj posameznih regij, in za pristanišča med vsemi regijami. Modela LVM in LM sta uporabljena za tri prevladujoče regije: zahodni Mediteran, Jadransko morje in vzhodni Mediteran (vključno s tremi največjimi pristanišči v zahodnem Mediteranu: Barcelona, Civitavecchia in Balearski otoki ter dvema največjima pristaniščema v Jadranskem morju: Benetke in Dubrovnik). V poglavju tri so povzeti rezultati analize. V poglavju štiri pa so podane kritične pripombe glede uporabljenih metod v članku.

V nadaljevanju članka uporabljamo okrajšavo »Pax« za potnike. Vsa analizirana pristanišča smo razvrstili glede na število premikov potnikov (Pax) na:

1. pristanišča z več kot 0,8 milijona Pax na leto so velika pristanišča,
2. pristanišča z 0,2 do 0,8 milijona Pax na leto so srednje velika pristanišča,
3. pristanišča z manj kot 0,2 milijona Pax na leto so majhna pristanišča za križarjenja.

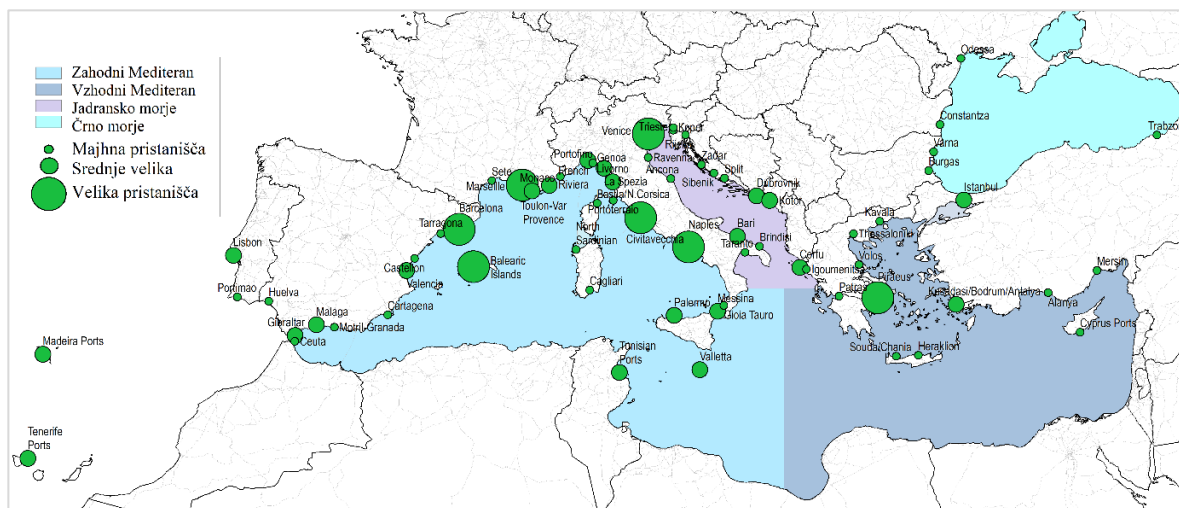
Kar zadeva Mediteran, se za veliko pristanišče šteje tudi tisto z več kot 4 % tržnim deležem v sistemu, medtem ko je majhno pristanišče tisto z manj kot 1 % tržnega deleža.

2. Podatki in metode

V tem poglavju predstavljamo pregled trenutnega stanja prometa z ladjami za križarjenja, ki vključuje razdelitev Mediterana na regije, prikazuje osnovne kazalnike trga križarjenj ter uporabljene metode.

2.1. Pregled trenutnega stanja trga križarjenj v Mediteranu

Mediteranska pristanišča lahko razdelimo na štiri regije (slika 1): vzhodni Mediteran (VM), zahodni Mediteran (ZM), Jadransko morje (JM) in Črno morje (ČM) [18]. Na splošno v analizo nismo vključili južnega Mediterana, med pristanišča ZM pa vključujemo tunizijska pristanišča in pristanišča v Atlantskem oceanu, tj. pristanišča Tenerife v Španiji ter Lizbona in Madeira na Portugalskem, saj so vključena kot del nekaterih itinerarij.



Slika 1. Analiza pristanišč in regij v Mediteranu.

Po podatkih MedCruise [29] je bilo v letu 2017 zabeleženih 25,2 mio. Pax in 363 prihodov ladij, ki predstavljajo 15,8 % vseh prihodov ladij za križarjenja v svetu. V letu 2017 je v Mediteranu delovalo 42 ladjarjev, ki so imeli v lasti 136 ladij s skupno kapaciteto kar 3,8 mio. Pax. Na podlagi ABC analize lahko ocenimo, da je trg križarjenj postal zelo koncentriran, saj si kar 20 % vseh ladjarjev lasti 76 % kapacitete Pax v Mediteranu.

Tabela 1 prikazuje 15 najbolj prometnih pristanišč v Mediteranu z najvišjim Pax v letu 2010 in 2017. Ta pristanišča so imela skupaj približno 70 % tržnega deleža Pax v Mediteranu. Največji tržni delež imata Barcelona in

Civitavecchia, ki se nahajata v zahodnem Mediteranu. V primerjavi z letom 2010 je najbolj napredovalo pristanišče v Marseillu, ki je na lestvici skočilo z 12. na 4. mesto. Najbolj je nazadovalo pristanišče v Dubrovniku, ki je s 7. padlo na 11. mesto. Presenetila so pristanišča Valletta, Kotor in Corfu, ki so se povzpela na seznam prvih 15 pristanišč, in nadomestila tunizijska in turška pristanišča.

Tabela 1. Najboljših 15 pristanišč v Mediteranu glede na Pax (v milijonih).

| Razvrstitev | Pristanišče | 2010 | Sprememba razvrstitve - Shift | Pristanišče | 2017 | Pristanišče | Skupaj 2010-2017 |
|-------------|--------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|------------------|
| 1 | Barcelona | 2,35 | 0 | Barcelona | 2,71 | Barcelona | 20,32 |
| 2 | Civitavecchia | 1,94 | 0 | Civitavecchia | 2,20 | Civitavecchia | 18,41 |
| 3 | Benetke | 1,62 | 1 | Balearski otoki | 2,11 | Balearski otoki | 13,69 |
| 4 | Balearski otoki | 1,55 | 8 | Marseille | 1,49 | Benetke | 13,34 |
| 5 | Pirej | 1,35 | -2 | Benetke | 1,43 | Neapelj | 9,53 |
| 6 | Neapelj | 1,15 | -1 | Pirej | 1,06 | Marseille | 9,44 |
| 7 | Dubrovnik | 1,14 | 3 | Pristanišča na Tenerifih | 0,96 | Pirej | 9,32 |
| 8 | Tunizijska pristanišča | 0,94 | -2 | Neapelj | 0,93 | Dubrovnik | 7,37 |
| 9 | Genova | 0,90 | 0 | Genova | 0,93 | Genova | 7,12 |
| 10 | Livorno | 0,86 | -2 | Valletta | 0,78 | Pristanišča na Tenerifih | 6,87 |
| 11 | Pristanišča na Tenerifih | 0,82 | -4 | Dubrovnik | 0,75 | Livorno | 6,41 |
| 12 | Marseille | 0,74 | -2 | Livorno | 0,70 | Krf | 5,37 |
| 13 | Francoska riviera | 0,70 | 0 | Francoska riviera | 0,69 | Kusadasi/Bodrum/Antalya | 5,07 |
| 14 | Kusadasi/Bodrum/Antalya | 0,67 | | Krf | 0,68 | Francoska riviera | 5,05 |
| 15 | Malaga | 0,66 | | Kotor | 0,54 | Valletta | 4,78 |
| | <i>Tržni delež 15</i> | <i>73,0</i> | | <i>Tržni delež 15</i> | <i>71,7</i> | <i>Tržni delež 15</i> | <i>69,3</i> |
| | | <i>%</i> | | | <i>%</i> | | <i>%</i> |

2.2. Osnovne ekonomske metrike potniškega prometa za križarjenja

Podatki za izračun osnovnih statističnih analiz [32] so prikazani v tabeli 2. Nekatere pristaniške oblasti ter zlasti specializirane organizacije [30,33] zagotavljajo prosto dostopne statistične analize, ki vsebujejo analizo povprečne letne stopnje rasti, tržne deleže, koncentracijo trga, analize sezonskih trendov, napovedi itd. S pomočjo le-teh smo tudi mi pridobili podatke o pristaniščih. Za vse nadaljnje statistične analize regij smo uporabili podatke, prikazane v tabeli 2.

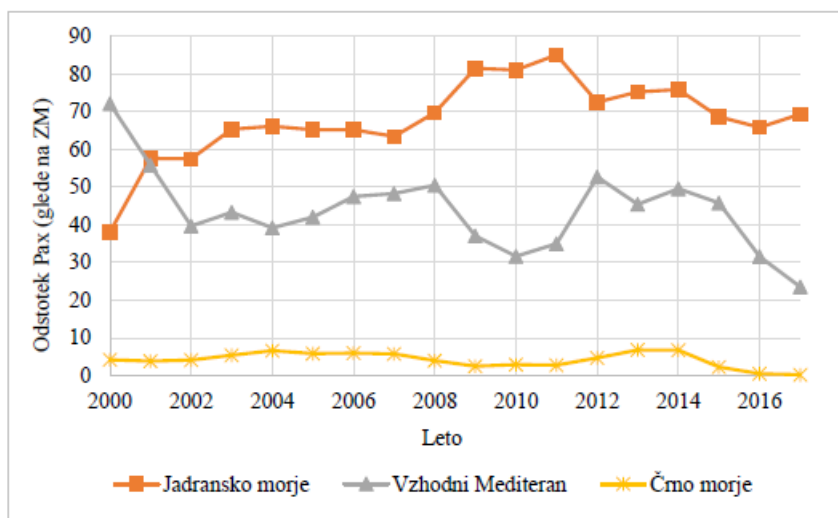
Tabela 2. Podatki o potnikih v enoti Pax [29].

| Leto | Število vključenih pristanišč | | | | Število potnikov skupaj (v milijonih) | | | | Povprečno število potnikov na pristanišče (v tisočih) | | | |
|------|-------------------------------|----|----|----|---------------------------------------|------|------|------|---|-------|-------|------|
| | ZM | JM | VM | ČM | ZM | JM | VM | ČM | ZM | JM | VM | ČM |
| 2000 | 34 | 10 | 16 | 9 | 4,73 | 0,53 | 1,61 | 0,05 | 139,1 | 53,0 | 100,4 | 5,9 |
| 2001 | 34 | 10 | 16 | 9 | 5,29 | 0,90 | 1,39 | 0,05 | 155,7 | 89,7 | 86,9 | 6,0 |
| 2002 | 34 | 10 | 16 | 9 | 6,18 | 1,05 | 1,16 | 0,07 | 181,9 | 104,8 | 72,2 | 7,6 |
| 2003 | 34 | 10 | 16 | 9 | 7,50 | 1,44 | 1,53 | 0,11 | 220,7 | 144,2 | 95,6 | 11,9 |
| 2004 | 34 | 10 | 16 | 9 | 7,54 | 1,47 | 1,39 | 0,13 | 221,7 | 146,8 | 87,0 | 14,7 |
| 2005 | 34 | 10 | 16 | 9 | 8,85 | 1,70 | 1,75 | 0,14 | 260,2 | 169,7 | 109,4 | 15,2 |
| 2006 | 34 | 10 | 16 | 9 | 10,12 | 1,94 | 2,26 | 0,16 | 297,5 | 194,1 | 141,4 | 17,8 |
| 2007 | 34 | 10 | 16 | 9 | 12,10 | 2,26 | 2,75 | 0,18 | 355,8 | 225,8 | 172,0 | 20,5 |
| 2008 | 34 | 10 | 16 | 9 | 13,89 | 2,85 | 3,31 | 0,15 | 408,7 | 285,3 | 206,6 | 16,2 |
| 2009 | 34 | 10 | 16 | 9 | 15,37 | 3,69 | 2,68 | 0,10 | 452,1 | 368,7 | 167,6 | 11,3 |
| 2010 | 34 | 10 | 16 | 9 | 17,24 | 4,11 | 2,57 | 0,13 | 507,0 | 411,1 | 160,5 | 15,0 |
| 2011 | 34 | 10 | 16 | 9 | 18,90 | 4,73 | 3,12 | 0,14 | 555,9 | 473,0 | 194,8 | 15,4 |
| 2012 | 36 | 13 | 12 | 6 | 18,55 | 4,86 | 3,26 | 0,15 | 515,2 | 373,8 | 271,8 | 24,4 |
| 2013 | 36 | 13 | 12 | 6 | 18,83 | 5,12 | 2,86 | 0,21 | 523,1 | 393,7 | 238,0 | 35,6 |
| 2014 | 39 | 13 | 13 | 6 | 18,03 | 4,56 | 2,98 | 0,19 | 462,3 | 350,8 | 229,2 | 31,4 |
| 2015 | 39 | 13 | 13 | 6 | 19,64 | 4,49 | 3,00 | 0,07 | 503,6 | 345,7 | 230,9 | 11,6 |
| 2016 | 39 | 14 | 16 | 6 | 20,08 | 4,75 | 2,60 | 0,02 | 514,8 | 339,1 | 162,8 | 2,8 |
| 2017 | 40 | 13 | 15 | 5 | 19,72 | 4,45 | 1,74 | 0,01 | 493,0 | 342,1 | 116,0 | 1,3 |

Opomba: Podatki, označeni s sivo barvo, so ocene.

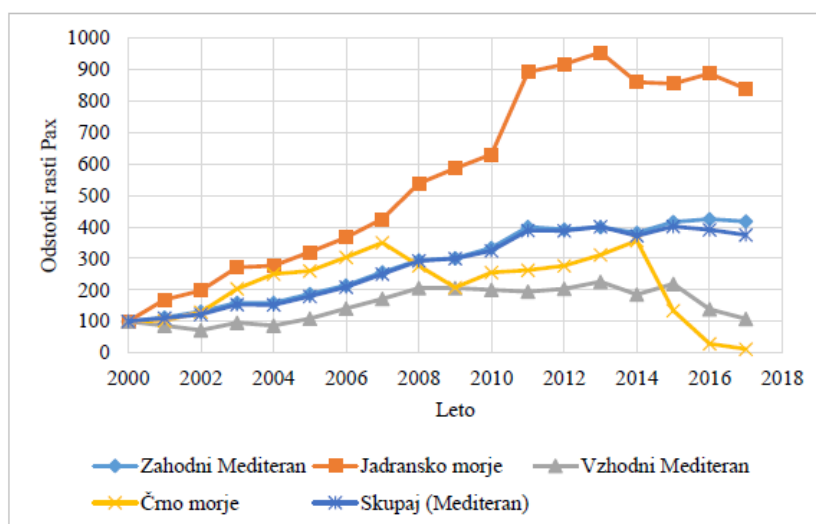
Kot je razvidno iz tabele 2, je imel zahodni Mediteran v obdobju 2010-2017 največ premikov potnikov. Na drugem mestu je Jadransko morje, na tretjem pa vzhodni Mediteran. Črno morje ima skoraj zanemarljivo število Pax. V obravnavanem obdobju je bilo v Mediteranu skupaj zabeleženih 340 milijonov premikov potnikov, od katerih je 71 % obvladoval zahodni Mediteran, 16 % Jadransko morje, 12 % vzhodni Mediteran in manj kot 1 % Črno morje.

Ker se število pristanišč v regijah med leti razlikuje, smo izračunali povprečno vrednost Pax na pristanišče v regiji za vsako posamezno leto glede na to, koliko pristanišč je bilo v tistem letu vključenih v križarjenja. Povprečni Pax regij smo normalizirali glede na povprečni Pax v regiji zahodnega Mediterana. Slika 2 prikazuje normalizirane vrednosti Pax v odstotkih glede na zahodno regijo Mediterana. Opazimo, da povprečni Pax v Jadranskem morju dosega približno 68 % povprečnega Pax v zahodnem Mediteranu. V vzhodnem Mediteranu povprečni Pax pristanišča dosega 44 % povprečnega Pax v zahodnem Mediteranu, in v Črnem morju le 4 % povprečnega Pax v zahodnem Mediteranu. Iz tega ugotovimo, da zahodni Mediteran ni le največja regija, ampak ima tudi v povprečju največji Pax na pristanišče v primerjavi z drugimi regijami.



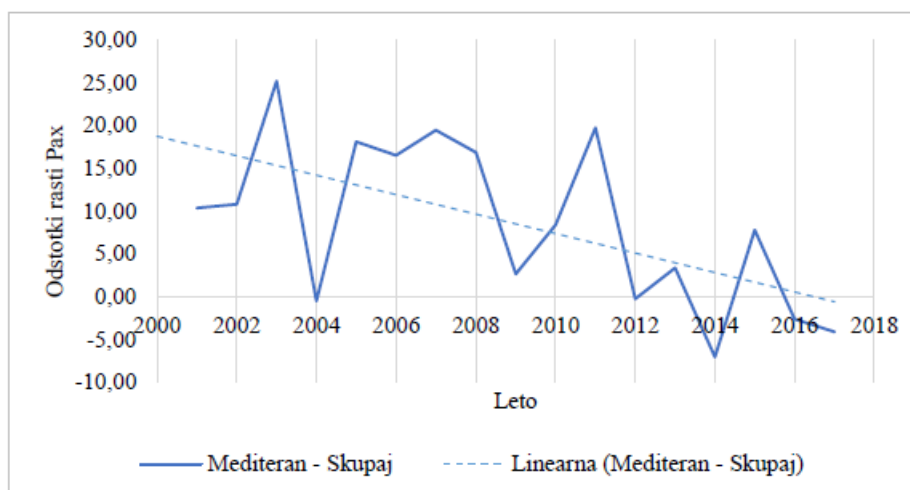
Slika 2. Povprečni Pax na pristanišče v posamezni regiji glede na regijo zahodni Mediteran = 100 %.

Drugi kazatelj dinamike tokov potnikov je ocena indeksa rasti, ki ga prikazuje slika 3. Vidimo, da ima Jadransko morje najvišje indekse rasti, kjer je leta 2013 doseglo največjo rast, skoraj 900 % glede na izhodiščno leto (2000), ki predstavlja 100 % (število Pax v letu 2000 smo normalizirali). Indeks rasti v Črnem morju se je leta 2014 močno znižal zaradi negotovih geopolitičnih in gospodarskih razmer na območju regije (priključitev ukrajinskega polotoka Krim k Ruski federaciji), ki so vplivale tudi na križarjenja. V letu 2015 opazimo padec indeksa rasti tudi v vzhodnem Mediteranu, kar je najverjetneje prav tako posledica zapletenih geopolitičnih, gospodarskih in socialnih razmer na Bližnjem vzhodu.



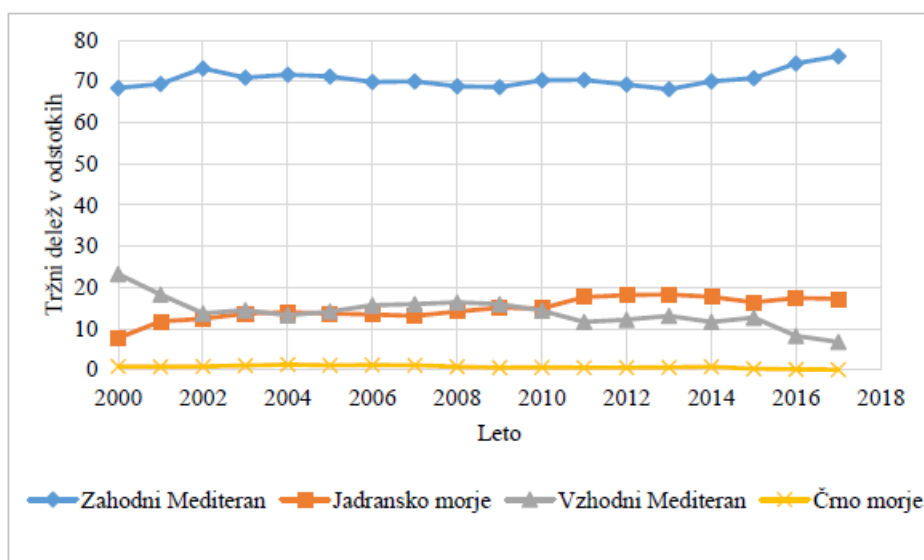
Slika 3. Indeks rasti Pax za regije Mediterana glede na izhodiščno leto 2000 (100 %).

Slika 4 prikazuje letne stopnje rasti (ang. annual growth rate – AGR) trga križarjenj v Mediteranu. Glede na črto trenda opazimo, da se je letna stopnja rasti zmanjšala z okoli 20 % v letu 2000 na -5 % v letu 2017, z drugimi besedami, trg križarjenj se upočasnjuje. To lahko opazimo tudi znotraj posameznih regij Mediterana. V obravnavanem obdobju je v zahodnem Mediteranu trg križarjenj padel z 12 % (2001) na -4 % (2017), medtem ko je v Jadranskem morju z 69 % na le 1 %. Vzhodni Mediteran je v enakem obravnavanem obdobju prav tako povečal upad rasti z -13 % na skoraj -21 %. Tudi Črno morje je v enakem obdobju zabeležilo upad rasti s skoraj 2 % v letu 2001 na -58 % v letu 2017.



Slika 4. Letna stopnja rasti prometa križarjenj v Mediteranu.

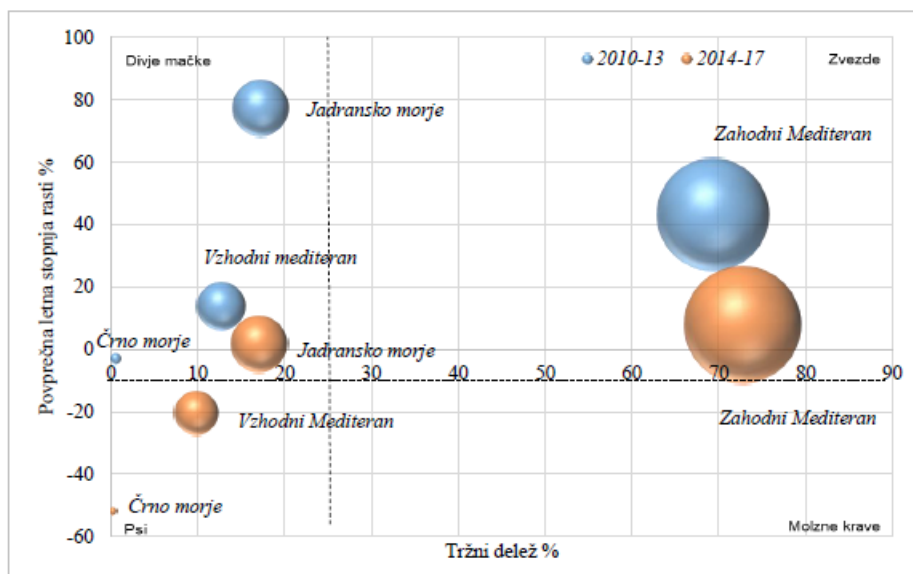
Slika 5 prikazuje tržne deleže regij v Mediteranu po letih. V tem primeru smo analizirali dejansko skupno število Pax (v milijonih) iz tabele 1 in ne več povprečnega Pax na pristanišče. Z izvedbo analize tržnih deležev ugotavljamo, da je zahodni Mediteran v letu 2017 obvladoval 76 % tržnega deleža, Jadransko morje 17 % tržnega deleža, vzhodni Mediteran 6 %, Črno morje pa manj kot 1 % tržnega deleža križarjenj v Mediteranu, medtem ko se je tržni delež regije vzhodni Mediteran zmanjšal na približno 7 %.



Slika 5. Tržni delež prometa križarjenj v različnih regijah Mediterana.

Povprečno letno stopnjo rasti in tržni delež združimo v matriko Boston Consulting Group (BCG), ki je prikazana na sliki 6. Matriko BCG smo uporabili za oceno portfelja regij križarjenja v Mediteranu. V matriki so štiri regije razporejene glede na tržni delež in letno stopnjo rasti v dveh zaporednih štiriletnih obdobjih: 2010-2013 in 2014-2017. Slika prikazuje, da so vse regije ohranile svoje povprečne tržne deleže in povprečno gibanje števila potnikov. Vendar pa se je njihova povprečna letna stopnja rasti znižala, kar kaže na možen stalen razvoj trga v prihodnosti. Glede na matriko BCG sta regiji JM in VM iz "divjih mačk" z velikimi možnostmi za rast, vendar nizkim tržnim

deležem, postali "psi", saj sta izgubili povprečno stopnjo rasti, medtem ko je regija ZM iz "zvezd" z najboljšim tržnim deležem in dobro stopnjo rasti postala "molzne krave", ki vodijo po tržnem deležu, vendar imajo nizko povprečno stopnjo rasti.



Slika 6. Položaji različnih regij v matriki BCG za dve časovni obdobji. Širina mehurčkov je sorazmerna z vrednostjo Pax regije.

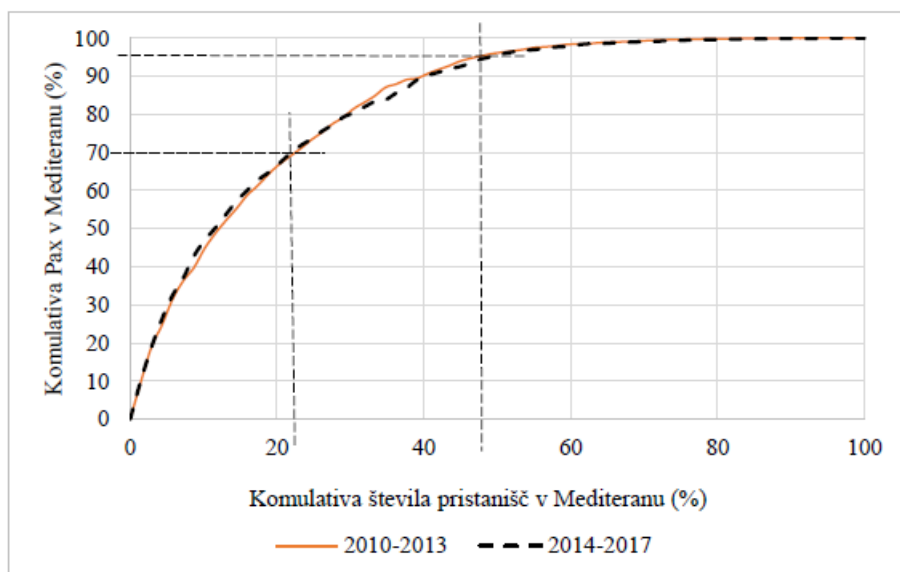
2.3. Koncentracija trga križarjenj

Za oceno koncentracije trga križarjenj v mediteranskih pristaniščih za križarjenja uporabimo Lorentzovo krivuljo koncentracije [21] in Herfindahl-Hirschmanov indeks (HHI), ki je opredeljen kot [21,34]:

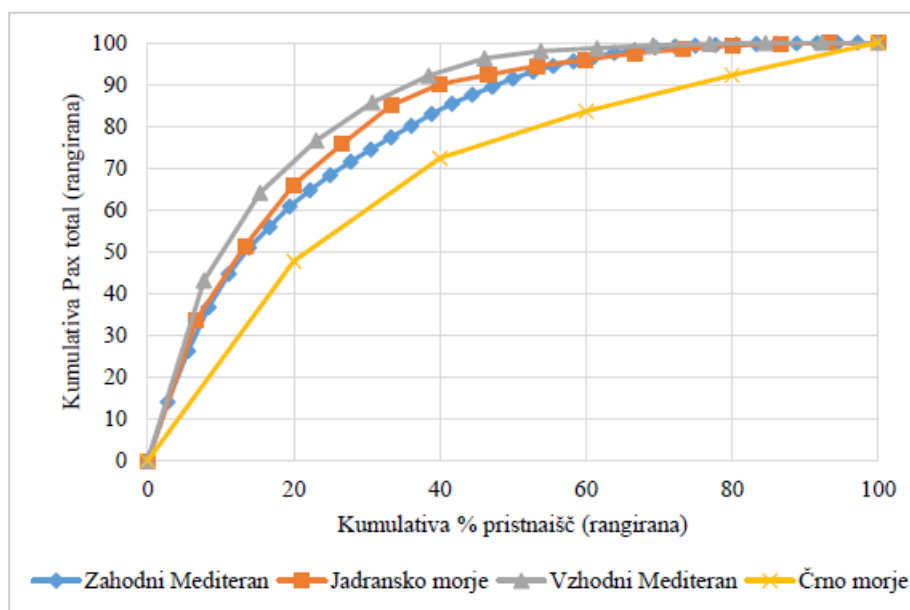
$$HHI = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad \frac{1}{n} \leq HHI \leq 1, \quad (1)$$

kjer je P_i skupno število potnikov Pax v pristanišču i , n pa je število pristanišč v pristaniškem sistemu za križarjenje. Višja kot je vrednost HHI , večja je koncentracija trga. Če je HHI enak ena, pomeni popolno koncentracijo, tj. eno pristanišče pridobi celoten trg križarjenj. Če imajo vsa pristanišča enak tržni delež, potem je $HHI = 1/n$. Tako njegova obratna vrednost, $n_e = 1/HHI$, opisuje enakovreden trg križarjenj z n_e pristanišči, ki imajo enak tržni delež. Tako se n_e razlaga kot število prevladujočih pristanišč na trgu. Za praktični izračun smo uporabili MS Excel.

Slika 7 prikazuje Lorentzove krivulje koncentracije za obdobji 2010-2013 in 2014-2017. V obeh obdobjih je koncentracija ladij za križarjenje praktično enaka: približno 20 % pristanišč (približno 15 pristanišč) prejme 70 % celotnega prometa Pax, medtem ko približno 50 % pristanišč prejme 95 % prometa Pax. Podobno stanje je mogoče opaziti na celotnem trgu za regiji JM in VM (slika 8). Koncentracija trga v regiji ZM je nekoliko manjša (30 % pristanišč ima 70 % trga). Še manjša je v regiji ČM, kjer ima 40 % pristanišč 70 % tržni delež.

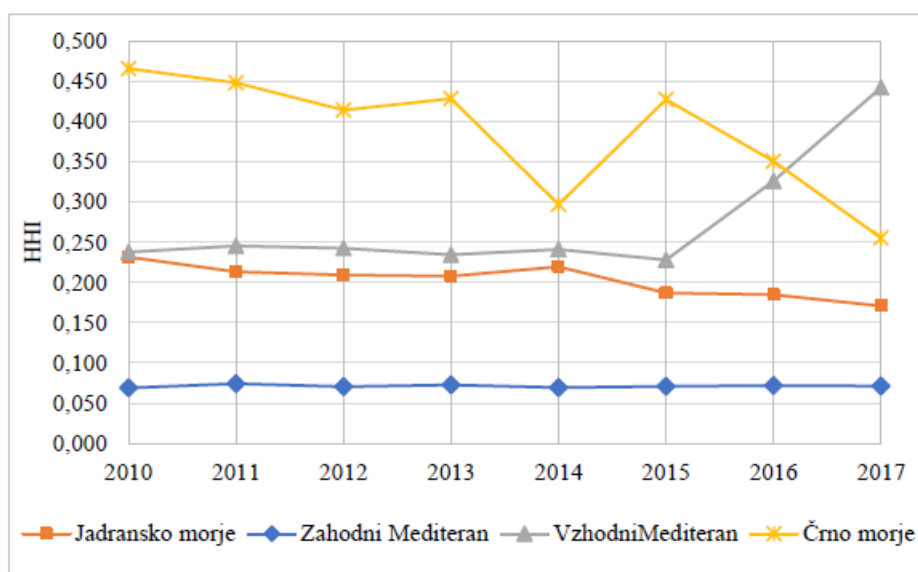


Slika 7. Kumulativa tržnega deleža pristanišč (Pax) v Mediteranu (sistem 69 pristanišč).



Slika 8. Kumulativni tržni delež pristanišč za križarjenja v različnih regijah v obdobju 2014-2017.

Slika 9 prikazuje spremembo tržne koncentracije trga, ki jo opisuje HHI. HHI za vse regije in regijo zahodnega Mediterana (ZM) ostaja stabilen in razmeroma nizek ($HHI \approx 0,04$ in $HHI \approx 0,07$), kar pomeni, da promet z ladjami za križarjenja ni koncentriran. To kaže, da na trgu križarjenj v Mediteranu prevladuje približno 25 pristanišč (od 69 pristanišč), od katerih je približno 15 pristanišč (od 36 pristanišč) v regiji ZM. HHI za regiji JM in VM je bil do leta 2015 nekoliko nad 0,2, kar pomeni, da je bila koncentracija prometa z ladjami za križarjenja zmerna. To pomeni, da je bilo v vsaki regiji pet glavnih pristanišč (od 15 v JM oziroma 13 pristanišč v VM). Po letu 2015 se je HHI za regijo JM začel postopoma zmanjševati, kar pomeni, da je promet postal manj koncentriran. HHI za regijo VM pa se je povečal na približno 0,4, kar pomeni, da je promet postal bolj koncentriran z le dvema prevladujočima pristaniščema: Pirej v Grčiji in skupina turških pristanišč Kusadasi/Bodrum/Antalya.



Slika 9. Gibanje Hirschman-Herfindahlovega indeksa prometa ladij za križarjenja v obdobju 2010-2017.

2.4. Analiza premikov tržnega deleža (ang. Shift-share)

Upoštevamo, da imamo v konkurenčnem trgu n regij ali pristanišč, ki so konkurenti v sistemu. $P_{i,t}$ je promet Pax tj. število premikov potnikov konkurenta i v času t . Skupni promet Pax v sistemu konkurenčnega trga ob času t je:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_{i,t}, \quad (2)$$

medtem ko je tržni delež $MS_{i,t}$ konkurenta i ob času t enak:

$$MS_{i,t} = \frac{P_{i,t}}{P_t} \times 100\%. \quad (3)$$

Shift-share model delitve določa, da se $P_{i,t}$ lahko razstavi v naslednjo obliko enačbe:

$$P_{i,t} = SHARE_{i,t} + SHIFT_{i,t}, \quad (4)$$

kjer je:

$$SHARE_{i,t} = MS_{i,t-1} \times P_t, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{in } SHIFT_{i,t} = (MS_{i,t} - MS_{i,t-1}) \times P_t. \quad (6)$$

Enačba (4) kaže, da učinek deleža opisuje pričakovano rast števila potnikov konkurenta na način, da se ohrani njegov trenutni tržni delež. Sprememba odraža skupni promet, ki ga konkurent pridobi ali izgubi v svoji konkurenci z drugimi deležniki v sistemu. V preglednicah 6 in 7 bomo uporabili naslednje odstotne vrednosti shift in share:

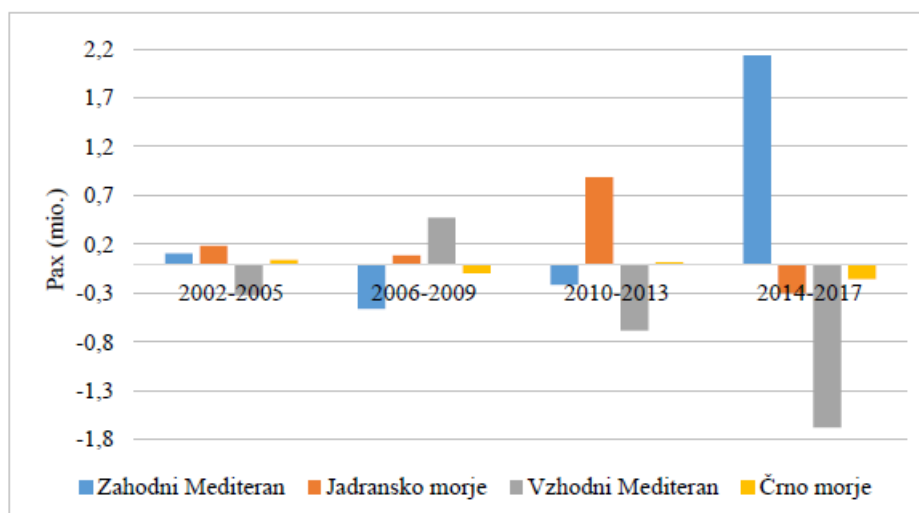
$$\%SHARE_{i,t} = \frac{SHARE_{i,t}}{P_{i,t}} \times 100\%, \quad \%SHIFT_{i,t} = \frac{SHIFT_{i,t}}{P_{i,t}} \times 100\%. \quad (7)$$

Prvi %SHARE podaja odstotek pričakovanega deleža Pax v smislu dejanskega števila potnikov konkurenčnega pristanišča, druga pa odstotek premika dejanskega števila potnikov Pax konkurenčnega pristanišča.

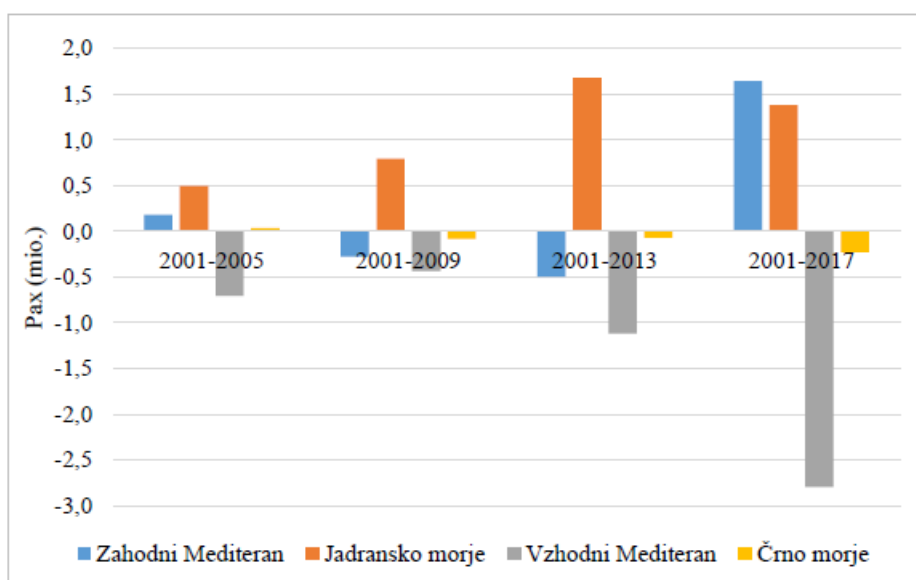
2.4.1. Konkurenca med regijami v sistemu Mediterana

Slika 10 prikazuje rezultat shift-share analize regij. Slika kaže, da premik Pax ni enakomeren proces, kar pomeni, da nobena regija ne pridobiva ali izgublja Pax trajno. Na primer, regija ZM, ki je v obdobju 2014-2017 pridobila 2,1 milijona potnikov, je v obdobju 2010-2013 izgubila 0,2 milijona potnikov. Podobno je regija JM v obdobju 2010-2013 pridobila 0,9 milijona Pax, v obdobju 2014-2017 pa izgubila približno 0,3 milijona Pax. V obdobju 2001-2017 je regija VM izgubila največje število potnikov (2,8 milijona potnikov), medtem ko je regija ZM pridobila največje število potnikov (1,64 milijona potnikov) (slika 11). Ta premik števila potnikov iz regije VM pomeni izgubo

približno 6 % vseh potnikov Pax v tem obdobju. Vendar premik v regijo ZM ni bil pomemben, saj je v tem obdobju predstavljal le 0,7 % celotnega prometa.

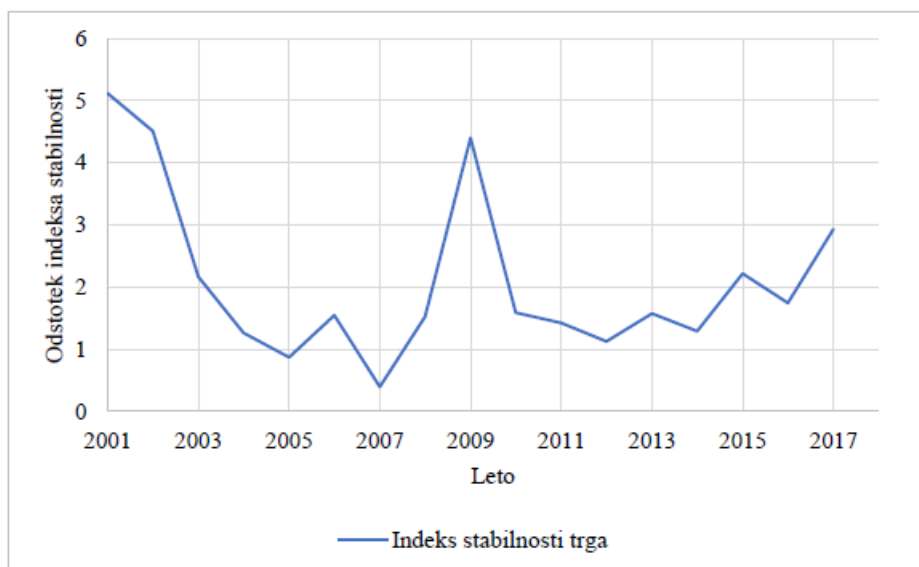


Slika 10. Dinamična analiza deleža premikov s povzetki premikov za štiriletna obdobja.



Slika 11. Kumulativni premik skupnega števila potnikov v obdobju 2001-2017.

Ugotavljamo, da je skupni promet potnikov v sistemu v obdobju 2001-2017 znašal približno 330 milijonov Pax, skupni premik Pax pa približno 3 milijone potnikov, kar je manj kot 1 % skupnega prometa Pax v tem obdobju. Navedeno stanje je prikazano na sliki 12, ki prikazuje tudi indeks stabilnosti trga križarjenj [35], tj. relativni premik prometa Pax. Čeprav ocena indeksa ni stabilna, je njegova vrednost razmeroma nizka. Vidimo lahko, da se v povprečju na leto med regijami premakne približno 2 % celotnega prometa Pax, kar pomeni, da je trg razmeroma stabilen.



Slika 12. Gibanje indeksa stabilnosti za promet z ladjami za križarjenja v Mediteranu.

2.4.2. Konkurenca med pristanišči vseh regij

Rezultati dinamične analize tržnega deleža premikov (ang. shift-share) pristanišč za križarjenja za obdobje 2011-2017, ko se njihova regionalna lokacija tj. regija ni upoštevala, so prikazani v tabelah 3-6.

V tabeli 3 so prikazana pristanišča, ki so v tem obdobju pridobila in izgubila največje število potnikov Pax. Opazimo, da so pristanišča na Balearskih otokih dvakrat pridobila največje število potnikov, medtem ko so tunizijska pristanišča dvakrat izgubila največje število potnikov.

Tabela 3. Sprememba skupnega števila Pax po letih.

| Leto | Skupni shift Pax
(v milijonih) | Največji prejeti Pax
Shift (%) | Vodilno
pristanišče | Največji izgubljeni Pax
Shift (%) | Zadnje
pristanišča |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 2011 | 1,88 | 21,6 | Civitavecchia | -36,6 | Tunizijska
pristanišča |
| 2012 | 1,61 | 14,5 | Valencia | -14,7 | Pirej |
| 2013 | 1,82 | 14,2 | Marseille | -19,0 | Livorno |
| 2014 | 1,57 | 18,2 | La Spezia | -12,6 | Civitavecchia |
| 2015 | 1,81 | 17,1 | Balearski otoki | -22,9 | Tunizijska
pristanišča |
| 2016 | 1,80 | 9,8 | Genova | -30,5 | Istanbul |
| 2017 | 1,50 | 15,2 | Balearski otoki | -22,0 | Neapelj |

Tabela 4 prikazuje seznam devetih pristanišč, ki so v obdobju 2011-2017 obvladovala približno 70 % skupnega tržnega deleža Pax v Mediteranu. Večino tržnega deleža obvladujejo velika pristanišča, kot sta Marseille (0,78 milijona Pax) in Balearski otoki (0,47 milijona Pax). Vendar so bila srednje velika in majhna pristanišča za križarjenja, kot sta italijanski pristanišči La Spezia in Cagliari ter Kotor v Črni gori, relativno najuspešnejša pri pridobivanju Pax, saj njihov skupni shift predstavlja približno 15 % celotnega prometa Pax v obdobju 2011-2017.

Tabela 4. Pristanišča z največjim pridobljenim številom Pax v obdobju 2010-2017.

| Pristanišče | Regija | Država | Tržni delež (%) | Shift Pax (v milijonih) | % prejetega shift | % SHIFT |
|--------------------------|--------|--------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------|
| Marseille | ZM | FRA | 4,60 | 0,78 | 16,9 | 8,25 |
| Balearski otoki | ZM | ESP | 6,68 | 0,49 | 10,7 | 3,60 |
| La Spezia | ZM | ITA | 1,23 | 0,42 | 9,0 | 16,60 |
| Kotor | JM | MNE | 1,33 | 0,40 | 8,8 | 14,82 |
| Cagliari | ZM | ITA | 0,80 | 0,27 | 5,8 | 16,40 |
| Valletta | ZM | MLT | 2,33 | 0,26 | 5,6 | 5,37 |
| Barcelona | ZM | ESP | 9,98 | 0,25 | 5,5 | 1,24 |
| Civitavecchia | ZM | ITA | 8,98 | 0,19 | 4,1 | 1,03 |
| Pristanišča na Tenerifih | ZM | ESP | 3,35 | 0,18 | 3,9 | 2,6 |

Tabela 5 prikazuje seznam pristanišč za križarjenja, ki so v obdobju 2011-2017 izgubila približno 70 % vseh potnikov. Na tem seznamu so velika pristanišča za križarjenje, kot so Dubrovnik, Neapelj in Benetke, ki so izgubila približno 0,2 do 0,3 milijona Pax. Vendar so tunizijska pristanišča (36 % vseh Pax) ter pristanišči na Cipru in v Istanbulu (približno 15 % vseh Pax) relativno izgubila največje število Pax.

Tabela 5. Pristanišča, ki so v obdobju 2010-2017 izgubila največji delež Pax.

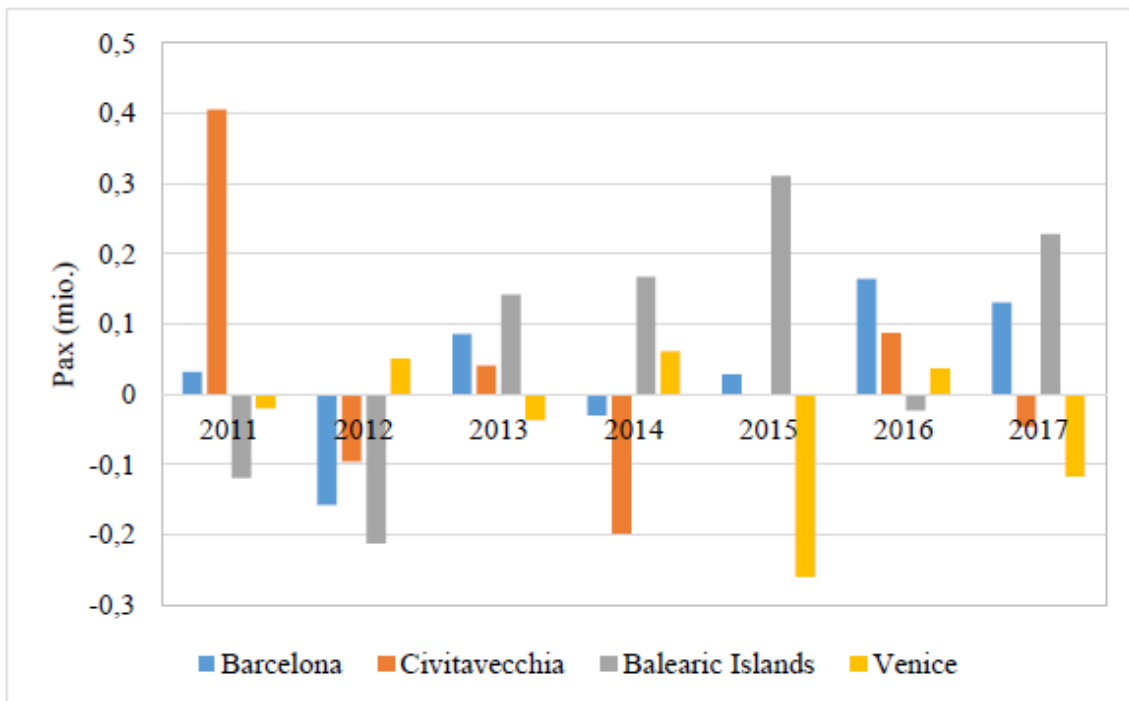
| Pristanišče | Regija | Država | Tržni delež (%) | Shift Pax (v milijonih) | % izgubljenega shift | %SHIFT |
|-------------------------|--------|--------|-----------------|-------------------------|----------------------|--------|
| Malaga | ZM | ESP | 2,01 | -0,21 | -4,5 | -4,99 |
| Dubrovnik | JM | HRV | 3,59 | -0,23 | -5,0 | -3,16 |
| Neapelj | ZM | ITA | 4,65 | -0,27 | -5,9 | -2,88 |
| Ciprska pristanišča | VM | CYP | 0,89 | -0,28 | -6,1 | -15,55 |
| Benetke | JM | ITA | 6,51 | -0,29 | -6,2 | -2,14 |
| Istanbul | VM | TUR | 1,75 | -0,54 | -11,6 | -14,88 |
| Kusadasi/Bodrum/Antalya | VM | TUR | 2,47 | -0,59 | -12,9 | -11,71 |
| Tunizijska pristanišča | ZM | TUN | 1,43 | -0,99 | -21,5 | -36,16 |

Tabela 6. Analiza premika tržnega deleža (shift-share) pristanišč za križarjenja (v milijonih potnikov Pax). Našteta so le pristanišča, ki so v obdobju 2010-2017 pridobila več kot 2 % celotnega tržnega deleža trga križarjenj.

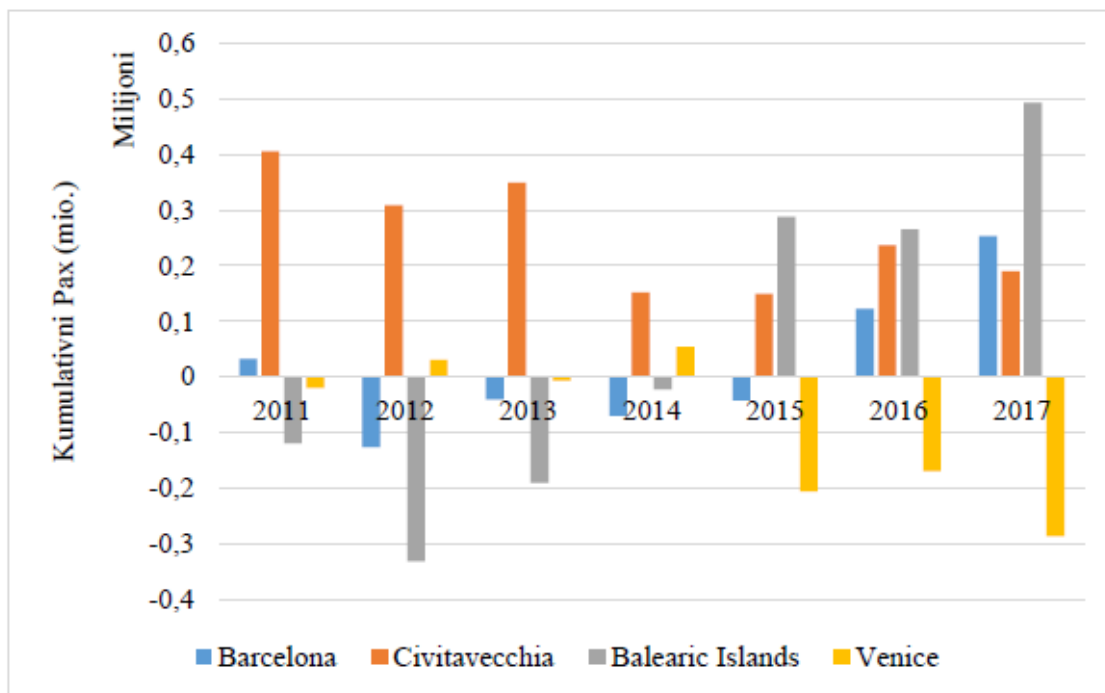
| Pristanišče | Regija | Država | Skupni Pax (v milijonih) | Tržni delež (v %) | Regionalni tržni delež (v %) | % SHIFT | % PROPSFT | % DIFFSFT |
|-------------------------|--------|--------|--------------------------|-------------------|------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Barcelona | ZM | ESP | 17,97 | 9,91 | 14,21 | 1,41 | 1,21 | 0,20 |
| Civitavecchia | ZM | ITA | 16,46 | 8,98 | 12,88 | 1,15 | 1,22 | -0,07 |
| Balearic Islands | ZM | ESP | 12,14 | 6,68 | 9,58 | 4,06 | 1,31 | 2,74 |
| Naples | ZM | ITA | 8,39 | 4,65 | 6,66 | -3,27 | 1,21 | -4,48 |
| Marseille | ZM | FRA | 8,74 | 4,60 | 6,60 | 8,91 | 1,56 | 7,35 |
| Genoava | ZM | ITA | 6,26 | 3,47 | 4,98 | 0,54 | 1,26 | -0,72 |
| Tenerife ports | ZM | ESP | 6,13 | 3,35 | 4,81 | 2,92 | 1,21 | 1,70 |
| Livorno | ZM | ITA | 5,59 | 3,13 | 4,48 | -3,16 | 0,93 | -4,09 |
| French Riviera | ZM | FRA | 4,38 | 2,46 | 3,53 | -0,65 | 1,00 | -1,65 |
| Valletta | ZM | MLT | 4,29 | 2,33 | 3,34 | 5,99 | 1,18 | 4,80 |
| Madeira ports | ZM | PRT | 3,74 | 2,06 | 2,96 | 0,43 | 1,14 | -0,71 |
| Malaga | ZM | ESP | 3,47 | 2,01 | 2,89 | -5,94 | 0,74 | -6,69 |
| Piraeus | EM | GRC | 8,17 | 4,54 | 40,04 | -1,70 | -7,52 | 5,82 |
| Kusadasi/Bodrum/Antalya | EM | TUR | 4,41 | 2,47 | 21,79 | -13,47 | -8,58 | -4,89 |
| Benetke | AS | ITA | 11,73 | 6,51 | 35,06 | -2,44 | 0,49 | -2,93 |
| Dubrovnik | AS | HRV | 6,43 | 3,59 | 19,36 | -3,62 | 0,49 | -4,11 |
| Corfu | AS | GRC | 4,77 | 2,62 | 14,10 | 1,17 | 0,32 | 0,85 |

Slika 13 prikazuje shift-share dinamiko gibanja kumulativnega tržnega deleža štirih največjih pristanišč za križarjenja: Barcelona, Civitavecchia, Balearski otoki in Benetke. Kar zadeva regije, je mogoče opaziti, da delež premika v pristaniščih ni stalen. Kljub temu so Balearski otoki od leta 2012 dalje vsako leto pridobili največje število Pax. Tudi v Barceloni je bil vsako leto zabeležen pozitiven premik. Slika 14 kaže, da so tri pristanišča, Barcelona, Civitavecchia in Balearski otoki, od leta 2015 dalje pridobila največje število potnikov. Rezultati so podobni za

celotno obdobje 2011-2017 (slika 14). Vsa tri pristanišča so povečala število Pax, vendar so Balearski otoki pridobili največje število Pax (skoraj 0,5 milijona potnikov). Benetke pa so izgubile približno 0,3 milijona Pax.



Slika 13. Dinamični premik skupnega števila potnikov v obdobju 2011-2017.



Slika 14. Kumulativni premik skupnega števila potnikov v obdobju 2011-2017.

2.4.3. Konkurenca med pristanišči znotraj posameznih regij

Naj bo $P_{jk,t}$ skupni Pax v pristanišču j v regiji k ob času t . Skupni Pax $P_{k,t}$ v regiji k ob času t je:

$$P_{k,t} = \sum_{j=1}^{n_k} P_{jk,t}. \quad (8)$$

Če uvedemo regionalni tržni delež $MS_{i,t}$, regionalni shar pristanišča $RMS_{jk,t}$ in skupni shar pristanišča $MS_{jk,t}$, dobimo:

$$MS_{i,t} = \frac{P_{i,t}}{P_t} \times 100\%, \quad RMS_{jk,t} = \frac{P_{jk,t}}{P_{k,t}} \times 100\%, \quad MS_{jk,t} = \frac{P_{jk,t}}{P_t} \times 100\%, \quad (9)$$

potem lahko skupno število potnikov Pax na pristanišče razčlenimo na naslednji način [1]:

$$P_{jk,t} = SHARE_{jk,t} + PROSFT_{jk,t} + DIFFSFT_{jk,t}, \quad (10)$$

kjer so:

$$SHARE_{jk,t} \equiv MS_{jk,t-1} \times P_t \quad (11)$$

$$PROSFT_{jk,t} \equiv (RMS_{jk,t-1} MS_{k,t} - MS_{jk,t-1}) \times P_t, \text{ (proporcionalni shift)} \quad (12)$$

$$DIFFSFT_{jk,t} \equiv (RMS_{jk,t} - RMS_{jk,t-1}) \times P_{k,t}, \text{ (diferencialni shift)}. \quad (13)$$

Skupni premik, $SHIFT_{jk,t}$ je v tem primeru:

$$SHIFT_{jk,t} = PROSFT_{jk,t} + DIFFSFT_{jk,t}. \quad (14)$$

Shift in share efekt imata enako razlago kot v prejšnjem poglavju. Proporcionalni shift odraža konkurenčni učinek med regijami. Diferencialni shift pa odraža konkurenčni učinek med pristanišči v regiji. V tabelah 6 in 7 so prikazane relativne vrednosti obeh efektov, kjer smo uporabili naslednji enačbi:

$$\%PROPSFT_{jk,t} = \frac{PROPSFT_{jk,t}}{P_{jk,t}} \times 100\%, \quad \%DIFFSFT_{jk,t} = \frac{DIFFSFT_{jk,t}}{P_{jk,t}} \times 100\%. \quad (15)$$

Kjer $\%PROPSFT_{jk,t}$ daje odstotek razlike proporcionalnega shifta od skupnega Pax v odstotkih na pristanišče, $\%DIFFSFT_{jk,t}$ daje odstotek razlike diferencialnega shifta od skupnega Pax v odstotkih na pristanišče.

Rezultati analize so predstavljeni v tabeli 6. Proporcionalni shift za regijo ZM je pri vseh navedenih pristaniščih pozitiven, kar pomeni, da je regija privlačna. Vendar pa diferencialni shift razkriva morebitno konkurenco med pristanišči znotraj regije. Najuspešnejše pristanišče v regiji ZM je Marseille (7,4 %DIFFSFT), najmanj uspešno pristanišče pa je Malaga (− 6,7 %DIFFSFT). Kar zadeva največji pristanišči v Mediteranu, Barcelono in Civitavecchia, njun premik predstavlja manj kot 1 % njunega skupnega Pax. Nasprotno za Marseille skupni %SHIFT predstavlja skoraj 9 % celotnega njegovega Pax.

Med najpomembnejšimi pristanišči v regiji JM so Benetke, Dubrovnik in Krf, kjer kaže Krf pozitiven diferencialni premik, kar pomeni, da je privlačen, medtem ko ostali dve pristanišči kažeta negativen diferencialni premik, kar pomeni, da sta izgubili potnike in je bil njihov premik v druga pristanišča v regiji. Dubrovnik je izgubil največ prometa (− 4,1 %). Pristanišča v regiji VM kažejo negativni sorazmerni premik, kar kaže na regionalni upad, vendar je med vsemi pristanišči v tej regiji Pirej pokazal največji diferenčni premik (5,8 %), kar pomeni, da je pridobil Pax v primerjavi z drugimi pristanišči v regiji.

Možna regionalna konkurenca ima za posledico razmeroma majhen diferencialni premik za pristanišča na vrhu tabele 7 in velik diferencialni premik za majhna pristanišča. Tabela 7 prikazuje seznam pristanišč, ki so zaradi diferencialnega shifta pridobila več kot 10 % svojega skupnega števila Pax. Med srednje velika pristanišča na seznamu spadata Kotor v Črni gori (regija JM) in La Spezia v Italiji (regija ZM), ki sta pridobila približno 15 % svojega skupnega števila Pax.

Tabela 7. Pristanišča z največjim proporcionalnim shiftom v obdobju 2010-2017.

| Pristanišče | Regija | Država | Skupni Pax
(v milijonih) | Tržni delež
(%) | Regionalni
tržni delež (%) | %
SHIFT | %
PROPSFT | %
DIFFSFT |
|--------------|--------|--------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|------------|--------------|--------------|
| Taranto | JM | ITA | 11 | 0,01 | 0,03 | 79,2 | 0,0 | 79,2 |
| Burgas | ČM | BGR | 64 | 0,03 | 8,77 | 0,0 | -59,9 | 60,0 |
| Tarragona | ZM | ESP | 81 | 0,04 | 0,06 | 59,7 | 1,0 | 58,8 |
| Igoumenitsa | VM | GRC | 30 | 0,01 | 0,13 | 31,7 | -9,1 | 40,8 |
| Sete | ZM | FRA | 143 | 0,07 | 0,10 | 29,9 | 1,3 | 28,7 |
| Zadar | JM | HRV | 486 | 0,25 | 1,33 | 24,9 | -0,1 | 25,0 |
| Souda/Chania | VM | GRC | 817 | 0,40 | 3,56 | 15,8 | -9,1 | 24,9 |
| Ceuta | ZM | ESP | 56 | 0,03 | 0,04 | 23,5 | 1,0 | 22,5 |
| Brindisi | JM | ITA | 315 | 0,17 | 0,90 | 24,4 | 2,5 | 21,9 |
| Huelva | ZM | ESP | 34 | 0,02 | 0,02 | 21,3 | 1,9 | 19,4 |
| Constantza | ČM | ROU | 223 | 0,12 | 33,25 | -9,9 | -28,2 | 18,3 |
| Cagliari | ZM | ITA | 1484 | 0,80 | 1,15 | 18,2 | 1,2 | 16,9 |
| Trst | JM | ITA | 576 | 0,29 | 1,55 | 16,7 | 0,5 | 16,2 |
| Kotor | JM | MNE | 2583 | 1,33 | 7,17 | 15,7 | 0,1 | 15,5 |
| La Spezia | ZM | ITA | 2468 | 1,23 | 1,76 | 16,9 | 2,3 | 14,6 |
| Šibenik | JM | HRV | 128 | 0,07 | 0,37 | 13,0 | 0,1 | 12,9 |
| Mersin | VM | TUR | 4 | 0,00 | 0,02 | -0,5 | -13,2 | 12,7 |
| Cartagena | ZM | ESP | 1020 | 0,55 | 0,79 | 12,7 | 1,4 | 11,3 |
| Varna | ČM | BGR | 52 | 0,03 | 7,99 | -15,7 | -26,1 | 10,4 |

2.5. Model Lotka-Volterra (LVM)

V tem poglavju bomo uporabili Lotka-Volterra model, da bi ugotovili možne odnose med regijami in pristanišči, tj. konkurenti. Uporabljamo avtonomni model LVM v naslednji obliki [36-40]:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_i x_i + \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (i = 1, \dots, n), \quad (16)$$

kjer je n število konkurentov, t je čas, $x_i = x_i(t)$ je Pax konkurenta i v času t , a_i koeficiente rasti, $b_{(ij)}$ pa koeficiente interakcije (sodelovanja). Iz enačbe je razvidno, da pozitivni koeficienti povečujejo stopnjo rasti konkurenta, negativni pa jo zmanjšujejo. Vloga koeficientov interakcije je pojasnjena v tabeli 8.

Tabela 8. Vrste konkurenčnih odnosov med konkurentoma i in j .

| i | j | Vrsta konkurence | Razlaga: |
|---------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| $sgn(b_{ij})$ | $sgn(b_{ji})$ | | |
| + | + | čisto sodelovanje | položaj zmaga-zmaga |
| + | - | konkurenca | j je plen i |
| - | + | konkurenca | i je plen j |
| - | - | čista konkurenca | položaj izguba-izguba |

Ko so koeficienti ocenjeni, lahko izračunamo stacionarno točko, tj. c_j zmogljivost vsakega konkurenta, tako da rešimo c_j iz naslednje enačbe [39]:

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} c_j = -a_i. \quad (17)$$

Če je Pax podan za pretekla časovna obdobja za vsakega tekmovalca, potem formula (17) predstavlja regresijski problem pri oceni neznanih koeficientov. Za rešitev tega problema uporabimo metodo najmanjših kvadratov [40]. Opazimo, da je LVM uporaben za manjše število konkurentov, saj se število neznanih koeficientov povečuje s formulo $n^2 + n$. Ker imamo časovno vrsto za 18 let, lahko v model vključimo največ tri konkurente.

2.6. Logistični model (LM)

V posebnem primeru, ko so vsi interakcijski koeficienti, razen diagonalnega, enaki nič, se lahko LVM zmanjša na niz logističnih enačb:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_i x_i + b_{ii} x_i^2, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (18)$$

Ta enačba ima končno mnogo rešitev določene z logistično funkcijo:

$$x_i = \frac{c_i}{1 + e^{-a_i(t-t_{0,i})}}. \quad (19)$$

Kjer je $t_{0,i}$ integracijska konstanta, $c_i \equiv -\frac{a_i}{b_{ii}}$ pa zmogljivost pristanišča i . Ko je x podan, postane enačba (19)

nelinearni regresijski problem za določitev a_i , c_i in t_0 . Pax, ki ga določa enačba (19), opredelimo kot logistični model (LM).

V nadaljevanju uporabljamo obe regresiji. Za merjenje ustreznosti uporabljamo koeficiente determinacije R^2 , ki meri, kako dobro se vrednosti prilagajajo. Primerjava vrednosti R^2 za LVM in LM bo pokazala, kateri model je boljši. To pomeni, ali obstaja bistvena interakcija med opazovanimi regijami ali pa se te razvijajo neodvisno od drugih konkurentov.

3. Rezultati analize konkurence in sodelovanja LVM in LM z razpravo

3.1. Konkurenca med regijami

Uporabljamo zgodovinske podatke o skupnem številu potnikov za časovno obdobje 2000-2017. Med štirimi regijami smo izključili regijo ČM, ker je njen tržni delež v Mediteranu zanemarljiv. Rezultati izračunov so prikazani na sliki 15. Vrednosti R^2 v tabeli 9 kažejo, da sta obe ujemanji sprejemljivi oz. oba modela tako LVM kot LM sprejemljiva. Prileganje z LVM in LM daje podobne rezultate, vendar LVM za regiji ZM in JM daje nekoliko višjo vrednost R^2 , kar nakazuje, da je med opazovanimi regijami možna interakcija. Iz tabele 9 je razvidno, da metoda LVM predvideva nekoliko večjo zmogljivost regij. Ob upoštevanju LVM in LM lahko ocenimo, da je dolgoročna zmogljivost regije ZM od približno 22 do 27 milijonov Pax na leto, medtem ko je zmogljivost regij JM 5 do 7 milijonov oziroma za VM od približno 3 do 4 milijone Pax na leto.

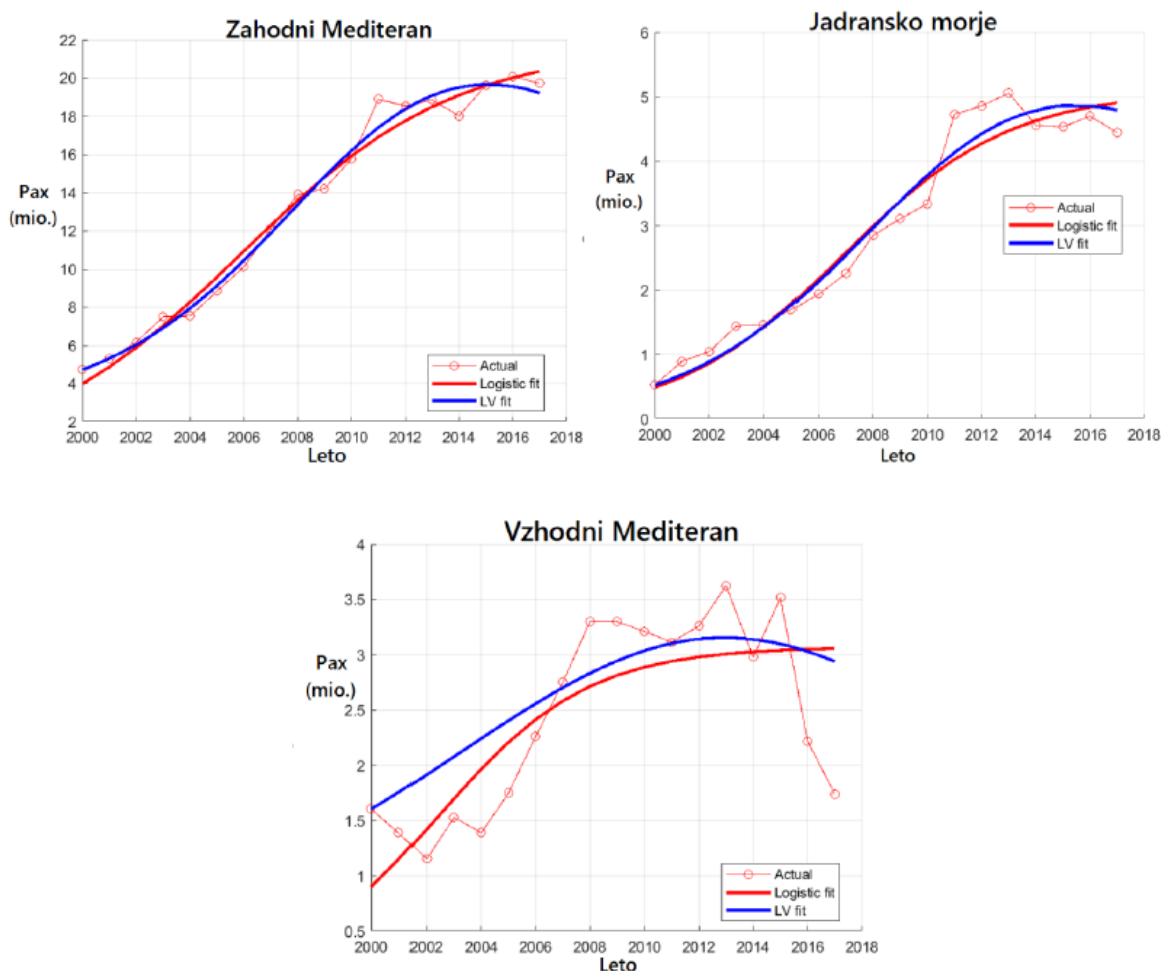
Tabela 9. Razmerja med konkurenco in sodelovanjem LVM med regijami v obdobju 2000-2017.

| | Lotka-Volterra model | | | | Logistični model | | | |
|------------------------|-------------------------------|---------------|-------|------------|-------------------------------|---------------|-------|------------|
| | Zmogljivost Pax (v milijonih) | Stopnja rasti | R^2 | Adj_R^2 | Zmogljivost Pax (v milijonih) | Stopnja rasti | R^2 | Adj_R^2 |
| zahodni Mediteran (ZM) | 26,9 | -0,166 | 0,988 | 0,985 | 21,6 | 0,252 | 0,982 | 0,980 |
| Jadransko morje (JM) | 6,8 | -0,106 | 0,963 | 0,955 | 5,1 | 0,325 | 0,952 | 0,945 |
| vzhodni Mediteran (VM) | 3,9 | -0,141 | 0,589 | 0,501 | 3,1 | 0,363 | 0,597 | 0,582 |

Tabela 10 prikazuje konkurenčno-sodelovalna razmerja med regijami. Regija ZM je v močni konkurenci in tekmuje z regijo JM, medtem ko tesno sodeluje z regijo VM. Po drugi strani pa je interakcija regije JM z regijama VM in ZM zelo omejena. To kaže, da je regija JM avtonomna. Iz tabele 11 je razvidno tudi, da regija VM zelo močno tekmuje z regijo JM. V terminologiji LVM lahko rečemo, da je regija ZM "plen" za regijo JM, medtem ko sta regiji ZM in VM v položaju "zmaga-zmaga".

Tabela 10. Normalizirani parametri interakcije za LVM.

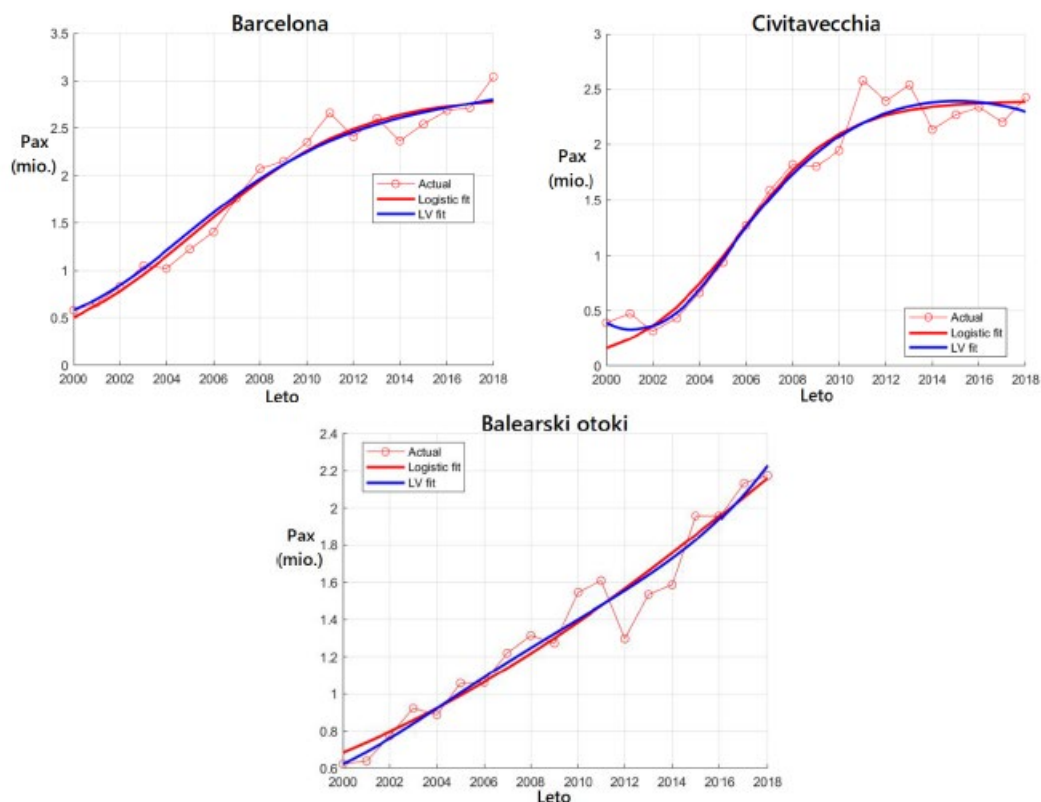
| $i \backslash j$ | | | |
|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| | zahodni Mediteran (ZM) | Jadransko morje (JM) | vzhodni Mediteran (VM) |
| zahodni Mediteran (ZM) | 1 | -5,7 | 4,14 |
| Jadransko morje (JM) | 0,27 | -1 | -0,06 |
| vzhodni Mediteran (VM) | 4,04 | -14,64 | -1 |



Slika 15. Pax (Actual) v različnih regijah z ujemanjem LVM (LV fit) in LM (Logistic fit).

3.2. Konkurenca in sodelovanje med Barcelono, Civitavecchio in Balearskimi otoki

V zadnjih dveh desetletjih so bila najbolj obiskana pristanišča Barcelona, Civitavecchia in Balearski otoki, ki so predstavljala približno 25 % vseh Pax in 35 % skupnega Pax v regiji ZM. Slika 18 prikazuje krivulje Pax posameznega pristanišča z ujemanjem LVM in LM krivuljo. Opazimo, da sta Barcelona in Civitavecchia v fazi zasičenja, medtem ko so Balearski otoki v začetni fazi rasti. Tabela 11 kaže, da so vse regresije sprejemljive, saj imajo vrednosti R^2 večje od 0,9. Ker so vse vrednosti R^2 podobne za LVM in LM, je učinek konkurence med temi pristanišči dvoumen in ga je med modeli težko razločiti. Poleg tega je predvidena dolgoročna zmogljivost pristanišč enaka, 2,6 do 2,9 milijona Pax za Barcelono in 2,4 do 3 milijone Pax za Civitavecchio. Kar zadeva Balearske otoke, se predvidene zmogljivosti bistveno razlikujejo. LVM predvideva, da se bo po začetni fazi rasti njihova zmogljivost zmanjšala na približno 1 milijon Pax, medtem ko LM predvideva končno zmogljivost približno 4,5 milijona Pax. Ker pa gre za dolgoročne napovedi, je treba biti pri njihovem upoštevanju previden.



Slika 16. Krivulje Pax (Actual) pristanišč z ujemanjem LVM (LV fit) in LM (Logistic fit) krivuljo.

Tabela 11. Razmerja med konkurenco in sodelovanjem LVM med pristanišči v obdobju 2000-2017.

| | Lotka-Volterra model | | | | Logistični model | | | |
|-----------------|-------------------------------|---------------|-------|------------|-------------------------------|---------------|-------|------------|
| | Zmogljivost Pax (v milijonih) | Stopnja rasti | R^2 | Adj_R^2 | Zmogljivost Pax (v milijonih) | Stopnja rasti | R^2 | Adj_R^2 |
| Barcelona | 2,62 | 0,233 | 0,968 | 0,962 | 2,855 | 0,289 | 0,970 | 0,966 |
| Civitavecchia | 3,03 | -0,309 | 0,969 | 0,963 | 2,395 | 0,460 | 0,961 | 0,956 |
| Balearski otoki | 0,99 | 0,090 | 0,956 | 0,947 | 4,541 | 0,091 | 0,948 | 0,941 |

Če upoštevamo LVM regresijo, potem je v skladu s tabelo 12, ki prikazuje normalizirane parameter interakcij, Barcelona v močni konkurenci s pristaniščem Balearskimi otoki in zelo močni konkurenci s pristaniščem Civitavecchia. Po drugi strani pa prisotnost Barcelone povečuje stopnjo rasti v pristanišču Civitavecchia. V terminologiji LVM je Barcelona "plen" Civitavecchia in Balearske otoke, medtem ko je Civitavecchia "plenilec" za Barcelono. Z drugimi besedami, vsa pristanišča so v konkurenčnih odnosih.

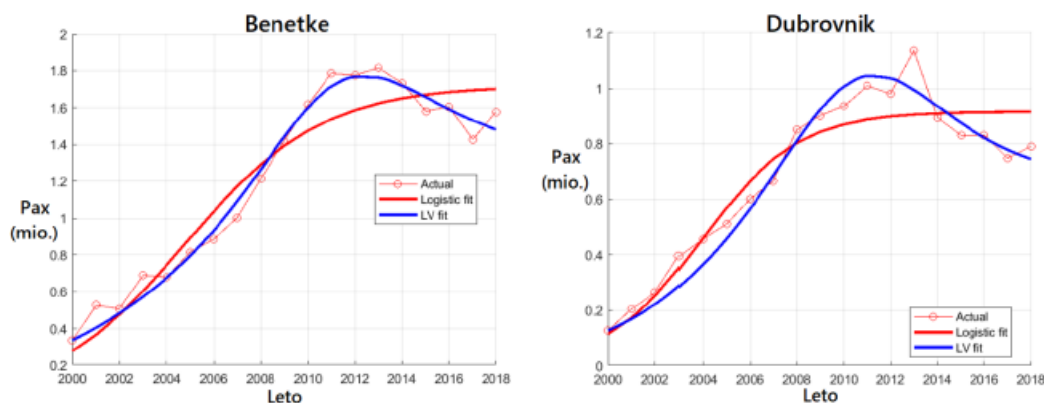
Tabela 12. Normalizirani parametri interakcije za LVM.

| i | j | | |
|-----------------|-----------|---------------|-----------------|
| | Barcelona | Civitavecchia | Balearski otoki |
| Barcelona | 1 | -6,116 | -2,732 |
| Civitavecchia | 1,540 | -1 | -0,831 |
| Balearski otoki | -0,420 | -0,575 | 1 |

3.3. Konkurenca in sodelovanje med dvema glavnima konkurentoma v Jadranskem morju

Rezultati kažejo, da se ključni tržni kazalniki mediteranskih križarjenj zmanjšujejo, kar pomeni, da ocena osnovnih tržnih kazalnikov kaže na upočasnitev trga križarjenj, vendar tržni delež različnih regij ostaja stabilen. To opažanje potrjujeta kazalnika LVM in LM, ki kažeta, da je promet z ladjami za križarjenja v teh regijah v fazi zasičenja. Oglejmo si konkurenco med dvema največjima pristaniščema v regiji JM, Benetkami in Dubrovnikom, ki skupaj obvladujeta več kot 50 % tržnega deleža v regiji. Slika 17 prikazuje krivulje Pax posameznega pristanišča z ujemanjem LVM in LM krivuljo za časovno obdobje 2000-2018. Iz nje je razvidno, da se za razliko od konkurence

med Barcelono, Civitavecchio in Balearskimi otoki v tem primeru LVM in LM bistveno razlikujeta. Tabela 13 razkriva, da ujemanje z LVM daje višjo vrednost R^2 ($>0,95$), kar kaže na soodvisnost med pristanišč. Tabela 14 kaže, da prisotnost Dubrovnika povečuje stopnjo rasti Benetk, prisotnost Benetk pa zmanjšuje stopnjo rasti Dubrovnika. V terminologiji LVM je Dubrovnik "plen" za pristanišče Benetke. Ocenjena zmogljivost Benetk znaša približno 1,4 milijona Pax in za Dubrovnik 0,7 milijona Pax. LM daje vrednosti R^2 , ki so za približno 20 % višje v primerjavi z vrednosti LVM.



Slika 17. Krivulje Pax (Actual) pristanišč z ujemanjem LVM (LV fit) in LM (Logistic fit) krivuljo.

Tabela 13. Razmerja med konkurenco in sodelovanjem LVM med pristanišči v obdobju 2000-2017.

| | Lotka-Volterra model | | | | Logistični model | | | |
|-----------|----------------------------------|------------------|-------|------------|----------------------------------|------------------|-------|------------|
| | Zmogljivost Pax
(v milijonih) | Stopnja
rasti | R^2 | $Adj. R^2$ | Zmogljivost Pax
(v milijonih) | Stopnja
rasti | R^2 | $Adj. R^2$ |
| Benetke | 1,399 | 0,294 | 0,983 | 0,981 | 1,720 | 0,344 | 0,920 | 0,910 |
| Dubrovnik | 0,722 | 0,433 | 0,957 | 0,951 | 0,916 | 0,489 | 0,896 | 0,883 |

Tabela 14. Normalizirani parametri interakcije za LVM.

| | | j | |
|-----|-----------|---------|-----------|
| | | Benetke | Dubrovnik |
| i | Benetke | -1 | 1,236 |
| | Dubrovnik | -0.965 | 1 |

Z dolgoročno oceno Pax z uporabo LVM in LM smo ugotovili, da bo v prihodnosti, če bodo zunanji pogoji ostali enaki, regija ZM predstavljala približno 72 % celotnega prometa Pax, medtem ko bo regija JM predstavljala 18 %, regija VM pa 10 % celotnega Pax. Ko smo primerjali največja pristanišča za križarjenje v Mediteranu (Barcelona, Civitavecchia in Balearski otoki), smo ugotovili, da so vsa pristanišča v konkurenčnem odnosu, pri čemer je Barcelona v močni konkurenci z Balearskimi otoki in v še večji konkurenci s pristaniščem Civitavecchia. Čeprav so razmere v JM drugačne, podatki kažejo, da prisotnost Dubrovnika povečuje stopnjo rasti Benetk, prisotnost Benetk pa zmanjšuje stopnjo rasti Dubrovnika. V terminologiji LVM Dubrovnik deluje kot "plen" za pristanišče Benetke.

4. Sklep

V obdobju 2000-2017 je bil Mediteran druga najbolj priljubljena destinacija za karibsko regijo [24], s skupno 25,2 milijona potnikov [29] v letu 2017. V tej študiji smo preučevali konkurenčno-sodelovalna razmerja med pristanišči in regijami na trgu križarjenj v Mediteranu.

Sektor križarjenj je vse pomembnejši del turizma v mediteranskih državah, kjer pristanišča (pa tudi regije) tekmujejo med seboj. Zato smo modelirali oceno prometa z ladjami za križarjenja na tem območju. Poskušali smo ugotoviti možnosti za sodelovanje in konkurenco na trgu križarjenj. Opravljene analize so pokazale, kako se bo ta trg obnašal v prihodnjih letih, ali obstajajo priložnosti za razvoj obstoječih pristanišč in kje je koncentracija že tako velika, da lahko pričakujemo spremembe. Za poglobljeno analizo odnosov med pristanišči smo pristanišča razdelili na štiri regije: zahodni Mediteran (ZM), vzhodni Mediteran (VM), Jadransko morje (JM) in Črno morje (ČM) [18]. Ker je regija ZM vključno s pristanišči Barcelona, Civitavecchia, Marseille in Balearski otoki) najpomembnejša regija v Mediteranu z 71 % tržnim deležem, je bilo zelo težko primerjati promet s številom Pax med to regijo in drugimi. Če pogledamo trg kot celoto, lahko rečemo, da je zmerno koncentriran (približno 21 % pristanišč prejme 70 % Pax Mediterana). To velja tudi za regiji ZM in JM, vendar ne za regijo VM, ki postaja zelo koncentrirana.

Z izvedbo shift-share analize je bilo prikazano, da shift Pax močno vpliva na majhna pristanišča za križarjenja in ne toliko na velika pristanišča. Tako so zaradi premika shift Pax pristanišča na vrhu razvrstilnega seznama pridobila le nekaj več kot 1 % svojega celotnega Pax prometa. Vendar je to moč pripisati naključnim nihanjem vrednosti Pax in ne toliko interakcijam med pristanišči.

Ker LVM in LM dajeta podobne rezultate, se je težko odločiti, ali se regije ali pristanišča razvijajo avtonomno ali v interakciji. Izjema je interakcija med Benetkami in Dubrovnikom, saj LVM razkriva močno konkurenco med njima. Zato lahko sklepamo, da so med letoma 2000 in 2017 med mediteranskimi pristanišči za križarjenje obstajala konkurenčno-sodelovalna razmerja in da lahko podobno stanje pričakujemo tudi v naslednjem letu, če se na trgu ne bo zgodilo nič pomembnega. Pristanišča se med seboj potrebujejo zaradi poti, ki so hrbtenica pomorske industrije; zato med njimi obstajajo zapleteni sodelovalno-konkurenčni odnosi [24].

Trg križarjenj in razmere v pristaniščih za križarjenja se bodo spremenili zaradi nove zakonodaje (Benetke), ki bo največje ladje za križarjenja preusmerila v druga pristanišča. Morda bodo nove destinacije vse bolj privlačne (kot se je lani zgodilo v Zadru, pred tem pa tudi v Kotorju) in te spremembe bodo zanimive za prihodnje raziskovalno delo.

Viri in literatura

1. Brida, J.G.; Aguirre, S. Cruise Tourism: Economic, Socio-Cultural and Environmental Impacts. *Int. J. Leis. Tour. Mark.* 2009, *1*, 205–226.
2. Lekakou, M.; Pallis, A.; Vaggelas, G. Which homeport in Europe: The cruise industry's selection criteria. *Tour. Int. Multidiscip. J. Tour.* 2009, *4*, 215–240.
3. Soriani, S.; Bertazzon, S.; Cesare, F.D.; Rech, G. Cruising in the Mediterranean: Structural aspects and evolutionary trends. *Marit. Policy Manag.* 2009, *36*, 235–251.
4. Pallis, A. Cruise Shipping and Urban Development: State of the Art of the Industry and Cruise Ports; *International Transport Forum Discussion Papers (No. 2015-14)* OECD Publishing: Chios, Greece, 2015.
5. Rodrigue, J.-P.; Notteboom, T. The Cruise Industry. In *The Geography of Transport Systems*, 3rd ed.; Rodrigue, J.-P., Ed.; Publisher: Routledge, New York, USA, 2017.
6. Asero, V.; Skonieczny, S. Cruise Tourism and Sustainability in the Mediterranean. Destination Venice. In *Mobilities, Tourism and Travel Behavior—Contexts and Boundaries*; Butowski, L., Ed.; Publisher: IntechOpen, London, UK, 2018.
7. Dowling, R.K., Ed.; *Cruise Ship Tourism*, 2nd ed.; Publisher: CAB International, UK, 2017.
8. González, A. Venice: The problem of overtourism and the impact of cruises. *Investig. Reg.* 2018, *2018*, 35–51.
9. Rosa-Jiménez, C.; Perea-Medina, B.; Andrade, M.J.; Nebot, N. An examination of the territorial imbalance of the cruising activity in the main Mediterranean port destinations: Effects on sustainable transport. *J. Transp. Geogr.* 2018, *68*, 94–101.
10. Johnson, D. Environmentally sustainable cruise tourism: A reality check. *Mar. Policy* 2002, *26*, 261–270.
11. Butt, N. The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: A study of Southampton. *Mar. Policy* 2007, *31*, 591–598.
12. Tzannatos, E. Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus—Greece. *Atmos. Environ.* 2010, *44*, 400–407.
13. Carić, H.; Mackelworth, P. Cruise tourism environmental impacts – The perspective from the Adriatic Sea. *Ocean Coast. Manag.* 2014, *102*, 350–363.
14. Pallis, A.; Papachristou, A.; Platias, C. Environmental policies and practices in Cruise Ports: Waste reception facilities in the Med. *SPOUDAI J. Econ. Bus.* 2017, *67*, 54–70.
15. Pallis, A.; Vaggelas, G. Chapter 13 - Cruise Shipping and Green Ports: A strategic Challenge. In *Green Ports. Inland and Seaside Sustainable Transportation Strategies*, Bergqvist R., Monios J., Eds., Publisher: Elsevier, 2019; pp. 255–273.
16. Paiano, A.; Crovella, T.; Lagioia, G. Managing sustainable practices in cruise tourism: The assessment of carbon footprint and waste of water and beverage packaging. *Tour. Manag.* 2020, *77*, 104016.
17. Rodrigue, J.-P.; Notteboom, T. The geography of cruise shipping: Itineraries, capacity deployment and ports of call. In *Proceedings of the Atti Della IAME 2012 Conference*, Taipei, Taiwan, 14–15 June 2012; pp. 6–8.
18. Rodrigue, J.-P.; Notteboom, T. The geography of cruises: Itineraries, not destinations. *Appl. Geogr.* 2013, *38*, 31–42.
19. Tsiotas, D.; Niavis, S.; Sdrolas, L. Operational and geographical dynamics of ports in the topology of cruise networks: The case of Mediterranean. *J. Transp. Geogr.* 2018, *72*, 23–35.
20. Marti, B.E. Shift-share analysis and port geography: A New England example. *Marit. Policy Manag.* 1982, *9*, 241–250.
21. Notteboom, T.E. Concentration and load centre development in the European container port system. *J. Transp. Geogr.* 1997, *5*, 99–115.
22. Jeronimo, E.-P.; Antonio, G.-S. Dynamism Patterns of Western Mediterranean Cruise Ports and the Coopetition Relationships Between Major Cruise Ports. *Pol. Marit. Res.* 2018, *25*, 51–60.
23. Castillo-Manzano, J.I.; Fageda, X.; Gonzalez-Laxe, F. An analysis of the determinants of cruise traffic: An empirical application to the Spanish port system. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 2014, *66*, 115–125.
24. Esteve-Perez, J.A. Garcia-Sanchez, and A. Muñoz-Paupie, Cruise Traffic Seasonality Patterns in the Western Mediterranean and the Adriatic Sea: A Challenge to Port Operators. *Coast. Manag.* 2019, *47*, 362–386.
25. Zhang, N.; Miao, R.; Huang, H.; Chan, E.Y. Contact infection of infectious disease onboard a cruise ship. *Sci. Rep.* 2016, *6*, 38790.
26. Klein, R.; Lück, M.; Poulston, J. Passengers and Risk: Health, Wellbeing, and Liability. In *Cruise Ship Tourism*, 2nd ed.; Dowling, R.K., Ed.; Publisher: CAB International, UK, 2017; pp. 106–123.
27. Marti, B.E. Cruise ship market segmentation: A 'non-traditional' port case study. *Marit. Policy Manag.* 1991, *18*, 93–103.

28. Pallis, A.; Arapi, K.P. A multi-port cruise region: Dynamics and hierarchies in the Med. *Tourismos* 2016, *11*, 168–201.
29. MedCruise. 2018. Available online: <http://www.medcruise.com/> (accessed on 11 July 2018).
30. CLIA, Reports—Cruise Industry Outlook, State of the industry; Publisher: Cruise Lines International Association, Available online: <https://cruising.org/news-and-research/research> (accessed on 6. February 2020).
31. Esteban-Marquillas, J.M. I. A reinterpretation of shift-share analysis. *Reg. Urban Econ.* 1972, *2*, 249–255.
32. Farris, P. *Key Marketing Metrics: The 50+ Metrics Every Manager Needs to Know*; Financial Times Prentice Hall: Harlow, UK, 2009; p. 353.
33. *MedCruise, Cruise Activities in MedCruise Ports: Statistics, in (Statistics 2013, 2014, 2015, 2016, 2017)*; Available online: <https://www.medcruise.com/> (accessed on 15. January 2020).
34. Notteboom, T.E. Concentration and the formation of multi-port gateway regions in the European container port system: An update. *J. Transp. Geogr.* 2010, *18*, 567–583.
35. Twrdy, E.; Batista, M. Assessment of Cooperation and Competition Among Container Ports in the Northern Adriatic, In *Dynamics in Logistics: Proceedings of the 6th International Conference LDIC 2018*, Bremen, Germany; Freitag M., Kotzab H., Pannek J., Eds.; Publisher: Springer International Publishing 2018; pp. 231–242.
36. Chukwu, E.N. A mathematical treatment of economic cooperation and competition among nations: With Nigeria, USA, UK, China and Middle East examples. In *Mathematics in Science and Engineering*, 1st ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2005; p. 37.
37. Lee, S.J.; Lee, D.J.; Oh, H.S. Technological forecasting at the Korean stock market: A dynamic competition analysis using Lotka-Volterra model. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2005, *72*, 1044–1057.
38. Marasco, A.; Romano, A. Inter-port interactions in the Le Havre-Hamburg range: A scenario analysis using a nonautonomous Lotka Volterra model. *J. Transp. Geogr.* 2018, *69*, 207–220.
39. Takeuchi, Y. *Global Dynamical Properties of Lotka-Volterra Systems*; World Scientific: Singapore, 1996; p. 316.
40. Twrdy, E.; Batista, M. Modeling of container throughput in Northern Adriatic ports over the period 1990–2013. *J. Transp. Geogr.* 2016, *52*, 131–142.

Večparametrski odločitveni model izogibanja trčenju plovil: pristop z mehko logiko

Tanja Brcko, Andrej Androjna, Jure Srše, Renata Boć

Prevod dela: Vessel multi-parametric collision avoidance decision model: fuzzy approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9010049>

Povzetek: Uporaba mehke logike je učinkovit pristop v različnih okoliščinah, vključno z reševanjem situacij izogibanja trčenju na morju. Prispevek predstavlja nadgradnjo radarskega navigacijskega sistema, zlasti orodja za načrtovanje izogibanja trčenju, z uporabo odločitvenega modela, ki združuje dinamične parametre v eno odločitev – kurz izogibanja trčenja. V tem prispevku je predlagan večparametrski odločitveni model, ki temelji na mehki logiki. Model izračuna spremembo kurza v primeru izogibanja trčenju. Najprej model zbere vhodne podatke opazovanega plovila in oceni tveganje trčenja. Z uporabo časovnega zamika se izračunajo štirje parametri za nadaljnjo obdelavo kot vhodne spremenljivke za mehki inferenčni sistem. Nato se metoda mehke logike uporabi za izračun spremembe kurza, ki upošteva varno domeno plovila in mednarodna pravila o izogibanju trčenju na morju (International Regulations for Preventing Collisions at Sea - COLREGs). Posebnost odločitvenega modela je njegovo uglasovanje z rezultati podatkovne baze pravilnih rešitev, pridobljenih z ročno metodo radarskega vrisovanja. Validacija je bila izvedena s šestimi izbranimi primeri, ki simulirajo srečanja z opazovanim plovilom na odprtem morju iz različnih smeri in ob poljubni vidljivosti. Rezultati študij primerov so pokazali, da so odločitve modela ustrezne v primerih, ko je lastno plovilo v položaju brez prednosti. Poleg tega model zagotavlja dobre rezultate v primerih, ko opazovano plovilo krši pravila COLREGs. Orodje za načrtovanje izogibanja trčenju je mogoče avtomatizirati in služi kot podlaga za nadgradnjo modela, ki upošteva manevrske sposobnosti plovil, vremenske razmere in situacije srečanja z več plovili.

Ključne besede: mehka logika; model odločanja; COLREGs; izogibanje trčenju

1. Uvod

Sprejemanje odločitev in odzivnost sta glavni dejavnosti navigatorja pri izogibanju trčenju na morju. Zaradi manjšega števila članov posadke na mostu se je povečala količina informacij na osebo, kar dodatno obremenjuje proces odločanja. Na odločitve vplivajo tudi prometne razmere, vremenske razmere in ne nazadnje navigatorjeve izkušnje. Izogibanje plovilu dodatno posebnost, saj ima navigator obsežno znanje o svojem plovilu in omejene informacije o plovilih v bližini, kar pomeni, da se odloča v negotovem okolju [1]. Avtomatizacija navigacijskih naprav je prinesla nov pristop k pomorski varnosti in hkrati spremenila naravo človeške napake [2]. Bistveni kognitivni vidik problema avtomatizacije je: kako človeški možgani obdelujejo določene informacije? Koliko podatkov je človek sposoben sprejeti naenkrat? Kako naj se informacije prikažejo, da jih bo človek lahko sprejel v pravilni obliki in jih uporabil za nadaljnje odločanje?

K izboljšanju pomorske varnosti v sedemdesetih letih 20. stoletja je prispevala predvsem nadgradnja navigacijskih radarjev s pripomočkom samodejnega radarskega vrisovanja (Automatic Radar Plotting Aid - ARPA), ki je bil podporno orodje za odločanje o izogibanju trčenju na morju. Predvsem je skrajšal čas ocenjevanja tveganja trčenja in povečal situacijsko zavedanje navigatorja. Čeprav ARPA radar vsebuje veliko informacij o plovilih na opazovanem območju in orodje za simulacijo izogibanja trčenju z možnostjo časovnega zamika (Trial Manoeuvre), obstajajo standardne omejitve in napake, ki jih imajo radarji, zlasti glede časa obdelave sprejetega signala [3]. V skladu z zahtevami Mednarodne pomorske organizacije (International Maritime Organization - IMO) mora ARPA radar v eni minuti s 95 % natančnostjo prikazati relativno gibanje opazovanega plovila (relativni kurz in hitrost) in razdaljo do najbližje točke srečanja (Distance to Closest Point of Approach - DCPA) z opazovanim plovilom; v treh minutah zabeležiti splošno gibanje opazovanega plovila - relativni in pravi kurz, relativno in pravo hitrost, DCPA ter čas do najbližje točke srečanja (Time to Closest Point of Approach TCPA). Zato je priporočljivo uporabiti te podatke z naprave avtomatskega sistema identifikacije ladij (Automatic Identification System - AIS), saj se v povprečju posodablja vsakih 30 sekund (odvisno od hitrosti in spremembe kurza plovila). Tako ARPA radar kot AIS sta trenutno vključena v napravo za elektronski prikaz navigacijskih kart in informacijski sistem (Electronic Chart Display and Information System - ECDIS), zato ima navigator na voljo veliko informacij na enem samem zaslonu. Vendar orodje Trial Manoeuvre še vedno zahteva ročne prilagoditve, kar posledično pomeni podaljšanje časa odločanja v razmerah, ki zahtevajo dinamično sprejemanje odločitev. Prav tako v samem sistemu ni integriranih COLREGs pravil, njihova uporaba pa je prepuščena znanju osebe, ki krmili plovilo.

Da bi razbremenili navigatorja od preobilice informacij, ki jih prinaša današnja tehnologija, ki se uporablja na plovilih, je IMO leta 2009 izdala Strategijo za razvoj in izvajanje e-navigacije (MSC85-Report, prilogi 20 in 21). Cilj razvoja e-navigacije je izboljšati pomorsko varnost s strukturiranim povezovanjem obstoječih in novih navigacijskih naprav, poenostavitvijo postopkov za preprečevanje preobremenjenosti z informacijami in povečanje varnosti z združevanjem informacij v tiste, ki so za navigatorja resnično pomembne [4]. Naloga navigacijskega

odločitvenega sistema je poleg funkcije informiranja tudi zagotavljanje rešitev - določanje varnih trajektorij plovil v procesu izogibanja trčenju. Sistemi odločanja so sestavljeni iz več komponent, vključno s komponentami za oceno tveganja trčenja in izračun manevra izogibanja. Kvantitativne metode za izračun tveganja trčenja lahko vključujejo predvsem izračun najbližje točke srečanja (Closest Point of Approach - CPA), ki je prvi kazalnik možnosti trčenja ali vstopa v varno domeno plovila. Varna domena plovila je morsko območje okoli plovila, ki mora ostati prosto drugih plovil in fiksnih naprav. V nekaterih ARPA radarjih je mogoče najti tudi metodo »predvidenega področja nevarnosti« (Predicted Area of Danger - PAD) za prikaz ocene trčenja, ki za razliko od metode CPA upošteva tudi dimenzije obeh plovil, kurz in hitrost [5, 6]. V zgodnjem razvoju področja varne domene plovil so prevladovala ovalne in eliptične oblike, ki so bile ustvarjene s statističnimi in analitičnimi metodami. V zadnjem času pa najdemo modele, ki se dinamično spreminjajo glede na različne navigacijske razmere: velikost plovila, gostoto prometa, relativno hitrost, vrsto navigacijske situacije, vremenske razmere, vidljivost itd. [7, 8]. Po Cockcroftu [9] velikosti domene plovila ni mogoče količinsko opredeliti, vendar naj bi bila pri poslabšani vidljivosti omejena na 2 navtični milji (M). Vendar je lahko manjša pri nizkih hitrostih ob gostem prometu, v položaju prehitevanja ali kadar se pričakuje, da bo opazovano plovilo priplulo po krmi. V praksi to območje subjektivno določi navigator ali pa ga določi ladjar ali druga odgovorna oseba/institucija. Če obstaja nevarnost, da bo drugo plovilo vstopilo v varno domeno lastnega plovila, je treba v skladu s pravili COLREGs izvesti ustrezen manever za izogibanje trčenju.

Z razvojem sistemov za preprečevanje trčenja na morju se ukvarjajo številni raziskovalci. Modele raziskav lahko razdelimo v tri glavne kategorije: matematične modele in algoritme, mehko računanje (evolucijski algoritmi, nevronske mreže, mehka logika in ekspertni sistemi) ter kombinacijo vseh - hibridni navigacijski sistemi [10]. Odločitveni model, ki na podlagi mehke logike določa ustrezen manever za izogibanje trčenju, je uvedlo več avtorjev, med njimi Perera [6], ki je osvetlil predvsem razmere, ki se pojavljajo na odprtem morju, ko je plovilo v tveganem položaju glede na drugo plovilo in mora izvesti manever izogibanja trčenju. Simulacija je bila preizkušena z orodjem MATLAB Fuzzy Logic Toolbox z uporabo Mamdani mehkega inferenčnega sistema. Pri določanju pravil (skupaj 144 pravil) je avtor določil pet vhodnih parametrov: območje, kjer je opazovano plovilo; relativni kurz opazovanega plovila; stopnjo tveganja srečanja; razdaljo do opazovanega plovila in relativno hitrost približevanja. Na podlagi teh parametrov se je model odločil, ali je treba spremeniti smer ali hitrost na podlagi COLREGs pravil 13, 14 in 15. V naslednjem prispevku [11] so poskušali rešiti izziv izogibanja več plovilom s kombinacijo mehke logike in grafičnega verjetnostnega modela - Bayesovih mrež. Kasneje so za iskanje ustreznega manevra izogibanja uporabili manj vhodnih parametrov: razdaljo do opazovanega plovila, azimut, relativni kurz in hitrost približevanja [12]. Izbiro navigacijske strategije v shemi ločene plovbe z uporabo odločitvenega modela, ki temelji na algoritmu mehke logike, je predlagal Wu [13], ki je analiziral dinamične značilnosti navigacijskega procesa. S podobnim pristopom mehke logike je bilo izračunano tveganje trka s statičnimi in premikajočimi se objekti [14, 15]. Zhuo in dr. [16] so v svojem modelu izračunali čas začetka manevra s spremembo smeri za 30° glede na opazovano plovilo, ki se nahaja na razdalji 0,8 M. Podoben pristop k izogibanju trčenju so uporabili Su in dr. [17], ki so izračunali položaj lastnega plovila za začetek izogibanja pri različnih odklonih krmila. Poskus iskanja optimalne poti izogibanja je predstavil Pietrzykowski [18], kjer je bila za gibanje plovila uporabljena metoda optimalnega nadzora: večstopenjski mehki nadzor v kombinaciji z Dijkstrovim algoritmom za določitev najkrajše poti. Liu [19] je s kombinacijo mehke logike in nevronske mreže izračunal smer in velikost lastne spremembe smeri plovila ter čas začetka spremembe. Pri tem je uporabil vhodne parametre z različnimi navigacijskimi situacijami (COLREGs pravila 13, 14 in 15) ter razmerje hitrosti med lastnim in opazovanim plovilom. Trajektorija plovila v situacijah izogibanja trčenju je bila podlaga tudi za raziskavo Szłapczyńskiego [20], ki je uporabil tehniko evolucijskih algoritmov, ki navigatorju omogočajo predvideti trajektorijo opazovanega plovila in tako načrtovati njegov manever. Na prometno obremenjenem območju bi ta metoda operaterju sistema za nadzor plovbe (Vessel Traffic System - VTS) med drugim omogočila usklajevanje gibanja vseh plovil. Kompleksnejše hibridne sisteme za avtonomno navigacijo sta predstavila Lee in dr. [21] ter Hu [22]. Poleg uporabe mehke logike sta uvedla virtualno polje sil (VFF), znano na področju mobilne robotike.

V tem prispevku je predlagan model odločanja za izogibanje trčenju, ki temelji na mehki logiki in računa spremembo kurza lastnega plovila s pomočjo štirih parametrov. Model je nadgradnja trenutnega orodja Trial Manoeuvre v radarju ARPA, ki se uporablja za načrtovanje manevrov izogibanja trčenju. Struktura modela in sistem, ki temelji na pravilih, sta zgrajena z uporabo baze pravilnih rešitev, pridobljenih z ročno metodo radarskega vrisovanja. To predstavlja nov pristop pri določanju mehkih parametrov in pravil. Poleg tega sta v modelu upoštevana dva pomembna segmenta izogibanja trčenju:

- smer izogibanja (v skladu s COLREGs praviloma 8 in 19) in
- najmanjša sprememba kurza (v skladu s COLREGs pravilom 8).

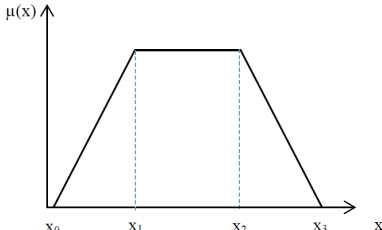
Kakovost izvedbe manevra izogibanja torej ni odvisna le od doseganja varne razdalje za mimohod plovil, temveč tudi od postopka manevriranja.

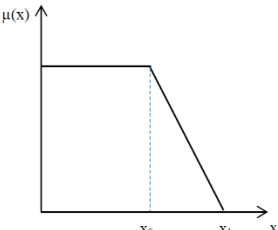
Prispevek je strukturiran na naslednji način. V poglavju 2 je na kratko predstavljena metodologija mehke logike; v poglavju 3 je opisana zasnova odločitvenega modela v dveh korakih, kar predstavlja tudi izvirnost te študije. Vsak korak je podrobneje opisan v podpoglavjih, ki opredeljujejo vhodne parametre, mehki inferenčni sistem z njegovimi mehki pravili in izhodno odločitvijo modela. V poglavju 4 je predstavljenih šest izbranih študij primerov, ki simulirajo različna srečanja v različnih navigacijskih situacijah. V poglavju 5 sledi diskusija študijskih primerov ter zaključek.

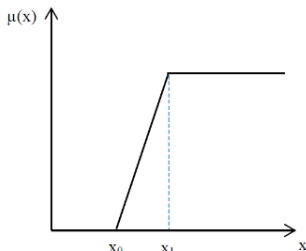
2. Metodologija mehke logike

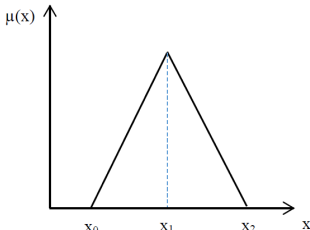
V pregledu literature je bilo predstavljenih več metod računanja manevra izogibanja trčenju. Predlagani odločitveni model uporablja mehko logiko, ki spada med tehnike umetne inteligence. Prednost mehke logike je, da se lahko odločitve sprejemajo na podlagi netočnih podatkov, ki jih ni mogoče opisati z matematičnim zapisom, saj so izraženi z besedami. Zadeh [23] je utemeljeval numerične metode mehke logike s trditvijo, da ljudje zaznavajo dogodke v svojem okolju nenatančno in brez natančnega zakona porazdelitve. Mehka logika tako posnema človeški način razmišljanja, ki lahko rešuje kompleksne naloge, ki lahko vsebujejo tudi veliko negotovosti. Druga prednost uporabe mehke logike za odločitveni model sta njena preprosta uporaba in preglednost, ki sta bili dve bistveni lastnosti pri izbiri te tehnike. Mehko računanje se je izkazalo za zelo razširjeno tehniko tudi na drugih področjih prometa; nekaj takih primerov je navedel Teodorović [24]: reševanje težave usmerjanja vozil, izbira poti ali optimizacija voznega reda v različnih prometnih panogah, regulacija semaforjev itd.

Mehki inferenčni sistem (Fuzzy Inference System -FIS) je postopek oblikovanja preslikave med danim vhomod in izhodom z uporabo mehke logike. Je eden od glavnih elementov sistema mehke logike. Vrsta FIS v tem prispevku je Mamdani mehki inferenčni sistem. Uporaba pravil IF-THEN je organizirana z operatorjema "AND (min)" in "OR (max)". Zato so osnovne naloge mehko inferenčnega sistema mehčanje ostrih vrednosti, mehko sklepanje in ostrenje mehkih vrednosti. Mehčanje ostrih vrednosti je postopek, pri katerem se vhodni podatki uvrstijo v ustrezno množico, ki je hkrati jezikovna spremenljivka, in določi se jim stopnja pripadnosti. Teorija matematične logike predpostavlja le pravilne in nepravilne izjave; v mehki logiki pa element pripada množici z določeno stopnjo pripadnosti (μ_x). Mehke množice imajo različne oblike; v literaturi se pogosto uporabljata trikotnik in trapez, ki sta predstavljena z matematičnim zapisom:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0; \\ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, & x_0 \leq x < x_1; \\ 1, & x_1 \leq x \leq x_2; \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, & x_2 < x \leq x_3; \\ 0, & x \geq x_3. \end{cases} \quad (1)$$


$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < x_0; \\ \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}, & x_0 \leq x \leq x_1; \\ 0, & x > x_1. \end{cases} \quad (2)$$


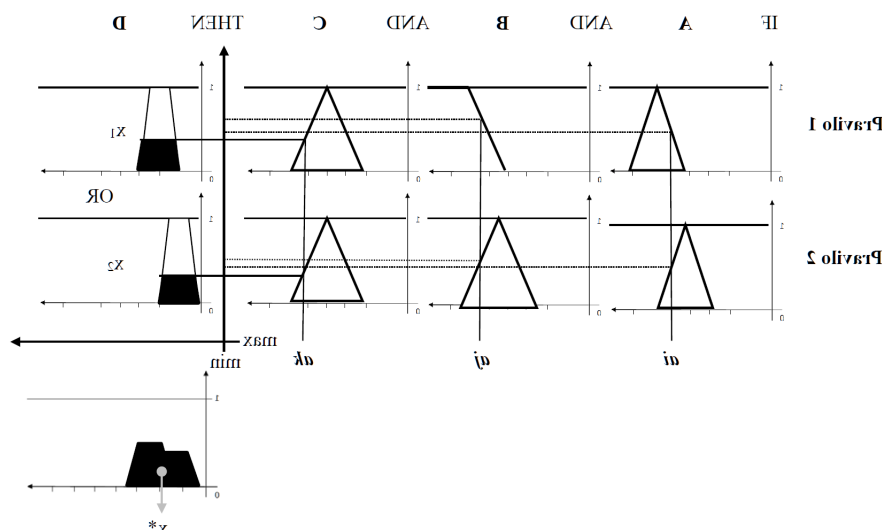
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < x_0; \\ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, & x_0 \leq x \leq x_1; \\ 1, & x > x_1. \end{cases} \quad (3)$$


$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}, & x_0 \leq x \leq x_1; \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, & x_1 < x \leq x_2; \\ 0, & x < x_0 \text{ ali } x > x_2 \end{cases} \quad (4)$$


Mehko sklepanje ali postopek preslikave vhodnih podatkov v izhodno odločitev se izvaja na podlagi pravil, ki jih tvorijo pogojni stavki IF-THEN. Ostrenje mehkih vrednosti je zadnji korak v FIS-u in je pretvorba mehkih izhodnih

količin v ostro izhodno količino. Za vsako enoto vhodnih in izhodnih podatkov se določi stopnja pripadnosti ustrezni mehki množici. Običajna preslikava je več vhodov na en izhod, lahko pa je tudi več izhodov. Večje kot je njihovo število, večje je število mehkih pravil v sistemu, kar žal vpliva tudi na njegovo preglednost. Odločitveni model uporablja Mamdani mehko inferenčni sistem. Značilnost tega tipa je, da so tako vhodi kot izhodi interpretirani z jezikovnimi spremenljivkami, povezanimi z mehkim operatorjema "min" in "max". Vrednost jezikovne spremenljivke se imenuje tudi mehka vrednost, ki opisuje pripadnost določeni mehki množici [25]. Mehki logični operatorji so opredeljeni na naslednji način:

- AND ("min") – mehek presek ali povezava,
- OR ("max") - mehka unija ali disjunkcija,
- NOT – mehki komplement.



Slika 1. Grafična interpretacija Mamdani mehkega inferenčnega sistema [26].

Funkcija pripadnosti izhodnega podatka D ima obliko (slika 1):

$$\mu_D(x) = \max_n \{ \min [\mu_{A_n}(a_i), \mu_{B_n}(a_j), \mu_{C_n}(a_k)] \}, n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (5)$$

kar pomeni, da se vhodni podatki med seboj združujejo s funkcijo »min«,

$$\mu_{A \cap B \cap C}(x) = \min [\mu_A(a_i), \mu_B(a_j), \mu_C(a_k)] \quad (6)$$

izhodni podatki pa se med seboj združujejo s funkcijo »max«.

$$\mu_D(x) = \max [\mu_D(x_1), \mu_D(x_2), \dots, \mu_D(x_n)] \quad (7)$$

Slednje izračuna vsoto vseh izhodov, s tem pa se dobi lik, ki predstavlja mehko množico izhodnega podatka. Običajno uporabljena metoda ostrenja podatkov je metoda "težišča", ki se izračuna z

$$x^* = \frac{\int_0^\infty x \cdot \mu_D(x) dx}{\int_0^\infty \mu_D(x) dx}. \quad (8)$$

V naslednjih poglavjih so predstavljeni vhodni parametri in izhodna odločitev, sestava mehkih funkcij pripadnosti za vsak vhod in izhod ter mehka pravila, ki izvajajo postopek mehkega sklepanja.

3. Zasnova predlaganega modela izogibanja trčenju na morju

Izogibanje je postopek, ki zahteva načrtovanje in opazovanje dinamičnih navigacijskih razmer v ustreznem časovnem okvirju. Pomemben del načrtovanja je napovedovanje gibanja plovila z ekstrapolacijo trajektorije plovila v časovnem zamiku. Tako kot na radarju so navigacijske razmere v modelu predstavljene z vidika lastnega plovila. Opazovano plovilo se šteje kot plovilo, s katerim obstaja nevarnost trčenja. Predlagani model odločanja izračuna odločitev v dveh korakih. V prvem koraku model zbere vhodne podatke lastnega in opazovanega plovila, da oceni tveganje trčenja. Za napoved položaja opazovanega plovila ob izvedbi manevra izogibanja trčenju se uporabi izračun časovnega zamika, s katerim se določi nov relativni položaj opazovanega plovila. Na tej točki se izračunajo štirje parametri za nadaljnjo obdelavo kot vhodne spremenljivke v mehkem inferenčnem sistemu. Drugi korak je izračun odločitve (spremembe kurza lastnega plovila) z uporabo metodologije mehke logike.

3.1. Izračun vhodnih parametrov FIS

Na izračun ustrezne spremembe kurza vplivajo štirje dinamični parametri kot vhodne spremenljivke FIS:

1. DCPA - razdalja do najbližje točke srečanja,
2. AP (Action Point) - oddaljenost opazovanega plovila v trenutku izogibanja,
3. RB (Relative Bearing) - relativni azimut opazovanega plovila,
4. V - hitrost lastnega plovila.

Za izračun vhodnih parametrov, ki se uporabljajo v mehkem inferenčnem sistemu, se predvideni položaj opazovanega plovila izračuna s časovnim zamikom [27]. Časovni zamik navigacijske situacije je niz funkcij, ki izračunajo relativni položaj opazovanega plovila v želenem časovnem zamiku, če se smer in hitrost lastnega in opazovanega plovila v času ne spreminjata. Ta metoda se imenuje "statični izračun poskusnega manevra". Novi relativni položaj opazovanega plovila se izračuna na naslednji način:

$$d_{tN} = \left| \frac{X_{tN}}{\sin \omega_{tN}} \right| [M], \quad (9)$$

$$RB = \omega_t - K_o [^\circ], \quad (10)$$

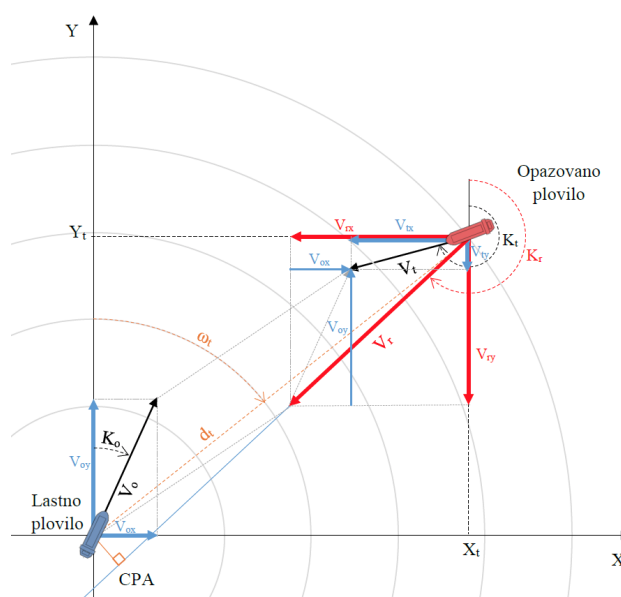
kjer je d_{tN} nova razdalja do opazovanega plovila, X_{tN} je nova relativna koordinata položaja opazovanega plovila, ω_{tN} je nov azimut opazovanega plovila, RB je nov relativni azimut opazovanega plovila in K_o je kurz lastnega plovila.

Parametra ocene tveganja trčenja DCPA in TCPA se izračunata na sledeč način [28]:

$$DCPA = \left| \frac{(X_t \cdot V_{ry}) - (Y_t \cdot V_{rx})}{V_r} \right| [M], \quad (11)$$

$$TCPA = - \frac{(Y_t \cdot V_{ry}) + (X_t \cdot V_{rx})}{V_r^2} \cdot 60 [\text{min}], \quad (12)$$

kjer sta X_t in Y_t relativni koordinati položaja opazovanega plovila, V_{rx} in V_{ry} sta komponenti vektorja relativne hitrosti, V_r pa je relativna hitrost približevanja (slika 2).



Slika 2. Grafični prikaz izračuna tveganja trčenja v relativnem koordinatnem sistemu.

Parametra AP in RB sta časovni spremenljivki, DCPA in V pa sta statična podatka (ob predpostavki, da obe plovili ohranjata hitrost in kurz gibanja). Ker je mehko sklepanje pogojeno z negotovostjo, hitrost opazovanega plovila, relativna hitrost približevanja in TCPA opazovanega plovila pri modeliranju mehkega inferenčnega sistema niso bili uporabljeni kot vhodni parametri, saj upoštevanje parametra AP izniči vpliv teh spremenljivk.

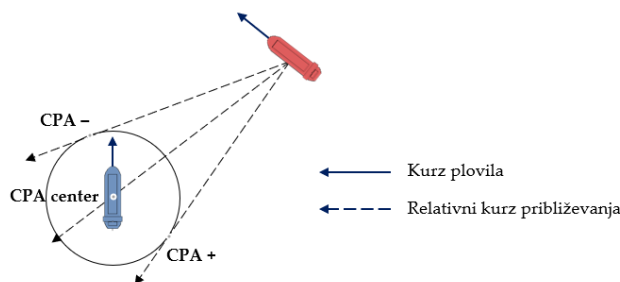
V naslednjih podpoglavjih so parametri podrobno predstavljeni, vsaki vrednosti pa je dodeljena stopnja pripadnosti ustrezni mehki množici.

3.1.1. Parameter DCPA

DCPA je dinamični parameter. Če je njegova vrednost manjša od vnaprej določene varne domene plovila, obstaja nevarnost trčenja z opazovanim plovilom ali objektom. Posebej pomemben je položaj točke CPA glede na lastno

plovilo: ali se bo lastno plovilo srečalo z opazovanim plovilom po krmnem (desnem boku), po premčnem delu (levem boku) ali pa gre relativna smer približevanja skozi lastno plovilo [26].

Položaj CPA vpliva na velikost spremembe kurza. Različne smeri približevanja zahtevajo različno spremembo kurza; večja sprememba je opazna že pri razliki vrednosti DCPA $\pm 0,3$ M. Za parameter DCPA so bile oblikovane tri trapezne funkcije pripadnosti: negativen DCPA, center DCPA in pozitiven DCPA. Ker podatki DCPA, pridobljeni iz navigacijskih naprav, ne zagotavljajo informacij o položaju CPA glede na lastno plovilo (slika 3), je pozitivna ali negativna vrednost DCPA določena po naslednjem pravilu: če azimut opazovanega plovila s časom narašča, je položaj CPA "pozitiven" in parameter DCPA ima pozitivno vrednost; če se azimut opazovanega plovila s časom zmanjšuje, je položaj CPA "negativen" in ima parameter DCPA negativno vrednost.



Slika 3. Položaj CPA pri različnih kurzih približevanja.

Naslednje enačbe predstavljajo funkcije pripadnosti za parameter DCPA:

$$\mu_{\text{Negative}}(d) = \begin{cases} 0, & d < -1 \\ \frac{d}{0.2} + 5, & -1 \leq d \leq -0.8 \\ 1, & -0.8 \leq d \leq -0.3 \\ -0.5 - \frac{d}{0.2}, & -0.3 \leq d \leq -0.1 \\ 0, & d > -0.1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{\text{Centre}}(d) = \begin{cases} 0, & d < -0.5 \\ \frac{d}{0.2} + 2.5, & -0.5 \leq d \leq -0.3 \\ 1, & -0.3 \leq d \leq 0.3 \\ 2.5 - \frac{d}{0.2}, & 0.3 \leq d \leq 0.5 \\ 0, & d > 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{\text{Positive}}(d) = \begin{cases} 0, & d < 0.1 \\ \frac{d}{0.2} - 0.5, & 0.1 \leq d \leq 0.3 \\ 1, & 0.3 \leq d \leq 0.8 \\ 5 - \frac{d}{0.2}, & 0.8 \leq d \leq 1 \\ 0, & d > 1 \end{cases} \quad (15)$$

Te vrednosti so bile izbrane, ker direktna trčenja predstavljajo vrednosti v intervalu $-0,3$ in $+0,3$ M, pri čemer je stopnja pripadnosti enaka 1; za druge vrednosti do $-0,5$ ali $+0,5$ se stopnja pripadnosti linearno zmanjšuje ali povečuje. Izbrana je bila trapezoidna oblika funkcije pripadnosti, saj več elementov v posamezni mehki množici predstavlja jedro funkcije pripadnosti, tj. stopnja pripadnosti v mehki množici je enaka 1. To velja tudi za mehke množice drugih parametrov.

3.1.2. Parameter AP

Ta parameter je izračunana nova razdalja do opazovanega plovila z uporabo simulacije časovnega zamika v koraku 2 (d_{tN}). Po Cockcroftu [9] obstajajo štiri stopnje srečanja z opazovanim plovilom: od trenutka, ko ni nevarnosti trčenja (prva stopnja), do skrajne situacije, ko mora plovilo s prednostjo ukrepati, da se izogne trčenju (četrt

stopnja). Vmesne stopnje so: izogibanje trčenju s strani plovila, ki nima prednosti (druga stopnja) na varni razdalji do plovila s prednostjo, katera na odprtem morju znaša od 5 do 8 M (te številke so povezane tudi z vidnostjo ladijskih luči na odprtem morju v skladu s COLREGs pravili [29]); in izogibanje trčenju s strani plovila s prednostjo, na razdalji 2 do 3 M od plovila brez prednosti [9]. Nekateri ladjarji so zelo konkretni pri določanju točke AP. Sistem varnega upravljanja ladjarja CMA CGM za AP na odprtem in priobalnem morju določa 6 M v navigacijskih situacijah, ki jih obravnavata COLREGs pravili 14 in 15 [30]. V situaciji prehitevanja pa mora biti najmanjša razdalja do opazovanega plovila 2 M.

Na podlagi predlaganih razdalj za AP v literaturi so pri sestavi vhodnega parametra AP v mehkem inferenčnem sistemu nastale tri mehke množice, ki opisujejo položaj opazovanega plovila v trenutku začetka manevra:

nevarno blizu (angl. Near): zavzema področje od 0 do 5 M oddaljenosti, z različnimi stopnjami pripadnosti;

normalno oddaljeno (angl. Middle): glede na različne poglede, ki jih najdemo v literaturi, to območje zajema oddaljenosti med 2,5 in 9 M, z različnimi stopnjami pripadnosti;

daleč (angl. Far): množica, ki vse vrednosti nad 6 M opisuje kot položaje, ki so zelo oddaljeni, pri tem so vrednosti med 6 in 7,5 M z različnimi stopnjami pripadnosti.

$$\mu_{\text{Near}}(d) = \begin{cases} 1 & d < 4 \\ 5 - d, & 4 \leq d \leq 5 \\ 0, & d > 5 \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{\text{Middle}}(d) = \begin{cases} 0, & d < 2.5 \\ \frac{d}{1.5} - 1.6, & 2.5 \leq d \leq 4 \\ 1 & 4 \leq d \leq 7.5 \\ 6 - \frac{d}{1.5}, & 7.5 \leq d \leq 9 \\ 0, & d > 9 \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_{\text{Far}}(d) = \begin{cases} 0, & d < 6 \\ \frac{d}{1.5} - 4, & 6 \leq d \leq 7.5 \\ 1, & d > 7.5 \end{cases} \quad (18)$$

3.1.3. Parameter RB

V odločitvenem modelu je RB merjen od premčne linije lastnega plovila v smeri urinega kazalca, 0° - 359°. V praksi se kot približevanja opazovanega plovila redko izraža v stopinjskih vrednostih, ampak se izraža glede na splošne smeri plovila (premec, krma, levi in desni bok). Zato je RB kot vhodni parameter mehke logike sestavljen iz 8 mehkih množic s pripadajočimi trapeznimi funkcijami pripadnosti, ki so opisane z besedami: premec desno (Starboard Bow), premec/ bok desno (Starboard Bow/ Beam), bočno desno (Starboard Beam), krma desno (Starboard Quarter), krma (Stern), krma levo (Port Quarter), bočno levo (Port Beam), premec levo (Port Bow). Naslednje vrednosti so bile med simulacijami prilagojene, dokler niso dobile naslednjih oblik:

$$\mu_{\text{S_Bow}}(\text{deg}) = (0, 0, 60, 70) \quad (19)$$

$$\mu_{\text{S_B/B}}(\text{deg}) = (40, 50, 80, 90) \quad (20)$$

$$\mu_{\text{S_Beam}}(\text{deg}) = (70, 80, 140, 150) \quad (21)$$

$$\mu_{\text{SQ}}(\text{deg}) = (120, 130, 180, 190) \quad (22)$$

$$\mu_{\text{Stern}}(\text{deg}) = (160, 170, 220, 230) \quad (23)$$

$$\mu_{\text{PQ}}(\text{deg}) = (200, 210, 260, 270) \quad (24)$$

$$\mu_{\text{P_Beam}}(\text{deg}) = (240, 250, 300, 310) \quad (25)$$

$$\mu_{\text{P_Bow}}(\text{deg}) = (280, 290, 360, 360) \quad (26)$$

3.1.4. Parameter V

Pomemben parameter, ki vpliva na velikost spremembe kurza, je hitrost lastnega plovila. Manjši kot je, večja sprememba kurza je potrebna, da se plovila srečajo na varni razdalji. Parameter hitrosti je sestavljen iz treh mehkih množic z ustreznimi trapezoidnimi funkcijami pripadnosti:

majhna hitrost (Low),

povprečna hitrost (Normal),

visoka hitrost (High).

Mehke množice so bile določene na podlagi baze pravilnih rešitev, v kateri so bile uporabljene tri različne hitrosti lastnega plovila: 10, 15 in 20 vozlov (navtičnih milj na uro). V mehko množico "Low" so bila vključena plovila s hitrostjo do 12 vozlov, kot so ribiške ladje, plovila, ki se približujejo pristaniščem, pilotskim postajam itd. Mehka množica "Normal" vključuje plovila s hitrostmi med 8 in 16 vozli, kar je običajna hitrost povprečne ladje za prevoz razsutega tovora, ki pluje s pol moči naprej ali s polno močjo naprej. Množica "High" vključuje plovila s hitrostjo, večjo od 16 vozlov: hitri čolni, kontejnerske ladje itd. Vrednosti so bile med simulacijami prilagojene, dokler niso dobile naslednjih oblik:

$$\mu_{\text{Low}}(v) = \begin{cases} 1, & v < 8 \\ 3 - \frac{v}{4}, & 8 \leq v \leq 12 \\ 0, & v > 12 \end{cases} \quad (27)$$

$$\mu_{\text{Normal}}(v) = \begin{cases} 0, & v < 5 \\ \frac{v}{3} - 1.6, & 5 \leq v \leq 8 \\ 1, & 8 \leq v \leq 16 \\ 5 - \frac{v}{4}, & 16 \leq v \leq 20 \\ 0, & v > 20 \end{cases} \quad (28)$$

$$\mu_{\text{High}}(v) = \begin{cases} 0, & v < 12 \\ \frac{v}{4} - 3, & 12 \leq v \leq 16 \\ 1, & v > 16 \end{cases} \quad (29)$$

3.2. Izhodna odločitev – sprememba kurza lastnega plovila

Najpogostejši način izogibanja plovil na morju je manever s spremembo kurza. Tak manever je tudi najbolj ustrezen, saj COLREGs pravilo 8 narekuje:

»(1) Vsako dejanje za izognitev trčenju v skladu z določbami tega poglavja mora biti glede na okoliščine odločno, pravočasno in tako, kot bi ga storil dober upravljavec plovila.

(2) Vsaka sprememba smeri in/ali hitrosti za izognitev trčenju mora biti glede na okoliščine dovolj velika, da jo drugo plovilo, ki opazuje s prostim očesom ali z radarjem, lahko takoj opazi. Izogibati se je treba zaporednim majhnim spremembam smeri in/ali hitrosti« [29].

S tolmačenjem pravila 8 je mogoče sklepati, da mora biti manever opazen, kar ne velja, če se hitrost zmanjša za nekaj vozlov. Poleg tega lahko negotovost navigatorja, ki opazuje tak manever z drugega plovila, sproži napačne odločitve. Cockcroft [9] priporoča, da naj bo sprememba kurza vsaj 30°, bolj priporočljiva pa je sprememba kurza v območju 60° do 90°. Glede na položaj opazovanega plovila se lahko kurz spremeni v levo ali desno stran.

Rezultat odločitvenega modela je sprememba kurza lastnega plovila, v stopinjah, v levo ali desno stran, ki se uporablja za izračun trajektorije plovila v postopku poskusnega manevra. Opisan je z devetimi mehкими množicami, ki se uporabljajo v pomorskem žargonu:

ohraniti isti kurz (Steady),

spremeniti smer rahlo na desno ali levo (Easy to Stbd/Port),

spremeniti smer srednje na desno ali levo (Mid to Stbd/Port),

spremeniti smer močno na desno ali levo (Hard to Stbd/Port),

spremeniti smer zelo močno na desno (Full to Stbd),

narediti cel krog (Full Turn).

Mehke množice so oblikovane subjektivno.

$$\mu_{\text{hP}}(\text{deg}) = (-120, -110, -90, -80) \quad (30)$$

$$\mu_{\text{mP}}(\text{deg}) = (-90, -80, -60, -50) \quad (31)$$

$$\mu_{\text{eP}}(\text{deg}) = (-60, -50, -30, -20) \quad (32)$$

$$\mu_{\text{S}}(\text{deg}) = (-30, -20, 0, 10) \quad (33)$$

$$\mu_{\text{eS}}(\text{deg}) = (0, 10, 30, 40) \quad (34)$$

$$\mu_{mS}(\text{deg}) = (30, 40, 70, 80) \quad (35)$$

$$\mu_{hS}(\text{deg}) = (70, 80, 110, 120) \quad (36)$$

$$\mu_{fS}(\text{deg}) = (110, 120, 150, 160) \quad (37)$$

$$\mu_{fT}(\text{deg}) = (150, 160, 360, 360) \quad (38)$$

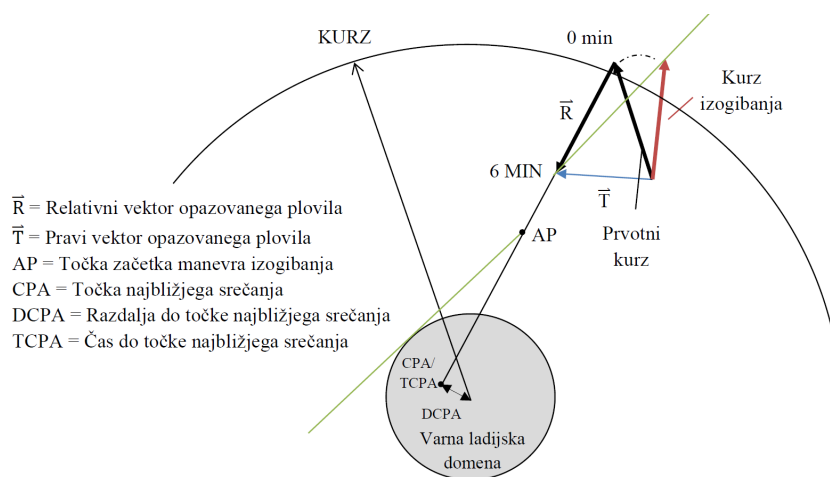
Postopek preslikave vhodnih parametrov v izhodno odločitev ureja sistem mehkih pravil. Pravila so bila oblikovana na podlagi opazovanja rezultatov baze pravilnih rešitev ter interpretacije COLREGs pravil 8 in 19. Baza pravilnih rešitev je bila narejena s pomočjo tradicionalne metode računanja spremembe kurza – grafičnega radarskega vrisovanja. Ročno radarsko vrisovanje (slika 4) je metoda, ko se v časovnem intervalu na radarskem zaslonu merita azimut in oddaljenost signala oziroma opaženega plovila ter se položaj plovila vriše na radarski diagram. S povezavo dveh točk opazovanega signala se dobita relativni in pravi vektor gibanja signala (ali plovila) in točka CPA, kar zagotavlja bistvene podatke za oceno tveganja trčenja, DCPA in TCPA. Na koncu se vektorsko določi in izmeri še kurz izogibanja ali sprememba hitrosti za željeno varno ladijsko domeno ter začetek izogibanja. Ta metoda predpostavlja, da opazovano plovilo ohrani svojo trenutno smer in hitrost. Baza pravilnih rešitev vsebuje 972 odločitev za spremembo kurza pri različnih parametrih:

oddaljenost do najbližje točke srečanja z opazovanim plovilom (0 M, +0,5 M, - 0,5 M),

prečni kot opazovanega plovila ($0^\circ - 350^\circ$),

oddaljenost plovila v trenutku izogibanja (2 M, 4 M in 6 M),

hitrosti lastnega plovila (10, 15 in 20 vozlov).



Slika 4. Ročno radarsko vrisovanje [26].

Pogoj srečanja z opazovanim plovilom je za vse odločitve 1 NM; relativna hitrost približevanja plovil je v vseh primerih 20 vozlov. Obe vrednosti sta bili določeni subjektivno. V odločitvah sta bili uporabljeni COLREGs pravili 8 in 19. Na sliki 5 je prikazan izsek iz baze pravilnih rešitev za pogoje: DCPA opazovanega plovila je 0 M, razdalja do točke začetka manevra izogibanja je 6 M pri različnih relativnih azimutih opazovanega plovila. Odločitev je sprememba smeri pri treh različnih hitrostih lastnega plovila.

| RB [°] | AP [M] | DCPA [M] | Course deviation | | | RB [°] | AP [M] | DCPA [M] | Course deviation | | |
|--------|--------|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------|--------|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | | Velocity own vessel: 20 kn | Velocity own vessel: 15 kn | Velocity own vessel: 10 kn | | | | Velocity own vessel: 20 kn | Velocity own vessel: 15 kn | Velocity own vessel: 10 kn |
| 0 | 6 | 0 | 10 | 12 | 19 | 180 | 6 | 0 | 10 | 14 | 20 |
| 10 | 6 | 0 | 10 | 13 | 20 | 190 | 6 | 0 | 10 | 13 | 18 |
| 20 | 6 | 0 | 11 | 15 | 22 | 200 | 6 | 0 | 10 | 14 | 21 |
| 30 | 6 | 0 | 13 | 16 | 23 | 210 | 6 | 0 | 10 | 14 | 21 |
| 40 | 6 | 0 | 13 | 17 | 24 | 220 | 6 | 0 | 12 | 16 | 23 |
| 50 | 6 | 0 | 15 | 20 | 28 | 230 | 6 | 0 | 12 | 15 | 21 |
| 60 | 6 | 0 | 21 | 25 | 35 | 240 | 6 | 0 | 13 | 17 | 24 |
| 70 | 6 | 0 | 26 | 29 | 38 | 250 | 6 | 0 | 16 | 21 | 27 |
| 80 | 6 | 0 | 35 | 41 | 50 | 260 | 6 | 0 | 20 | 25 | 33 |
| 90 | 6 | 0 | -25 | -31 | -36 | 270 | 6 | 0 | 26 | 33 | 40 |
| 100 | 6 | 0 | -22 | -24 | -35 | 280 | 6 | 0 | 33 | 39 | 47 |
| 110 | 6 | 0 | -16 | -21 | -30 | 290 | 6 | 0 | 44 | 49 | 57 |
| 120 | 6 | 0 | -15 | -18 | -25 | 300 | 6 | 0 | 19 | 30 | 72 |
| 130 | 6 | 0 | -12 | -16 | -23 | 310 | 6 | 0 | 14 | 19 | 32 |
| 140 | 6 | 0 | -10 | -13 | -20 | 320 | 6 | 0 | 14 | 18 | 29 |
| 150 | 6 | 0 | -9 | -12 | -18 | 330 | 6 | 0 | 11 | 15 | 23 |
| 160 | 6 | 0 | -10 | -14 | -20 | 340 | 6 | 0 | 11 | 15 | 22 |
| 170 | 6 | 0 | -10 | -13 | -20 | 350 | 6 | 0 | 10 | 13 | 20 |

Slika 5. Izsek iz baze pravih rešitev: zelena barva označuje spremembo smeri v desno stran, rdeča pa v levo stran pri različnih parametrih.

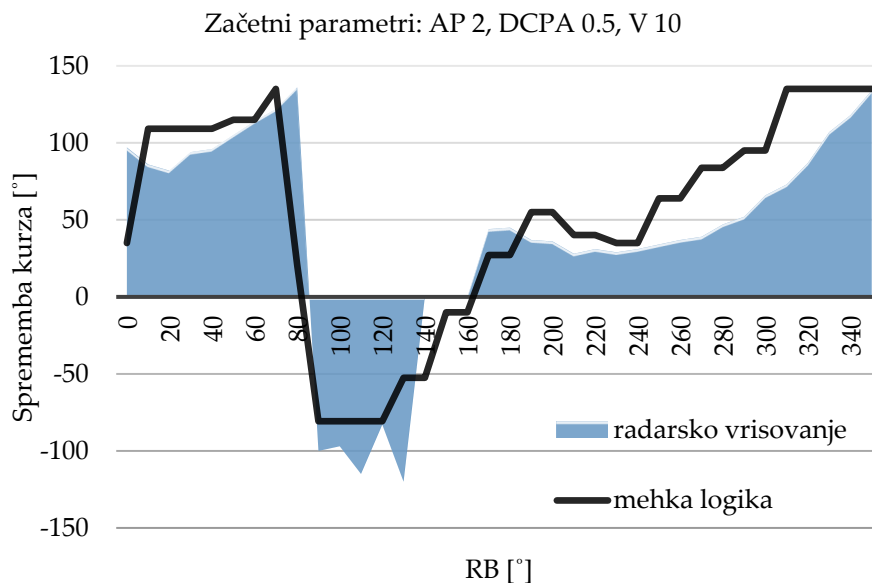
3.3. Validacija odločitev

Uglasovanje odločitvenega modela je potekalo, dokler niso rezultati mehke logike zavzeli podobne površine pod krivuljo kot rezultati baze pravih rešitev. Popolna pokritost grafov ni pričakovana, saj mehka logika simulira človeški način sklepanja, pomembno pa je ujemanje rezultatov pri spremembi kurza v RB območju od 0 – 110°, saj imajo zaradi pravila desnega vsa opazovana plovila v tem premčnem kotu prednost pred plovilom na mehanski pogon (ki je status lastnega plovila v odločitvenem modelu). Slika 6 prikazuje primerjavo rezultatov obeh metod. Grafa se po površini pokrivata skoraj v celoti, z manjšimi odstopanji v posameznih RB območjih.

Sestava mehkih pravil je potekala po principu iskanja najvišje vrednosti »spremembe kurza« za posamezna območja (v razponu od 30 do 40 stopinj) premčnega kota. Skupaj 216 pravil tvori izjave v obliki IF – THEN stavkov (tabela 1).

Tabela 1. Izjave IF-THEN

| | | |
|------|------------------------|---|
| IF | <i>DCPA</i> | »Negativen«, »Pozitiven«, »Center« |
| AND | <i>AP</i> | »Nevarno blizu«, »Normalno oddaljeno«, »Daleč« |
| AND | <i>RB</i> | »Premec desno«, »Premec/ bok desno«, »Bočno desno«, »Krma desno«, »Krma«, »Krma levo«, »Bočno levo«, »Premec levo« |
| AND | <i>V</i> | »Majhna hitrost«, »Povprečna hitrost«, »Visoka hitrost« |
| THEN | <i>Sprememba kurza</i> | »Ohraniti isti kurz«, »Spremeniti smer rahlo na desno ali levo«, »Spremeniti smer srednje na desno ali levo«, »Spremeniti smer močno na desno ali levo«, »Spremeniti smer zelo močno na desno«, »Narediti cel krog« |



Slika 6. Primerjava rezultatov baze pravilnih rešitev in rezultatov mehkega inferenčnega sistema.

Mehki inferenčni sistem je pokazal nekaj pomanjkljivosti na področjih, kjer se odločitve spreminjajo iz pozitivnih v negativne in obratno, kar je posledica COLREGs pravila 19, ki narekuje, da se mora plovilo izogibati spremembi kurza v smeri opazovanega plovila, če je le ta za njeno prečnico. Zato je pokritost grafov v teh delih slabša. Ta pokritost je bila nekoliko izboljšana z dodano mehko množico parametra RB »premec/bok desno (Starboard Bow/Beam)«. S podobno težavo se je srečal tudi Perera in dr. [31], ki je ostre meje med mehкими množicami, ki so si bile nasprotni v odločitvah, omehčal z dodajanjem mehkih množic, ki so nevtralizirale oster prehod med dvema nasprotujočima si odločitvama.

4. Simulacije

Cilj simulacij je dokazati ustreznost delovanja večparametrskega odločitvenega modela izogibanja trčenju na morju. Obstaja nešteto možnih situacij srečanj na morju; Perera [6] je v svojem prispevku predstavil simulacije srečanja enega plovila z različnih relativnih smeri: 63, 30, 106, 1 in 296° na razdaljah med 7 in 14 M. Pri tem so bile zajete vse tri navigacijske situacije v skladu s COLREGs pravili - križanje, prehitevanje in približevanje z nasprotnih smeri. Podobno simulacijo sta predstavila Ni [32] z uporabo več generičnih algoritmov in linearnega razširitvenega algoritma za načrtovanje poti za različne navigacijske situacije na odprtem morju ter Nguyen [33] v omejenem vodnem prostoru, v situaciji z več plovili. Zhuo [16] je simuliral srečanje s tremi plovili istočasno, ki se nahajajo v premčnih kotih 050°, 325° in 002°, z navigacijskimi situacijami križanje in srečanje iz nasprotnih smeri. Podobno situacijo je simuliral Pietrzykowski [18]. Lee in dr. [21] so obravnavali križanja z desne smeri glede na lastno plovilo (približevanje s smeri 30° – 50° premčnega kota in smeri 90° – 140° premčnega kota), leve smeri (približevanje s smeri 300° – 330° premčnega kota in smeri 220° – 270° premčnega kota) glede na lastno plovilo ter prehitevanje. Še en pomemben vidik izogibanja trčenju na morju je varna domena plovila. Avtorji, ki so reševali problem izogibanja trčenju na morju celostno, so za varno domeno v modelu večinoma uporabili preprost radarski krog: Zhang [34] je določil polmer kroga 1500 m (0,8 M), Pietrzykowski [35] in Szłapczyński [36] pa sta pri simulacijah uporabila krog velikosti 1 M. Zhuo [16] je pri velikosti kroga upošteval tudi dimenzije svojega in opazovanega plovila. Nekateri so se lotili preprostih elips, kjer so velikost velike polosi določili glede na dolžino ladje (2x dolžina ladje), malo polos pa glede na širino ladje, 2 – 4x širina ladje [33, 37]. Številni avtorji v odločitvenih modelih niso posebej opredelili velikosti domene, med njimi Hwang [38], Perera [6] in Hu [39], ali pa so izbrali najmanjšo razdaljo srečanja [8, 40-42]. Na podlagi teh ugotovitev se v predstavljenem modelu predpostavlja, da je najmanjša varnostna domena plovila 1 navtična milja.

Validacija modela je bila opravljena na šestih izbranih primerih, ki simulirajo srečanje z opazovanim plovilom na odprtem morju z različnih smeri približevanja in ob kateri koli vidljivosti: približevanje z nasprotnih smeri, križanje, prehitevanje in ter pri različnih pravicah poti. Opazovana kriterija simulacij sta izogibanje skladno s COLREGs pravili in minimalna varna domena plovila. Ker so simulacije osredotočene na plovbo na odprtem morju, se v postopku modeliranja ne upoštevajo manevrske lastnosti plovil in vplivi okolja (veter in tokovi).

4.1. Uporaba predlaganega modela, študija primera 1 (situacija prehitevanja)

Sledi podrobna razlaga izračuna odločitvenega modela (tabele 2-5). Simulacija preizkuša mehki inferenčni sistem za situacijo srečanja z opazovanim plovilom. To situacijo urejajo COLREGs pravilo 14, " približevanje z nasprotnih

smeri ", pravilo 8 "ukrepi za preprečitev trčenja" in pravilo 19 "ravnanje plovil pri omejeni vidljivosti". Obe plovili sta na motorni pogon. Predpostavlja se, da opazovano plovilo ohranja svoj kurz in hitrost.

Tabela 2. Začetni parametri, 0 min.

| | Lastno plovilo | Opazovano plovilo |
|----------------|----------------|-------------------|
| K [°] | 340 | 161 |
| V [kn] | 16.5 | 13 |
| dt [M] | - | 9.5 |
| ωt [°] | - | 341 |

Tabela 3. Ocena tveganja trčenja.

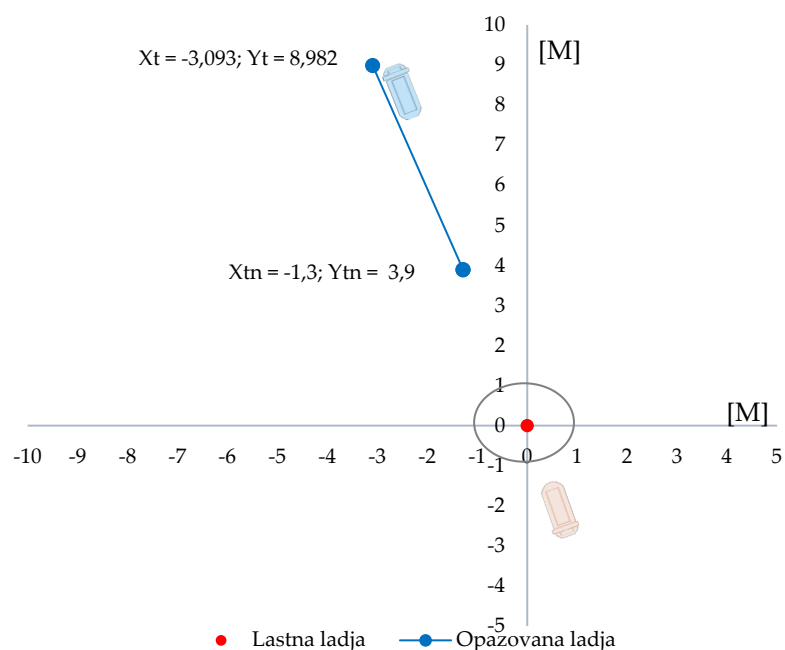
| | |
|-------------|-----------|
| DCPA [M] | 0.09 |
| TCPA [min] | 19.32 |
| Položaj CPA | pozitivno |
| RB [°] | 1 |

Tabela 4. Nov relativni položaj opazovanega plovila v časovnem zamiku 11 min.

| | |
|----------------|-------|
| ωt [°] | 341.7 |
| dt [M] | 4.09 |
| RB [°] | 1.739 |

Tabela 5. Izračunani vhodni parametri za mehki inferenčni sistem (FIS).

| | |
|-----------|-------|
| DCPA [M] | +0.09 |
| AP [M] | 4.09 |
| RB [°] | 1.739 |
| V [vozli] | 16.5 |



Slika 7. Grafični prikaz relativnega gibanja opazovanega plovila v časovnem zamiku, v polarnem koordinatnem sistemu.

Slika 7 prikazuje relativni premik opazovanega plovila v časovnem zamiku. Naslednji korak je razvrstitev vhodnih parametrov v mehke množice in izračun stopnje pripadnosti. Ta postopek se imenuje fuzifikacija:

$$DCPA = +0,09 \text{ M}$$

$$\mu_{\text{Center}}(d) = 1, \text{ če } -0,3 \leq d \leq 0,3$$

Pojasnilo: DCPA +0,09 M pripada mehka množici "Center" s stopnjo pripadnosti 1.

$$AP = 4,09 \text{ M}$$

$$\mu_{\text{Near}}(d) = 5 - d, \text{ če } 4 \leq d \leq 5$$

$$\mu_{\text{Near}}(d) = 5 - 4,09 = 0,91$$

$$\mu_{\text{Middle}}(d) = 1, \text{ če je } 4 \leq d \leq 7,5$$

Pojasnilo: Razdalja do opazovanega plovila 4,09 M pripada mehki množici "Near" s stopnjo pripadnosti 0,91 in mehki množici "Middle", s stopnjo pripadnosti 1.

$$RB = 1,739^\circ$$

$$\mu_{(\text{S}_\text{Bow})}(\text{deg}) = 1, \text{ če je } \text{deg} < 60$$

Pojasnilo: RB 1.739° pripada mehki množici "Stbd Bow" s stopnjo pripadnosti 1.

$$V = 16,5 \text{ vozlov}$$

$$\mu_{\text{Normal}}(V) = 5 - V/4, \text{ če je } 16 \leq V \leq 20$$

$$\mu_{\text{Normal}}(V) = 5 - 16,5/4 = 0,875$$

$$\mu_{(\text{High})}(V) = 1, \text{ če je } V > 16$$

Pojasnilo: Hitrost lastnega plovila 16,5 vozla pripada mehki množici "Normal" s stopnjo pripadnosti 0,875 in mehki množici "High" s stopnjo pripadnosti 1.

Sledi aktivacija FIS na podlagi mehkih pravil (tabela 6). Ker vhodna parametra AP in V pripadata dvema mehkim množicama, se aktivirajo štiri mehka pravila (R_n):

Tabela 6. Mehka pravila.

| Pravilo | Če je DCPA | in AP | in RB | in SPEED | Je sprememba kurza |
|---------|------------|--------|-------|----------|--------------------|
| R1 | Center | Near | S_Bow | High | Mid to Stbd |
| R2 | Center | Near | S_Bow | Normal | Mid to Stbd |
| R3 | Center | Middle | S_Bow | High | Mid to Stbd |
| R4 | Center | Middle | S_Bow | Normal | Mid to Stbd |

Sledi izračun vrednosti posameznega izhodnega podatka mehkega pravila s presekom mehkih množic $DCPA \cap AP \cap RB \cap V$:

$$\text{Pravilo 1: } \mu_D(x_1) = \min [1 \ 0,91 \ 1 \ 1] = 0,91.$$

$$\text{Pravilo 2: } \mu_D(x_2) = \min [1 \ 0,91 \ 1 \ 0,875] = 0,875.$$

$$\text{Pravilo 73: } \mu_D(x_3) = \min [1 \ 1 \ 1 \ 1] = 1.$$

$$\text{Pravilo 74: } \mu_D(x_4) = \min [1 \ 1 \ 1 \ 0,875] = 0,875.$$

Unija vseh izhodov znaša:

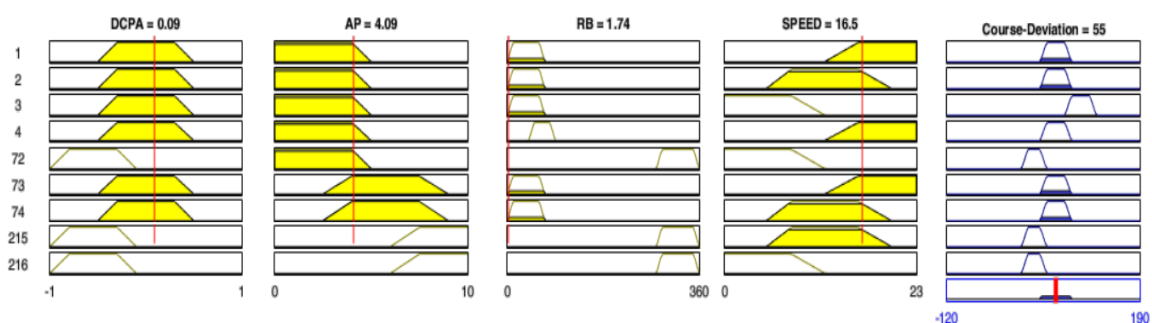
$$\mu_D(x) = \max [\mu_D(x_1), \mu_D(x_2), \dots, \mu_D(x_n)] = \max [0,91 \ 0,875 \ 1 \ 0,875] = 1.$$

Vsi izhodi pripadajo mehki množici "Mid to Stbd".

Sledi zadnji korak v postopku, imenovan defuzifikacija. To je postopek ostrenja podatkov oziroma izračun spremembe kurza. Uporabljena metoda defuzifikacije je težiščna metoda. Slika 8 prikazuje izsek preslikave vhodnih podatkov v izhodno odločitev z uporabo orodja MATLAB Fuzzylogic Toolbox.

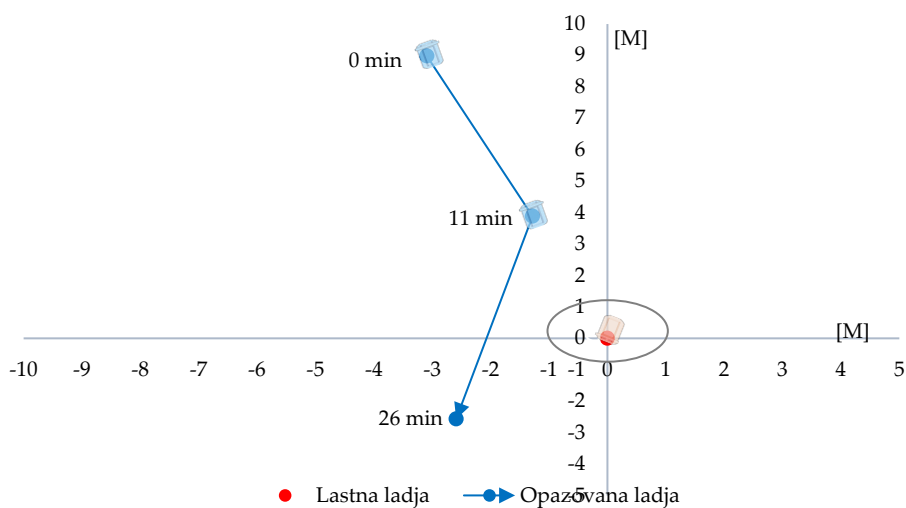
$$\mu_{ms}(deg) = \begin{cases} 0, & \text{deg} \leq 30 \\ \frac{\text{deg}}{10} - 3, & 30 \leq \text{deg} \leq 40 \\ 1, & 40 \leq \text{deg} \leq 70 \\ 8 - \frac{\text{deg}}{10}, & 70 \leq \text{deg} \leq 80 \\ 0, & \text{deg} \geq 80 \end{cases} \quad \mu_{ms}(deg) = 1, \text{ if } 40 \leq \text{deg} \leq 70$$

$$x^* = \int_0^\infty \frac{x \cdot \mu_D(x) dx}{\mu_D(x) dx} = \frac{1 \cdot 40 + 1 \cdot 70}{2} = 55^\circ$$



Slika 8. Mehki inferenčni postopek z uporabo MATLAB Fuzzylogic Toolbox.

Pojasnilo: Odločitveni model izračuna spremembo kurza $x^* = 55^\circ$, novi kurz za izogibanje trčenju pa je 35° . Slika 9 prikazuje relativni premik opazovanega plovila po spremembi kurza lastnega plovila.



Slika 9. V 11. minuti sprememba kurza spremeni relativno pot in hitrost opazovanega plovila.

Tabela 7. Ponovna ocena tveganja trčenja.

| | |
|------------|------|
| DCPA [M] | 2.0 |
| TCPA [min] | 8.1 |
| Vr [vozli] | 26.3 |
| Cr [°] | 191 |

Analiza: Študija primera 1 prikazuje srečanje z opazovanim plovilom, ki se približuje z nasprotne smeri. Odločitveni model oceni tveganje trčenja z izračunom vrednosti DCPA, ki je glede na začetne podatke manjši od varne domene plovila 1 M. S časovnim zamikom navigacijske situacije za 11 minut model izračuna vhodne parametre RB in AP. Na podlagi vhodnih parametrov mehki inferenčni sistem izračuna spremembo kurza in ponovno oceni tveganje trčenja. Model grafično prikaže načrtovano trajektorijo opazovanega plovila. Novi DCPA srečanja po spremembi smeri potrjuje kakovost izračunanega manevra izogibanja, saj je večji od 1 M (tabela 7).

4.2. Študije primerov

Funkcionalnost odločitvenega modela je bila preizkušena na različnih primerih; rezultati simulacij so prikazani v naslednjih tabelah (8-13). V vseh primerih je lastno plovilo v položaju brez prednosti: primer 2 simulira navigacijsko situacijo križanja z opazovanim plovilom, ki se približuje po premcu desno, primer 3 simulira situacijo, v kateri je opazovano plovilo brez prednosti, vendar krši pravilo 16 "ukrepanje plovila brez prednosti", in mora lastno plovilo, ki je v položaju s prednostjo, ukrepati, da se izogne trčenju. Študija primera 4 simulira približevanje z opazovanim plovilom, ki se nahaja v relativnem azimutu 274°. Opazovano plovilo je v tem primeru plovilo s prednostjo (omejeno z ugrezom), lastno plovilo pa je plovilo brez prednosti. Simulacija predstavlja izogibanje na oddaljenosti dobrih 4 M, mehka logika z vstopnimi parametri izračuna večjo spremembo smeri, s tem pa zagotovi srečanje na razdalji 3.8 M. Študija primera 5 preizkuša odziv mehkega inferenčnega sistema v situaciji prehitevanja (COLREGs pravilo 13), primer 6 pa simulira situacijo križanja, z vrednostjo RB med 90 in 112,5°. Pri simulaciji se opazuje odziv modela, če upošteva pravili COLREGs 8 in 19, ki zahtevata, da se mora plovilo, ki samo z radarjem zazna prisotnost drugega plovila, izogibati spremembi kurza proti opazovanemu plovilu, če je opazovano plovilo na strani prečnice lastnega plovila, ali proti njegovi krmi [29]. Grafični prikaz relativnega gibanja opazovanega plovila je za vsako študijo primera prikazan na sliki 10.

Tabela 8. Začetni podatki lastnega plovila.

| | Primer 2 | Primer 3 | Primer 4 | Primer 5 | Primer 6 |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Status plovila | Motorni pogon | Motorni pogon | Motorni pogon | Motorni pogon | Motorni pogon |
| K [°] | 225 | 303 | 134 | 81 | 359 |
| V [vozli] | 20 | 13 | 10 | 23 | 17 |

Tabela 9. Začetni podatki opazovanega plovila.

| | Primer 2 | Primer 3 | Primer 4 | Primer 5 | Primer 6 |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Status plovila | Motorni pogon | Motorni pogon | Motorni pogon | Motorni pogon | Motorni pogon |
| K [°] | 160 | 313 | 193 | 82 | 330 |
| V [vozli] | 17 | 23 | 21 | 11 | 23 |
| dt [M] | 8 | 3.5 | 7.8 | 6.7 | 5 |
| ωt [°] | 270 | 146 | 48 | 80 | 99 |

Tabela 10. Začetni podatki srečanja.

| | Primer 2 | Primer 3 | Primer 4 | Primer 5 | Primer 6 |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| DCPA [M] | 0.73 | 0.03 | 0.9 | 0.01 | 0.49 |
| TCPA [min] | 23.85 | 20.11 | 25.8 | 33.49 | 25.8 |
| Položaj CPA | negativno | pozitivno | pozitivno | negativno | negativno |
| RB [°] | 45 | 203 | 274 | 359 | 100 |
| Navigacijska situacija | Križanje | Prehitevanje | Križanje | Prehitevanje | Križanje |

Tabela 11. Nov relativni položaj opazovanega plovila z uporabo časovnega zamika.

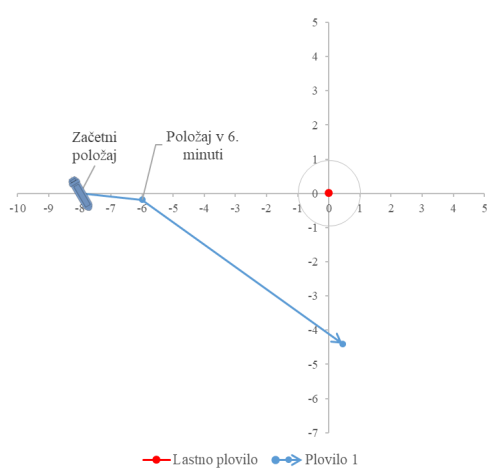
| | Primer 2 | Primer 3 | Primer 4 | Primer 5 | Primer 6 |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Časovni zamik [min] | 6 | 6 | 12 | 20 | 11 |
| ω [°] | 268.3 | 146.2 | 53.6 | 79.9 | 94.9 |
| d [M] | 6.01 | 2.46 | 4.24 | 2.70 | 2.9 |
| RB [°] | 43.252 | 203.2 | 279.602 | 358.876 | 95.9 |

Tabela 12. Vhodni parametri in izračunana odločitev.

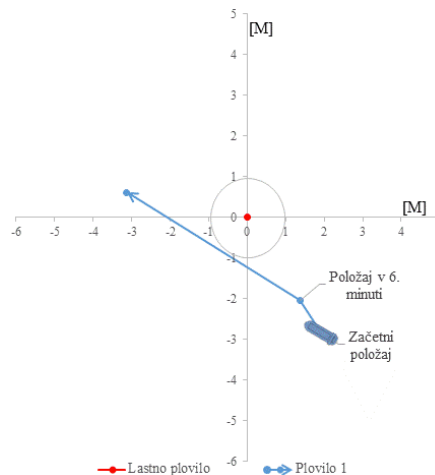
| | Primer 2 | Primer 3 | Primer 4 | Primer 5 | Primer 6 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| DCPA [M] | -0.73 | 0.03 | 0.90 | -0.01 | -0.49 |
| AP [M] | 6.01 | 2.46 | 4.24 | 2.70 | 2.90 |
| RB [°] | 43.25 | 203.22 | 279.60 | 358.8 | 95.89 |
| V [vozli] | 20 | 13.00 | 10.00 | 23 | 17.00 |
| Sprememba kurza | 47.5 | 20 | 60 | 61.6 | -41.7 |

Tabela 13. Ponovna ocena tveganja trčenja.

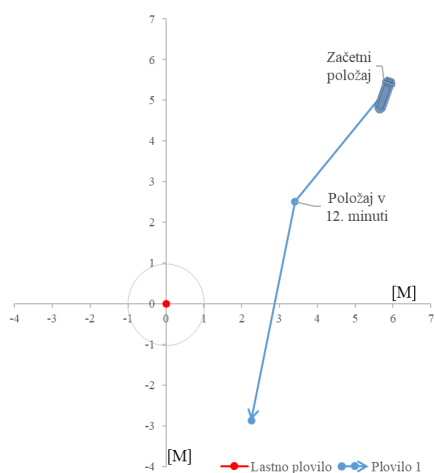
| | Primer 2 | Primer 3 | Primer 4 | Primer 5 | Primer 6 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| DCPA [M] | 3.4 | 1.1 | 2.8 | 2.6 | 2.8 |
| TCPA [min] | 9.6 | 12.7 | 17.3 | -0.2 | 1.9 |



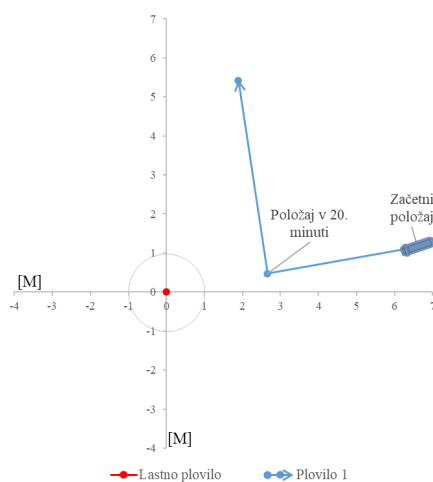
(a)



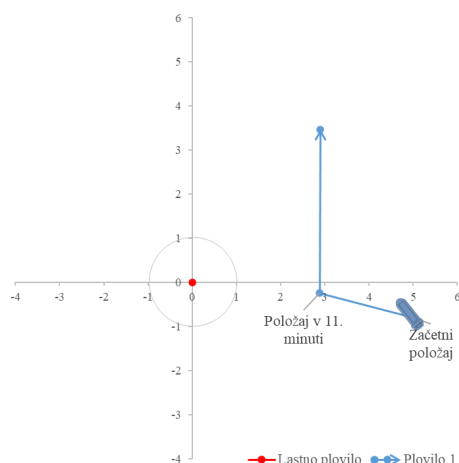
(b)



(c)



(d)



(e)

Slika 10. Načrtovana trajektorija opazovanega plovila: **(a)** študija primera 2, **(b)** študija primera 3, **(c)** študija primera 4, **(d)** študija primera 5, **(e)** študija primera 6.

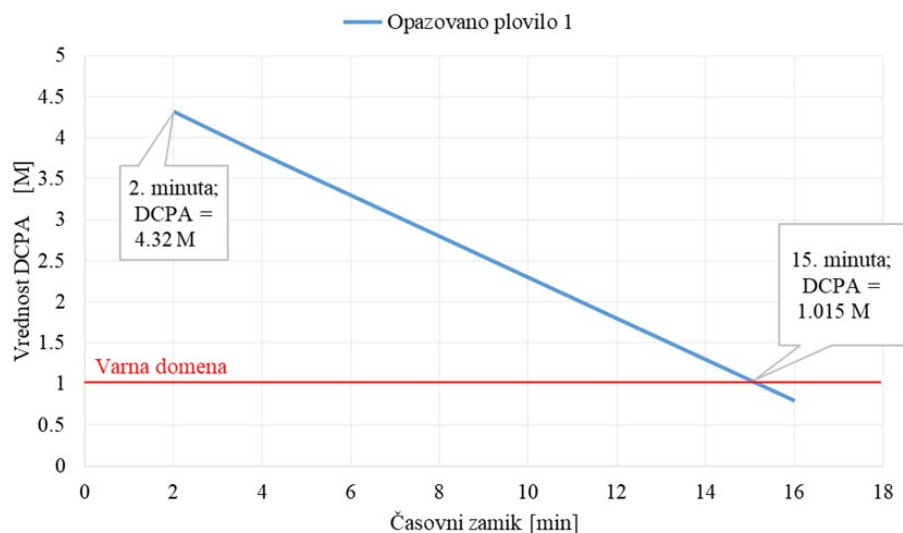
5. Diskusija

Simulacije prikazujejo izogibanje trčenju z opazovanim plovilom v treh različnih navigacijskih situacijah: srečanje z nasprotnih si strani, križanje in prehitevanje, pri čemer je lastno plovilo brez prednosti. Simulacije ne upoštevajo manevrskih značilnosti plovil in se izvajajo v okolju brez vremenskih vplivov, pri čemer se na primer ne upoštevajo veter in morski tokovi. Rezultati simulacij prikazujejo odločitev s subjektivno določenim časovnim zamikom, vendar ima v realnem času navigator običajno določen časovni okvir za izvedbo manevra izogibanja trčenju, ki zadostuje varnostnim merilom. Zato je bila kakovost modela ocenjena tudi za različne časovne zamike, da bi ugotovili, ali odločitev izpolnjuje začetno zahtevo po vrednosti DCPA. Časovni okvir pravičnih odločitev smo primerjali s TCPA in dobili odstotek časa, v katerem je model še vedno pravilno in v skladu z robnimi pogoji izračunal spremembo kurza. Študija primera 1: sprememba smeri je zadovoljivo izračunana v 15 minutah (glej tabelo 14). Po 15-minutnem časovnem zamiku je opazovano plovilo na razdalji manj kot 2 M, kar je tudi razdalja, pri kateri model odločanja ne deluje več v skladu z začetnimi pogoji.

Tabela 14. Sprememba kurza pri različnih časovnih zamikih, študija primera 1.

| Časovni zamik [min] | AP [M] | RB [°] | Sprememba kurza [°] |
|---------------------|--------|--------|---------------------|
| 4 | 7.53 | 1.15 | 55.2 |
| 6 | 6.55 | 1.25 | 55.2 |
| 8 | 5.57 | 1.40 | 55.2 |
| 10 | 4.58 | 1.60 | 55.2 |
| 12 | 3.60 | 1.92 | 54.9 |
| 14 | 2.62 | 2.47 | 55 |
| 15 | 2.13 | 2.94 | 55 |

Slika 11 prikazuje vrednost DCPA pri različnih časovnih zamikih. Iz slike je razvidno, da model izračuna pravilne odločitve v časovnem okviru 15 min, kar je 77 % celotnega razpoložljivega časa od začetka opazovane situacije pri izračunu DCPA, ki je v simulacijski študiji primera 1 znašal 19 min.

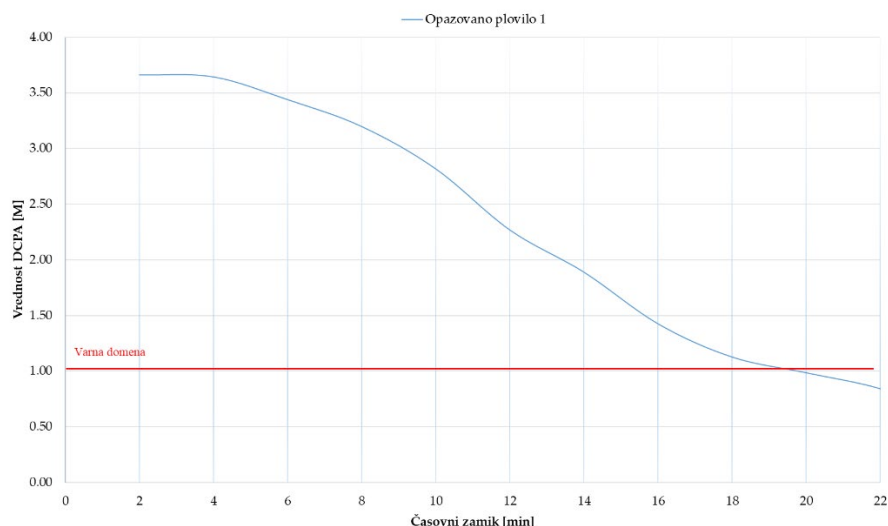


Slika 11. Izračunani DCPA pri različnih časovnih zamikih.

Študija primera 2: tabela 15 prikazuje spremembo kurza ob različnih časovnih zamikih. Varnostni pogoj DCPA (slika 12) dokazuje, da FIS izračuna pravilne odločitve v časovnem okviru med 2. in 16. minuto. Pri časovni zamudi 18 min je sprememba kurza manjša od 30°, kar po Cockcroftu [9] ne velja za ustrezno spremembo kurza. V 22 min je AP opazovanega plovila 1 M, izogibanje na tej razdalji pa predstavlja veliko tveganje za trčenje plovil, saj je DCPA manj kot 1 M. Model izračuna pravilne odločitve v 67 % celotnega razpoložljivega časa od začetka opazovane situacije.

Tabela 15. Sprememba kurza pri različnih časovnih zamikih, študija primera 2.

| Časovni zamik [min] | AP [M] | RB [°] | Sprememba kurza [°] |
|---------------------|--------|--------|---------------------|
| 2 | 7.34 | 44.52 | 40.9 |
| 4 | 6.67 | 43.95 | 45.5 |
| 6 | 6.01 | 43.25 | 47.5 |
| 8 | 5.34 | 42.38 | 49.2 |
| 10 | 4.68 | 41.26 | 47.6 |
| 12 | 4.03 | 39.78 | 40.2 |
| 14 | 3.37 | 37.71 | 36.2 |
| 16 | 2.72 | 34.66 | 26.5 |
| 18 | 2.09 | 29.72 | 20 |
| 20 | 1.48 | 20.62 | 20 |
| 22 | 0.96 | 0.45 | 19.5 |

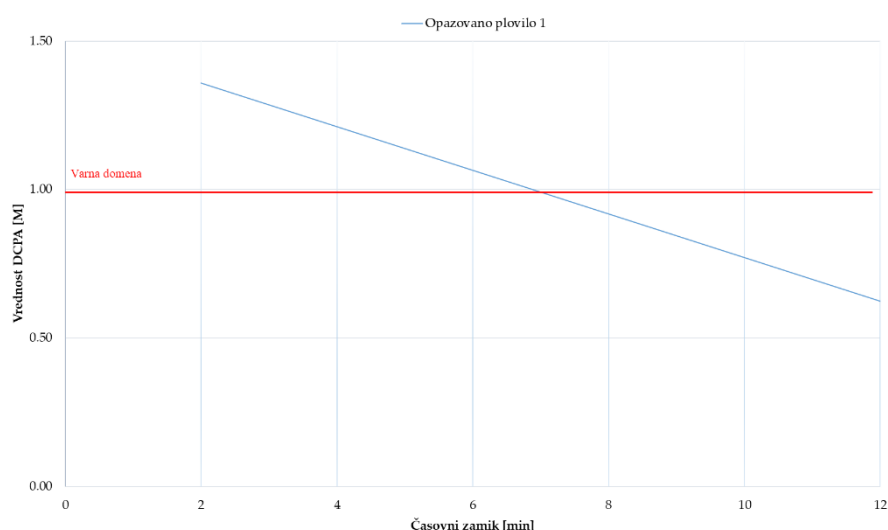


Slika 12. Izračunani DCPA pri različnih časovnih zamikih.

Študija primera 3: v tem primeru je opazovano plovilo brez prednosti, ki krši COLREGs pravila. Rezultat manevra izogibanja kaže, da se mehki inferenčni sistem dobro odziva tudi v nujnih primerih (tabela 16). Slika 13 prikazuje vrednost DCPA pri različnih časovnih zamikih. Model se dobro odziva do 7. minute časovnega zamika, vsaka sprememba kurza po tem času, pa bi ogrozila varnost plovil.

Tabela 16. Sprememba kurza pri različnih časovnih zamikih, študija primera 3.

| Časovni zamik [min] | AP [M] | RB [°] | Sprememba kurza [°] |
|---------------------|--------|--------|---------------------|
| 2 | 3.15 | 203.06 | 20 |
| 4 | 2.80 | 203.13 | 20 |
| 6 | 2.46 | 203.22 | 20 |
| 8 | 2.11 | 203.34 | 20 |
| 10 | 1.76 | 203.51 | 20 |



Slika 13. Izračunani DCPA pri različnih časovnih zamikih.

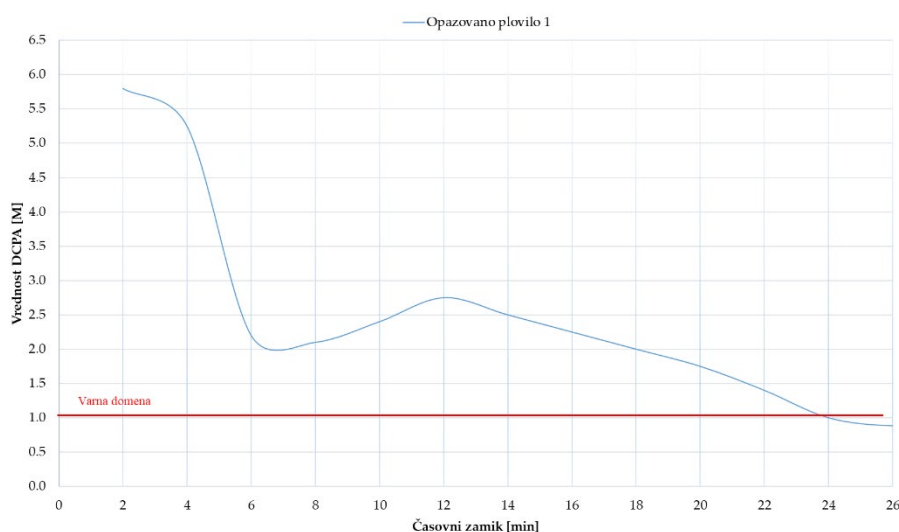
Izogibanje nevarnega plovila, ki krši pravila izogibanja, je opravljeno v skladu s praviloma 8 in 19, torej izogibanje na stran, kjer ni opazovanega plovila, v tem primeru v desno. Varna ladijska domena je izpolnjena v omejenem časovnem intervalu, v 8. minuti opazovanja, ko je opazovano plovilo na razdalji 2.1 M, izračunana sprememba kurza

ne zadosti kriterijem varne ladijske domene, zato je ta pogoj le delno potrjen. Model izračuna ustrezne odločitve le v 35 % celotnega časa, ki je na voljo od začetka opazovane situacije.

Študija primera 4: primer srečanja s plovilom z leve strani. Ker je opazovano plovilo omejeno z ugrezom, se mu mora lastno plovilo izogniti. V skladu s COLREGs pravilom 8 je model predlagal spremembo smeri na desno stran. Sprememba manevra je dovolj velika, da jo zazna radar. Tabela 17 prikazuje spremembo kurza pri različnih časovnih zamikih, slika 14 pa prikazuje vrednost DCPA pri različnih časovnih zamikih. Rezultati kažejo, da se model dobro odziva od 2. do 24. minute. V 24. minuti opazovanja je razdalja do opazovanega plovila 1,05 M. Model izračuna pravilne odločitve v 89 % celotnega razpoložljivega časa od začetka opazovane situacije.

Tabela 17. Sprememba kurza pri različnih časovnih zamikih, študija primera 4.

| Časovni zamik [min] | AP [M] | RB [°] | Sprememba kurza [°] |
|---------------------|--------|--------|---------------------|
| 6 | 6.01 | 275.9 | 41 |
| 12 | 4.24 | 279.6 | 60 |
| 18 | 2.51 | 288.33 | 62.2 |
| 24 | 1.05 | 326.29 | 95 |

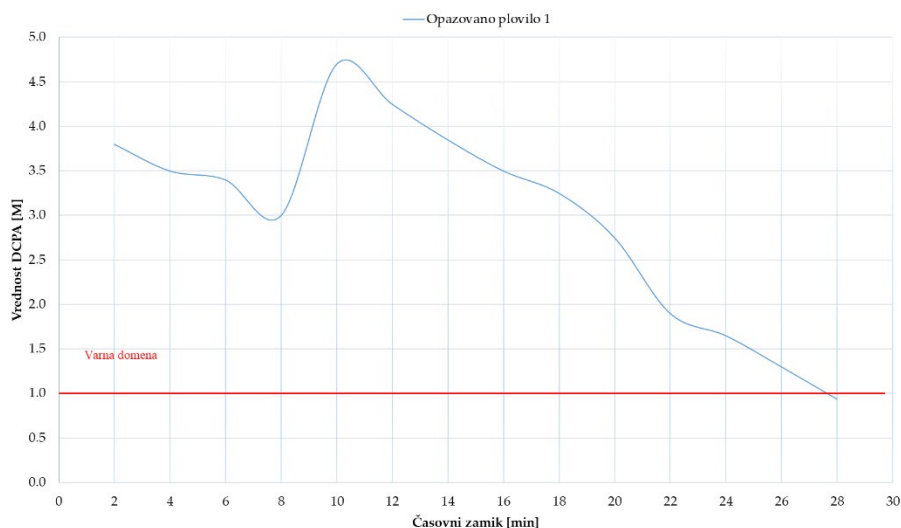


Slika 14. Izračunani DCPA pri različnih časovnih zamikih.

Študija primera 5: v tem primeru je lastno plovilo v položaju prehitevanja opazovanega plovila. V skladu s COLREGs pravilom 13 je prehitevanje mogoče v obe smeri. Model ponudi odločitev o izogibanju v desno. Tabela 18 prikazuje izračunano spremembo smeri za različne časovne zamike.

Tabela 18. Sprememba kurza pri različnih časovnih zamikih, študija primera 5.

| Časovni zamik [min] | AP [M] | RB [°] | Sprememba kurza [°] |
|---------------------|--------|--------|---------------------|
| 8 | 5.1 | 358.9 | 19.8 |
| 12 | 4.3 | 358.95 | 61.7 |
| 16 | 3.5 | 358.92 | 61.8 |
| 20 | 2.7 | 358.88 | 61.8 |
| 24 | 1.9 | 358.79 | 95.5 |
| 28 | 1.1 | 358.57 | 95.3 |



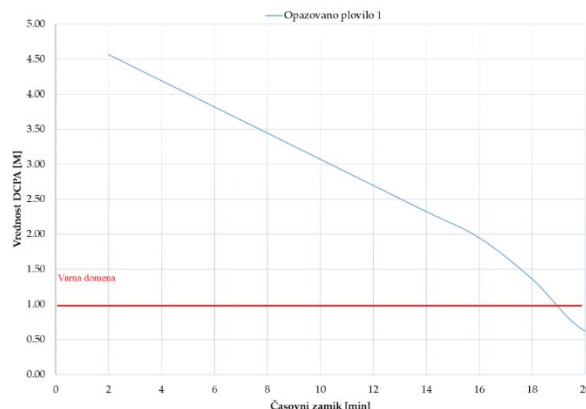
Slika 15. Izračunani DCPA pri različnih časovnih zamikih.

Opazovano stanje DCPA kaže, da se mehko sklepanje ustrezno odziva v časovnem okviru med 2. in 28. minuto (slika 15). V 28. minuti je plovilo na razdalji 1,1 M in model izračuna spremembo smeri $95,3^\circ$, vendar zaradi prekratke razdalje manever ne doseže varne razdalje srečanja, saj je izračunani DCPA 0,9372 M. Ustrezen interval izogibanja je med 2. in 27. minuto časovnega zamika. Model izračuna ustrezne odločitve v 80 % celotnega razpoložljivega časa od začetka opazovane situacije.

Študija primera 6: primer obravnava situacijo srečanja z boka. V tem primeru je sprememba smeri proti opazovanemu plovilu nevarna. Tabela 19 prikazuje izračunano spremembo kurza pri različnih časovnih zamikih oziroma vhodnih parametrih mehkega inferenčnega sistema. Sprememba kurza je zadovoljujoče izračunana v časovnem intervalu od 2. do 17. minute časovnega zamika, kot je prikazano na sliki 16. Pogoji varnega srečanja je izpolnjen na vseh razdaljah, razen na razdalji, manjši od 1,7 M v 18. minuti. Model izračuna ustrezne odločitve v 66 % celotnega časa, ki je na voljo od začetka opazovane situacije.

Tabela 19. Sprememba kurza ob različnih časovnih zamikih, študija primera 6.

| Časovni zamik [min] | AP [M] | RB [°] | Sprememba kurza [°] |
|---------------------|--------|--------|---------------------|
| 2 | 4.62 | 99.53 | -41.7 |
| 4 | 4.23 | 98.98 | -41.7 |
| 6 | 3.85 | 98.31 | -41.7 |
| 8 | 3.47 | 97.50 | -41.7 |
| 10 | 3.09 | 96.49 | -41.7 |
| 12 | 2.71 | 95.20 | -41.7 |
| 14 | 2.33 | 93.48 | -41.7 |
| 16 | 1.95 | 91.09 | -41.7 |
| 17 | 1.76 | 89.52 | -27.6 |



Slika 16. Izračunani DCPA pri različnih časovnih zamikih.

Pri načrtovanju manevra za izogibanje trčenju je sprememba kurza najpogostejši in najučinkovitejši ukrep za preprečitev situacije nevarnega približevanja, zlasti na odprtem morju. V skladu s pravili COLREGs mora biti manever izveden pravočasno in jasno viden drugim plovilom v bližini. Vendar pa razdalja, pri kateri naj bi plovila začela manever izogibanja – zlasti v neugodnih vremenskih razmerah ali na omejenih območjih – ni določena, zato je odločitev prepuščena navigatorju.

Pomemben dejavnik, ki ga je treba upoštevati, je manevrska sposobnost plovila, kjer na sposobnost obračanja vplivajo vrsta plovila, njegova velikost in stanje natovorjenosti. Poleg tega na gibanje plovila in s tem na spremembo kurza vplivajo tudi zunanji dejavniki, kot so veter in lokalni tokovi s svojo smerjo in močjo, saj lahko otežijo želeno spremembo kurza v načrtovanem času. Zlasti večji trim na krmi lahko bistveno spremeni značilnosti obnašanja plovila v vetru. Lokalni tokovi lahko povzročijo zanos plovila ali vplivajo na njegovo hitrost, njihov vpliv pa je odvisen od podvodne površine plovila, ki je izpostavljena toku, ter od njegove smeri. V plitvih vodah se krog obračanja poveča, vendar je sposobnost ohranjanja kurza boljša, razen če nizka hitrost dodatno ne zmanjša odzivnosti plovila na spremembe kurza. Zato mora navigator pri načrtovanju spremembe kurza upoštevati vse vplive na manevrske sposobnosti plovila, da lahko pravočasno izvede učinkovit in varen manever na varni razdalji od opazovane ladje.

6. Zaključek

Prispevek prikazuje računalniške napovedi izogibanja trčenju na morju z združitvijo tradicionalne metode ročnega radarskega vrisovanja z metodo umetne inteligence – mehko logiko. Prednost mehke logike je v sprejemanju odločitev na podlagi netočnih podatkov, ki jih ni mogoče opisati z matematičnimi izrazi, saj so izraženi jezikovno. Mehka logika tako posnema človeški način razmišljanja, ki je sposoben reševanja kompleksnih nalog, čeprav lahko vsebuje veliko negotovosti. Posebnost odločitvenega modela je njegovo uglasovanje z rezultati baze pravilnih rešitev, pridobljenih z uporabo tradicionalne metode ročnega radarskega vrisovanja. Na tej osnovi so bile oblikovane mehke množice in mehka pravila.

Pri preverjanju modela pa so se pokazale nekatere pomanjkljivosti: na območjih, kjer se odločitve spreminjajo iz pozitivnih v negativne in obratno, lahko pride do večjih napak, zato je treba oblikovati dodatne mehke množice za zmanjšanje teh napak. Poleg tega je postopek validacije mehkega inferenčnega sistema (mehkih množic in pravil) dolgotrajen, preden je sistem sposoben sprejemati uporabne odločitve.

Večparametrski odločitveni model za izogibanje trčenju uporablja parametre, pridobljene na podlagi približevanja plovil, ne da bi upošteval manevrske sposobnosti plovila ter meteorološke in oceanografske parametre, ki bi lahko dodatno vplivali na izbiro manevra izogibanja ali na stopnjo spremembe smeri in/ali hitrosti lastnega plovila. V simulacijah je uporabljeno tudi morsko okolje brez navpičnih in/ali vodoravnih omejitev (obala, globina); slednje lahko dodatno vpliva na izbiro manevra izogibanja, zlasti na kurz izogibanja. Nadaljnje raziskave bodo osredotočene na izogibanje s pomočjo hitrosti plovila ter kombinacije spremembe hitrosti in smeri lastnega plovila kot tudi na izogibanje trčenju v situacijah z več plovili.

Pomemben segment nadaljnjih raziskav in testiranj predstavlja integracija odločitvenega modela v vsa plovila, ki so vključena v navigacijsko situacijo, s čimer bi se zmanjšala verjetnost kršitev pravil izogibanja med sodelujočimi plovili.

Viri in literatura

1. Nielsen, M.; Petersen, J. Collision avoidance at sea—Practice and problems. In Proceedings of the 20th European Annual Conference on Human Decision, Kongens Lyngby, Denmark, 2001.
2. Chauvin, C. Human factors and maritime safety. *J. Navig.* 2011, *64*, 625–632.

3. MAIB. *Accident Report MV P&O Nedlloyd Vespucci and Motor Yacht Wakhuna*; Report No. 28; Marine Accident Investigation Branch: Southampton, UK, 2003.
4. IMO Resolution. *Strategy for the Development and Implementation of E- Navigation, MSC 85, Anex 20*; IMO Publishing: London, UK, 2009.
5. Bole, A.G.; Wall, A.D.; Norris, A. *Radar and ARPA Manual: Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2013.
6. Perera, L.; Carvalho, J.; Soares, C. Fuzzy logic based decision making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions. *J. Mar. Sci. Technol.* 2011, *16*, 84–99.
7. Szlapczynski, R.; Szlapczynska, J. Review of ship safety domains: Models and applications. *Ocean Eng.* 2017, *145*, 277–289.
8. Wang, X.; Liu, Z.; Cai, Y. The ship manoeuvrability based collision avoidance dynamic support system in close-quarters situation. *Ocean Eng.* 2017, *146*, 486–497.
9. Cockcroft, A.N.; Lameijer, J.N.F. *Guide to the Collision Avoidance Rules*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2003.
10. Statheros, T.; Howells, G.; McDonald-Maier, K. Autonomous Vessel Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques. *J. Navig.* 2008, *61*, 129–142.
11. Perera, L.P.; Carvalho, J.P.; Soares, C.G. Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision/Action Formulation. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2012, *37*, 204–219.
12. Perera, L.P.; Carvalho, J.; Soares, C.G. Solutions to the failures and limitations of Mamdani fuzzy inference in ship navigation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2014, *63*, 1539–1554.
13. Wu, B.; Cheng, T.; Yip, T.L.; Wang, Y. Fuzzy logic based dynamic decision-making system for intelligent navigation strategy within inland traffic separation schemes. *Ocean Eng.* 2020, *197*, 106909.
14. Wu, B.; Yip, T.L.; Yan, X.; Soares, C.G. Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system. *Ocean Eng.* 2019, *187*, 106152.
15. Hu, Y.; Park, G.K. Collision risk assessment based on the vulnerability of marine accidents using fuzzy logic. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2020, *12*, 541–551.
16. Zhuo, Y.; Tang, T. An Intelligent Decision Support System to Ship Anti-Collision in Multi-Ship Encounter. In Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 25–27 June 2008.
17. Su, C.; Chang, K.; Cheng, C. Fuzzy Decision on Optimal Collision Avoidance Measures for Ships in Vessel Traffic Service. *J. Mar. Sci. Technol. Taiwan* 2012, *20*, 38–48.
18. Pietrzykowski, Z.; Magaj, J.; Wołesza, P.; Chomski, J. *Fuzzy Logic in the Navigational Decision Support Processes onboard a Sea—Going Vessel*; ICAISC Part I, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, Germany, 2010.
19. Liu, Y.; Du, X.; Yang, S.; Yeung, D.; Liu, Z.; Wang, X.; Yan, H. The design of a fuzzy-neural network for ship collision avoidance. *Adv. Mach. Learn. Cybern.* 2006, *3930*, 804–812.
20. Szlapczynski, R.; Szlapczynska, J. COLREGS Compliance in Evolutionary Sets of Cooperating Ship Trajectories. *Electron. J. Int. Group Reliab. Reliab. Theory Appl.* 2011, *2*, 11.
21. Lee, S.; Kwon, K.; Joh, J. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2004, *2*, 171–181.
22. Hu, Y.; Meng, X.; Zhang, Q.; Park, G.K. A real-time collision avoidance system for autonomous surface vessel using fuzzy logic. *IEEE Access* 2020, *8*, 108835–108846.
23. Zadeh, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 1973, *1*, 28–44.
24. Teodorović, D.; Vukadinović, K. *Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach (Vol. 13)*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012.
25. Mamdani, E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers* 1977, vol. C-26, no. 12, pp. 1182–1191.
26. Brcko, T.; Svetak, J. Fuzzy reasoning as a base for collision avoidance decision support system. *Promet Traffic Transp.* 2013, *25*, 555–564.
27. Naik, S.L.; Vimarshini, K.R. Prudent Ship Pilotage Using Trial Maneuver. In Proceedings of the 9th International Radar Symposium India, IRSI 13, Bangalore, India, 10–14 December 2013.
28. Stateczny, A. *Radar Navigation*; GTN: Gdańsk, Poland, 2011.
29. COLREG. *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*; IMO Publishing: London, UK, 1973.
30. CMA CGM Bridge Safety Manual—Safe Passing Distance; CMA CGM Group: Marseille, France, 2015.
31. Perera, L.P.; Carvalho, J.P.; Guedes Soares, C. Mamdani type fuzzy inference failures in navigation. IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Lisbon, Portugal, 26–29 July 2011.
32. Ni, S.; Liu, Z.; Cai, Y. Ship manoeuvrability-based simulation for ship navigation in collision situations. *J. Mar. Sci. Eng.* 2019, *7*, 90.
33. Nguyen, M.; Nguyen, V.; Tamaru, H. Automatic collision avoiding support system for ships in congested waters and at open sea. Control, Automation and Information Sciences International Conference (ICCAIS), Ho Chi Minh City, Vietnam, 26–29 November 2012.
34. Zhang, J.; Zhang, D.; Yan, X.; Haugen, S.; Soares, C.G. A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs. *Ocean Eng.* 2015, *105*, 336–348.
35. Pietrzykowski, Z.; Wołesza, P.; Borkowski, P. Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* 2017, *70*, 447–464.
36. Szlapczynski, R.; Szlapczynska, J. A Target Information Display for Visualising Collision Avoidance Manoeuvres in Various Visibility Conditions. *J. Navig.* 2015, *68*, 1041–1055.
37. Yan, X.; Chen, X.; Sang, L.; Zhang, D. A novel approach for assistance with anti-collision decision making based on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 2012 *226*(3), 250–259.
38. Hwang, C.N. The integrated design of fuzzy collision—Avoidance and H ∞ autopilots on vessels. *J. Navig.* 2002, *55*, 20.
39. Hu, L.; Naem, W.; Rajabally, E.; Watson, G.; Mills, T.; Bhuiyan, Z.; Salter, I. COLREGs-Compliant Path Planning for Autonomous Surface Vehicles: A Multiobjective Optimization Approach. *IFAC-PapersOnLine* 2017, *50*, 13662–13667.

40. Fang, M.C.; Tsai, K.Y.; Fang, C.C. A Simplified Simulation Model of Ship Navigation for Safety and Collision Avoidance in Heavy Traffic Areas. *J. Navig.* 2018, *71*, 837–860.
41. Huang, Y.; van Gelder, P.; Wen, Y. Velocity obstacle algorithms for collision prevention at sea. *Ocean Eng.* 2018, *151*, 308–321.
42. Kim, D.; Hirayama, K.; Okimoto, T. Distributed Stochastic Search Algorithm for Multi-ship Encounter Situations. *J. Navig.* 2017, *70*, 699–718.

Analiza fizioloških podatkov pilotov med simulacijo vplutja v luko z uporabo navtičnega simulatorja

Dejan Žagar, Matija Svetina, Tanja Brcko, Marko Perkovič, Franc Dimc, Andrej Košir

Prevod dela: Analysis of Marine-Pilot Biometric Data Recordings during Port-approach using a full-mission simulator. *Sensors*, 22(7), 2022.
<https://doi.org/10.3390/s22072701>

Povzetek: Namen študije je analizirati fiziološki odziv pomorskih pilotov in oceniti, ali predhodne izkušnje v fazi pristajanja vplivajo na njihov fiziološki odziv. Ponovitve imajo pomembno vlogo pri procesu odločanja udeležencev, kjer udeleženci med drugim pridobivajo tudi izkušnje. To se odraža v fiziološkem odzivu, npr. spremembi srčnega utripa ali elektrodermalne aktivnosti itd. Analizirali smo podatke dveh skupin udeležencev z različno stopnjo izkušenj pri isti simulirani nalogi pristajanja v pristanišče. Rezultati kažejo, da se fiziološki odčitki manj izkušenih udeležencev običajno razlikujejo v primerjavi z bolj izkušenimi, ki simulirano nalogo jemljejo resneje. Študija ponuja tudi vpogled v proces delovne obremenitve, vključno z motečimi dejavniki med opravljanjem naloge.

Ključne besede: navtični simulator; biometrične meritve; pomorski piloti; srčni utrip; elektrodermalna aktivnost

1. Uvod

V članku merimo fiziološke odzive pomorskih pilotov med simuliranim pristajanjem v Luki Koper. Cilj je analizirati podatke iz biosenzorjev za boljše razumevanje odziva udeležencev med simulacijo, kjer človeške napake lahko vodijo do potencialno nevarnih situacij [1].



Slika 1. Začaran krog obremenitve: vse višja kognitivna obremenitev tipično povzroči napake pod skupnim imenom "človeški faktor", kar v najbolj črnem scenariju lahko pripelje do kolizije.

Visoka delovna obremenitev, kot kažejo poročila o nesrečah ladij, je posledica različnih motečih dejavnikov, ki običajno zmanjšujejo pozornost častnika in podaljšujejo njegov odzivni čas tako pri nujnih kot tudi nenujnih situacijah. Nepričakovane motnje povzročajo visoko delovno obremenitev in predvsem nasičenost delovnega spomina, kar vodi v napačne človeške odločitve in napake človeškega dejavnika (slika 1). To pa nas lahko pripelje do potencialno nevarnih situacij in v najslabšem možnem scenariju tudi do trčenja [1]. Glavni mehanizem izboljšanja uspešnosti s ponovitvami simulacij temelji na avtomatizaciji vedenjskih procesov in postopnem razbremenjevanju delovnega spomina. Z več ponovitvami postanejo nekateri postopki avtomatizirani, kar zmanjša kognitivno obremenitev, pri čemer se sprostijo več delovnega spomina za druge naloge; to se kaže v višji ravni uspešnosti. Zato smo simulirali tipično nalogo pomorskih pilotov in analizirali odzive udeležencev na ponavljajoči se dogodek.

Glede na povedano najdemo potrditev tudi v literaturi. Leta 2021 je v Sueškem prekopu prišlo do nesreče. Egipčanske oblasti so kot vzroke navedle močne sunke vetra in hkrati namignile na »tehnične ali človeške napake« [2]. Čeprav ni bilo smrtnih žrtev, je nesreča povzročila ogromne stroške za svetovno trgovino. Dogodek v Suezu je bil le eden izmed mnogih v zadnjih letih. Po podatkih Evropske agencije za pomorsko varnost (EMSA) je bilo med letoma 2014 in 2019 zabeleženih skoraj 20.000 poročil; 28 % jih je imelo resne ali zelo resne posledice. Najpogostejše so bile vključene tovarne ladje, sledile so potniške ladje. Skupno je bilo 41,5 % primerov v pristaniških območjih, kjer je prisotnost pilota obvezna. Večina primerov je vključevala človeško napako kot primarni vzrok [3].

Plovba v pristanišču je specifična in jo pogosto spremlja utrujenost zaradi stalne situacijske zavednosti o omejitvah, kot so širina in globina kanala, promet v pristanišču, vreme, tokovi itd., kar vse dodatno obremenjuje kognitivne sposobnosti. Pilot, ki je seznanjen z lokalnimi plovnimi razmerami, pomaga kapitanu pri varnem krmarjenju ladje do priveza.

Na tej točki se pojavi potencialni izziv, saj se številne študije tega področja zanašajo na mlade neizkušene študente kot udeležence v svojih raziskavah, zato bomo obravnavali tudi vprašanje: ali so fiziološki odzivi neizkušenih udeležencev (študentov) v realnem času drugačni od tistih pri izkušenih?

Nekatere raziskave, kot na primer študija na Šanghajski pomorski univerzi, je proučevala vpliv socialne kognicije in tolerance tveganja na varnostno vedenje pomorskih pilotov. Rezultati so pokazali, da zavedanje o nevarnosti manevra neposredno negativno vpliva na odziv, medtem ko ima toleranca tveganja posreden negativni vpliv na varnostno vedenje pilotov [4]. Zaznavanje tveganja vpliva na nasičenost delovnega spomina pilota, kar posredno vodi do človeških napak [5]. Nasičenost delovnega spomina častnikov povzroča situacijska zavednost, prepoznavanje informacij, določanje prioritet in proces odločanja med nalogo, npr. navigacijo in izogibanjem trčenju. Poleg tega različni moteči dejavniki, ki preusmerjajo pozornost častnika, povzročajo visoko delovno obremenitev. Tipični moteči dejavniki med navigacijo so: alarmi na mostu, različni klici in elektronska sporočila, ki vplivajo na situacijsko zavednost navigatorja [6–8]. Gostota motečih dejavnikov (v izbranem časovnem okvirju) povečuje kognitivno obremenitev. Iz objektivnih razlogov se raziskave o človeških dejavnikih v navigaciji in/ali izogibanju trčenj, vključno z oceno kognitivne obremenitve med nalogo, običajno izvajajo v navtičnem simulatorju. Sorodna literatura predvideva tri tipične metodološke pristope za zbiranje podatkov: osnovni (klasični) pristop, neposredno merjenje odzivov in posredno merjenje odzivov udeležencev. Prednosti in slabosti posameznega pristopa bomo pojasnili v naslednjih poglavjih. Po natančnem pregledu razpoložljive literature smo se odločili za prilagojen posredni metodološki pristop, da bi zmanjšali negativno vzburljenje udeležencev, artefakte in napačne odčitke zaradi samega nošenja senzorjev.

1.1. Klasični pristop

Osnovni pristop vključuje merjenje splošnega odziva udeležencev na čas odločanja med scenarijem trčenja, kot denimo v primeru Pomorskega inštituta v Koreji [9]. Daljši čas odločanja kot običajno nakazuje visoko kognitivno obremenitev. Prednost tega pristopa je, da se uporabljeni algoritem zlahka integrira z obstoječimi navigacijskimi instrumenti, kot sta avtomatski radar za plotiranje (ARPA) in elektronski prikazovalni informacijski sistem (ECDIS), na podlagi katerega ocenimo odzivni čas častnikov. Poleg odzivnega časa študije, ki uporabljajo ta pristop, pogosto vključujejo tudi samoocenjevalne vprašalnike, imenovane indeks delovne obremenitve (TLX), orodje za ocenjevanje čustvenega stanja udeležencev v določenem trenutku med eksperimentom [10–12]. Indeks TLX je dobro znan, vendar je primeren le, če je udeleženec zmožen samostojno zaznati svoje čustveno stanje.

1.2. Neposredno merjenje odzivov

Kvantifikacija kognitivne obremenitve in stresa častnikov med navigacijsko nalogo z opazovanjem stresnega hormona kortizola in/ali možganskih valov omogoča neposreden vpogled v trud in napor udeležencev med nalogo. Vendar pa ima metoda kortizola časovni zamik, saj je najvišja raven stresnega hormona dosežena šele 40 minut po dogodku, zato je malo verjetno, da bi bila ta metoda učinkovita na ladjah [13].

Sodobno spremljanje možganskih valov z elektroencefalogramom (EEG) se sooča s podobnimi izzivi. Metoda je pretežno invazivna kljub najodobnejšim čeladam in senzorjem in je zelo občutljiva na artefakte in napačne odčitke. Interpretacija rezultatov z invazivnimi senzorji je zahtevna zaradi negativnega učinka vzburljenja, ki ga povzroči sam merilni senzor. Takšen pristop v fazi naknadne obdelave običajno vključuje algoritme nevronske mreže, ki med strojnim učenjem sčasoma prepoznajo šum v podatkih [14–16].

1.3. Posredno merjenje odzivov

Prepoznavanje in določanje prioritet pomembnih navigacijskih informacij v delovnem spominu častnikov, situacijsko zavedanje in sprejemanje ustreznih odločitev lahko posredno vplivajo na telesni odziv udeležencev, kar se kaže v povečanem srčnem utripu (HR), volumnu krvi v tkivu (BVP), elektrodermalni aktivnosti (EDA) in premeru zenice. Sorodna literatura ugotavlja, da so vedenjski vzorci lahko vzrok sprememb, ki jih merimo, kar je seveda predmet našega raziskovanja [17–19].

BVP podatek temelji na volumnu krvi, ki teče skozi tkivo ob vsakem pulzu. Senzor fotopletizmografije (PPG) zazna spremembe z osvetljevanjem kože (tkiva) z infrardečo svetlobo. Rdeča svetloba se absorbira v hemoglobinu rdečih krvničk in odbija od drugih tkiv. Količina svetlobe, ki se vrne do fotodetektorja PPG, je sorazmerna s relativnim volumnom krvi v tkivu. Jakost (amplituda) BVP se izpelje iz trenutno izmerjenega signala in označuje trenutni relativni pretok krvi v tkivu. Enote merjenja so normalizirane in nimajo dodatnega fizikalnega pomena. HR (srčni utrip) se izračuna iz posameznih pulzov BVP signala, z merjenjem razdalje (časa) med zaporednimi pulzi.

EDA (elektrodermalna aktivnost) se nanaša na električne spremembe, izmerjene na površini kože, ki so posledica signalov iz možganov. EDA signal vsebuje dve glavni komponenti. Prva komponenta je tonična ali osnovna raven EDA, ki se nanaša na počasneje spreminjajoče se komponente signala. Najpogostejše merilo za to komponento je raven prevodnosti kože (SCL), pri čemer spremembe SCL odražajo splošne spremembe v avtonomni stimulaciji. Druga komponenta je fazna komponenta, ki se nanaša na hitro spreminjajoči se signal v odzivu prevodnosti kože.

Nastavitev praga zaznavanja spremembe je odvisna od eksperimentalnih pogojev [20]. Navedeni parametri se običajno uporabljajo za določanje stopnje vznburjenosti, vendar valence pa kljub vsemu s trenutno obdelavo ne izluščimo [21].

Študije, ki uporabljajo posredni pristop, pogosto vključujejo tudi sledenje očem kot biometrični in/ali fiziološki senzor, tipično pa v pomorskih simulacijah merijo število fiksacij pogleda na določen predmet med nalogo in trajanje posamezne fiksacije. Večje število fiksacij in daljše trajanje fiksacij nakazujeta višjo kognitivno obremenitev. Pomanjkljivosti so večinoma povezane s težavami pri zbiranju podatkov, kot so zahteve po stalnih svetlobnih pogojih ter dejstvo, da morajo udeleženci med meritvijo sedeti relativno pri miru [22–24].

V zadnjem času se z razvojem brezžičnih sistemov dodatno vključujejo nosljivi senzori in elektrode za biometrične meritve, kot so zapestnice, prsni senzori in senzori na prstih za spremljanje telesnega odziva [25–27]. Prednost tega pristopa je nizka invazivnost in posledično nizka motnja (šum) v podatkih zaradi nošenja senzorjev. Podoben pristop je bil uporabljen v [28], kjer so stres in napor na posadki kontejnerskih ladij merili z omenjenimi neinvazivnimi senzori, kjer je izmerjeni srčni utrip pričakovano imel bistveno nižjo vrednost med plovbo po odprtem morju kot med pristajanjem ali plovbo po reki.

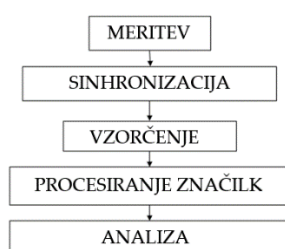
Članek je razdeljen na pet delov. Po uvodu in pregledu področja (poglavje 1) so v 2. poglavju predstavljene raziskovalne metode. V poglavju 3 so rezultati meritev, nato pa v 4. poglavju sledi razprava. Sklepne ugotovitve so predstavljene v poglavju 5.

2. Metodologija

Za odpravo pomanjkljivosti iz prejšnjih raziskav smo zasnovali in izvedli prilagojen posredni pristop. Poudarek na oceni odziva udeležencev med simulacijo pristajanja je bil na uporabi neinvazivnih senzorjev. Glavni cilj študije je bil ugotoviti, kako izkušnje vplivajo na njihov fiziološki odziv med manevriranjem in pristajanjem. Primarne opazovane vrednosti HR, EDA in BVP, so bile naknadno obdelane in modelirane. Prednost uporabe neinvazivnega senzora je bila v zmanjšanju šuma v zbranih podatkih, kar je poenostavilo naknadno obdelavo in izboljšala natančnost rezultatov. Pomembno je poudariti, da nismo modelirali specifičnih psihofizioloških stanj, kot sta stres ali kognitivna obremenitev, ampak smo signale primerjali neposredno.

Uporabili smo večsenzorsko zapestnico Empatica E4 [20], neinvazivno in nemoteče orodje za zbiranje fizioloških podatkov. Udeleženci so v intervjujih običajno omenili, da so po nekaj minutah pozabili, da nosijo senzor, kar potrjuje domnevo, da je moteči učinek senzora minimalen. Zbiranje podatkov je bilo sprva brezžično in v realnem času. Zapestnica je bila povezana prek Bluetootha s pametnim telefonom s 5G Wi-Fi internetno povezavo. Prednost te konfiguracije je bila v možnosti sprotne spremljanja in prenosa podatkov. Vendar smo opazili več pomanjkljivosti: udeleženec je lahko po nesreči izklopil zapestnico in/ali telefon, naprava se je lahko med meritvijo začela samodejno posodablјati, Bluetooth povezava se je lahko prekinila, prav tako Wi-Fi povezava itd. Na žalost smo v teh primerih izgubili nekaj dragocenih podatkov, zato smo prešli na robustnejši način, pri katerem so bili podatki shranjeni lokalno v notranjem pomnilniku zapestnice; po simulaciji so bili preneseni na računalnik.

Osnovna obdelava podatkov je prikazana na sliki 2. Podatkovni nabor za vsako seanso je sestavljen iz 7 Mb podatkov BVP, 0,5 Mb podatkov EDA in 0,1 Mb podatkov HR. Pretok podatkov in vizualizacija sta bila v realnem času, obdelava podatkov pa ne in je bila izvedena naknadno. Algoritem za ocenjevanje in primerjavo v Pythonu je nizke računske moči in ga je v teoriji mogoče izvajati v realnem času na katerikoli napravi, vključno z mobilnimi.



Slika 2. Procesiranje podatkov: v kasnejši obdelavi podatkov smo zaradi lažje strojne obdelave pred statistično analizo podatke najprej uredili, sinhronizirali ter poenotili vzorčenje.

2.1. Podatki iz merilnikov

Za oceno podatkov med eksperimentom smo obravnavali tri veličine. Prva je volumen krvi v tkivu (BVP) s frekvenco vzorčenja 64 Hz. Jakost razširitve krvnih žil (vazodilacija) je izražena z amplitudo signala, ki se uporablja kot kazalnik fiziološkega odziva med izvajanjem naloge. Druga veličina je bila vrednost srčnega utripa (HR), ki je bila izračunana iz intervala med udarci BVP. Frekvenca vzorčenja HR je bila 1 Hz. Merilna zapestnica je opremljena z enim parom srebrnih elektrod za spremljanje elektrodermalne aktivnosti EDA s frekvenco vzorčenja 4 Hz. Poleg BVP, HR in EDA je merilnik spremljal tudi telesno temperaturo in pospešek zapestja s frekvenco vzorčenja 32 Hz. Merilnik je bil sinhroniziran z internetnim časom za natančno časovno usklajenost.

Simulator mostu je imel tudi okoljske senzorje, ki so zbirali podatke o vlažnosti, temperaturi in hrupu v prostoru. Okoljske meritve so zagotavljale enake razmere za vse udeležence [29]. Za zbiranje osebnih podatkov udeležencev, kot so spol, starost in predhodne izkušnje z navigacijo, pa je bil uporabljen pisni vprašalnik.

2.2. Zasnova eksperimenta

Eksperiment je bil izveden na Fakulteti za pomorstvo in promet Univerze v Ljubljani, kjer je nameščen simulator Wärtsilä NTPRO 5000, ki vključuje sodoben in ergonomsko zasnovan navigacijski most, štiri video projektorje spredaj in dva LCD monitorja zadaj, ki zagotavljajo 270° vidnega kota. Poleg tega ima tri simulirane komandne mostove vlačilcev Voight-Schneider, ki med simulacijo asistirajo veliki kontejnerski ladji med manevriranjem. Okolje simulatorja je bilo klimatizirano in prezračevano za ohranjanje stalne temperature v prostoru med eksperimentom. To se je izkazalo za pomembno za zmanjšanje šuma pri meritvah EDA in telesne temperature, ki sta odvisni tudi od okoljskih pogojev.

Udeleženci so se razlikovali po izkušnjah, kar je sorazmerno koreliralo s starostjo (tabela 1). Razdeljeni so bili v dve skupini: osem izkušenih morskih pilotov (vsi moški) s povprečno starostjo 47 let (SD = 6,8) in povprečno dolžino službe na morju 11,9 let (SD = 4,1) ter štirje študenti s povprečno starostjo 25 let (SD = 1,6) in povprečno manj kot enim letom službe na morju.

Tabela 1. Podatki udeležencev: osem izkušenih pilotov s povprečno starostjo 47 let (SD = 6,8) in povprečnim stažem na morju 11,9 let (SD = 4,1) ter štirje študenti s povprečno starostjo 25 let (SD = 1,6) in pretežno brez izkušenj.

| | spol | starost | izkušnje [leta] | Študent | spol | starost | izkušnje [leta] |
|------------------|------|-----------|-----------------|------------------|------|-----------|-----------------|
| 1 | M | 41 | 6 | 1 | M | 24 | - |
| 2 | M | 41 | 15 | 2 | M | 23 | 0.4 |
| 3 | M | 54 | 7 | 3 | M | 26 | - |
| 4 | M | 58 | 13 | 4 | M | 27 | 0.5 |
| 5 | M | 49 | 18 | Povprečje | | 25 | 0.45 |
| 6 | M | 37 | 8 | | | | |
| 7 | M | 45 | 16 | | | | |
| 8 | M | 51 | 12 | | | | |
| Povprečje | | 47 | 11.9 | | | | |

Skupine udeležencev so se razlikovale tako po starosti kot po izkušnjah, saj nismo mogli pridobiti mladih in hkrati izkušenih pilotov ali starih in neizkušenih pilotov; razlika glede na izkušnje in starost odraža realne razlike v praksi. Zaradi splošnih omejitev v času COVID-a, ko so se izvajale meritve, je vzorec majhen in neuravnotežen. Te pomanjkljivosti smo upoštevali pri analizi stabilnosti (*bootstrap* statistika). Na tem mestu s hvaležnostjo izjavljamo, da so se kapitani vlačilcev iz Luke Koper prostovoljno javili za upravljanje simulatorjev vlačilcev za asistenco kontejnerski ladji, s čimer so povečali realističnost eksperimenta.

Naloge simulacije so bile zasnovane na podlagi analiz nesreč in napovedi prometa v severnem Jadranu [30,31]. Simulacije so bile izvedene v šestih mesecih in so bile ponovljene petdesetkrat, kar pomeni, da je vsak udeleženec v povprečju ponovil simulacijo štirikrat (tabela 2). Povprečni čas med ponovitvami posameznega udeleženca je bil 25 dni. Za naknadno obdelavo je bilo primernih le 21 meritev pilotov in 11 tečajnikov zaradi nedoslednega beleženja podatkov in/ali težav s senzorji.

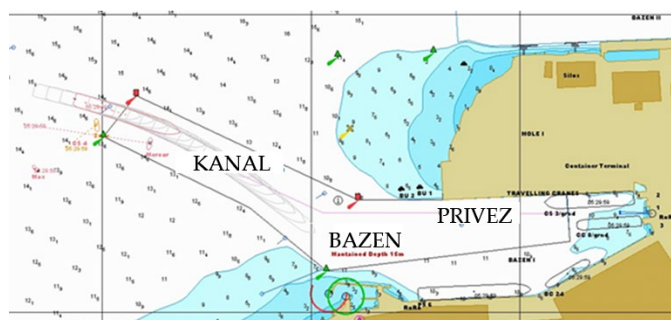
Tabela 2. Udeleženci.

| Skupina | Število udeležencev | Število ponovitev |
|----------------------|---------------------|-------------------|
| Izkušeni piloti | 8 | 31 |
| Študenti | 4 | 19 |
| Poveljniki vlačilcev | 2 | 50 |

Naloga udeležencev je bila prevzeti nadzor nad veliko kontejnersko ladjo, jo varno voditi skozi poglobljen kanal in naprej v pristaniški bazen ter jo nazadnje privezati na določeno privezno mesto. V praksi se pomorski piloti tudi sicer srečujejo s podobnimi nalogami, ko kontejnerske ladje pristajajo v Luki Koper. Udeleženci so se v fazi uvajanja seznanili s simuliranim mostom ladje in se adaptirali z okoljem, tako, da je bila naloga čim bližje dejanskemu poteku. Za kontrolne podatke za analizo in primerjavo se je štel prvi del simulacije (pred katerim koli motečim dejavnikom). Poleg tega je bila za opazovanje odziva ob pridobivanju izkušenj vsaka seansa uporabljena kot kontrolni podatek za naslednjo.

Med nalogo so se udeleženci soočili z dvema vrstama motečih dejavnikov. Pričakovani moteči dejavnik so bili sunki severovzhodnega vetra (burja) med vsemi fazami naloge, ki so ladjo odnašali s smeri, kar se v Luki Koper redno dogaja (glede na meteorološke meritve v povprečju vsaj en dan na mesec). Poleg tega so se pojavili nepričakovani moteči dejavniki, v smislu, da je vlačilec po nesreči pretrgal vlečno vrv, odpoved pogonskega motorja itd. Ohranitev želene smeri je bila pomembna, ker ima ladja 14 m ugreza, kanal pa je poglobljen na 15 m globine, zato ni veliko prostora za napake. S pomočjo vlačilcev in krmila so udeleženci največkrat uspeli ladjo obdržati znotraj predvidene plovne poti.

Namen eksperimenta je bil spremljati in beležiti fiziološke parametre pilota skozi celotno nalogo, da bi pridobili vpogled v reakcije udeležencev na moteče dejavnike ter ocenili njihov odziv med izvajanjem naloge. Poseben poudarek raziskave je bil na odzivu obeh skupin med učnim obdobjem (ponovitvami) z namenom ugotoviti, kako izkušnje in učni proces vplivajo na fiziološki odziv.



Slika 3. Kot je razvidno na elektronski karti, je ladja zaradi močnega vetra vstopila v kanal pod neugodnim kotom. Dva vlačilca sta asistiralala kontejnerski ladji (ugrez 14 metrov), da je ostala znotraj poglobljenega kanala (globina 15 m).

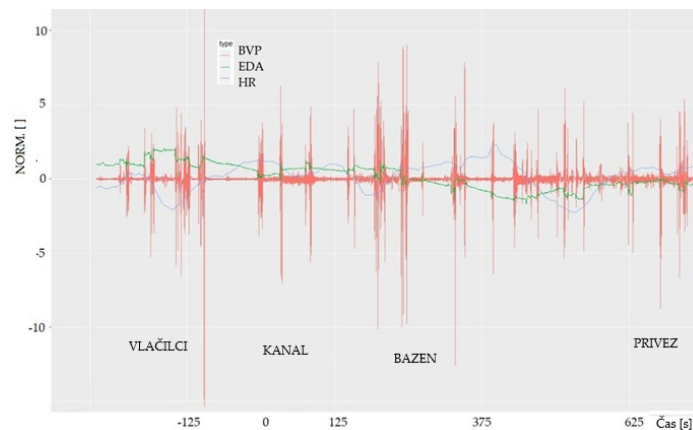
Da bi zagotovili verodostojnost, je udeleženec v vlogi pilota, tako kot v resničnih situacijah, zgolj dajal ukaze krmarju in hkrati komuniciral z obema kapitanoma vlačilcev, ki sta pomagala ladji. Izkušeni višji inštruktor iz Uprave za pomorstvo je predstavljal pristaniške oblasti, spremljal prihod ladje z inštruktorske konzole ter imel pravico prekiniti vplutje oziroma izdati ukaz, da zaradi varnostnih razlogov plovilo prekine vplutje in se vrne nazaj na sidrišče (npr. v izogib in preprečitev trčenja, nasedanja, onesnaženja ali škode, ko bi za varno vplutje vremenske razmere postale prezahtevne). Zasnova je zagotovila visoko stopnjo realnosti. Naloga se je zaključila, ko je bila ladja varno privezana v pristanišču, ko je nasedla ali trčila, ali če je zaradi izrednih razmer prekinila manever vplutja. Če je šlo vse po načrtih, je manevriranje običajno trajalo pol ure. Po zaključku naloge je sledila analiza odziva udeležencev v specifični situaciji in izmenjava mnenj ter predlog za pridobivanje izkušenj za naslednji poskus. Rezultati so predstavljeni v naslednjem poglavju.

3. Rezultati

Pričakovanja glede kakovosti izmerjenih podatkov v tej študiji temeljijo na predpostavki, da se izkušeni udeleženci dovolj vživijo v simulacijo, kar je posledično primerljivo z odzivom v resničnem življenju. To so potrdili med diskusijo po zaključku naloge. Fiziološki odziv pilotov med nalogo je bil izmerjen z uporabo neinvazivne zapestne zapestnice.

3.1. Sinhronizacija

Sinhronizacija senzorjev je bila izvedena s pomočjo časovnega strežnika, vendar so različne frekvence vzorčenja senzorjev (64 Hz, 32 Hz, 4 Hz in 1 Hz) zahtevale ponovno vzorčenje za analizo na isti časovni osi (slika 4). Skripta za ponovno vzorčenje je bila napisana v okolju Python. Čas »nič« je bil postavljen natanko v trenutek, ko je GPS položaj ladje prečkal črto med obema bojama na vhodu v poglobljeni kanal. Razlog za takšno zasnovo je v različnih hitrostih približevanja ladij posameznega udeleženca.



Slika 4. Normaliziran odziv izkušenega udeleženca pri manevriranju s plovilom. Intenziteta odziva korelira s situacijo, ukazi in pozicijo plovila. Čas "nič" na x-osi pomeni trenutek, ko je ladja prečka navidezno črto na začetku kanala.

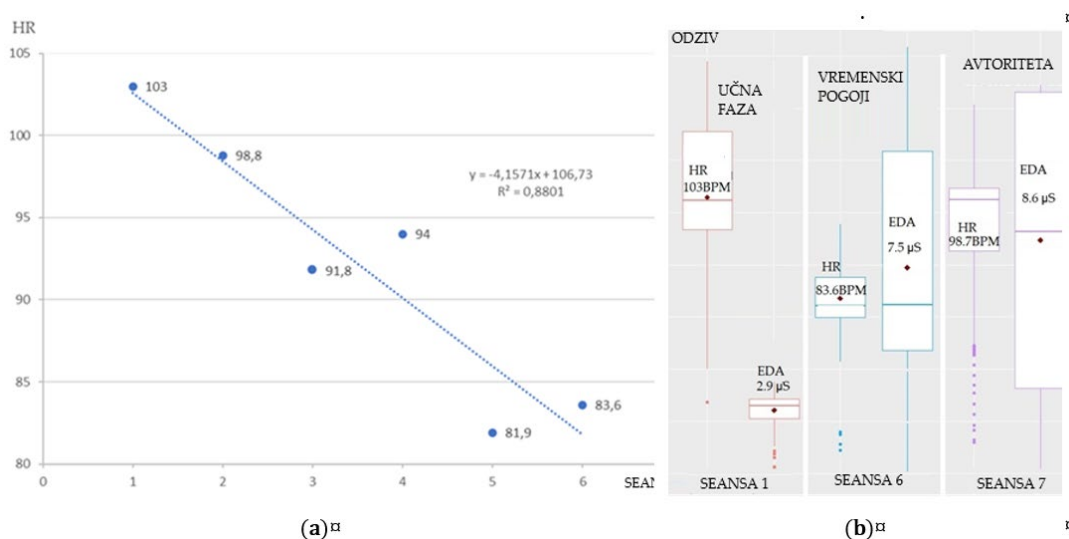
3.2. Odziv izkušenih udeležencev

Obdelani podatki iz vsake seanse vključujejo BVP, EDA in HR signale, kot je prikazano na sliki 4. Intenzivnost opazovanih spremenljivk med pristajanjem običajno korelira s situacijsko zavednostjo, izdanimi ukazi in položajem plovila, npr. vstop v kanal, vstop v bazen in privezovanje, kjer je amplituda signalov najvišja. Normalizacija, predstavljena za vsako opazovano spremenljivko, je bila izvedena z uporabo povprečja in standardnega odklona celotnega signala.

3.3. Vpliv izkušenj na signal HR in EDA

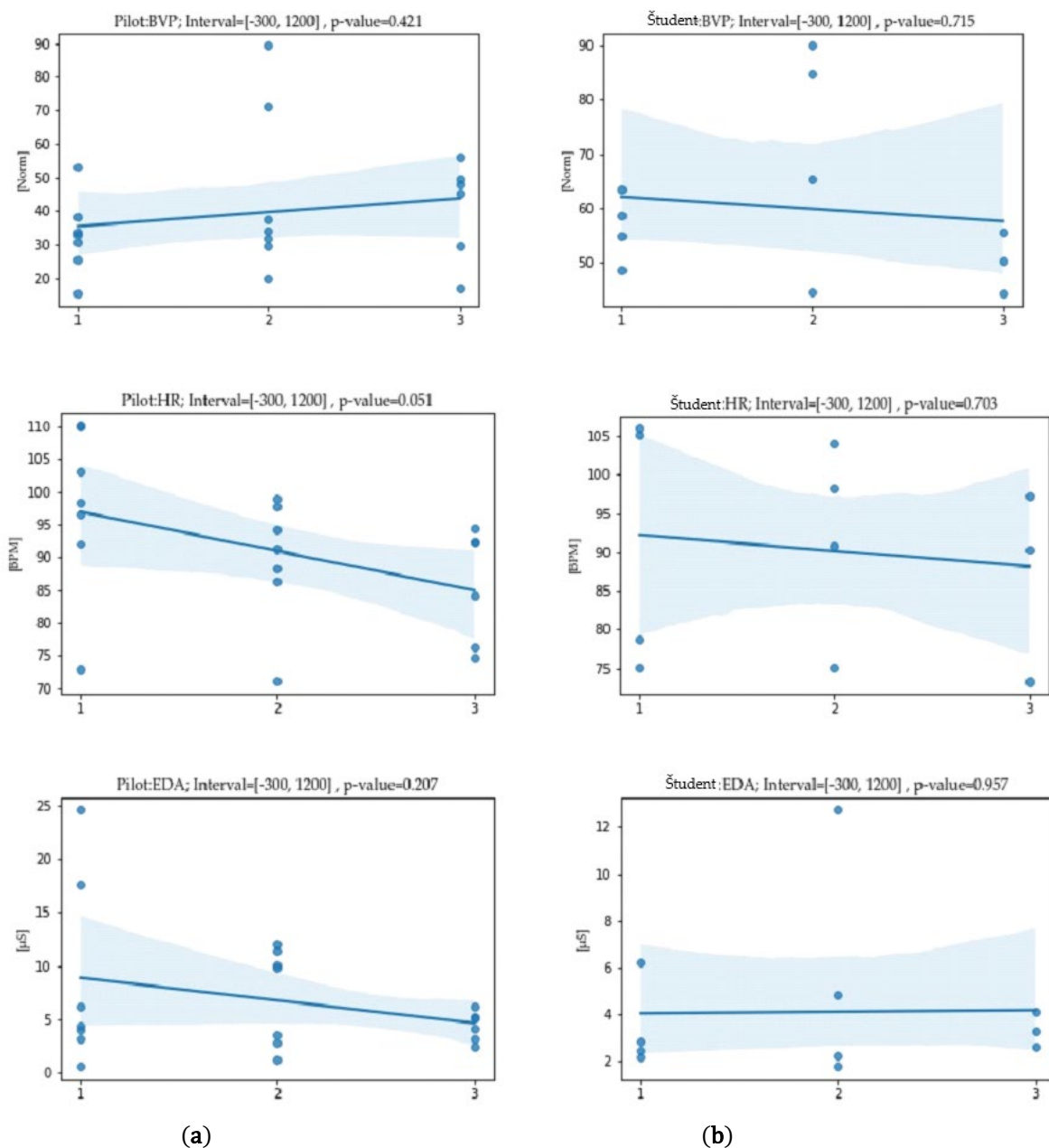
Za opazovanje vpliva pridobljenih izkušenj je bila izvedena vizualizacija HR in BVP udeležencev. Hipoteza je bila, da se bosta tipičen odziv in vznemirjenje skozi seanse znižala zaradi pridobljenih izkušenj, kar smo tudi potrdili. Vendar smo opazili, da se lahko posamezni parametri razlikujejo. Na primer, HR pokaže vrednost blizu povprečja zaradi izkušenj, medtem ko je zaradi trenutnega stresorja EDA prekomerno vzburjena. Iz tega razloga je pri obdelavi tovrstnih podatkov potreben celosten pristop.

Slika 5a prikazuje HR tipičen odziv udeležencev med učnim obdobjem (seanse 1 do 6). Podatki kažejo, da HR upada med prvimi tremi sejami. Kot zanimivost omenimo seanso 4, ki ima v primerjavi z drugimi nepričakovano visok HR. Ugotavljamo, da je bila posneta po kosilu, kar je domnevno vplivalo na izmerjene vrednosti [29]. Podobno povišana je seansa 6, kjer se je pilot soočil z izzivom, ko so močni sunki vetra pretrgali privezne vrvi med manevrom privezovanja. Zaradi predpisov in varnostnih razlogov so pristaniške oblasti ukazale prekinitev vplutja in poslale plovilo nazaj ven na sidrišče. Kljub tej kaotični situaciji, kar nakazuje povečan odziv na sliki 5b, je izkušeni pilot uspešno dokončal nalogo.



Slika 5. Opazovanje povprečnega odziva enega izmed izkušenih udeležencev med sedmimi seansami. Izkušnje, pridobljene v obdobju učenja, pojasnjujejo znižanje srčnega utripa (a); Odziv korelira s ponovitvami. Nepričakovane vremenske razmere v šestem scenariju so povzročile EDA odziv. Sklepamo, da sedmi primer kaže odziv na avtoriteto (b).

Povečan odziv v seansi 7 (slika 5b) je bil posledica prihoda višjega inštruktorja na most med simulacijo in njegovih učinek njegovih komentarjev, kar se kaže tako v HR kot EDA.



Slika 6. Povprečni odziv v prvih treh simulacijah izkušenih pilotov; $N = 8$ (a) v primerjavi s študenti; $N = 4$ (b) brez motečih dejavnikov. Na x osi so predstavljene tri ponovitve, modre pike predstavljajo udeležence na vsaki ponovitvi. P-vrednost predstavlja naklon regresijske premice. Vzorec odziva se pri študentih, ki nimajo izkušenj, razlikuje od vzorca pri izkušenih pilotih na način, da s ponovitvami odziv ostaja bolj ali manj nespremenjen.

3.4. Primerjava med izkušenimi piloti in študenti

Razlika med izkušenimi piloti in študenti v intervalu od -300 s do 1200 s je glede na čas vstopa v kanal prikazana na sliki 6. Kot je bilo pričakovano, so imeli izkušeni udeleženci (slika 6a) najvišje vrednosti v prvi seansi, ki so se nato znižale z nadaljnjimi ponovitvami. Iz slike 6b pa je razvidno, da je bil za razliko od izkušenih, odziv tečajnikov v prvem poskusu relativno nizek in neizrazit, hkrati pa ponovitve ne izražajo statistično pomembnih sprememb, zato smo uporabili drug pristop.

Tabela 3: Povprečje značilk srednja vrednost in standardna deviacija (std) po eksperimentalnih skupinah.

| | HR | | EDA | | BVP | |
|----------|------------------|------|------------------|------|------------------|-------|
| | srednja vrednost | std | srednja vrednost | std | srednja vrednost | std |
| Študenti | 91.26 | 4.19 | 5.95 | 0.61 | -0.05 | 57.01 |
| Piloti | 89.26 | 4.44 | 3.24 | 0.2 | -0.01 | 87.8 |

3.5. Pomembne razlike med skupinama

V zadnjem delu smo primerjali povprečne odzive med izkušenimi in študenti. V tabeli 3 so predstavljeni povprečni srčni utrip, BVP in elektrodermalna aktivnost, merjeno pred začetkom prve navigacijske naloge. Ker naši podatki niso bili normalno porazdeljeni, smo uporabili Mann–Whitney U statistični test za zaznavanje pomembnih razlik z uporabo Python knjižnice Scipy verzije 1.7.3. Statistična moč je bila ocenjena z GPower verzijo 3.1.9.4. Referenčna točka je bila postavljena ob vstopu v kanal, kar smo poimenovali *čas nič* (glej sliko 3). Vsi merilni sistemi so bili normalizirani z odštevanjem povprečnih vrednosti vseh signalov, izmerjenih pri udeležencih pred eksperimentom. Značilnosti signalov opišejo odziv udeležencev med vplutjem v kanal. Posamezno merjenje je trajalo običajno dvajset minut, namen pa je bil primerjati rezultate BVP, EDA in HR vseh pilotov z rezultati vseh študentov. Glede na literaturo [32,33] smo se odločili izluščiti naslednje značilnosti iz zabeleženih vrednosti:

- povprečno vrednost (mv);
- standardni odklon (std), (razpršenost porazdelitve);
- asimetrijo (skw), iz česar izluščimo, ali se vrednosti nagibajo k nižjim vrednostim (negativna asimetrija), k povprečju (ničelna asimetrija) ali k višjim vrednostim (pozitivna asimetrija).

Po treh eksperimentih smo pridobili 33 meritev. Rezultati značilk so predstavljeni v tabeli 4. Ugotovili smo, da obstajajo pomembne razlike med skupinama pri BVP signalu, ki je bil bistveno nižji pri pilotih (62,13) kot pri tečajnikih (86,12), $p = 0,002$ in pri asimetriji EDA signala za pilote (−0,87) v primerjavi s tečajniki (−1,78), $p = 0,02$.

Ocena velikosti učinka (ES) je bila izračunana med značilkami signalov pri študentih in pilotih. Višja vrednost ES nakazuje, da razlika med skupinama verjetno obstaja, vendar zaradi majhnosti vzorca ni bila statistično zaznana. Takšne razlike vključujejo povprečno vrednost EDA signala ($ES = 0,48$; $p = 0,34$), povprečno vrednost srčnega utripa (HR) ($ES = 0,35$; $p = 0,23$) in standardni odklon EDA ($ES = 0,82$; $p = 0,68$). Sklepamo, da razlike med študenti in piloti obstajajo, vendar jih zaradi majhnosti velikosti vzorca ni bilo mogoče statistično potrditi.

Tabela 4. Statistično pomembne razlike. Standardni odklon BVP in asimetrija EDA se pri izkušenih pilotih značilno razlikujeta v primerjavi z neizkušenimi študenti. Razlike z razmeroma veliko velikostjo učinka in statistično močjo nakazujejo, da bi lahko obstajale razlike med značilnostmi skupin, vendar jih zaradi majhnosti vzorca nismo zaznali.

Značilka: srednja vrednost

| | Piloti | Študenti | | | |
|--------|------------------|------------------|------|-------|------|
| Signal | srednja vrednost | srednja vrednost | p | es | pw |
| BVP | 10.45 | 12.45 | 0.42 | 0.138 | 0.09 |
| EDA | 2.46 | 1.38 | 0.26 | 0.48 | 0.34 |
| HR | 0.21 | 2.48 | 0.08 | 0.35 | 0.23 |

Značilka: Standardna deviacija (std)

| | Piloti | Študenti | | | |
|-----|------------------|------------------|------|------|------|
| | srednja vrednost | srednja vrednost | p | es | pw |
| BVP | 62.13 | 86.12 | 0.02 | 0.82 | 0.68 |
| EDA | 1.77 | 0.87 | 0.23 | 0.82 | 0.68 |
| HR | 6.15 | 6.49 | 0.38 | 0.09 | 0.08 |

Značilka: Asimetrija (skw)

| | Piloti | Študenti | | | |
|-----|------------------|------------------|------|-------|------|
| | srednja vrednost | srednja vrednost | p | es | pw |
| BVP | 4.99 | 4.91 | 0.33 | 0.047 | 0.06 |
| EDA | -0.87 | -1.78 | 0.02 | 0.55 | 0.41 |
| HR | 0.22 | 0.04 | 0.17 | 0.22 | 0.14 |

4. Diskusija

Namen raziskave je bil zagotoviti realno simulacijo pristajanja v Luki Koper ter pridobiti vpogled v fiziološke odzive udeležencev glede na izkušnje, pridobljene skozi učno fazo in ponovitve. Tudi sicer je uporaba simulatorjev običajen način usposabljanja pilotov, kjer učni proces običajno vključuje več ponovitev. Čeprav so ponovitve na simulatorjih bistveni del učnega procesa, je v literaturi malo podatkov o procesih, ki stojijo za temi ponovitvami. Cilj naše študije

je bil delno nasloviti omenjeno »nevidno dimenzijo« pilotovega delovanja — fiziološki odziv, ki nakazuje na mehanizme odločanje med manevriranjem. Menimo, da članek prispeva tudi k razumevanju, kako narediti učne procese učinkovite. Zbrani rezultati so prinesli dve pomembni ugotovitvi. Prvič, odziv udeležencev na moteče dejavnike, ki simulirajo nepričakovane situacije, je merljiv. Drugič, neizkušeni udeleženci so pokazali drugačen vzorec odziva na simulatorju kot izkušeni piloti; medtem ko se je odziv pri izkušenih pilotih z več ponovitvami zmanjševal, je bil odziv tečajnikov v primerjavi s piloti relativno nizek in stabilen skozi vse seanse, kar verjetno nakazuje, da študenti niso bili tako vznemirjeni ali osredotočeni kot izkušeni piloti (slika 5). Razlog za razliko med izkušenimi piloti in tečajniki ni povsem jasen. Predlagamo dve možni razlagi:

- piloti se zavedajo resnosti naloge in morebitnih posledic ter zato simulacijo jemljejo bolj resno, medtem ko študenti, ki nimajo resničnih izkušenj iz realnih izzivov in njihovih posledic, ne morejo povsem odmisлити dejstva, da je simulacija le vaja;
- zaradi pomanjkanja izkušenj neizkušene osebe niso seznanjene z odgovornostjo in nevarnostjo, zato naloga ne sproži pričakovanega odziva.

V vsakem primeru imajo rezultati pomembne implikacije za prihodnje raziskave učnih postopkov, saj je treba upoštevati, da se študenti morda ne zavedajo resničnih okoliščin, ki jih simulirajo. Če imajo neizkušeni bistveno drugačne telesne odzive na različne dogodke na mostu, jih morda ne bi smeli vključevati v širše študije, ki simulirajo izkušene pilote. Za raziskovanje odzivov pilotov in pomorskih častnikov med učnimi procesi naj bi sodelovali le izkušeni udeleženci; za raziskovanje učnih postopkov za začetnike pa le neizkušeni.

Študija kaže, da se odziv pri izkušenih pilotih zmanjšuje s ponovitvami, kar nakazuje, da simulacija z visoko stopnjo realnosti odraža fiziološki odziv pilotov med privezovanjem. Večsenzorska zapestnica [23] se je izkazala za uporabno orodje za zbiranje podatkov, saj omogoča poglobljen vpogled v telesne reakcije udeležencev v realnem času, zato verjamemo, da imajo neinvazivna in nemoteča večsenzorska orodja, velik potencial za podporo častnikom na mostu pri učinkovitem soočanju z morebitnim stresom, ki lahko nastane med zahtevnimi nalogami in sprejemanjem nevarnih odločitev na mostu.

Študija prav tako odpira nekaj izzivov, povezanih s kvantifikacijo stresa in kognitivne obremenitve, ki bi bili zanimivi za prihodnje raziskave. Prvi izziv se nanaša na osebne razlike med piloti. Udeleženci niso homogena skupina glede inteligence, temperamenta in odzivov, ki jih sproža stres. Osebnostne lastnosti lahko delujejo kot *moderator*, torej kot dejavnik med motečimi dejavniki ali stresnimi dogodki in vedenjskimi odzivi pilotov. Zato je za potrditev domneve, da osebnost moderira odnos med stresnimi dogodki in pilotovim vedenjem, potrebno testirati fiziološki odziv pilotov v različnih stresnih pogojih ob hkratnem nadzoru njihove osebnosti znotraj modela *velikih pet osebnostnih lastnosti* [34].

Drugi izziv se nanaša na analize časovnih vrst, ki bi jih bilo mogoče izvesti na zbranih podatkih, denimo med simulacijami manevriranja. V analizah bi lahko fiziološke odzive na naloge znotraj vsake seanse, ki zahtevajo visoko kognitivno obremenitev ali so povezane z visoko čustveno vzbujenostjo, primerjali z odzivi med nalogami z manjšo kognitivno obremenitvijo ali manjšo čustveno vzbujenostjo, da bi preučevali dinamične vidike odločanja na mostu. Tretje vprašanje se nanaša na tehnične izzive pri zbiranju podatkov z več senzorji. Trenutna študija je prinesla kar nekaj izzivov: zasnovali smo jo tako, da bi spremljali podatke v realnem času prek Wi-Fi povezave, a smo se soočili z več tehničnimi težavami, kot so začasna izguba internetne povezave in posledična izguba podatkov, težave z opremo, kot je telefon, ki se je med seanso posodobil, in v nekaterih primerih je bila zapestnica po nesreči izklopljena, kar je prav tako povzročilo izgubo podatkov itd. Posredovanje vodje eksperimenta lahko sicer hitro odpravi težavo glede zbiranja podatkov, vendar zmoti pilotov vzorec pri reševanju problema, vnaša šum in tako vpliva na vsebinsko veljavnost podatkov. Poleg tega sinhronizacija vseh senzorjev z različnimi frekvencami vzorčenja zahteva algoritme za ponovno vzorčenje in normalizacijo za vsako kombinacijo senzorjev. Nazadnje podatki iz več senzorjev s svojo časovno sinhronizacijo prinašajo dodatne izzive. Trenutna študija ponuja več rešitev za te težave, ki jih je mogoče uporabiti v prihodnjih interdisciplinarnih študijah s področja senzorske tehnologije, pomorstva in psihologije. Rezultati se lahko uporabijo kot indikatorji tveganja za različne analize pomorskih nesreč, kjer je človeška napaka pogost vzrok nesreč [35], ali za druge modele tveganja, kjer je treba človeški dejavnik vključiti ali vsaj upoštevati [36]. Poleg tega je študija dragocen prispevek k nadaljnjim raziskavam določanja ustrezne hitrosti ladij v pristaniškem območju, saj so piloti ključna vez pri reševanju izzivov vplutja in asistiranju velikih ladij s pomočjo vlačilcev in drugih deležnikov med samim manevriranjem [37,38]. Pomembno je poudariti, da je študija povezana z dejanskimi okoliščinami, ki vključujejo lokalne oblasti in industrijo. Na podlagi ugotovitev za potencialno zmanjšanje delovne obremenitve se v praksi odslej vrši stalna prisotnost dveh dežurnih pilotov v pristanišču, uporaba elektronskih kart (neodvisni navigacijski sistemi pilotov) z aktualnimi vremenskimi podatki, uvedba omejitve hitrosti ladje ob vstopu v pristanišče ter začetek manevriranja eno miljo prej kot doslej.

5. Zaključek

Študija raziskuje fiziološki odziv izkušenih pilotov in neizkušenih študentov med manevriranjem z ladjo. Meritve, ki so vključevale srčni utrip, volumen krvi v tkivu in elektrodermalno aktivnost, so bile uporabljene za merjenje odzivov udeležencev na ponavljajočo se nalogo. Namen raziskave je bil uporabiti čim bolj realistično simulacijo pristajanja v pristanišče, da bi verodostojno določili fiziološki odziv glede na ponovitve. Pomemben vidik raziskave je vpliv obremenitve pri izkušenih pilotih, pri čemer je pomembna ugotovitev, da se odzivi neizkušenih v simulaciji razlikujejo od odzivov izkušenih pilotov, zato je treba njihove rezultate v študijah obravnavati z določeno mero

previdnosti. Dodatni cilj te študije ostaja razvoj algoritma strojnega učenja za prepoznavanje stanja vedenjskih vzorcev udeležencev pri napovedovanju odločitev in napak, povezanih s človeškim dejavnikom, med privezovanjem, zato se bo ta del eksperimenta nadaljeval.

Izjava: Vsi postopki, izvedeni v okviru raziskave, so bili skladni s Helsinško deklaracijo iz leta 1964 in njenimi kasnejšimi dopolnitvami, etičnimi načeli in kodeksom ravnanja APA za psihološke raziskave ter z institucionalnimi etičnimi pravili. Pred testiranjem je bila pridobljena pisna privolitev udeležencev. Podatki so shranjeni na lokalnem pomnilniku in zaščiteni v skladu s smernicami GDPR. Etično občutljivi podatki niso bili pridobljeni, udeleženci niso bili izpostavljeni potencialno škodljivim izkušnjam ali etično občutljivim okoliščinam; sama eksperimentalna procedura ni odstopala od normativne učne izkušnje v simulatorju.

Viri in literatura

1. Barnett M. L.; Searching for the Root Causes of the Maritime Casualties, WMU Journal of Maritime Affairs, 2005, DOI <http://dx.doi.org/10.1002/andp.19053221004>,
2. Suez Canal unblocked: "We pulled it off!". Royal Boskalis Westminster N.V. 29 March 2021. Retrieved 31 March 2021.
3. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual overview of marine casualties and incidents 2020. European Maritime Safety Agency: Lisbon, Portugal, 2020.
4. A Xi, Y., Zhang, Q., Hu, S., Yang, Z., Fu, S. The effect of social cognition and risk tolerance on marine pilots' safety behaviour. Maritime Policy & Management, 2021
5. Haberlandt, 1997. Allyn and Bacon, psychology, isbn 13-978-0205264162, 1997.
6. Maglič, L.; Valčić, S.; Gundić, A.; Maglič, L. Voice communication systems impact on navigating officers. Journal of Marine Science and Engineering, 2020,
7. Maglič, L.; Zec, D. The Impact of Bridge Alerts on Navigating Officers. The Journal of Navigation, 2020,
8. Harry Hirst: Collisions at sea: Why are they still happening? Safety4Sea, 2019; available on (https://safety4sea.com/cm-collisions-at-sea-why-are-they-still-happening/?_cf_chl_jschl_tk__=pmd_Y3.N8IW6mtPFMoMku5hNwBmlerA5i9h8XIH5.tTcivU-1632553574-0-gqNtZGzNAhCjcnBszQil)
9. Kim, H.; Kim, H.-J.: Collision scenario-based cognitive performance assessment for marine officers. TransNav, Vol4, No.1, 2010
10. Hart, S.G., Staveland, L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. Advances in psychology. North-Holland, 1988.
11. Hart S. G., Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later; Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting; <https://doi.org/10.1177/154193120605000909A>, 2006
12. Di Nocera, F., Mastrangelo, S., Colonna, S. P., Steinhage, A., Baldauf, M., Kataria, A. Mental workload assessment using eye-tracking glasses in a simulated maritime scenario. Proceedings of the human factors and ergonomics society Europe, 2016
13. Main, L. C., Wolkow, A., & Chambers, T. P. Quantifying the physiological stress response to simulated maritime pilotage tasks: The influence of task complexity and pilot experience. Journal of occupational and environmental medicine, 2017
14. Miklody, D., Uitterhoeve, W. M., Heel, D. V., Klinkenberg, K., Blankertz, B. Maritime Cognitive Workload Assessment, Symbiotic Interaction, L. Gamberini et al., Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017
15. Lim, W. L., Liu, Y., Subramaniam, S. C. H., Liew, S. H. P., Krishnan, G., Sourina, O., Wang, L. EEG-based mental workload and stress monitoring of crew members in maritime virtual simulator. Transactions on Computational Science XXXII (pp. 15-28). Springer, Berlin, Heidelberg, 2018
16. Liu, Y.; Lim, W.L.; Subramaniam, S.C.H.; Liew, S.H.P.; Krishnan G.Sourina, O.; Konovessis, D.; Ang, H.E.; Wang, L. EEG-based Mental Workload and Stress Recognition of Crew Members in Maritime Virtual Simulator: A Case Study. In Proceedings of the International Conference on Cyberworlds (CW), Chester, UK, 20-22 September 2017
17. J. Shukla, M. Barreda- Angeles, J. Oliver, G. C. Nandi, and D. Puig: Feature Extraction and Selection for Emotion Recognition from Electrodermal Activity. IEEE transactions on affective computing, vol. 12, no. 4, 2021
18. Petrescu, L.; Petrescu, C.; Oprea, A.; Mitrut, O.; Moise, G.; Moldoveanu, A.; Moldoveanu, F.: Machine Learning Methods for Fear Classification Based on Physiological Features. Sensors 21, 4519, 2021,
19. Wang C-A, Baird T., Huang J., Coutinho J.D., Brien D.C. and Munoz D.P.: Arousal Effects on Pupil Size, Heart Rate, and Skin Conductance in an Emotional Face Task. Front. Neurol. 9:1029, 2018.
20. Empatica E4 wrist sensor - available on: <https://www.empatica.com/research/e4/>
21. V. Markova, T. Ganchev and K. Kalinkov: Detection of Negative Emotions and High-Arousal Negative-Valence States on the Move. Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 2018, pp. 61-65. 2018
22. Renganayagalu, S. K., Komandur, S., Rylander, R. Maritime simulator training: Eye-trackers to improve training experience. Advances in Human Aspects of Transportation Part III: AHFE Conference, 2014
23. Coral, M. P. Analyzing cognitive workload through eye-related measurements: A meta-analysis. PhD Thesis. Wright State University, 2016.
24. Hareide, O. S., Ostnes, R. Maritime usability study by analysing eye tracking data. The Journal of Navigation, 2017,
25. Kim, H., Yang, C. S., Lee, B. W., Yang, Y. H., Hong, S. Alcohol effects on navigational ability using ship handling simulator. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007,
26. Žagar D., Svetina M., Dimc F., Košir A.: Human Factor in Navigation: Overview of Cognitive Load Measurement during Simulated Navigational Tasks, Journal of Marine Science and Engineering, 2020, DOI: 10.3390/jmse8100775
27. Orlandi, L., Brooks, B. Measuring mental workload and physiological reactions in marine pilots: Building bridges towards redlines of performance. Applied ergonomics, 2018,
28. Oldenburg M, Jensen H-J.: Stress and strain among merchant seafarers differs across the three voyage episodes of port stay, river passage and sea passage. PLoS ONE 14(6): 2019.
29. Sumpor, D. Relevant Factors of Driver Reaction Time for Cognitive Motoric Tasks; Fakultet Prometnih Znanosti: Zagreb, Croatia, 2019.

30. Vidmar, P.; Perkovič, M. Safety assessment of crude oil tankers. *Saf. Sci.* 2018, *105*, 78–191.
31. Vidmar, P.; Perkovič, M. Methodological approach for safety assessment of cruise ship in port. *Saf. Sci.* 2015, *80*, 189–200.
32. Burnik U., Zaletelj J., Košir A.: Video-based learners' observed attention estimates for lecture learning gain evaluation. *Multimed Tools Appl*, 2018 77:16903–16926, DOI 10.1007/s11042-017-5259-8
33. Geršak G., Drnovšek J.: Electrodermal activity patient simulator. *P-One* J, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228949>
34. L.M.P. Zillig, S.H. Hemenover, R.A. Dienstbier.: What Do We Assess when We Assess a Big 5 Trait? A Content Analysis of the Affective, Behavioral, and Cognitive Processes Represented in Big 5 Personality Inventories. *Personality and Social Psychology Bulletin*. 2002;28(6):847-858. doi:10.1177/0146167202289013
35. Bye, R. J., & Aalberg, A. L. Maritime navigation accidents and risk indicators: An exploratory statistical analysis using AIS data and accident reports. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018, 176, 174-186.
36. Bai, X., Cheng, L., & Iris, Ç. Data-driven financial and operational risk management: Empirical evidence from the global tramp shipping industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2022, 158, 102617.
37. Venturini, G., Iris, Ç., Kontovas, C. A., & Larsen, A. The multi-port berth allocation problem with speed optimization and emission considerations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017, 54, 142-159.
38. Wu, G., Zhao, X., Sun, Y., & Wang, L. Cooperative maneuvering mathematical modeling for multi-tugs towing a ship in the port environment. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9(4), 384.

Vpliv starosti pnevmatik in zavornega sistema proti blokiranju koles (ABS) na koeficient trenja in zavorno pot osebnega vozila

Vivien Lorenčič

Prevod dela: The effect of tire age and anti-lock braking system on the coefficient of friction and braking distance. *Sustainability*, 15(8), 2023.
<https://doi.org/10.3390/su15086945>

Povzetek: V tem članku je predstavljena raziskava o vplivih uporabe ABS sistema in vrste vozne površine na koeficient trenja pri zaviranju z maksimalno silo. Ugotovljeno je bilo, da je bil koeficient trenja s sistemom ABS v povprečju za 13 % višji na suhih asfaltnih površinah in za 30 % višji na mokrih drsnih površinah, kar je povzročilo 14,3 % krajšo zavorno pot na suhih in 37 % krajšo zavorno pot na mokrih površinah. Meritve so bile opravljene z zmogljivo napravo za merjenje pospeškov Vericom VC4000DAQ, ki predstavlja preprosto in učinkovito metodo za merjenje zavorne učinkovitosti na različnih cestnih površinah z različnimi pnevmatikami. Ugotovljeno je bilo tudi, da se koeficient trenja zmanjšuje s starostjo pnevmatik, pri čemer obstaja zmerina do močna korelacija med starostjo pnevmatik in koeficientom trenja. Vendar pa model, uporabljen v študiji, pojasnjuje le zmerno stopnjo variabilnosti podatkov. V članku je predstavljena tudi ocena obrabe pnevmatik, ki kaže, da bi se pnevmatike, ki se uporabljajo od pet do osem let in ob letni vožnji 12.000 km, v enem letu obrabile za 0,79-1,33 mm profila ob predpostavki, da je začetna globina profila nove pnevmatike približno 8-9 mm in da je v večini evropskih držav zakonsko določena najmanjša globina profila za vse letne pnevmatike 1,6 mm. Raziskava priporoča menjavo letnih pnevmatik po šestih letih uporabe, če voznik na leto prevozi povprečno 12.000 km, saj se masa pnevmatik v povprečju zmanjša za 1,3 kg, višina tekalne plasti pa se v povprečju zmanjša za 6 mm. Prav tako se s starostjo zmanjšuje koeficient trenja, zaradi česar se zavorna pot podaljša.

Ključne besede: ABS; koeficient trenja; zavorna pot; starost pnevmatik; obraba pnevmatik; vpliv na okolje

1. Uvod

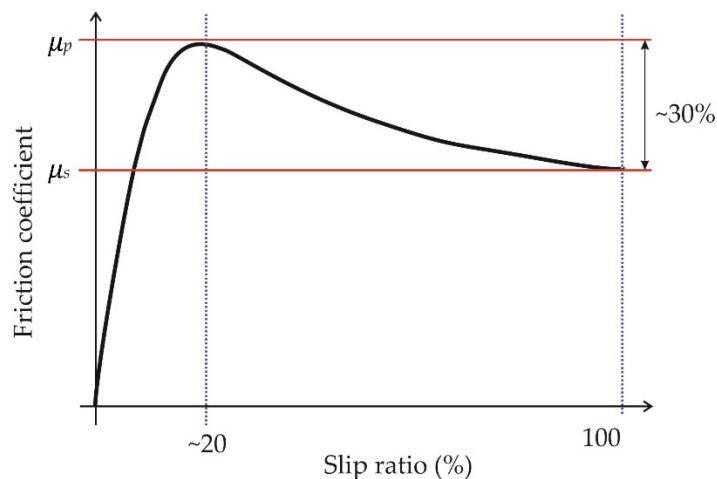
Pri vožnji vozila mora voznik opraviti več nalog, med katerimi je tudi zaviranje. Na splošno vozniki uporabljajo blago zaviranje, ki ostaja pod mejo največje zavorne zmogljivosti. V običajnih prometnih razmerah največja zavorna moč praviloma ni potrebna. Vendar pa je v sili zavorna pot ključnega pomena, zlasti kadar se pred vozilom pojavi ovira. Poleg tega morajo biti vozniki pripravljeni na nenadne spremembe voznih razmer, na primer prehod s suhe na mokro, zasneženo ali blatno vozišče. Voznikova sposobnost obvladovanja vozila v takšnih razmerah je odvisna od stika med pnevmatikami in voziščem, pri čemer mu pomagajo tudi asistenčni sistemi v vozilu. Ti sistemi so danes standardna oprema večine novih vozil in omogočajo čim hitrejšo ustavljanje vozila.

Na največjo učinkovitost zaviranja vpliva predvsem interakcija med pnevmatiko in voziščem. V tem članku sta zato preučevana: koeficient trenja in zavorna pot osmih različnih letnih pnevmatik na suhi asfaltni površini. Ko voznik pritisne na zavorno pedal, se med pnevmatiko in cesto ustvari zavorna sila (F_b). Koeficient trenja (γ) je opredeljen kot razmerje med zavorno silo (F_b) in navpično silo pnevmatike (F_v) izraženo z enačbo: $\gamma = F_b/F_v$ [1]. Koeficient trenja je odvisen predvsem od stanja pnevmatik, vremenskih razmer, površine vozišča in hitrosti vozila. Namen tega članka je prikazati obnašanje različnih letnih pnevmatik (različne dimenzije in starost) med zaviranjem na suhem asfaltu. Poleg tega je bila opravljena raziskava vpliva sistema ABS na zavorno pot in koeficient trenja.

ABS, znan tudi kot protiblokirni zavorni sistem, je varnostni sistem v vozilih, ki preprečuje blokiranje koles med zaviranjem v sili, in s tem pomembno prispeva k varnosti v cestnem prometu z zmanjšanjem zavorne poti. Če med zaviranjem kolesa zablokirajo, voznik izgubi možnost krmiljenja vozila v želeno smer. Posledica tega je, da se vozilo premika naprej v trenutni smeri gibanja, ne glede na to, v katero smer voznik zasuče volan. Blokada koles povzroči zmanjšanje koeficienta trenja med pnevmatiko in voziščem, kar povzroči zdrs vozila in posledično podaljšanje zavorne poti. Namen sistema ABS je nadzorovati vrtenje koles, da se prepreči zdrs ter omogoči ohranjanje nadzora nad vozilom in krmiljenje v željeni smeri. Delovanje ABS sistema temelji na kombinaciji nadzora zdrsa in nadzora pospeševanja koles. Razmerje zdrsa se določi na podlagi hitrosti vozila in hitrosti posameznih koles [2]:

$$\gamma = (v_v - v_w)/v_v \quad \text{ali} \quad \gamma = (v_v - (r \cdot \omega))/v_v, \quad (1)$$

kjer je γ razmerje zdrsa, v_v je hitrost vozila, v_w je hitrost kolesa, r je polmer kolesa in ω je kotna hitrost kolesa. Zdrs kolesa na vozilu nastane zaradi popolne uporabe zavor, ko se vozilo sicer še vedno premika, vendar se kolesa ne vrtijo več oziroma se vrtijo znatno počasneje od hitrosti vozila. To pomeni, da je vrtenje koles počasnejše od hitrosti vozila, kar povzroči zdrs koles (enačba (1)). Razmerje med zdrsom vozila in koeficientom trenja lahko predstavimo s t. i. krivuljo zdrsa (slika 1). Največji koeficient trenja (μ_p) označuje največjo vrednost koeficienta trenja, ki se doseže med spremembo razmerja zdrsa. Koeficient drsnega trenja (μ_s) predstavlja vrednost koeficienta trenja, ko kolo drsi v blokiranem stanju. Pri vozilih z vgrajenim sistemom ABS se največji koeficient trenja običajno doseže pri razmerju zdrsa med približno 10 % in 20 % [3,4]. Sistem ABS zato deluje v tem območju, saj omogoča optimalno razmerje med zavornim učinkom in nadzorom nad vozilom.



Slika 1. Shematski prikaz krivulje koeficienta trenja in območja zdrsa (x-os zdrs %, y-os koeficient trenja).

Preiskavo zavorne učinkovitosti različnih vrst pnevmatik (letnih, celoletnih in zimskih) na mokrih in suhih asfaltnih površinah so izvedli avtorji v študiji [5]. Primerjali so zavorno učinkovitost vozil z vklopljenim sistemom ABS in brez njega ter ugotovili, da na zavorno pot vozila bistveno vplivata koeficient trenja med pnevmatiko in voziščem ter uporaba sistema ABS. Do podobne ugotovitve so prišli tudi drugi raziskovalci [1], ki so preučevali vpliv sistema za nadzor zdrsa pogonskih koles (TCS – Traction Control System), ki je sestavni del sistema za elektronski nadzor stabilnosti vozila (ESP – Electronic Stability Program). Ugotovili so, da sistem TCS v določenih primerih povzroči nekoliko nižji koeficient trenja v primerjavi s sistemom ABS. Veliko večje razlike pa so bile zaznane med zaviranjem z uporabo sistema ABS in običajnim zaviranjem brez njega. Poleg tega je omenjena študija primerjala različne vrste voznih površin in prišli do ugotovitev, da ima vrsta vozišča pomemben vpliv na vrednost koeficienta trenja. V študiji [6] je bila preučevana povezava med koeficientom trenja pnevmatike in vozišča pri zaviranju v sili z uporabo sistema ABS na različnih cestnih površinah. Ugotovljeno je bilo, da se koeficient trenja praviloma zmanjšuje z naraščajočo začetno hitrostjo vozila, pri čemer je ta trend opazen na različnih vrstah površin.

V študiji [7] je bila opravljena analiza stika pnevmatike z voziščem v različnih zimskih vremenskih razmerah. Avtorji so eksperimentalno potrdili vpliv pomožnih sredstev, kot so snežne verige ali bodice, na vlečne lastnosti vozil v zimskih razmerah. Poleg tega so predstavili razpone koeficientov trenja za različne zimske vozne površine. Koeficienti trenja za posamezne vrste voznih površin, zbrani iz različnih virov, so prikazani v tabeli 1.

Tabela 1. Koeficienti trenja za nekatere vozne površine pri običajnem zaviranju.

| Površina | Stanje | Koeficient trenja |
|-------------------------|---------|-------------------|
| grobi asfalt | suh | 0,65-1,20 |
| | mokri | 0,45-0,75 |
| gladek asfalt | suh | 0,55-0,80 |
| | mokri | 0,40-0,65 |
| stari obrabljeni asfalt | suh | 0,35-0,60 |
| | mokri | 0,25-0,55 |
| gramoz | suh | 0,1-0,3 |
| blato | mokro | 0,1-0,3 |
| sneg in led | rahel | 0,15-0,50 |
| | zgoščen | 0,24-0,40 |
| led | moker | 0,05-0,19 |

Vir: [1,7].

Kot je bilo že omenjeno, na zavorno pot vozila bistveno vplivata koeficient trenja med pnevmatiko in voziščem ter uporaba sistema ABS. Vendar pa se zastavlja vprašanje, ali bi lahko tudi staranje pnevmatik vplivalo na zavorno zmogljivost vozila. V tej študiji je posebej poudarjen pomen staranja pnevmatik ter onesnaževanja, ki ga povzročajo obrabni delci, sproščeni med vožnjo. Vpliv staranja pnevmatik so obravnavali številni avtorji [8–10]. Primerjali so pnevmatike, starane v laboratorijskih razmerah (v pečici), in pnevmatike, starane na terenu. Te študije so se osredotočale predvsem na spremembe mehanskih in materialnih lastnosti gume zaradi staranja, vendar nobena ni podrobneje preučevala vpliva staranja na koeficient trenja, ki je ključni dejavnik pri zavorni učinkovitosti. Obstajajo pa študije, ki se posredno ukvarjajo z ocenjevanjem trenja med pnevmatiko in voziščem. Celovit pregled teh pristopov je predstavil avtor v [11], kjer so metode ocenjevanja koeficienta trenja razvrščene v tri glavne kategorije: metode, ki temeljijo na senzorjih zunaj vozila; metode, ki temeljijo na dinamiki vozila; metode, ki temeljijo na

podatkovnih modelih. Glede na ta pregled naša raziskava spada v drugo kategorijo – metode, ki temeljijo na dinamiki vozila – natančneje v raziskovanje vzdolžne dinamike.

Posebej omembe vredna je študija [12], ki je analizirala vpliv starosti pnevmatike na razmerje zdrsa. V raziskavi so bile ugotovljene pomembne razlike v koeficientu vzdolžnega trenja med novimi in umetno staranimi pnevmatikami. Ugotovljeno je bilo, da je pri umetno staranih pnevmatikah koeficient trenja za 10 do 15 % nižji v primerjavi z novimi pnevmatikami. Vendar je treba opozoriti, da je bil ta preizkus opravljen s pnevmatiko, ki je bila približno osem tednov stara v laboratorijski pečici pri temperaturi 65 °C, kar naj bi ustrezalo pnevmatiki, stari približno štiri leta v realnih voznih razmerah. V zadnjem času se v literaturi vse pogosteje pojavlja uporaba metode umetnega staranja v pečici, predvsem zaradi krajšega časovnega obdobja v primerjavi z naravnim (teren-skim) staranjem. Zato je še vedno premalo študij, ki bi neposredno preučevale vpliv terenskega staranja pnevmatik na koeficient trenja. Poleg tega študija [12] izpostavlja potrebo po nadaljnjih raziskavah, ki bi podrobneje preučile vpliv staranja pnevmatike na nastanek vzdolžne sile ter vključile različne tipe in dimenzije pnevmatik, da bi zaznale morebitne večje spremembe lastnosti. Zato je namen te študije raziskati vpliv starosti pnevmatik na koeficient trenja. Osrednje raziskovalno vprašanje se glasi: »Ali vpliv staranja pnevmatike na koeficient trenja ostaja konstanten ali pa se s starostjo pnevmatike spreminja (v pozitivno ali negativno smer)?«

Obraba pnevmatik je predvsem posledica njihove uporabe med vožnjo, kar vodi do zmanjšanja debeline tekalne plasti. Gumijasti delci, ki nastanejo zaradi obrabe, se odlagajo na vozišče in njegovo okolico (cestni svet), kar pomembno prispeva k onesnaževanju vode, tal in zraka kot del emisij trdnih delcev [13, 14]. Po podatkih [15] se vsako leto po vsem svetu sprosti več kot 600 milijonov ton delcev, nastalih zaradi obrabe pnevmatik. Za zbiranje in analizo teh delcev je bilo razvitih več metod. Vzorci delcev obrabe pnevmatik se lahko zbirajo neposredno na realnih cestah ali ustvarjajo v laboratorijskih razmerah s pomočjo cestnih simulatorjev. Ti vzorci se lahko razlikujejo glede na lokacijo, velikost delcev in njihovo koncentracijo. Poleg tega so delci pnevmatik na cestah pogosto pomešani z drugimi mikroplastičnimi delci, zato je potrebna natančna identifikacija, da se ločijo ostanki obrabe pnevmatik od drugih virov onesnaženja. Zaradi širokega nabora analitskih metod je izbira najprimernejše metode za merjenje teh delcev zahtevna. V tem članku je bil zato uporabljen nekonvencionalen pristop, pri katerem so bili delci obrabe ocenjeni na podlagi dejanskega staranja pnevmatik na terenu in njihovega vedenja med vožnjo. Znano je, da tipična avtomobilska pnevmatika ob koncu svoje življenjske dobe v povprečju tehta približno en kilogram manj kot nova pnevmatika. To lahko ponazorimo s preprostim izračunom (enačba (2)). Na primer, pri letni pnevmatiki dimenzije 195/55R16 znaša tipična gostota obrabnih delcev med 320 kg/m³ in 490 kg/m³, odvisno od proizvajalca. Za izračun v tej študiji je bila uporabljena povprečna vrednost 415 kg/m³ [16]. Globina tekalne plasti nove letne pnevmatike znaša približno 8–9 mm. Po podatkih [17] je povprečna letna prevožena razdalja večine voznikov med 19.312 in 24.140 km, kar pomeni, da je pričakovana življenjska doba pnevmatike za običajnega uporabnika od tri do pet let. Na podlagi teh podatkov lahko sklepamo, da se pnevmatika povprečno obrabi za približno 1,280 do 2,133 mm na leto. Izračun povprečne letne mase obrabe pnevmatike (v kg/leto) je bil opravljen z uporabo naslednjega pristopa:

$$TC = 415 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,00128 \text{ m} \cdot 0,195 \text{ m} \cdot (16 \cdot 0,0254 \text{ m} \cdot 3,1415 \cdot 2) = 0,264 \text{ kg/leto}, \quad (2)$$

kjer je 415 kg/m³ gostota pnevmatike, povprečna letna obraba pnevmatike v petletnem obdobju je 0,001280 m, širina pnevmatike je 0,195 m, in premer pnevmatike je 16 palcev, ki pa je pretvorjen v metre in uporabljen za izračun obsega kroga (se pomnoži s pi in z 2). Na tej osnovi izračunana masa izgubljene gume znaša približno 0,264 kg na leto. Ti izgubljeni ostanki pnevmatike, sestavljeni iz naravne in sintetične gume, predstavljajo drobne delce mikroplastike, ki se nalagajo na vozišča, spirajo v vodotoke, ali celo prehajajo v zrak kot del onesnaženja s trdnimi delci (PM10). Po podatkih Mednarodne študijske skupine za gumo (IRSG - International Rubber Study Group) je svetovno povpraševanje po naravni in sintetični gumi leta 2020 znašalo 27,07 milijona ton, od tega 14,36 milijona ton sintetičnega kavčuka [18]. Med viri primarne mikroplastične onesnaženosti oceanov je tekstil na prvem mestu s 35 %, sledi mu obraba pnevmatik z 28 %. Leta 2019 je bilo na svetu registriranih približno 1490 milijonov vozil [19]. V Evropski uniji je leta 2014 zaradi obrabe pnevmatik nastalo približno 1,3 milijona ton delcev [20]. Zaradi stalne rasti števila vozil se povečuje tudi potreba po proizvodnji gume, kar neposredno prispeva k večji količini odpadnih delcev iz obrabe pnevmatik. Že leta 2010 so pnevmatike predstavljale približno 57 % celotne porabe sintetične gume, medtem ko se je globalna poraba sintetične gume med letoma 2002 in 2010 povečala za 27 % [21]. Nedavne študije potrjujejo, da obraba pnevmatik predstavlja enega glavnih virov mikroplastike v okolju [14, 22, 23]. Delci pnevmatik se med vožnjo sproščajo v okolje in po podatkih [17] več kot 90 % teh delcev nastane na podeželskih cestah in mestnih avtocestah, kjer prispevajo k obrabi pnevmatik, voznih površin in zavornih komponent. Ti delci nato preko cestnega odvodnjavanja in meteoritnih vod preko kanalizacije vstopajo v okolje, kjer postajajo žarišča onesnaževanja z mikroplastiko. Obstajajo številne študije, med njimi [24, 25], ki obravnavajo mikroplastične delce iz pnevmatik in cestnih površin, ki se izpirajo v cestne odtoke in meteorno kanalizacijo ter s tem v okolje.

Po podatkih [26] lahko nova pnevmatika za osebni avtomobil, težka približno 10 kg, v svoji življenjski dobi proizvede med 1 in 1,5 kg plastičnih delcev, kar ustreza približno 0,03 g/km. To pomeni, da lahko takšna pnevmatika v povprečju prevozi približno 50.000 km. Obrabo pnevmatike skozi njeno življenjsko dobo je mogoče izraziti tudi kot maso izgubljenega materiala v gramih na kilometer ali na 1.000 kilometrov. Pri tem izračunu je bilo uporabljeno povprečje letno prevoženih kilometrov osebnega vozila v EU, ki znaša približno 12.000 km [27]. Po podatkih združenja ADAC povprečen osebni avtomobil povzroči približno 120 gramov obrabe pnevmatik na vsakih 1.000 km

[28]. Pomembno je poudariti, da obraba pnevmatik ni odvisna zgolj od njihovih dimenzij, temveč tudi od številnih drugih dejavnikov, kot so: topografija terena (npr. gorska območja povzročajo večjo obrabo kot ravninske ceste); tip vozne površine (npr. beton povzroča večjo obrabo kot asfalt); vremenske razmere (mokre ceste povzročajo več obrabe kot suhe); temperatura zraka (višje temperature povečujejo obrabo); masa vozila in porazdelitev obremenitve; nastavitev vzmetenja in blažilcev; moč motorja ter način prenosa moči; povprečna hitrost vožnje in način vožnje. Agresiven slog vožnje z močnim pospeševanjem in zaviranjem, pa tudi vožnja pri večjih hitrostih, pomembno povečujejo obrabo pnevmatik. Večji navor in športno nastavljeno podvozje prav tako prispevata k večji obrabi pnevmatik.

Članek je sestavljen na naslednji način: v prvem poglavju je predstavljen pregled relevantne literature, ki obravnava koeficient trenja, zavorno pot, vpliv sistema ABS ter obrabo pnevmatik. Poglavje dve opisuje uporabljene materiale in metode za merjenje koeficienta trenja in zavorne poti, vključno z matematičnimi enačbami, ki so bile uporabljene za oceno merjenih veličin. V tretjem poglavju so analizirani učinki sistema ABS na zavorno pot in koeficient trenja, pri čemer so predstavljeni tudi rezultati primerjave med zaviranjem z in brez sistema ABS na dveh različnih cestnih površinah. Poleg tega ta del članka obravnava vpliv starosti pnevmatik na koeficient trenja in zavorno pot ter predstavi okoljske posledice, povezane z obrabnimi delci pnevmatik. V poglavju štiri so podane razprave o rezultatih raziskave, njihova primerjava z ugotovitvami iz obstoječe literature ter interpretacija opaženih pojavov. Zaključki so zajeti v poglavju pet, kjer so povzeti ključni izsledki raziskave, opredeljene omejitve in podani predlogi za nadaljnje raziskovalno delo.

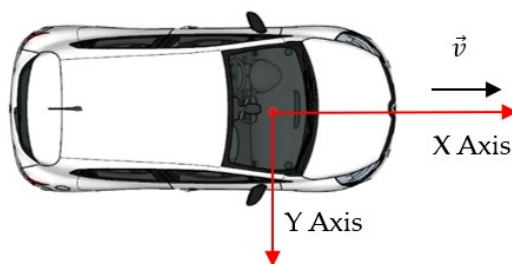
2. Analiza podatkov in metode

Namen tega članka je primerjati zaviranje z različnimi vrstami pnevmatik na različnih vozniških površinah, pri čemer sta ponovljivost in natančnost preskušanja ključnega pomena. Za ta namen je bila uporabljena zanesljiva merilna naprava – Vericom VC4000DAQ Performance Computer (slika 2), za katerega proizvajalec navaja natančnost merjenja G-sile z odstopanjem $\pm 0,003$. Kljub visoki natančnosti lahko med pospeševanjem vozila do ciljne hitrosti pride do predčasne aktivacije naprave, denimo zaradi prestavljanja prestav, kar povzroči netočne meritve. Zato so bili vsi takšni poskusi izločeni iz analize, preizkusi pa ponovljeni, da bi zagotovili zanesljive in ponovljive rezultate.



Slika 2. Pnevmatike, uporabljene za preskušanje zavorne učinkovitosti, in merilna naprava Vericom VC4000.

Merilna naprava oz. računalnik Vericom VC4000DAQ je natančen merilni instrument, namenjen merjenju trenja med pnevmatikami in cestiščem ter analiziranju zmogljivosti vozila. Omogoča sinhronizirano beleženje podatkov o pospeševanju, zaviranju, hitrosti, času in razdalji med zaviranjem vozila. Opremljen je z vmesniškim GPS-modulom frekvence 10 Hz, triosnim merilnikom pospeška, dvosmernimi žiroskopi in grafičnim zaslonom. Med druge tehnične značilnosti naprave še spadajo: izbirno območje zaznave pospeška (2 G ali 6 G), pomnilniška kartica SD, Bluetooth-komunikacija, vhod OBDII CAN, digitalni kompas, USB vhod, notranja baterija, vakuumski montažni sistem pritrditve, tipkovnica in drugi dodatki. Natančnost meritev ostaja visoka tudi v primeru, ko naprava ni popolnoma poravnana, saj triosni merilnik pospeška omogoča izračun vektorske vsote vseh treh komponent pospeška, kar zagotavlja natančno določanje sile G, hitrosti in prevožene razdalje. Kot je navedeno v uporabniškem priročniku, se naprava lahko namesti na vetrobransko ali stransko steklo vozila z uporabo montažne roke in vakuumskega lončka. V okviru te raziskave je bila naprava nameščena približno na sredino vetrobranskega stekla, pri čemer je bila os x usmerjena v smer preizkusa (od zadnje proti sprednji strani vozila), os je bila nagnjena pod 45° in poravnana s smerjo gibanja vozila (slika 3). Pomembno je tudi, da je triosni merilnik pospeška vedno nameščen čim bližje težišču preizkusnega vozila, kar je skladno z navodili proizvajalca [29].



Slika 3. Lokacija namestitve merilne naprave Vericom VC4000.

Koeficient trenja je bil izmerjen na ravnih in vodoravnih cestnih površinah. V primerih, ko je bila podlaga rahlo nagnjena, je računalnik Vericom VC4000DAQ avtomatsko kompenziral naklon, kar je omogočilo ohranjanje visoke natančnosti vseh merjenih podatkov. Pojemek vozila je bil izračunan z uporabo osnovne fizikalne enačbe za enakomerno pospešeno gibanje. Pojemek vozila se izračuna z naslednjo enačbo [5]:

$$a = (v_e^2 - v_i^2) / (2 \cdot s), \quad (3)$$

kjer je a pojemek, v_i začetna hitrost, v_e končna hitrost, s pa razdalja, izmerjena od začetne točke pojemka (pritisk na zavorni pedal) do točke ustavljanja (popolna zaustavitev vozila). Iz tega je razvidno, da je razdalja izražena z naslednjo enačbo [5]:

$$s = (v_e^2 - v_i^2) / (2 \cdot a). \quad (4)$$

Med preizkusi zaviranja je voznik skrbel, da je vozilo ohranjalo smer gibanja v ravni črti, kar je ključnega pomena za verodostojne rezultate, saj bočno drsenje vpliva na porazdelitev sil med pnevmatikami in cestiščem. Sila G , ki ponazarja intenzivnost pojemka glede na gravitacijo, je bila izračunana z naslednjo enačbo:

$$G = (v_i) / (t \cdot g), \quad (5)$$

kjer je G sila g , t je čas zaviranja, g pa je pospešek zaradi težnosti, ki vleče navzdol z 1 g ali 9,80665 m/s².

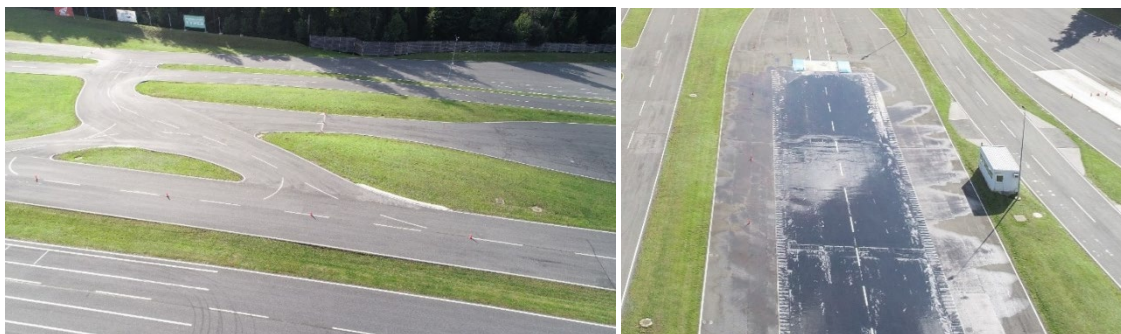
Študija je bila izvedena z namenom ugotoviti, kako se koeficient trenja in zavorna pot letnih pnevmatik spremenita ob vklopljenem in izklopljenem protiblokirnem zavornem sistemu (ABS). Za izvedbo preizkusa sta bila uporabljena vozila – Renault Clio 1.0 letnik 2020 z močjo 74 kW – in en komplet letnih pnevmatik Sava Intensa HP2, dimenzij 195/55R16 87H, stare 1 leto in 50 tednov. Preizkus je potekal na dveh vrstah površin: na suhem asfaltu ter na mokri, umetno drsni podlagi (slika 4). Merilna naprava Vericom VC4000DAQ Performance Computer (slika 2) je bila nameščena na vetrobransko steklo vozila, približno v območju njegovega težišča (slika 3), skladno s priporočili za natančno merjenje pospeškov. Vsi preizkusi so bili izvedeni v enem izmed slovenskih nacionalnih centrov za varnost cestnega prometa. Testna vožnja je potekala na ravnem in vodoravnem odseku suhe asfaltne ceste ter na posebej pripravljeni mokri drsni površini. Meritve so bile opravljene pri različnih začetnih hitrostih, in sicer 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h in 50 km/h. Pri preizkusu so bile uporabljene letne pnevmatike različnih dimenzij, vendar so vse imele najmanj 1,6 mm preostale globine tekalne plasti, kar ustreza zakonsko predpisanemu minimumu. Vse pnevmatike so bile pred preizkusi napolnjene na tlak, ki ga je predpisal proizvajalec vozila, s čimer je bila zagotovljena enotna primerjalna osnova med posameznimi preizkusi.

3. Rezultati

To poglavje je razdeljeno na več podpoglavij, ki predstavljajo rezultate posameznih preizkusov. V prvem podpoglavju so prikazani rezultati meritev zavorne poti in koeficienta trenja pri zaviranju z vključenim in izključenim protiblokirnim zavornim sistemom (ABS). Drugo podpoglavje obravnava vpliv starosti pnevmatik na koeficient trenja in zavorno pot, s poudarkom na spremembah zmogljivosti, ki jih povzroča staranje materiala. V tretjem podpoglavju pa je analiziran okoljski vpliv obrabnih delcev pnevmatik, ki nastajajo med vožnjo, ter njihov prispevek k onesnaženju okolja z mikroplastiko.

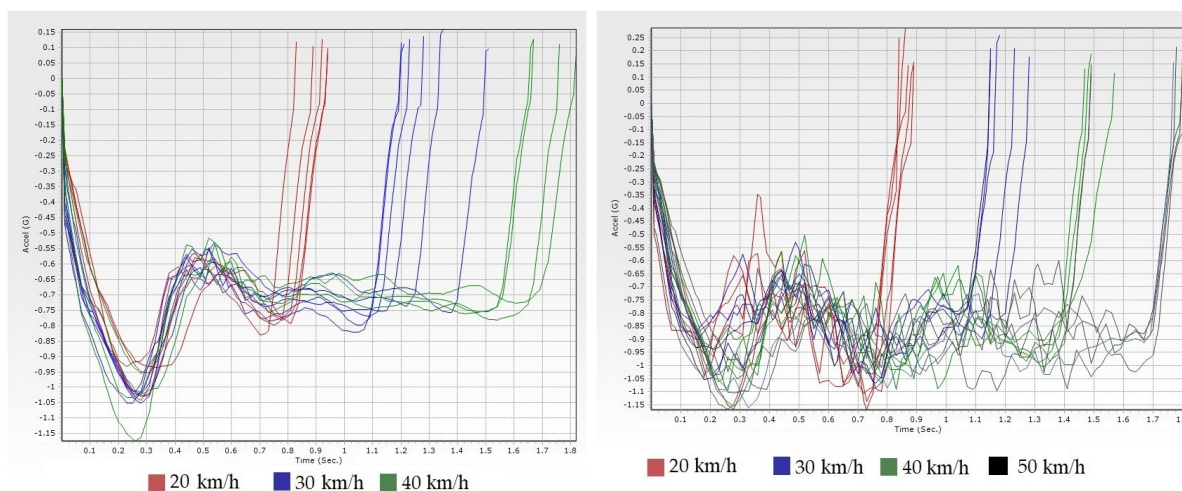
3.1. Vpliv sistema proti blokiranju koles (ABS) na zavorno pot in koeficient trenja

V tem podpoglavju je preučen vpliv protiblokirnega zavornega sistema (ABS) na zavorno pot in koeficient trenja. Rezultati zaviranja z vključenim sistemom ABS so primerjani z rezultati običajnega zaviranja brez ABS na dveh različnih vrstah cestnih površin. Preizkusni površini, uporabljeni za meritev, sta bili mokra drsna podlaga in suh asfalt, kot je prikazano na sliki 4.



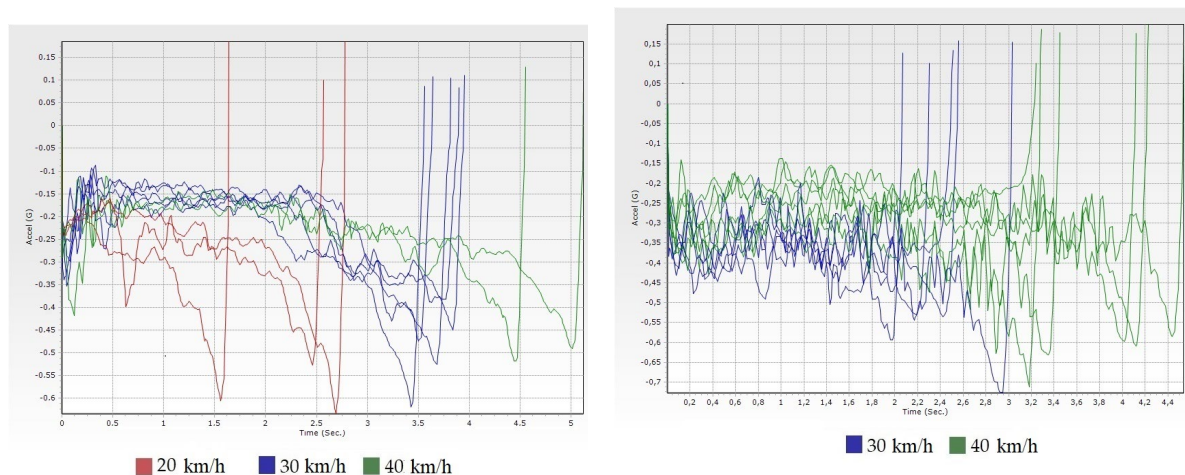
Slika 4. Preizkusni površini - suhi asfalt (levo) in mokra drsna površina (desno).

Slika 5 prikazuje, da ima hitrost dejanski vpliv na koeficient trenja, kar potrjujejo tudi ugotovitve drugih avtorjev [1, 6, 7]. Na testu je bila uporabljena letna pnevmatika Sava Intensa HP2, dimenzije 195/55R16 87H, stara 1 leto in 50 tednov. Preizkus je potekal na istem vozilu in na enaki podlagi – suhem asfaltu. Meritve so bile izvedene v decembrskem dnevu z rahlo meglo, pri temperaturi $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in relativni vlažnosti 79 %. Zanimiva ugotovitev je, da se pri uporabi sistema ABS koeficient trenja rahlo povečuje s hitrostjo, medtem ko se brez ABS zmanjšuje. Ciljne hitrosti testiranja so bile 20 km/h, 30 km/h in 40 km/h. Izmerjeni povprečni koeficient trenja z vključenim ABS je znašal 0,83, z vrednostmi med 0,768 in 0,894. Povprečni koeficient trenja brez ABS je bil 0,73, z razponom med 0,681 in 0,780. V povprečju so bile vrednosti koeficienta trenja za 13 % višje pri uporabi ABS v primerjavi z običajnim zaviranjem. Graf zaviranja s sistemom ABS (sliki 5 in 6) prikazuje spremembo hitrosti zaviranja vozila skozi čas, pri čemer je na vodoravni osi prikazan čas, na navpični osi pa koeficient trenja ob zaviranju. Na grafu so razvidni številni vrhovi, ki predstavljajo posamezne zavorne impulze sistema ABS. Takšni grafi so uporabni za oceno delovanja ABS sistema in lahko razkrijejo morebitne težave, na primer okvaro senzorja. Poleg tega se lahko uporabljajo tudi za ocenjevanje celotne zavorne učinkovitosti vozila.



Slika 5. Zaviranje na suhi asfaltni površini brez ABS sistema (levo) in z uporabo ABS sistema (desno). Leva os y – je pojemek, spodnja os x – pa je čas zaviranja (v sekundah).

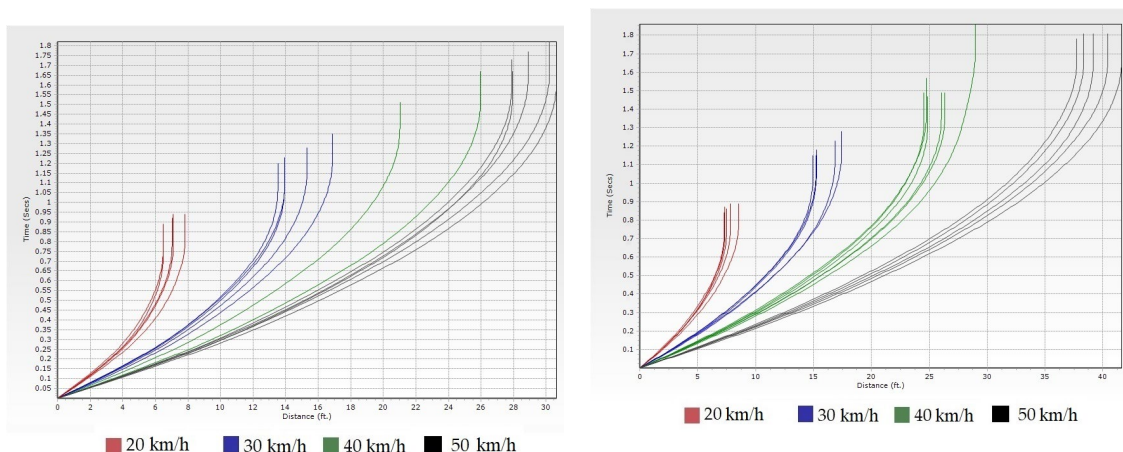
Če primerjamo koeficient trenja pri zaviranju na mokri drsni površini z rezultati zaviranja na suhem asfaltu z uporabo istega para pnevmatik, dobimo podobne ugotovitve kot prej – sistem ABS bistveno vpliva na koeficient trenja, kar prikazuje tudi slika 6. Preizkus so bili izvedeni pri začetnih hitrostih 30 km/h in 40 km/h. Izmerjeni povprečni koeficient trenja z vključenim sistemom ABS je znašal 0,35, z vrednostmi v razponu od 0,266 do 0,413. V primeru zaviranja brez ABS je bil povprečni koeficient trenja 0,24, z razponom med 0,206 in 0,317. To pomeni, da so bile vrednosti koeficienta trenja pri uporabi ABS v povprečju za 30 % višje kot pri običajnem zaviranju brez sistema.



Slika 6. Zaviranje na mokri drsni površini brez ABS sistema (levo) in z uporabo ABS sistema (desno). Leva os y je pojemek, spodnja os x pa čas zaviranja (v sekundah).

Rezultati preizkusa, opravljenega na suhem asfaltu, v primerjavi s preizkusom na mokri drsni površini, potrjujejo, da ima vrsta in stanje cestne površine pomemben vpliv na koeficient trenja. Na suhih površinah je koeficient trenja običajno zelo visok, zato je tudi zaviranje brez sistema ABS lahko učinkovito. Nasprotno pa se koeficient trenja občutno zmanjša, ko je vozišče mokro, kar vodi v zmanjšano zavorno učinkovitost in večjo nevarnost zdrsa. Koeficient zdrsa se pomembno spreminja glede na stanje površine ceste. Po podatkih [30] znaša približno 0,1 na mokri površini in 0,2 na suhi površini, kar potrjuje pomembnost prilagajanja zavornih sistemov in pnevmatik razmeram na cesti.

Slika 7 prikazuje primerjavo največje zavorne poti na suhem asfaltu za vozila z vključenim in izključenim sistemom ABS. Preizkusi so bili izvedeni pri različnih začetnih hitrostih: 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h in 50 km/h. Pri začetni hitrosti 40 km/h je bilo ugotovljeno, da se vozilo z vključenim ABS v povprečju ustavi po 7,7 metra, medtem ko se vozilo brez ABS ustavi po 8,6 metra. To pomeni, da sistem ABS v tem primeru skrajša zavorno pot za 10,5 %. Pri višji začetni hitrosti 50 km/h je bila povprečna zavorna pot z ABS 12 metrov, brez ABS pa 14 metrov, kar pomeni 14,3 % krajšo zavorno pot z uporabo sistema ABS. Zlasti velja poudariti, da se razlika v dolžini zavorne poti med vozilom z ABS in brez njega eksponentno povečuje z večanjem začetne hitrosti, kar dodatno potrjuje učinkovitost in varnostno prednost uporabe sistema ABS pri višjih hitrostih.



Slika 7. Zavorna pot na suhem asfaltu brez ABS sistema (levo) in z uporabo ABS sistema (desno). Leva os y– je pojemek, spodnja os x– pa zavorna pot (v enoti čevlji).

Primerjava največje zavorne poti na mokrem asfaltu pri zaviranju z vključenim in izključenim sistemom ABS kaže, da so rezultati podobni tistim na suhem asfaltu, vendar so razlike še bolj izrazite. Pri začetni hitrosti 30 km/h se vozilo brez ABS ustavi v povprečju po 17 metrih, medtem ko se vozilo z vključenim sistemom ABS ustavi že po 10,7 metra. To pomeni, da ABS na mokri površini skrajša zavorno pot za približno 37 %. Na podlagi teh rezultatov lahko

jasno ugotovimo, da sistem ABS bistveno prispeva k izboljšanju zavorne učinkovitosti, še posebej na spolzkih oziroma manj oprijemljivih cestnih površinah, kjer se brez njegovega delovanja zavorna pot občutno poveča.

3.2. Vpliv starosti pnevmatik na koeficient trenja in zavorno pot

V raziskavo je bilo vključenih osem različnih letnih pnevmatik, navedenih v tabeli 2. Starost testiranih pnevmatik je bila med 1 letom in 50 tedni ter 7 leti in 43 tedni. Vse pnevmatike so bile pred preizkusom napolnjene s tlakom, ki ga priporoča proizvajalec vozila, s čimer je bila zagotovljena enaka primerjalna osnova. Povprečne največje zavorne značilnosti za posamezne pnevmatike z vključenim sistemom ABS na suhem asfaltu pri začetni hitrosti 30 km/h so prikazane v tabeli 2. Izračuni so bili opravljeni na podlagi enačb (3)–(5), ki upoštevajo razdaljo zaviranja, pojemek in koeficient trenja.

Tabela 2. Podatki za preskušene pnevmatike in rezultati preizkusa zaviranja z uporabo ABS sistema na suhem asfaltu pri začetni hitrosti 30 km/h.

| Proizvajalec | Sava Intensa HP2 | Sava Intensa UHP 2 | Continental Conti Sport Contact 5 | Nokian Wetproof | Bridgestone Turanza | Continental Conti Eco Contact 5 | Nexen N Blue Eco | Nexen N Blue Eco |
|--|--------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|
| ID preizkušene pnevmatike | A | B | C | D | E | F | G | H |
| Povprečna zavorna pot (m) | 4,86 | 5,20 | 4,59 | 4,19 | 4,63 | 4,16 | 4,30 | 5,19 |
| Povprečni zavorni čas (s) | 1,09 | 1,11 | 1,06 | 1,02 | 1,10 | 1,01 | 1,08 | 1,16 |
| Povprečni pojemek zaviranja (m/s ²) | 7,73 | 7,79 | 7,86 | 7,19 | 6,78 | 7,48 | 7,39 | 7,14 |
| Povprečna vrednost koeficienta trenja | 0,814 | 0,830 | 0,816 | 0,773 | 0,737 | 0,791 | 0,756 | 0,759 |
| Povprečna začetna hitrost vozila ob zaviranju (km/h) | 31,18 | 32,40 | 30,51 | 27,91 | 28,49 | 28,14 | 28,69 | 30,92 |
| Starost pnevmatike (leta in tedni) | 1 leto
50 teden | 1 leto
42 teden | 2 leti
41 teden | 2 leti
43 teden | 7 let
43 teden | 6 let
43 teden | 4 leta
36 teden | 5 let
36 teden |
| Širina pnevmatike (mm) | 195 | 225 | 225 | 205 | 205 | 195 | 195 | 195 |
| Višina pnevmatike (mm) | 55 | 45 | 45 | 55 | 55 | 65 | 65 | 65 |
| Premier pnevmatike (v palcih) | 16 | 18 | 18 | 15 | 16 | 15 | 15 | 15 |
| Indeks hitrosti | H | Y | Y | H | V | H | H | H |
| Indeks obremenitve pnevmatik | 87 | 95 | 95 | 91 | 91 | 91 | 85 | 85 |
| Proizvajalec km garancija | N/A | N/A | 80,000 | 80,000 | 128,000 | N/A | 100,000 | 100,000 |

Povezave med šestimi izbranimi spremenljivkami, ki opisujejo značilnosti pnevmatik — zavorna pot, čas zaviranja, pojemek, koeficient trenja, hitrost vozila in starost pnevmatike — so bile preučene z uporabo enostavne regresijske analize. Analizirani model je predvideval, da je možno vsako izmed odvisnih spremenljivk (Y) opisati z naslednjo linearno enačbo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + e_i \quad (6)$$

Kjer je e_i ostanek (*residual*), ki predstavlja napako pri prilagajanju modela. Ostanek opisuje razliko med dejansko izmerjeno vrednostjo in vrednostjo, napovedano z regresijskim modelom, ter zagotavlja informacijo o ustreznosti prilagojenega modela. Ocenjeni parametrom β_0 in β_1 tvorita premico, ki v določenem smislu predstavlja najboljše prilaganje podatkom. Regresijska parametra β_1 (regresijski koeficient) in $\beta_{(0)}$ (regresijska konstanta) sta bila ocenjena z uporabo metode najmanjših kvadratov, ki minimizira vsoto kvadratov ostankov za vse opazovane točke. Za pnevmatiko F je bila izdelana Pearsonova korelacijska matrika, prikazana v tabeli 3. V ta namen je bila največja zavorna pot za pnevmatiko F izmerjena 28-krat pri različnih začetnih hitrostih (20 km/h, 30 km/h, 40 km/h in 50 km/h). Pri vsaki hitrosti je bilo izvedenih od šest do osem ponovitev zaviranja, kar omogoča zanesljivo statistično obdelavo rezultatov.

Tabela 3. Matrika Pearsonovega korelacijskega koeficienta med spremenljivkami za pnevmatiko F.

| Pearsonov koeficient | Zavorna pot (m) | Čas zaviranja (s) | Pojemek (m/s ²) | Koeficient trenja | Hitrost vozila (km/h) |
|-----------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|
| Zavorna pot (m) | 1 | 0,988 | -0,073 | -0,098 | 0,990 |
| Čas zaviranja (s) | 0,988 | 1 | -0,145 | -0,162 | 0,988 |
| Pojemek (m/s ²) | -0,073 | -0,145 | 1 | 0,978 | 0,006 |
| Koeficient trenja | -0,098 | -0,162 | 0,978 | 1 | -0,013 |
| Hitrost vozila (km/h) | 0,990 | 0,988 | 0,006 | -0,013 | 1 |

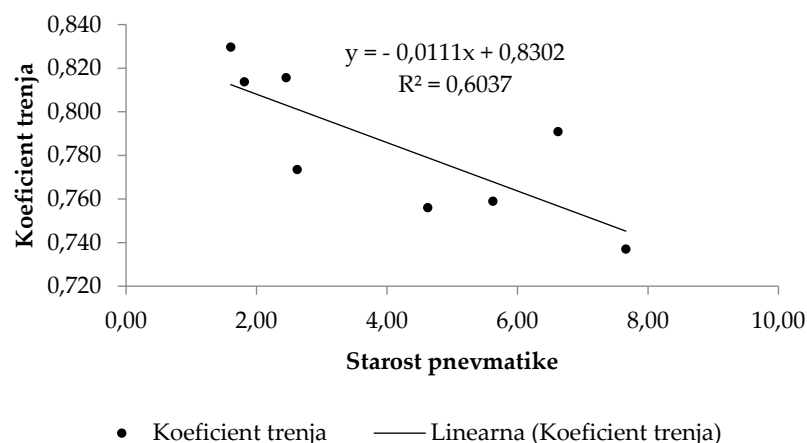
Iz Pearsonove korelacijske matrike (tabela 3) je razvidna zelo visoka povezanost med zavorno potjo, časom zaviranja in hitrostjo vozila, kar potrjuje pričakovane fizikalne odnose med temi spremenljivkami. Poleg tega je bila ugotovljena tudi močna korelacija med pojemkom (zaviranje) in koeficientom trenja, kar je v skladu z osnovno dinamiko gibanja vozila. Vpliv starosti pnevmatik na koeficient trenja in zavorno pot je bil eden izmed ključnih ciljev te raziskave. V ta namen je bila izvedena primerjalna analiza, v kateri je bila starost posamezne pnevmatike povezana s povprečnimi vrednostmi šestih ključnih spremenljivk, navedenih v tabeli 2. Ta analiza omogoča vpogled v potencialno degradacijo zavornih lastnosti pnevmatik skozi čas ter prispeva k boljšemu razumevanju vpliva staranja na varnost vožnje.

Tabela 4. Korelacija med povprečnimi meritvami vsake spremenljivke in starostjo pnevmatike (podatki iz tabele 2).

| Pearsonov koeficient | Zavorna pot (m) | Čas zaviranja (s) | Pojemek (m/s ²) | Koeficient trenja | Hitrost vozila (km/h) | Starost pnevmatike (leta) |
|-----------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|
| Zavorna pot (m) | 1 | 0,868 | 0,172 | 0,289 | 0,895 | -0,257 |
| Čas zaviranja (s) | 0,868 | 1 | -0,169 | -0,167 | 0,637 | 0,061 |
| Pojemek (m/s ²) | 0,172 | -0,169 | 1 | 0,929 | 0,591 | -0,752 |
| Koeficient trenja | 0,289 | -0,167 | 0,929 | 1 | 0,653 | -0,777 |
| Hitrost vozila (km/h) | 0,895 | 0,637 | 0,591 | 0,653 | 1 | -0,575 |
| Starost pnevmatike (leta) | -0,257 | 0,061 | -0,752 | -0,777 | -0,575 | 1 |

Iz Pearsonovega korelacijskega koeficienta, izračunanega med povprečnimi vrednostmi, je razvidna visoka negativna korelacija med koeficientom trenja in starostjo pnevmatike ter med pojemkom in starostjo pnevmatike, kar pomeni, da se z naraščajočo starostjo pnevmatike zmanjšujeta tako koeficient trenja kot zavorna učinkovitost. Močna pozitivna korelacija med koeficientom trenja in pojemkom je prav tako jasno razvidna iz tabele 3 in 4. Pretekle raziskave so pokazale, da se koeficient trenja s hitrostjo sprva povečuje, nato pa pri določenem pragu začne zmanjševati [7]. Tudi rezultati te študije to potrjujejo, saj je bil povprečni koeficient trenja za vseh 214 meritev na suhem asfaltu z osmimi različnimi pnevmatikami pri hitrosti 20 km/h 0,725, pri 30 km/h 0,759, pri 40 km/h 0,789 in pri 50 km/h 0,812, kar kaže na trend naraščanja, ki pa bi se glede na predhodne ugotovitve lahko pri višjih hitrostih obrnil navzdol zaradi zmanjšane oprijema in povečane verjetnosti zdrsa.

V tej študiji so bile podrobno preučene tudi spremembe koeficienta trenja glede na starost pnevmatike, z osrednjim vprašanjem, ali se ta s staranjem zmanjšuje, povečuje, ali ostaja nespremenjen. Rezultati analize, prikazani na sliki 8, kažejo, da obstaja visoka negativna linearna korelacija med koeficientom trenja in starostjo pnevmatike, kar potrjuje vrednost R-kvadrata 0,6037 ter pripadajoči Pearsonov korelacijski koeficient $\sqrt{0,6037} = 0,777$. Ta vrednost pomeni, da regresijski model pojasni 60,37 % variabilnosti koeficienta trenja na podlagi starosti pnevmatike, kar nakazuje zmerno do visoko stopnjo pojasnjevalne moči modela. Ob tem je treba upoštevati, da na koeficient trenja vplivajo tudi drugi dejavniki, ki niso bili vključeni v model, kot so širina, višina in premer pnevmatike, sestava gumene zmesi, tlak v pnevmatikah ter pogoji vožnje. Kljub temu pa je bil glavni cilj študije usmerjen v ugotavljanje vpliva staranja pnevmatik na trenje, pri čemer je bilo jasno potrjeno, da se koeficient trenja pnevmatike s starostjo zmanjšuje, kar lahko pomembno vpliva na zavorno učinkovitost in varnost vozila.



Slika 8. Povezava med starostjo pnevmatike (leta) in koeficientom trenja (povprečja).

3.3. Vpliv drobcov in obrabe pnevmatik na okolje

Pozornost javnosti je vse bolj usmerjena na okoljski vpliv obrabe pnevmatik, ki je tesno povezan s pojavom mikroplastike. Da bi zmanjšali negativne posledice za vodne vire, tla in ne nazadnje tudi na zdravje ljudi, si je nujno prizadevati za zmanjšanje količine obrabnih delcev pnevmatik, ki se sproščajo v promet. Kot je bilo omenjeno že v uvodu, med vožnjo pnevmatike po cesti prihaja do abrazije, pri kateri nastajajo drobni delci zaradi obrabe. Ker so pnevmatike sestavljene iz različnih materialov, vključno z naravno in sintetično gumo, njihova obraba prispeva k onesnaževanju okolja s sproščanjem delcev, znanih kot obrabni delci pnevmatik. Življenjska doba pnevmatike je za voznike pogosto vezana predvsem na globino profila, ki predstavlja merilo za njeno zamenjavo. Vendar pa to merilo ni zadostno za zanesljivo oceno vpliva pnevmatike na okolje v kontekstu mikroplastičnega onesnaževanja. Za celovitejše razumevanje in natančnejše vrednotenje okoljskega vpliva je treba obrabo pnevmatike izraziti glede na maso, tj. v gramih izgubljenega materiala, in ne zgolj glede na preostalo globino tekalne plasti. Tak pristop omogoča bolj objektivno oceno obremenitve okolja in primerljivost med različnimi pnevmatikami, vozili ter voznimi razmerami.

V tem podpoglavju je predstavljena primerjava obrabe pnevmatik, navedenih v tabeli 2, pri čemer je bila uporabljena enačba (2) za izračun količine delcev, ki nastanejo na leto zaradi obrabe. Predpostavljeno je bilo, da povprečen voznik v Evropi z letnimi pnevmatikami prevozi približno 12.000 km na leto. Na tej osnovi je bilo ocenjenih več scenarijev, pri čemer je bilo predvideno, da se pnevmatike, ki se uporabljajo od pet do osem let, obrabijo za približno 0,79 do 1,33 mm na leto, ob upoštevanju, da ima nova pnevmatika prvotno globino tekalne plasti približno 8 mm. V skladu z evropsko zakonodajo je minimalna dovoljena globina tekalne plasti za letne pnevmatike 1,6 mm, kar pomeni, da se uporabna globina profila zmanjša za približno 6,4 mm skozi življenjsko dobo pnevmatike. Če se ta življenjska doba razteza na približno šest let, znaša povprečna letna obraba profila približno 1 mm. Uporabo enačbe (2) omogoča pretvorbo te obrabe v maso izgubljenega materiala v gramih, kar predstavlja merilo za okoljski vpliv pnevmatike glede na prevoženo razdaljo. Rezultati teh izračunov so prikazani v tabeli 5, kjer je prikazana ocenjena masa obrabe pnevmatik za posamezne primere na letni ravni.

Tabela 5. Izračun obrabe pnevmatik za analizirane pnevmatike iz tabele 2.

| Pnevmatika | Širina pnevmatike (m) | Premier pnevmatike (m) | Starost pnevmatike (leta) | Obraba pnevmatike na leto (g) | Obraba pnevmatike glede na starost (kg) |
|------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| A | 0,195 | 0,406 | 1,81 | 207 | 0,374 |
| B | 0,225 | 0,457 | 1,60 | 268 | 0,429 |
| C | 0,225 | 0,457 | 2,45 | 268 | 0,657 |
| D | 0,205 | 0,381 | 2,62 | 204 | 0,534 |
| E | 0,205 | 0,406 | 7,66 | 217 | 1,664 |
| F | 0,195 | 0,381 | 6,62 | 194 | 1,282 |
| G | 0,195 | 0,381 | 4,62 | 194 | 0,895 |
| H | 0,195 | 0,381 | 5,62 | 194 | 1,089 |

Iz tabele 5 je razvidno, da je pnevmatika F povzročila več kot 1 kg obrabe skozi svojo življenjsko dobo. Glede na to, da tipična avtomobilska pnevmatika proti koncu svoje uporabe tehta v povprečju od 1 do 1,5 kg manj kot nova, lahko

sklepamo, da je bila ta pnevmatika v uporabi več let, vendar je letno prevozila manj kot 12.000 km. V skladu z izračuni iz iste preglednice se je pnevmatika F glede na svojo starost obrabila za manj kot 1 mm na leto, kar kaže na relativno nizko povprečno letno obremenitev. Po podatkih združenja ADAC se povprečno obrabi približno 120 g pnevmatike na vsakih 1.000 prevoženih kilometrov, kar je osnova za enačbo (7). Na tej podlagi je mogoče izračunati količino sproščenih drobcev pnevmatike glede na prevoženo razdaljo. Izračun drobcev pnevmatik se opravi na naslednji način.

$$TC = 0,12 \text{ kg} / 4 \cdot 12000 \text{ km} = 360 \text{ g na pnevmatiko v enem letu} \quad (7)$$

Rezultati izračuna kažejo, da pnevmatika v enem letu proizvede približno 360 g obrabe, kar ustreza 1,65 mm izgube višine tekalne plasti pri štiriletni uporabi. Po podatkih iz [26] lahko nova 10-kilogramska pnevmatika osebnega avtomobila v svoji življenjski dobi ustvari od 1 do 1,5 kg obrabe, kar pomeni približno 0,03 g/km. Na tej osnovi je mogoče izračunati, da letna obraba v višini 1 mm ustreza približno 218 g mase obrabe, če pnevmatika vozilo služi šest let. Na podlagi podatkov iz literature in rezultatov, predstavljenih v tabeli 5, je jasno, da sta količina obrabe in nastanek delcev obrabe pnevmatik tesno povezana s fizikalnimi značilnostmi pnevmatike, zlasti s širino in premerom. To pomeni, da pnevmatike z večjo širino in večjim premerom — kot jih najdemo pri vozilih SUV — v povprečju povzročajo večjo obrabo in s tem večje emisije obrabnih delcev. Ti rezultati poudarjajo pomen izbire pnevmatik in vozila v kontekstu okoljskega vpliva mikroplastike, ki nastaja kot posledica mehanskega stika pnevmatike s cestno površino.

Če obrabo pnevmatik pretvorimo iz gramov v izgubo višine tekalne plasti (v mm), dobimo rezultate ocenjene obrabe, prikazane v tabeli 6. Na tej osnovi lahko opazimo, da bi glede na starost pnevmatike in predpostavljeno povprečno obrabo 6,4 mm v 6,4 letih, morala biti pnevmatika E (Bridgestone Turanza) že povsem obrabljena. Vendar pa je bila dejansko izmerjena globina profila še vedno najmanj 1,6 mm, kar pomeni, da je bila pnevmatika v času uporabe bodisi manj izpostavljena obrabi bodisi je bilo z njo prevoženih manj kot 12.000 km na leto. Ta rezultat kaže, da se je pnevmatika E obrabljala manj kot 1 mm na leto, kar lahko kaže na varčnejšo uporabo vozila, pa tudi na višjo kakovost materialov ali tehnološke lastnosti pnevmatike, kot je zmanjšana obraba. Poleg tega lahko nižja stopnja obrabe sovpadajo s proizvajalčevo garancijo za kilometrino, ki pogosto vključuje uporabo bolj odporne gumene zmesi z daljšo življenjsko dobo. Takšne ugotovitve poudarjajo pomen povezovanja laboratorijskih meritev z dejanskimi uporabniškimi podatki za zanesljivo oceno trajnosti pnevmatik in njihovega okoljskega vpliva.

Vendar je treba poudariti, da rezultati te raziskave temeljijo na določenih vhodnih parametrih, kot so letne pnevmatike, povprečna letna kilometrina 12.000 km, uporabljena povprečna letna obraba pnevmatike 218 g ter specifične vremenske razmere, značilne za poletni čas v Sloveniji. Če bi bili enaki testi izvedeni, denimo, v severni Evropi (npr. Skandinaviji), bi bili pogoji bistveno drugačni — tako glede temperature zraka in površin, kot tudi vlažnosti in tipa uporabljenih pnevmatik. V teh državah so razširjene tudi zimske pnevmatike z bodicami, ki so na primer na Finskem dovoljene od 1. novembra do 31. marca, pa tudi izven tega obdobja, če to narekujejo vremenske razmere ali stanje cest. Poleg tega je na Finskem priporočena minimalna globina dezena letnih pnevmatik 4 mm, kar je občutno več od zakonsko določene minimalne globine 1,6 mm, ki velja v večini drugih evropskih držav. Zaradi teh razlik je treba rezultate te raziskave interpretirati previdno in jih ne posploševati na druge klimatske ali prometne pogoje. Vseeno pa velja, da bi preizkusi, izvedeni v enakih pogojih — z istimi tipi pnevmatik, dimenzijami, uporabljenim merilnim sistemom Vericom, enakimi začetnimi hitrostmi, podlago in vremenskimi pogoji — morali dati primerljive rezultate, kar potrjuje, da je preizkusna metodologija ponovljiva in primerna za nadaljnje raziskave.

Tabela 6. Drobci pnevmatike so izraženi v gramih (enačba (2)), višina obrabljene tekalne plasti pa v mm (enačba (7)).

| Pnevmatika | Starost pnevmatike (leta) | Obraba pnevmatike na leto (g) | Obraba pnevmatike glede na starost (kg) | Obraba višine tekalne plasti na leto (mm) | Obraba višine tekalne plasti glede na starost (mm) |
|------------|---------------------------|-------------------------------|---|---|--|
| A | 1,81 | 207 | 0,374 | 0,95 | 1,72 |
| B | 1,60 | 268 | 0,429 | 1,23 | 1,97 |
| C | 2,45 | 268 | 0,657 | 1,23 | 3,01 |
| D | 2,62 | 204 | 0,534 | 0,93 | 2,45 |
| E | 7,66 | 217 | 1,664 | 0,99 | 7,63 |
| F | 6,62 | 194 | 1,282 | 0,89 | 5,88 |
| G | 4,62 | 194 | 0,895 | 0,89 | 4,11 |
| H | 5,62 | 194 | 1,089 | 0,89 | 4,99 |

4. Razprava

Rezultati tega članka kažejo, da lahko uporaba protiblokirnega zavornega sistema (ABS) znatno izboljša zavorno pot in koeficient trenja tako na suhih kot tudi na mokrih površinah. Ugotovitve naše raziskave so skladne z rezultati iz [1], kjer je bila predstavljena tehnična analiza eksperimentalne študije koeficienta trenja vozila pri običajnem zaviranju, z uporabo sistema ABS ter sistema za nadzor oprijema (TCS) pri največjih zavornih silah na različnih

voziščnih podlagah. Študija [1] je pokazala, da se koeficient trenja z naraščajočo začetno hitrostjo zmanjšuje in je močno odvisen od lastnosti površine, kar potrjujejo tudi naši podatki, predstavljeni v primerjalni tabeli 7. V naši raziskavi je bilo ugotovljeno, da je bil na suhem asfaltu koeficient trenja z vključenim ABS v povprečju za 13 % višji kot pri običajnem zaviranju, medtem ko je bil na mokri podlagi ta razlika še večja — 30 % z uporabo sistema ABS. Analizirali smo tudi vpliv ABS na zavorno pot, kjer se je pokazalo, da sistem ABS skrajša zavorno pot za 14,3 % na suhem asfaltu ter kar za 37 % na mokri drsni površini. Ti rezultati pa niso skladni z ugotovitvami raziskave [1], kjer je bilo ugotovljeno, da se je zavorna pot pri uporabi ABS na grobi in gladki podlagi celo podaljšala. To poudarja dejstvo, da ABS ne zagotavlja vedno krajše zavorne poti, saj je njegova učinkovitost odvisna od številnih dejavnikov, med drugim od stanja in kakovosti pnevmatik, vrste cestišča, hitrosti ter mase vozila. Na primer, v globokem snegu lahko pride do pogrezanja koles v podlago, zaradi česar se njihova rotacija upočasni in sistem ABS se aktivira, čeprav oprijem ni izgubljen. To lahko vodi do podaljšanja zavorne poti, saj kolesa zaradi hitrega sproščanja zavor izgubijo stik s podlago in zdrsnejo. Ugotovitve naše študije zato potrjujejo pomembnost kritične presoje delovanja ABS v različnih voznih razmerah in opozarjajo, da tehnologija ni univerzalna rešitev, temveč mora biti podprta s kakovostnimi pnevmatikami, ustreznim vzdrževanjem in prilagojeno vožnjo.

Tabela 7. Primerjava koeficientov trenja.

| Avtor | Hitrost vozila | Suha asfaltna cesta | Mokra asfaltna cesta | Mokra drsna površina |
|--------------|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| [1] | 50 km/h | 1 | 0,5 | / |
| [1] | 90 km/h | 0,91 | 0,2 | / |
| Ta raziskava | 30 km/h | 0,84 | / | 0,35 |
| Ta raziskava | 40 km/h | 0,81 | / | 0,33 |

Izboljšave protiblokirnega zavornega sistema (ABS) so predmet številnih raziskav, zlasti na področju ocenjevanja optimalnega razmerja zdrsa, kar so obravnavali številni avtorji [31–34]. V zadnjem času pa se kot zanimiva smer razvoja uveljavlja regenerativni protiblokirni zavorni sistem (RABS), ki združuje delovanje klasičnega ABS s sistemom regenerativnega zaviranja, zlasti v kontekstu električnih in hibridnih vozil [35–37]. Sistem RABS vključuje dve ključni funkciji: prvič, uporablja se regenerativno zaviranje za upočasnjevanje vozila in hkratno pretvorbo kinetične energije v električno energijo, ki se shranjuje v bateriji; drugič, klasični protiblokirni sistem skrbi za preprečevanje blokade koles in s tem zagotavlja stabilnost vozila pri zaviranju. Takšna integracija omogoča ne le izboljšano energetsko učinkovitost, temveč tudi gladkejšo in bolj nadzorovano zaviranje, kar prispeva k večjemu udobju in varnosti vožnje. V raziskavi [35] je bil predlagan sistem za oceno učinkovitosti regenerativnega zaviranja pri nizkih hitrostih (do 10 km/h), ki hibridnemu vozilu omogoča, da povrne znatno količino električne energije. Sistemi RABS se zato vse pogostejše uporabljajo v električnih in hibridnih vozilih, saj prispevajo k večji energetski učinkovitosti in varnosti, kar je posebej pomembno v kontekstu razvoja trajnostne mobilnosti. Glede na naraščajoče povpraševanje po električnih in hibridnih vozilih, potrebo po učinkovitejših prometnih rešitvah ter hiter napredek baterijskih tehnologij, je pričakovati, da se bodo raziskave in razvoj regenerativnih protiblokirnih zavornih sistemov (RABS) v prihodnje še okrepili in postali pomemben del prihodnjih generacij vozil.

V članku je obravnavana povezava med starostjo pnevmatik, njihovo obrabo, zavorno potjo in koeficientom trenja, pri čemer je poseben poudarek namenjen pomenu obrabe pnevmatik in spreminjanja koeficienta trenja kot posledici staranja. Na podlagi izračunov količine drobcov pnevmatik je bila ocenjena povprečna letna obraba pnevmatike 360 gramov, kar ustreza letnemu zmanjšanju višine tekalne plasti za približno 1,65 mm pri tipični letni prevoženosti razdalji 12.000 km in štiriletni življenjski dobi pnevmatik. Prejšnja študija [26] poroča, da lahko nova 10-kilogramska pnevmatika osebnega avtomobila v svoji življenjski dobi ustvari med 1 in 1,5 kg obrabe, kar pomeni približno 0,03 g/km. Na podlagi teh podatkov je priporočljivo, da se letne pnevmatike uporabljajo med štiri in šest let, vendar je treba opozoriti, da so ta priporočila specifična za določene pogoje in ne veljajo univerzalno za vse tipe pnevmatik ali vse vožno-klimatske razmere. Zato morajo vozniki redno spremljati stanje pnevmatik, zlasti globino tekalne plasti, in glede na lastne vozne navade določiti optimalni čas za zamenjavo. Med uporabo na cesti pnevmatike povzročajo abrazijo, pri kateri nastajajo drobci obrabe, saj so izdelane iz kombinacije naravnih in sintetičnih materialov, kot je guma. Na okoljski vpliv teh delcev, ki se sproščajo v zrak, tla in vodne vire, so že opozorili številni avtorji [22, 26, 38–42]. Gre za resno okoljsko vprašanje, saj imajo ostanki pnevmatik potencialno negativen vpliv na ekosisteme, kakovost zraka in zdravje ljudi, zato je nujno, da se temu vprašanju v prihodnje namenijo več pozornosti v okviru raziskav in zakonodaje.

V tej raziskavi so bile prepoznane številne možnosti za nadaljnje poglobljanje razumevanja, kako različni dejavniki vplivajo na zavorno pot in koeficient trenja, ter za njihovo optimizacijo z namenom izboljšanja varnosti vozila in učinkovitosti zaviranja. Med ključnimi področji prihodnjih raziskav so: analiza vpliva različnih vrst pnevmatik (npr. zimskih, celoletnih) na zaviranje; preučevanje vpliva dodatnih dejavnikov, kot so tlak v pnevmatikah, masa vozila, različne vrste cestnih površin in vremenskih razmer; ocena učinkovitosti različnih zavornih sistemov in tehnologij

pri zmanjševanju zavorne poti; ter raziskava povezave med starostjo pnevmatik in drugimi vidiki delovanja, kot so vodljivost, stabilnost in poraba goriva, kar lahko prispeva k celostnemu izboljšanju varnosti in zmogljivosti vozil. V tem članku so bili pojasnjeni učinki hitrosti vozila, uporabe sistema ABS in starosti pnevmatik na zavorno pot in koeficient trenja. Rezultati predstavljene raziskave pomembno prispevajo k razumevanju zavorne učinkovitosti vozil na različnih cestnih površinah, pri različnih vrstah pnevmatik in ob uporabi različnih zavornih sistemov, s čimer nudijo podlago za nadaljnji razvoj prometne varnosti in trajnostne mobilnosti.

5. Zaključek

V članku so obravnavani vplivi hitrosti vozila in delovanja sistema ABS na koeficient trenja ter zavorno pot. Preizkus je bil izveden z uporabo letne pnevmatike Sava Intensa HP2 na suhi asfaltni in mokri drsni površini, z vključenim in izključenim sistemom ABS, pri začetnih hitrostih 20 km/h, 30 km/h in 40 km/h. Ugotovljeno je bilo, da je koeficient trenja z uporabo ABS v povprečju za 13 % višji na suhi površini in za 30 % višji na mokri površini v primerjavi z zaviranjem brez ABS. Poleg tega je sistem ABS skrajšal zavorno pot za 14,3 % na suhi površini in kar za 37 % na mokri površini, kar potrjuje njegovo učinkovitost pri izboljšanju zaviranja v različnih razmerah.

Poleg tega je bila v članku analizirana tudi povezava med starostjo pnevmatik in koeficientom trenja, pri čemer je bila ugotovljena zmerna do visoka negativna korelacija, kar kaže, da se koeficient trenja s staranjem pnevmatike zmanjšuje. Vendar pa je regresijski model pojasnil le zmeren delež variabilnosti, kar pomeni, da na koeficient trenja in zavorno učinkovitost verjetno vplivajo tudi drugi dejavniki, ki niso bili zajeti v modelu – na primer širina, višina in premer pnevmatike, sestava gumene zmesi ali vozne razmere.

V članku je bila izvedena tudi primerjalna analiza osmih letnih pnevmatik z vidika obrabe. Po podatkih združenja ADAC povprečen osebni avtomobil na vsakih 1.000 prevoženih kilometrov obrabi približno 120 gramov pnevmatike. Ob upoštevanju povprečne letne prevožene razdalje v Evropi (12.000 km/leto) je bilo ugotovljeno, da 218 gramov obrabe na leto ustreza približno 1 mm izgube višine tekalne plasti. To pomeni, da lahko pnevmatika po šestih letih uporabe tehta približno 1,3 kg manj kot nova. Na podlagi tega izračuna je bila za vsako testirano pnevmatiko ocenjena letna obraba v kilogramih, pri čemer so bile upoštevane tudi dimenzije in specifikacije pnevmatik.

Primerjava osmih letnih pnevmatik je pokazala, da je pnevmatika E povzročila več kot 1 kg obrabe, kar bi pomenilo, da bi morala biti ob predpostavki 12.000 km letne vožnje že popolnoma obrabljena. Ker pa pnevmatika še vedno ustreza minimalnim zakonskim zahtevam glede globine profila, lahko sklepamo, da je bilo z njo prevoženih manj kot 12.000 km na leto.

Na podlagi zbranih rezultatov članek priporoča, da se letne pnevmatike zamenjajo po štirih do šestih letih uporabe, če je letna kilometrina okoli 12.000 km. Razlog za to ni le mehanska obraba, temveč tudi zmanjševanje koeficienta trenja zaradi staranja pnevmatik, kar posledično podaljšuje zavorno pot in zmanjšuje varnost. Pravočasna menjava pnevmatik torej ni zgolj priporočilo, temveč pomemben varnostni ukrep.

Viri in literatura

1. Samuelraj, D.; Jaichandar, S.; Gowthama, R.; Govindan, S. Coefficient of Friction in Different Road Conditions by Various Control Methods—An Overall Review. *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.* 2018, *8*, 9–20. <https://doi.org/10.24247/ijmperdddec20182>.
2. Zhao, Y.-Q.; Hai-Qing, L.; Fen, L.; Jian, W.; Xue-Wu, J. Estimation of Road Friction Coefficient in Different Road Conditions Based on Vehicle Braking Dynamics. *Chin. J. Mech. Eng.* 2017, *30*, 982–990. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0143-z>.
3. Oh, Y.; Lee, H.; Characteristics of a Tire Friction and Performances of a Braking in a High Speed Driving. *Adv. Mech. Eng.* 2014, *6*, 260428. <https://doi.org/10.1155/2014/260428>.
4. Saha, S.; Saha, S.; Ikkurti, H. A robust slip based traction control of electric vehicle under different road conditions. In Proceedings of the Michael Faraday IET International Summit 2015, Kolkata, India, 12–13 September 2015.
5. Leiss, P. J.; Becker, S.; Derian, G. Tire Friction Comparison of Three Tire Types. Paper presented at the SAE 2013 World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA, 16–18 April 2013. SAE International in United States: Warrendale, PA, USA.
6. Uzunov, H.; Dimitrov, K.; Dechkova, S. *Experimental Determination of the Tire-Road Friction Coefficient for a Vehicle with Anti-Lock Braking System*; AIP Publishing: College Park, MD, USA, 2022; Volume 2557; p. 030001.
7. Walu, K. J.; Olszewski, Z. Analysis Of Tire-road Contact Under Winter Conditions. In Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2011), London, UK, 6–8 July 2011.
8. Bauer, D. R.; Baldwin, J.M.; Ellwood, K.R. Rubber aging in tires. Part 2: Accelerated oven aging tests. *Polym. Degrad. Stab.* 2007, *92*, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.08.014>.
9. Baldwin, J. M.; Bauer, D.R.; Ellwood, K.R. Rubber aging in tires. Part 1: Field results. *Polym. Degrad. Stab.* 2007, *92*, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.08.030>.
10. Baldwin, J.; Bauer, D. and Ellwood, K. Accelerated Aging of Tires, Part II. *Rubber Chem. Technol.* 2005, *78*, 336–353. <https://doi.org/10.5254/1.3547887>.
11. Wang, Y.; Hu, J.; Wang, F.; Dong, H.; Yan, Y.; Ren, Y.; Zhou, C.; Guodong, Y. Tire Road Friction Coefficient Estimation: Review and Research Perspectives. *Chin. J. Mech. Eng.* 2022, *35*, 6. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00675-z>.
12. Wright, K.R.S.; Botha, T.R.; Els, P.S. Effects of age and wear on the stiffness and friction properties of an SUV tyre. *J. Terramechanics* 2019, *84*, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.04.001>.
13. Kreider, M. L.; Panko, J.M.; McAtee, B.L.; Sweet, L.I.; Finley, B.L. Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies. *Sci. Total Environ.* 2010, *408*, 652–659.

14. Sommer, F.; Dietze, V.; Baum, A.; Sauer, J.; Gilge, S.; Maschowski, C.; Gieré, R. Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol Air Qual. Res.* 2018, *18*, 2014–2028. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0099>.
15. Zhang, M.; Yin, H.; Tan, J.; Wang, X.; Yang, Z.; Hao, L.; Du, T.; Niu, Z.; Ge, Y. A comprehensive review of tyre wear particles: Formation, measurements, properties, and influencing factors. *Atmos. Environ.* 2023, *297*, 119597. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119597>.
16. Scrap Tires, in User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. 2016, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Federal Highway Administration Research and Technology. Available online: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st1.cfm> (accessed on 4 April 2023).
17. Schiller, S.; Speciale, H. How Long Do Michelin Tires Last—Average Lifespan. 2023 January 2, 2023. Available online: <https://www.ppmc-transport.org/how-long-do-michelin-tires-last/> (accessed on 28 March 2023).
18. IRSG. International Rubber Study Group. 2023. Available online: <https://www.rubberstudy.org/> (accessed on 28 March 2023).
19. RubberWorld. Latest World Rubber Industry Outlook Now Available from IRSG. 2021. Available online: <https://rubberworld.com/latest-world-rubber-industry-outlook-now-available-from-irsg/> (accessed on 29 March 2023).
20. Wagner, S.; Hüffer, T.; Klöckner, P.; Wehrhahn, M.; Hofmann, T.; Reemtsma, T. Tire wear particles in the aquatic environment—A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. *Water Res.* 2018, *139*, 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051>.
21. Boucher, J.; Friot, D. *Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources*; IUCN: Gland, Switzerland, 2017.
22. Kole, P. J.; Löhr, A. J.; Van Belleghem, F.G.A.J.; Ragas, A.M.J. Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int. J. Envi-Ronmental Res. Public Health* 2017, *14*, 1265. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>.
23. Järlskog, I.; Strömvall, A.-M.; Magnusson, K.; Gustafsson, M.; Polukarova, M.; Galfi, H.; Aronsson, M.; Andersson-Sköld, Y. Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater. *Sci. Total Environ.* 2020, *729*, 138950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138950>.
24. Eisentraut, P.; Dümichen, E.; Ruhl, A.S.; Jekel, M.; Albrecht, M.; Gehde, M.; Braun, U. Two Birds with One Stone—Fast and Simultaneous Analysis of Microplastics: Microparticles Derived from Thermoplastics and Tire Wear. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2018, *5*, 608–613. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00446>.
25. Liu, F.; Olesen, K. B.; Borregaard, A. R.; Vollertsen, J. Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds. *Sci. Total Environ.* 2019, *671*, 992–1000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.416>.
26. Milani, M.; Pucillo, F.P.; Ballerini, M.; Camatini, M.; Gualtieri, M.; Martino, S. First evidence of tyre debris characterization at the nanoscale by focused ion beam. *Mater. Charact.* 2004, *52*, 283–288.
27. Transport, E. Passenger Transport—Cars, in Change in Distance Travelled by Car. 2021. Available online: <https://ec.europa.eu/eurostat/> (accessed on 29 March 2023).
28. ADAC Tyre Wear Particles in the Environment. 2022. Available online: https://assets.adac.de/image/upload/v1639663105/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/Tyre_wear_particles_in_the_environment_zkmd3a.pdf (accessed on 28 March 2023).
29. Gürbüz, H.; Buyruk, S. Improvement of safe stopping distance and accident risk coefficient based on active driver sight field on real road conditions. *IET Intell. Transp. Syst.* 2019, *13*, 1843–1850. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0322>.
30. Hussain, I.; Patoli, A.; Kazi, K. Fuzzy Logic Based Effective Anti-Lock Braking System Adaptive to Road Conditions. In Proceedings of the First International Conference on Modern Communication & Computing Technologies (MCCT'14), Nawabshah, Pakistan, 26–28 February 2014. Available online: <https://www.rubberstudy.org/> (accessed on 4 April 2023).
31. Soltani, A.; Azadi, S.; Jazar, R. N. Integrated control of braking and steering systems to improve vehicle stability based on optimal wheel slip ratio estimation. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2022, *44*, 102. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03420-2>.
32. Rajendran, S.; Spurgeon, S.K.; Tsampardoukas, G.; Hampson, R. Estimation of road frictional force and wheel slip for effective antilock braking system (ABS) control. *Int. J. Robust Nonlinear Control* 2019, *29*, 736–765. <https://doi.org/10.1002/rnc.4366>.
33. Seyedtabaai, S.; Velayati, A. Adaptive optimal slip ratio estimator for effective braking on a non-uniform condition road. *Automatika* 2019, *60*, 413–421. <https://doi.org/10.1080/00051144.2019.1637053>.
34. Zhao, J.; Zhang, J.; Zhu, B. Development and Verification of the Tire/Road Friction Estimation Algorithm for Antilock Braking System. *Math. Probl. Eng.* 2014, *2014*, 786492. <https://doi.org/10.1155/2014/786492>.
35. Elghitany, M.N.; Tolba, F.; Abdelkader, A.M. Low Vehicle Speeds Regenerative Anti-lock Braking System. *Ain Shams Eng. J.* 2022, *13*, 101570. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.08.013>.
36. Chen, J.; Yu, J.; Zhang, K.; Ma, Y. Control of regenerative braking systems for four-wheel-independently-actuated electric vehicles. *Mechatronics* 2018, *50*, 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.06.005>.
37. Chen, X.; Lingtao, W.; Xiangyu, W.; Liang, L.; Qiong, W.; Lingyun, X. Hierarchical cooperative control of anti-lock braking and energy regeneration for electromechanical brake-by-wire system. *Mech. Syst. Signal Process.* 2021, *159*, 107796. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107796>.
38. Piscitello, A.; Bianco, C.; Casasso, A.; Sethi, R. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Sci. Total Environ.* 2021, *766*, 144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>.
39. Verschoor, A.; Poorter, L.; Dröge, R.; Kuenen, J.; Valk, E. Emission of Microplastics and Potential Mitigation Measures: Abrasive Cleaning Agents, Paints and Tyre Wear. Report of National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands, 2016. Available online: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0026.pdf> (accessed on 4 April 2023).

40. Magnusson, K.; Eliasson, K.; Fråne, A.; Haikonen, K.; Hultén, J.; Olshammar, M.; Stadmark, J.; Voisin, A. Swedish Sources and Pathways for Microplastics to the Marine Environment. Report of the Swedish Environmental Protection Agency, Sweden, 2016. Available online: <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/swedish-sources-and-pathways-for-microplastics-to-the-marine-environment.html> (accessed on 4 April 2023).
41. Cani, D.; van der Waal, J. C.; Pescarmona, P. P. Highly-accessible, doped TiO₂ nanoparticles embedded at the surface of SiO₂ as photocatalysts for the degradation of pollutants under visible and UV radiation. *Appl. Catal. A Gen.* 2021, *621*, 118179. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118179>.
42. Fan, G.; Ning, R.; Li, X.; Lin, X.; Du, B.; Luo, J.; Zhang, X. Mussel-Inspired Immobilization of Photocatalysts with Synergistic Photocatalytic-Photothermal Performance for Water Remediation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, *13*, 2973. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02973>.

Vpliv migracije storitev cestnega tovornega prometa na gospodarske kazalnike v izbranih državah EU

Marina Zanne, Elen Twrdy, Robert Muha, Milan Batista

Prevod dela: The Impact of Migration of Road Freight Transport Services on Economic Indicators in Selected EU Countries. *Promet - Traffic&Transportation*, 35(3), 2023. <https://doi.org/10.7307/ptt.v35i3.198>

Povzetek: Promet je panoga, ki ustvari pomemben del nacionalnega dohodka, in neposredno ali posredno zaposluje veliko število delavcev, hkrati pa podpira obstoj in razvoj vseh drugih gospodarskih panog. Kljub dolgoletnemu cilju, da se v Evropski uniji (EU) ločita gospodarska in prometna rast, se obseg tovornega prometa, zlasti cestnega tovornega prometa, še naprej povečuje. To povzroča poslabšanje kakovosti življenja in okolja, po drugi strani pa ustvarja tudi poslovne priložnosti. Vprašanje je, prevozniki katerih držav bodo imeli največ koristi. Avtorji z analizo deleža premikov podajo pregled dinamike trga cestnega tovornega prometa v EU in izberejo države, ki jih je treba podrobneje preučiti. Nato preučijo, v kolikšni meri sektor cestnega tovornega prometa prispeva k nacionalnemu dogovoru v teh državah. Z regresijsko analizo ocenijo cene prevozov ter spremembe v prihodkih in bruto dodani vrednosti za izbrane države zaradi sprememb strukture trga. Rezultati kažejo, da so se prihodki sektorja zaradi sprememb na trgu povečali za 4 %, bruto dodana vrednost sektorja pa je le malo odstopala, zaradi pomanjkanja voznikov tovornjakov pa je prišlo do izgube bruto dodane vrednosti v višini najmanj 8 milijard EUR.

Ključne besede: EU, cestni tovorni promet, nacionalni sporazum, analiza deleža menjav, regresijska analiza, zaposlovanje

1. Uvod

Konkurenčnost evropskega gospodarstva temelji na notranjem trgu, na katerem je zagotovljen prost pretok ljudi, blaga, storitev in kapitala. Promet je ključni dejavnik za razvoj in obstoj sodobnih gospodarstev in družb, saj podpira optimalno geografsko porazdelitev gospodarskih dejavnosti, rast gospodarske proizvodnje in kakovost življenja. Hkrati je promet panoga, ki ustvarja pomemben delež nacionalnega dohodka, in neposredno ali posredno zaposluje veliko število delavcev. Trenutno prometni sektor prispeva 5 % k evropskemu bruto domačemu proizvodu (BDP) in neposredno zaposluje približno 10 milijonov delavcev [1]. Bruto dodana vrednost (BDV) sektorja prometa in skladiščenja znaša približno 575 milijard EUR v tekočih cenah (ocena iz [2]).

Povpraševanje po prometu v Evropski uniji (EU) že desetletja skoraj enakomerno narašča, čeprav nekoliko počasneje kot BDP; povprečna letna stopnja rasti (average annual growth rate – AAGR) za potniški promet je znašala 1,2 %, za tovorni promet pa 1,4 %, medtem ko se je BDP od leta 1995 do leta 2019 v povprečju povečeval za 1,7 % na leto [2]. Kljub dolgoletni težnji po ločitvi gospodarskega razvoja od rasti obsega prometa in zlasti zmanjšanju negativnih stranskih učinkov prometa, ki jih povzroča predvsem cestni promet, naj bi se do leta 2050 potniški in tovorni promet v primerjavi z letom 2010 povečala za približno 40 % oziroma 60 % [3].

Ta prispevek se osredotoča na komercialni cestni tovorni promet v EU. Danes je trg storitev cestnega tovornega prometa popolnoma odprt za konkurenco, saj sta bila mednarodni in kabotažni cestni tovorni promet liberalizirana z vrsto evropskih pravnih aktov; prevozniki lahko delujejo po vsej EU, ne glede na to, ali so tovorni tokovi kakor koli povezani z gospodarstvi držav, iz katerih prihajajo.

Leta 2020 je bil evropski trg cestnega tovornega prometa ocenjen na 324,5 milijarde EUR, leta 2021 pa naj bi se po napovedih povečal na prednovoletne številke in dosegel vrednost približno 352 milijard EUR. V prihodnjih letih je napovedana nadaljnja rast [4]; vendar od napovedanega povečanja ne bodo imeli enake koristi vsi prevozniki in vse države. V dnevnem časopisu je veliko člankov, ki opisujejo slabši položaj cestnih prevoznikov v državah EU-14 (države, ki so bile članice EU pred letom 2004) v primerjavi s tistimi v državah EU-13 (države, ki so postale članice EU po letu 2004). Po drugi strani pa je število znanstvenih člankov na to temo omejeno.

Študije kažejo, da se tovorni tokovi hitro odzivajo na gospodarske in politične spremembe, pri čemer je cestni promet najbolj odziven. Razmerje med obsegom tovornih tokov in stopnjo gospodarske dejavnosti je že dolgo metoda za napovedovanje prihodnjih tovornih tokov. Številne študije so pokazale močno povezavo med rastjo BDP in obsegom tovornih tokov, merjenih v tonskih kilometrih (npr. [5], [6]). Tovorne tokove je mogoče povezati tudi z demografskimi spremembami, gospodarsko strukturo, stroški prevoza, globalizacijo gospodarstva, okoljsko ozaveščenostjo, uporabljenimi logističnimi koncepti in značilnostmi potencialnih načinov prevoza (npr. [7], [8], [9]). V tej študiji pa avtorji poskušajo ugotoviti obratno povezavo, tj. neposredni prispevek storitev cestnega tovornega prometa k BDV v izbranih državah, in oceniti vpliv sprememb pri zagotavljanju storitev cestnega tovornega prometa na skupne stroške cestnega tovornega prometa v EU.

Evropska komisija je leta 2017 objavila poročilo o trgu cestnega prometa, vendar brez ocene ekonomskega vidika [10]. Študije, ki so obravnavale to vprašanje, so večinoma preučevale širši vpliv različnih prometnih sektorjev na nacionalna gospodarstva. V ta namen so večinoma uporabljale kazalnike, kot so dodana vrednost, zaposlenost, dohodek od dela in naložbe, ter uporabile input-output analizo, kvantitativni ekonomski model, ki opisuje soodvisne

odnose med industrijskimi sektorji v gospodarstvu. Coppens in drugi [11] so preučevali vpliv pristanišča Antwerpen na regionalni gospodarski razvoj. Troch in drugi [12] so preučevali dodano vrednost železniškega tovornega prometa v Belgiji, Meersman in drugi [13] pa posredni gospodarski vpliv železniškega tovornega prometa v Belgiji. Njoya in Nikitas [14] sta preučevala vpliv zračnega prometa na zaposlovanje in zmanjševanje revščine v Južni Afriki.

Na trgu cestnega tovornega prometa v EU je v zadnjih letih prišlo do velikih sprememb na področju ponudnikov storitev. Cilj prispevka je kvantificirati spremembe na trgu cestnega tovornega prometa EU v zadnjem desetletju in odgovoriti na naslednja raziskovalna vprašanja: (a) Ali so spremembe pri zagotavljanju storitev cestnega tovornega prometa koristne za evropsko prebivalstvo? (b) Kako sprememba v zagotavljanju storitev cestnega tovornega prometa vpliva na BDV izbranih držav EU? (c) Koliko pomanjkanje voznikov tovornjakov neposredno vpliva na BDV v izbranih državah EU?

Prispevek je razdeljen na šest poglavij. Prvo poglavje vsebuje uvod v temo in raziskovalna vprašanja. V drugem poglavju je opisana uporabljena metodologija. Tretje poglavje vsebuje kratek pregled sektorja cestnega tovornega prometa v EU. Četrto poglavje predstavlja podlago za odgovore na raziskovalna vprašanja. Peto poglavje je osrednje poglavje, ki vsebuje odgovore na raziskovalna vprašanja in razpravo. V šestem poglavju so povzete ugotovitve in podan vpogled v nadaljnje delo.

2. Metodologija

Uporabljena raziskovalna metodologija je metodologija od zgoraj navzdol. V prvi fazi je z uporabo osnovnih opisnih statističnih podatkov in pregledom zakonodaje določen profil sektorja cestnega tovornega prometa v EU.

V naslednji fazi se izračuna Herfindahl-Hirschmanov indeks (HHI) za določitev koncentracije trga.

$$HHI = 10.000 \times \sum_{i=1}^n s_i^2 \quad (1)$$

kjer je s odstotni tržni delež (v našem primeru vsake države i).

HHI se giblje od skoraj 0 do 10.000. Trg s HHI manj kot 1.500 velja za konkurenčen, s HHI od 1.500 do 2.500 za zmerno koncentriran, s HHI 2.500 ali več pa za zelo koncentriran trg.

Kot temeljni metodi za odgovore na raziskovalna vprašanja sta uporabljeni analiza deleža sprememb in regresijska analiza.

Analizo porazdelitve delovnega časa je v zgodnjih štiridesetih letih prejšnjega stoletja uvedel Creamer. Gre za znanstveno metodo, razvito za regionalno ekonomsko analizo. Prvotna zamisel te metode je prikazati rast zaposlenosti in konkurenčnost industrije v določeni regiji z razgradnjo učinkov na štiri komponente, in sicer na učinek nacionalne rasti, učinek mešanice industrij, učinek pričakovane spremembe in učinek konkurence. Leta 1997 je Notteboom [15] predstavil poenostavljeno analizo deleža sprememb, ki se lahko uporablja veliko širše. Twrdy in Batista [16] sta jo na primer uporabila za analizo kontejnerskega prometa v Severnem Jadranu.

Poenostavljena analiza deleža premika pomaga razumeti spremembe na trgu, saj jih razdeli na dva dela, pri čemer delež odraža pričakovano rast za ohranitev tržnega deleža, premik pa odraža razliko od pričakovane rasti.

$$share_{i,t} = GR_t \times Q_{i,t-1} = (Q_t - Q_{t-1}) \times s_{i,t-1}, \quad (2)$$

$$shift_{i,t} = (s_{i,t} - s_{i,t-1}) \times Q_t = Q_{i,t} - Q_{i,t-1} - share_{i,t}, \quad (3)$$

kjer je GR stopnja rasti (skupne) opazovane spremenljivke, Q pomeni vsoto opazovane količine, i pomeni posamezno opazovanje (državo), t in $t-1$ pa označujeta čas opazovanja.

Analiza porazdelitve delovnega časa je preprosta; zanjo je potrebna le majhna količina podatkov, ki so na splošno takoj na voljo [17]. Vendar gre za statično metodo, pri kateri so rezultati odvisni od izbranih let, spremembe med začetnim in končnim letom pa niso opisane. Avtorji so izbrali statični pristop z desetletnim obdobjem, da bi poudarili spremembe na trgu cestnega tovornega prometa v EU. Pristop od leta do leta ne bi zagotovil boljših rezultatov, zlasti ker bi lahko upoštevali tudi nekatera kratkoročna izkrivljanja zaradi makroekonomskih nihanj ali nepričakovanih dogodkov [18]. Rezultati analize deleža preusmeritev so služili predvsem kot eden od dejavnikov za določitev držav za nadaljnjo, podrobnejšo obravnavo in oris sprememb na trgu cestnega tovornega prometa. Rezultati analize deleža modalnih premikov se v tem dokumentu ne uporabljajo za napovedne namene.

V drugi fazi raziskave so izbrane države članice podrobneje obravnavane. Za nadaljnjo študijo je bilo izbranih osem držav; štiri od njih so nove sile na trgu cestnega tovornega prometa, in sicer Poljska, Litva, Bolgarija in Romunija, ter štiri velike in tradicionalno pomembne države, ki v zadnjem desetletju izgubljajo svoj pomen na evropskem trgu cestnega tovornega prometa, in sicer Nemčija, Francija, Španija in Italija. Merila za izbiro držav so vključevala

rezultate analize deleža izmen, skupno število zaposlenih v cestnem tovornem prometu in delež zaposlitve v cestnem tovornem prometu v skupni zaposlenosti ter obseg prevoza in stroške dela. Upoštevane so bile trenutne vrednosti in trendi. Podobnim državam je bila posvečena pozornost tudi v študiji avtorjev De Smedt in De Wispelaere [19].

Podatki o uspešnosti sektorja cestnega tovornega prometa in obsegu prevoza prevoznikov s sedežem v zadevni državi so bili razdeljeni na nacionalni prevoz, nakladanje v državi poročevalki, razkladanje v državi poročevalki, navzkrižno trgovino in kabotažo. Ti podatki so iz Eurostata ([sbs_na_1a_se_r2] in [ROAD_GO_TA_TOTT]). Manjkajoči podatki so bili pridobljeni iz Statistical Pocketbook - Mobility and Transport (2014-2019). Za analizo so bili upoštevani podatki od leta 2011 do vključno leta 2020. V tem obdobju, natančneje med letoma 2008 in 2014, je EU-27 doživela krizo v obliki črke W. Kriza v obliki črke W je kriza z dvojnim dnom, pri kateri gospodarstvo hitro raste, nato pa spet pade [20]. Leto 2020 je zaznamovala tudi pandemija. Te razmere lahko omejijo zmožnosti modeliranja napovedi.

Pri večkratni linearni regresiji se parametri modela prilagodijo tako, da se zmanjša razlika med napovedanim in izmerjenim rezultatom, kadar se upošteva več vhodnih podatkov,

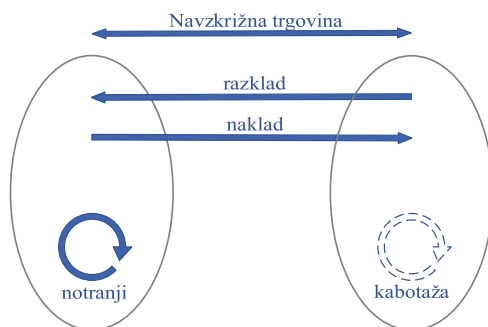
$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon, \quad (4)$$

kjer Y označuje vektor odvisne spremenljivke, α pomeni presečišče (konstanto), β označuje koeficiente naklona za vsako pojasnjevalno spremenljivko, X je matrika pojasnjevalnih spremenljivk, ε pa označuje izraz napake modela (ostanke).

Podatki o obsegu prevoza, izraženi v kilometrih, so predstavljali neodvisne (pojasnjevalne) spremenljivke, medtem ko so podatki o prihodkih služili kot odvisna spremenljivka v modelu multiple regresije, ki je bil oblikovan med tem raziskovalnim delom. Ta model je avtorjem omogočil oceno stroškov na kilometer v notranjem in mednarodnem prometu za izbrane države in nato oceno prihodka na podlagi predvidenih kilometrov vozil.

3. Pregled komercialnega cestnega tovornega prometa v EU

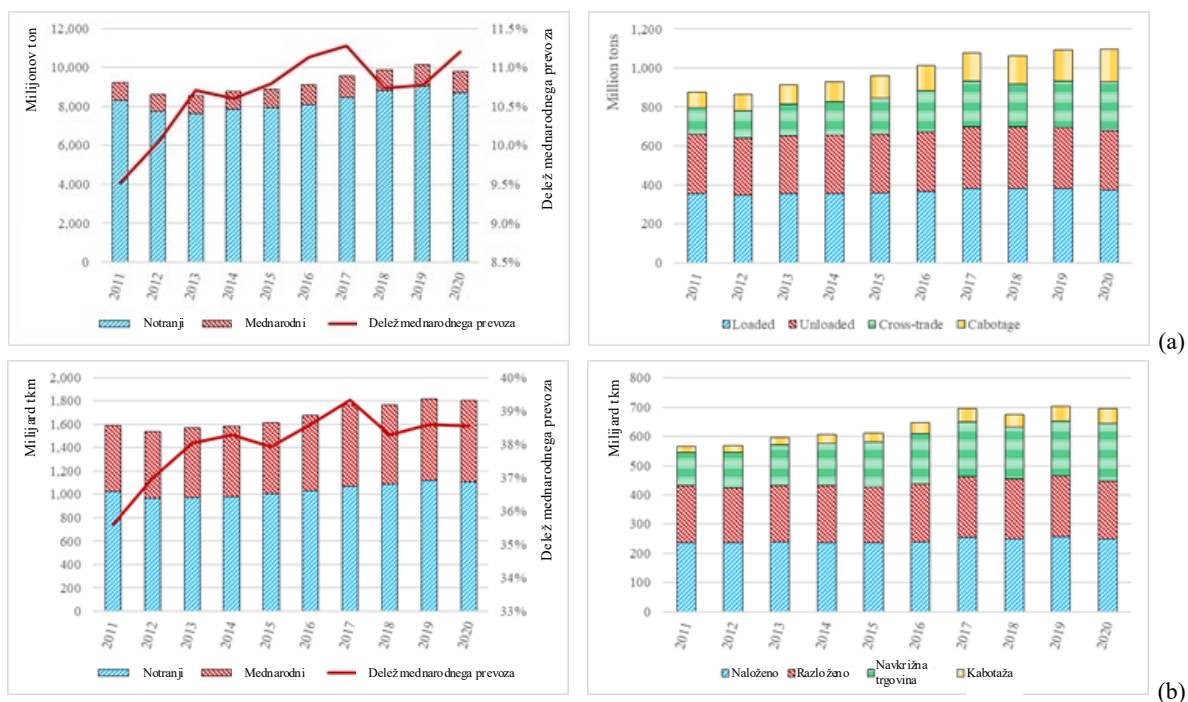
Sektor cestnega tovornega prometa je eden od ključnih sektorjev v EU; leta 2020 je obsegal več kot 545.000 večinoma majhnih podjetij in zaposloval približno 3,2 milijona ljudi [21]. Skupaj ti prevozniki prepeljejo več kot 10 milijard ton tovora ali približno 75 % evropskega tovora po obsegu [22], in sicer v notranjem ali mednarodnem prevozu, pri čemer slednjega sestavljajo prevoz blaga, naloženega in razloženega v državi prevoznika, ter navzkrižna trgovina in kabotaža (*slika 1*). Dodatne 3 milijarde ton tovora se po evropskih cestah prepeljejo za lastne potrebe podjetij.



Slika 1. Elementi komercialnega cestnega tovornega prometa.

Vir: avtorji.

Kot je razvidno iz *slike 2*, se delež mednarodnega komercialnega cestnega tovornega prometa povečuje, zlasti navzkrižne trgovine in kabotaže; vendar je delež mednarodnega prometa v celotnem prometu še vedno razmeroma majhen in znaša približno 11 % v tonah (a), v tonskih kilometrih pa je ta delež približno 41,5 % (b).



Slika 2. Struktura komercialnega cestnega tovornega prometa v EU-27 v tonah (a) in tonskih kilometrih (b).
Vir: avtorji, na podlagi [23].

Daleč največ tovarov v EU prepeljejo nemški prevozniki, in sicer okoli 2,4 milijarde ton na leto. Francoski, španski in poljski prevozniki so prepeljali po približno 1,3 milijarde ton. Približno 65 % pošilk v navzkrižni trgovini, merjeno v prepeljenih tonah, se prepelje med 20 najpomembnejšimi trgovinskimi partnerji v EU-27, večino teh pretovorov pa tradicionalno opravijo poljski prevozniki ([24] in [25]).

Leta 2020 je bilo v EU še vedno približno 18 % celotnega komercialnega cestnega tovornega prometa, izraženega v kilometrih vozil, opravljenega s praznimi vozili; ta delež je bil približno 22 % v notranjem prometu in približno 12 % v mednarodnem prometu (lasten izračun na podlagi [13]). Te številke so se v zadnjem obdobju nekoliko izboljšale po odpravi omejitev prevoza za prevoznike, ne glede na njihov izvor v EU. Za izboljšanje učinkovitosti prevoza je bila z Uredbo (ES) št. 1072/2009 uzakonjena cestna kabotaža, tj. prevoz na določenem ozemlju, ki ga opravljajo cestni prevozniki nerezidenti, in je mogoč od maja 2010. Uredba (ES) št. 1072/2009 je bila julija 2020 spremenjena z Uredbo (EU) 2020/1055. Osnovno pravilo določa, da se po popolnem raztovarjanju tovornjaka v državi prejema/raztovarjanja v naslednjih sedmih dneh lahko opravijo skupno trije kabotažni prevozi ali en prevoz v treh dneh [26].

4. Rezultati

4.1. Analiza deleža sprememb v številu zaposlenih v cestnem tovornem prometu v EU

Kot smo že omenili, je v cestnem tovornem prometu zaposlenih približno 3,2 milijona delavcev, kar je približno 1,7 % vseh zaposlenih oseb, starih od 15 do 64 let, v EU-27 (lasten izračun na podlagi [27] in [28]). Pet največjih evropskih držav, in sicer Nemčija, Francija, Španija, Poljska in Italija, zaposluje skoraj 62 % vseh delavcev v cestnem tovornem prometu v EU-27; vendar ima Herfindahl-Hirschmanov indeks (HHI), indeks koncentracije trga, za leto 2020 vrednost približno 880, kar kaže, da je trg precej konkurenčen.

V desetletju med letoma 2011 in 2020 se je število zaposlenih v sektorju cestnega tovornega prometa v EU-27 povečalo za več kot 550.000, vendar neenakomerno v vseh državah članicah. Število zaposlenih v prevoznih podjetjih se močno povečuje tudi v Srbiji.

Naslednja preglednica (*preglednica 1*) prikazuje rezultate analize deleža izmen. V stolpcu "Delež" je prikazana pričakovana sprememba števila zaposlenih, če se ohrani delež iz prejšnjega obdobja (v našem primeru) 2011. Stolpec "Premik" prikazuje, koliko zaposlenih je bilo izgubljenih ali dodanih zaradi spremembe deleža iz prejšnjega obdobja. Na primer, na Poljskem se je skupno število zaposlenih v sektorju cestnega tovornega prometa povečalo za skoraj 200.000 oseb; običajna rast bi bila približno 60.000 oseb, vendar so nekateri drugi dejavniki povzročili, da se je sektor povečal še za 140.000 zaposlenih.

Preglednica 2. Analiza porazdelitve dela v izmenah o številu zaposlenih v sektorju cestnega tovornega prometa v EU za leti 2011 in 2020.

| Država | Rast po deležu | Rast zaradi premika | Sprememba |
|-------------|----------------|---------------------|-----------|
| Belgija | 12.610 | (13.820) | (1.210) |
| Bolgarija | 9.947 | 14.046 | 23.993 |
| Češka* | 24.214 | (12.736) | 11.478 |
| Danska | 6.560 | (7.750) | (1.190) |
| Nemčija | 77.033 | (37.335) | 39.698 |
| Estonija* | 2.833 | 467 | 3.300 |
| Irska* | 3.887 | 1.050 | 4.937 |
| Grčija | 7.792 | (7.424) | 368 |
| Španija* | 69.685 | (61.811) | 7.874 |
| Francija | 71.802 | (22.633) | 49.169 |
| Hrvaška* | 4.136 | 2.373 | 6.509 |
| Italija | 65.885 | (30.916) | 34.969 |
| Ciper | 519 | (931) | (412) |
| Latvija | 3.939 | 2.562 | 6.501 |
| Litva | 9.124 | 45.073 | 54.197 |
| Luksemburg | 1.652 | (2.064) | (412) |
| Madžarska | 13.164 | 3.681 | 16.845 |
| Malta* | 227 | (106) | 121 |
| Nizozemska | 23.820 | (16.299) | 7.521 |
| Avstrija | 11.920 | (8.292) | 3.628 |
| Poljska | 59.684 | 138.044 | 197.728 |
| Portugalska | 13.372 | (3.529) | 9.843 |
| Romunija | 20.077 | 40.680 | 60.757 |
| Slovenija | 4.407 | 3.087 | 7.494 |
| Slovaška | 8.140 | 401 | 8.541 |
| Finska | 9.142 | (10.400) | (1.258) |
| Švedska | 15.974 | (15.416) | 558 |

Opomba: * - podatki iz Statističnega žepnega priročnika 2014.

Vir: avtorji, na podlagi [23] in [29].

V dveh obrobni državah, Grčiji in na Portugalskem ter v vseh državah, kjer so stroški dela nad povprečjem EU, se je število zaposlenih v cestnem tovornem prometu povečalo manj od pričakovanega, v petih državah pa se je celo zmanjšalo. Po drugi strani je število zaposlenih v Litvi raslo najhitreje, skoraj šestkrat hitreje od pričakovanih, in je leta 2020 predstavljalo 7,6 % vseh zaposlenih v Litvi. Sledijo ji Poljska, Romunija in Bolgarija.

4.2. Utemeljitev izbora držav za nadaljnjo analizo

Prevozniki iz EU-14 imajo na splošno bolj uveljavljeno in razvito logistično in prevozno industrijo z večjimi in bolj izkušenimi podjetji. Prav tako imajo običajno naprednejšo tehnologijo, kar jim lahko daje prednost v smislu časovne in stroškovne učinkovitosti. Po drugi strani pa imajo lahko prevozniki iz držav EU-13 večje težave pri dostopu do finančnih sredstev in financiranja. Vendar imajo številni prevozniki iz držav EU-13 nižje stroške dela, zaradi česar so lahko bolj konkurenčni.

V *preglednici 2* so navedene osnovne informacije o cestnem tovornem prometu v izbranih državah leta 2020 in uvrstitev v EU, na *sliki 3* pa so prikazana gibanja teh elementov. Leta 2020 je bilo več kot 70 % vseh podjetij, ki se ukvarjajo s cestnim tovornim prometom, v teh osmih državah. Skupno so ta podjetja zaposlovala 72 % vseh delavcev iz tega sektorja v EU-27. Hkrati so prevozniki iz teh držav prepeljali 71,5 % vsega komercialnega cestnega tovornega prometa in opravili skoraj 75 % vseh tonskih kilometrov (lasten izračun na podlagi [23] in [21]).

Preglednica 3. Osnovne informacije o cestnem tovornem prometu v izbranih državah leta 2020.

| Država | Zaposlene osebe | Delež v zaposlitveni strukturi v državi | Povprečni stroški dela | Število tovornih vozil na zalogi |
|-----------|-----------------|---|------------------------|----------------------------------|
| Nemčija | 412.235 (2) | 1,1% (23) | 32,0 (10) | 552.885 (2) |
| Francija | 396.407 (3) | 1,5% (17) | 37,8 (8) | 413.121 (3) |
| Španija | 344.874 (5) | 1,8% (11) | 31,0 (11) | 355.708 (4) |
| Italija | 353.593 (4) | 1,6% (16) | 36,8 (9) | 193.751 (5) |
| Poljska | 486.364 (1) | 3,0% (2) | 10,9 (20) | 708.819 (1) |
| Litva | 98.320 (9) | 7,6% (1) | 12,7 (18) | 58.214 (19) |
| Romunija | 157.848 (6) | 1,9% (9) | 6,4 (22) | 135.520 (9) |
| Bolgarija | 72.097 (13) | 2,4% (7) | 6,1 (23) | 96.044 (10) |

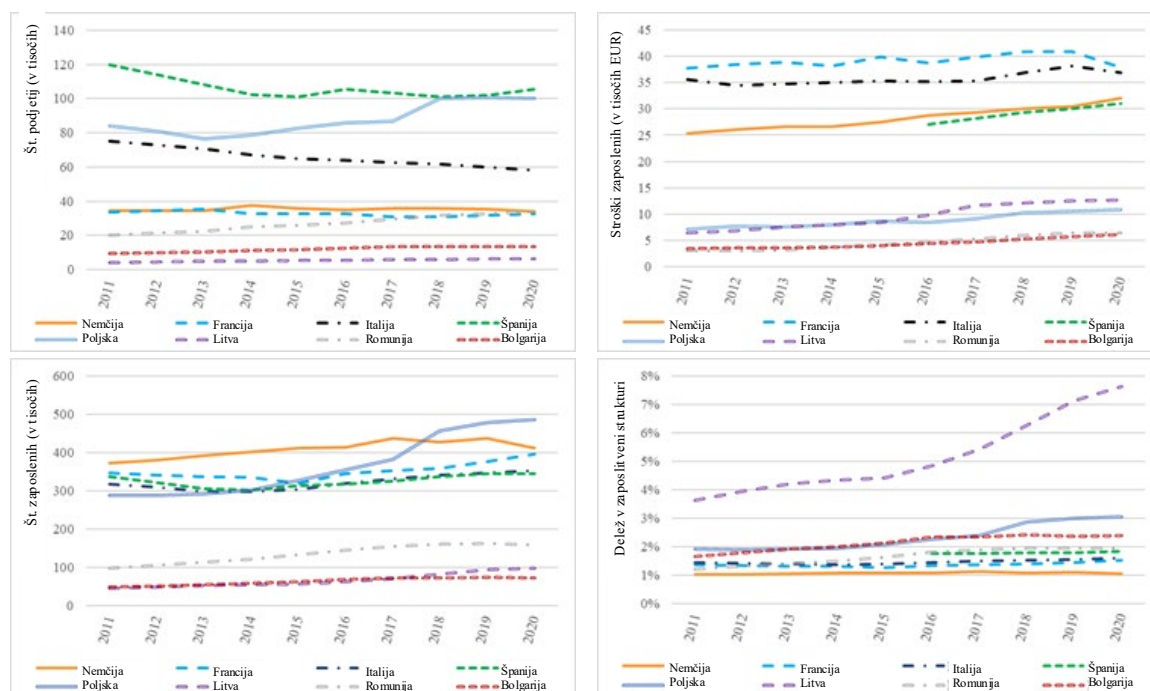
Opomba: otoške države in Estonija so bile zaradi geografskih razlogov in manjkajočih podatkov izključene iz analize.

Vir: avtorji, na podlagi [21] in [30].

Večje zanimanje za zaposlovanje v sektorju cestnega tovornega prometa je vplivalo na povečanje stroškov dela v državah v vzponu, vendar so ti še vedno precej nižji kot v gospodarsko najmočnejših evropskih državah (EU-14), kar ohranja njihovo konkurenčnost in povečuje njihov tržni delež na evropski ravni.

Število podjetij je v štirih razvitejših državah razmeroma stabilno, v novih državah članicah pa močno narašča. Sestavljena letna stopnja rasti (compound annual growth rate – CAGR) števila podjetij v cestnem tovornem prometu za obdobje 2011-2020 znaša 2 % za Poljsko, 3,9 % za Bolgarijo, 4,8 % za Litvo in 6 % za Romunijo. To je tudi posledica t. i. "flagging out", ko podjetja ustanovljajo hčerinske družbe v tujini, če je poslovanje tam cenejše. Predvsem, vendar ne izključno, zaradi nižjih stroškov osebja.

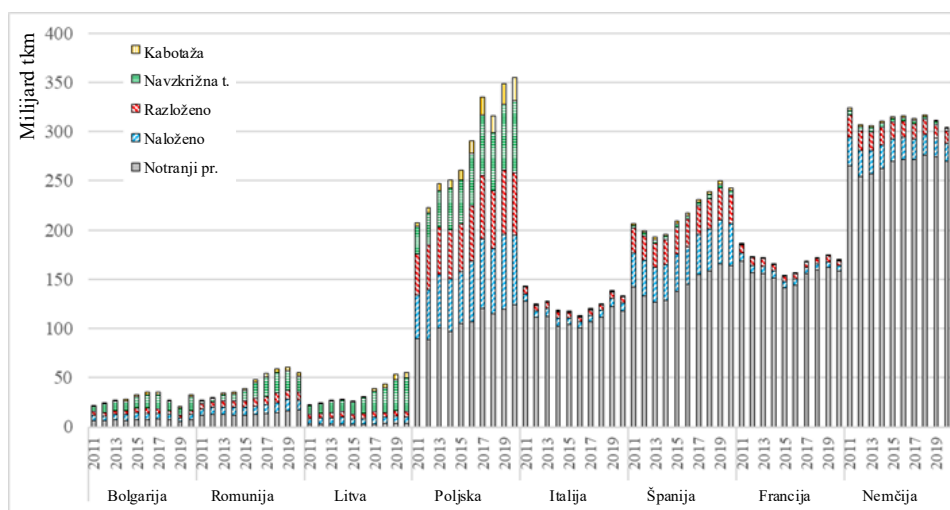
Podjetja iz EU-14 torej vplivajo na ponudbo prevoznih storitev v EU-13, zato prispevajo k zmanjšanju BDP v svojih državah in povečanju BDP v državah, v katerih so ustanovila podružnice.



Slika 3. Osnovni statistični podatki o cestnem tovornem prometu v izbranih državah.

Vir: avtorji, na podlagi [27].

Preučevane države se med seboj zelo razlikujejo. Romunski, bolgarski in litovski prevozniki so na mednarodnem trgu dejavni predvsem v segmentih navzkrižne trgovine in kabotaže, saj prihajajo iz razmeroma šibkih gospodarstev. Litovski prevozniki dejansko prepeljejo več kot desetkrat več tovora v mednarodnem prometu kot v notranjem prometu. Nasprotno pa prevozniki iz velikih in razvitih gospodarstev večinoma opravljajo notranji prevoz, saj v tujem okolju niso konkurenčni. Na primer, obseg mednarodnega prometa pri francoskih prevoznikih predstavlja le 6 % domačega prometa. Poleg tega se v teh državah zmanjšuje celo obseg notranjega (nacionalnega) prometa. Poljski prevozniki služijo močnemu domačemu gospodarstvu zaradi velikosti države in raznolikosti njene proizvodnje, hkrati pa so pomemben dejavnik v trgovini države in glavni ponudnik prevoznih storitev v navzkrižni trgovini in kabotaži v EU.



Slika 4. Obseg in struktura prometa v izbranih državah članicah EU od leta 2011 do leta 2020 (v tonskih kilometrih).
Vir: avtorji, na podlagi [23].

5. Diskusija

V absolutnem smislu se je obseg prevoza, ki so ga opravili prevozniki iz osmih podrobno preučenih držav, izražen v tonah, v obdobju 2011-2020 povečal za 5,4 %, medtem ko se je obseg prevoza, izražen v tonskih kilometrih, v istem obdobju povečal za skoraj 20 %. To je posledica internacionalizacije storitev cestnega tovornega prometa v EU; razdalje v notranjem prometu so v povprečju do osemkrat krajše kot v mednarodnem prometu.

Rast posameznih segmentov prometa ni bila enakomerna; notranji (nacionalni) promet se je povečal le za 4 %, če ga izrazimo v tonskih kilometrih, medtem ko sta se navzkrižni promet in kabotaža povečala za 210 % oziroma 225 %.

Iz *preglednice 3* je razvidno, da se je rast nacionalnega prevoza povečala za približno 110 milijonov ton; če bi se deleži iz leta 2011 nadaljevali, pa bi se povečala za dodatnih 225 milijonov ton. Poleg tega trgovino danes v večji meri opravljajo prevozniki iz držav, ki niso povezane z nobenim od gospodarstev; prevozniki, ki služijo nacionalni trgovini, so izgubili približno 7,5 milijarde tonskih kilometrov, medtem ko se je navzkrižna trgovina glede na pričakovano rast povečala za devetkrat v smislu tonskih kilometrov.

Preglednica 4 - Analiza deleža sprememb v obsegu prevoza (v tonskih kilometrih in tonah) po vrstah prevoza v letih 2011 in 2020.

| Vrsta potovanja | V tisoč tonah | | | V milijonih tonskih kilometrov | | |
|----------------------|----------------|---------------------|-----------|--------------------------------|---------------------|-----------|
| | Rast po deležu | Rast zaradi premika | Sprememba | Rast po deležu | Rast zaradi premika | Sprememba |
| Nacionalni | 337.431 | (224.046) | 113.385 | 151.610 | (102.887) | 48.723 |
| Naložen | 10.046 | 21.547 | 31.593 | 26.371 | (1.481) | 24.890 |
| Raztovorjena stran | 8.589 | 6.260 | 14.849 | 21.952 | (5.927) | 16.025 |
| Navzkrižno trgovanje | 3.168 | 119.467 | 122.635 | 9.957 | 82.411 | 92.368 |
| Kabotaža | 1.902 | 76.771 | 78.673 | 1.758 | 27.884 | 29.642 |

Vir: avtorji, na podlagi [23].

Prevozniki iz velikih in gospodarsko močnih evropskih držav izgubljajo možnosti za zaposlitev; francoski in italijanski prevozniki bodo leta 2020 prepeljali približno 300 milijonov ton tovora manj kot leta 2011, po tonskih kilometrih pa izgubljajo svoj delež tudi nemški prevozniki. V navzkrižni trgovini in kabotaži je bilo skoraj 120 milijonov ton tovora več, kot je bilo pričakovati po deležih iz leta 2011 (*preglednica 4*).

Preglednica 5. Analiza deleža prevoza (v tonskih kilometrih in tonah) v izbranih državah v letih 2011 in 2020.

| Država | V tisoč tonah | | | V milijonih tonskih kilometrov | | |
|-----------|----------------|---------------------|-----------|--------------------------------|---------------------|-----------|
| | Rast po deležu | Rast zaradi premika | Sprememba | Rast po deležu | Rast zaradi premika | Sprememba |
| Bolgarija | 3.325 | 16.185 | 19.510 | 3.952 | 7.401 | 11.353 |
| Romunija | 3.376 | 49.725 | 53.101 | 4.909 | 23.769 | 28.678 |
| Litva | 1.710 | 60.001 | 61.711 | 4.008 | 29.772 | 33.780 |
| Poljska | 45.514 | 209.279 | 254.793 | 38.690 | 108.586 | 147.276 |
| Španija | 67.092 | (37.550) | 29.542 | 38.539 | (3.114) | 35.425 |
| Italija | 53.166 | (233.488) | (180.322) | 26.615 | (36.235) | (9.620) |
| Francija | 69.003 | (198.501) | (129.498) | 34.597 | (50.621) | (16.024) |
| Nemčija | 117.950 | 134.348 | 252.298 | 60.337 | (79.557) | (19.220) |

Vir: avtorji, na podlagi [23].

Čeprav analiza deleža premika ne daje odgovora na vprašanje, zakaj pride do premika, je povsem jasno, da imajo v primeru cestnega tovornega prometa pomembno vlogo plače. Posplošena struktura stroškov prevoza je razvidna iz preglednice 5.

Preglednica 6. Povprečni deleži komponent prevoznih stroškov v EU.

| Komponenta | Delež [%] |
|---------------------|-----------|
| Stroški zaposlenih | 42,1 |
| Stroški goriva | 21,1 |
| Davki na lastništvo | 0,6 |
| Cestnine | 5,9 |
| Drugo (čas) | 17,1 |
| Drugo (razdalja) | 13,3 |

Vir: [31].

Na podlagi desetletnih podatkov o prevoženih kilometrih v osmih izbranih državah (podatkov o praznih vožnjah romunskih in italijanskih prevoznikov ni bilo, zato so bile te vrednosti ocenjene) je bil izdelan linearni regresijski model, s katerim je bil skupni promet kot izhodna spremenljivka približen vhodni spremenljivki kilometri v notranjem prometu in kilometri v mednarodnem prometu.

$$Pr i h o d k i = 1,90 \times n o t r a n j i _ v k m + 3,33 \times m e d n a r o d n i _ v k m, \quad (5)$$

s prilagojenim R -kvadratom 0,87 v obeh primerih, obe neodvisni spremenljivki pa sta bili statistično pomembni s p -vrednostjo, manjšo od 0,05 v obeh modelih.

Na podlagi zgornjega modela in razpoložljivih podatkov so avtorji izračunali povprečne cene nacionalnega in mednarodnega prevoza za cestne prevoznike iz osmih izbranih držav. Poljski in litovski prevozniki imajo najnižje cene na kilometer vozila, medtem ko imajo italijanski in francoski prevozniki precej višje cene, zlasti v mednarodnem prometu. Rezultati so posplošeni na podlagi razpoložljivih podatkov; vendar so lahko cene cestnega tovornega prometa višje pri daljših razdaljah in pri specializiranem tovoru (npr. nevarni materiali), ki zahteva dodatno ravnanje ali opremo. Cene se lahko razlikujejo tudi glede na izvor in cilj pošiljke ter razpoložljivost prevoznih storitev v različnih regijah. Na ceno cestnega tovornega prometa lahko vplivajo tudi zunanji dejavniki, kot so svetovni gospodarski pogoji, trgovinski sporazumi in politična stabilnost. Na splošno se povprečni stroški cestnega tovornega prometa v EU gibljejo od približno 1,00 do 3,50 EUR na kilometer (po podatkih [32] in testiranih s spletnim orodjem CargoApps podjetja Impargo), kar je v skladu z opravljenimi izračuni.

Obseg cestnega tovornega prometa, izražen v tonah, je edino ustrezno merilo za uporabo deležev od leta 2011 na celoten obseg za leto 2020, saj različne vrste storitev (tj. notranji prevoz v primerjavi s katero koli obliko mednarodnega prevoza) izkazujejo zelo različne razdalje. Skupaj so prevozniki iz izbranih držav leta 2020 prepeljali skoraj 7 milijard ton tovara. V *preglednici 6* so prikazane količine, ki bi jih prevozniki iz teh držav prepeljali leta 2020, če bi struktura cestnega tovornega prometa ostala enaka kot leta 2011.

Preglednica 7. Ocenjeni obseg storitev cestnega tovornega prometa v letu 2020 na podlagi deležev iz leta 2011 in skupnega obsega za leto 2020 [v tisoč tonah].

| | Notranji
(nacionalni) | Naloženo | Razloženo | Navzkrižna
trgovina | Kabotaža | Skupaj |
|-----------------------|--------------------------|---------------|--------------|------------------------|---------------|------------------|
| Bolgarija | 49.923 | 5.020 | 3.534 | 4.315 | 1.624 | 64.416 |
| Romunija | 54.564 | 3.940 | 3.258 | 2.742 | 908 | 65.412 |
| Litva | 16.978 | 4.929 | 3.322 | 7.586 | 309 | 33.125 |
| Poljska | 740.724 | 48.379 | 45.458 | 34.638 | 12.592 | 881.792 |
| Španija | 1.232.156 | 32.904 | 26.427 | 3.793 | 4.572 | 1.299.852 |
| Italija | 1.004.778 | 12.284 | 11.466 | 345 | 1.174 | 1.030.046 |
| Francija | 1.288.611 | 22.070 | 23.611 | 613 | 1.969 | 1.336.873 |
| Nemčija | 2.149.724 | 65.103 | 49.328 | 7.339 | 13.704 | 2.285.198 |
| Skupaj
pričakovano | 6.537.458 | 194.631 | 166.405 | 61.369 | 36.851 | 6.996.713 |
| Skupaj 2020 | 6.313.412 | 216.178 | 172.665 | 180.836 | 113.622 | |
| Razlika | (224.046) | 21.547 | 6.260 | 119.467 | 76.771 | |

Vir: avtorji, na podlagi [23].

Povprečne razdalje, ki jih prevozniki prevozijo v osmih izbranih državah, so večje od povprečja EU-27, saj je bila leta 2020 povprečna razdalja 171 kilometrov, od povprečno 130 kilometrov za nacionalni prevoz do približno 805 kilometrov za navzkrižno trgovino. Za namene izračuna so bile te razdalje prenesene v kilometrih na prepeljeno tono. Upošteevane so bile prazne vožnje. To je privedlo do ocene skupnih kilometrov, ki so jih prevozniki opravili z vozili, če bi se ohranili deleži iz leta 2011, in približka njihovega prometa (preglednica 7).

Preglednica 8. Ocena prometa v sektorju cestnega tovornega prometa v letu 2020 na podlagi deležev iz leta 2011 in registrirane količine in prometa v letu 2020.

| Država | Pričakovano po deležih iz leta 2011 | | | Dejanski položaj na trgu | | |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | Notranji pr.
[mio vkm] | Mednarodni pr.
[mio vkm] | Prihodki
[mio EUR] | Notranji pr.
[mio vkm] | Mednarodni pr.
[mio vkm] | Prihodki
[mio EUR] |
| Bolgarija | 451 | 818 | 2.355 | 463 | 1.657 | 4.209 |
| Romunija | 805 | 656 | 3.527 | 1.049 | 2.661 | 10.309 |
| Litva | 181 | 945 | 1.881 | 347 | 3.549 | 6.720 |
| Poljska | 8.833 | 7.049 | 21.793 | 9.278 | 15.639 | 37.743 |
| Španija | 13.342 | 4.070 | 33.381 | 12.796 | 4.846 | 34.708 |
| Italija | 10.881 | 1.078 | 59.373 | 8.366 | 1.026 | 47.253 |
| Francija | 15.066 | 988 | 56.803 | 12.894 | 728 | 47.916 |
| Nemčija | 20.032 | 3.534 | 46.165 | 21.651 | 2.507 | 45.844 |
| Skupaj | 69.592 | 19.137 | 225.277 | 66.844 | 32.613 | 234.704 |

Opomba: Vrednosti so zaokrožene.

Vir: avtorji, na podlagi [23] in [27].

Če bi struktura zagotavljanja storitev cestnega tovornega prometa ostala nespremenjena (velik pribitek storitev navzkrižne trgovine ali kabotaže), bi bil skupni obseg prevoza, izražen v voznih kilometrih, zaradi krajših razdalj v notranjem prometu in v lastnem gospodarstvu (blago, natovorjeno in raztovorjeno v državi poročevalki) približno 10,7 milijarde kilometrov (11 %) manjši. Glede na razpoložljive podatke bi končni uporabniki v tem primeru porabili približno 9,4 milijarde EUR ali približno 4 % manj, kot so dejansko porabili (tj. prihodki prevoznikov bi bili nižji za 9,4 milijarde EUR).

Za odgovor na drugo raziskovalno vprašanje so bili za vsako državo ustvarjeni ločeni modeli. Obseg nacionalnega in mednarodnega prometa, izražen v kilometrih vozil, je bil ponovno pojasnjevalna spremenljivka, BDV pa odvisna spremenljivka. BDV je razlika med celotno proizvodnjo in vmesno potrošnjo ter je eden od načinov merjenja gospodarske proizvodnje z merjenjem prispevka posameznih sektorjev h gospodarstvu. BDV na ravni podjetja se pogosto meri s proizvodnim pristopom kot razlika med prihodki od prodaje in stroški surovin in drugih vložkov, ki se uporabljajo v proizvodnji.

Leta 2020 so bile storitve največja gospodarska dejavnost v EU glede na ustvarjeno BDV, saj so predstavljale približno 73 % celotne BDV EU [33]. V proučevanih državah se je razmerje med BDV in prihodki v cestnem tovornem prometu gibalo od približno 24 % do 43 % in je predstavljalo od 0,6 in do 4,7 % celotne BDV v posamezni državi (lasten izračun na podlagi [21] in [34]).

V osmih proučevanih državah je bila leta 2020 ustvarjena skupna dodana vrednost v višini 8.433 milijard EUR; 91 % so ustvarila podjetja v štirih glavnih državah EU, ki so bile predmet raziskave. Dodana vrednost iz prometa je v teh državah predstavljala le 0,9 % celotne BDV. Zato sprememba pri zagotavljanju storitev cestnega tovornega

prometa ni imela prevelikega vpliva na sektorsko BDV niti na skupno BDV v desetletju od leta 2011 do leta 2020, če države obravnavamo skupaj. Dejansko bi bila BDV v prometu nižja za 1 %, skupna BDV pa za 0,01 %, če bi ostali deleži iz leta 2011. Vendar je učinek na posamezna gospodarstva pomemben, kot je razvidno iz preglednice 8.

Preglednica 9. Ocena BDV v cestnem tovornem prometu leta 2020 na podlagi deležev iz leta 2011.

| Država | Pričakovano
(v deležu za leto 2011) | | Dejanski položaj na trgu | | Spremembe in vplivi | | |
|---------------|--|-----------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| | BDV
[mio EUR] | BDV v
BDV'(skupaj) | BDV
[mio EUR] | BDV v
BDV'skupaj | Sprememba
odsnosti | Sektorske
spremembe | Vpliv na
BDV'skupaj |
| Bolgarija | 565 | 1,1% | 1.010 | 1,9% | 445 | 44,1% | 0,83% |
| Romunija | 843 | 0,4% | 2.465 | 1,2% | 1.622 | 65,8% | 0,81% |
| Litva | 585 | 1,4% | 2.090 | 4,7% | 1.505 | 72,0% | 3,37% |
| Poljska | 5.144 | 1,1% | 8.910 | 1,9% | 3.765 | 42,3% | 0,81% |
| Španija | 12.511 | 1,2% | 13.009 | 1,3% | 497 | 3,8% | 0,05% |
| Italija | 18.497 | 1,2% | 14.722 | 1,0% | (3.776) | (25,6%) | (0,25%) |
| Francija | 20.073 | 1,0% | 16.932 | 0,8% | (3.140) | (18,5%) | (0,15%) |
| Nemčija | 19.741 | 0,6% | 19.604 | 0,6% | (137) | (0,7%) | 0,00% |
| Skupaj | 77.960 | | 78.741 | | | | |

Opomba: Skupna BDV v preglednici 8 ali prilagojena skupna BDV je bila izračunana tako, da je bila dejanska BDV iz sektorja cestnega tovornega prometa odšeta od dejanske skupne BDV in dodana pričakovana BDV iz sektorja cestnega tovornega prometa, če bi se ohranili deleži iz leta 2011.

Vir: avtorji, na podlagi [23] in [27].

Največje pozitivno odstopanje zaradi sprememb pri opravljanju storitev cestnega tovornega prometa je zabeleženo v Litvi (+3,4 % cestnega tovornega prometa v celotni BDV), medtem ko je bilo največje absolutno povečanje zabeleženo na Poljskem s 3,77 milijarde EUR več zaradi sprememb na trgu. Prispevek prometa k BDV države se je zmanjšal v Italiji (-0,25 % ali 3,78 milijarde EUR) in Franciji (-0,15 % ali 3,14 milijarde EUR).

Na splošno je konkurenčnost v komercialnem cestnem tovornem prometu rezultat zapletenega medsebojnega delovanja več dejavnikov; podjetja, ki so sposobna učinkovito upravljati te dejavnike, pa imajo večje možnosti za uspeh na trgu.

Stroški zaposlenih so eden od dejavnikov, ki lahko vplivajo na konkurenčnost v komercialnem cestnem tovornem prometu, vendar niso edini; poljski in litovski prevozniki imajo višje stroške zaposlenih kot romunski prevozniki, vendar zagotavljajo nižjo ceno na kilometer. Nemški prevozniki dosegajo najboljše razmerje med BDV in prihodki ter razmeroma konkurenčno ceno na kilometer, vendar izgubljajo tovar tudi na domačem trgu. Morda zaradi pomanjkanja poklicnih voznikov tovornjakov.

Voznikov tovornjakov primanjkuje po vsej EU. V državah EU-14 so razlogi za pomanjkanje ne le nekonkurenčne plače, temveč tudi slaba podoba poklica, težki delovni pogoji, slabo ravnanje z vozniki na dostavnih mestih ter neustrezni in nevarni prostori za postanke, medtem ko je v državah EU-13 pomanjkanje predvsem posledica hitre in močne širitve sektorja cestnega tovornega prometa.

Pomanjkanje poklicnih voznikov je stalen problem; leta 2020 je bilo v EU 400.000 prostih delovnih mest za voznike [35], to število pa še naprej narašča. Leta 2021 je bila povprečna starost voznikov tovornjakov 47 let, in čeprav je brezposelnost mladih v EU še vedno velik problem, je delež mladih voznikov, mlajših od 25 let, v sektorju cestnega tovornega prometa še vedno zelo nizek in znaša približno 7 % [22].

Podatki o pomanjkanju voznikov se v različnih virih razlikujejo, vendar je jasno, da problem obstaja, in ta problem ne bo povezan le z neposrednim prispevkom sektorja cestnega tovornega prometa k nacionalnemu dohodku, temveč lahko povzroči težave tudi v vseh drugih gospodarskih dejavnostih in oskrbi.

Nemški vozniki tovornjakov so v povprečju prevozili približno 58.600 kilometrov na leto, sledijo jim poljski in španski vozniki s približno 51.000 kilometri. Francoski in italijanski vozniki izkazujejo najnižjo produktivnost s 34.360 oziroma 26.560 kilometri.

Preglednica 10. Ocena izgubljenega prometa in bruto dodane vrednosti v cestnem tovornem prometu v letu 2020 na podlagi pomanjkanja voznikov in njihove produktivnosti.

| Država | Število prostih delovnih mest | Dodatni kilometri [mio] | | Prihodki [mio EUR] | GVA [mio EUR] | BDV v BDV' (skupaj) |
|----------|-------------------------------|-------------------------|------------|--------------------|---------------|---------------------|
| | | Nacionalni | Mednarodni | | | |
| Poljska | 120.000 | 2.289 | 3.859 | 11.315 | 2.671 | 0,57% |
| Španija | 15.300 | 568 | 215 | 1.540 | 577 | 0,06% |
| Italija | 15.000 | 355 | 44 | 2.005 | 625 | 0,04% |
| Francija | 43.000 | 1.399 | 79 | 5.198 | 1.837 | 0,09% |
| Nemčija | 45.000 | 2.363 | 274 | 5.004 | 2.140 | 0,07% |
| | 60.000 | 3.151 | 365 | 6.673 | 2.853 | 0,09% |
| Skupaj | | | | 25.061 | 7.849 | |
| | | | | 26.730 | 8.563 | |

Vir: avtorji na podlagi [23], [27] in [35].

Ob predpostavki, da bi bilo na voljo dovolj tovora (število prostih delovnih mest temelji na tej predpostavki) in da bi se razmerje med obsegom notranjega (nacionalnega) in mednarodnega prometa ohranilo na ravni iz leta 2020, bi se prihodki v petih državah, za katere imamo podatke o pomanjkanju voznikov za leto 2020, povečali za vsaj 25 milijard EUR ali pa bi se BDV sektorja povečala za vsaj 7,9 milijarde EUR. Zadnji stolpec v preglednici 9 prikazuje, koliko bi delo dodatnih voznikov prispevalo k skupni BDV. Skupna BDV upošteva le neposredno dodano vrednost cestnega tovornega prometa, zato je izračunana kot dejanska skupna BDV plus dodatna BDV iz sektorja cestnega tovornega prometa, če voznikov ne bi primanjkovalo.

6. Sklepne ugotovitve

EU je eno najmočnejših in najnaprednejših gospodarstev na svetu. Čeprav je zamišljena kot območje brez notranjih meja ali drugih regulativnih ovir za spodbujanje konkurence in trgovine, jo sestavlja 27 držav, ki še zdaleč niso enakomerno razvite. To se odraža v različnih delovnih pogojih in stroškovnih strukturah, kar na koncu vpliva na konkurenčnost podjetij, vključno s konkurenco med podjetji, ki opravljajo storitve cestnega tovornega prometa.

V strukturi stroškov prevoza je delo v povprečju največja postavka, na ceno prevoznih storitev pa vplivajo tudi daljše razdalje in naraščajoče cene goriva. Dobre ocene prevoznih stroškov na podrobni prostorski ravni za EU niso na voljo [31], prav tako niso na voljo podatki o vsakem posameznem potovanju, zato so avtorji izračunali generične stroške cestnega tovornega prevoza v notranjem in mednarodnem prometu za osem izbranih držav. Glede na rezultate najbolj negativno izstopa Italija, ki je najmanj konkurenčna in kaže največje relativno zmanjšanje obsega prevoza. Po izračunih so nemški prevozniki cenovno najbolj konkurenčni med prevozniki iz velikih in pomembnih držav EU, vendar se je v Nemčiji močno zmanjšalo število voznikov, tako da ne morejo več pokrivati niti lastnih prevoznih potreb.

Na splošno cestni tovorni prevoz na ravni EU ustvari večje skupne prihodke, kot bi jih, če bi pogoji ostali enaki kot leta 2011. Zaradi spremenjene strukture ponudnikov cestnega tovornega prometa je bilo po ocenah leta 2020 opravljenih približno 11 milijard kilometrov več. Nižje cene, ki jih zaračunavajo ponudniki iz EU-13, ne odtehtajo razlike v prevoženih razdaljah. Z ureditvijo mednarodnega cestnega tovornega prometa se je delež praznih voženj v desetletju od leta 2011 do leta 2020 nekoliko zmanjšal (z 19,2 % na 18,3 %), vendar se je njihov obseg povečal (za približno 2,34 milijarde kilometrov skupaj oziroma za približno 1,24 milijarde v mednarodnem prometu).

Promet ima izjemno pomembno vlogo pri konkurenčnosti Evrope, saj podpira vse druge dejavnosti, njegova učinkovitost pa je že več desetletij v središču pozornosti. V prejšnjih študijah je bil večinoma obravnavan širši vpliv prometa na nacionalna ali regionalna gospodarstva, v tej študiji pa je analiziran neposredni gospodarski vpliv cestnega tovornega prometa na ravni EU. Prispevek razdeljuje in količinsko opredeljuje spremembe, ki so se zgodile na trgu cestnega tovornega prometa. Rezultati te študije niso v skladu s cilji EU za učinkovitejši in okolju prijazen promet, vendar je treba te rezultate jemati z določeno mero previdnosti, saj so bili produktivnost prevoznikov, prevozne razdalje in cene ocenjeni in povprečeni, v praksi pa so odvisni od številnih dejavnikov, ki se od primera do primera razlikujejo.

Nadaljnje delo avtorjev bo potekalo v dveh smereh. Avtorji bodo ocenili zunanje stroške prometa zaradi povečanega števila prevoženih kilometrov tovornih vozil na cestah EU in se pri tem osredotočili na varnost v cestnem prometu. Po drugi strani pa pomanjkanje poklicnih voznikov povzroča finančne izgube za prevoznike in posledično za nacionalne BDP-je. Zato bodo avtorji raziskali, ali ima preusmeritev delovne sile v druge sektorje, ki je še posebej pogosta v EU-14, pozitiven neposreden vpliv na BDP v teh državah.

Viri in literatura

1. EC. *Sustainable and smart mobility: Putting European transport on track for the future*. Brussels: European Commission; 2021.
2. EC. *Statistical pocketbook 2021: EU transport in figures*. Directorate-General for Mobility and Transport. Brussels: European Commission; 2021.
3. EC. *EU Reference Scenario 2016: Energy, transport, GHG emissions and trends to 2050*. Brussels: European Commission; 2016.
4. Statista. *Size of the road freight market in Europe from 2010 to 2025 (in billion euros)*. 29th September 2022. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1068472/road-freight-market-size-europe/>. [Accessed 5th December 2022].
5. Brunel J. *Freight transport and economic growth : an empirical explanation of the coupling in the EU using panel data*. 2005. <https://shs.hal.science/halshs-00004826/>
6. van de Riet O, de Jong G, Walker W. Drivers of freight transport demand and their policy implications. In Perrels A, Himanen V, Lee-Gosselin M (eds.) *Building blocks for sustainable transport - Obstacles, trends, solution*. Bingley: Emerald; 2008.
7. Koorey GF, Mitchell TJ, Fisk C, Moynihan SF, Mara MK. *Traffic growth prediction*. Transfund, Wellington; 2000.
8. Holguin-Veras J, Sarmiento I, Gonzalez-Calderon CA. Parameter stability in freight generation and distribution demand models in Colombia. *Dyna*, vol. 78, no. 166, pp. 16-20; 2011.
9. Meersman H, Van de Voorde E. *The relationship between economic activity and freight transport*, in Freight transport modelling, Ben-Akiva ME, Meersman E, Van de Voorde E (Eds.), Emerald Group Publishing; 2013.
10. EC. *An overview of the EU road transport market in 2015*. Brussels: European Commission; 2017.
11. Coppens F, Lagneaux F, van Gastel G, Meersman H, Sellekaerts N, Van de Voorde E, Vanelslander T, Verhetsel A. *Economic impact of port activity: a disaggregate analysis. The case of Antwerp*. National Bank of Belgium; 2007.
12. Troch F, Meersman H, Sys C, Van de Voorde E, Vanelslander T. The added value of rail freight transport in Belgium, *Research in Transportation Business and Management*, vol. 44; 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100625> [Accessed 16th March 2023].
13. Meersman H, Sys C, Troch F, Van de Voorde E, Vanelslander T. The indirect economic impact of rail freight transport: An input-output case, *Case Studies on Transport Policy*, vol. 10, pp. 1353-1365; 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.04.014> [Accessed 17th March 2023].
14. Njoya ET, Nikitas A. The role of air transport in employment creation and inclusive growth in the Global South: The case of South Africa, *Journal of Transport Geography*, vol. 85; 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102738> [Accessed 16th March 2023].
15. Notteboom T. Concentration and load centre development in the European container port system. *Journal of Transport Geography*. 1997;5(2): 99-115. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(96\)00072-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(96)00072-5) [Accessed 10th December 2022].
16. Twrdy E, Batista M. Modeling of container throughput in Northern Adriatic ports over the period 1990-2013. *Journal of transport geography*. 2016;52: 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.005> [Accessed 15th December 2022].
17. Yasin MM, Alavi J, Sobral F, Lisboa J. A shift-share analysis approach to understanding the dynamic of the Portuguese tourism market, *Journal of Travel & Tourism Marketing*, vol. 17, no. 4, pp. 11-22; 2004. https://doi.org/10.1300/J073v17n04_02 [Accessed 16th March 2023].
18. Mogila Z, Ciolek D, Kwiatkowski JM, Zaucha J. The Baltic blue growth – A country-level shift-share analysis, *Marine Policy*, vol. 134; 2021. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104799> [Accessed 16th March 2023].
19. De Smedt L, De Wispelaere F. *Road freight transport in the European Union: In search of a balance between the economic and social dimension of the internal market. A quantitative sectoral analysis*. TransFair; 2020.
20. Roubini N, Mihm S.(translators). [Crisis Economics – A Crash Course in the Future of Finance]. Gospodarska kriza: napoved prihodnjih finančnih zlomov. Ljubljana: Soleco; 2010. Slovene.
21. Eurostat [sbs_na_1a_se_r2]. *Annual detailed enterprise statistics for services*. 2022. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SBS_NA_1A_SE_R2/default/table?lang=en. [Accessed 5th December 2022].
22. IRU. *Getting more young drivers behind the wheel - Reducing youth unemployment and driver shortages*. Geneva: International Road Transport Union; 2022.
23. Eurostat [ROAD_GO_TA_TOTT]. *Summary of annual road freight transport by type of operation and type of transport (1 000 t, Mio Tkm, Mio Veh-km)*. 2022. [Online]. [Accessed 5th December 2022].
24. Eurostat. *Road freight transport statistics*. November 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_statistics. [Accessed 17th December 2018].
25. Eurostat. *Road freight transport statistics*, September 2022. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_statistics#In_2021.2C_Germany.2C_France.2C_Spain.2C_Poland_and_Italy_accounted_for_almost_two_thirds_of_the_total_tonnage_transported_in_the_EU. [Accessed 5th December 2022].
26. EC. *Rules on cabotage as applicable from 21 February 2022*. 2022. [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/road/mobility-package-i/market-rules/rules-cabotage-applicable-21-february-2022_en. [Accessed 15th December 2022].

27. Eurostat [sbs_na_1a_se_r2]. *Annual detailed enterprise statistics for services (NACE Rev. 2 H-N and S95)*. 2022. [Online]. Available: https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=sbs_na_1a_se_r2&lang=en. [Accessed 14th April 2022].
28. Eurostat. *Employment and activity by sex and age - annual data*. 2022. [Online]. Available: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>. [Accessed 15th April 2022].
29. EU. *Statistical pocketbook 2014*. Luxembourg : Publications Office of the European Union,.
30. Eurostat. *Road freight transport by vehicle characteristics*. October 2022. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_by_vehicle_characteristics. [Accessed 3rd January 2023].
31. Persyn D, Díaz-Lanchas J, Barbero J. *Estimating road transport costs between EU regions*. Brussels: European Commission; 2019.
32. Ti-Upply-IRU. *The European road freight rate benchmark*. Bath, Paris & Geneva: Ti-Upply-IRU; 2022.
33. Eurostat. *Services represented 73% of EU's total GVA*. October 2021. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211021-1>. [Accessed 3rd January 2023].
34. Eurostat [NAMA_10_A10_custom_4534709]. *Gross value added and income by A*10 industry breakdowns*. January 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_a10/default/table?lang=en. [Accessed 17th January 2023].
35. Keckarovska V. *European driver shortages*. Bath: Transport Intelligence; 2021.

Določanje optimalnega števila internih tovornjakov na manjših kontejnerskih terminalih

Maja Stojaković, Elen Twrđy

Prevod dela: Determining the optimal number of yard trucks in smaller container terminals. Eur. Transp. Res. Rev. 13 (22), 2021.
<https://doi.org/10.1186/s12544-021-00482-6>

Povzetek: Leta 2017 so manjša kontejnerska pristanišča pretovorila 164 milijonov TEU, kar predstavlja 22 % celotnega kontejnerskega tovora (UNKTAD, 2018). Dandanes linijski operaterji v ta pristanišča prihajajo z večjimi ladjami in zahtevajo hiter in učinkovit pretovor ladij v pristanišču. To je mogoče le, če ima privez ustrezne kapacitete, če pravilno deluje in dosega dobro raven produktivnosti. Slednje ni odvisno le od zmogljivosti obalnih dvigal, temveč tudi od transferne mehanizacije, katere glavna naloga je, da služi obalnim dvigalom na eni strani in skladiščnim dvigalom na drugi strani. Izbira pravilne vrste in števila vozil za prenos kontejnerjev s priveza na skladišče je tako postala zelo pomembna odločitev v vsakem kontejnerskem terminalu. V majhnih kontejnerskih terminalih so interni tovornjaki najpogostejša vrsta transferne mehanizacije, zato raziskava temelji na dodelitvi pravega števila internih tovornjakov obalnim dvigalom, da bi zagotovili boljšo raven produktivnosti v podsistemi priveza in skladišča. V ta namen je bil uporabljen pristop simulacijskega modeliranja diskretnih dogodkov. Pristop je uporabljen na primeru majhnega hipotetičnega kontejnerskega terminala, ki vključuje operacije na relaciji privez-skladišče-privez.

Ključne besede: kontejnerski terminali, interni tovornjaki, produktivnost priveza, operativna učinkovitost

1. Uvod

Pomorski kontejnerski terminal predstavlja tranzitno točko za kontejnerizirano blago med morskimi ladjami in kopenskimi načini prevoza, kot so tovornjaki in vlaki (Saccone & Siri, 2009). Čeprav se pomorski kontejnerski terminali precej razlikujejo po velikosti, funkciji in geometrijski razporeditvi, so v glavnem sestavljeni iz istih podsistemov (Kim & Günther, 2006). To so podsistem priveza, skladišča in primopredaje (Bešković, Twrđy in Bauk, 2019; Huynh in Walton, 2011). Usklajevanje med temi tremi podsistemi, dodeljevanje mehanizacije za izvajanje potrebnih aktivnosti in načrtovanje različnih premikov so glavni vidiki, ki jih je treba obravnavati in optimizirati na pomorskem kontejnerskem terminalu (Saccone & Siri, 2009). Na kontejnerskih terminalih obstajajo tri vrste prekladalne opreme, vključene v postopek natovarjanja/raztovarjanja: obalna dvigala-OD, transferna mehanizacija (izbira je med internimi tovornjaki-IT, portalnimi prenosniki malega razpona – pajki, shuttle carrierji-SC, avtomatsko vodenimi vozili-AGV) in skladiščna dvigala-SD (izbira je med pajki, portalnimi prenosniki velikega razpona na pnevmatikah-RTG, portalnimi prenosniki velikega razpona na železnici-RMG in kontejnerskimi manipulatorji) (Brinkmann, 2011; Gupta, Roy, de Koster in Parhi, 2017; Kress, Meiswinkel in Pesch, 2019; H. Zhang in Kim, 2009). OD opravljajo pretovorne operacije na obali, SD se uporabljajo pri operacijah zlaganja kontejnerjev na skladiščnih površinah, medtem ko se za prevoz med obalo in skladiščem uporablja transferna mehanizacija. Ker je podsistem priveza tisti, ki dejansko določa velikost ladje, ki jo terminal lahko sprejme in tisti, ki najbolj vpliva na čas obrata ladje v pristanišču, se je v prvi fazi treba osredotočiti na operativni čas in izkoriščenost tega območja, medtem ko operacije na območju skladišča posredno vplivajo na čas, ki ga bo ladja preživela v pristanišču (Stojaković & Twrđy, 2016). Carlo, Vis in Roodbergen (2014b) navajajo, da je prevozne operacije v obeh podsistemi treba načrtovati tako, da se prepreči ozko grlo v kontejnerskih terminalih. Pri tem je ključnega pomena pravilna izbira transferne mehanizacije. Zelo pogosto uporabljena vrsta mehanizacije v majhnih pristaniščih in najpogostejša v majhnih pristaniščih severnega Jadrana so IT. To so vozila, ki vlečejo šasije s kontejnerji. S tehnološkega vidika predstavljajo zelo skromno sredstvo, saj sami ne morejo dvigovati kontejnerjev - zato je za nakladanje in razkladanje potrebno tudi dvigalo. To pomeni, da če ni dobre sinhronizacije med OD in IT ter med SD in IT lahko prihaja do zastojev. Težava manjših kontejnerskih terminalov je, da imajo po eni strani težave s prostorom, po drugi strani pa imajo že vzpostavljene delovne postopke za ravnanje s kontejnerji. Zato je za že delujoč kontejnerski terminal finančno ugodneje kupiti dodatne IT, kot pa prestrukturirati terminal in nabaviti drugo vrsto pretovorne opreme. Po podatkih He, Chang, Mi in Yan (2010) je tako učinkovitost kontejnerskih terminalov v veliki meri odvisna od uspešnosti dodeljevanja mehanizacije v različnih fazah ravnanja s kontejnerji.

Kljub temu pa Meisel (2009) pravi, da so IT ekonomsko privlačni in lahko zagotavljajo veliko fleksibilnost glede delovne obremenitve terminala. V naši raziskavi bodo zato simulacijski postopki temeljili na dodeljevanju različnega števila IT obalnim dvigalom. Namen te raziskave je opredeliti pravilno število IT, ki bo skrajšalo čas

obrata ladje v majhnem kontejnerskem pristanišču. V ta namen so bile na hipotetičnem kontejnerskem terminalu (KT) izvedene številne računalniške simulacije s programsko opremo Flexsim CT 3.3. Med simulacijami so se spreminjale značilnosti terminala, kot so dolžina priveza, število OD in vrsta ladje (tabela 2), da bi postopoma povečali letni promet in kapaciteto s 630 000 TEU na približno 1 milijon TEU ter ocenili, kako bi tako povečanje prometa vplivalo na produktivnost priveza v prvi fazi in skladišča v drugi fazi.

Ker naša raziskava ni bila osredotočena na določeno pristanišče, smo združili elemente različnih majhnih pristanišč s podobnimi lastnostmi. Osnovna merila za simulacijo postavitve terminala so predstavljala severno-jadranska pristanišča Koper, Trst in Reka, iz katerih so bili vzeti najbolj skupni dejavniki. Največji delež podatkov je bil pridobljen iz pristanišča Koper.

Ugotavljamo, da v literaturi obstaja znanstvena vrzel, ko poskušamo opredeliti vrsto in število transferne mehanizacije za premeščanje kontejnerskih enot s priveza na skladišče v majhnih KT. Raziskava tako temelji na dodelitvi ustreznega števila IT na OD, da se zagotovi boljša raven produktivnosti v podsistemi priveza in skladišča. V ta namen smo razvili model, ki ponazarja delovanje podsistema priveza in skladišča s poudarkom na ustrezni dodelitvi transferne mehanizacije. Cilj je bil zagotoviti optimalno delovanje priveza in s tem hitrejši odhod ladje iz pristanišča. Razviti model je preprost za uporabo in omogoča hitro določitev potrebne mehanizacije glede na kapaciteto KT.

Struktura članka je naslednja. V sekciji 2 najdemo pregled literature, v sekciji 3 je opisan razvoj metodologije s štirimi podpoglavji, ki pojasnjujejo značilnosti osnovnega hipotetičnega KT, sledi analiza osnovnega modela in nadaljnja metodologija izvedenih simulacij za določitev optimalnega števila IT v majhnem KT. Rezultati simulacij so na voljo v sekciji 4, medtem ko sekcija 5 vsebuje razpravo in zaključek s predlogom za nadaljnje raziskave.

2. Pregled literature

Danes je izredno pomembno, da ladja čim prej zapusti pristanišče, kar pomeni, da se od KT zahteva visoka učinkovitost. To se običajno meri z operativno produktivnostjo, kot sta čas obrata ladje ali izkoriščenost skladišča. Po podatkih Gharehgozli, Vernooij in Zaerpour (2017) je pomembno omogočiti učinkovite delovne procese na morski strani, vendar ima sistem zlaganja na skladišču tudi pomemben vpliv na celotno zmogljivost terminala. Pravilna izbira mehanizacije za premik kontejnerjev med morskno in kopensko stranjo terminala ima zato zelo pomembno vlogo. V zvezi s tem je bilo v zadnjih letih opravljenih veliko raziskav o uporabi IT, saj so ob ustreznem načrtovanju dosegli veliko učinkovitost (Tang, Qin, Zhao, Yu in Shen, 2020).

2.1. Terminalske operacijske sisteme (TOS) in načrtovanje terminalov

Osnovo za nadaljnje raziskave o operacijskih sistemih kontejnerskih terminalov so v zgodnjih letih 20. stoletja zagotovili Steenken, Voß in Stahlbock (2004), Stahlbock in Voß (2008), Vis in De Koster (2003) ter Kim in Günther (2006). Kasneje je Böse (2011), izdal priročnik o načrtovanju terminalov, Singgih, Jin, Hong in Kim (2016) pa so predlagali zasnovo TOS, ki vključuje integrirano načrtovanje in različne module odločanja, povezane z različnimi vidiki operacij na novem konceptualnem KT, ki temelji na železnici. Kourounioti, Polydoropoulou in Tsiklidis (2016) pa so se osredotočili na čas zadrževanja kontejnerjev na terminalih. Leta 2019 so Hervás-Peralta, Poveda-Reyes, Molero, Santarremigia in Pastor-Ferrando (2019) prvi uporabili AHP (Analytic Hierarchy Process) za opredelitev in hierarhizacijo funkcionalnosti TOS. Posebno vlogo pri merjenju učinkovitosti TOS v KT imajo tudi ključni kazalniki uspešnosti, ki so odločilni za načrtovanje in nadaljnjo optimizacijo KT. V zvezi s tem so zanimivo študijo opravili Hinkka in drugi (2018), ki so analizirali kazalnike, potrebne za načrtovanje terminalov, in jih primerjali z obstoječimi kazalniki za merjenje učinkovitosti pristanišč in terminalov.

Čeprav so problemi KT med seboj povezani, avtorji pogosto obravnavajo posebne izzive posameznega segmenta terminala. Zato so v nadaljevanju predstavljene nekatere zanimive študije o produktivnosti privezov in skladišč, ki odražajo medsebojne povezave v pristaniščih in se nanašajo na naše raziskave.

2.2. Produktivnost priveza

Podsistem priveza predstavlja najpomembnejši del KT, saj so z njim povezani vsi nadaljnji procesi v drugih podsistemi terminala. Zaradi prihoda vedno večjih kontejnerskih ladij se je zmanjšala produktivnost privezov, kar se odraža v daljšem času ladje v pristanišču in višjih stroških za linijske operaterje. Seyedalizadeh Ganji, Babazadeh in Arabshahi (2010) so poudarili, da čas, ko ladja čaka na razpoložljivost priveza, in čas obravnave ladje veljata za najpomembnejši merili učinkovitosti KT, zato zmanjšanje vsakega od teh časov poveča produktivnost terminala. Večina raziskovalcev se je zato osredotočila na problem optimalne dodelitve privezov (BAP) in problem dodelitve obalnih dvigal (ODAP) z uporabo splošnih algoritmov (Bierwirth in Meisel, 2010, 2015; Giallombardo, Moccia, Salani in Vacca, 2010; Imai, Sun, Nishimura in Papadimitriou, 2005; Liang, Hwang in Gen, 2011).

Pomemben dejavnik, ki vpliva na čas obravnave ladje, je produktivnost OD. Ta se meri s številom premikov na uro. Bartošek in Marek (2013) sta poudarila, da lahko terminali dosežejo največjo produktivnost do 80 %, kar je posledica izgube produktivnosti zaradi motenj v delovanju. Učinkovitost OD in vpliv na morebitna ozka grla sta

podrobno pojasnila Goodchild in Daganzo (2006). Tudi Beškovnik in drugi (2019) so raziskovali produktivnost OD in njen vpliv na izkoriščenost privezov. V ta namen so v postopku analize produktivnosti podsistema uporabili primerjalni model dvajsetih izbranih globalnih KT za primerjavo produktivnosti. Vendar je produktivnost OD v veliki meri odvisna tudi od vrste in števila uporabljene opreme za horizontalni transport; ta je lahko dodeljena določenemu OD ali več OD hkrati. Vrste in operativne značilnosti horizontalne opreme so analizirali Carlo et al. (2014b). V klasifikaciji glede na velikost ladje so OD razdeljena v več kategorij. V tej študiji sta uporabljeni dve od teh kategorij (Bartošek in Marek, 2013):

- Panamax OD - lahko oskrbuje ladje Panamax, široke 11-13 kontejnerjev (vrste).
- Postpanamax OD - lahko oskrbuje ladje postpanamax, široke od 17 do 19 kontejnerjev.

Naš cilj je izbrati takšno število IT, da bodo OD kljub motnjam na območju skladiščenja lahko dosegla 20 premikov na uro (Panamax OD) oziroma 25 premikov na uro (Post-Panamax OD).

2.3. Težave pri skladiščenju

V izdanih delih, ki obravnavajo probleme skladiščenja, se večina raziskovalcev osredotoča na optimizacijo postopkov pretovarjanja in izboljšanje izkoriščenosti skladiščnega prostora. Vpogled v trenutne raziskave na tem področju ter natančen opis postavitve skladišča in tamkajšnjih postopkov pretovarjanja so zagotovili Carlo, Vis in Roodbergen (2014a). C. Zhang, Liu, Wan, Murty in Linn (2003) ter Woo in Kim (2011) so se ukvarjali s problemom dodeljevanja skladiščnega prostora za kontejnerje, pri čemer so se osredotočili predvsem na dodeljevanje prostora izvoznim kontejnerjem. Po drugi strani sta Zhao in Goodchild (2013) analizirala vpliv transferne mehanizacije na pretovorne učinke terminala.

2.4 Računalniške simulacije

Včasih je lažje in bolj izvedljivo uporabiti vgrajene simulacijske programe, kot so ARENA software, MicroPort, AnyLogic, FlexSim CT itd., ki omogočajo podrobno simulacijo enega podsistema terminala ali interoperabilnost dveh podsistemov. Podroben pregled razpoložljive raziskovalne literature o uporabi simulacijskih modelov pri razvoju pristanišč v zadnjih 54 letih (1961-2015) so predstavili Dragović, Tzannatos in Park (2017). Sislioglu, Celik in Ozkaynak (2018) so uporabili analizo podatkovne ovojnice (DEA) v kombinaciji s programsko opremo ARENA za razvoj orodja za podporo odločanju (DST), katerega cilj je poiskati optimalno naložbo za izboljšanje produktivnosti KT. Osredotočili so se na minimiziranje povprečnega časa obrata ladje v pristanišču ob maksimiziranju prepustnosti kontejnerjev. Isto programsko opremo so uporabili tudi Kotachi, Rabadi in Obeid (2013), ki so modelirali generične pristaniške operacije, da bi preučili, kako lahko različni vhodni podatki vplivajo na izhodne podatke, ki vključujejo pretovor, izkoriščenost mehanizacije in čakalne dobe. Programsko opremo AnyLogic so uporabili Yang, Li in Zhao (2018) za izdelavo simulacijskega modela transportnega sistema AGV, ki bi učinkovito povečal stopnjo izkoriščenosti OD in SD ter skrajšal čas delovanja. Po drugi strani sta Gamal Abd El-Nasser A. Said in El-Horbaty (2015), izbrala programsko opremo FlexSim CT za optimizacijo rešitev problema dodeljevanja skladiščnega prostora, pri čemer sta upoštevala vse različne medsebojno povezane dejavnosti ravnanja s KT. Predlagani pristop je uporabljen na dejanskih podatkih študije primera KT v pristanišču Aleksandrija. Stojaković in Twrddy (2019) sta uporabili programsko opremo FlexSim CT, da bi ugotovili, kako lahko različno število IT, dodeljenih posameznemu OD, vpliva na produktivnost tega dvigala in produktivnost celotnega podsistema priveza v majhnem KT. V tej študiji smo se odločili narediti korak naprej in v programski opremi FlexSim CT zgraditi hipotetični KT ter spremljati le medsebojne odnose podsistemov priveza in skladišča, pri čemer smo se osredotočili predvsem na produktivnost priveza z usklajevanjem števila IT. Na ta način je bilo mogoče pridobiti izvirne podatke o potrebnem številu IT na OD glede na obseg letnega prometa, da bi dosegli največjo produktivnost na privezu in s tem hitrejši odhod velikih ladij iz pristanišča.

3. Razvoj metodologije

Metodologijo lahko razdelimo na štiri glavne korake:

- Predstavitev okvirja. V prvem koraku je predstavljen okvir simulacij. V tem koraku so pojasnjeni podatki, ki so bili izbrani in vključeni v simulacijsko programsko opremo za izdelavo osnovnega simulacijskega modela KT. Poleg tega je opisano zaporedje vseh operacij, izvedenih med simulacijo.
- Postavitev terminala. Po razlagi okvira simulacij je predstavljena postavitev terminala osnovnega modela KT. V tem koraku so navedene fizične značilnosti, ki so bile izbrane za izgradnjo KT (podsistem priveza in skladišča). Ker izvedene simulacije temeljijo na dejanskih pristaniških podatkih, je podan razpored prihodov ladij, ki je bil uporabljen v simulaciji.
- Analize simulacije, izvedene na osnovnem KT. V tretjem koraku so podani in obravnavani rezultati, ki so bili pridobljeni s simulacijo osnovnega modela KT. Rezultati so pokazali, da so bili IT ključnega pomena za doseganje večje produktivnosti priveza, prav tako pa so pomembno vplivali na delovanje skladišča. Te ugotovitve so zato predstavljale podlago za nadaljnje simulacije, ki so nam omogočale določitev optimalnega števila IT na terminalu manjših velikosti.

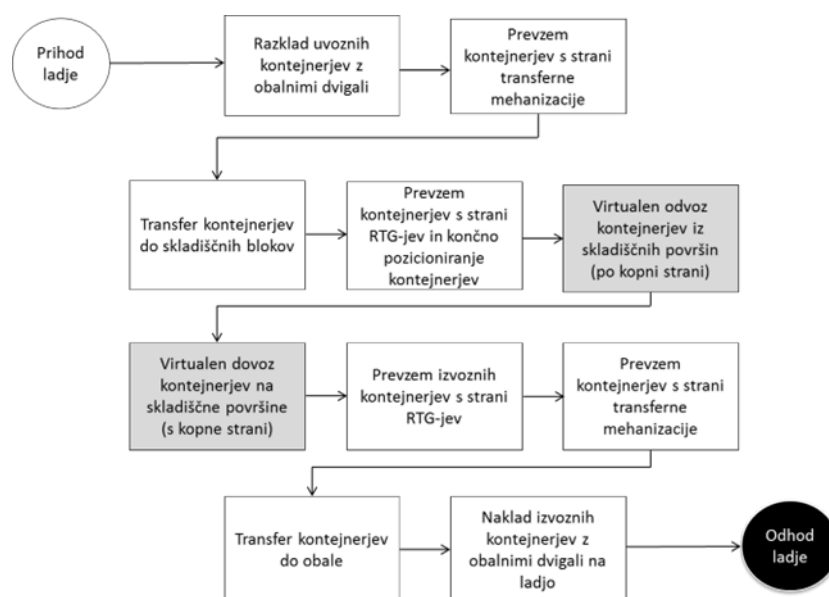
- Izvajanje simulacije. V zadnjem koraku je pojasnjeno, kako so bile izvedene simulacije. Da bi lahko določili optimalno število IT za majhen terminal, so bile simulacije izvedene v treh sklopih z različnim številom IT na OD. V vsakem sklopu je bilo izvedenih sedem različnih scenarijev, v katerih so bile spremenjene značilnosti terminala in povečan letni pretovor KT do 1 milijon TEU.

3.1. Okvir

Za namen te raziskave je bil s programsko opremo FlexSim CT zgrajen hipotetični KT. Gre za model simulacije diskretnih dogodkov (DES) na podlagi dejanskih podatkov iz pristanišč Koper, Reka in Trst. Program FlexSim CT je zmogljivo orodje za analizo funkcije "kaj če", ki se uporablja za modeliranje sistemov, ki zaradi določenih dogodkov spreminjajo svoje stanje v diskretnih časih. Naša raziskava temelji na modelih, ki sta jih razvila Gamal Abd El-Nasser A. Said in El-Horbaty (2015) in Gamal Abd El-Nasser A. Said, Mahmoud in El-Horbaty (2014). Zato so bili v tej simulacijski študiji obravnavani stohastični, dinamični in diskretni problemi.

Izvedena simulacija zajema vse operacije na relaciji privez-skladišče-privez. V model so bili vneseni vsi dejanski podatki o kontejnerjih, ki so na terminal prispeli z ladjo (uvoz), in podatki o kontejnerjih, ki jih je bilo treba naložiti na ladjo, da bi zapustili pristanišče (izvoz), medtem ko je bilo število kontejnerjev, ki so na terminal vstopili in izstopili na kopni strani, izvedeno virtualno (s programsko opremo) glede na vhodne parametre. Vse simulacije so vključevale prihod ladje na terminal, razkladanje vhodnih kontejnerjev, prenos kontejnerjev na skladišče in njihovo postavitve na končno pozicijo in obratno. Zaporedje izvedenih operacij v KT je prikazano na sliki 1.

Za simulacijo ladij je bil uporabljen dejanski urnik prihodov ladij, v katerem ima vsak ladijski servis določen načrtovani čas prihoda na tedenski ravni, kar omogoča realistične simulacije (spored je prikazan na sliki 3). Podatki o območju pretovarjanja, skladiščnih zmogljivostih in opremi so bili vzeti iz razpoložljivih podatkov izbranih pristanišč in združeni za namen raziskave.



Slika 1: Zaporedje operacij v KT.

3.2. Postavitev terminala (vhodni podatki)

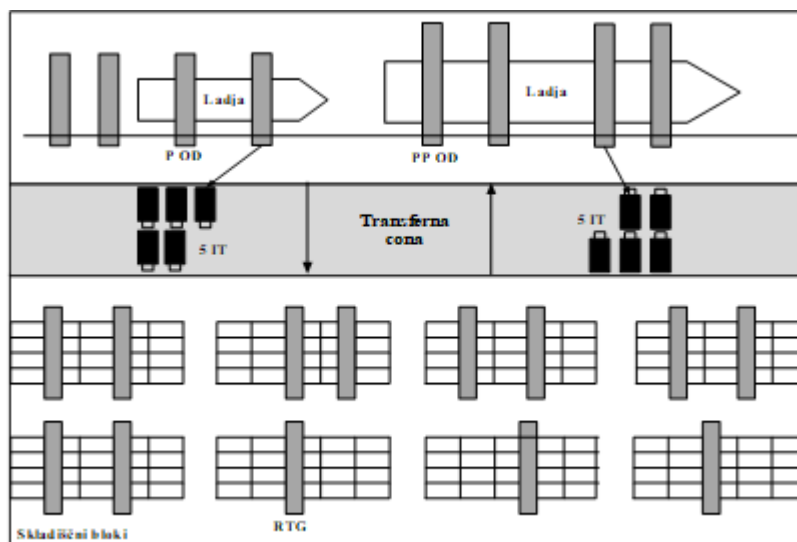
V osnovni simulacijski model so bili vneseni naslednji vhodni podatki: dolžina priveza, OD, ladje, vhodni in izhodni kontejnerji, IT, skladiščne površine in SD.

Osnovni model KT zajema en neprekinjen pomol dolžine 600 metrov, razdeljen na dva priveza (tabela 1, slika 2). Tako lahko velike ladje zasedejo več kot en privez, medtem ko si majhne ladje lahko delijo privez.

Tabela 1: Osnovni model KT.

| | Obala | OD |
|----------|-------|---------------------|
| Privez 1 | 250 m | 4 Panamax (P) |
| Privez 2 | 350 m | 4 Post Panamax (PP) |

Vsa OD opravljajo posamične ciklične operacije, kar je običajno v srednje velikih in manjših pristaniščih. Postopke prenosa kontejnerjev med obalo in območjem skladiščenja opravljajo interni IT. Na začetku je vsakemu OD dodeljenih 5 IT, kar pomeni, da je na terminalu nameščenih 40 IT. Kapacitete spremenljivk, ki so se spremenile med simulacijami sedmih scenarijev, so predstavljene v tabeli 2.



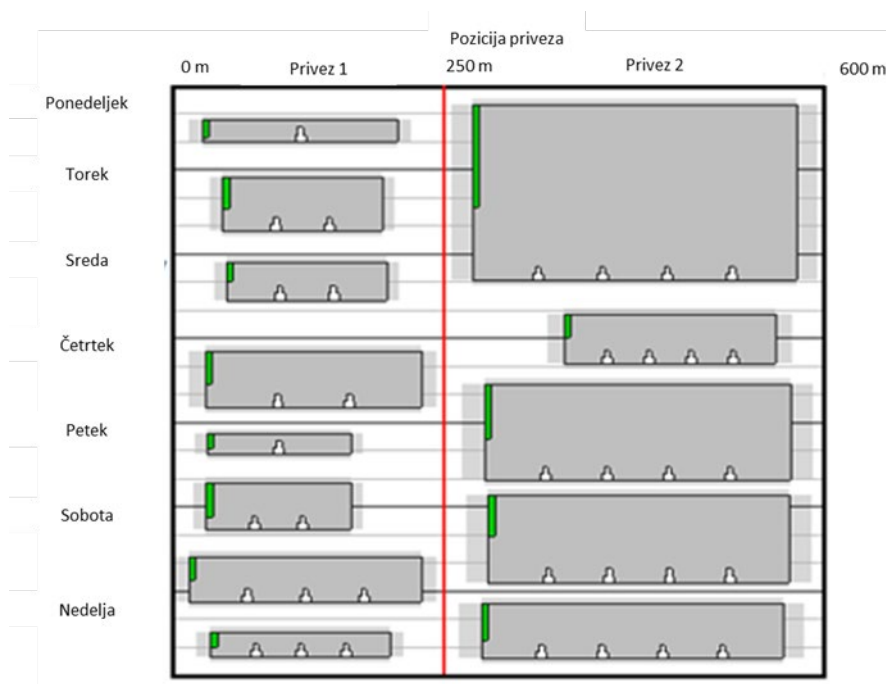
Slika 2: Osnovna postavitev terminala.

Območje skladišča ima zmogljivost 20 160 TEU in je postavljeno vzporedno glede na obalo. Razdeljeno je na tri območja zlaganja: uvozno, izvozno in območje za prazne kontejnerje. Vsak blok za polne kontejnerje je oskrbovan z RTG-jem, medtem ko je blok s praznimi kontejnerji oskrbovan s kontejnerskim manipulatorjem. Vsa manipulacijska sredstva iste vrste imajo enake specifikacije. Ob postavitvi kontejnerja na njegovo končno pozicijo se ta več ne spreminja.

Promet terminala v osnovnem modelu obsega trinajst servisov, ki zajemajo naslednje vrste ladij:

- 46,15 % feeder ladij (do 1 500 TEU),
- 23,08 % Panamax ladij (1 500-5 000 TEU),
- 30,77 % Post Panamax ladij (nad 5 000 TEU).

Kljub temu da ladje razreda Post Panamax predstavljajo le 30,77 % vseh ladij, ki priplujejo na terminal, predstavljajo 66,20 % pretovora terminala. Začetni promet znaša 630 000 TEU na leto. Simulacije so bile izvedene za obdobje enega tedna oziroma do zaključka pretovarjanja zadnje načrtovane ladje. Razpored ladij za vsak dan v tednu in razporeditev na posameznem privezu sta na sliki 3 prikazana s sivimi kvadrati.



Slika 3: Tedenski razpored KT.

3.3. Analiza

Izbrani urnik ladij je predvideval vsakodnevno zasedenost privezov za obdobje enega tedna (prikazano na sliki 3). Na prvi privez so prihajale ladje do 2 300 TEU in dolžine do 220 metrov, medtem ko je drugi privez bil namenjen predvsem večjim Post Panamax ladjam, katerih dolžina je približno 300 metrov.

V analiziranem tednu so P OD pretovorila 3 306 TEU, kar predstavlja 27,25 % pretovorjenih TEU, medtem ko so preostale tri četrtine celotnega tedenskega pretovora opravila PP OD. Povprečna zasedenost vseh OD v analiziranem tednu je bila 43,47 %, povprečni delovni čas PP OD pa je znašal 62,88 %. Zelo pomemben rezultat za izvajanje dodeljenih manipulacij je bil čas čakanja OD na prihod IT. V povprečju je čas čakanja vseh osem OD znašal 11,44 %, kar ni veliko, v kolikor se pa osredotočimo samo na PP OD, se je čas čakanja povečal na 19,56 %, kar pomeni, da so potrebovali več IT ali hitrejša operacija na skladišču. To močno vpliva na celoten čas ladij v pristanišču, saj OD ne more odložiti kontejnerja na površino in preiti na drugo manipulacijo, temveč mora čakati na razpoložljiv IT. Na drugi strani, je čas čakanja pri P OD znašal le 3,32 %, kar pomeni, da jim je pet IT zadostovalo.

V povprečju so OD pretovorila nekaj manj kot 20 premikov na uro, kar je sprejemljivo za mala OD in tudi v skladu z dejanskimi dosežki v bližnjih pristaniščih, medtem ko je tako majhen pretovor za velika OD nesprejemljiv. To je vplivalo na zasedenost privezov, ki je znašala 62,70 %. Čeprav je najvišja meja za doseganje optimalnih rezultatov na privezu določena na 65 %, je to še vedno sprejemljiv delež. Kljub temu je na drugem privezu, kjer se privezujejo velike ladje, dejanska zasedenost (74,06 %) presegla dovoljeno mejo. Ob takšnih rezultatih bi morali terminalni operaterji razmisliti o optimizaciji priveza.

Simulacija je pokazala, da je za trenutni letni promet skladiščna površina terminala še vedno zadostna ali celo premalo izkoriščena. Povprečna izkoriščenost skladiščnega prostora je znašala 31,21 %, medtem ko je največja priporočena izkoriščenost do 60 %. RTG-ji, nameščeni na uvoznih blokih, so na prihod IT čakali veliko dlje kot tisti, nameščeni na izvoznih blokih. Povprečna stopnja izkoriščenosti SD je zato pokazala, da je na terminalu trenutno presežek SD. Kljub temu bi v primeru njihovega zmanjšanja prišlo do večjih zastojev, saj primanjkuje IT za prevoz kontejnerjev iz priveza do skladišča in obratno, kar bi pripomoglo k doseganju optimalnih rezultatov.

Z izbranimi vhodnimi podatki je tako delovni čas simuliranega terminala trajal 210,65 ure. Če bi v simulaciji upoštevali samo podsistem priveza (brez vseh operacij na skladišču), bi se ta čas skrajšal na 140 ur, saj bi OD dosegla večjo produktivnost. Simulacija je pokazala, da je v našem primeru največja težava na območju transferne cone, kjer delujejo IT.

3.4. Simulacije

Rezultati osnovnega modela so pokazali, da je nezadostno število IT glavni vzrok za slabšo učinkovitost OD in daljše postanke ladij na terminalu. Zato so bile izvedene nadaljnje simulacije s povečanjem števila IT.

Sprva smo povečali transferno mehanizacijo za enega vsakemu OD, vendar ustreznih rezultatov nismo dosegli, dokler nismo dodelili desetih IT na vsako OD. Najbolj primerne rezultate (primerljive s tistimi, doseženimi v pristaniščih) smo dosegli le z namestitvijo šestnajstih IT na OD. Čeprav to na majhnih terminalih ni običajno, nam je omogočilo doseči želeno produktivnost OD, ko produktivnost skladišča ni bila najvišja.

Nadaljnje simulacije so bile zato razdeljene v naslednje tri sklope:

- sklop 1: vsako OD oskrbuje 5 IT,
- sklop 2: vsako OD oskrbuje 10 IT,
- sklop 3: vsako OD oskrbuje 16 IT.

Tako je bilo mogoče ugotoviti, kako sprememba števila IT vpliva na produktivnost OD in čas obdelave ladij.

V vsakem od treh sklopov so bile izvedene enake simulacije, ki so zajemale sedem scenarijev, pri katerih se je letni promet postopoma povečal na skoraj 1 milijon TEU. Hkrati so se optimizirale zmogljivosti privezov in skladišč, da bi se omogočil sprejem takšnega prometa. Scenariji so opisani v tabeli 2.

Tabela 2: Izvedeni scenariji.

| Zaporedna številka scenarija | Opis scenarija |
|------------------------------|--|
| SCENARIJ 1 | Osnovni model s 630 000 TEU letnega pretovora. |
| SCENARIJ 2 | Obala osnovnega modela je bila podaljšana za 100 m, ladje pa je oskrbovalo 6 PP in 2 P OD. Letni pretovor je ostal nespremenjen. |
| SCENARIJ 3 | Prejšnjemu modelu je bil dodan tedenski servis s PP ladjo. Letni pretovor se je povečal na 689 000 TEU. |
| SCENARIJ 4 | Prejšnjemu modelu je bil dodan še en tedenski servis s PP ladjo, en feeder servis pa je bil ukinjen. Letni promet se je spremenil na 768 000 TEU. |
| SCENARIJ 5 | Postavitev OD je bila spremenjena na 7 PP in 1 P. Razpored ladij se je spremenil, dodan je bil še ne PP servis, namesto manjšega servisa. Letni pretovor se je povečal na 844 000 TEU. |
| SCENARIJ 6 | Tedenski spored se je spremenil z namenom povečanja letnega pretovora na 899 000 TEU. |
| SCENARIJ 7 | V zadnjem scenariju so bila na pomol postavljena samo PP OD. Tedenski urnik se je spremenil, da bi se letni pretovor povečal na 990 000 TEU. |

Zaradi uporabe verjetnostne porazdelitve različne simulacije istega scenarija niso dale enakih rezultatov. Zato je bilo za vsak scenarij izvedenih več simulacij. Navedeni rezultati predstavljajo povprečje simulacij vsakega scenarija.

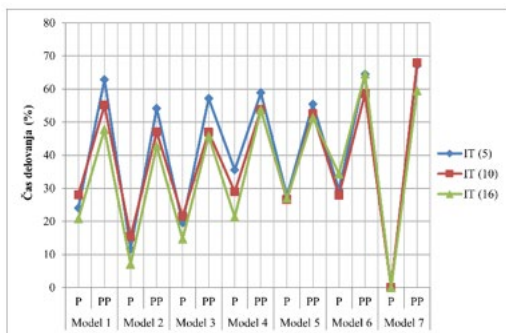
4. Rezultati

Simulacije so vključevale primerjavo vsakega scenarija z različnimi merili in različnim številom IT. Rezultati so prikazani v tabeli 3 in na slikah od 4 do 9. Najboljši rezultati so označeni z zeleno piko, najslabši pa z rdečo. Z rumeno piko so označeni primeri, ko se dobljeni rezultati niso veliko razlikovali od najboljših in so bili zato tudi zelo ugodni. Študija je vključevala P in PP OD, saj gre za dvigala, ki so prisotna v večini srednjih in malih pristanišč, ki so vključena tako v feeder kot v čezoceanske servise. Simulacije so bile osredotočene predvsem na podsistem priveza, saj je bilo to področje v povezavi s transferno mehanizacijo opredeljeno kot tisto, ki najbolj vpliva na čas ladij v pristanišču.

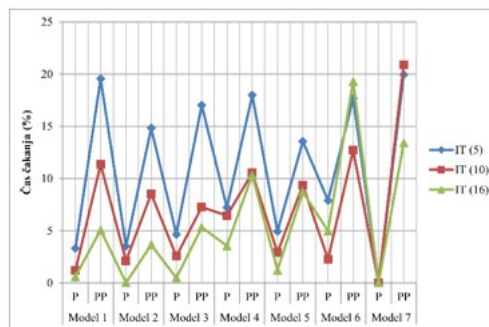
Tabela 3: Rezultati operacij na podsistemu priveza (trije sklopi simulacij) z različnim številom IT.

| | Čas delovanja (%) | | Čas čakanja (%) | | Premiki/h | | Zasedenost Obale (%) |
|------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|-----------|---------|----------------------|
| | P | PP | P | PP | P | PP | |
| MODEL/SCENARIJ 1 | | | | | | | |
| 5 IT | 24.06 | ● 62.88 | ● 3.32 | ● 19.56 | ● 19.12 | ● 19.80 | ● 63.11 |
| 10 IT | ● 27.99 | 55.09 | 1.20 | 11.36 | ● 22.89 | 23.18 | ● 55.84 |
| 16 IT | ● 20.83 | ● 47.80 | ● 0.60 | ● 5.07 | ● 22.10 | ● 26.23 | ● 51.43 |
| MODEL/SCENARIJ 2 | | | | | | | |
| 5 IT | 11.65 | ● 54.21 | ● 3.51 | ● 14.83 | ● 16.05 | ● 21.00 | ● 49.49 |
| 10 IT | ● 15.34 | 47.07 | 2.10 | 8.54 | 19.98 | 24.04 | ● 44.67 |
| 16 IT | ● 7.09 | ● 42.81 | ● 0.03 | ● 3.66 | ● 23.22 | ● 26.48 | ● 42.87 |
| MODEL/SCENARIJ 3 | | | | | | | |
| 5 IT | 19.53 | ● 57.16 | ● 4.65 | ● 17.03 | ● 17.65 | ● 19.99 | ● 55.04 |
| 10 IT | ● 21.42 | ● 46.93 | 2.56 | 7.27 | 20.91 | ● 24.73 | 48.34 |
| 16 IT | ● 14.61 | ● 45.79 | ● 0.49 | ● 5.32 | ● 22.86 | ● 25.68 | ● 41.82 |
| MODEL/SCENARIJ 4 | | | | | | | |
| 5 IT | ● 35.55 | ● 58.90 | ● 7.22 | ● 17.97 | 18.77 | ● 19.77 | ● 62.32 |
| 10 IT | 28.89 | ● 53.75 | 6.45 | ● 10.53 | ● 17.90 | ● 23.54 | ● 55.59 |
| 16 IT | ● 21.27 | ● 53.73 | ● 3.55 | ● 10.33 | ● 19.65 | ● 23.53 | ● 53.74 |
| MODEL/SCENARIJ 5 | | | | | | | |
| 5 IT | ● 27.65 | ● 55.45 | ● 4.94 | ● 13.57 | ● 19.42 | ● 21.70 | ● 60.74 |
| 10 IT | ● 26.56 | ● 52.46 | 2.90 | 9.37 | 21.05 | ● 24.01 | ● 57.71 |
| 16 IT | ● 26.92 | ● 51.35 | ● 1.19 | ● 8.72 | ● 22.66 | ● 24.41 | ● 55.93 |
| MODEL/SCENARIJ 6 | | | | | | | |
| 5 IT | 29.50 | ● 64.51 | ● 7.90 | 17.68 | ● 17.15 | 20.98 | ● 65.56 |
| 10 IT | ● 27.93 | ● 58.61 | ● 2.28 | ● 12.72 | ● 21.78 | ● 22.79 | ● 60.82 |
| 16 IT | ● 34.36 | ● 64.50 | 4.97 | ● 19.31 | 20.14 | ● 20.61 | ● 65.71 |
| MODEL/SCENARIJ 7 | | | | | | | |
| 5 IT | 0.00 | ● 67.17 | 0.00 | 19.93 | 0.00 | ● 20.32 | 70.54 |
| 10 IT | 0.00 | ● 67.92 | 0.00 | ● 20.90 | 0.00 | 20.46 | ● 73.12 |
| 16 IT | 0.00 | ● 59.48 | 0.00 | ● 13.42 | 0.00 | ● 23.02 | ● 64.99 |

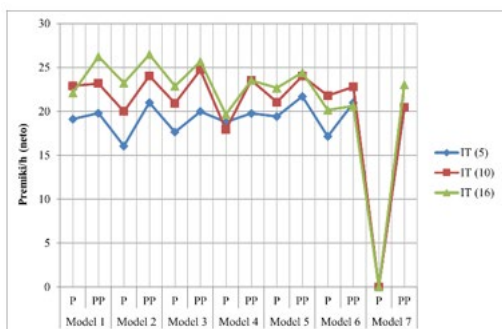
Rezultati vseh scenarijev so pokazali, da se je ob povečanju števila IT na OD (na največje možno število), delovni čas OD in čas čakanja OD na prihod IT zmanjšal (sliki 4 in 5). To je pozitivno vplivalo na produktivnost OD in na zmanjšanje zasedenosti privezov, kar je ključnega pomena, za pristanišča, ki želijo povečati letni promet, pridobiti večje ladje in jim zagotoviti hitre pretovorne operacije (sliki 6 in 7). Izjema je bil scenarij 6, kjer so bili najboljši rezultati pri vseh kriterijih doseženi s povečanjem števila IT na 10 (slike 4 do 7). Jasno je tudi razvidno, da so v scenarijih 3, 4 in 5 PP OD dosegla zelo ugodne rezultate z 10 IT na OD (slike 4 do 6). Ti rezultati so zelo podobni rezultatom tretjega sklopa simulacij, kar kaže, da bi 10 IT zadoščalo za doseganje dobrih učinkov pretovora ladij v primeru povečanja prometa na 689 000 TEU ali več. V skoraj vseh scenarijih je tretji sklop simulacij pokazal najnižjo stopnjo zasedenosti privezov (slika 7). Kljub temu so bili v 2. sklopu doseženi zelo ugodni rezultati, ki niso presegli priporočene kritične točke 65 % (slika 7), kar pomeni, da finančna naložba v 16 IT ne bi bila smiselna. Poleg tega bi se v takšnih razmerah težave pri skladiščenju še poslabšale. Tu so rezultati s 16 IT bili bistveno slabše kot z 10 IT na OD (sliki 8 in 9). Po številnih simulacijah je bilo jasno, da so bili najboljši rezultati na podsistemu skladišča doseženi v prvem sklopu simulacij s 5 IT na vsakem OD (sliki 8, 9). Zato imamo opravka z izjemno zapletenim problemom, ki zahteva pomembne odločitve. Za pristanišča je bistvenega pomena določiti točko ravnovesja, kjer je mogoče doseči produktivnost priveza, ki jo zahtevajo ladjarji vendar z najmanjšimi negativnimi učinki na območju skladišča. Težave na skladišču zmanjšujejo učinkovitost podsistema priveza, zato pristanišča ne morejo zanemariti zahtev priveza in izbrati števila IT, ki ustreza predvsem skladišču.



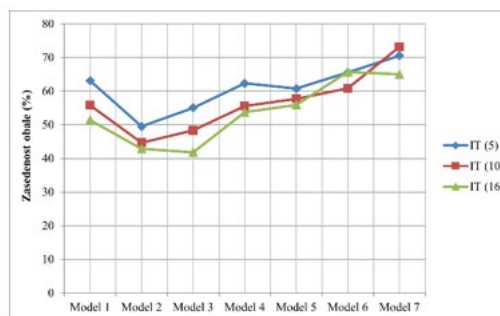
Slika 4: Delovni čas OD (%).



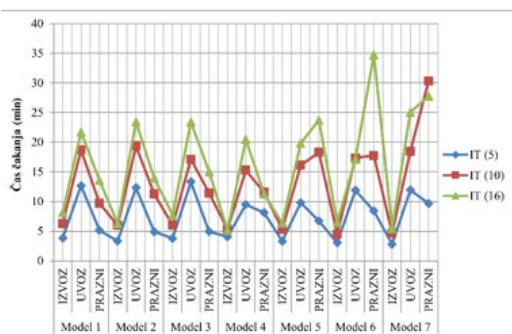
Slika 5: Čas čakanja OD (%).



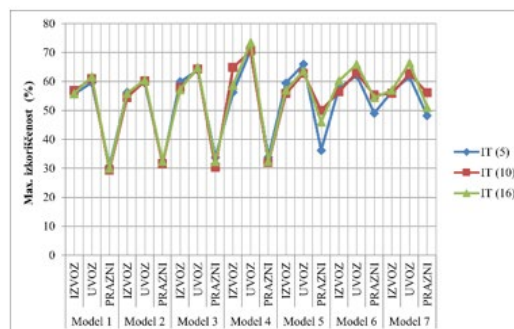
Slika 6: Produktivnost OD (premiki/h).



Slika 7: Zasedenost priveza (%).



Slika 8: Čas čakanja SD (min).



Slika 9: Izkoriščenost skladišča (%).

Raziskava je pokazala, da je s terminalom takšnih dimenzij mogoče doseči optimalne rezultate do letnega pretovora 850 000 TEU. Pri milijonu TEU se produktivnost znatno zmanjša, celoten sistem pa postane preobremenjen. Grafični pregled sprememb rezultatov, pridobljenih med faznimi simulacijami, je poudarjen na naslednjih slikah.

5. Razprava in zaključek

V članku so predstavljeni rezultati študije, opravljene na hipotetičnem KT majhne velikosti z uporabo programske opreme Flexsim CT 3.3. Analiza je zajemala vse operacije na relaciji privez-skladišče-privez s poudarkom na pravilni razporeditvi transferne mehanizacije, ki bi omogočala optimalno delovanje priveza in posledično hitrejši obrat ladje v pristanišču. Ker danes ladjarji tudi v manjša pristanišča prihajajo z vedno večjimi ladjami, se takšna pristanišča soočajo z vedno večjimi količinami kontejnerjev in zahtevami po hitrejšem obratu ladij, da bi zmanjšali stroške v pristaniščih.

Naša študija temelji na delu Gamal Abd El-Nasser A. Said in El-Horbaty (2015), v katerem je bilo z uporabo optimizacijskega modela za dodeljevanje skladiščnega prostora na kontejnerskem terminalu v Aleksandriji doseženo 54-odstotno zmanjšanje časa zadrževanja kontejnerjev v pristanišču. V našem primeru smo uporabili podatke hipotetičnega terminala z zmogljivostjo 630 000 TEU, simulacije pa smo razdelili na sedem scenarijev, ki so omogočali postopno povečanje prometa do približno enega milijona TEU letno. Simulacije so bile izvedene v treh

sklopih, pri čemer je bilo v vsakem uporabljeno različno število IT na OD.

Rezultati so pokazali, da so OD v vseh sedmih scenarijih v povprečju dosegla najugodnejše rezultate s 16 IT, vendar se sklop simulacij z 10 IT, ki služijo enemu OD, bistveno ne razlikuje. Zato se naložba v 16 IT na OD (glede na dobljene rezultate) ne izplača, saj bi brez izjemno dobre strategije za dodeljevanje operacij IT v obeh obravnavanih podsistemih prišlo do zastojev. Situacija pa je bila ravno obratna na območju skladišča. Zato ima v našem primeru povečanje števila transferne mehanizacije negativen vpliv na delovanje skladišča. Ne glede na to je bilo treba zaradi slabih rezultatov, doseženih na privezu s petimi IT na OD, število IT povečati, čeprav je to pomenilo tveganje za rahlo poslabšanje produktivnosti na območju skladiščenja. Naš cilj je bil doseči tako produktivnost OD in zasedenost priveza, ki izpolnjujeta današnje zahteve ladjarjev v manjših pristaniščih. Zato smo se odločili za večje število IT na dvigalo. Poleg tega lahko izbira napačne strategije privede do zastojev na območju priveza - zlasti pa na območju skladiščenja, kar posledično negativno vpliva na operacije na pomolu.

Če povzamemo, sta konkurenčnost in raven delovanja KT trenutno odvisni od svetovnega povpraševanja po kontejnerskem prevozu in posledično od odločitev ladjarjev o uporabi večjih ladij. Pri tem so srednja in mala pristanišča v zelo težkem položaju, saj so podvržena kaskadnemu učinku, kar po besedah Merk, Busquet in Aronietis (2015) pomeni, da se ladje, ki so postale odvečne zaradi zelo velikih novih ladij, uporabljajo v direktnih servisih, ki vključujejo srednja in mala pristanišča. Rezultati te študije so pomembni za operaterje manjših KT, saj lahko model uporabijo za iskanje pravega števila transferne mehanizacije za povečanje letnega pretovora. Glavna omejitev izhaja iz dejstva, da v analizo niso bili vključeni vsi KT, temveč le en manjši terminal. Zato so tukaj predstavljene ugotovitve omejene na glavno vprašanje, torej kako zagotoviti hitro in učinkovito pretovarjanje ladij, ki zdaj dosegajo 6 000 do 8 000 TEU, in kako izpolniti glavno zahtevo ladjarjev - hitro pretovarjanje v pristaniščih za zmanjšanje stroškov. Poudarek je bil na kazalnikih učinkovitosti in operativnih časih, ki so odvisni od mehanizacije v vsakem podsistemu. Ker so rezultati 2. sklopa simulacij pokazali precej dobre rezultate za oba podsistema v scenarijih s povečanim letnim prometom, bi bilo za majhno kontejnersko pristanišče najugodnejše izbrati 10 IT na posamezno OD.

Možnosti številnih modelov so omejene z razpoložljivostjo podatkov. Pomanjkanje podrobnih podatkov ostaja velik izziv, tudi pri določanju pravega števila IT za OD, z namenom zagotavljanja večje produktivnosti v podsistemih priveza in skladišča. Vendar pa ocenjeni rezultati kažejo, da bi predstavljeni koncept omogočil znatno izboljšanje splošne produktivnosti v manjših KT. Pridobljeni rezultati so se izkazali za verodostojne, vendar se lahko vprašamo, ali lahko terminal takšnih zmogljivosti doseže še boljše rezultate v obeh podsistemih z uporabo alternativne transferne mehanizacije. Naše nadaljnje raziskave se bodo tako osredotočile na nadgradnjo predstavljenega modela, kjer bodo postopki prenosa kontejnerjev med obalo in skladiščem izvedeni z drugo vrsto mehanizacije. Na ta način bo mogoče primerjati rezultate in oblikovati nekaj dobrih smernic za učinkovito optimizacijo operacij v majhnih kontejnerskih pristaniščih.

Viri in literatura

1. Bartošek, A., & Marek, O. (2013). Quay cranes in container terminals. *Transactions on Transport Sciences*, 6(1), 9–18. <https://doi.org/10.2478/v10158-012-0027-y>.
2. Beškovnik, B., Twrdy, E., & Bauk, S. (2019). Developing higher berth productivity: Comparison of eastern adriatic container terminals. *Promet – Traffic & Transportation*, 31(4), 397–405.
3. Bierwirth, C., & Meisel, F. (2010). A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>.
4. Bierwirth, C., & Meisel, F. (2015). A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 244(3), 675–689. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>.
5. Böse, J. W. (2011). In J. W. Böse (Ed.), *Handbook of terminal planning*, (vol. 49). Springer Science+Business Media.
6. Brinkmann, B. (2011). Operations system of container terminals: A compendious overview. In J. W. Böse (Ed.), *Handbook of terminal planning*, (pp. 25–39). Springer and Springer Science+Business Media, LLC.
7. Carlo, H. J., Vis, I. F. A., & Roodbergen, K. J. (2014a). Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 412–430. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.054>.
8. Carlo, H. J., Vis, I. F. A., & Roodbergen, K. J. (2014b). Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*, 236(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.023>.
9. Dragović, B., Tzannatos, E., & Park, N. K. (2017). Simulation modelling in ports and container terminals: Literature overview and analysis by research field, application area and tool. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(1), 4–34. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9239-5>.

10. Gharehgozli, A. H., Vernooij, F. G., & Zaerpour, N. (2017). A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal. *European Journal of Operational Research*, 261(1), 108–128. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.037>.
11. Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M., & Vacca, I. (2010). Modeling and solving the tactical berth allocation problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(2), 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.07.003>.
12. Goodchild, A. V., & Daganzo, C. F. (2006). Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations. *Transportation Science*, 40(4), 473–483. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0148>.
13. Gupta, A., Roy, D., de Koster, R., & Parhi, S. (2017). Optimal stack layout in a sea container terminal with automated lifting vehicles. *International Journal of Production Research*, 55(13), 3747–3765. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1273561>.
14. He, J., Chang, D., Mi, W., & Yan, W. (2010). A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1), 136–155. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.002>.
15. Hervás-Peralta, M., Poveda-Reyes, S., Molero, G. D., Santarremigia, F. E., & Pastor-Ferrando, J.-P. (2019). Improving the performance of dry and maritime ports by increasing knowledge about the Most relevant functionalities of the terminal operating system (TOS). *Sustainability*, 1648(6). <https://doi.org/10.3390/su11061648>.
16. Hinkka, V., Porkka, J., Fatima, Z., Hyvärinen, J., Huovila, A., Morales-Fusco, P., Soley, G. (2018). Terminal planning: The selection of relevant KPIs to evaluate operations. Paper presented at the Transport Research Arena TRA 2018. Stojaković and Twrdy *European Transport Research Review* (2021) 13:22 Page 11 of 12.
17. Huynh, N., & Walton, C. M. (2011). Improving efficiency of drayage operations at seaport container terminals through the use of an appointment system. In J. W. Bose (Ed.), *Handbook of terminal planning*, (pp. 323–343). Springer and Springer Science+Business Media, LLC.
18. Imai, A., Sun, X., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2005). Berth allocation in a container port: Using a continuous location space approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(3), 199–221. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.04.004>.
19. Kim, K.-H., & Günther, H.-O. (2006). Container terminals and terminal operations. *OR Spectrum*, 28(4), 437–445. <https://doi.org/10.1007/s00291-006-0059-y>.
20. Kotachi, M., Rabadi, G., & Obeid, M. F. (2013). Simulation modeling and analysis of complex port operations with multimodal transportation. *Procedia Computer Science*, 20, 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.09.266>.
21. Kourounioti, I., Polydoropoulou, A., & Tsiklidis, C. (2016). Development of models predicting dwell time of import Containers in Port Container Terminals – An artificial neural networks application. *Transportation Research Procedia*, 14, 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.061>.
22. Kress, D., Meiswinkel, S., & Pesch, E. (2019). Straddle carrier routing at seaport container terminals in the presence of short term quay crane buffer areas. *European Journal of Operational Research*, 279(3), 732–750. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.028>.
23. Liang, C., Hwang, H., & Gen, M. (2011). A berth allocation planning problem with direct transshipment consideration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2207–2214. <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0566-9>.
24. Meisel, F. (2009). *Seaside operations planning in container terminals*. PhysicaVerlag A Springer Company. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2191-8>.
25. Merk, O., Busquet, B., & Aronietis, R. (2015). The impact of mega-ships Retrieved from http://www.oecd-ilibrary.org/transport/the-impact-of-megaships_5jlwvzcm3j9v-en.
26. Sacone, S., & Siri, S. (2009). An integrated simulation-optimization framework for the operational planning of seaport container terminals. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 15(3), 275–293. <https://doi.org/10.1080/13873950902808636>.
27. Said, G. A. E.-N. A., & El-Horbaty, E.-S. M. (2015). A simulation modeling approach for optimization of storage space allocation in container terminal. *Information, Systems and Control Engineering*, 9(1), 168–173.
28. Said, G. A. E.-N. A., Mahmoud, A. M., & El-Horbaty, E.-S. M. (2014). Solving container terminals problems using computer-based modeling. *International Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE)*, 3(3), 91–100. <https://arxiv.org/abs/1407.6384>.
29. Seyedalizadeh Ganji, S. R., Babazadeh, A., & Arabshahi, N. (2010). Analysis of the continuous berth allocation problem in container ports using a genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, 15(4), 408–416. <https://doi.org/10.1007/s00773-010-0095-9>.
30. Singgih, I. K., Jin, X., Hong, S., & Kim, K. H. (2016). Architectural Design of Terminal Operating System for a container terminal based on a new concept. *Industrial Engineering and Management Systems*, 15(3), 278–288. <https://doi.org/10.7232/iems.2016.15.3.278>.

31. Sislioglu, M., Celik, M., & Ozkaynak, S. (2018). A simulation model proposal to improve the productivity of container terminal operations through investment alternatives. *Maritime Policy & Management*, 46(2), 156–177. <https://doi.org/10.1080/03088839.2018.1481544>.
32. Stahlbock, R., & Voß, S. (2008). Operations research at container terminals: A literature update. *OR Spectrum*, 30(1), 1–52. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0100-9>.
33. Steenken, D., Voß, S., & Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*, 26(1), 3–49. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>.
34. Stojaković, M., & Twrdy, E. (2016). A decision support tool for container terminal optimization within the berth subsystem. *Transport*, 31(1), 29–40. <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.994226>.
35. Stojaković, M., & Twrdy, E. (2019). The influence of yard trucks on berth operations in smaller container terminals. *Scientific Journal of Maritime Research*, 33, 171–175. <https://doi.org/10.31217/p.33.2.6>.
36. Tang, G., Qin, M., Zhao, Z., Yu, J., & Shen, C. (2020). Performance of peak shaving policies for quay cranes at container terminals with double cycling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 104, 102129. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102129>.
37. Vis, I. F. A., & De Koster, R. (2003). Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00293-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00293-X).
38. Woo, Y. J., & Kim, K. H. (2011). Estimating the space requirement for outbound container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.032>.
39. Yang, Z., Li, C., & Zhao, Q. (2018). Dynamic time estimation based AGV dispatching algorithm in automated container terminals. Paper presented at the Chinese Control Conference (CCC).
40. Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.-W., Murty, K. G., & Linn, R. J. (2003). Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(10), 883–903. [https://doi.org/10.1016/s0191-2615\(02\)00089-9](https://doi.org/10.1016/s0191-2615(02)00089-9).
41. Zhang, H., & Kim, K. H. (2009). Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals. *Computers and Industrial Engineering*, 56(3), 979–992. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.008>.
42. Zhao, W., & Goodchild, A. V. (2013). Using the truck appointment system to improve yard efficiency in container terminals. *Maritime Economics & Logistics*, 15(1), 101–119. <https://doi.org/10.1057/mel.2012.23>.