Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GEOFIZIKA, MODUL HIDROLOGIJA

Kandidat:

LOVRENC PAVLIN

MODELIRANJE VPLIVA CURKA LADIJSKEGA VIJAKA NA HITROSTI OB MORSKEM DNU

Magistrsko delo št.: M3

MODELLING THE EFFECT OF PROPELLER WASH ON VELOCITIES AT THE SEABED

Graduation – Master Thesis No.: M3

Mentor:
izr. prof. dr. Dušan Žagar

Predsednik komisije:
prof. dr. Matjaž Mikoš

Somentor:
/

Član komisije:

15. 5. 2017

POPRAVKI

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

[Prazna stran]

BIBLOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 629.5.024.711:532.517.4:627.222.1 (043.3)

Avtor: Lovrenc Pavlin, dipl. fiz. (UN)

Mentor: izr. prof. dr. Dušan Žagar

Naslov: Modeliranje vpliva curka ladijskega vijaka na hitrosti na morsko dno

Tip dokumenta: Magistrsko delo

Obseg in oprema: 59 str., 3 pregl., 42 sl., 83 en.

Ključne besede: curek ladijskega vijaka, turbulentni vodni curek, hitrosti ob morskem dnu, modeliranje hitrosti

Izvleček

Magistrsko delo obravnava turbulentni curek ladijskega vijaka in hitrosti, ki jih tak curek povzroči ob morskem dnu. Zaradi predvidenega povečanja prometa v Koprskem zalivu se pričakuje tudi večji vpliv plovbe na morsko dno. Curek ladijskega vijaka lahko namreč povzroči privzdigovanje in premeščanje sedimentov. Narejen je bil pregled literature in sestavljen pregledni seznam enačb za opis problema curka ladijskega vijaka. Za primerjavo enačb je bil razvit nov model v programskem okolju MATLAB, ki omogoča izračun hitrostnega polja za poljubno batimetrijo ali vodoravno ravnino, različne tipe ladij in poljubne manevre ob plovbi. Izračunano hitrostno polje je mogoče uporabiti tudi kot vhodni podatek v sedimentacijskem modulu modela PCFLOW3D.

Izračuni kažejo, da različne enačbe dajejo značilno različne rezultate. Skoraj 100% razlike so možne pri izračunu iztočne hitrosti. Različne enačbe za zmanjševanje največje hitrosti curka z oddaljenostjo od vijaka dajejo dosege curka od le nekaj 10 metrov do nekaj kilometrov. Raziskani sta bili tudi dve metodi, ki upoštevata vpliv krmila za vijakom na curek, od katerih se je za uporabno izkazala le ena. Tri preizkušene metode za korekcijo iztočne hitrosti zaradi gibanja ladje dajejo primerljive rezultate. Izvedena je bila tudi analiza treh testnih primerov manevrov ladij v Koprskem zalivu. Izračunana hitrostna polja so primerljiva z rezultati doslej izvedenih študij.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	**629.5.024.711:532.517.4:627.222.1 (043.3)**
Author:	**Lovrenc Pavlin, B.Sc. Phys.**
Supervisor:	**Assoc. Prof. Dušan Žagar, Ph.D.**
Title:	**Modelling the effect of propeller wash on velocities at seabed**
Document type:	**M. Sc. Thesis**
Notes;	**59 p., 3 tab., 42 fig., 83 eq.**
Keywords:	**ship's propeller wash, turbulent water jet, velocities at seabed, modelling velocities**

Abstract

This Master Thesis discusses a ship's propeller wash and velocities that this wash inflicts on the seabed. As increased maritime traffic is expected in the Gulf of Koper, the impact of ships navigating on the seabed is also expected to increase. The propeller wash can cause the resuspension and transport of sediments. A review of literature has been made and a list of equations describing a turbulent jet of propeller has been put together. For the comparison of these equations, a new model in MATLAB computing environment has been developed, which enables the calculation of velocity field for any bathymetry or horizontal plane, several types of ships and any manoeuvre during navigation. The calculated velocity field could be used as an input for the sedimentation module of PCFLOW3D model.

The calculations show that different equations give significantly different results. The differences of nearly 100% are possible at efflux velocity calculation. Different equations for the prediction of maximum velocity decay give jet reaches from only some 10 meters to some kilometres. An investigation of two methods that account for rudder effects in the propeller wash has been done, from which only one has been proved to be useable. The three tested methods for the correction of efflux velocity due to advancing of the ship have given comparable results. The analysis of three test manoeuvres in the Gulf of Koper has also been carried out. The calculated velocity fields are comparable with the results from previously performed studies.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju magistrskega dela ter za vedno pozitiven in proaktiven odnos se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Dušanu Žagarju. Zahvaljujem se tudi prof. dr. Matjažu Mikošu, ki mi je pomagal pri organizaciji magistrskega študija.

Za poslane podatke in nasvete se zahvaljujem viš. pred. mag. Marku Perkoviču iz Fakultete za pomorstvo in promet, za posredovane batimetrične podatke pa tudi Aljoši Žerjalu iz podjetja Harpha Sea, d. o. o.

Nazadnje se zahvaljujem še mojim najbližjim, še posebno staršem, ki mi vedno stojijo ob strani in me vedno podpirajo pri študiju in drugih dejavnostih.

KAZALO VSEBINE

KAZALO PREGLEDNIC

KAZALO SLIK

LIST OF TABLES

LIST OF FIGURES

1 UVOD

Koprski zaliv predstavlja zaprti jugovzhodni del obsežnejšega Tržaškega zaliva in meri okrog 35 km^2. Na severozahodu se med Izolo in Debelim rtičem odpira v Tržaški zaliv, na vzhodu pa prehaja v dolino Rižane. Zaliv je relativno plitev, saj je večinoma globok med 15 in 20 metrov, obala pa je dokaj strma. Obrežno območje do globine okrog 5 metrov prekriva peščeni melj s srednjo zrnavostjo okrog 50 µm. Proti notranjosti zaliva prevladuje glinasti melj, srednja zrnavost pa se giblje med 3 in 6 µm. Sediment odprtega dela zaliva je peščeni melj s srednjo zrnavostjo 30 µm.(Ogorelec et al., 1988)

V Koprskem zalivu deluje največje slovensko pristanišče, Luka Koper, ki je poleg Trsta in Tržiča eno pomembnejših pristanišč v Severnem Jadranu. Leta 2015 je ladijski pretovor prvič presegel 20 milijonov ton blaga, leta 2016 je zrasel že na več kot 22 mio. ton, kar je 57% več kot leta 2006 (Luka Koper, d. d., 2017). Napovedi upravljalca pristanišča o rasti pretovora so tudi za prihodnost zelo optimistična, saj do leta 2020 pričakujejo preseganje 24 mio. ton, do leta 2030 pa 35 mio. ton pretovora blaga (Luka Koper, d. d., 2015). Pri tem gre predvsem za povečanje prometa s kontejnerji in avtomobili. Število tovornih ladij, ki so priplula ali izplula iz koprskega pristanišča, se giblje med 3739 in 4080 (2009-2015), medtem ko se število potniških ladij v istem obdobju giblje med 88 in 158 (Statistični urad Republike Slovenije, 2017). Upravljalec napoveduje povečanja števila ladij, hkrati pa načrtuje poglabljanje plovnih kanalov in s tem omogočenje vplutja večjih ladij.

Luka Koper ima tri plovne bazene, ki omogočajo vplutje in privez ladij na pomole. Najjužnejši prvi bazen je najplitvejši, saj je ob prvem pomolu, namenjenemu potniškim ladjam, in je globok 11 metrov, ob drugem pomolu, ki je namenjen kontejnerskemu in generalnemu tovoru, pa 15 metrov. Srednji drugi bazen je namenjen pretovoru generalnega tovora, nafte in drugih tekočih kemikalij, avtomobilov in razsutega tovora. Globok je med 14 in 16 metrov. Najgloblji je tretji bazen ob tretjem pomolu, kjer je globina vode okrog 19 metrov, kar omogoča sidranje ladij z največjim ugrezom 17.2 metra. Tu se pretovarjajo ladje za prevoz avtomobilov (RO-RO), generalni tovor in razsuti tovor. Plovni bazeni so podaljšani proti sredini zaliva do točke, kjer je globina zaliva enaka globini bazena. V primeru prvih dveh bazenov ta podaljšani poglobljeni del meri okrog 600 metrov od pomolov, medtem ko je kanal tretjega bazena dolg okrog 2 kilometra od tretjega pomola.

Zaradi značilne zrnavostne sestave sedimenta je ta podvržen privzdigovanju in premeščanju. To povzroča zasipavanje vodnih poti, ki so nujne za vplutje večjih ladij in s tem delovanje pristanišča. Velik naravni in gospodarski pomen tega območja je vodil v izvedbo dosedanjih raziskav. Te so preučevale dejavnike, ki vplivajo na sediment, kot so cirkulacija (Malačič et al., 2010; Žagar et al., 2012), valovanje in plovba (Žagar et al., 2014).

Poleg ekonomskih posledic je privzdigovanje sedimentov problematično tudi z okoljskega vidika. V Tržaškem zalivu je posebno problematično onesnaženje z živim srebrom. Glavni vir tega je zdaj že zaprti rudnik živega srebra v Idriji, od koder se prek rek Idrijce in Soče transportira do morja. »Meritve v Tržaškem zalivu kažejo močno povišane koncentracije živosrebrovih spojin v vodi, sedimentu in vodnih organizmih. Koncentracije v naravnem zaledju so presežene za red, v sedimentu na dnu zaliva pa za dva reda velikosti in so višje od priporočljivih po WHO[1]«(Žagar, 1999, str. 12). Živo srebro ima dokazano škodljive posledice na človekov centralni živčni sistem in na genetski material, zato je potrebno biti pozoren že na najmanjše dvige koncentracij živega srebra v okolju ter poznati gibanje privzdignjenih sedimentov.

[1] WHO – World Health Organisation

V Koprskem zalivu so koncentracije živega srebra sicer dosti nižje kot na severu Tržaškega zaliva. Tu je problematično predvsem onesnaženje z organokositrovimi spojinami in poliaromatskimi ogljikovodiki. Tributilkositrove spojine (TBT) so izredno strupene snovi, ki jih najdemo v premazih, ki preprečujejo obraščanje plovil. (IzVRS, 2013) o onesnaženju s TBT podaja naslednje ugotovitve: Koncentracije TBT na vseh merilnih mestih v slovenskem morju kažejo prekomerno onesnaženje. Najvišje koncentracije TBT v morski vodi za obdobje med leti 2008 in 2011 so bile izmerjene na merilnem mestu sredi Koprskega zaliva. V sedimentih se nalagajo tako TBT, kot tudi njegov razpadni produkti dibutil kositrove spojine (DBT). Največje koncentracije so bile izmerjene v marinah in njihovi neposredi okolici, proti odprtemu morju pa znatno padajo.

Policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH) v vodo vstopajo predvsem s pretvorbo fosilnih goriv, surove nafte ali premoga, nastajajo pa tudi pri nepopolnem izgorevanju goriv, ki vsebujejo ogljik. Največji vir PAH je pomorski promet in pretovor goriv. PAH so lipofilne snovi in se akumulirajo v sedimentu in organizmih. Po letu 2005 trendi kažejo občutno znižanje koncentracij v koprskem pristanišču. (IzVRS, 2013)

V plitvih zalivih, kot je Koprski, lahko pomembno vlogo pri privzdigovanju sedimentov igra vpliv curka ladijskega vijaka pri plovbi in manevriranju ladij. Ladijski vijak lokalno pospeši vodo, kar za vijakom ustvari močno turbulentni curek. Okoliška voda je približno mirujoča, kar pomeni, da se na meji curka pojavijo velike strižne napetosti. Če tak curek zadene ob morsko dno, lahko pride do resuspenzije sedimenta. Oblak suspendiranega sedimenta, ki se ob tem ustvari, lahko curek in cirkulacija odplavita, da se posede tudi več kilometrov stran od mesta resuspendiranja. Povečana motnost zmanjša prodiranje svetlobe v vodni stolpec, kar najbolj prizadene fotosintezirajoče rastline in bentoške organizme (Orpin et al., 2004). Resuspendiran material lahko destabilizira substrat, na katerem rastejo organizmi, nato pa se lahko ta material poseda na organizme in s tem hromi njihovo rast. Ob resuspenziji se ponovno aktivirajo strupene snovi (Hg, Ni, Cd, Cr, Pb), ki so drugače vezane v sedimentu. Curek ladijskega vijaka manevrirajočih ladij lahko povzroča poškodbe na pristaniški infrastrukturi, saj premeščeni sediment lahko zasipa plovne kanale, spiranje materiala pa lahko postopno poškoduje pristaniške zgradbe.

Vpliv curka ladijskega vijaka na dno v Koprskem zalivu so preučevali že Perkovič et al.(2011), ki so razvili dva modela hitrosti ob dnu, in sicer v programskem okolju Microsoft Excel in Mathcad. Oba modela predvidevata homogeno ravno dno, vhodni podatki pa so parametri iz navtičnega simulatorja Transas NTPro 5000, v izvedbi »*full mission ship handling configuration*«. Za preverbo poenostavljenih modelov so izvedli tudi analizo z računsko dinamiko tekočin v orodju Ansys CFD, ki upošteva dejansko batimetrijo zaliva. Model v programu Matlab (Ramšak, 2013) je bil razvit za izračun hitrostnega polja ob dnu in za uvoz matrik hitrosti v model PCFLOW3D (Rajar et al., 2004, 1997; Rajar in Četina, 1997; Žagar, 1999; Žagar et al., 2007). Model (Ramšak, 2013) temelji na predhodnem delu skupine Perkovič et al., za izračun se namreč upoštevajo iste enačbe, uporaba poljubne topografije in batimetrije pa prav tako ni mogoča. Zaradi omejenosti tega modela in njegovega nepreglednega kodiranja potreba po široko zastavljenem in preglednem modelu za izračun hitrostnega polja ob dnu za nadaljnjo rabo v modelu PCFLOW3D še vedno ostaja.

Vsi že razviti modeli vpliva curka ladijskega vijaka na hitrosti ob morskem dnu sledijo istim enačbam, v literaturi (Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2011; Hamill et al., 1998; Hamill in Kee, 2016; Lam et al., 2011b) pa je navedenih mnogo različnih enačb, ki opisujejo širjenje turbulentnega curka za ladijskim vijakom. Pričakujemo, da različne kombinacije teh enačb dajejo signifikantno različne rezultate glede na največjo hitrost, smer, obliko in doseg curka. Predvsem nas zanima obnašanje empiričnih enačb, ki so bile razvite na podlagi meritev s fizičnimi modeli, v simulaciji realnih manevrov ladij.

Cilj naloge je izdelati široko uporaben model vpliva curka ladijskega vijaka na hitrosti ob morskem dnu v programu Matlab. Model bo omogočal izračun hitrostnega polja z uporabo različnih enačb iz literature, bo pa tudi dovolj fleksibilen, da ga bo možno uporabiti s poljubno topografijo in batimetrijo zaliva, z različnimi tipi ter pogonskimi sistemi ladij in za poljubne manevre ladje. Rezultate modela bo možno prenesti in uporabiti v modulu za privzdigovanja sedimenta zaradi tokov, valov in ladijskega prometa modela PCFLOW3D (Ramšak, 2013). Naša želja je z novim modelom omogočiti vrednotenje vpliva manevrov ladij na morsko dno, s tako pridobljenimi podatki pa biupravljalci pristanišč boljše načrtovali plovne režime in poti. Na ta način bi lahko omejili resuspendiranje sedimenta z morskega dna in preprečili reaktivacijo toksičnih kovin, poškodbe pristaniške infrastrukture in škodljive vplive na fotosintetizirajoče in bentoške organizme.

2 CUREK ZA LADIJSKIM VIJAKOM

Z naraščajočim ladijskim prometom in vedno večjimi ter močnejšimi ladijami se povečuje tudi možnost erozijskih poškodb na dnu in brežinah pristaniškega bazena ter plovnih kanalov zaradi curka ladijskega vijaka. Pod udarom so predvsem pristanišča v plitvih zalivih, kot je Luka Koper, kjer je razdalja med gredljem in dnom majhna. Da bi omejili erozijo in poškodbe ter se izognili dragim remediacijskim ukrepom, je nujna dobra napoved hitrosti znotraj curka ladijskega vijaka.

Delno je metodologijo na tem področju v doktorski disertaciji že opisala Ramšak (2013). V tej nalogi je podana razširjena metodologija, ki se delno prekriva z delom Ramšakove, vendar so zaradi preglednosti in zveznosti razlage podane vse enačbe in izpeljave, ki so citirane po originalnih avtorjih.

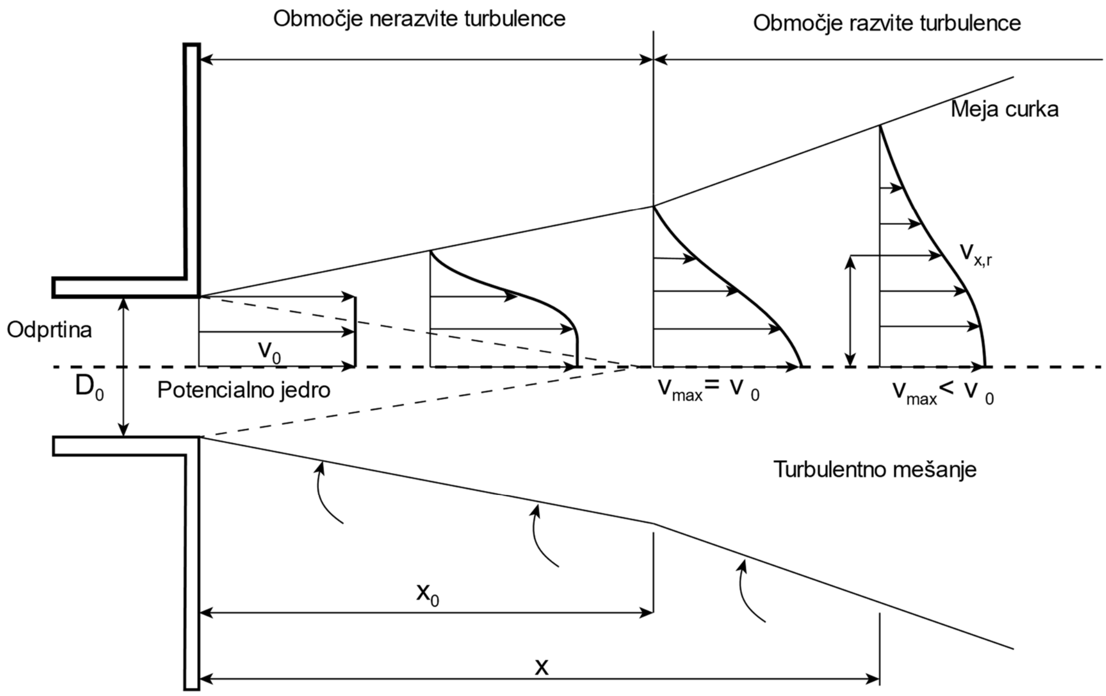
2.1 Opis curka za ladijskim vijakom

Ladijski vijak vrtilni moment pretvarja v aksialno potisno silo tako, da vsrkava vodo pred seboj, jo pospeši in v obliki curka dolvodno izpusti. Glede na okolico se voda znotraj curka giblje zelo hitro, pri čemer nastanejo velike strižne napetosti na meji med curkom in mirujočo tekočino. To povzroči turbulenco, s katero se energija jedra curka zmanjšuje in prenaša na okoliško vodo. Hitrost jedra se zmanjšuje, hitrost zunaj njega pa povečuje, zato se curek širi osno simetrično v obliki stožca.

Problem turbulentnega curka za ladijskim vijakom lahko opišemo z analogijo ravninskega vodnega curka iz okrogle potopljene odprtine, kar je dobro popisal Albertson (1950). Ta študija je osnova za večino nadaljnjega proučevanja hitrostnega polja znotraj curka ladijskega vijaka po teoriji gibalne količine oziroma momentne teorije, ki temelji na naslednjih predpostavkah:

- Hidrostatična razporeditev tlakov po celotnem toku.
- Proces difuzije je dinamično podoben pod vsemi pogoji.
- Longitudinalno komponento hitrosti znotraj difuzijskega območja lahko z Gaussovo verjetnostno porazdelitveno funkcijo opišemo v vsakem prečnem prerezu.

Turbulentni curek razdelimo na dve območji, ki sta shematsko prikazani na sliki 2.1. Hitrost v_0 na iztoku iz odprtine je približno stalna in ustvarja potencialno jedro curka. Na meji med jedrom curka in okoliško tekočino obstaja očitna nezveznost v hitrosti. Na tej meji se zaradi strižnih sil ustvarjajo turbulentni vrtinci, ki povzročajo mešanje. To območje turbulence se širi radialno navznoter in navzven z oddaljevanjem od iztočnega prereza. Širina jedra curka se počasi zmanjšuje, medtem ko se skupna širina curka povečuje z oddaljevanjem od iztočnega prereza. Pri tem se hitrost jedra curka zmanjšuje, okoliška tekočina pa se pospešuje.



Slika 2.1: Shematični prikaz razpršitve curka (povzeto po Albertson et al., 1950, str. 640)

Figure 2.1: Schematic representation of jet diffusion (after Albertson et al., 1950, str. 640)

Prvo območje, ki ga imenujemo območje nerazvite turbulence ali nerazvitega toka, sega od odprtine do mesta, kjer mešalno območje prodre do osne linije curka. Za to območje je značilno potencialno jedro curka, kjer tok ni turbulenten.

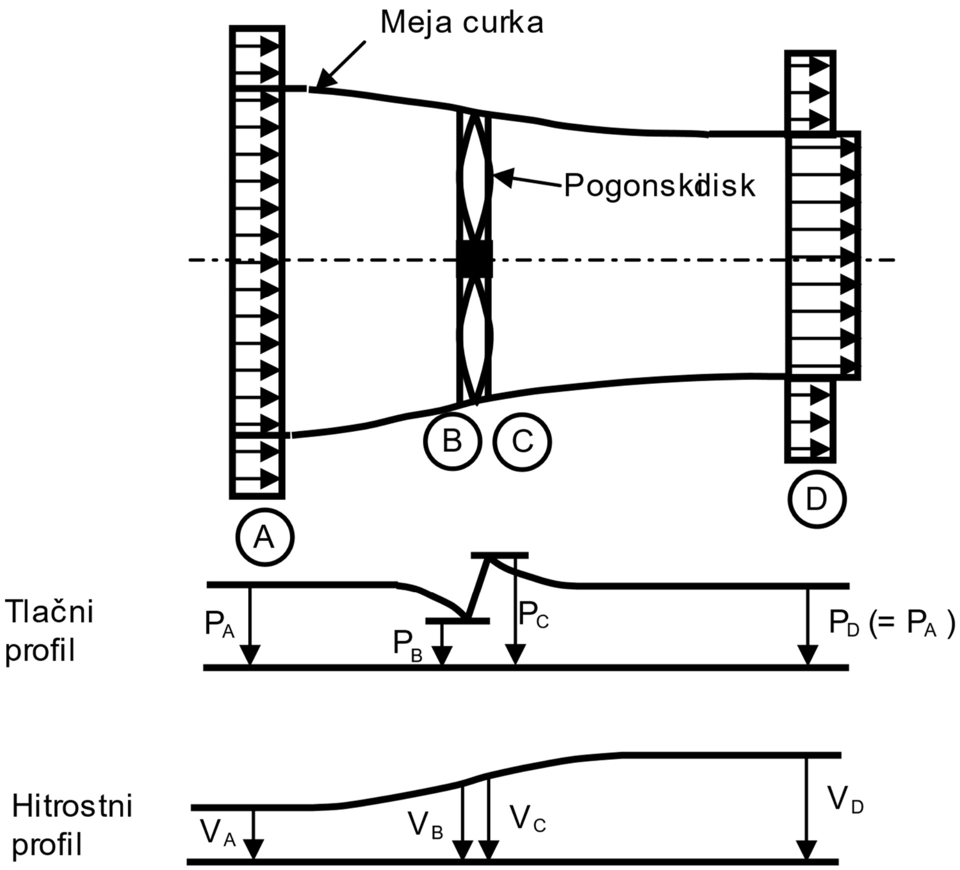
Ko ves jedrni del curka postane turbulenten, govorimo o območju razvite turbulence. Od tod dalje se curek še naprej širi, zmanjšuje pa se hitrost na osi curka ($v_{max} < v_0$). Profil hitrosti na kateremkoli prerezu je oblike Gaussove verjetnostne porazdelitvene funkcije. O curku govorimo do mesta, dovolj daleč od iztočne odprtine, kjer hitrost na osi curka postane zanemarljiva.

Tako kot meja med jedrom curka tudi meja med območjem nerazvite in razvite turbulence ni ostro določena. Med njima vedno obstaja prehodno območje, ki pa ga zaradi prikladnosti izračuna ne upoštevamo.

Hidrodinamične procese v curku ladijskega vijaka so v okviru momentne teorije obravnavali različni avtorji (Blaauw in van de Kaa, 1978; Verhey, 1983). Ta teorija ima šest osnovnih predpostavk (Hamill et al., 2004):

(a) Vijak je obravnavan kot idealen pogonski disk ekvivalentnega premera.
(b) Disk ima neskončno število lopatic, ki se vrtijo z neskončno hitrostjo.
(c) Disk je zanemarljive debeline v smeri osi.
(d) Disk je potopljen v idealno tekočino.
(e) Vsi delci tekočine, ki preidejo preko diska, doživijo enako povečanje tlaka.
(f) Disku dovedena energija se na tekočino prenese brez povzročanja rotacijskih efektov.

Prenos potisne sile vijaka na tekočino je brez izgub in enakomerno razporejen po celotni površini potisnega diska. Na sliki 2.2 je ladijski vijak shematično prikazan kot potisni disk. Ravnini A in D sta dovolj oddaljeni od vijaka, da je tok tam konstanten in v smeri osi vijaka, tlak pa je enak. Verhey (1983) predlaga, da je ta razdalja približno dvakratnik premera vijaka. V tem območju opis z momentno teorijo ni mogoč. Med preseki A in B ter C in D velja Bernullijeva enačba. Ne velja pa med presekoma C in D, kjer pogonski disk v sistem dovaja energijo.



Slika 2.2: Ladijski vijak kot idealni pogonski disk (povzeto po Hamill et al., 2004, str. 84)

Figure 2.2: Propeller as an ideal actuator disc (after Hamill et al., 2004, str. 84)

V praksi so lastnosti hitrostnega polja ladijskega vijaka dosti kompleksnejše, kot jih popisuje momentna teorija. Pri uporabi te poenostavljene teorije pride do odstopanj tudi za 20% (Hamill et al., 2004). Pomanjkljivosti so (Lam et al., 2011b):

- Momentna teorija upošteva le aksialno komponento hitrosti, medtem ko raadialno in tangencialno komponento zanemari. Sledi, da je predpostavka (f) neveljavna.
- Ladijski vijak je običajno sestavljen iz treh do šestih lopatic, ki se vrtijo s hitrostjo do nekaj sto vrtljajev na minuto. Lopatice morajo za pravilno delovanje imeti določen naklon na ravnino vijaka, zato vijak ne more biti zanemarljivo tanek. Naklon in površina lopatic se spreminjata od pesta do konice, zato razporeditev tlaka ni homogena. Sledi, da so predpostavke (b), (c) in (e) neveljavne.
- Oblika toka po rotacijski osi vijaka je drugačna od prostega potopljenega curka, in sicer zaradi prisotnosti pesta, ki preko gredi povezuje motor in vijak. Pesto ustvarja območje nižje hitrosti

ob rotacijski osi. Predpostavka, da v kateremkoli prerezu curka največja hitrost leži na rotacijski osi, ne more biti pravilna.

Opisane pomanjkljivosti so s spreminjanjem enačb poskušali odpraviti različni avtorji (Blaauw in van de Kaa, 1978; Hamill in Johnston, 1993; Lam et al., 2011b; Verhey, 1983).

2.2 Analitični opis curka

Opis turbulentnega curka z momentno teorijo, ki jo je predlagal že Froude, temelji na enačbah gibanja. Analiza toka turbulentnih curkov je dobro opisana v (Rajaratnam, 1976). Njegovo izpeljavo za okrogli tubulentni curek (*ang. circular turbulent jet*), ki je za opis curka ladijskega vijaka je najbolj merodajen, je povzeta v nadaljevanju. Za naša izvajanja vzemimo odprtino premera D_0, iz katere brizga voda z stalno hitrostjo v_0 v mirujočo tekočino. Tako kot momentna teorija zahteva, upoštevamo le aksialno komponento hitrosti, medtem ko radialno in tangencialno komponento zanemarimo. Izpeljavo pričnemo z Reynoldsovimi enačbami v cilindričnem koordinatnem sistemu (r, ϕ, z), pri čemer upoštevamo približke mejne plasti, saj curek zavzema le majhno širino v prečni smeri:

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} + \nu\left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right) \\ &- \left(\frac{\partial}{\partial r}\overline{v_r'^2} + \frac{\partial}{\partial z}\overline{v_r' v_z'} + \frac{\overline{v_r'^2}}{r} - \frac{\overline{v_\phi'^2}}{r}\right) \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} - \frac{v_r v_\phi}{r} &= \nu\left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi}{r^2} + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2}\right) \\ &- \left(\frac{\partial}{\partial r}\overline{v_r' v_\phi'} + \frac{\partial}{\partial z}\overline{v_\phi' v_z'} + 2\frac{\overline{v_r' v_\phi'}}{r}\right) \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right) \\ &- \left(\frac{\partial}{\partial r}\overline{v_r' v_z'} + \frac{\partial}{\partial z}\overline{v_z'^2} + \frac{\overline{v_r' v_z'}}{r}\right) \end{aligned} \tag{2.3}$$

in kontinuiteto enačbo:

$$\frac{\partial}{\partial r} r v_r + \frac{\partial}{\partial z} r v_z = 0 \tag{2.4}$$

kjer so:

v_r, v_z, v_ϕ	časovno povprečne hitrosti v smereh r, ϕ in z;
v_r', v_z', v_ϕ'	fluktuacije hitrosti v smereh r, ϕ in z
ρ	gostota tekočine;
p	tlak izven curka;

Za krožne curke brez vrtinčenja velja $v_\phi = 0$, torej so vsi členi, ki vsebujejo v_ϕ in njene odvode, enaki 0. Upoštevamo še, da je hitrost v aksialni smeri dosti večja od radialne hitrosti, $v_z \gg v_r$, gradient aksialne hitrosti pa je dosti manjši od gradienta radialne hitrosti. Za viskozno napetost lahko rečemo, da je dosti manjša od turbulentne strižne napetosti, kar drži za Reynoldsova števila, večja od nekaj tisoč. Turbulentna normalna napetost ima približno enako velikost v radialni in prečni smeri. S temi predpostavkami se enačbe gibanja prevedejo na:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial r}\overline{v_r'^2} \tag{2.5}$$

$$v_r\frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\partial}{\partial r}\overline{v_r'v_z'} + \frac{\overline{v_r'v_z'}}{r} + \frac{\partial}{\partial z}\overline{v_z'^2}\right) \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial r}rv_r + \frac{\partial}{\partial z}rv_z = 0 \tag{2.7}$$

Enačbo (2.5) integriramo po r, dobljen rezultat vstavimo v (2.6) ter s tem dobimo:

$$v_r\frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\overline{rv_r'v_z'}\right) \tag{2.8}$$

Sedaj zaradi prikladnosti uvedemo novo nomenklaturo. Aksialno razdaljo z poimenujmo x, komponenti hitrosti v aksialni in radialni smeri pa naj se imenujeta v_x in v_r ter $-\left(\overline{rv_r'v_z'}\right) = \tau$, turbulentna strižna napetost. Sprememba tlaka v aksialni smeri $\mathrm{d}p/\mathrm{d}x$ je v večini primerov skoraj enaka nič. Dokončno poenostavljene enačbe gibanja sedaj zapišemo:

$$v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v\frac{\partial v_x}{\partial r} = \frac{1}{\rho r}\frac{\partial r\tau}{\partial r} \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}rv_x + \frac{\partial}{\partial r}rv_r = 0 \tag{2.10}$$

Enačbama priredimo še naslednje robne pogoje (Perkovič et al., 2011):

$$v_x(x, D_0/2) = v_0 \qquad v_r(x, D_0/2) = 0 \qquad (x < x_0) \tag{2.11}$$

$$v_x(x, \infty) = 0 \qquad v_r(x, \infty) = 0 \qquad \tau(x, 0) = \tau(x, \infty) = 0 \tag{2.12}$$

Izvajanja nadaljujemo z iskanjem energijske enačbe za ta problem. Pričnemo z integracijo enačbe (2.9), ki jo predhodno pomnožimo s $\rho v_x r$, po r v mejah $[0, \infty)$:

$$\int_0^\infty \rho r v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}\,\mathrm{d}r + \int_0^\infty \rho r v_r\frac{\partial v_x}{\partial r}\mathrm{d}r = \int_0^\infty \frac{\partial(r\tau)}{\partial r}\,\mathrm{d}r \tag{2.13}$$

$$\int_0^\infty \rho r v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}\,\mathrm{d}r = \frac{1}{4\pi}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\int_0^\infty 2\pi r\,\mathrm{d}r\,\rho v_x^2$$

$$\int_0^\infty \rho r v_r\frac{\partial v_x}{\partial r}\mathrm{d}r = |\rho v_x v_r r|_0^\infty - \int_0^\infty \frac{\partial rv}{\partial r}\,\mathrm{d}r = \frac{1}{4\pi}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\int_0^\infty 2\pi r\,\mathrm{d}r\,\rho v_x^2$$

$$\int_0^\infty \frac{\partial(r\tau)}{\partial r}\,\mathrm{d}r = |r\tau|_0^\infty = 0$$

Torej se izraz (2.13) prevede na

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\int_0^\infty 2\pi r\,\mathrm{d}r\,\rho v_x^2 = 0 \tag{2.14}$$

Enačba (2.14) pravi, da je hitrost spremembe aksialnega toka gibalne količine v aksialni smeri enaka nič, oziroma da se tok gibalne količine ohranja v aksialni smeri. Z upoštevanjem robnih pogojev (2.12) se izraz še nekoliko poenostavi:

$$\int_0^\infty v_x^2 \, r \, \mathrm{d}r = const. \tag{2.15}$$

Iz te enačbe lažje vidimo, da se gibalna količina v smeri toka ohranja. Gibalna količina na izvoru je $\rho v_0^2 \frac{\pi D_0^2}{4}$ in lahko zapišemo:

$$\int_0^\infty v_x^2 \, r \, \mathrm{d}r = v_0^2 \frac{D_0^2}{4} \tag{2.16}$$

S pomočjo te enačbe lahko izračunamo v_x. Komponento hitrosti v radialni smeri lahko izračunamo s pomočjo enačbe za pretok v smeri x, ki jo zapišemo:

$$Q(x) = 2\pi \int_0^\infty v_x r \, \mathrm{d}r \tag{2.17}$$

Aksialna komponenta hitrosti curka se z oddaljenostjo od izvora zmanjšuje, zato se v tej smeri zmanjšuje tudi pretok. To pomeni, da mora v območje turbulentnega toka tekočina dotekati iz okolice. Za kontrolni volumen dolžine L in polmera r torej velja kontinuitetna enačba:

$$Q(x+L) - Q(x) = -2\pi r \int_x^{x+L} v_r \mathrm{d}r \tag{2.18}$$

V limiti, ko gre L proti 0, dobimo hitrost v radialni smeri:

$$v_r = -\frac{1}{2\pi r}\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x} \tag{2.19}$$

2.3 Semiempirične enačbe

2.3.1 Aksialna iztočna hitrost

Analizo turbulentnega curka z momentno teorijo, ki jo je opravil Albertson (1950), sta Blaauw in van de Kaa (1978) uporabila na problemu curka ladijskega vijaka. Vijak sta shematizirala kot pogonski disk (Slika 2.2).

Sprememba gibalne količine zaradi energije, ki jo v sistem vnaša pogonski disk, je enaka potisni sili na tekočino. To potisno silo lahko povežemo z Bernoullijevo enačbo, da izračunamo iztočno hitrost (Stewart, 1992, cit. po Lam et al., 2011):

$$T = \frac{1}{2}\rho A(v_D^2 - v_A^2) \tag{2.20}$$

Dimenzijska analiza potisne sile vijaka pa nam da (Stewart, 1992, cit. po Lam et al., 2011):

$$T = K_t \rho n^2 D_p^4 \tag{2.21}$$

kjer je:

T	potisna sila ladijskega vijaka [N];	K_t	koeficient potiska vijaka [m];
ρ	gostota tekočine [$\mathrm{kg/m^3}$];	n	število vrtljajev vijaka [$1/\mathrm{s}$];
A	površina pogonskega diska [$\mathrm{m^2}$];	D_p	premer vijaka [m].
v_A in v_D	hitrosti na prerezih A in D [$\mathrm{m/s^2}$];		

Koeficient potiska vijaka je brezdimenzijski koeficient, ki ga določimo z merjenjem učinkovitosti delovanja vijaka. Izračunamo ga kot:

$$K_t = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4} \tag{2.22}$$

Za mirujoče in zelo počasi gibajoče (manevrirajoče) se ladje velja, da je dotočna hitrost na prerezu A skoraj enaka nič, $v_A \sim 0$. Ob tej predpostavki izenačimo enačbi (2.20) in (2.21), vstavimo površino diska $A = \pi D^2/4$ in dobimo:

$$\frac{\pi D_p^2}{8} v_D^2 = Ktn^2 D_p^4 \tag{2.23}$$

Iz gornje enačbe izrazimo v_D, ki je jo sedaj označimo z v_0 ter jo imenujemo iztočna hitrost:

$$v_0 = 1.59 n D_p \sqrt{K_t} \tag{2.24}$$

Iztočna hitrost je največja hitrost, ki jo opazimo v ravnini vijaka.

Blaauw,van de Kaa (1978) in Verhey (1983) so predlagali, da se namesto premera vijaka D_p za izračune uporabi premer zoženega curka za vijakom D_0. Za zaščitene vijake (vijake v cevi, *ang. duct propeller*) je D_0 kar enak D_p, za nezaščitene vijake pa je $D_0 = D_p/\sqrt{2}$.

Lam (2011b) navaja, da se Fuehrer inRömisch (1977), Bergh in Cederwall (1981) ter Hamill (1987) s tem ne strinjajo, saj naj bi bilo zoženje zanemarljivo majhno. Lam navaja še, da je Stewart (1987) na podlagi meritev prišel do zaključka, da ima hitrostni profil blizu vijaka majhno ali sploh nično zoženje.

Enačba (2.24) je pogosto uporabljena v raziskavah curka ladijskega vijaka in jo tudi priporočajo različne komisije (Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ (Germany), 2015; Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2011), vendar je več raziskovalcev z eksperimenti pokazalo, da ni točna. Fuehrer et al. (1987, cit. po Lam et al., 2011) je odkrila, da odstopanje enačbe znaša tudi do $\pm$ 20%. Hamill (1987, cit. po Lam et al., 2011) je na podlagi meritev predlagal enačbo z nižjim koeficientom:

$$v_0 = 1.33 n D_p \sqrt{K_t} \tag{2.25}$$

Stewart (1992, cit. po Lam et al., 2011) je izvedel podobne eksperimente in predlagal enačbo, ki upošteva geometrijske lastnosti vijaka. Predlagana enačba se glasi:

$$v_0 = \zeta n D_p \sqrt{K_t} \tag{2.26}$$

kjer je iztočni koeficient ζ enak:

$$\zeta = D_p^{-0.0686} \left({}^{P}/_{D} \right)^{1.519} BAR^{-0.323} \tag{2.27}$$

kjer je:

${}^{P}/_{D}$ koračno razmerje vijaka – kvocient koraka in premera vijaka (*ang. design pitch ratio)*;

BAR razmerje površine lopatic – razmerje projicirane površine vseh lopatic in površine pogonskega diska (*ang. blade area ratio).*

V izrazu za brezdimenzijski koeficient ζ nastopa dimenzijski element D_p. Da bi odpravil to nedoslednost, je Hashmi (1993, cit. po Lam et al., 2011) premer vijaka D_p delil s premerom pesta vijaka D_h.

$$v_0 = E_0 n D_p \sqrt{K_t} \tag{2.28}$$

kje je iztočni koeficient E_0 enak:

$$E_0 = \left(\frac{D_p}{D_h}\right)^{-0.403} K_t^{-1.79} BAR^{0.744} \tag{2.29}$$

Obsežnejše raziskave (Hamill et al., 2015) so pokazale, da enačba (2.24), ki sta jo z momentno analizo izpeljala Blaauw in van de Kaa, eksperimentalne meritve napove z napako znotraj 10%. Enačba (2.25), ki jo je predlagal Hamill (1987), izmerjene hitrosti podceni za do 20%, Enačbi (2.26) in (2.28), ki sta ju predlagala Stewart in Hashmi, pa izmerjene hitrosti podcenita tudi do 40%. Pri tem je potrebno poudariti, da sta bili zadnji enačbi razviti na podlagi meritev na drugem merilnem območju. Ekstrapolacija enačb na drugo merilno območje razumljivo prinese večja odstopanja.

Predlagana je bila nova enačba za napoved aksialne iztočne hitrosti (Hamill et al., 2015):

$$v_0 = 1.22 n^{1.01} D_p^{0.84} K_t^{0.62} \tag{2.30}$$

V primeru, da namesto hitrosti vrtenja vijaka poznamo aplicirano moč vijaka, lahko uporabimo enačbo, ki sta jo predlagala Blaauw in van de Kaa (Blaauw in van de Kaa, 1978):

$$v_0 = C_p \left(\frac{f_p P_D}{10^3 D_p^2}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.31}$$

Enačba je osnovana na podlagi inštalirane moči ladje P_D [W], v njej pa nastopata še delež uporabljene moči f_p in koeficient C_p, ki je za nezaščitene vijake enak 1.48, za zaščitene pa 1.17.

2.3.2 Pozicija iztočne hitrosti

Meritve so pokazale, da pozicija največje hitrosti na iztočni ravnini ni na rotacijski osi, kot je to pri prostem potopljenem curku (Albertson et al., 1950). Zaradi pesta vijaka, ki ustvari jedro nižje hitrosti ob rotacijski osi, se največja hitrost curka na iztočni ravnini pojavi na radialni razdalji R_{m0}. Berger et al. (1981, cit. po (Lam et al., 2010) so predlagali naslednjo enačbo:

$$R_{m0} = 0.67(R_p - R_h) \tag{2.32}$$

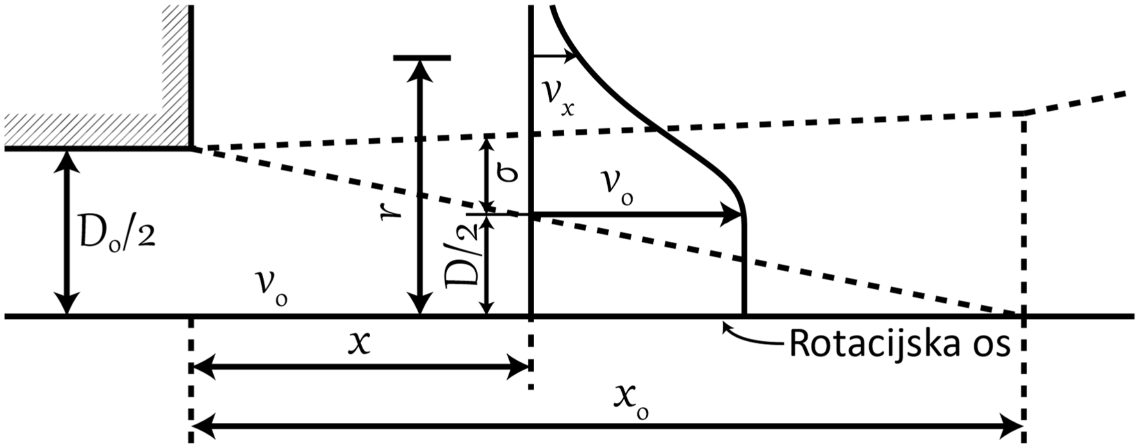
V enačbi nastopata radij ladijskega vijaka R_p in pesta vijaka R_h. Enačba (2.32) je uveljavljena ter pogosto uporabljena. Z nadaljnjim proučevanjem sta Oebius and Schuster (1975, cit. po Lam et al., 2011) razvila enačbo za napoved pozicije največje hitrosti po celem območju nerazvite turbulence:

$$R_m = 0.3 R_{m0} \left(\frac{x}{R_{m0}}\right)^{-0.3} \tag{2.33}$$

kjer je R_m radialna razdalja pozicije največje hitrosti na prerezu znotraj območja nerazvite turbulence, ki je od iztočne ravnine oddaljen za razdaljo x.

2.3.3 Območje nerazvite turbulence

Na iztočni ravnini in skozi območje nerazvite turbulence (slika 2.1) porazdelitev aksialne komponente hitrosti narašča od jedra z nizko hitrostjo ob rotacijski osi, vzdolž lopatic do najvišje hitrosti in nato hitro pada do konic lopatic. Jedro z nizko hitrostjo, ki ga najdemo ob rotacijski osi znotraj območja nerazvite turbulence, lahko povzroči pesto vijaka (Hamill, 1987, cit. po Lam et al., 2011, str. 7).



Slika 2.3: Definicijska slika območja nerazvite turbulence (povzeto po Albertson et al., 1950, str. 644)

Figure 2.3: Definition sketch for zone of flow establishment (after Albertson et al., 1950, str. 644)

Porazdelitev hitrosti ($v_{x,r}$) opišemo kot funkcijo oddaljenosti od iztočne ravnine x in radialne oddaljenosti od rotacijske osi vijaka r. Albertson et al. (1950) so ugotovili, da lahko porazdelitev hitrosti dobro opišemo z Gaussovo verjetnostno porazdelitveno funkcijo. Na podlagi te ugotovitve so predlagali naslednjo enačbo:

$$\frac{v_{x,r}}{v_0} = \exp\left(- \frac{\left(r + Cx - \frac{D_0}{2}\right)^2}{2(Cx)^2} \right) \tag{2.34}$$

D_0 je premer zoženega curka, C pa je empirična konstanta. Slednja je definirana kot (Albertson et al., 1950):

$$\frac{x_0}{D_0} = \frac{1}{2C} \tag{2.35}$$

kjer je x_0 aksialna razdalja do konca območja nerazvite turbulence. Empirično konstanto C oziroma razmerje x_0/D_0, ki ga določa, je predlagalo več različnih avtorjev:

- Albertson et al. (1950): $\frac{x_0}{D_0} = 6.2$; $C = 0.081$;
- Fuehrer et al. (1987, cit. po Lam et al., 2011, str. 6): $\frac{x_0}{D_0} = 2.6$; $C = 0.192$;
- Blaauw in van de Kaa (1978): $\frac{x_0}{D_p} = 2.8$; $C = 0.19$ (prosti vijaki); $C = 0.17$ (zaščiteni vijaki)
- Verhey (1983): $\frac{x_0}{D_p} = 2.77$;
- Hamill (1987, cit. po Lam et al., 2011, str. 6): $\frac{x_0}{D_p} = 2$;
- Stewart (1992, cit. po Lam et al., 2011, str. 6): $\frac{x_0}{D_p} = 3.25$;

Enačba (2.34) predpostavlja, da ima jedro curka na območju nerazvite turbulence konstantno največjo hitrost , $\frac{v_{max}}{v_0} = 1$. Hamill (1987, cit. po Lam et al., 2011, str. 7) je iz svojih raziskav ugotovil, da to velja le do približno $x/D_0 = 0.35$ od ravnine vijaka. Od tam dalje se maksimalna hitrost zmanjšuje v aksialni smeri od vijaka in jo lahko izračunamo kot:

$$\frac{v_{max}}{v_0} = 0.87\left(\frac{x}{D_p}\right)^{-\left(\frac{BAR}{4}\right)} \tag{2.36}$$

Stewart (1992, cit. po Hamill in Kee, 2016) je za razdalje $x/D_p < 3.25$ predlagal uporabo linearne enačbe:

$$\frac{v_{max}}{v_0} = 1.0172 - 0.1835\left(\frac{x}{D_p}\right) \tag{2.37}$$

Na podlagi svojih meritev sta Hamill in Kee (2016) predlagala izboljšavo Stewartove enačbe, v kateri nastopa še koračno razmerje $P/_D$:

$$\frac{v_{max}}{v_0} = 1.51 - 0.175\left(\frac{x}{D_p}\right) - 0.46\,P/_D \tag{2.38}$$

Enačba (2.58) velja za razdalje $0.35 < x/D_p < 3.25$ od iztočne ravnine. Hitrostno polje curka lahko izračunamo po enačbi (Hamill et al., 1995, cit. po Kee et al., 2006, str. 2):

$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r - R_{m0}}{\sigma}\right)^2\right] \tag{2.39}$$

kjer je R_{m0} radialna razdalja maksimuma hitrosti od rotacijske osi, σ pa standardni odklon Gaussove verjetnostne porazdelitvene funkcije, ki ga izračunamo za dve različni območji:

$$\sigma = \begin{cases} 0.5 * R_{m0}, & x < 0.5\,D \\ \frac{1}{2}R_{m0} + 0.075\left(x - \frac{D}{2}\right), & 0.5\,D \leq x < x_0 \end{cases} \tag{2.40}$$

Enačbo na podlagi karakteristik ladijskega vijaka sta s pomočjo večkratne regresije izpeljala Hamill in McGarvey (1996):

$$\begin{aligned}\frac{v_{x,r}}{nZR} = 1.261 - 0.974\left(\frac{P}{R}\right) + 0.733\left(\frac{d}{R}\right) + 18.53\left(\frac{t}{r}\right) + 5.028\left(\frac{h_d}{R}\right) + 0.106\left(\frac{P}{R}\right)^2 \\ - 7.277\left(\frac{h_d}{R}\right)^2 - 4.093\left(\frac{h_t}{d}\right)^2\end{aligned} \tag{2.41}$$

kjer je:

n	število obratov vijaka na sekundo;	h_d	spiralna razdalja od vodilnega roba do linije, ki povezuje pesto in vrh lopatice;
Z	število lopatic vijaka;		
R	polmer vijaka;	h_t	spiralna razdalja od vodilnega roba vijaka do mesta z največjo debelino;
P	naklon lopatic;		
d	širina lopatic;		

Vendar je to enačbo mogoče uporabiti le na iztočni ravnini, ne sme pa se je uporabljati za oceno aksialne komponente hitrosti dolvodno znotraj območja nerazvite turbulence.

2.3.4 Območje razvite turbulence

Območje, kjer ima porazdelitev hitrosti obliko Gaussove verjetnostne porazdelitvene funkcije z enim vrhom na rotacijski osi in kjer neturbulentno jedro curka povsem izgine, imenujemo območje razvite turbulence ali območje razvitega toka. Curek se širi v obliki stožca z naklonom 13° glede na rotacijsko os (Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2011).

S prenašanjem energije na okoliško tekočino se curek vedno bolj širi, največja hitrost pa se zmanjšuje z oddaljenostjo od iztočne ravnine. Enačb, ki popisujejo zmanjševanje maksimalne hitrosti (v_{max}) nasproti iztočni hitrosti (v_0), je veliko in so zbrane v preglednici 1.

Preglednica 1: Primerjava enačb za napoved največje hitrosti na prerezu za območje razvite turbulence (povzeto po Lam et al., 2011a, str. 11)

Table 1: Comparison of the equations for predicting maximum velocity at the cross-section in the zone of established flow (after Lam et al., 2011a, str. 11)

Avtor	Enačbe	Območje	
Albertson et al. (1950)	$\frac{v_{max}}{v_0} = \frac{1}{2C}\left(\frac{x}{D_0}\right)^{-1}$ $C = \sigma/x_0$	$\frac{x}{D_0} > 6.2$	(2.42)
Fuehrer & Römisch (1977)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 2.6\left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1}$	$\frac{x}{D_p} \geq 2.6$	(2.43)
Blaauw & van de Kaa (1978)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 2.8\left(\frac{x}{D_p}\right)^{-1}$	$\frac{x}{D_p} \geq 2.8$	(2.44)
Berger et al. (1981)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 1.025\left(\frac{x}{D_p}\right)^{-0.6}$	$\frac{x}{D_p} \geq 1.0$	(2.45)
Verhey (1983)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 1.275\left(\frac{x}{D_p}\right)^{-0.7}$	$\frac{x}{D_p} \geq 1.5$	(2.46)
Hamill (1987)	$\frac{v_{max}}{v_0} = A'\left(\frac{x}{D_p}\right)^{-B\prime}$ $A' = -11.4K_t + 6.65BAR + 2.16\,P/D$ $B' = -(1.0 * K_t)^{-0.216}BAR^{1.024}\,(P/D)^{-1}$ kjer $K_t = 0.4, BAR = 0.47, P/D = 1$	$\frac{x}{D_p} \geq 2$	(2.47)
Stewart (1992)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 0.543 - 0.0281\left(\frac{x}{D_p}\right)$	$\frac{x}{D_p} \geq 3.25$	(2.48)
Hashmi (1993)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 0.638\exp\left(-\frac{0.097x}{D_p}\right)$	$\frac{x}{D_p} \geq 3.25$	(2.49)
Hamill et al. (2015)	$\frac{v_{max}}{v_0} = 0.964 - 0.039\left(\frac{x}{D_p}\right) - 0.344\,P/D$	$\frac{x}{D_p} \geq 3.25$	(2.50)

Za uporabo enačb iz preglednice 1 v praktične namene je dobro poznati tudi zgornjo mejo območja, za katere veljajo. Žal avtorji ne navajajo te vrednosti, iz grafičnih prikazov rezultatov meritev pa je možno razbrati, da je Verhey (1983) meril vsaj do $x/D_p = 28.19$, Blaauw & van de Kaa (1978) vsaj do $x/D_p = 10$ in Hamill et al. (2015) do $x/D_p \approx 4.-10.5$. Hamill et al. (2015, str. 109) navaja, da je Hashmi (1993) ugotovil, da je največja hitrost merljiva do $x/D_p = 16$ od vijaka. Pri ekstrapolaciji enačb izven teh okvirjev je potrebna posebna previdnost, saj lahko privedejo do signifikantno drugačnih rezultatov.

Za izračun porazdelitve aksialnih hitrosti v območju razvite turbulence je dobro uveljavljena oblika enačbe, ki so jo predlagali že Albertson et al. (1950) in Blaauw & van de Kaa (1978):

$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp\left(-\frac{1}{2C^2}\frac{r^2}{x^2}\right) \tag{2.51}$$

Če vstavimo $C = 18$, enačbo še nekoliko poenostavimo (Hamill et al., 2015):

$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp\left(-15.4\frac{r^2}{x^2}\right) \tag{2.52}$$

Fuehrer & Römisch (1977, cit. po Hamill et al., 2015, str. 110) sta le nekoliko spremenila koeficient:

$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp\left(-22.2\frac{r^2}{x^2}\right) \tag{2.53}$$

Ugotovljeno je bilo, da enačba (2.53) ustrezno napoveduje porazdelitev aksialne hitrosti v območju razvite turbulence, konsistentno z vsemi vijaki, ki so jih uporabili Hamill et al. (2015). Rezultati njihovih meritev se skladajo z delom Hamill (1987, cit. po Hamill et al., 2015, str. 110) in Stewart (1992, cit. po Hamill et al., 2015, str. 110).

2.4 Hitrosti ob dnu

Maksimalne hitrosti, ki lahko nastanejo ob dnu, je mogoče izračunati s poenostavljenimi enačbami. Berger (1981, cit. po Stoshek et al., 2014, str. 6) je predlagal naslednjo enačbo, ki je veljavna za majhne globine in razdalje med osjo vijaka in dnom, h_p, podobne premeru vijaka D_p:

$$v_b = 1.2 v_0 \left(\frac{x}{D_p}\right)^{-0.45} \tag{2.54}$$

Za ladje s krmilom pa lahko uporabimo naslednjo enačbo (Fuehrer and Römisch, 1977, cit. po Stoshek et al., 2014, str. 6)

$$v_{b,max} = v_0 \, E \left(\frac{h_p}{D_p}\right)^{-1} \tag{2.55}$$

Brezdimenzijski koeficient E ima lahko tri različne vrednosti:

- $E = 0.42$ za vijak brez krmila;
- $E = 0.71$ za vijak s krmilom v centralni poziciji ($\theta = 0°$);
- $E = 0.25$ za zaščiten vijak

Podobna enačba je podana tudi v študiji (Moffatt & Nichol, 2005):

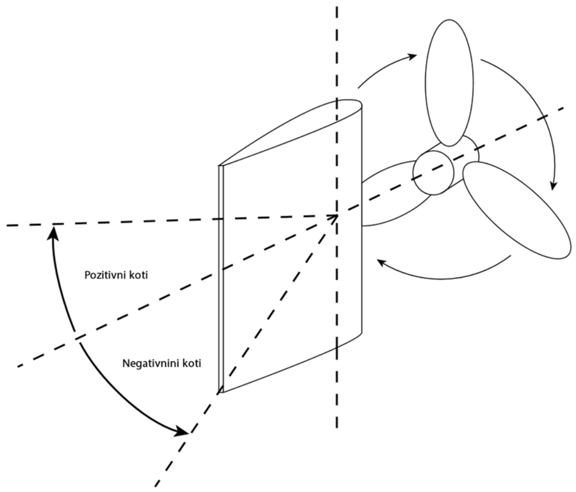
$$v_{b,max} = v_0 \frac{\alpha}{h/D_0} \tag{2.56}$$

kjer je α empirična konstanta z vrednostjo 0.22 za nezaščitene in 0.3 za zaščitene vijake. (Perkovič et al., 2011) navaja, da se največja hitrost ob dnu pojavi na aksialni razdalji $x_{max} = h_p/C$ od vijaka, kjer je h_p razdalja med osjo vijaka in dnom, C pa empirična konstanta, podana v poglavju 2.3.3.

2.5 Vpliv krmila na curek

Krmilo za ladijskim vijakom v curek vnese dodatno motnjo. Raziskave Hamilla & McGarveyja (1996) so pokazale, da je porazdelitev hitrosti na iztočni ravnini vijaka podobna porazdelitvi brez prisotnosti krmila. Tik za vijakom se hitrosti močno zmanjšajo zaradi oblivanja krmila. Hitrosti se zopet povečajo vzdolž krmila. Mogoče je opaziti tudi horizontalno poravnavo vektorjev hitrosti, kar kaže na to, da je velikost radialne komponente hitrosti zanemarljiva. Opazila sta tudi, da se curek razcepi na dva žarka. En žarek curka opazimo nad rotacijsko osjo in je usmerjen proti gladini, drugi žarek pa je pod rotacijsko osjo in je usmerjen proti dnu. Vsak od žarkov se pojavi na svoji strani krmila. Ločena žarka curka predstavljata tudi dva vrha v porazdelitvi hitrosti. Ta dva vrha se z oddaljevanjem od vijaka ne združita, kot se to zgodi v območju razvite turbulence v odsotnosti krmila. Zaradi tega lahko zaključimo, da je curek polno razvit že od zadnjega roba krmila. Iz teh izsledkov vidimo, da opis hitrostnega polja curka ladijskega vijaka s krmilom ni mogoč z enačbami, navedenimi do sedaj .

Zasuk krmila merimo v stopinjah. Največji zasuk krmila, pri katerem je to še efektivno za obračanje, je 35°. Za vijake, ki se gledajoč v krmo (proti licu vijaka) vrtijo v smeri urinega kazalca, so koti zasuka krmila pozitivni v smeri levega boka (*ang. port*) in negativni v smeri desnega boka (*ang. starboard*) – slika 2.4 (Ryan in Hamill, 2013).



Slika 2.4: Dogovor o predznaku kota zasuka krmila (povzeto po: Ryan in Hamill, 2013, str. 249)

Figure 2.4: Rudder angle sign convention (after: Ryan in Hamill, 2013, str. 249)

Verhey (1983) je pri svojih raziskavah obravnaval tudi primere z enojnim in dvojnim krmilom. Prišel je do zaključka, da je maksimalna hitrost curka odvisna od kota krmila. Predlagal je modificirano enačbo (2.46), ki je odvisna od zasuka krmila θ v stopinjah:

$$\begin{aligned} \frac{v_{max}}{v_0} &= \alpha\left(\frac{x}{2.8D_0}\right)^{-b} \\ \frac{1}{\alpha} &= 1.0 + 5.2 * 10^{-6}\,\theta^{3.25} \end{aligned} \tag{2.57}$$

Eksponent b je 0.8 za enojno in 0.9 za dvojno krmilo. Odboj curka na krmilu upoštevamo kot odklon rotacijske osi za 0.67 θ v horizontalni ravnini.

Podrobnejše raziskave vpliva krmila na curek ladijskega vijaka sta opravila Hamill in McGarvey. Raziskala sta premik curka tako v navpični ravnini (Hamill in McGarvey, 1996), kot tudi v horizontalni ravnini (Hamill et al., 1998). Članka obravnavata del curka, obrnjenega proti dnu, pri zasuku krmila $\pm$ 35°. Pozicija največje hitrosti v vertikalni ravnini y in horizontalni ravnini z je odvisna od zasuka krmila (sliki 2.5 in 2.6).

Tok je popolnoma turbulentno razvit od roba krmila, do koder je največja hitrost enaka iztočni hitrosti. Od tam se maksimalna hitrost zmanjšuje. Zasuk krmila ne spremeni hitrosti zmanjševanja, vpliva pa na začetno zmanjšanje magnitude.

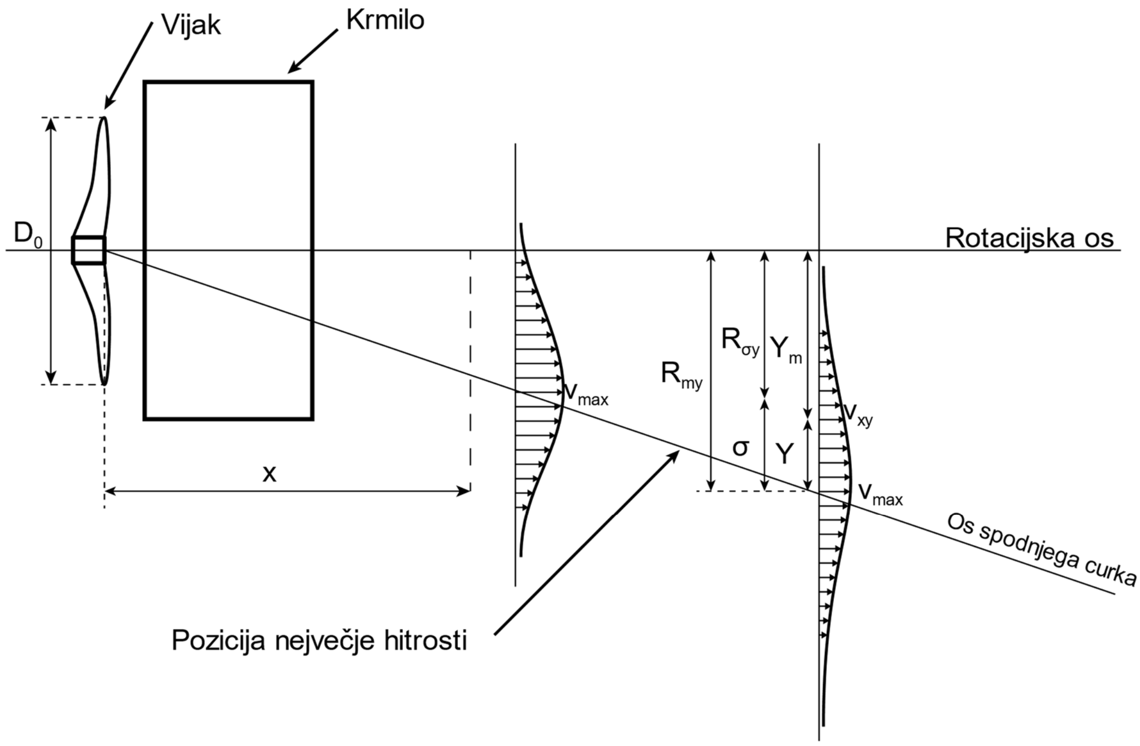
$$\frac{v_{max}}{v_0} = A + 0.293 \ln\left(\frac{x}{D_p}\right) \tag{2.58}$$

Zasuk krmila $-10 < \theta < +35$ stopinj

$$A = 0.915 - 0.004\theta \tag{2.59}$$

Zasuk krmila $-35 < \theta < -10$ stopinj

$$A = 1 - 0.007\theta \tag{2.60}$$



Slika 2.5: Shematični prikaz porazdelitve hitrosti po vertikalni ravnini y (povzeto po Hamill et al., 1998, str. 3631)

Figure 2.5: Velocity distribution schematic for vertical y-plane (after Hamill et al., 1998, str. 3631)

Oddaljenost lokacije največje hitrost od rotacijske osi vijaka se v aksialni smeri povečuje linearno. Naklon linearne funkcije je odvisen od zasuka krmila.

Zasuk krmila $-10 < \theta < +35$ stopinj

$$\frac{R_{my}}{R_{m0}} = (-0.659 + 0.002\theta)\left(\frac{X}{D_p}\right) \tag{2.61}$$

Zasuk krmila $-35 < \theta < -10$ stopinj

$$\frac{R_{my}}{R_{m0}} = (-0.772 - 0.012\theta)\left(\frac{X}{D_p}\right) \tag{2.62}$$

kjer je R_{my} pozicija največje hitrosti v vertikalni ravnini za neko razdaljo x od vijaka, R_{m0} pozicija največje hitrosti na iztočni ravnini in θ kot zasuka krmila.

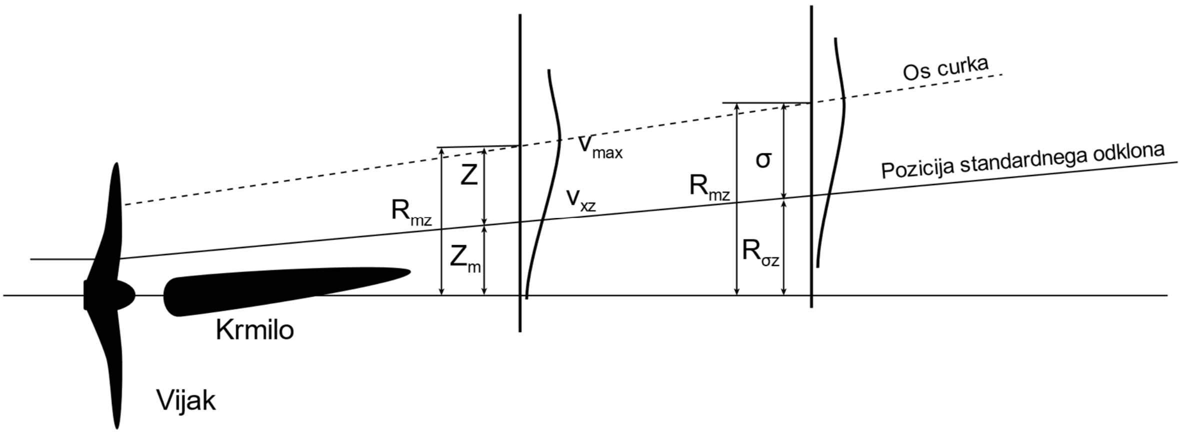
Porazdelitev hitrosti zapišemo v obliki Gaussove verjetnostne porazdelitvene funkcije, kot je predlagal Albertson (1950). Vrh te funkcije je sedaj premaknjen za R_{my} navzdol. Razdalja od vrha do izbrane točke y je enaka $R_{my} - y_m$, kjer je y_m vertikalna razdalja od rotacijske osi do izbrane točke. Standardni odklon σ je enak $R_{\sigma y} - R_{my}$, kjer je $R_{\sigma y}$ lokacija enega standardnega odklona hitrosti glede na rotacijsko os in jo zapišemo kot:

$$R_{\sigma y} = -0.8 R_{m0} + (-0.322 + 0.0012\theta)X^2 \tag{2.63}$$

Sedaj lahko končno zapišemo enačbo porazdelitve:

$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp\left(-0.5\left(\frac{R_{my} - y_m}{R_{\sigma y} - R_{my}}\right)^2\right) \tag{2.64}$$

Ta enačba dokaj točno napoveduje porazdelitev hitrosti znotraj curka ladijskega vijaka za dan zasuk krmila na razdalji do 10 D_p od vijaka (Hamill et al., 1998).



Slika 2.6: Shematični prikaz porazdelitve hitrosti po horizontalni ravnini z (povzeto po Hamill et al., 1998, str. 3632)

Figure 2.6: Velocity distribution schematic for horizontal z-plane (after Hamill et al., 1998, str. 3632)

Podobno kot za vertikalno ravnino ravnamo tudi pri obravnavi odklona curka v horizontalni ravnini. Tudi tokrat sledimo izvajanjem Hamilla et al. (1998). Pričnemo z definicijo oddaljenosti najvišje hitrosti od rotacijske osi v horizontalni smeri (R_{mz}):

$$\frac{R_{mz}}{R_{m0}} = 1 + m_z\left(\frac{x}{D_p}\right) \tag{2.65}$$

kjer je m_z linearna funkcija naklona $\frac{R_{mz}}{R_{m0}}\left(\frac{x}{D_p}\right)$ v odvisnosti od kota zasuka krmila v radianih Θ:[3]

$$m_z = -0.27 - 0.04\Theta \tag{2.66}$$

Ta enačba velja le za zasuke krmila od -35 do +15 stopinj, saj med zasukom +15 in +20 pride do obrata funkcije, ki še ni pojasnjen. Za popis od zasuka +15 stopinj so potrebne dodatne raziskave (Hamill et al., 1998).

Lokacija enega standardnega odklona hitrosti horizontalno glede na rotacijsko os $R_{\sigma z}$ izračunamo kot:

$$R_{\sigma z} = 0.2\, R_{m0} + (-0.141 - 0.014\theta)x \tag{2.67}$$

Porazdelitev hitrosti v ravnini *z* lahko tudi zapišemo v obliki Gaussove porazdelitvene funkcije. Razdalja od vrha funkcije do izbrane točke z je enaka $R_{mz} - z_m$, kjer je z_m horizontalna razdalja od rotacijske osi do obravnavane točke in R_{mz} horizontalna razdalja od rotacijske osi do pozicije največje hitrosti. Za

---

[2] Ugotovljeno je bilo, da predznak naklona linearne funkcije napačen. Glej stran 41.
[3] Ugotovljeno je bilo, da je kot zasuka krmila potrebno podati v stopinjah. Glej stran 41.

lažjo predstavo je to prikazano na sliki 2.6 Standardni odklon hitrosti, σ, je enak $R_{\sigma z} - R_{mz}$, zato lahko porazdelitev hitrosti zapišemo kot:

$$\frac{v_{x,z}}{v_{max}} = \exp\left[-0.5\left(\frac{R_{mz} - z_m}{R_{\sigma z} - R_{mz}}\right)^2\right] \tag{2.68}$$

Ker sta porazdelitvi po oseh y in z neodvisni, lahko zapišemo skupno porazdelitev hitrosti v 3D-prostoru kot produkt porazdelitvenih funkcij in dobimo:

$$\frac{v_{x,y,z}}{v_{max}} = \exp\left\{-0.5\left[\left(\frac{R_{my} - y_m}{R_{\sigma y} - R_{my}}\right)^2 + \left(\frac{R_{mz} - z_m}{R_{\sigma z} - R_{mz}}\right)^2\right]\right\} \tag{2.69}$$

S to enačbo lahko popišemo hitrostno polje ladijskega vijaka s krmilom, ki je zasukano za -35 do $+15$ stopinj.

2.6 Vpliv gibanja ladje na curek

Za ploveče ladje, torej tiste, ki ne mirujejo ali izvajajo zelo počasnih manevrov, predpostavka $v_a \approx 0$ za enačbo (2.20) ne velja več. Za ta primer je Verhey (1983) predlagal naslednji set enačb:

$$v_a = (v_s + v_r)(1 - w) \tag{2.70}$$

kjer je v_a dotočna hitrost na vijaku, v_s hitrost ladje glede na okoliško vodo in v_r hitrost povratnega toka, ki ga lahko izračunamo po Schijfovi metodi (Verhey, 1983). Delež vodne brazde (*ang. wake fraction)* w določimo na podlagi testov pogonskega sistem ali empiričnih relacij. Tipične vrednosti za motorna plovila na celinskih vodah so 0.40-0.60, za vlačilce pa 0.30-0.45 (Verhey, 1983). Iztočno hitrost sedaj zapišemo kot:

$$v_0 = \left(v_a^2 + K_t\frac{8n^2D_p^2}{\pi}\right)^{0.5} \tag{2.71}$$

zoženje curka pa kot:

$$D_0 = \sqrt{D_p^2\frac{K_t\frac{4n^2D_p^2}{\pi}}{v_0(v_0 - v_a)}} \tag{2.72}$$

Za območje razvite turbulence lahko sedaj zapišemo porazdelitev hitrosti:

$$\frac{v_{x,r}}{v_{max}} = \exp\left[-\frac{1}{2\left(c\frac{v_0 - v_s}{v} - v_0\right)^2}\frac{\left(\frac{r}{D_0}\right)^2}{\left(\frac{x}{D_0}\right)^2}\right] \tag{2.73}$$

kjer je

$$\frac{v_{max}}{v_0 - v_a} = \left(\frac{2cx}{D_0}\right)^{-b}$$
$$c = 0.18$$
$$b = 1.0 + J$$
$$J = \frac{v_a}{nD_p} \tag{2.74}$$

Koeficient J imenujemo faktor napredovanja *(ang. advance factor)* in ga srečamo tudi pri drugih avtorjih. (Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2011) podaja nekoliko poenostavljene enačbe. Najenostavnejša enačba za proste vijake je

$$v_{0J} \approx v_0 - \frac{v_a}{3} \tag{2.75}$$

za zaščitene vijake pa

$$v_{0J} \approx v_0 + \frac{v_a^2}{3v_0} \tag{2.76}$$

Ti dve enačbi lahko uporabimo, ko nimamo informacije o hitrosti vrtenja in naklonu lopatic vijaka, iztočna hitrost pa je izračunana po enačbi (2.31). S podrobnejšimi podatki lahko dobimo boljšo oceno iztočne hitrosti. Za proste vijake uporabimo enačbo

$$\begin{gathered} v_{0J} = \frac{\sqrt{J^2 + 2.55K_{tJ}}}{\sqrt{1.40\,{}^{P}/_{D}}}\, v_0 \\ K_{tJ} = 0.55\,{}^{P}/_{D} - 0.46J \end{gathered} \tag{2.77}$$

za zaščitene vijake pa

$$\begin{gathered} v_{0j} = \frac{J + \sqrt{J^2 + 5.10\,K_{tJ}}}{\sqrt{3.41\,{}^{P}/_{D}}}\, v_0 \\ K_{tJ} = 0.67\,{}^{P}/_{D} - 0.77J \end{gathered} \tag{2.78}$$

2.7 Radialna in tangencialna komponenta hitrosti

Poleg aksialne komponente hitrosti sta v turbulentnem curku ladijskega vijaka prisotni tudi tangencialna in radialna komponenta hitrosti. Raziskav teh dveh komponent je malo.

Vrtenje ladijskega vijaka povzroča, da se voda giblje v spirali v smeri curka okoli rotacijske osi in s tem inducira tangencialno komponento hitrosti. Brewster (1997, cit. po Lam et al., 2011b, str. 13) je zapisal, da je tangencialna komponenta druga največja komponenta hitrostnega polja. Prosser (1986, cit. po Lam et al., 2011b, str. 13) je ocenil magnitudo te komponente na 30% največje aksialne hitrosti. Lam et al. (2011a) pritrjuje Brewsterju, z meritvami pa je ugotovil, da lahko magnituda tangencialne hitrosti blizu vijaka doseže tudi do 82% največje aksialne hitrosti, medtem ko se njen vpliv od razdalje $x/D_p = 3.68$ močno zmanjša in znaša le še 9% magnitude blizu vijaka. Lam et al. (2011a) navaja dve Brewsterjevi enačbi zmanjševanja tangencialne hitrosti in predlaga še dve svoji.

Preglednica 2: Primerjava enačb zmanjševanja tangencialne komponente hitrosti (povzeto po Lam et al., 2011a, str. 14)

Table 2: Comparison between equations for predicting tangential velocity decay (after Lam et al., 2011a, str. 14)

Avtor	Enačbe	
Brewster (1997)	$\frac{u_{max}}{nD_p} = 0.38\exp\left[-0.3\left(\frac{x}{D_p}\right)\right]$ $\frac{u_{max}}{nD_p} = 0.47\exp\left[-0.35\left(\frac{x}{D_p}\right)\right]$	(2.79)
Lam et al. (2011)	$0 < x/D_p < 0.79$ $\frac{u_{max}}{u_0} = -0.6492\left(\frac{x}{D_p}\right) + 0.9749$ $0.79 \leq x/D_p \leq 6.32$ $\frac{u_{max}}{u_0} = 0.7031\exp\left(-0.4998\frac{x}{D_p}\right)$	(2.80)

Hamill et al. (2015) je za iztočno tangencialno hitrost predlagal naslednjo enačbo:

$$u_0 = 1.23n^{1.05}D_p^{0.798}K_t^{1.186} \tag{2.81}$$

Radialna komponenta hitrosti je komponenta, ki kaže od rotacijske osi prečno navzven. Ta komponenta naj bi imela najmanjšo magnitudo in naj bi bila zanemarljivo majhna, vendar je McGarvey (1996, cit. po Hamill et al., 2015, str. 64) ugotovil, da ima lahko na ravnini vijaka magnitudo 30% magnitude aksialne hitrosti. Hamill et al. (2015) je prav tako meril radialno komponento in ugotovil, da ima konsistentno magnitudo 20% magnitude aksialne hitrosti. Predlagal je tudi enačbo za iztočno radialno hitrost:

$$w_0 = 0.153n^{0.986}D_p^{0.719}K_t^{0.344} \tag{2.82}$$

Lam et al. (2011a) navaja, da se Brewster (1997) in McGarvey (1996) strinjata, da se radialna komponenta zmanjša do zelo nizkih magnitud (skoraj do nične hitrosti) do $x/D_p = 1.5$. Lam pa je izmeril nizke magnitude do $x/D_p = 6.32$. Od $x/D_p = 0.26$ je ta magnituda približno 50% največje magnitude na ravnini vijaka.

3 IZDELAVA IN UPORABA MODELA

3.1 Dosedanje raziskave

Za primerjavo različnih enačb, ki opisujejo procese v turbulentnem curku ladijskega vijaka, je bil razvit analitični model. Pri tem smo se oprli na obstoječe modele. Študija (Moffatt & Nichol, 2005) proučuje vpliv izgradnje plinskega terminala v zalivu Emsley na severni obali Britanske Kolumbije. Za napoved hitrosti in potencialnih vplivov curka ladijskega vijaka tankerjev in vlačilcev na dno je bil uporabljen analitični model. Izračun hitrostnega polja je bil v celoti izveden po metodologiji Blaauw & van de Kaa (1978). Za tankerje in vlačilce so izračunali profile aksialne hitrosti v odvisnosti od oddaljenosti od vijaka. To so storili za več mest po vertikalnem profilu za globine morja $20\ \mathrm{m}$ in več. Pri minimalni globini je maksimalna hitrost za tankerjem dosegla $1.3\ \mathrm{m/s}$, hitrost za vlačilcem pa ni nikjer presegla $0.6\ \mathrm{m/s}$. Hitrost curka za tankerjem ne preseže $1\ \mathrm{m/s}$ na oddaljenosti večji od $120\ \mathrm{m}$ od vijaka.

Poleg empiričnih enačb so se v svoji raziskavi Stoschek et al. (2014) poslužili tudi modeliranja z računalniško dinamiko tekočin (CFD - *ang. Computational Fluid Dynamics*). Ugotovili so, da je med strižno napetostjo na dnu in razdaljo pod gredljem linearna zveza. Največji vpliv na resuspenzijo sedimenta ima število vrtljajev vijaka, saj že 5% povečanje povzroči do 20% povečanja resuspenzije.

V slovenskem prostoru sta pomembni deli (Perkovič et al., 2011; Ramšak, 2013). V doktorski nalogi se Ramšakova naslanja na delo Perkoviča, zato velike razlike med razvitimi modeli hitrosti ob dnu zaradi plovbe ni. Uporabljata namreč iste enačbe in iste tipe ladij. Ramšakova je model razvila v okolju MATLAB, medtem ko je Perkovič modeliral v okoljih Microsoft Excel in MathCAD. Slednji model je najnatančnejši, saj računa na mreži z resolucijo $5\ \mathrm{m}$.

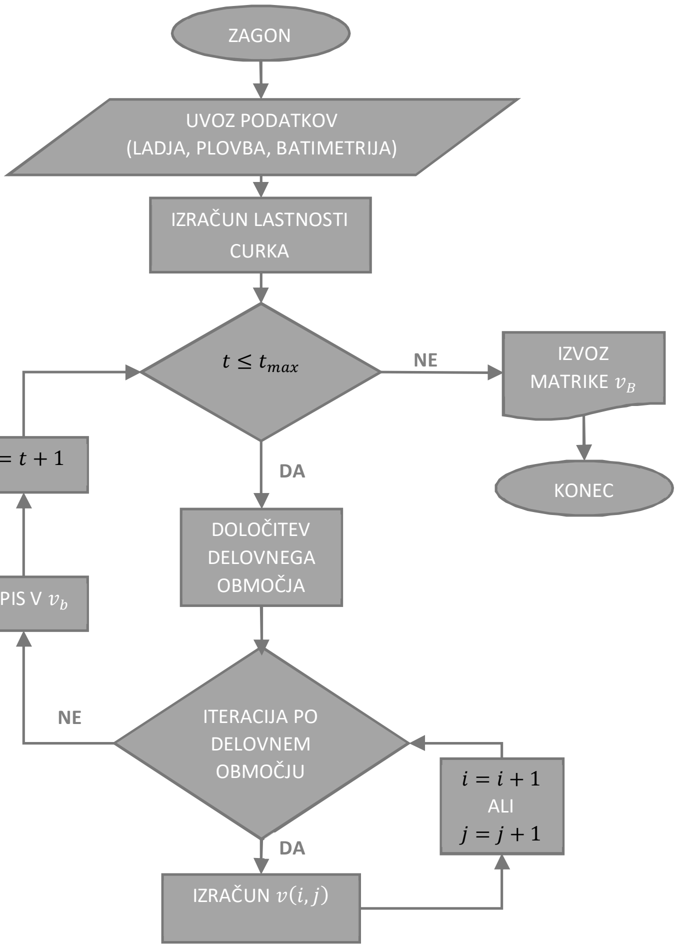
3.2 Opis modela

Pri razvoju modela je bil za zgled model v MathCAD-u Perkoviča et al. (2011). Naš model je napisan v programskem okolju MATLAB, ki je dobro razširjeno v znanstveni sferi in dosegljivo študentom na mnogih fakultetah. Prednost okolja MATLAB je veliko število uradnih in neuradnih knjižnic. Za potrebe tega modela sta posebno priročni knjižnici za kartiranje (»Mapping toolbox«) ter paralelizacijo procesov (»Parallel Computing Toolbox«), velik pa je tudi nabor funkcij za grafični prikaz izračunov.

Cilj naloge je izdelati široko uporaben model vpliva curka ladijskega vijaka na hitrosti ob morskem dnu. Model ustreza tudi naslednjim pogojem in funkcionalnostim:

- Uvoz poljubne batimetrije oziroma preučevanega območja.
- Izračun za različne tipe ladij z različnimi konfiguracijami pogonskih sistemov.
- Obravnava poljubnih manevrov ladje.
- Enostavno primerjanje rezultatov različnih naborov enačb.
- Preglednost in dobra dokumentacija, ki omogoča tudi razumevanje in uporabo drugim.
- Izvoz rezultatov za uporabo v numeričnem modelu PCFLOW3D.
- Omogoča preprosto nadgradnjo za nove tipe pogonskih sistemov in nabore enačb.

Na diagramu (slika 3.1) je prikazan okvirni potek delovanja modela. Po uvozu podatkov se pričnejo izračuni. Najprej se za vse časovne korake izračunajo osnovne lastnosti curka (iztočna hitrost, premer curka in dolžina območja oblikovanja toka). Tu vstopimo v prvo zanko, in sicer v zanko po časovnih intervalih. V vsaki iteraciji zanke se najprej zažene FindArea.m, ki poišče delovno območje za ta časovni korak, čemur sledi nova zanka, in sicer po točkah računske mreže znotraj delovnega območja. Znotraj te zanke se izračuna aksialna hitrost v tej točki in se zapiše v zbirno matriko hitrosti za ta korak. Ko so obdelane vse točke, se zanka zaključi. Zbirna matrika hitrosti časovnega koraka se zapiše v matriko hitrosti celotnega modelnega območja. Tako se iteracije nadaljujejo do konca časovnih korakov. Takrat se matrika hitrosti celotnega modelnega območja izvozi v tekstovno datoteko in izvajanje modela se zaključi.



Slika 3.1: Diagram poteka modela

Figure 3.1: Model flowchart

3.1 Uvoz podatkov

3.1.1 Uvoz podatkov o plovilu

Po zagonu nas model z vprašanji vodi skozi proces uvoza podatkov. Najprej se uvozijo podatki o plovilu. Uvoziti je možno predpripravljene datoteke, podatke iz preglednice Excel ali pa podatke vnesti ročno. Predpripravljeni sta dve datoteki, in sicer za ladjo za razsuti tovor (BC – *ang. Bulk Carrier*) in za ladjo z zabojniki (*ang. Container ship*). Podatki so zbrani v preglednici 3.

Podatki o plovilu, ki so potrebni za modeliranje:

- `Name` Ime plovila;
- `Pmax` Največja moč motorja [kW] pri ukazu »Polna morska hitrost naprej« (*ang. Full Sea Speed Ahead*);
- `rpmmax` Največje število obratov vijaka na minuto pri ukazu »Polna morska hitrost naprej« (*ang. Full Sea Speed Ahead*);
- `Rudder` Plovilo ima krmilo za ladijskim vijakom – 1 = Da, 0 = Ne;
- `LOA` Celotna dolžina (*ang. Length Over All*) [m];
- `B` Širina [m];

- `Ta` Ugrez na krmi [m];
- `Dp` Premer ladijskega vijaka [m];
- `Dh` Premer pesta ladijskega vijaka [m];
- `PD` Koračno razmerje (*ang. Design Pitch Ratio*) [m];
- `d_shaft` Globina osi ladijskega vijaka [m];
- `Ducted` Ladijski vijak je zaščiten ali zacevljen – 1 = Da, 0 = Ne;
- `Kt` Koeficient potiska [−];

Nekateri od zgoraj naštetih podatkov niso nujno potrebni za vse sklope enačb. Ob uporabi preprostejših enačb tako lahko izpustimo `Pmax, rpmmax, Dh` in `PD` ali `Kt`.

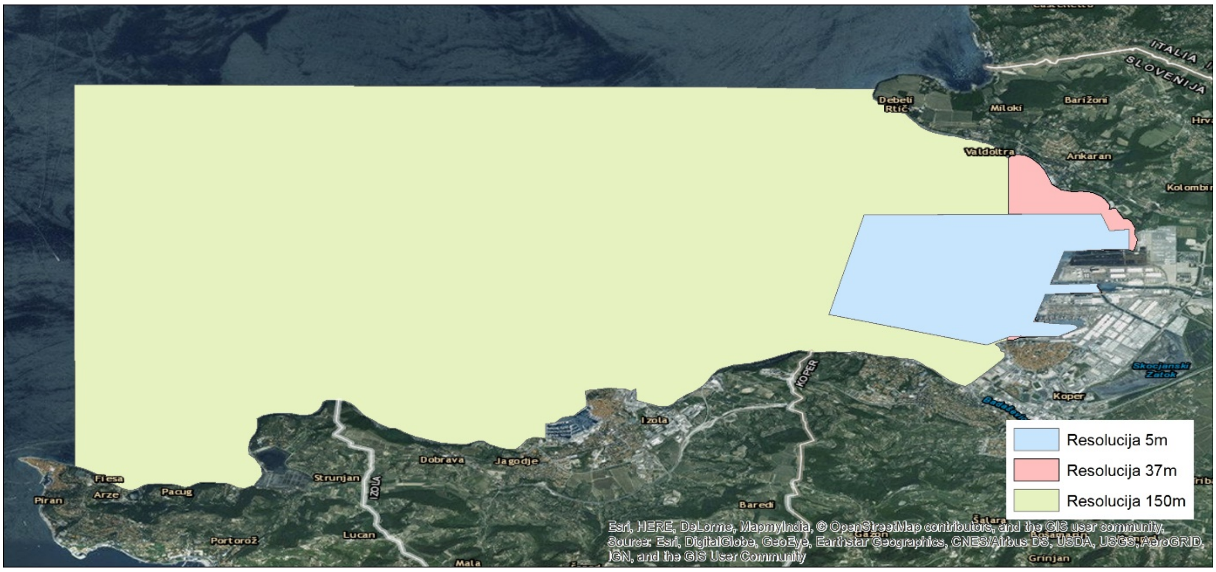
Preglednica 3: Podatki ladij, uporabljenih pri modeliranju

Table 3: Ships' data, used in modeling

Tip ladje	**Za razsuti tovor**	**Post panamax kontejnerska**
Name	BC	Container
Pmax [kW]	12271	62516.3
rpmmax [1/min]	65.4	104
Rudder	Da	Da
LOA [m]	290	304
B [m]	46	40
Ta [m]	9.3	14.22
Dp [m]	8.9	8.7
PD [-]	1.05	1.1
Ducted	Ne	Ne
Kt [-]	0.5775	0.605

3.1.2 Uvoz batimetričnih podatkov

Batimetrija se uvozi samodejno iz rastrske datoteke formata Geotiff. Ta tip rastrske slike ima vpisane tudi podatke o prostorski umestitvi slike, ki jih model prav tako uvozi. Predpripravljena batimetrija je zapisana v koordinatah univerzalnega transverzalnega Mercatorjevega koordinatnega sistema (UTM), torej so koordinate podane kot razdalja severno od ekvatorja (N - Northing) in vzhodno od srednjega meridiana cone (E - Easting). Model predvideva, da je batimetrija v 33. severni coni, ki zajema celotno Slovenijo, skoraj celoten Jadran, velik del Tirenskega morja ter del Sredozemskega morja okoli Sicilije in Malte. V model je mogoče uvoziti tudi batimetrijo v sferičnih geografskih koordinatah (geografska širina in geografska dolžina; *ang. latitude & longitude*).



Slika 3.2: Območja batimetričnih podatkov

Figure 3.2: Areas of bathymetric data (Blue: resolution 5m;, Red: resolution 37m; Green: resolution 150m)

Prednastavljena batimetrija je bila pripravljena s pomočjo orodja ArcMap s spojitvijo treh naborov batimetričnih podatkov (slika 3.2). Na območju Luke Koper in plovnih kanalov je resolucija batimetričnih podatkov 5x5 m. Te podatke je posredovalo podjetje Harpha Sea, d. o. o. Okolica pristanišča, ki je ni zajel prvi nabor podatkov, pokriva nabor z resolucijo približno 37x37 m. Preostali odprti del zaliva je pokrit z batimetrijo resolucije 140x150 m. Druga dva nabora podatkov sta predstavljena in uporabljena v (Žagar et al., 2014, 2012). Končna batimetrija je rezultat kubične interpolacije teh podatkov na mrežo resolucije 5x5 m. Globina vode je označena s pozitivnimi števili – os z je obrnjena navpično navzdol. Celice, ki ponazarjajo kopno, imajo vrednost -3.4028231e+38, kar kasneje pretvorimo v neštevilsko vrednost NaN (*ang. Not a Number*).

Model samodejno prebere velikost celic in meje batimetrije. Iz tega izračuna vrednosti koordinat mreže v smeri jug-sever (`Nr`) in zahod-vzhod (`Er`).

3.1.3 Uvoz podatkov o plovbi

Tretji niz podatkov, ki ga uvozimo v model, so podatki o plovbi plovila. Ti podatki opisujejo lokacijo, hitrost, usmerjenost plovila, zasuk krmila in druge parametre za vsak časovni korak obravnavanega manevra ladje. Nekaj podatkov o plovbi lahko pridobimo s sistemom samodejnega zaznavanja plovil (AIS – *ang. Automatic Identification System*). Preko tega sistema ladja vsakih od 2 do 10 sekund oddaja trenutne podatke o hitrosti, lokaciji, kurzu, usmerjenosti in hitrosti obračanja. Ti podatki so relativno lahko dostopni preko spleta. Težje je pridobiti preostale podatke. Uporabili smo produkt navtičnega simulatorja Transas NTPro 5000 na Fakulteti za pomorstvo in promet Univerze v Ljubljani (os. vir Marko Perkovič, UL FPP) . Gre za napredni simulator maritimnih operacij z velikimi ladjami, ki je namenjen urjenju kapitanov in posadke za različna plovila in pogonske sisteme.

Podatki so zbrani v preglednici Excel, za modeliranje pa potrebujemo naslednje podatke:

- `TIME` Čas od začetka manevra [s];
- `LAT` Trenutna geografska širina ladje [°];
- `LON` Trenutna geografska dolžina ladje [°];
- `COG` Kurz glede na dno [°];
- `SOG` Hitrost glede na dno [m/s];

- `LOG` Hitrost ladje glede na vodo [m/s];
- `HDG` Usmerjenost ladje [°];
- `RUD` Zasuk krmila [°];
- `RPM` Število vrtljajev ladijskega vijaka [1/min];

3.2 Izračun lastnosti curka

Izračun lastnosti curka se izvede s klicem funkcije LastnostiCurka. Ta zahteva kot vhodne podatke število vrtljajev vijaka in hitrost ladje. Potrebuje tudi globalno deklarirane podatke o premeru vijaka, koeficientu potiska in o zaščitenosti vijaka. Funkcija izračuna in kot rezultat vrne dolžino območja oblikovanja toka, iztočno hitrost in premer zoženega curka.

Zožitev curka se izračuna po metodologiji (Blaauw in van de Kaa, 1978). Obravnavata se lahko dva primera, in sicer za zaščiten in nezaščiten vijak.

Izračun iztočne hitrosti na ravnini vijaka se tudi deli na dva primera, in sicer za mirujočo ali zelo počasi gibajočo se ladjo ter za plovečo ladjo. Za prvi primer se račun lahko izvede s poljubno enačbo iz nabora, ki je opisan v poglavju 2.3.1, za drugi primer pa z enačbami iz poglavja 2.6.

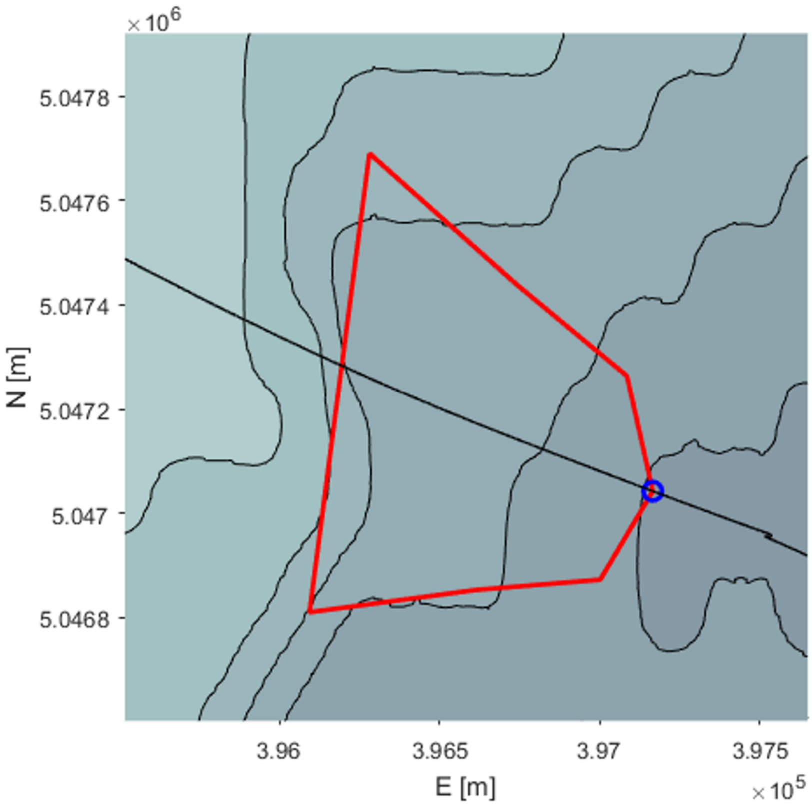
Na koncu se izračuna še dolžina območja oblikovanja toka. Zopet je na voljo več enačb, ki so prikazane v poglavju 2.3.3.

Funkcijo poženemo za vse časovne korake naenkrat in rezultate zberemo v obliki stolpcev matrike.

3.3 Izračun polja hitrosti

Izračun polja hitrosti se izvede z zagonom `Hitrosti.m`. Večina programa se izvede v dveh zankah »`for`«. Prva je zanka po časovnih korakih, vanjo pa je gnezdena zanka po mreži delovnega območja. Ta del modela je daleč najbolj časovno in računsko zahteven, saj obdelava manevra trajanja 1.25 ure oziroma 4500 časovnih korakov po 1 sekundo, na mreži resolucije 5x5 m približno 2 uri na računalniku s štirijedrnim procesorjem. Če nas zanima le posamezen časovni korak ali del manevra, to preprosto nastavimo v modelu. Model preskoči časovne korake, ko ladja pluje brez pomoči lastnega pogona ($v_0 < 0.2\ \mathrm{m/s}$), na primer ko jo usmerjajo vlačilci.

Na začetku vsake iteracije po času se zažene pomožna skripta `FindArea.m`. Ta na podlagi koordinat ladje in usmerjenosti curka znotraj celotne računske mreže, ki je pogojeno z batimetrijo, določi območje, na katerem se bo izračunalo polje hitrosti. Delovno območje, ki je označeno z ROI (*ang. Region of Interest*), je torej podmatrika matrike batimetrije. Primer delovnega območja je z rdečo obrobo označen na sliki 3.3.



Slika 3.3: Primer delovnega območja za en časovni korak

Figure 3.3: Example of the Region of Interest for one time step

Delovno območje je petkotne oblike z največjo širino 900 m in dolžino 1000-2500 m. V študiji (Perkovič et al., 2011) je opisan tudi postopek določitve območja eliptične oblike z iskanjem ničel transcendentne funkcije. Pri poskusnih izračunih se je ta postopek prepogosto izkazal za nestabilnega, zato v modelu ni uporabljen.

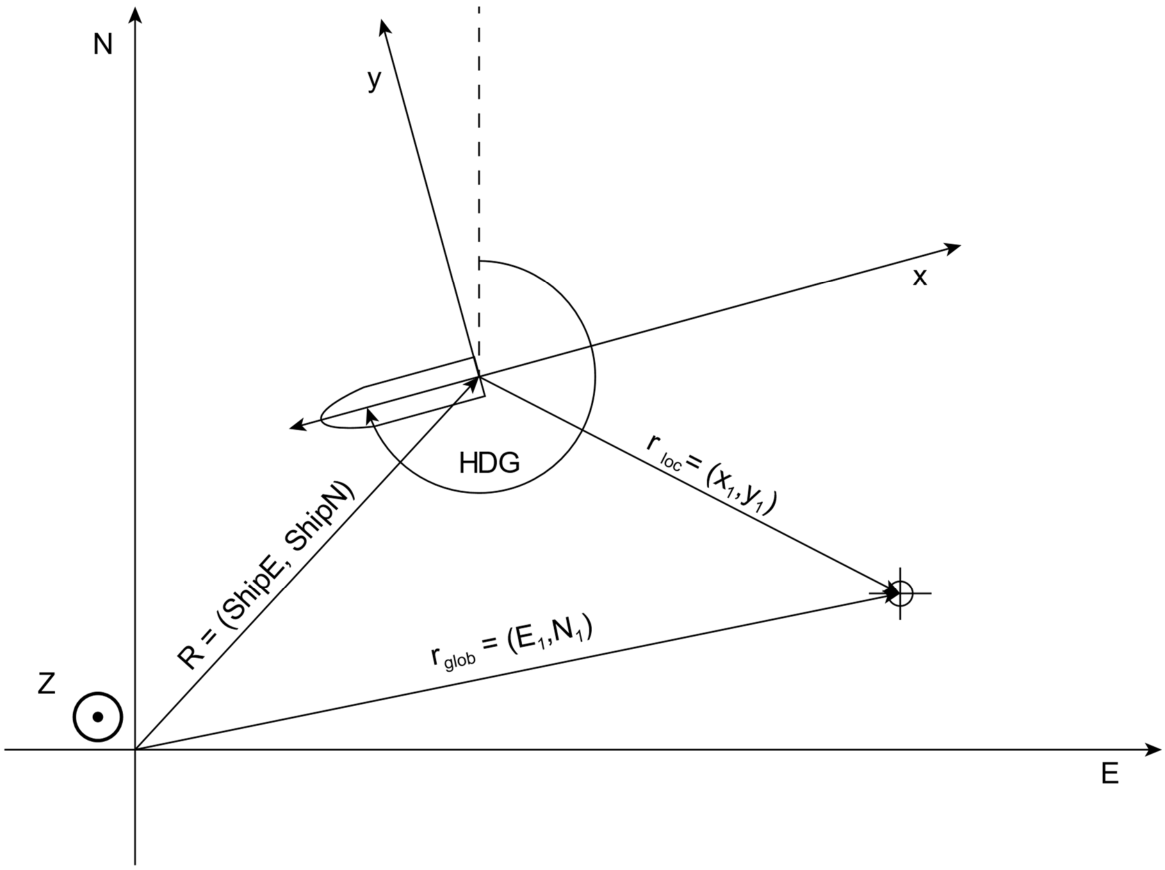
Po določitvi delovnega območja model preveri, ali obravnavana ladja ima krmilo ali ne (spremenljivka `RUD`), in na podlagi tega izbere primeren nabor enačb. Nabor enačb za ladjo brez krmila se uporabi tudi takrat, ko je število obratov vijaka negativno – pri ustavljanju in vzvratni plovbi. Z izbranim naborom enačb se izračuna aksialna hitrost v vsaki točki delovnega območja.

Za iteracijo po točkah se uporablja posebna zanka »`parfor`«. To je funkcija MATLAB iz knjižnice »Parallel Computing Toolbox«, ki omogoča vzporedno računanje v več točkah. To je možno, saj so izračuni neodvisni, torej ne vplivajo drug na drugega. Funkcija sama razporedi iteracije med dosegljive procesorje lokalnega ali oddaljenega računalnika za čim hitrejši izračun. Z uporabo vzporednega računanja se čas izračuna enega koraka zmanjša tudi za 70%. Primer: $t_{\text{for}} = 8.2266$ s; $t_{\text{parfor}} = 2.4452$ s.

Izračun za izbrano točko deluje po naslednjem postopku. Najprej pretvorimo koordinate točke v mreži batimetrije (globalne koordinate) v koordinate točke v lokalnem koordinatnem sistemu ladje za trenutni časovni korak. To je shematsko prikazano na sliki 3.4. Koordinatam v globalnem koordinatnem sistemu ($\boldsymbol{r}_{glob} = (E_1, N_1)$) najprej odštejemo koordinate izhodišča lokalnega koordinatnega sistema, torej globalne koordinate ladje v danem trenutku ($\boldsymbol{T} = (ShipE, ShipN)$). Nato razliko z leve pomnožimo z rotacijsko matriko:

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} -\sin HDG & -\cos HDG \\ \cos HDG & -\sin HDG \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

kjer je HDG trenutna usmerjenost ladje (*ang. Heading*). Pretvorba koordinat se izvede s funkcijo `glob2loc.` Koordinata z je v obeh koordinatnih sistemih usmerjena navpično navzdol. Preberemo jo iz matrike batimetrije, ki jo zmanjšamo za globino rotacijske osi vijaka.



Slika 3.4: Pretvorba iz globalnih v lokalne koordinate

Figure 3.4: Transformation from global to local coordinates

Lokalne koordinate uporabimo v izračunu hitrosti v trenutni točki, kar se izvede po enačbah iz poglavja 2.3.3,2.3.4 ali 2.4 glede na lokacijo točke in lastnosti curka ter ladje. Ker vedno računamo v točkah mreže batimetrije, si dno predstavljamo stopničasto. Torej globina v točki določa globino kvadrata s stranico, enako resoluciji mreže (recimo 5x5 m), katerega središče je v tej točki. Izračunana hitrost prav tako velja za celoten kvadrat okoli točke izračuna. Medsebojnih vplivov sosednjih točk z različno globino se ne upošteva.

Izračunane hitrosti v posameznih točkah trenutnega delovnega območja se zapisujejo v matriko `vb`, ki jo pred prehodom na naslednji časovni korak shranimo v zbirko `vbt` ter na ustrezno mesto v zbirni matriki `vb_sum` in `vb_max`. Spremenljivka `vbt` je tipa »`cell array`« in vanjo se poleg matrike `vb` za vsak časovni korak shranijo še koordinate delovnega območja `ROIE` in `ROIN`, ter koordinate skrajnih mej tega območja. V matriki `vb_sum` je shranjeno kumulativno hitrostno polje celotnega manevra, vanjo namreč v vsakem koraku na ustrezno mesto prištejemo izračunane hitrosti v tem koraku. V matriki `vb_max` so shranjene največje hitrosti ob dnu, ki so bile izračunane v vsaki izmed točk mreže.

3.4 Grafični prikaz rezultatov

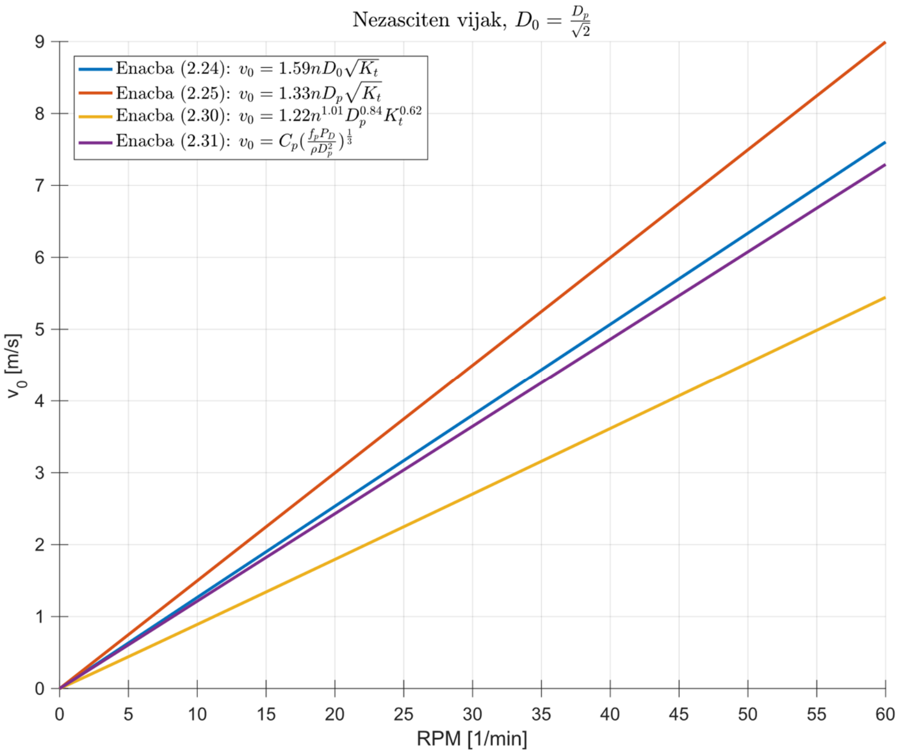
Programsko orodje MATLAB omogoča napreden grafični prikaz podatkov. V datoteki `vizualizacija.m` je zbrana koda za grafični prikaz rezultatov. Uporabnik ročno izbere grafično predstavitev, ki jo želi izrisati, in požene vrstice, ki so temu namenjene. Naprednejše urejanje in shranjevanje grafov se izvede preko grafičnega vmesnika MATLAB, ki se samodejno zažene po izvedbi izbrane kode.

4 REZULTATI RAZISKOVALNEGA DELA

4.1 Primerjava iztočnih hitrosti

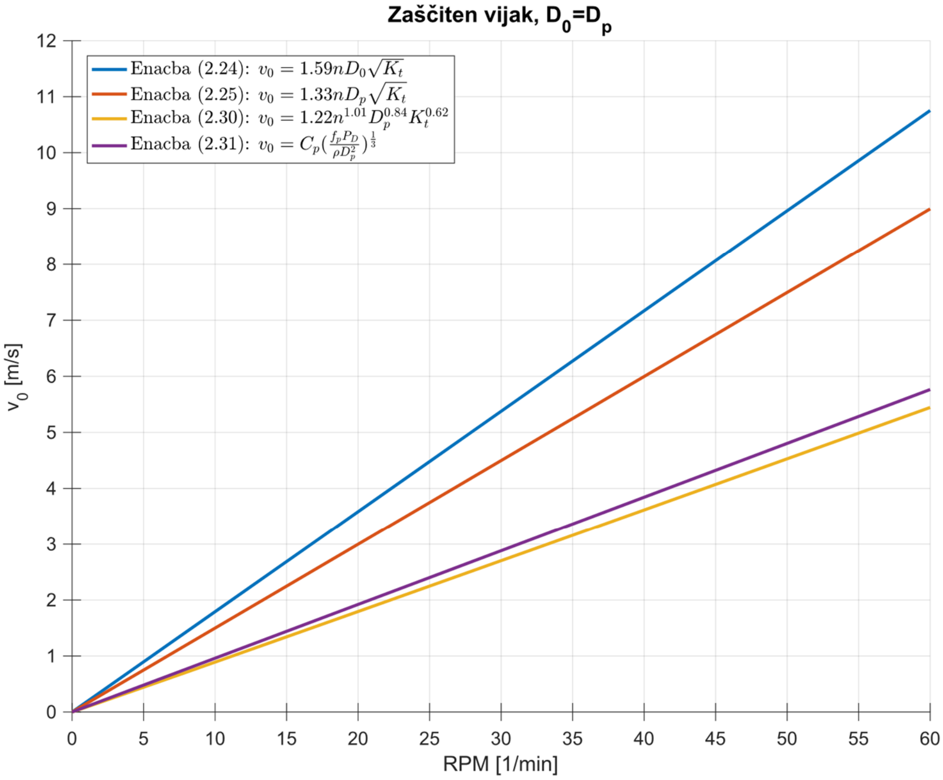
Iztočna hitrost je obvezen podatek za izračun profila hitrosti za ladijskim vijakom, zato je pomembno izbrati pravo enačbo za njen izračun. V poglavju 2.3.1 je prikazanih šest enačb za izračun aksialne iztočne hitrosti v_0. V nadaljevanju so primerjane enačbe (2.24), (2.25), (2.30) in (2.31). Enačbi (2.26) in (2.28) sta bili izpuščeni zaradi manjkajočega podatka BAR.

Narejeni sta bili dve primerjavi vseh štirih enačb za mirujočo ladjo – za nezaščiten (Slika 4.1) in zaščiten vijak (Slika 4.2). Pri tem je potrebno poudariti, da sta le enačbi (2.24) in (2.31) odvisni od zaščitenosti vijaka. Pri prvi se spremeni premer curka D_0, pri drugi pa empirična konstanta C_p.



Slika 4.1: Primerjava iztočnih hitrosti – nezaščiten vijak

Figure 4.1: Comparison of the efflux velocities – Unducted propeller



Slika 4.2: Primerjava iztočnih hitrosti – zaščiten vijak

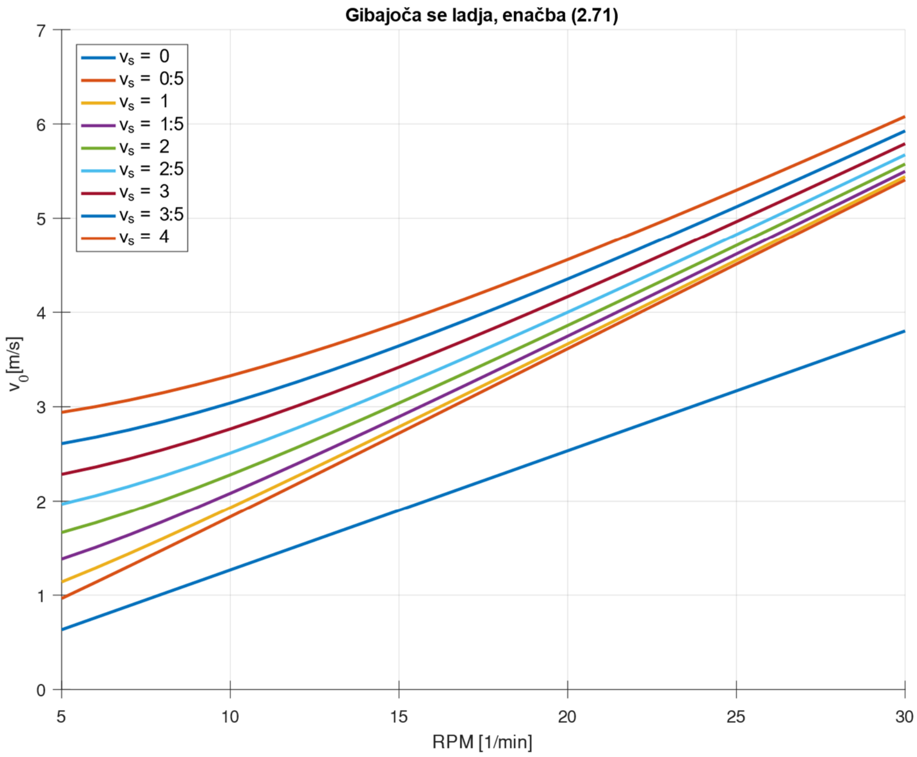
Figure 4.2: Comparison of the efflux velocities – Ducted propeller

Razlike med enačbami so znatne. Hitrosti za nezaščiten vijak po enačbi (2.25) so kar za 66% večje od (2.30), za zaščiten vijak pa je razlika med rezultati enačbe (2.24) in enačbe (2.30) skoraj 100%. Zanimivo je tudi, da se za zaščiten vijak hitrost po enačbi (2.24) zveča, po enačbi (2.31) pa zmanjša. To razhajanje enačb si je pomembno zapomniti, saj izbira enačbe za iztočno hitrost vpliva na celoten nadaljnji izračun hitrostnega polja.

Naslednji obravnavani primer je ladja, ki ni več statična, temveč pluje s hitrostjo $v_s > 0.2$ m/s. Tu so bili primerjani vsi trije načini upoštevanja hitrosti plovbe, ki so opisani v poglavju 2.6. Osnovna iztočna hitrost je bila izračunana po (2.24) in nato nadgrajena z (2.71), (2.75) in (2.77) za nezaščitene vijake ter (2.71), (2.76) in (2.78) za zaščitene vijake.

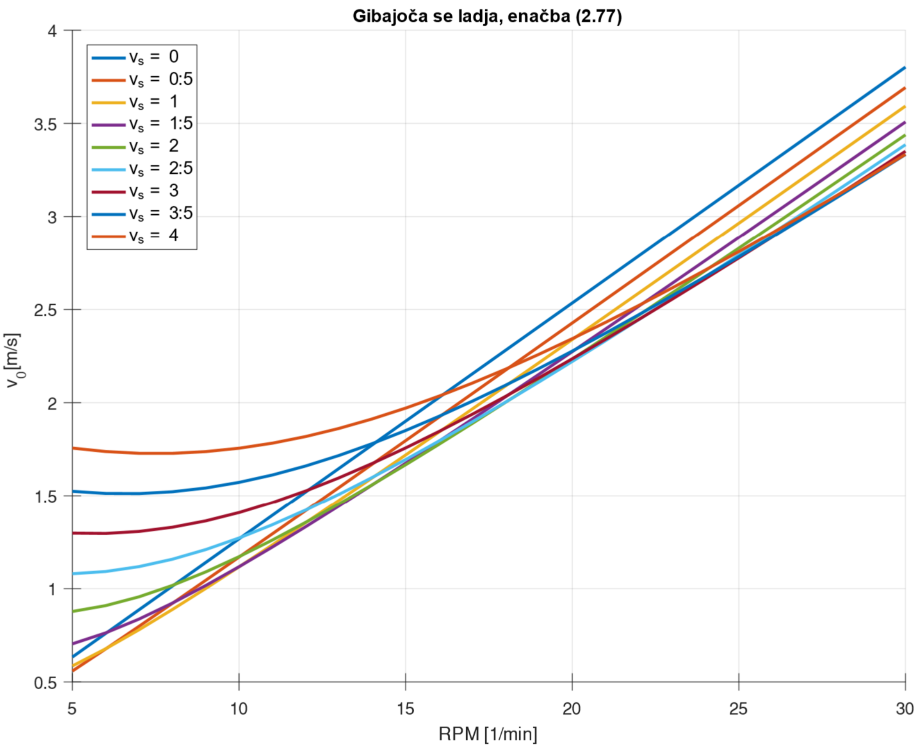
Na sliki 4.3 je prikazan potek iztočnih hitrosti, izračunanih po enačbi (2.71), pri različni hitrosti vrtenja vijaka za različne hitrosti plutja ladje. Iztočne hitrosti pri gibajoči se ladji so višje od iztočne hitrosti mirujoče ladje. Na sliki 4.4 je prikazan potek iztočnih hitrosti, izračunanih po enačbi (2.77), kjer pa so iztočne hitrosti gibajoče se ladje manjše od iztočne hitrosti mirujoče ladje. Iz obeh slik je vidno, da ima hitrost ladje vpliv predvsem pri majhnih hitrostih vrtenja vijaka, z večanjem hitrosti vrtenja pa vpliv upada.

Primerjava vseh treh enačb pri hitrosti ladje $v_s = 2$ [m/s] je prikazana na sliki 4.5 za nezaščiten vijak ter na sliki 4.6 za zaščiten vijak. Vse tri enačbe se v obeh primerih dokaj dobro ujemajo. Tudi najpreprostejši enačbi (2.75) in (2.76) se dobro obneseta. Slabše opišeta le dogajanje pri manjšem številu vrtljajev na minuto (do ~15), vendar za izračun potrebujemo le poznavanje hitrosti gibanja ladje in iztočne hitrosti.



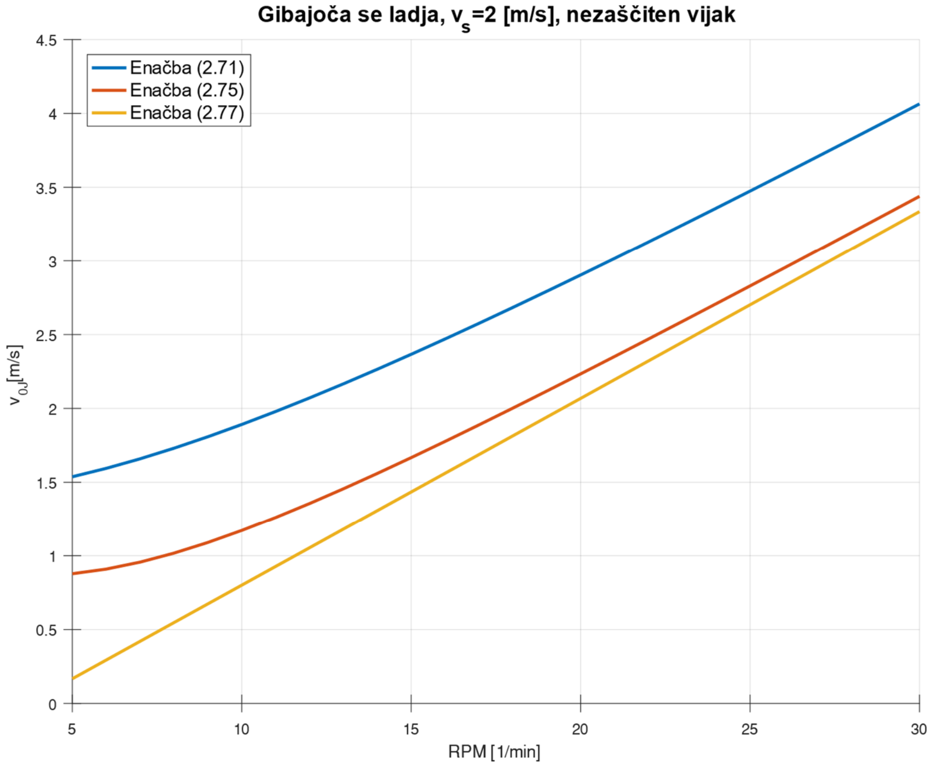
Slika 4.3: Iztočna hitrost pri gibajoči se ladji – enačba (2.71)

Figure 4.3: Efflux velocity of the advancing ship – equation (2.71)



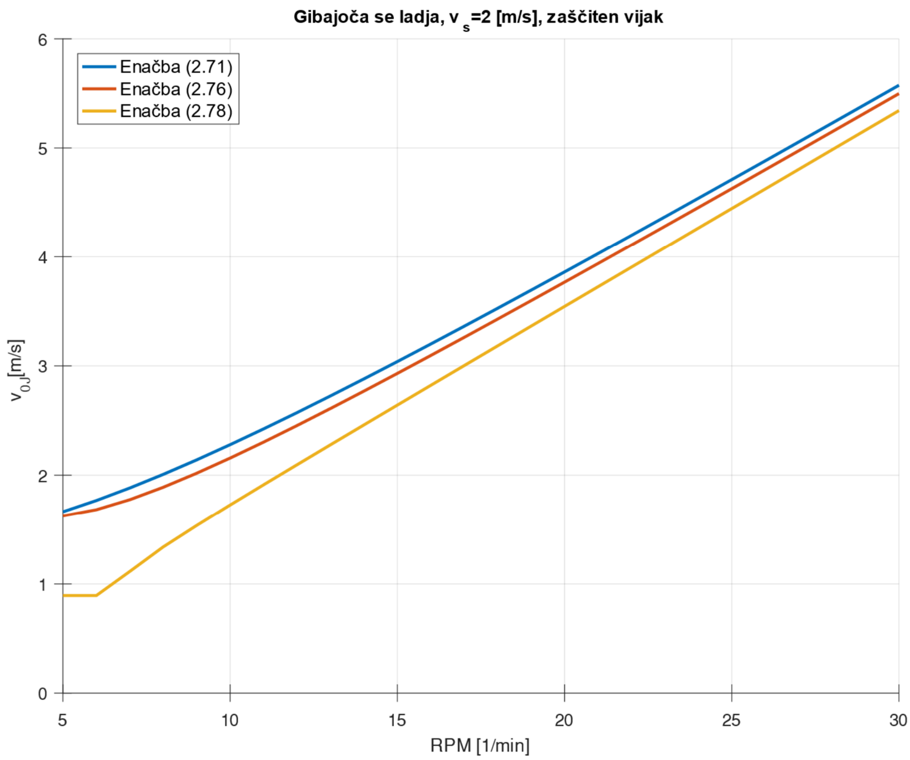
Slika 4.4: Iztočna hitrost pri gibajoči se ladji – enačba (2.77)

Figure 4.4: Efflux velocity of the advancing ship – equation (2.77)



Slika 4.5: Primerjava iztočnih hitrosti pri gibajoči se ladji z nezaščitenim vijakom

Figure 4.5: Comparison of the efflux velocities of the advancing ship with unducted propeller

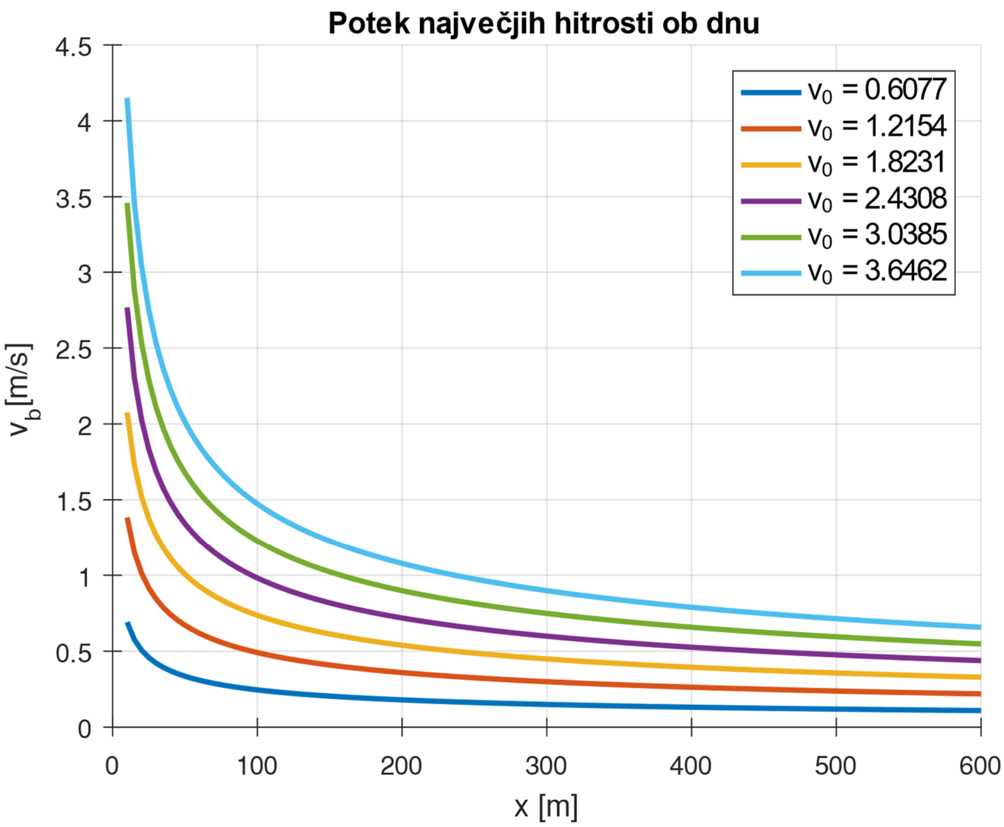


Slika 4.6: Primerjava iztočnih hitrosti pri gibajoči se ladji z zaščitenim vijakom

Figure 4.6: Comparison of the efflux velocities of the advancing ship with ducted propeller

4.2 Maksimalne hitrosti ob dnu

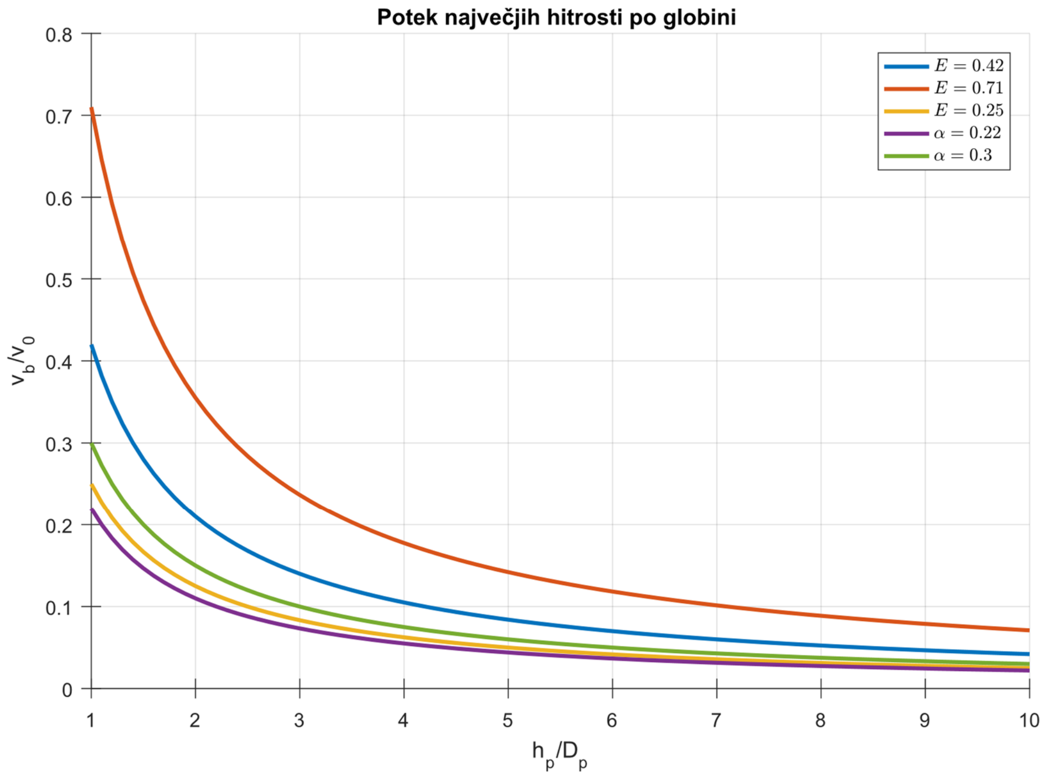
Izračun največjih hitrosti po enačbah iz poglavja 2.4 nam daje predstavo o velikostnem redu hitrosti, ki jih lahko pričakujemo pri izračunu celotnega hitrostnega polja. Na sliki 4.7 je prikazano, kako se največja hitrost ob dnu spreminja z oddaljevanjem od vijaka pri različnih iztočnih hitrostih v_0 (izračunane po (2.31)). Hitrosti so izračunane po enačbi (2.54), ki velja le za majhne globine in razdalje od osi vijaka do dna. S slike 4.7 lahko ugotovimo, da enačba očitno ne velja za zelo majhne aksialne razdalje od iztočne ravnine, saj hitrost ob dnu ne more biti večja od iztočne hitrosti. S preureditvijo enačbe (2.54) lahko ugotovimo, da je najmanjša razdalja vsaj $\left(x/D_p\right) = 1.28$.



Slika 4.7: Največje hitrosti ob dnu v odvisnosti od aksialne razdalje x

Figure 4.7: Maximum velocities at the seabed in dependence of axial distance x

Največjo hitrost na neki globini od rotacijske osi h_p izračunamo z enačbama (2.55) in (2.56). Gre za pravzaprav enaki enačbi z različnima empiričnim koeficientom E in α. Njuna primerjava je prikazana na sliki 4.8. Višji koeficient in s tem hitrosti za vijak s krmilom gre verjetno pripisati pojavu razdelitve curka na dva žarka.



Slika 4.8: Potek največjih hitrosti po globini za različne empirične koeficiente E in α

Figure 4.8: Depth profile of the maximum velocity for different empirical coefficients E and α

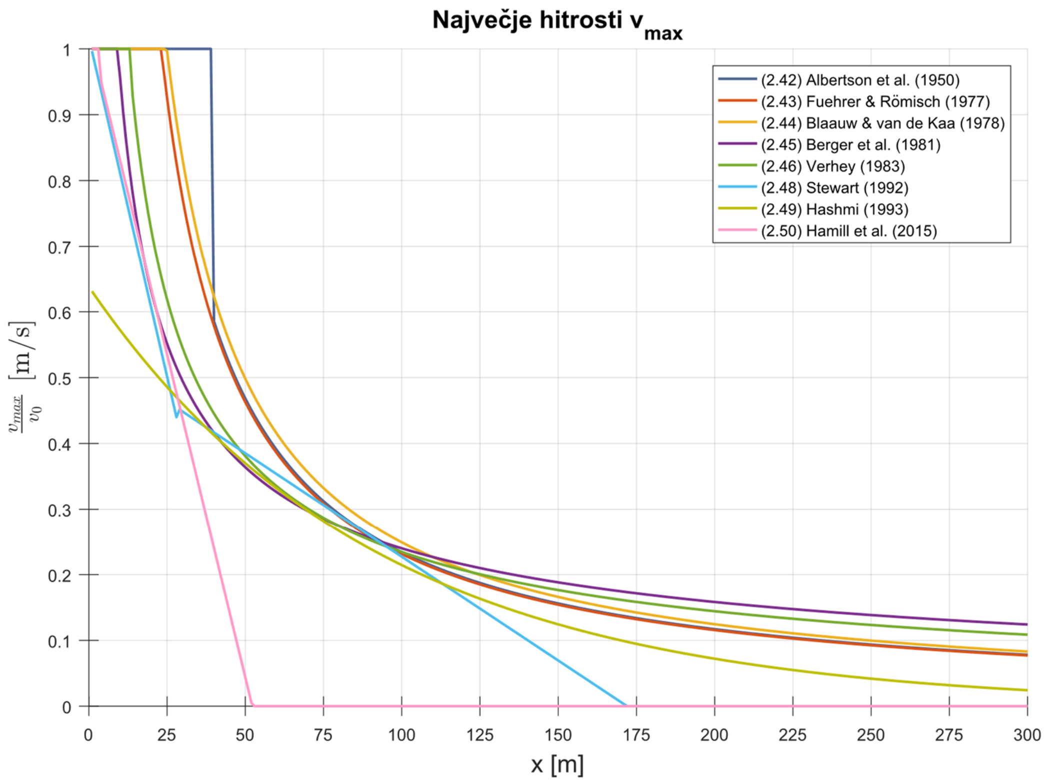
4.3 Primerjava izračunov za vijak brez krmila

Izračun hitrostnega polja curka ladijskega vijaka, za katerim ni krmila, je sestavljen iz dveh delov: izračun za območje nerazvite turbulence in izračun za območje razvite turbulence. Za vsako območje imamo več možnosti izračuna največje hitrosti preseka v_{max} in aksialne hitrosti v izbrani točki $v_{x,r}$.

Na sliki 4.9 je prikazan potek zmanjševanja največje hitrosti na preseku v_{max} kot delež iztočne hitrosti v_0. Primerjane so vse enačbe iz preglednice 1 razen (2.47), za katero nimamo dovolj podatkov. Očitno je, da so razlike med rezultati enačb znatne. Enačbe (2.42), (2.43), (2.44), (2.45) in (2.46) veljajo le za območje razvite turbulence in predvidevajo, da je na območju nerazvite turbulence $v_{max} = v_0$, zato na sliki vidimo ostra kolena, kjer se zgodi prehod med območjema. V poteku hitrosti po enačbi (2.48) opazimo tudi nenaden skok, kar je posledica nenatančno podane dolžine območja nerazvite turbulence in ni napaka modela. Najbolj podobni so si rezultati enačb (2.42), (2.43) in (2.44). Podobni so si tudi rezultati enačb (2.45) in (2.46), ki za razliko od prej navedenih treh enačb blizu iztočne ravnine dajeta manjše hitrosti, do razdalje 100 m pa večje. Enačbi (2.48) in (2.50) sta edini linearni in zelo hitro padeta na vrednost 0. To je najbrž posledica dejstva, da sta bili umerjeni na meritvah do aksialne razdalje $x/D_p = 10$, kar je v našem primeru komaj 90 m. Posebna je tudi enačba (2.49), ki je edina eksponentna. Oblika poteka hitrosti je najbolj podobna (2.45), vendar hitreje pada proti 0.

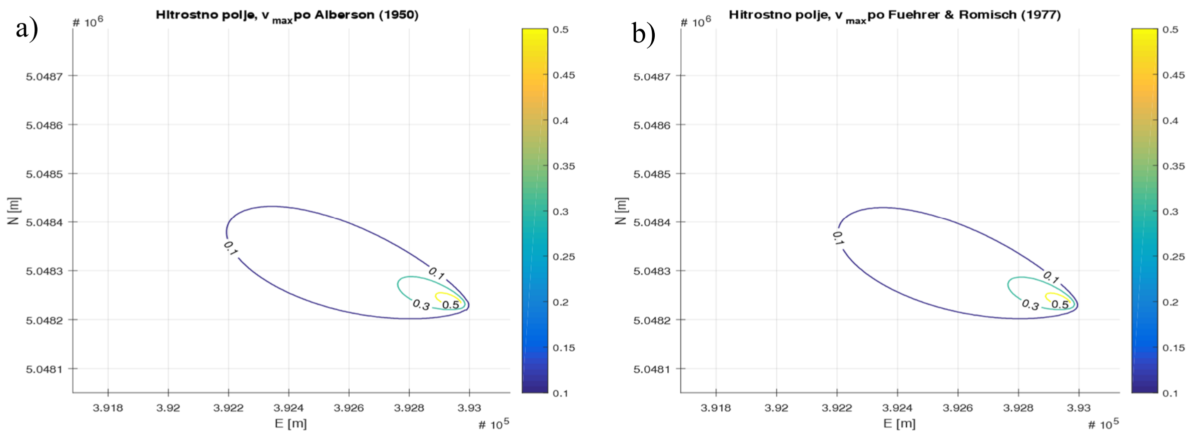
Kako izbira enačbe za izračun v_{max} vpliva na polje hitrosti curka ladijskega vijaka, je prikazano na slikah 4.10 in 4.11. Vse slike prikazujejo curek iste ladje na globini morja 20 m, z iztočno hitrostjo $v_0 = 3.64$ [m/s], hitrostno polje pa je izračunano po metodologiji (Albertson et al., 1950). Iz slik je razvidno, da lahko z različnimi enačbami dobimo povsem različne rezultate. Slike 4.10 a) in b) ter 4.11 a) so si najbolj podobne. Celotno območje, ki ga doseže hitrostno polje na slikah 4.11 b) in c), presega območje slike, saj v dolžino doseg meri več kot 4 km. To je štirikrat več kot na primer doseg na 4.10 a). Na drugi strani pa imamo 4.11 d), e) in f), ki imajo zelo kratke dosege. Na slikah 4.11 d) in e) je doseg le nekaj

100 m, na sliki 4.11 f) je doseg tako le nekaj 10 m, hitrosti pa ne presežejo 0.1 [m/s], zato se izotahe sploh ne izrišejo.



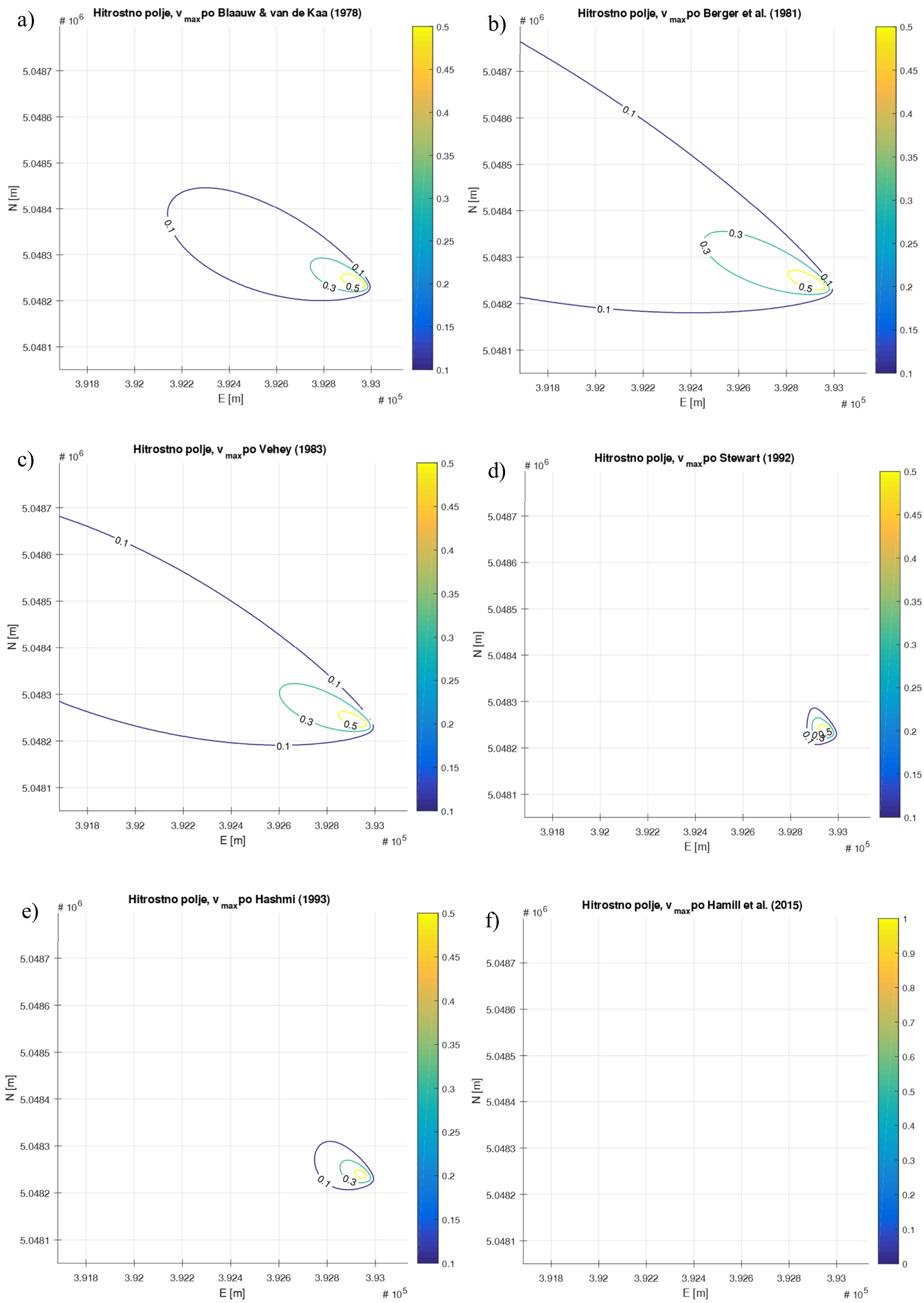
Slika 4.9: Zmanjševanje največje hitrosti z oddaljenostjo od iztočne ravnine

Figure 4.9: Decay of the maximum velocity with the distance from efflux plane



Slika 4.10: Primerjava hitrostnega polja; enačba v_{max}: a) (2.42); b) (2.43)

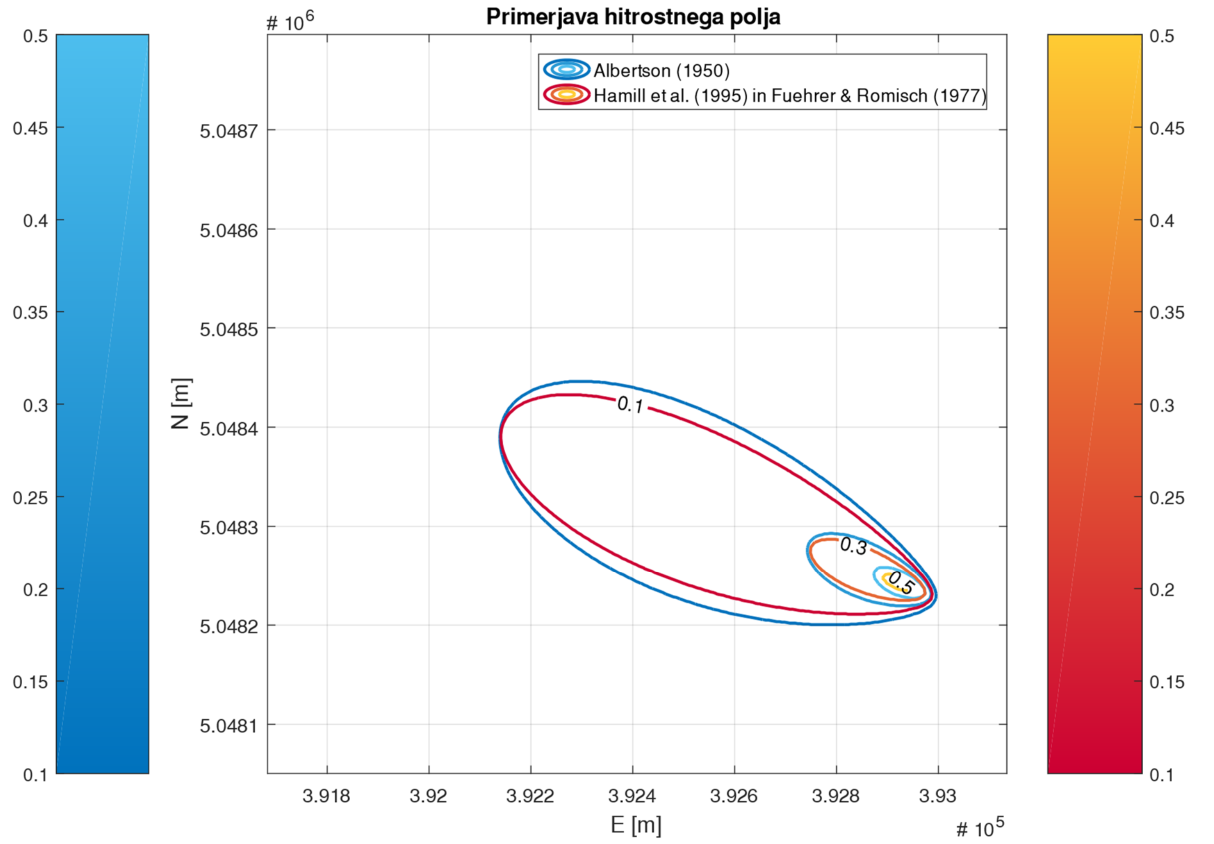
Figure 4.10: Comparison of the velocity field; equation v_{max}: a) (2.42); b) (2.43)



Slika 4.11: Primerjava hitrostnega polja; enačba v_{max}: a) (2.44); b) (2.45); c) (2.46); d) (2.48); e) (2.49); f) (2.50)

Figure 4.11: Comparison of the velocity field; equation v_{max}: a) (2.44); b) (2.45); c) (2.46); d) (2.48); e) (2.49); f) (2.50)

Izračun hitrostnega polja na območju nerazvite in razvite turbulence lahko izvedemo po dveh metodologijah. Prvo sestavljata enačbi (2.34) in (2.52) po (Albertson et al., 1950), drugo pa enačba (2.39) po (Hamill et al., 1995, cit. po Kee et al., 2006, str. 2) ter (2.53) po (Fuehrer in Römish, 1977). Obe metodologiji sta si podobni, na kar kažejo tudi rezultati, prikazani na sliki 4.12. Prikazan izračun je izveden za isto ladjo na globini morja 20 m in z iztočno hitrostjo $v_0 = 3.64$ [m/s], največja hitrost v prerezu pa je izračunana po enačbi (2.44). Rezultata obeh izračunov sta si podobna, kar je razumljivo, saj so si podobne tudi same enačbe za izračun. Curek, izračun po metodologiji Albertson et al., seže na nekoliko širše območje. Doseg v dolžino je enak, saj je odvisen le od zmanjševanja v_{max}, ki je bilo za oba izračuna enako.

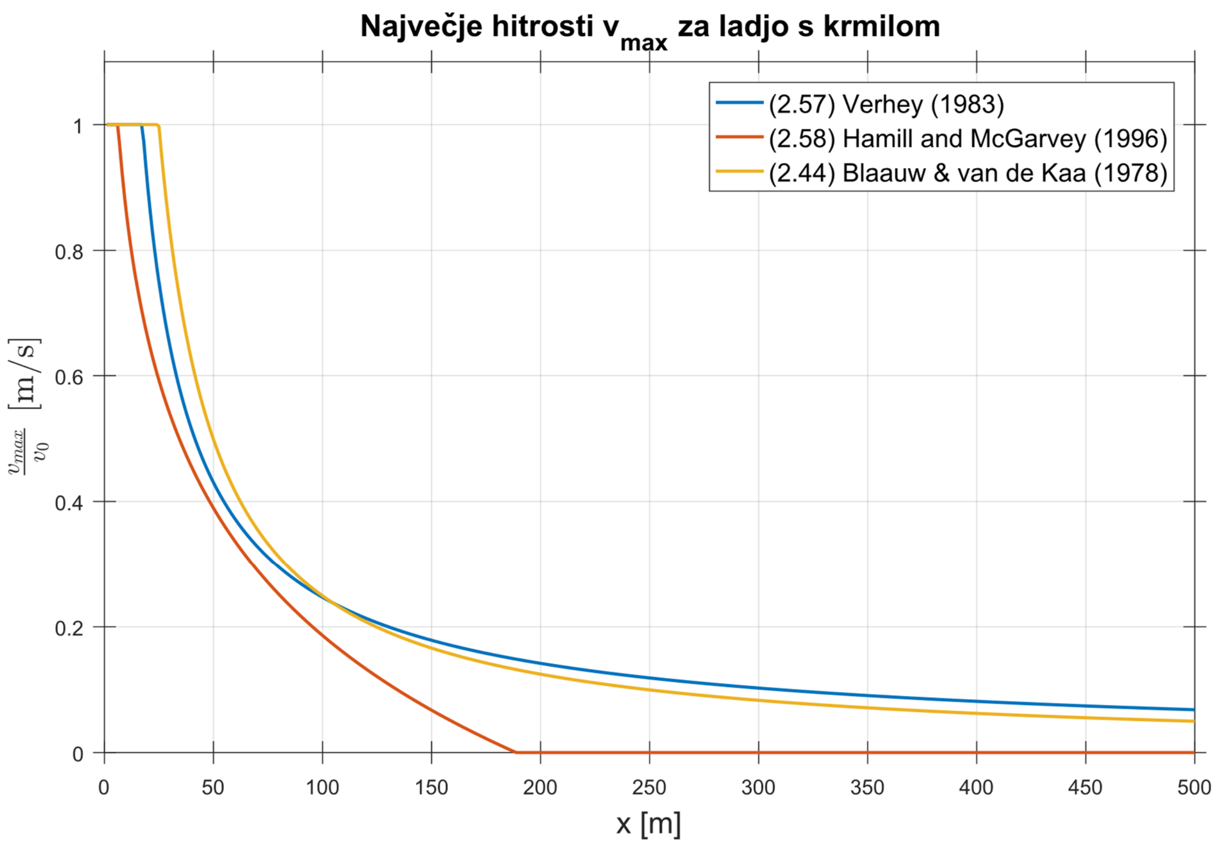


Slika 4.12: Primerjava izračuna hitrostnega polja $v_{x,r}$ po metodologiji (Albertson et al., 1950) ter (Hamill et al., 1995) in (Fuehrer and Römish, 1977)

Figure 4.12: Comparison of the calculated velocity field $v_{x,r}$ by methodology (Albertson et al., 1950) ter (Hamill et al., 1995) and (Fuehrer and Römish, 1977)

4.4 Primerjava izračunov za vijak s krmilom

Krmilo za ladijskim vijakom povzroči, da se curek na njem odbije ter razcepi na dva žarka. Ta proces so z enačbami poskušali opisati Verhey in Hamill et al., kar je prikazanov poglavju 2.5. Kot smo videli že v poglavju 4.3, je za doseg curka ladijskega vijaka odločilen izračun največje hitrosti na preseku v_{max}. Za izračun v_{max} za vijak s krmilom sta bili predlagani enačbi (2.57) in (2.58)(2.58)(2.58). Primerjava teh dveh enačb z enačbo za vijak brez krmila (2.44) je prikazana na sliki 4.13. Potek v_{max} po enačbah (2.57) in (2.44) je podoben, medtem ko se potek po enačbi (2.58)(2.58) precej razlikuje, saj že na razdalji približno 190 m od iztočne ravnine pade v_{max} na 0. Tudi tu se razlog za to najbrž skriva v dejstvu, da je bila umerjena na meritvah do aksialne razdalje $x/D_p = 10$, kar je v našem primeru približno 90 m. Do te razdalje se potek izračuna z enačbo (2.58) relativno dobro ujema z drugima dvema enačbama.

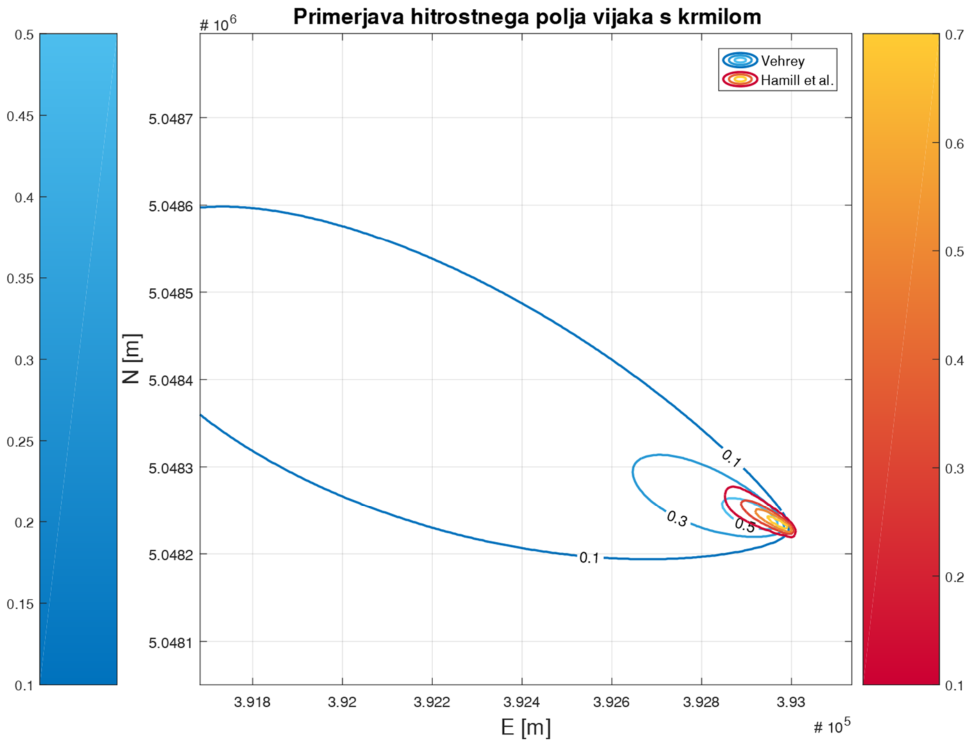


Slika 4.13: Primerjava poteka največjih hitrosti v_{max} za vijak s krmilom ((2.57) in (2.58)(2.58)) ter brez krmila (2.44)

Figure 4.13: Comparison of maximum velocities v_{max} profile for the propeller with a rudder ((2.57) in(2.58)) and without a rudder (2.44)

Razlika v poteku največje hitrosti v_{max} se odraža tudi v hitrostnem polju, ki je prikazano na sliki 4.14. Hitrostni polji po različnih metodologijah se močno razlikujeta. Izračun po metodologiji Hamill et al. daje višje hitrosti, vendar ima dosti manjši doseg kot izračun po metodologiji Verhey (1983).

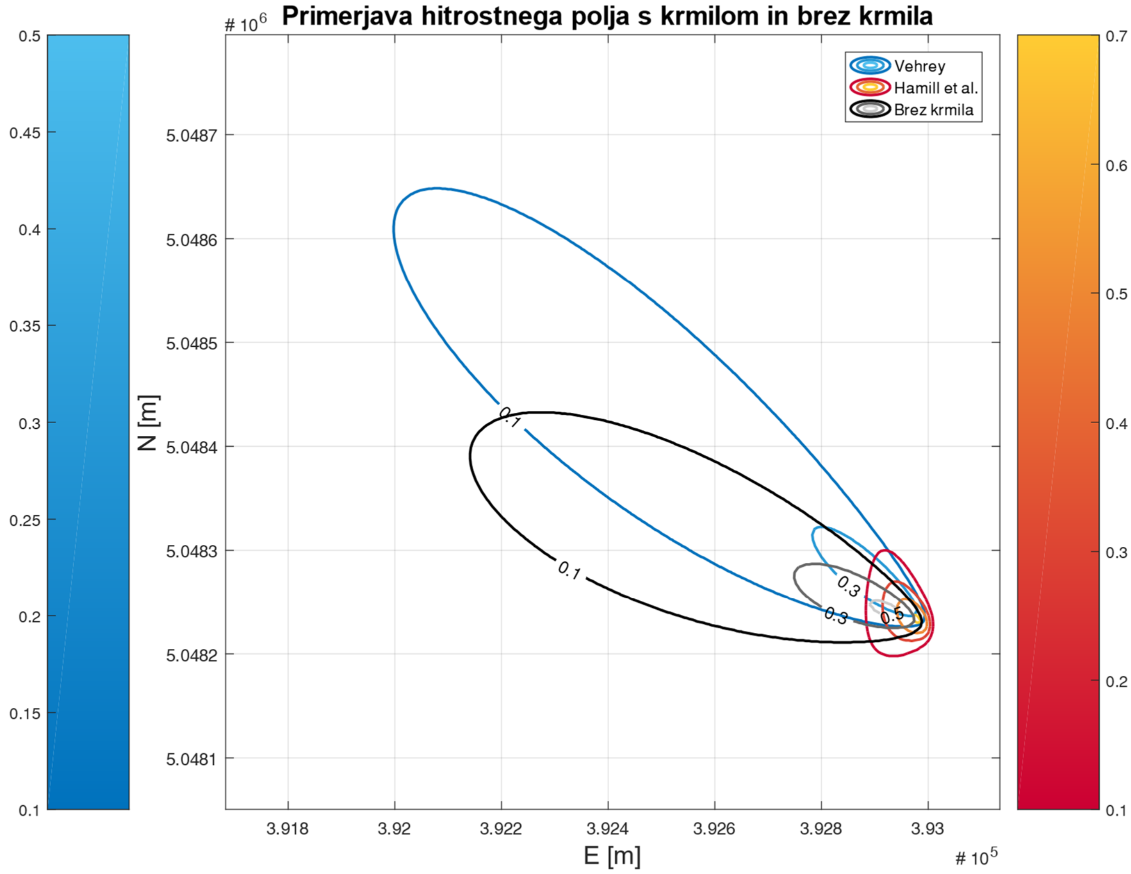
(Hamill in McGarvey, 1996) sta opazila, da je magnituda hitrosti curka vijaka s krmilom do 30% večja od vijaka brez krmila. Če primerjamo hitrostni polji na sliki 4.12 in hitrostno polje po Hamill et al. na sliki 4.14, je razlika v magnitudi tudi do 40%. Po metodologiji Verhey (1983) je razlika v magnitudi majhna.



Slika 4.14: Primerjava hitrostnega polja vijaka s krmilom po metodologiji Verhey (1983) in Hamill et al. (1998; 1996)

Figure 4.14: Comparison of the velocity field of the propeller with a rudder by methodology from Verhey (1983) and Hamill et al. (1998; 1996)

Primerjava hitrostnega polja za vijak s krmilom, zasukanim za kot 15°, ter za vijak brez krmila je prikazana na sliki 4.15. Jasno je viden sorazmeren premik curka v smeri zasuka krmila.



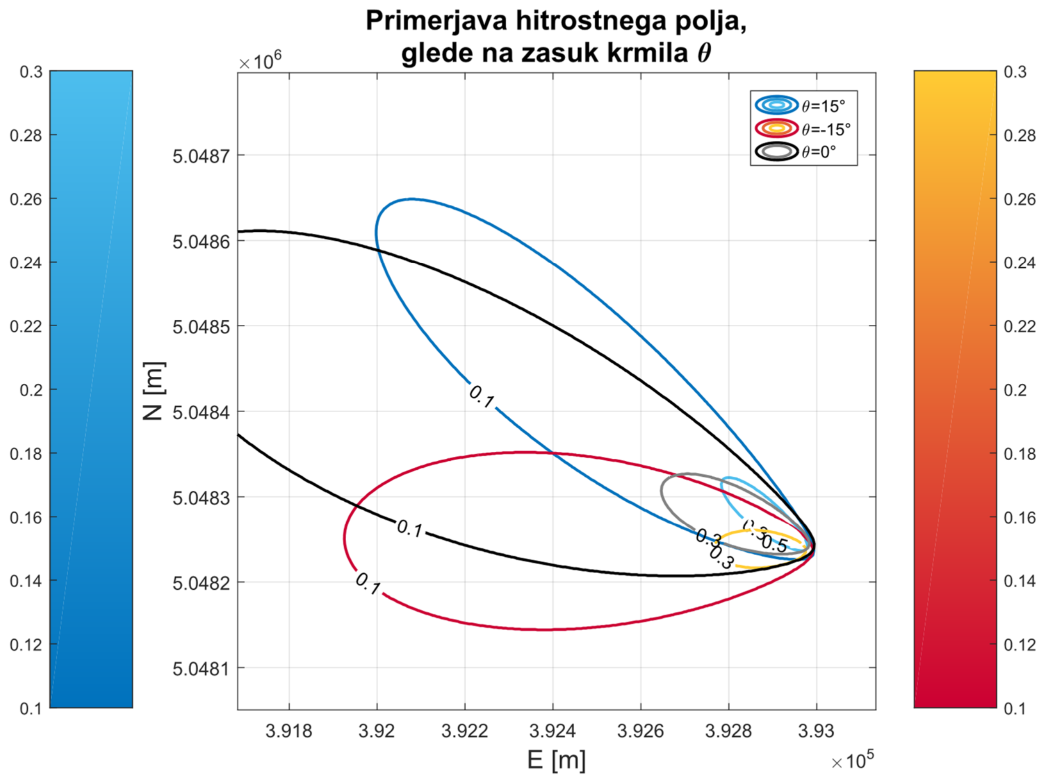
Slika 4.15: Primerjava hitrostnega polja curka vijaka s krmilom (zasuk 15°) in vijaka brez krmila

Figure 4.15: Comparison of the velocity field of the propeller with a rudder (angle 15°) and without a rudder

Rezultate obeh metodologij za vijak s krmilom pri različnih kotih zasuka smo tudi primerjali med seboj, kar je prikazano na slikah 4.16 in 4.17. Na sliki 4.16 se curek vidno premakne v smeri zasuka krmila, sorazmerno s povečanjem kota. Hitrostno polje je simetrično tako za pozitivne kot tudi za negativne zasuke krmila. Zasukani curek na sliki 4.16 ima manjšo magnitudo hitrosti kot nezasukani curek na sliki 4.14. To je posledica zmanjševanja koeficienta α v enačbi (2.57) s povečevanjem kota zasuka krmila θ.

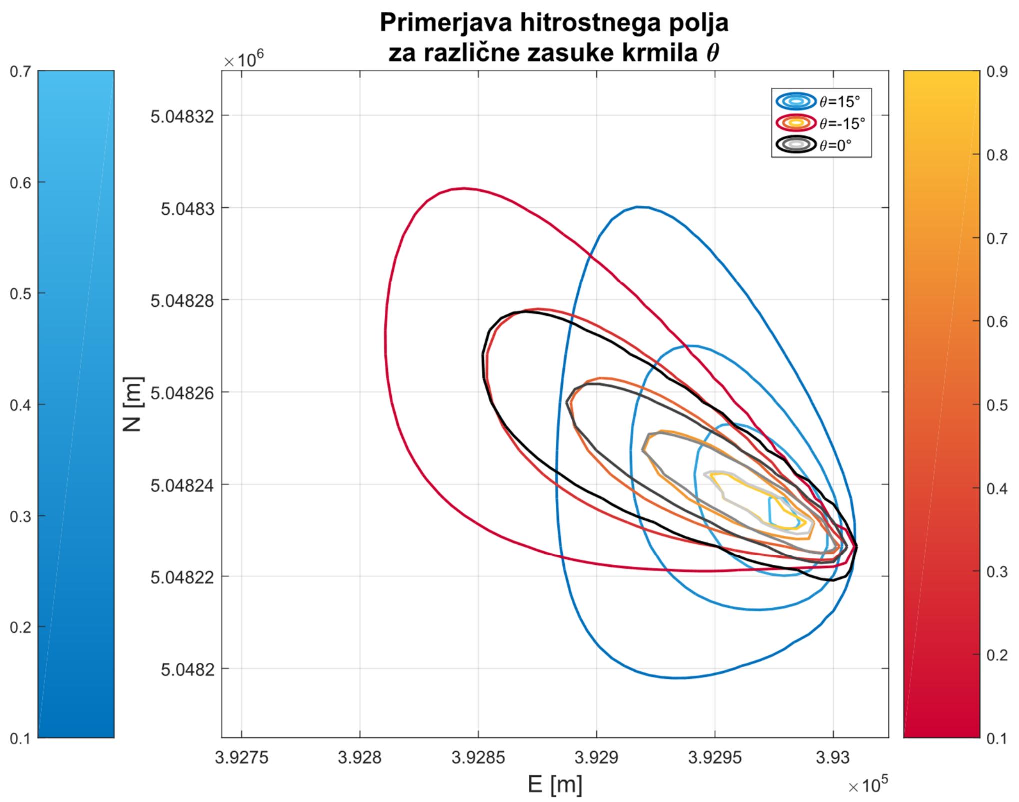
Metodologija Hamill et al. je dosti kompleksnejša in izrazito nesimetrična za različne kote zasuka, kar se odraža tudi na izračunanih hitrostnih poljih (slika 4.17). Z zasukom krmila se spreminjata tako največja hitrost na preseku v_{max} kot tudi pozicija v_{max} v horizontalni in vertikalni ravnini, oboje pa prispeva k spremembi magnitude izračunanih hitrosti.

S slike 4.17 je tudi razvidno, da se hitrostno polje sicer spremeni s spremembo zasuka krmila, vendar pa se smer jedra curka zelo malo spremeni v primerjavi z rezultati na sliki 4.16. Parameter, ki povzroči premik curka v horizontalni ravnini, je R_{mz}, ki je podan z enačbo (2.65). V izvornem članku (Hamill et al., 1998, str. 3628) piše, da je kot zasuka krmila podan v radianih. Z analizo grafa »Figure 5 Measure slope for location of maximum velocity on Z plane at various ruder angles.« iz izvornega članka smo ugotovili, da to ne drži. Kot zasuka je potrebno podati v stopinjah. Kako se predlagani popravek odraža v izračunu, je prikazano na sliki 4.18.



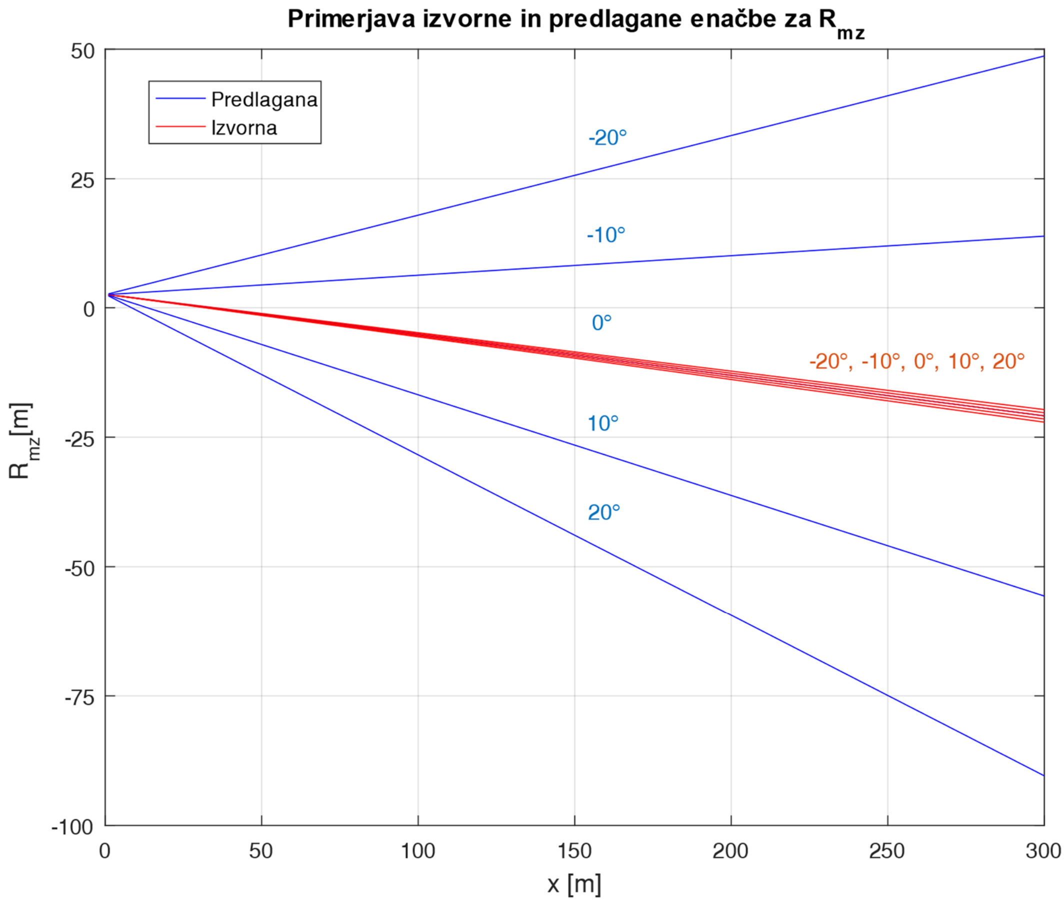
Slika 4.16: Primerjava hitrostnega polja vijaka s krmilom pri različnih kotih zasuka – metodologija Verhey (1983)

Figure 4.16: Comparison of the velocity field for the propeller with a rudder at different angles – metodology Verhey (1983)



Slika 4.17: Primerjava hitrostnega polja vijaka s krmilom pri različnih kotih zasuka – metodologija Hamill et al.

Figure 4.17: Comparison of the velocity field for the propeller with a rudder at different angles – metodology Hamill et al.



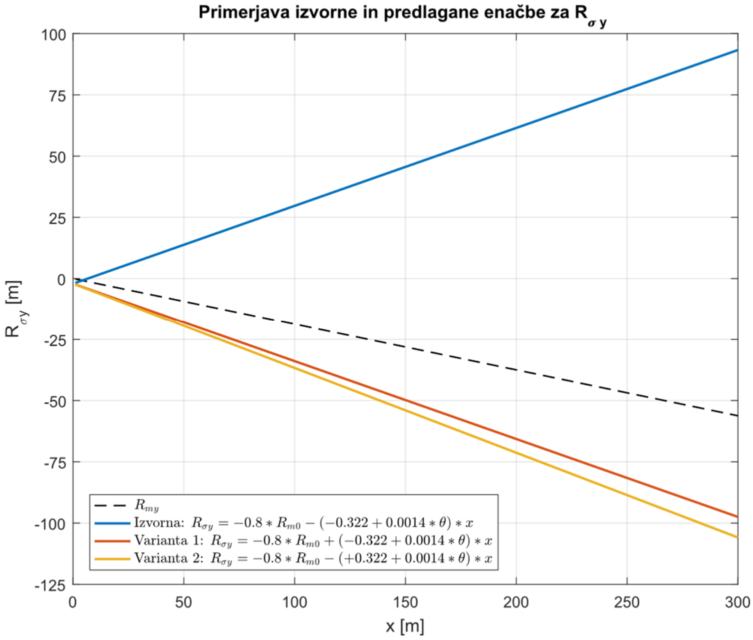
Slika 4.18: Primerjava izračuna R_{mz} po enačbi (2.65) s kotom zasuka krmila, podanim v radianih (Izvorna) in v stopinjah (Predlagana)

Figure 4.18: Comparison of the calculated R_{mz} by equation (2.65) with the rudder angle in radians (Izvorna) and in degrees (Predlagana)

Z nadaljnjim preverjanjem enačb je bila ugotovljena še ena napaka, in sicer v enačbi (2.63) za lokacijo enega standardnega odklona hitrosti vertikalno glede na rotacijsko os $R_{\sigma y}$. Z grafa »Figure 7 Location of standard deviation of velocity on Y plane for a zero rudder angle« (Hamill et al., 1998, str. 3628) je razvidno, da lahko $R_{\sigma y}$ in R_{my} opišemo s padajočo linearno funkcijo. Enačba (2.63) pa je naraščajoča za vse možne kote zasuka krmila. Napačen je torej predznak pred oklepajem na desni strani enačbe ali koeficienta -0.322. Primerjava izvorne enačbe s predlaganima variantama popravljene enačbe je prikazana na sliki 4.19.

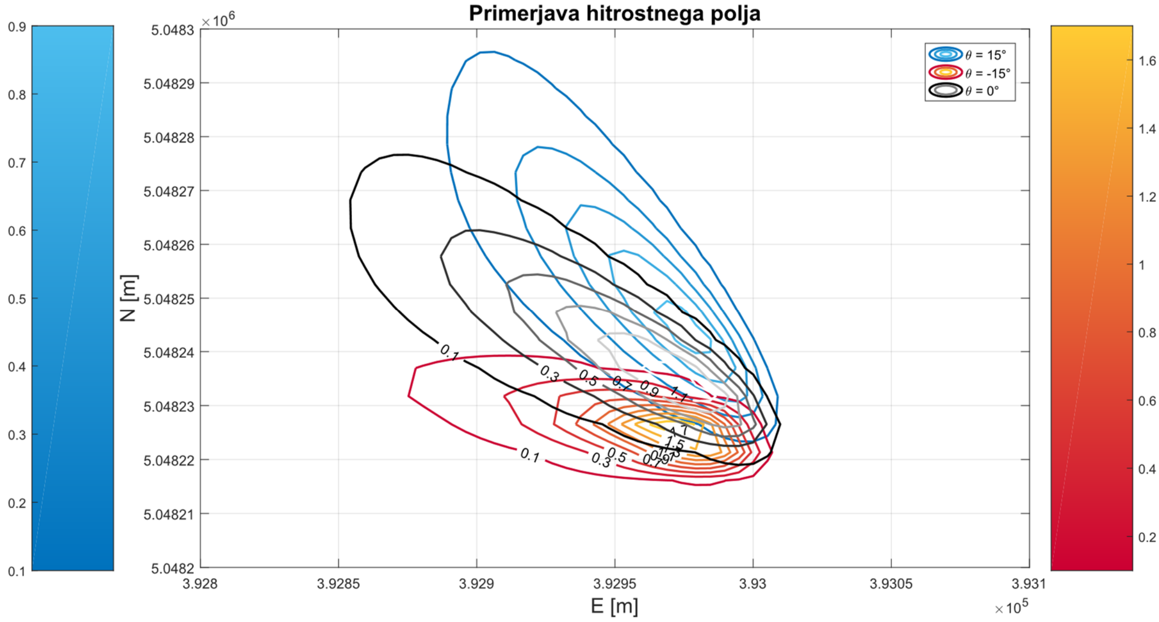
Hitrostno polje, izračunano s predlaganimi popravki enačb, je prikazano na sliki 4.2. V primerjavi s sliko 4.17 je premik curka zaradi zasuka krmila na sliki 4.2 očiten. Doseg curka je na sliki 4.2 v dolžino podoben ($\sim$150 m), v širino pa nekoliko manjši. Magnituda hitrosti je za pozitivne in negativne kote zasuka na sliki 4.2 večja, kar je posledica manjše razlike med $R_{\sigma y}$ in R_{my}.

Zaradi napak, ki so bile odkrite v izvorni literaturi, ter zaradi izrazito manjšega dosega curka v primerjavi z drugimi metodami v izračunih hitrostnega polja curka ladijskega vijaka ob dnu za celotne manevre metodologija Hamill et al. ni bila uporabljena.



Slika 4.19: Primerjava izvorne in dveh predlaganih variant enačbe (2.63) za $R_{\sigma y}$

Figure 4.19: Comparrison of the original (izvorna) and two proposed variants (varianta 1, varianta 2) of equation (2.63) for $R_{\sigma y}$



Slika 4.20: Primerjava hitrostnega polja vijaka s krmilom pri različnih kotih zasuka – metodologija Hamill et al. s predlaganimi popravki enačb

Figure 4.20: Comparison of velocity field for the propeller with a rudder at different angles – metodology Hamill et al. with suggested equation adjustments

4.5 Analiza testnih primerov

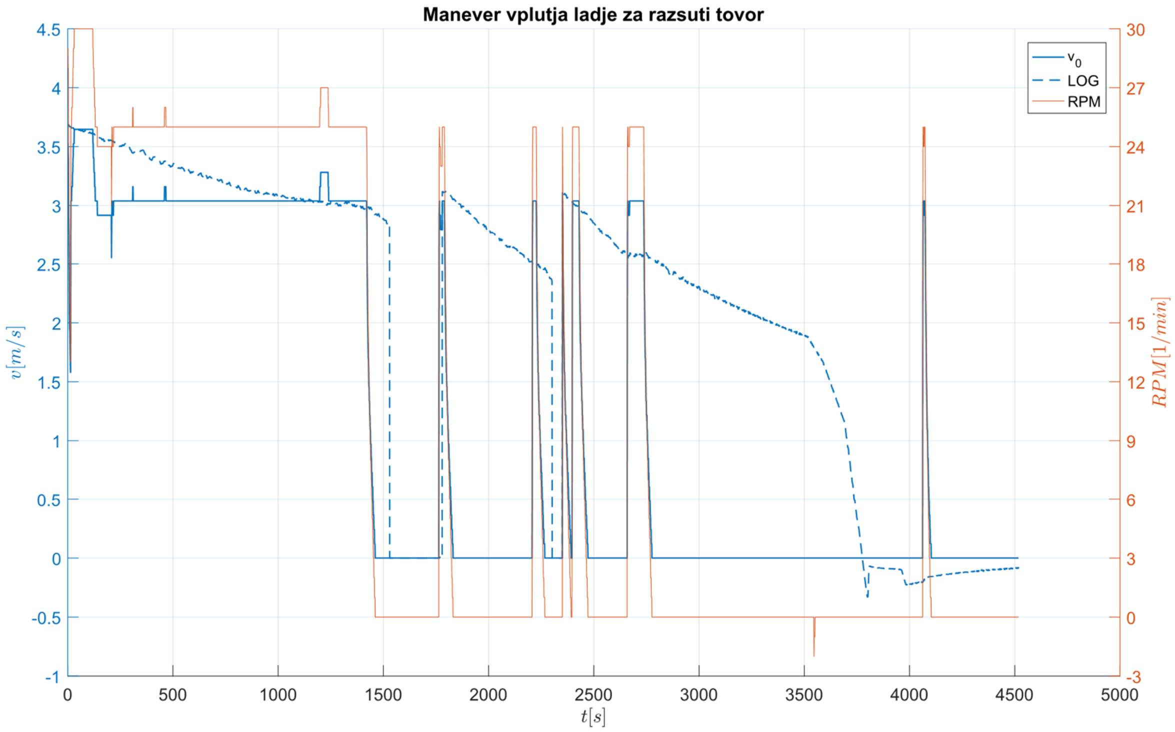
V sklopu naloge so bili testirani trije primeri manevrov v Koprskem zalivu. Pri prvih dveh gre za vplutje ladje za razsuti tovor oziroma kontejnerske ladje v Luko Koper. Pri tretjem primeru gre za izplutje ladje za razsuti tovor, manever pa je bil prirejen tako, da simulira kar se da intruzivno plovbo oziroma najslabši scenarij plovbe. Za vsakega od primerov sta bili izvedeni dve varianti izračuna hitrostnega polja. Spodaj so naštete enačbe, ki so bile uporabljene za posamezno varianto:

a) Brez upoštevanja krmila
    - Iztočna hitrost (2.24);
    - Popravek iztočne hitrosti zaradi gibanja ladje (2.77);
    - Območje nerazvite turbulence (2.58), (2.39);
    - Območje razvite turbulence (2.43), (2.53);
b) Upoštevanje krmila po metodologiji (Verhey, 1983)
    - Iztočna hitrost (2.24);
    - Popravek iztočne hitrosti zaradi gibanja ladje (2.77);
    - Največja hitrost v_{max} (2.57);
    - Hitrostni polje $v_{x,r}$ (2.53).

4.5.1 Vplutje ladje za razsuti tovor

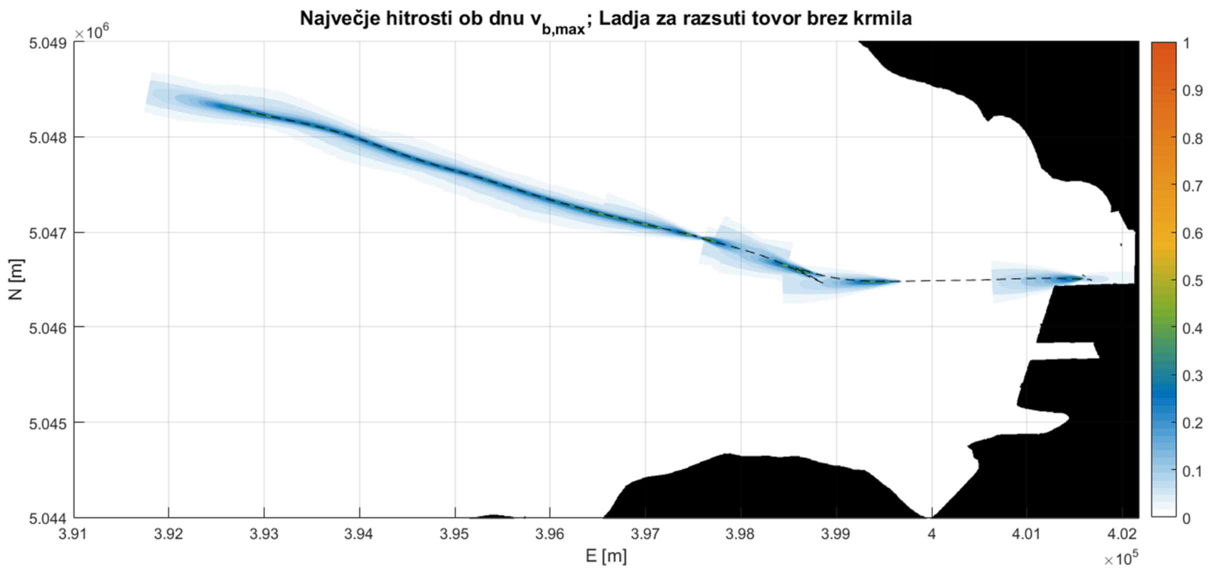
Kot prvega smo obravnavali primer vplutja ladje za razsuti tovor (BC – *ang. Bulk Carrier)* v tretji bazen Luke Koper. Celoten manever traja 4518 s. Podatki o ladji so zbrani v preglednici 3. Kako se s časom spreminja število vrtljajev vijaka (RPM), hitrost ladje glede na vodo (LOG) in iztočna hitrost (v_0), je prikazano na sliki 4.21. S slike je razvidno, da se ladja med manevrom večkrat ustavi in ponovno spluje. Po približno 3800 s ladja prične pluti vzvratno do konca manevra.

Največje izračunane hitrosti ob dnu za varianto manevra a) so prikazani na sliki 4.22, za varianto b) pa na sliki 4.23. Hitrostni polji za obe varianti sta si podobni po magnitudah hitrosti. Največja hitrost ob pomolu Luke Koper je za varianto a) $0.43\ \mathrm{m/s}$, za varianto b) pa $0.47\ \mathrm{m/s}$. Nekoliko višje so hitrosti na odprtem morju, kjer so okrog $0.5\ \mathrm{m/s}$ za obe varianti. Največji izračunani vrednosti sta $0.52\ \mathrm{m/s}$ za a) in $0.55\ \mathrm{m/s}$ za b). Rezultati (Perkovič et al., 2011, str. 107) so od naših izračunanih hitrosti večji za približno 60%.



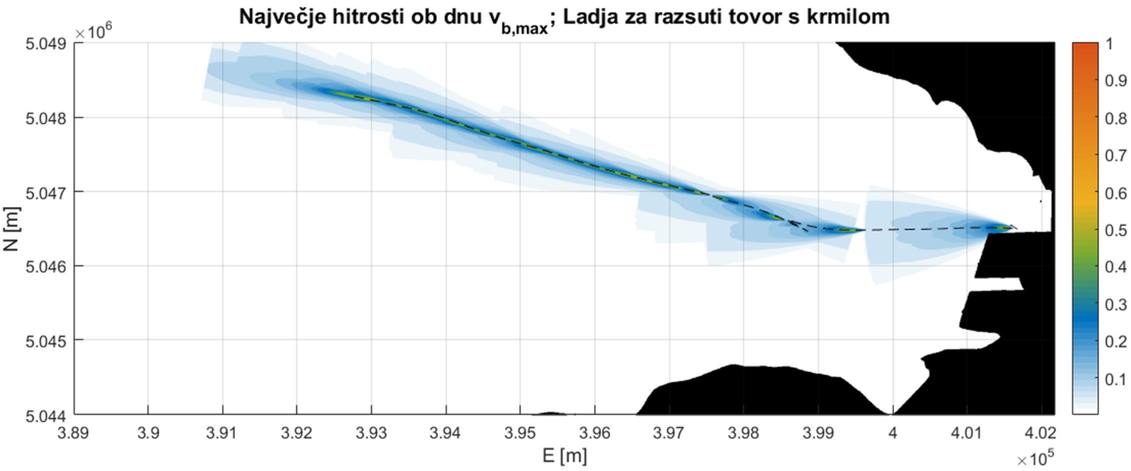
Slika 4.21: Potek števila vrtljajev vijaka (RPM), hitrosti ladje glede na vodo (LOG) in iztočne hitrosti (v_0) prek celotnega manevra vplutja ladje za razsuti tovor

Figure 4.21: Changes of the propeller revolutions (RPM), the ship's speed over water (LOG) and the efflux velocity (v_0) throughout the course of the entire navigation of bulk carrier ship to the port



Slika 4.22: Največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči ladja za razsuti tovor ob vplutju – a) brez upoštevanja krmila

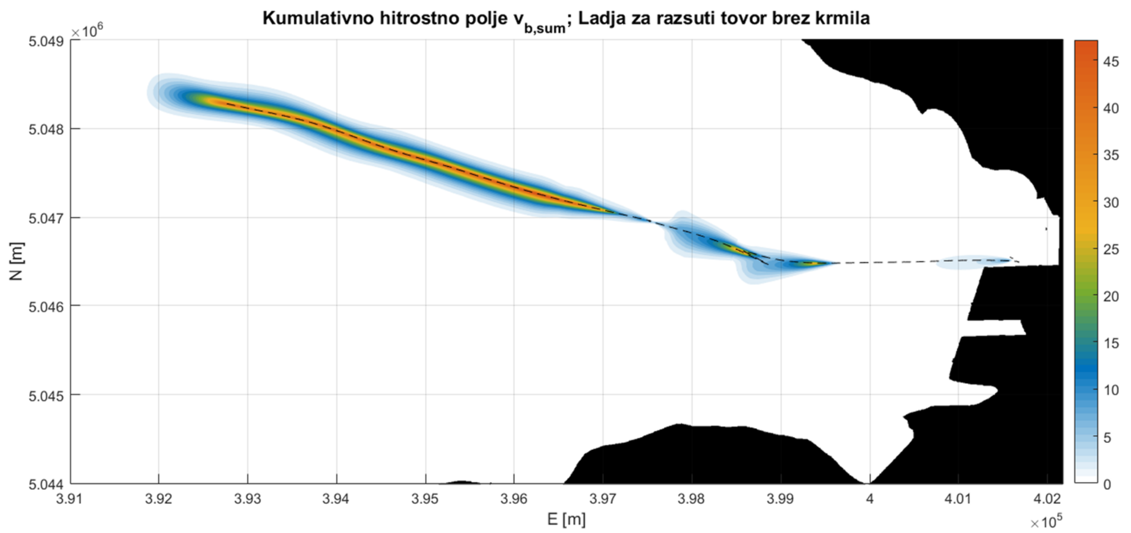
Figure 4.22: Maximum calculated velocities at the seabed $v_{b,max}$, by bulk carrier navigating to port – a) without the rudder effects



Slika 4.23: Največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči ladja za razsuti tovor ob vplutju – b) Upoštevanje krmila po metodologiji (Verhey, 1983)

Figure 4.23: Maximum calculated velocities at the seabed $v_{b,max}$, by bulk carrier navigating to the port – b) Rudder effects according to (Verhey, 1983)

Hitrostno polje najvišjih hitrosti podaja le trenutne najvišje hitrosti, ki zadenejo ob dno. Kolikšna je skupna obremenitev, ki jih v neki točki povzroči curek ladijskega vijaka skozi celoten manever, pa tako ne moremo ugotoviti. Da bi dobili vsaj približno predstavo, kje so najbolj izpostavljena mesta, izrišemo kumulativno hitrostno polje $v_{b,sum}$ (slika 4.24). Same količine sicer nimajo fizikalne osnove in služijo le vizualizaciji obremenjenosti. Vidimo, da je celotni vpliv manevra ob pomolu dosti manjši kot na odprtem morju.



Slika 4.24: Kumulativno hitrostno polje $v_{b,sum}$ ladje za razsuti tovor ob vplutju v Luko Koper – a) varianta: brez krmila

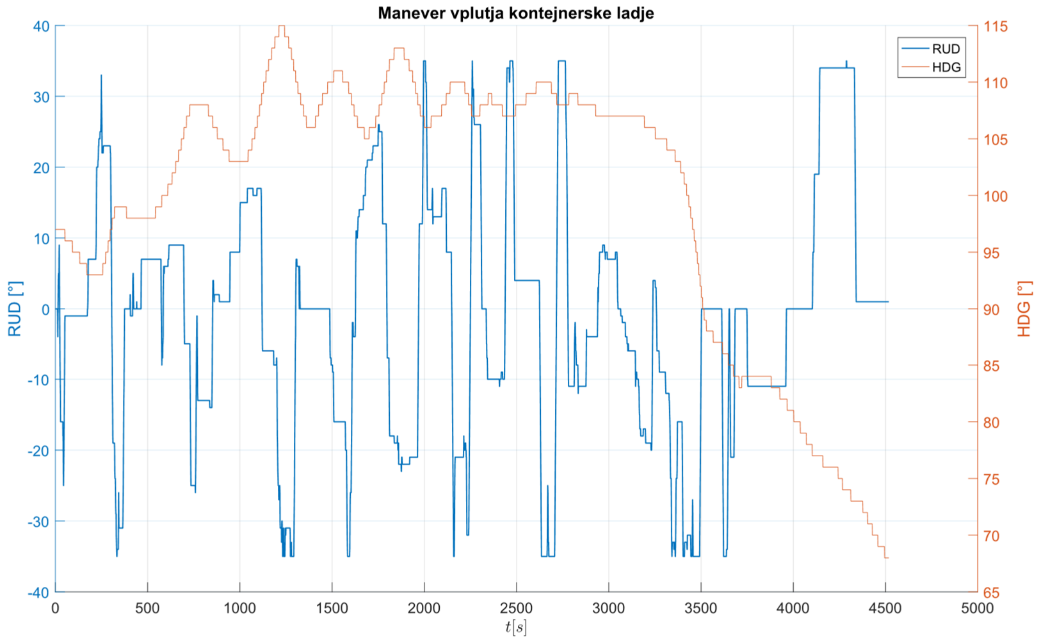
Figure 4.24: Cumulative velocity field $v_{b,sum}$ of a bulk carrier ship at navigation to Luka Koper – a) variant: no rudder

4.5.2 Ladja za kontejnerje

Manever vplutja kontejnerske ladje v prvi bazen Luke Koper traja 4519 s. Podatki o ladji so zbrani v preglednici 3. Potek števila vrtljajev vijaka (RPM), hitrosti ladje glede na vodo (LOG) in iztočne hitrosti (v_0) preko manevra je prikazan na sliki 4.25, potek zasuka krmila (RUD) in smeri plovbe ladje (HDG) pa na sliki 4.26. Ladja cel čas pluje naprej in zmanjšuje svojo hitrost s krajšimi intervali vrtenja vijaka v negativni smeri. Curki, ki ob tem nastanejo, so dobro vidni na izračunanem hitrostnem polju za varianto a) (slika 4.27) in varianto b) (slika 4.28). Na sliki je povečan prikaz hitrostnega polja ob pomolu, kjer hitrosti presežejo 2.1 $\mathrm{m/s}$. Na odprtem morju so hitrosti nižje, pod 0.9 $\mathrm{m/s}$. Primerljive rezultate je pokazala tudi študija (Perkovič et al., 2011, str. 96). Zasuk krmila nenehno niha med pozitivnimi in negativnimi koti. Posledica tega je opazno širše hitrostno polje za varianto b).

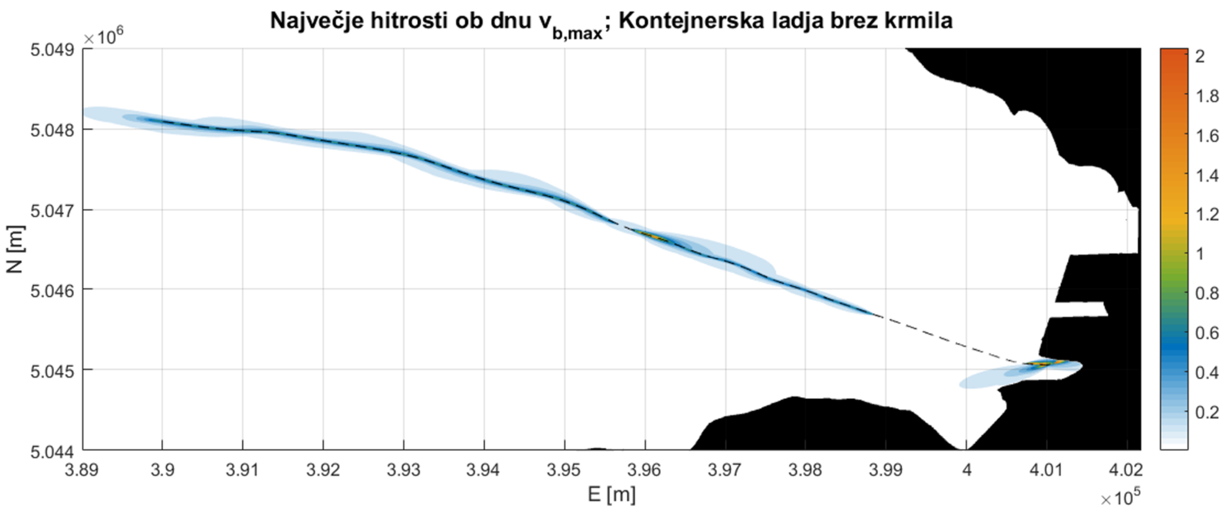
Slika 4.25: Potek števila vrtljajev vijaka (RPM), hitrosti ladje glede na vodo (LOG) in iztočne hitrosti (v_0) prek celotnega manevra vplutja kontejnerske ladje

Figure 4.25: Changes of propeller revolutions (RPM), ship's speed over water (LOG) and efflux velocity (v_0) throughout the course of the navigation of container ship to the port



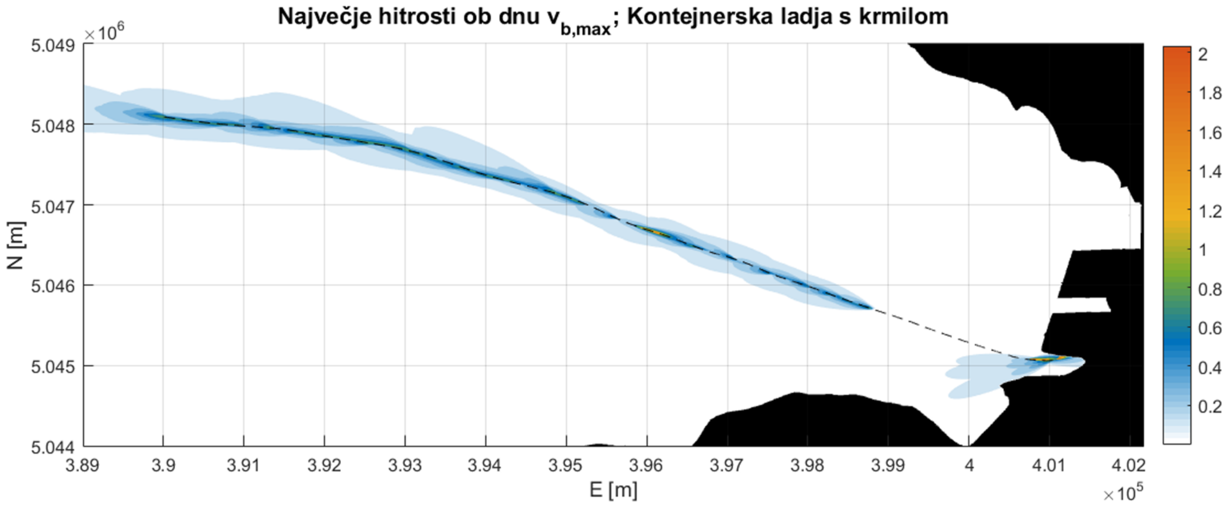
Slika 4.26: Potek zasuka krmila (RUD) in smeri plovbe (HDG) prek celotnega manevra vplutja kontejnerske ladje

Figure 4.26: Changes of the rudder angle (RUD) and the ship heading (HDG) throughout the course of the navigation of container ship to the port



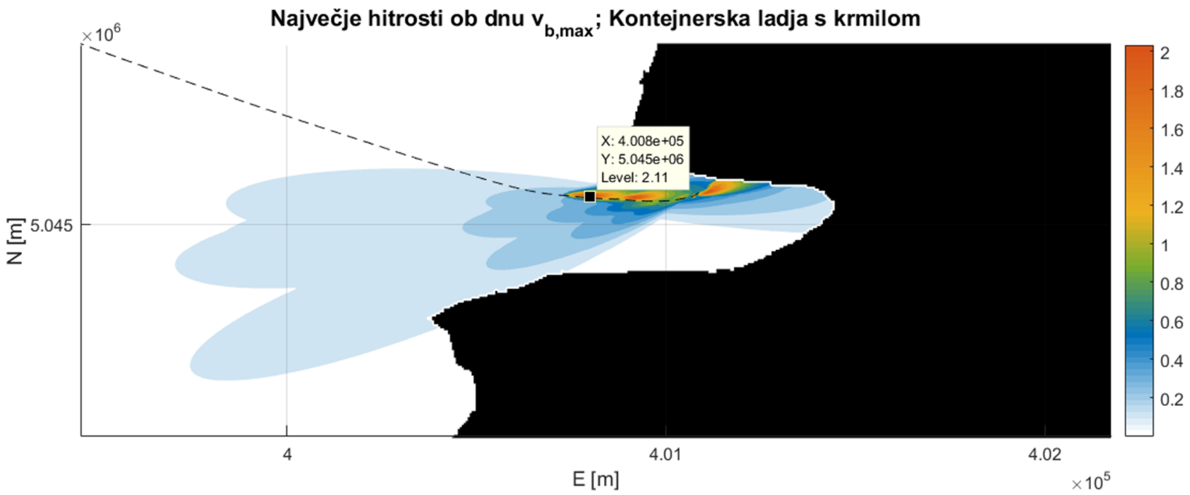
Slika 4.27: Največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči kontejnerska ladja ob vplutju – a) brez upoštevanja krmila

Figure 4.27: Maximum calculated velocities at the seabed $v_{b,max}$, by the container ship navigating to the port – a) without the rudder effects



Slika 4.28: Največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči kontejnerska ladja ob vplutju – b) Upoštevanje krmila po metodologiji (Verhey, 1983)

Figure 4.28: Maximum calculated velocities at the seabed $v_{b,max}$, by container ship navigating to the port – b) Rudder effects according to (Verhey, 1983)

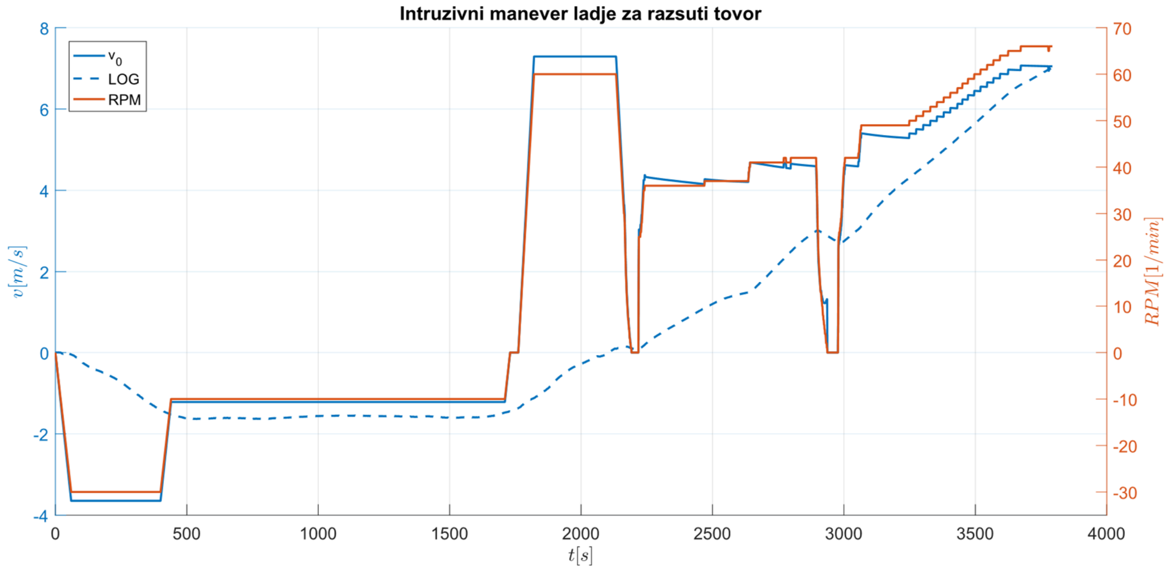


Slika 4.29: Povečan prikaz največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči kontejnerska ladja ob pomolu – b) Upoštevanje krmila po metodologiji (Verhey, 1983)

Figure 4.29: Close-up of maximum calculated velocities at the seabed $v_{b,max}$, by container ship near a berth – b) Rudder effects according to (Verhey, 1983)

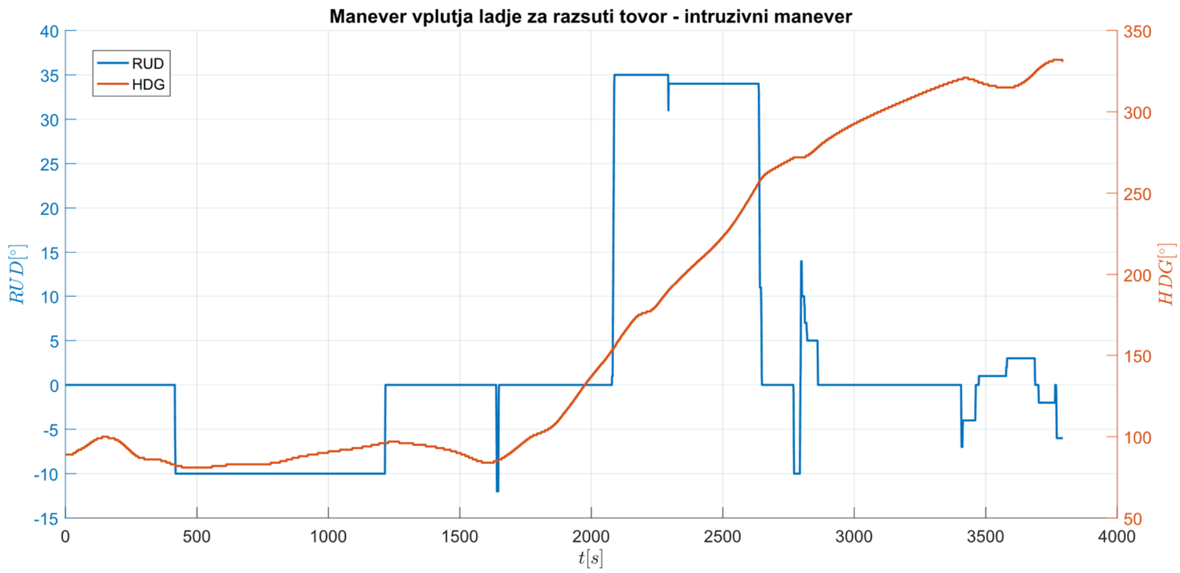
4.5.3 Intruzivni manever

Zadnji testni primer je primer izplutja ladje za razsuti tovor brez pomoči vlačilcev in pretiranim številom vrtljajev vijaka. Ta primer simulira najslabši scenarij in njegove posledice. Celoten manever traja 3793 s. Potek števila vrtljajev vijaka (RPM), hitrosti ladje glede na vodo (LOG) in iztočne hitrosti (v_0) pa je prikazana na sliki 4.3, potek zasuka krmila (RUD) in smeri plovbe (HDG) pa na sliki 4.31.



Slika 4.30: Potek števila vrtljajev vijaka (RPM), hitrosti ladje glede na vodo (LOG) in iztočne hitrosti (v_0) prek celotnega intruzivnega manevra izplutja ladje za razsuti tovor

Figure 4.30: Changes of the propeller revolutions (RPM), ship's speed over water (LOG) and efflux velocity (v_0) throughout the course of the navigation of bulk carrier ship out of the port

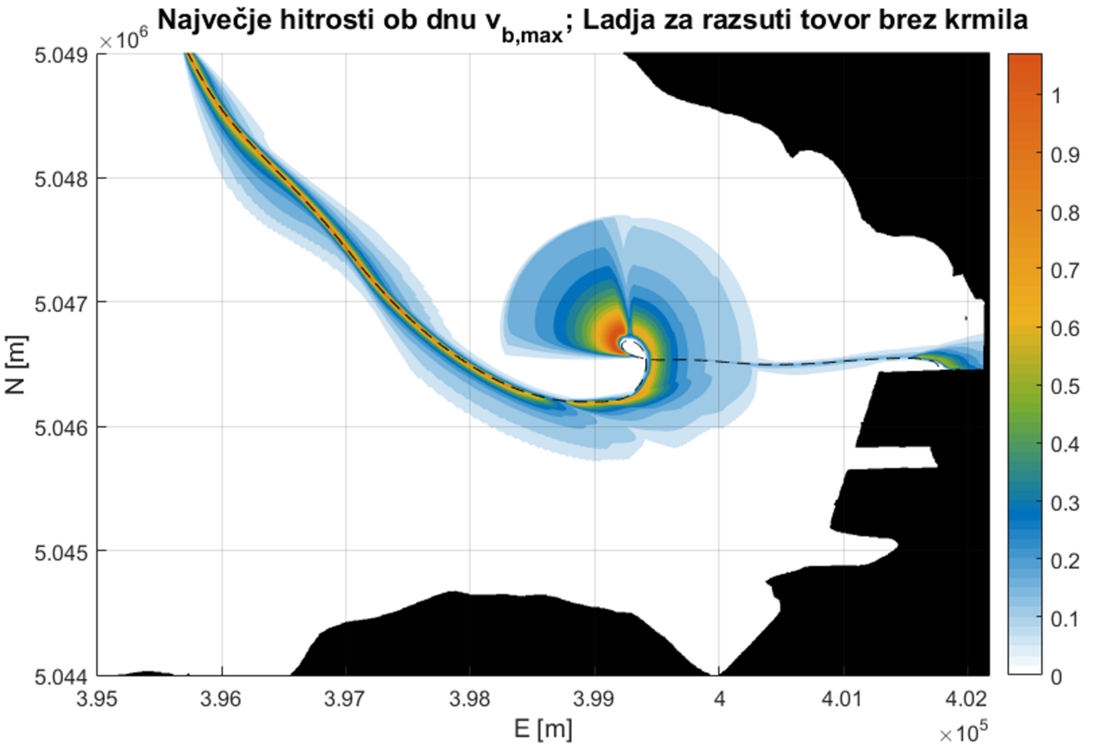


Slika 4.31: Potek zasuka krmila (RUD) in smeri plovbe (HDG) prek celotnega intruzivnega manevra izplutja ladje za razsuti tovor

Figure 4.31: Changes of the rudder angle (RUD) and ship heading (HDG) throughout the course of the navigation of bulk carrier ship out of the port

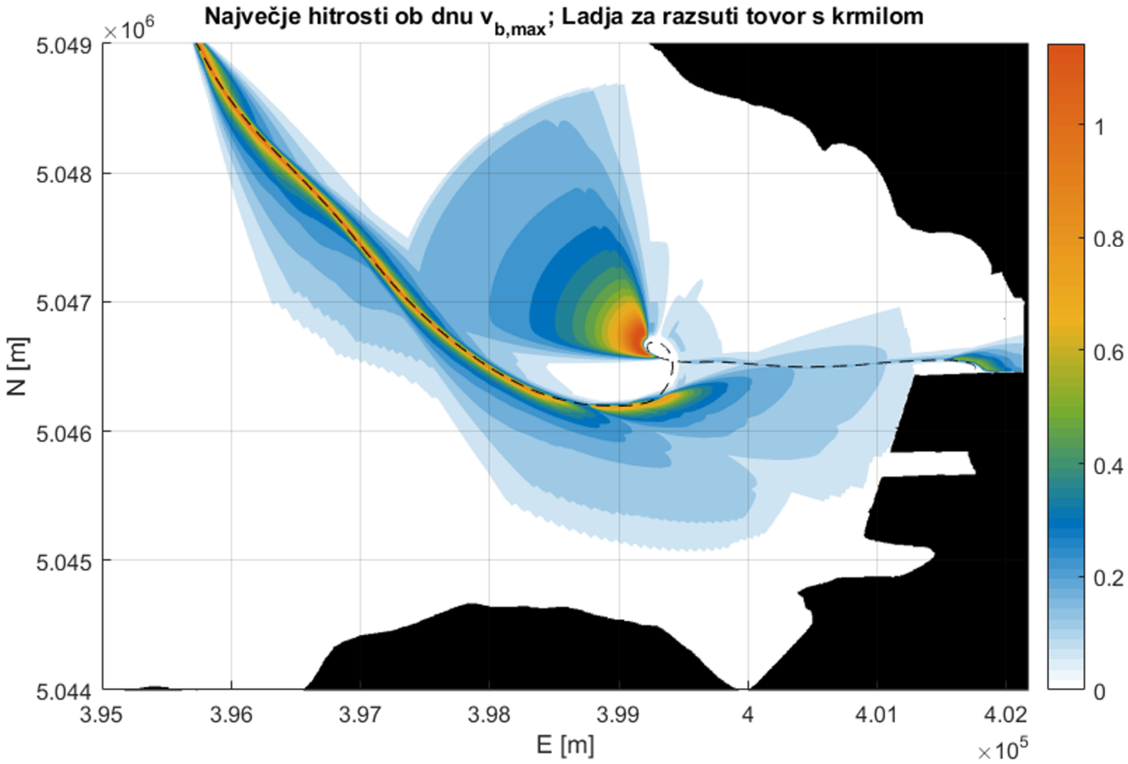
Izračunani hitrostni polji za varianti a) in b) sta na slikah 4.32 in 4.33. Vidimo, da za obe varianti hitrosti skoraj po vsej dolžini plovbe presegajo 1 m/s, največja izračunana hitrost celotnega manevra pa je 1.2 m/s. Ob pomolu hitrosti ne presežejo 0.55 m/s. Lokalno hitrosti za primer vplutja kontejnerske ladje presegajo hitrosti intruzivnega primera, vendar je celotna obremenitev v tem primeru večja. Ne tako velike hitrosti ob pomolu za intruzivni primer so tudi posledica globine tretjega plovnega bazena, ki je večja od prvega bazena iz primera vplutja kontejnerske ladje.

Hitrostni polji za varianti a) in b) sta si po magnitudah zelo podobni, so pa magnitude za varianto a) malenkost manjše – največja izračunana hitrost 1.12 m/s. Očitna pa je razlika v območju, ki ga doseže curek. To je namreč dosti večje za varianto b), ki upošteva premik curka zaradi zasuka krmila.



Slika 4.32: Največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči ladja za razsuti tovor ob izplutju – a) brez upoštevanja krmila, intruzivni primer

Figure 4.32: Maximum calculated velocities at the seabed $v_{b,max}$, by bulk carrier navigating out of port – a) without the rudder effects, intrusive case



Slika 4.33: Največje izračunane hitrosti ob dnu $v_{b,max}$, ki ga povzroči ladja za razsuti tovor ob izplutju – b) Upoštevanje krmila po metodologiji (Verhey, 1983), intruzivni primer

Figure 4.33: Maximum calculated velocities at seabed $v_{b,max}$, by bulk carrier navigating out of the port – b) Rudder effects according to (Verhey, 1983), intrusive case

5 ZAKLJUČEK

V sklopu tega dela je bil izdelan model curka ladijskega vijaka v programskem okolju MATLAB. Njegov glavni namen je primerjava različnih enačb iz literature, ki opisujejo širjenje turbulentnega vodnega curka, ki ga povzroča ladijski vijak. Model je možno uporabiti za poljubno ladjo, ki opravi manever znotraj območja izbrane batimetrije.

Rezultat izračunov modela je hitrostno polje curka ladijskega vijaka ob dnu ali na ravnini izbrane globine. Do rezultatov pridemo tako, da za vsak časovni korak najprej izračunamo iztočno hitrost v_0, nato pa za vsako točko računske mreže na delovnem območju izračunamo največjo hitrost na prerezu v_{max} in na koncu hitrost v posameznih točkah. Model deluje v dveh glavnih načinih, in sicer z upoštevanjem krmila in brez upoštevanja krmila ladje. Vse izračunane hitrosti ne glede na zasuk krmila so v smeri rotacijske osi vijaka.

Hitrostno polje vsakega posameznega časovnega koraka se shrani v spremenljivko `vbt`. Izračuna se še `vb_max`, ki hrani največje izračunane hitrosti za posamezne točke, in `vb_sum`, ki hrani seštevek vseh hitrosti, izračunanih za posamezno točko. Vse spremenljivke je možno izvoziti v tekstovne datoteke in jih lahko uporabimo kot vhodne podatke v drugih modelih, kot je na primer PCFLOW3D. Model je prilagodljiv in modularno zastavljen, zato lahko uporabnik izbira med različnimi enačbami oziroma seti enačb za posamezen del izračuna. Primerjave različnih naborov enačb, ki so predstavljene v tem delu, kažejo na to, da so rezultati lahko očitno različni.

Dober primer razhajanja rezultatov je izračun iztočnih hitrosti, kjer se lahko rezultati razlikujejo za 65% pri nezaščitenih in skoraj za 100% pri zaščitenih vijakih. To pomeni, da so lahko le zaradi drugačne izbire ene enačbe končne izračunane hitrosti ob dnu dvakrat večje. Za vse nadaljnje izračune smo uporabili enačbo (2.31). Vrednosti, ki jih daje ta enačba tako za zaščitene kot tudi za nezaščitene vijake, so namreč najbližje povprečni vrednosti vseh preostalih metod. Bolje se med seboj ujemajo rezultati enačb za spremembo iztočne hitrosti zaradi gibanja ladje.

Albertson et al. (1950) so curek ladijskega vijaka razdelili na območje nerazvite ter območje razvite turbulence. S to trditvijo se tudi večina drugih avtorjev strinja, mnenja pa se razhajajo o tem, kako dolgo je območje razvite turbulence x_0 in kako se spreminja največja hitrost na prerezu v_{max} z aksialno oddaljenostjo od iztočne ravnine vijaka. Ni torej presenetljivo, da je ravno za ti dve količini v literaturi podanih največ enačb. Primerjave, ki so predstavljene v poglavju 4.3, kažejo, da so lahko rezultati teh enačb povsem različni. Nekatere enačbe so si med seboj podobne in tudi dajejo podobne rezultate. Največje razlike so pri večjih razdaljah od vijaka. Večina enačb je bila namreč razvitih na podlagi meritev, izvedenih na fizičnih modelih do razdalje $x/D_p = 10$. Ekstrapolacija prek te razdalje je zato problematična. Izbira enačbe za v_{max} se direktno odraža v dosegu curka, kot je lepo vidno na slikah 4.1 in 4.11.

Vse enačbe za izračun hitrosti v izbrani točki $v_{x,r}$ iz pregledane literature sledijo osnovni ugotovitvi (Albertson et al., 1950), da lahko širjenje turbulentnega curka opišemo z Gaussovo porazdelitveno funkcijo. Razlike med rezultati primerjanih enačb so majhne. Za izračun vseh manevrov ladij sta bili izbrani enačba (2.39) na območju nerazvite turbulence in enačba (2.53) na območju razvite turbulence.

V poglavju 2.5 predstavljeni metodologiji za opis curka ladijskega vijaka s krmilom sta bili obsežno testirani. Metodologija po (Verhey, 1983) je preprosta in iz izračunov (slika 4.16) je zasuk curka v smer zasuka krmila jasno viden. Metodologija po (Hamill et al., 1998; Hamill in McGarvey, 1996) je precej kompleksnejša in opisuje premik lokacije največje hitrost curka tako v horizontalni kot tudi v vertikalni ravnini. Predstavljene enačbe so bile izvedene iz meritev na fizičnem modelu do razdalje $x/D_p = 10$ in so se v preizkusih izkazale kot neprimerne za opis curka ladijskega vijaka za ploveče ladje. Poleg tega smo v izvornih člankih našli nedoslednosti, ki so opisane v poglavju 4.4 skupaj s predlaganimi popravki. Zaradi naštetih razlogov ta metodologija ni bila uporabljena za obravnavo testnih primerov. Iz analize testnih primerov lahko sklepamo, da je odklonilni vpliv krmila na curek pomemben dejavnik, ki ga velja upoštevati.

Preizkušeni testni primeri so pokazali, da je izdelani model mogoče uporabiti za simulacije različnih manevrov za različne ladje. Izračunana hitrostna polja so primerljiva z rezultati (Perkovič et al., 2011; Ramšak, 2013). Hitrosti za primera vplutja ladje za razsuti tovor in kontejnerske ladje ne presežejo $1.0\ \mathrm{m/s}$, razen mestoma v primeru s kontejnersko ladjo. Za najbolj problematično se je izkazalo pristajanje kontejnerske ladje ob pomolu v prvem plovnem bazenu Luke Koper. Primer intruzivnega manevra pa prikazuje simulacijo vpliva neodgovornega krmarjenja ladje na hitrosti ob morskem dnu. Izračun je pokazal, da bi se v takem primeru hitrosti ob dnu na večjem območju povečale tudi za več kot 100% glede na primer vplutja ladje za razsuti tovor.

O točnosti izračunov izdelanega modela je težko soditi, saj razen rezultatov drugih modelov nimamo podatkov, na katere bi se lahko oprli. Da bi izdelani model lahko uporabili za napovedovanje privzdigovanja sedimentov, bi bile nujno potrebne meritve hitrosti ob dnu na realnih primerih. Z gotovostjo pa lahko trdimo, da je z enačbami iz literature možno modelirati vpliv curka ladijskega vijaka na morsko dno, vendar lahko različne enačbe dajo značilno različne rezultate.

Pred uporabo modela bo tega potrebno umeriti na meritvah v naravi. Temu lahko sledi nadgradnja modela z možnostjo izračuna poleg aksialne tudi radialne in tangencialne komponente hitrosti. Dodati je možno tudi metode za izračun hitrostnega polja drugih pogonskih sistemov ladij, kot so pogon Voith Schneider, pogon z vodnim curkom (*ang. water jet)* in črpalnim pogonom (*ang. pump jet*). Hitrostno polje curka teh sistemov je slabše raziskano, vendar v literaturi obstajajo enačbe, ki ga opisujejo (MarCom Working Group 180, 2015).

6 SUMMARY

As part of this thesis, a model of the ship's propeller wash has been made in MATLAB computing environment. Its main purpose is to compare different equations in literature that describe the diffusion of turbulent water jet produced by the ship propeller. The model could be used for any ship manoeuvring inside the area of chosen bathymetry.

The result of the model calculations is a velocity field of the propeller wash at the sea bed or on the horizontal plane of a chosen depth. The results are calculated in the following steps: for each time step efflux velocity v_0 is first calculated, then the maximum velocity v_max is calculated for each point in the calculation grid in the region of interest and finally the velocity at a selected point is calculated. The model works in two main modes, which are with and without the consideration of a ship's rudder. All calculated velocities, regardless of a rudder angle, are in the direction of the propeller rotation axis.

The velocity field of each time step is saved in variable vbt. vb_max, that stores the highest calculated velocity for each point, and vb_sum, that stores the sum of all velocities, calculated at specific point, are also calculated. All variables can be exported to text files and can be used as an input in other models, such as PCFLOW3D. the model is flexible and modular so that a user can choose between different equations or sets of equations for each part of the calculation. The comparisons with different sets of equations presented in this thesis shows that given results are significantly different.

A good example of diverging results is the calculation of efflux velocity, where results can vary for 65% at unducted propellers and for nearly 100% at ducted propellers, which means that the different choice of one equation could lead to two times greater calculated velocities at the sea bed. For all proceeding calculations, equation (2.31) has been used. The velocities calculated by this equation are the nearest to the average of velocities calculated by all other methods for both ducted and unducted propellers. Much more comparable are the results of equation for the consideration of an advancing ship.

Albertson et al. (1950) divided the propeller wash into the zone of a flow establishment and the zone of an established flow. Most of other authors agree with this statement, but the views differ on how long is the zone of the flow establishment x_0 and how maximum velocity v_max decays with distance from efflux plane. It is not surprising that for these two variables there most different equations exist. The comparisons presented in chapter 4.3 show, that the results of these equations can be significantly different. Some equations are similar and give comparable results. Greatest differences were observed at longer distances from propeller. Most of the equations were proposed based on measurements on physical models up to the distance x⁄D_p =10. Extrapolation beyond this distance is therefore problematic. Chosen equation for v_max is directly linked to the reach of the wash, as is shown in figures 4.1 and 4.11.

All equations for the calculation of velocity at a specific point v_(x,r) from the reviewed literature follow the initial finding (Albertson et al., 1950) that the diffusion of turbulent jet could be described by Gauss probability function. Differences between the results of the compared equations are small. All test manoeuvres were calculated by equation (2.39) in the zone of flow establishment and by equation (2.53) in the zone of established flow.

Two methodologies describing the effect of a rudder on the propeller wash that are presented in chapter 2.5, have been extensively tested. The methodology after (Verhey, 1983) is simpler and from calculations (figure 4.16) is jet deflection in the direction of the rudder clearly visible. The methodology after (Hamill et al., 1998; Hamill and McGarvey, 1996) in much more complex and describes a shift in the location of maximum velocity in a horizontal and vertical plane. The presented equations were derived from the measurements on a physical model for distances up to x⁄D_p =10 and have proven during testing that they are unsuitable for the calculation of the propeller wash for sea going ships. Some inconsistences in the source articles have also been found and are discussed in chapter 4.4 together with proposed corrections. Because of the described problem, this methodology was not used for the analysis of test cases. From the analysis of the test cases, we can assume that the rudder deflection effect on propeller jet is a crucial factor and should not be neglected.

The test cases have shown that the developed model could be used for the simulation of different manoeuvres for different ships. The calculated velocity fields are comparable with the results of (Perkovič et al., 2011; Ramšak, 2013). In the cases of a bulk carrier and a container ship navigation to the port, velocities do not exceed 1.0 m/s, except locally in the case of a container ship. The berthing of a container ship at the pier in the first navigation basin of Port of Koper has turned out to be the most problematic. The test case of the intrusive manoeuvre is a simulation of irresponsible navigation on the velocities on the sea bed. Calculations show that in this case velocities at the sea bed would increase for even more than 100% on a larger area by comparison with the test case of the bulk carrier navigating to the port.

It is hard to judge the accuracy of the devised model, as beside the results of other models, no data are available to compare with the calculations. Before we could use the devised model for predicting sediment resuspension, measurements at the sea bed in real cases are necessary. But we can say with certainty that it is possible to model the effects of the propeller wash on the sea bed with equations proposed in literature, however different equations could produce significantly different results.

Before the use of the devised model, the calibration on measurements in nature should be made. After that it could be upgraded with an option for calculating not only axial but also radial and tangential component of velocity. Furthermore, new methods for the calculations of the velocity field for other propulsion types, like Voith Schneider, water jet and pump jet, could be incorporated. The velocity field of jet produced by these systems is less examined, but the equations that describe them can be found in literature (MarCom Working Group 180, 2015).

VIRI

Albertson, M.L., Jensen, R.A., Rouse, H., 1950. Diffusion of submerged jets. New York, American society of civil engineers.

Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ (Germany), 2015. Recommendations of the committee for waterfront structures harbours and waterways EAU 2012., 9th Edition. ed. Berlin, Ernst & Sohn.

Blaauw, H.G., van de Kaa, E.J., 1978. Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of maneuvering ships, v: Publication 202. Netherlands, Delft Hydraulics Laboratory.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2011. Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB). URL: http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAW CodeofPractice_Principles_Bank_Bottom_Protection_Inland_Waterways_GBB_2010.pdf (Pridobljeno 20.4.2017)

Fuehrer, M., Römish, K., 1977. Effects of modern ship traffic on islands and ocean waterways and their structures, v: Proceedings of 24th Congress P.I.A.N.C. Leningrad. Bruselj. The World Association for waterborne Transport

Hamill, G.A., Johnston, H.T., 1993. The decay of maximum velocity within the initial stages of a propeller wash. Journal of Hydraulic Research 31, 605–613. doi:10.1080/00221689309498774

Hamill, G.A., Kee, C., 2016. Predicting axial velocity profiles within a diffusing marine propeller jet. OE Ocean Engineering 124, 104–112. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.07.061

Hamill, G.A., Kee, C., Ryan, D., 2015. Three-dimension efflux velocity characteristics of marine propeller jets. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Maritime Engineering 168, 62–75. doi:10.1680/maen.14.00019

Hamill, G.A., McGarvey, J.A., 1996. Designing for Propeller Action in Harbours. 25th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers http://dx.doi.org/10.1061/9780784402429.346

Hamill, G.A., McGarvey, J.A., Hughes, D.A.B., 2004. Determination of the efflux velocity from a ship's propeller. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering 157, 83–91. doi:10.1680/maen.2004.157.2.83

Hamill, G.A., McGarvey, J.A., Mackinnon, P.A., 1998. A method for estimating the bed velocities produced by a ship's propeller wash influenced by a rudder, Proceedings of 26th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark. Restov, VA. American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784404119.276

Inštitut za vode Republike Slovenije, 2013. Načrt upravljanja morskega okolja - Začetna presoja morskih voda v pristojnosti Republike Slovenije - Prevladujoče obremenitve in vplivi. URL: http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/NUMO_pritiski_in_vplivi.pdf

Kee, C., Hamill, G.A., Lam, W.-H., Wilson, P.W., 2006. Investigation of the Velocity Distributions Within a Ship's Propeller Wash, v: ISOPE-I-06-118. ISOPE, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Lam, W., Hamill, G.., Song, Y.C., Robinson, D.J., Raghunathan, S., 2011a. Experimental investigation of the decay from a ship's propeller. China Ocean Eng China Ocean Engineering 25, 265–284.

Lam, W., Hamill, G.A., Song, Y.C., Robinskon, D.J., Raghunthan, S., 2011b. A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet. Ocean Engineering 38, 1–10.

Lam, W.-H., Hamill, G.A., Robinson, D., Raghunathan, S., 2010. Observations of the initial 3D flow from a ship's propeller. Ocean Engineering 37, 1380–1388. doi:10.1016/j.oceaneng.2010.07.008

Luka Koper, d. d., 2017. Statistika pretovora. URL: https://luka-kp.si/slo/statistika-pretovora (pridobljeno 23.2.17).

Luka Koper, d. d., 2015. Povzetek Poslovne strategije družbe in Skupine Luka Koper do 2030 ter Strateškega poslovnega načrta družbe in Skupine 2016 – 2020. URL: https://luka-kp.si/libs/download.php?file=/c4e7482e5bd4cc1ff780c7b46ccab94a (pridobljeno 20.4.17)

Malačič, V., Petelin, B., Žagar, D., Bajt, O., Ramšak, A., Vodopivec, M., Čermelj, B., 2010. Cirkulacija in okoljske razmere v Koprskem zalivu in Luki Koper: Fazno poročilo 4. Naročnik: Luka Koper d.d., izvajalec: Nacionalni inštitut za biologijo.

MarCom Working Group 180, 2015. Guidelines for protecting berthing structures from scourcaused by ships (No. MarCom Report 180). Bruselj. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

Moffatt & Nichol, 2005. Kitimat LNG import terminal Vancouver, BC, Canada, Propeller Wash Study, Revised, Moffatt and Nichol, 19 pp.

Ogorelec, B., Mišič, M., Faganeli, J., Stegnar, P., Vrišer, B., Vukovič, A., 1988. Recentni sediment Koprskega zaliva = The recent sediment of the Bay of Koper (Northern Adriatic). Geologija 87–121.

Orpin, A.R., Ridd, P.V., Thomas, S., Anthony, K.R.N., Marshall, P., Oliver, J., 2004. Natural turbidity variability and weather forecasts in risk management of anthropogenic sediment discharge near sensitive environments. Marine Pollution Bulletin, 49 602–612.

Perkovič, M., Batista, M., Jankowski, S., 2011. Vpliv predvidenega povečanja ladijskega prometa na varnost in okolje Tržaškega zaliva; študija. Portorož, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet.

Rajar, R., Četina, M., 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. Ecological Modelling 101, 195–207. doi:10.1016/S0304-3800(97)00047-1

Rajar, R., Četina, M., Širca, A., 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. Ecological Modelling 101, 209–228. doi:10.1016/S0304-3800(97)00052-5

Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M., 2004. Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. Ecological Modelling 171, 139–155. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.08.001

Rajaratnam, N., 1976. Turbulent Jets, Developments in Water Science. Elsevier Science.

Ramšak, V., 2013. Numerično modeliranje tokov onesnažil med okoljskimi segmenti (Doktorska disertacija). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Ramšak), f. 164.

Ryan, D., Hamill, G.A., 2013. Determining Propeller Erosion at the Stern of a Berthing Ship. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 139, 247–255. doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000151

Statistični urad Republike Slovenije, 2017. Pomorski promet. Podatkovni portal Si-STAT. URL:http://pxweb.stat.si/pxweb/Database/Ekonomsko/22_transport/04_22194_pomorski_transport/04_22194_pomorski_transport.asp (pridobljeno 20.2.17).

Stoshek, O., Precht, E., Larsen, O., Jain, M., Yde, L., Ohle, N., Strotmann, T., 2014. Sediment resuspension and seabed scour indusced by ship-propeller wash. V: PIANC World Congress. San Francisco 2014, USA. PIANC. 18 str.

Verhey, H.J., 1983. The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propeller jet behind ships. Predstavljeno na 8th International Harbour Congress, Antwerpen, Belgium.

Žagar, D., 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb zivega srebra v morskem okolju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar), f. 101.

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G., Četina, M., 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. Marine Chemistry 107, 64–88. doi:10.1016/j.marchem.2007.02.007

Žagar, D., Ramšak, V., Jeromel, M., Perkovič, M., Ličer, M., Malačič, V., 2014. Modelling sediment resuspension caused by navigation, waves and currents (Gulf of Trieste, Northern Adratic). V: 3rd IAHR Europe Congress: book of proceedings, 2014, Porto - Portugal. IAHR: 9 str.

Žagar, D., Ramšak, V., Petelin, B., Malačič, V., 2012. Sediment transport modelling in the Koper bay - Northern Adriatic Slovenia. V: Rutschmann, P. (ur.), Grünzner, M. (ur.), Hötzl, S. (ur.). 2nd IAHR Europe Conference, 27.-29.6.2012, Munich, Germany. IAHR: 6 str.