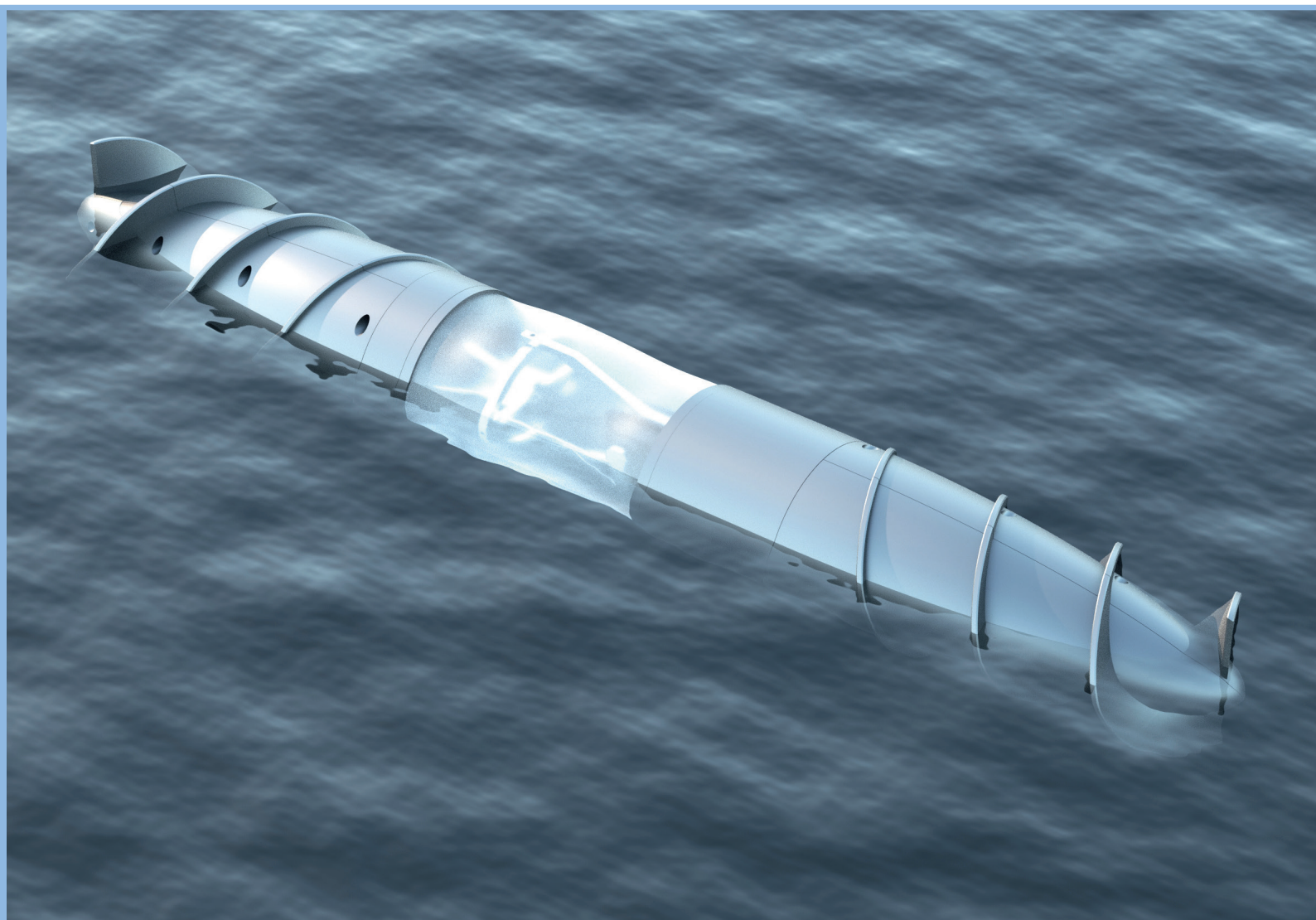


**Mārcis Eimanis**

# **DUBULTHELIKOĪDĀS PIEDZIŅAS PRINCIPA PIELIETOJUMS ZEMŪDENS TRANSPORTLĪDZEKĻOS**

Promocijas darbs



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

**Mārcis Eimanis**

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**DUBULTHELIKOĪDĀS PIEDZIŅAS PRINCIPA  
PIELIETOJUMS ZEMŪDENS  
TRANSPORTLĪDZEKĻOS**

**Promocijas darbs**

Zinātniskais vadītājs  
profesors, *Dr. sc. ing.*  
JĀNIS AUZIŅŠ

RTU Izdevniecība  
Rīga 2022

## **PATEICĪBAS VĀRDI**

Vēlos izteikt visdziļāko pateicību savam darba vadītājam profesoram Dr.sc.ing. Jānim Auziņam ne tikai par atbalstu promocijas darba tapšanā, bet arī par ilggadēju motivēšanu turpināt iesākto darbu, ne reizi neatsakot lūgumam pēc padoma vai palīdzības.

Vēlos arī izteikt pateicību par atbalstu ilggadējam Mehānikas institūta direktoram prof. Dr. habil.sc.ing. Jānim Vībam.

Kā arī nenovērtējamu “Paldies!” vēlos izteikt visai manai plašajai ģimenei - kā pašiem tuvākajiem, tā arī visiem radiem un tuviniekiem, kas vienmēr ir interesējušies par studiju progresu un ir mani atbalstījuši kā vien spēj visā studiju gaitā.

## ANOTĀCIJA

Darbs veltīts autora izstrādātam jaunam zemūdens transportlīdzekļa piedziņas veidam. Pētīta plūsmas un transportlīdzekļa mijiedarbības dinamika, kā arī apskatīti plūsmas ietekmējoši faktori, vadības metodes un spēja pārvietoties arī citās vidēs, ne tikai pa šķidrumu. Tiek izveidota piedziņas sistēmas ģeometrija, kuras hidrodinamiskās īpašības tiek pētītas ar speciālas CFD programmatūras palīdzību. Izveidots vadības sistēmas matemātiskais modelis. Zemūdens transportlīdzekļa dinamika, ievērojot vadības sistēmu un ar CFD programmatūras palīdzību izveidoto ūdens pretestības modeli, modelēta ar daudzķermeņu dinamikas modelēšanas programmatūru *MSC Adams*. Plūsmas dinamikas apvienošanai ar daudzķermeņu mehānisma dinamiku pielietots metamodelēšanas un skaitlisko eksperimentu paņēmieni. Skaitliskie eksperimenti ir īstenoti jeb granulārā vidē veikti, pielietojot diskreto elementu metodi, simulējot transportlīdzekļa pārvietošanos ar programmatūru *EDEM*. Darba ietvaros arī izveidots modeļa prototips modeļa uzvedības vērošanai reālos apstākļos. Iegūti kvalitatīvi, labi sakrītoši matemātiskā modeļa un fiziskā prototipa dinamikas rezultāti, kuri pierāda gan jaunā piedziņas principa, gan vadības sistēmas darbaspēju.

## ANNOTATION

The Thesis describes the new underwater vehicle propulsion type developed by the author. Flow and vehicle interaction dynamics are studied, and factors impacting the flow, control methods and the ability to move in other media (in addition to fluid) are reviewed. A geometry of the propulsion system was created, studying its hydrodynamic properties using special CFD software. The mathematical model for the control system was created. The dynamics of the underwater vehicle were modelled with the multibody dynamics modelling software *MSC Adams*, using the developed control system and the water resistance model developed with CFD software. Flow dynamics were combined with multibody mechanism dynamics using the metamodeling and numerical experiment approach. Numerical experiments in bulk or granular media were performed using the discrete element method, simulating the vehicle movement using the *EDEM* software. Within the framework of the thesis, a prototype of the model was also created for observing the model behaviour in real-life conditions. High-quality and good fit results were obtained from the mathematical model and the physical prototype dynamics, proving the performance of both the new propulsion principle and the control system.

# SATURS

ANOTĀCIJA .....	3
ANNOTATION .....	4
VISPĀRĪGS PROMOCIJAS DARBA APSKATS.....	8
Aktualitāte .....	8
Darba mērķis un galvenie uzdevumi .....	8
Izpētes hipotēzes un pieņēmumi .....	9
Pētījuma novitāte.....	9
Pētījuma praktiskais pielietojums.....	10
Darba aprobācija .....	10
1.    JAUNĀ VEIDA PIEDZIŅAS PRINCIPA IZKLĀSTS.....	13
1.1.    Baktēriju <i>E.Coli</i> piedziņa .....	13
1.2.    Biomīmikrija un konstruktīvie piemēri .....	15
1.3.    Secinājumi.....	17
2.    AUTONOMO ZEMŪDENS TRANSPORTLĪDZEKĻU APSKATS .....	18
2.1.    Kalmāra-tipa zemūdens robots.....	18
2.2.    AZT veikspējas uzlabošana ar dzīvajā dabā gūtu iedvesmu.....	23
2.3.    FILOSE projekta robota zivs.....	25
2.4.    Tasmānijas universitātes <i>ISE Explorer</i> AZT.....	26
2.5.    Viļņu planieris .....	28
2.6.    Secinājumi.....	30
3.    REINOLDSA SKAITLIS.....	31
3.1.    Nematocistas .....	36
3.2.    Reinoldsa skaitļa apskats nematocistas izšaušanās aprēķina piemērā .....	38
3.3.    Secinājumi.....	44
4.    ZEMŪDENS ROBOTU ORIENTĒŠANĀS SISTĒMA.....	45
4.1.    Skaņas noteikšanas un attāluma mērīšanas kanāls.....	50
4.2.    Secinājumi.....	55
5.    MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ <i>MSC ADAMS</i> .....	56
5.1.    Modeļa ģeometrija.....	56
5.2.    Durbja ģeometrijas izstrādē izskatītie dzenskrūvju parametri .....	57

5.2.1.	Dzenskrūves raksturojošie parametri .....	57
5.2.2.	Momenta teorija .....	63
5.3.	Ūdens pretestība .....	66
5.3.1.	Vilces un cēlējspēks .....	66
5.4.	Formas pretestība .....	68
5.4.1.	Lodes pretestība .....	69
5.4.2.	Cilindra pretestība .....	70
5.4.3.	Vienkāršots ūdens pretestības modelis DHAZT sistēmai.....	71
5.5.	Reinoldsa skaitļa aprēķins modelim.....	72
5.6.	Plūsmas pretestības modeļa izveide .....	72
5.7.	Secinājumi.....	77
6.	DINAMIKAS MODELĒŠANA, LIETOJOT DAŽĀDUS VADĪBAS ALGORITMUS.....	79
6.1.	Autonomo zemūdens transportlīdzekļu dinamikas modelēšana .....	79
6.2.	Zemūdens transportlīdzekļa simulācija <i>MSC Adams</i> vidē .....	83
6.3.	Helikoīdā transportlīdzekļa vadības principa izstrāde .....	90
6.3.1.	Zemūdens transportlīdzekļu vadības principi .....	92
6.3.2.	Vadības algoritmu apskats .....	95
6.3.3.	Atsauces trajektorijas ģenerēšana .....	101
6.3.4.	Durbja vadāmās konstrukcijas shēma.....	101
6.3.5.	Vidus korpusa stabilizācija .....	102
6.3.6.	Vadības algoritma varianti.....	104
6.4.	Vadības algoritms pēc virziena .....	105
6.5.	Vadības algoritms pēc ātruma .....	106
6.6.	Secinājumi.....	108
7.	MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ <i>EDEM</i>	109
7.1.	Diskrēto elementu metode.....	109
7.1.1.	Granulāras vides modelēšana.....	110
7.2.	Matemātiskā modeļa izveide programmā <i>EDEM</i> .....	112
7.3.	Secinājumi.....	115
8.	MODEĻA PROTOTIPS.....	116
8.1.	Secinājumi.....	121
	SECINĀJUMI .....	122

PIELIKUMI .....	124
LITERATŪRA.....	127



# VISPĀRĪGS PROMOCIJAS DARBA APSKATS

## Aktualitāte

Šodien tehnikā varam sastapt dažādas, gan zemūdens, gan pa ūdens virsmu pārvietojošos transportlīdzekļu piedziņas veidus, bet no tām aizvien visizplatītākā ir propelleru piedziņa. Propelleru piedziņa tiek izmantota gan kuģiem, laivām, gan zemūdenēm un torpēdām. Daļa no šiem transportlīdzekļiem tiek piedzīti arī ar ūdens strūkļas piedziņu, kura tāpat tiek radīta ar propelleriem. Katram no šiem piedziņas veidiem ir savi plusi un mīnusi, bet visbiežāk tomēr tiek izvēlēti propelleri. Darba gaitā tiek apskatīti dažādi ūdens vides transportlīdzekļi, to piedziņas veidi, tehniskie risinājumi un pielietojuma veidi.

Šī pati plaši sastopamā propelleru tipa piedziņa tiek izmantota arī autonomiem zemūdens transportlīdzekļiem (AZT, no angļu *autonomous underwater vehicle, AUV*). Šāds transportlīdzeklis tiek būvēts tā, lai tā darbībā nebūtu tiešas cilvēka iejaukšanās, to panākot ar speciālām vadības sistēmām, kas darbojas pēc cilvēka iepriekš izveidotiem algoritmiem. Visbiežāk AZT darbības mērķi ir paaugstinātas bīstamības vai cilvēkam grūti pieejamu (bieži nepieejamu) vietu izpēte. Tā kā šādi transportlīdzekļi darbojas pēc nelineāras dinamikas likumiem, tiem nav konkretizētu modeļu un nākas saskarties ar traucējumiem, kurus ir grūti nolasīt un paredzēt. To izveidē jāreķinās ar sarežģītām vadības sistēmas dizaina problēmām. Arī hidrodinamiskos koeficientus bieži vien nav iespējams aprakstīt pilnīgi, tāpat rodas arī nenomērāmi traucējumi straumju dēļ. [1] Šīs visas lietas nopietni apgrūtina AZT izveidi, bet par spīti visam, šādi transportlīdzekļi tiek būvēti, pilnveidoti un izmatoti kā pētnieciskās misijās, tā arī industrijā.

Piedziņas shēma veidota no pretējos virzienos rotējošām korpusa daļām, kas aprīkotas ar vītnēm. Ar to palīdzību objekts pats it kā „urbjas” cauri ūdenim, un ar elastīgi lokāmu vidusdaļu tam ir iespēja mainīt kustības virzienu. Iedvesma izgudrojumam ir aizgūta no mikropasaules baktērijām, kas pārvietojoties izmanto rotējošas viciņas. Vienīgi šeit piedāvātā shēma atšķiras ar to, ka rotācijas kustību veic arī priekšējais korpus, radot pozitīvu dzinējspēku. Šāda veida shēma būtu izmantojama autonomām bezapkalpes zemūdens transport ierīcēm. Līdz šim šādi līdzīgi korpusi, bet ar paralēli izvietotām gliemežpārvada tipa dzenskrūvēm tika izmantoti amfībijām [2], bet lielās zemes slāņa ārdīšanas dēļ šī piedziņa nav izplatīta.

## Darba mērķis un galvenie uzdevumi

Darba mērķis ir izpētīt dubult-helikoīdās piedziņas principa pielietojumu zemūdens transportlīdzekļos un parādīt, ka šāda zemūdens piedziņas sistēma darbojas un ir vadāma. Lai sasniegtu mērķi, jāatrisina šādi galvenie uzdevumi:

1. Veikt literatūras analīzi par industrijā esošo AZT piedziņas veidiem, to matemātiskajiem modeļiem, to analīzes metodēm un programmatūru.

2. Izveidot CFD (no angļu *computational fluid dynamics*, jeb skaitliskā hidrodinamika) programmatūrā lietojamu modeli šķidrums plūsmas radīto spēku modelēšanai un veikt skaitliskos eksperimentus.
3. Uz skaitlisko eksperimentu bāzes izveidot vienkāršotu šķidrums pretestības modeli lietošanai daudzķermeņu mehānismu dinamikas programmatūrā *MSC Adams*.
4. Veikt uz dubult-helikoīdās piedziņas principu balstīta AZT modelēšanu datorprogrammā *MSC Adams*.
5. Izstrādāt PD kontroliera tipa modeli uz dubult-helikoīdās piedziņas principu balstīta AZT vadīšanai.
6. Veikt mērķa sekošanas dinamikas modelēšanu ar datorprogrammu *MSC Adams*.
7. Izveidot uz dubult-helikoīdās piedziņas principu balstītu AZT modeli diskreto elementu programmatūrai *EDEMS* un ar to veikt skaitliskos eksperimentus granulāras vielas vidē.
8. Izveidot uz dubult-helikoīdās piedziņas principu balstītu AZT prototipu - konstruēt izmantojot *SolidWorks* programmatūru un sarežģītāko elementu izgatavošanā izmantot modernās ražošanas tehnoloģijas, kā, piemēram, 3D drukāšanu.
9. Veikt eksperimentus ar prototipu un validēt modelēšanas rezultātus.
10. Izdarīt secinājumus un noteikt turpmākā darba virzienus.

### **Izpētes hipotēzes un pieņēmumi**

1. Tiek pieņemts, ka dubult-helikoīdais piedziņas princips ir jauns – zinātniskajā literatūrā nav apskatīts un līdz šim tehnikā nav realizēts, ir pielietojams, vadāms un efektīvs.
2. Pieņemts, ka ūdens ir nespiežams šķidrums, mijiedarbība ūdenim ar mehānisma elementiem izpaužas kā formas pretestības un virsmas berzes spēki.
3. Ir pieņemts, ka dubult-helikoīdās piedziņas principa sistēma pārsniedz šādai sistēmai noteikto Reinoldsa skaitļa robežvērtību, tādējādi radot turbulentu plūsmu.
4. Ir pieņemts, ka modernā CFD programmatūra ir pielietojama aproksimētu ūdens pretestības modeļu jeb metamodeļu iegūšanai, kurus var pielietot tādā daudzķermeņu mehānikas dinamikas programmatūrā, kas pati veido Ņūtona-Eilera dinamikas modeļus, lietojot mehānisma kinemātiskās shēmas aprakstu.
5. Ir pieņemts, ka diskreto elementu metode un tās attiecīgā programmatūra pietiekami precīzi apraksta beramas vides daļiņu savstarpējo mijiedarbību un ar mehānisma elementiem.

### **Pētījuma novitāte**

Darbā tiek apskatīti aktuālie un jaunie zemūdens transportlīdzekļi un roboti, to dažādie izpildījumi, kas neaprobežojas ar propelleru radītu piedziņas spēku. Piedāvātais dubult-helikoīdais piedziņas princips arī ir pilnībā jauns, inovatīvs un tā konstruktīvais risinājums

līdz šim tehnikā nav realizēts. Piedziņas dizaina izstrādē ir gūta iedvesma no dabas, konkrētāk no mikro-pasaules baktērijām, tādejādi ir izmantota arī biomimikrijas metodika.

Rezultātu ieguvei tika izmantotas modernas, komerciāli pieejamas datorprogrammas, kas ļauj rezultātus apskatīt telpā un laikā. Pilnīgākai matemātiskā modeļa izveidei šīs programmatūras tika kombinētas, izmantojot metamodelēšanas un atbildes virsmas metodiku. Fluīda mijiedarbības noteikšanai tika izmantota CFD programmatūra, no kuras iegūtie dati pēc tam tika izmantoti modeļa izveidē daudzķermeņu simulēšanas programmatūrā *MSC Adams*.

## Pētījuma praktiskais pielietojums

1. Dubult-helikoīdais piedziņas princips var tikt izmantots autonomos zemūdens transportlīdzekļos, kas varētu veikt dažādas operācijas cilvēkam sarežģītā vai pat bīstamā zemūdens vidē, sākot ar vides monitoringu līdz, piemēram, paraugu ievākšanai no paša veiktā urbuma gultnē un ekoloģijas uzturēšanai vidē.
2. Konstruktīvais izpildījums ļauj arī pārvietoties pa cauruļvadiem, piemēram, diagnosticēt aizsprostojumu un to attīrīt. Pateicoties simetriskajam dizainam, transportlīdzeklim nav nepieciešams veikt apgriešanos, lai ar tādu pašu efektivitāti veiktu ceļu atpakaļ.
3. Mikro izmēros ierīce ar dubult-helikoīdo piedziņas principu varētu pārvietoties pa cilvēka vai dzīvnieka asinsvadiem, lai veiktu kādas medicīniskas manipulācijas vai piegādātu zāles uz konkrētu problēmas punktu.
4. Transportlīdzekļa amfībijas īpašības tam ļauj radīt dzinējspēku un pārvietoties irdenā cietvielā vai granulētā vidē. Aprīkojot ar nepieciešamajiem sensoriem, tas varētu pārvietoties, piemēram, pa graudu uzglabāšanas konteineri, veidot iekšējās vides monitoringu. Līdzīgi tas būtu arī pielietojams glābšanas darbos iežu vai sniega nogrūvumos, lai atrastu iesprostotos cietušos.
5. Ar speciāli konfigurētu konstrukciju transportlīdzeklim ar dubult-helikoīdās piedziņas principu ir potenciāls arī pazemes tuneļu rakšanā, kur paredzēts izvietot kabeļu līnijas.

## Darba aprobācija

Recenzēti zinātniskais raksti, kas publicēti Latvijā vai ārzemēs izdotos zinātniskos žurnālos ar redkolēģiju, tai skaitā augstskolu izdevumos:

1. **Eimanis M.**, Auzins J. Method and Device for Production of Driving Force in Underwater Floating Vehicle. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2021, Vol. 14(2), pp. 175-183, ISSN: 2212-7976, DOI : 10.2174/2212797613999200930163030.

Publikācijas konferenču materiālos, kas ir indeksēti Web of Science un/vai SCOPUS:

1. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Research of the Dynamics of Double Helicoidal Vehicle in Granular Media. No: 18th International Scientific Conference "*Engineering for Rural Development*": Proceedings. Vol.18, Latvija, Jelgava, 22.-24. maijs, 2019. Jelgava: LLU, 2019, 1205.-1209.lpp. ISSN 1691-5976. Pieejams: doi:10.22616/ERDev2019.18.N358
2. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Flow Analysis of New Type Propulsion System for UV's. No: IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering, Latvija*, Rīga, 27.-29. septembris, 2017. UK: IOP Publishing, 2017, 1.-9.lpp. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Pieejams: doi:10.1088/1757-899X/251/1/012059
3. Auziņš, J., **Eimanis, M.** Dynamical Simulation and Optimization of Double-Helical AUV. No: MARINE 2015 : *Computational Methods in Marine Engineering VI*, Itālija, Rome, 15.-17. jūnijs, 2015. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2015, 1128.-1139.lpp. ISBN 978-84-943928-6-3.

Citas publikācijas konferenču (arī vietējo) ziņojumu izdevumos:

1. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Flagella Inspired Propulsion for AUVs. No: *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'16*, Itālija, Cortona, 17.-19. oktobris, 2016. Cortona: 2016, 342.-354.lpp.
2. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Jauna veida zemūdens transportlīdzekļu piedziņas izstrāde. No: *Teorētiskā mehānika: 53. RTU studentu zinātniskās un tehniskās konferences rakstu krājums*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2012, 311. lpp. ISBN 978-9934-10-380-3.

Patenti:

1. LV15296B, Jānis Auziņš, **Mārcis Eimanis**, Vitālijs Beresņevičs, Guntis Kuļikovskis. IERĪCE UN PAŅĒMIENS ZEMŪDENS PELDLĪDZEKĻA DZINĒJSPĒKA RADĪŠANAI. Piešķirts 20.03.2018..
2. LVP2021000027, Jānis Auziņš, **Mārcis Eimanis**. IERĪCE UN PAŅĒMIENS, KAS RADA DZINĒJSPĒKU GRANULĀRĀ VAI IRDENĀ CIETVIELU VIDĒ. Iesniegts 05.05.2021.

Dalība starptautiskās konferencēs ar referātiem:

1. Engineering for Rural Development 2019. International Scientific Conference 22. – 24.05.2019. Jelgava, Latvia.

2. 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017) 27–29 September 2017, Riga, Latvia
3. 10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles – “Technologies for the Ship of the Future” (HIPER’16), 17-19 October 2016, Cortona, Italy

Apbalvojumi:

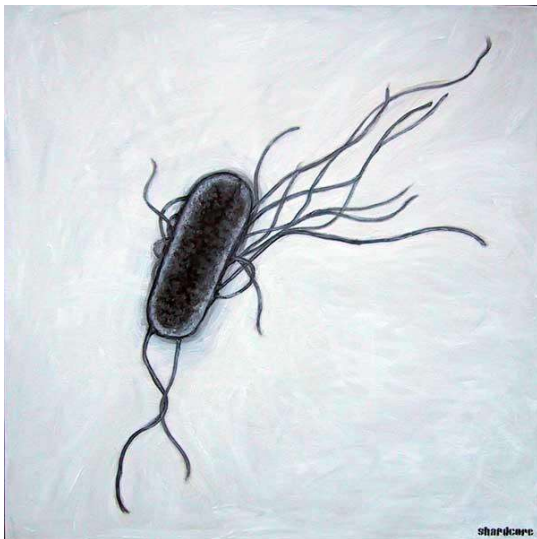
1. Trešās vietas apbalvojums 6. Starptautiskajā izgudrojumu un inovāciju izstādē “MINOX 2016”, 7.-8. oktobris, 2016.

# 1. JAUNĀ VEIDA PIEDZIŅAS PRINCIPA IZKLĀSTS

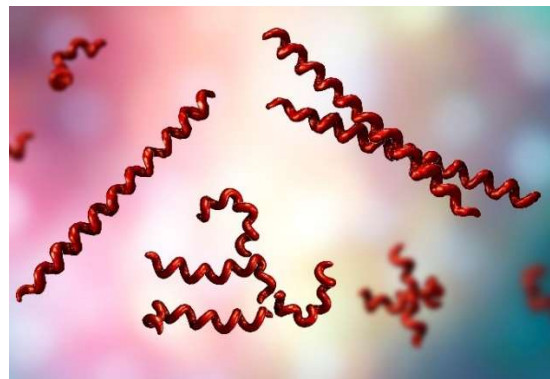
Nav jaunums, ka cilvēks tehnikā daudzas idejas smeļas no dabas organismiem un procesiem. Šobrīd pētnieku uzmanību pievēršuši mikrobioloģiskie organismi. Tiek pētītas salmonellas baktērijas, kurām konstatēts rotācijas dzinējs. Pagaidām dabā šis ir vienīgais mikropasaulē konstatētais rotācijas dzinējs. Pie tam tas spēj attīstīt ļoti augstu rotācijas ātrumu.

## 1.1. Baktēriju *E.Coli* piedziņa

*Escherichia coli* (*E. coli*) un *Salmonella typhimurium* baktērijās to dzenošā viciņa rotē ar 18 000 apgr./min (Attēli 1.1. un 1.2.), stumjot tās uz priekšu ar 30  $\mu\text{m/s}$  lielu ātrumu, bet ātruma rekords novērots citām baktērijām, kas pārsniedz 100 000 apgr./min, virzot baktērijas ar simtiem mikrometru sekundē lielu ātrumu. Jo vairāk ievērojams ir fakts, ka, pretēji kinezīnam, ncd un mijozīnam, šie viciņu motori var darboties abos virzienos – gan pulksteņrādītāja virzienā, gan pret pulksteņrādītāja virzienu.



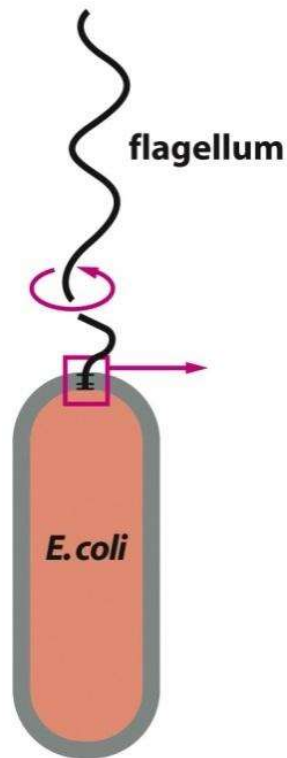
(a)



(b)

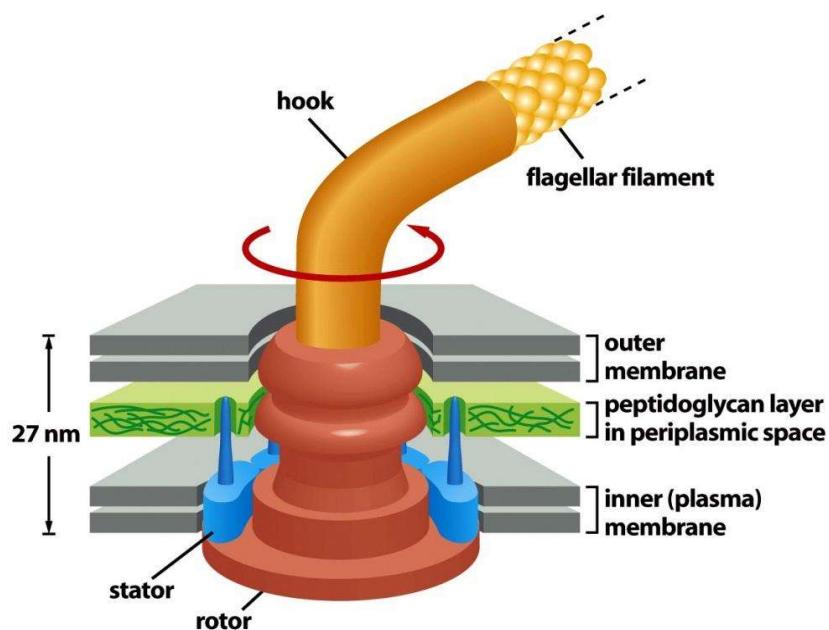
1.1. att. (a) *Escherichia coli* baktērija ar viciņām [3]; (b) spirālveida baktērijas *Spirochaetes* [4].

Viciņu kustina rotācijas molekulu motors, ko darbina jonu plūsma gar iekšējo, jeb citoplazmatisko, baktēriju šūnu membrānu apvalku [5]. Katrs motors piedzen uz āru izvirzāmu spirālveida šķiedru, kas rotējot rada piedziņas spēku, ļaujot šūnām peldēt.



1.2. att. *E. Coli* baktērijas shematisks attēlojums. [6]

Attēlā 1.3. shematiski attēlota šī šūnu motora konstrukcija. Iekšējās membrānas (citoplazmas), vidus daļas (periplazmas) un ārējās membrānas (lipopolisaharīda) gredzenus varētu nosaukt par struktūras korpusu, kas to visu notur šūnas apvalkā. Citoplazmatisko gredzenu komplekss atbild par viciņas rotācijas virzienu un nodrošina afinitāti substrāta piesaistīšanai [7].



1.3. att. Bakteriālā motora izvērsums. [6]

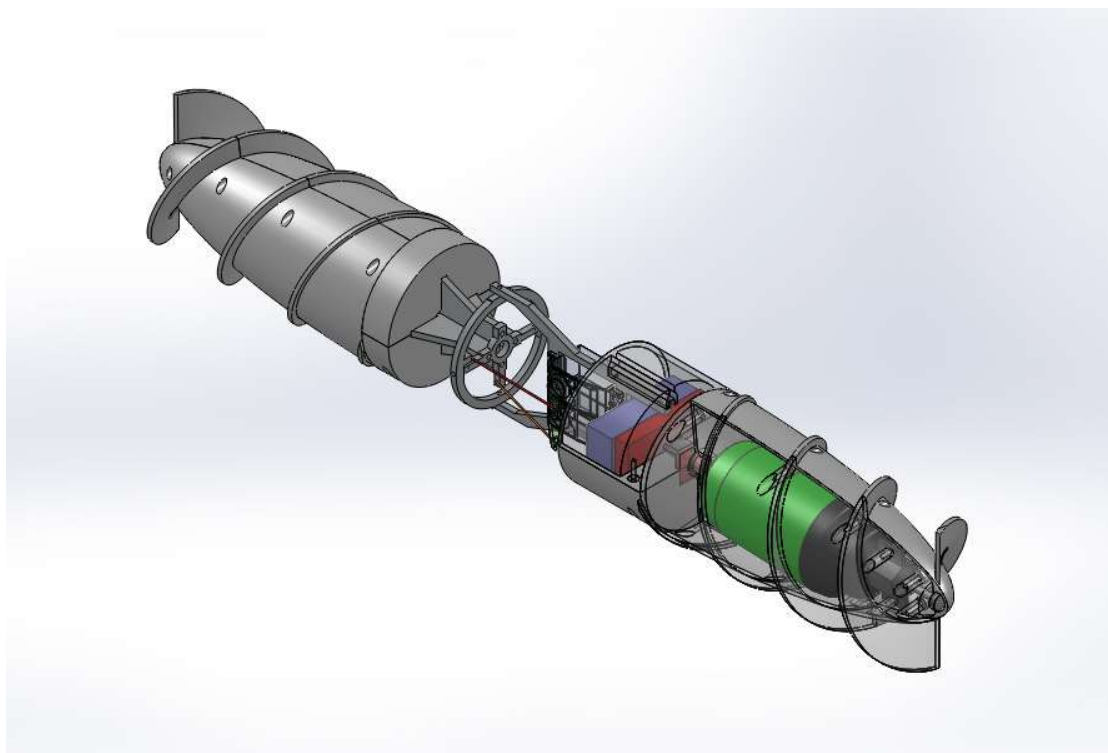
Pētījuma ietvaros tiek modelēts un veidots jauns zemūdens transportlīdzekļu vadāms piedziņas veids, kas darbojas uz darbības un pret darbības principu. Tā piedziņa balstās uz korpusiem ar vītņiem, kas būtībā ir kā propelleri. Gadu gaitā veiktos pētījumos ir izstrādāts piedāvātā piedziņas principa modelis, kas pierāda to, ka šāds zemūdens transportlīdzekļu piedziņas veids ir spējīgs darboties. Šī darba ietvaros pētītajai piedziņai tiks piešķirts apzīmējošs termins *helikoīda piedziņa* jeb *helikoīds*. Tas atsaucas uz grieķu valodas terminu *helico-*, kas latviešu valodā tulkojas kā *spirāl-*, t.b., spirālveida piedziņa. Transportlīdzeklim ar šādu piedziņas konstrukciju piešķirts nosaukums Durbis.

## 1.2. Biomīmikrija un konstruktīvie piemēri

No dažādiem piemēriem ir zināms, ka daba piedāvā labākus risinājumus, nekā tradicionālā inženierija. Dabas principi tiek izmantoti dažādās nozarēs, kā, piemēram, struktūras un materiālu, jaudas, vadības nozarēs, arī hidrodinamikā un navigācijā. Tāpēc Durbja piedziņas izveidē tika izmantots biomīmikrijas princips – ietverot daudznozaru aktivitātes, tiek atdarināts dabā sastopams objekts, lai risinātu sarežģītu inženierproblēmu [8] [9], jo gūtā iedvesma piedziņas idejai nākusi no mikropasaules baktērijām, konkrēti no attēlā 1.1. attēlotajām *E.Coli* un *Spirochaetes*, kur viena pārvietojas vidē ar rotējošas viciņas palīdzību, bet otra savā veidā ar rotācijas palīdzību pati urbjas cauri iekļaujošajai videi. Skatoties zemūdens piedziņas un manevrēšanas tehnoloģijas kontekstā, ievērojami pilnveidojumi ir gūti trīs dažādās nozarēs [10]: bioloģiski iedvesmotā nestabilajā hidrodinamikā ar lieliem cēlējspēkiem, mākslīgo muskuļu tehnoloģijā un uz neirozinātņi balstītā vadībā. Ir iecerēts, ka šīs bio-iedvesmas metodikas spēš uzlabot AZT manevrējamību pie maziem ātrumiem, ietverot arī stabilu pozīcijas noturēšanu telpā, jeb lidināšanos, spēju pagriezties ar mazu rādiusu un grimšanu – visas lietas, kas ūdens būtnēm ir dabiskas spējas. [10]

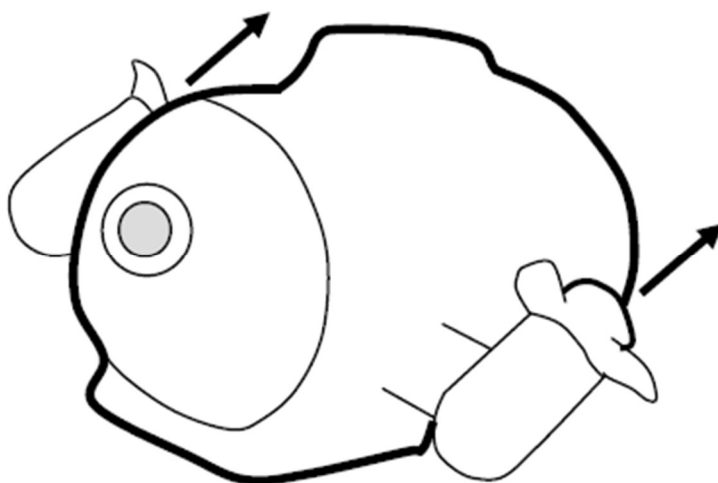
Modelis ir plānots kā autonomas bezapkalpes aparāts, kam netraucē tas, ka visas daļas rotē. Šādam autonomam zemūdens aparātam tiks ieviests nosaukums dubult-helikoīdais autonomais zemūdens transportlīdzeklis, jeb DHAZT. Mūsdienu ātrās vadības sistēmas ir iespējams pielāgot lieliem rotācijas ātrumiem rotējošos korpusos, un to orientēšanās spēju neietekmētu „galvas apreibšana”. Durbis (1.4. attēls) modeļa vadības realizēšanai tiks izmantots vienkāršs kardān tipa mehānisms, kas tam ļaus izliekt vidus korpusu uz augšu-leju, pa labi-kreisi, kā arī pa diagonāli šiem virzieniem, nodrošinot iespēju virzīties visos virzienos.





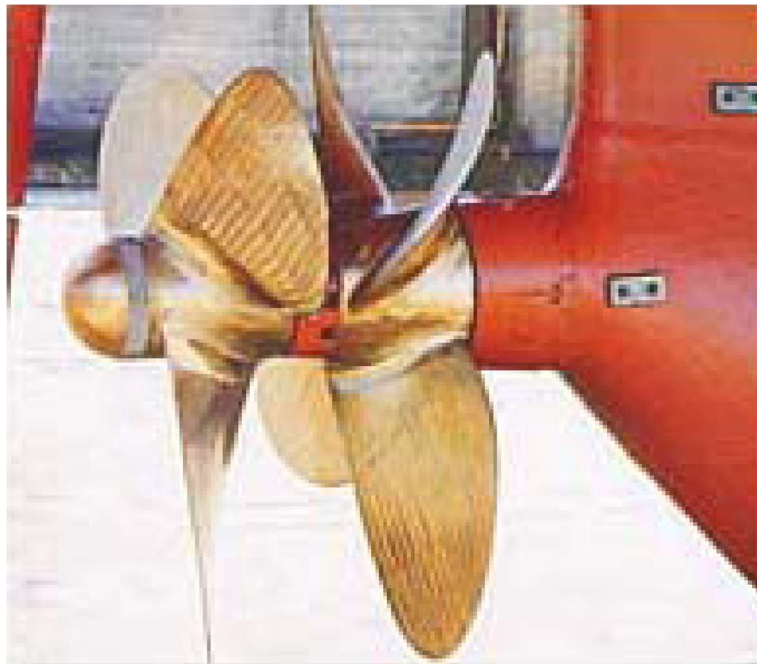
1.4. att. Durbja modeļa attēlojums programmā *SolidWorks*.

Šobrīd zemūdens transportlīdzekļiem jau tiek izmantotas sistēmas ar diviem dzenošiem propelleriem, kā 1.5. attēla piemērā [1], bet propelleri viens aiz otra, uz vienas ass, kas savā starpā būtu savienoti ar lokāmu savienojumu ar mērķi mainīt dzinējspēka virzienu un kas ir rotējoši pretējos virzienos, zinātniskajā literatūrā nav apskatīti.



1.5. att. Dvīņu-propelleru tipa radio vadāma zemūdene. [1]

Vislīdzīgākā piedziņas sistēma tiek izmantota dažos gadījumos kuģu piedziņā, kā redzams 1.6. attēlā. Šādiem propelleriem ir hidrodinamiskas priekšrocības atgūt slidošo straumju rotācijas enerģiju, kas parastā propelleru sistēmā tiek pazaudēta. Tas ļauj ietaupīt apmēram 15% no jaudai patērētās enerģijas. Tiem ir uzlabota efektivitāte, bet augstāka pretestība un izmaksas. Šādu tehniku parasti izmanto mazākiem ārpus borta motoriem, kas darbojas 1500-2000 RPM diapazonā, un tā ir pakļauta problēmām, kas ir saistītas ar garākas vārpstas sistēmas mehāniku.



1.6. att. Pretējos virzienos rotējošu propelleru mehānisms. [11]

### 1.3. Secinājumi

Lai gan iedvesma piedziņas izveidē ir ņemta no dabas, modeļa ideja ir jauna, un tai nav tiešu piemēru, ar ko salīdzināt sistēmas uzvedību. Tāpēc ir nepieciešama darbaspējīguma pārbaude ar hidrodinamikas aprēķiniem, izmantojot Navjē-Stoksa vienādojumus, dzenskrūvju teoriju un speciālu CFD programmatūru, kas ļauj modelēt sistēmu dinamiskā vidē un pētīt plūsmas mijiedarbību starp modeli un fluīdu, un tā vadības iespējas.

## 2. AUTONOMO ZEMŪDENS TRANSPORTLĪDZEKĻU APSKATS

Tā kā ar robotiem saistītās zinātnes mūsdienās gūst arvien lielāku popularitāti, uz doto brīdi jau pastāv ļoti daudz šo robotizēto transportlīdzekļu, un arī šajā pašā laikā tiek aizvien strādāts pie jauniem risinājumiem, turpinot attīstīt šo nozari. Šie transportlīdzekļi un ierīces atšķiras ne tikai pēc formas un komponentu izpildījuma, bet arī pēc izmantotā piedziņas tipa. Tā pat kā Durbim, arī citos risinājumos iedvesma visbiežāk gūta no dabā sastopamajiem organismiem. Šajā nodaļā tiks apskatīti dažādi līdz šim izstrādāti un vēl izstrādes procesā esoši autonomie zemūdens transportlīdzekļi, jeb AZT.

### 2.1. Kalmāra-tipa zemūdens robots

Osakas universitātē, Japānā, tiek izstrādāts zemūdens robots, kam formā un pašā uzbūvē iedvesma ir gūta no kalmāriem (attēls 2.1.). Robots (attēls 2.2.) kopumā ir veidots plakans, ar sānos izvietotām spurām, kas, izpildot viļņveida kustības, rada dzinējspēku. Kalmārs izvēlēts par robota prototipu tāpēc, jo, veicot novērojumus pie akvārijā peldoša dzīva kalmāra, pirmkārt, tika secināts, ka tie pārvietojoties vairāk izmanto sānu spuras, nevis reaktīvo strūklu. Un šis pārvietošanās veids uzrādīja dažādas priekšrocības, kā, piemēram, precīzu kustības kontroli, ietverot spēju apstāties un zemas frekvences skaņas troksni. [12]

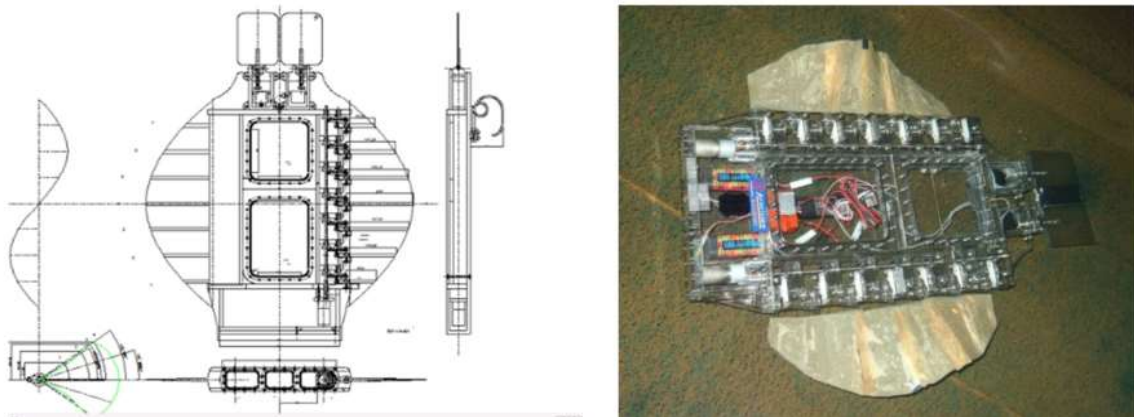


2.1. att. Karību rifa kalmārs, *Sepioteuthis sepioidea*, dabiskajā vidē, (no "Betty Wills (Atsme), Wikimedia Commons, License CC-BY-SA 4.0.).

Mehānisms, ar kura palīdzību spura veido dzinējspēku, darbojas pēc 2-dimensiju viļņveida kustības likuma. Pieņemot, ka viļņa garums ir  $\frac{1}{3}$  m, ar frekvenci 1 Hz, vienādojums ir sekojošs:

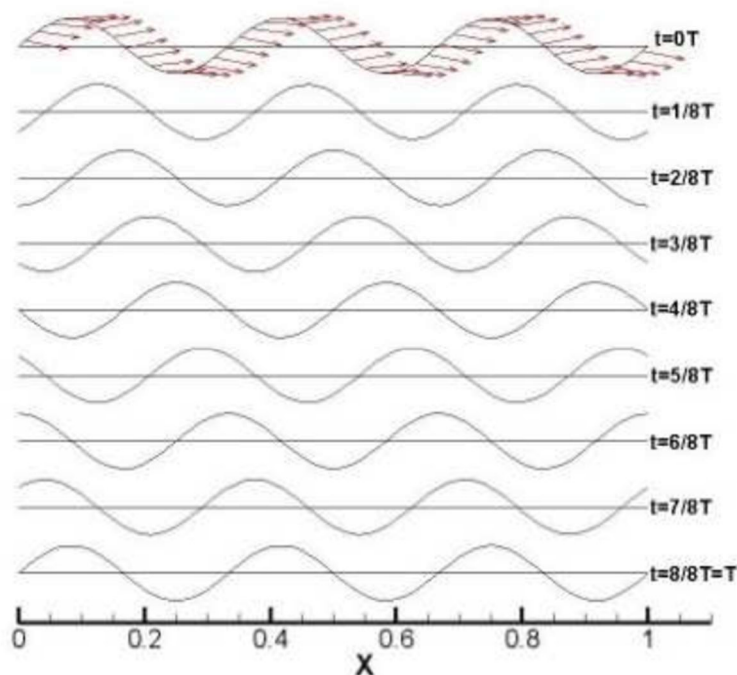
$$y = 0.05 \sin(2\pi kx - 2\pi ft) = 0.05 \sin 2\pi k(x - ct), \quad (2.1.)$$

kur  $x$  - virziena koordināte spuras garuma virzienā,  $y$  - vertikālais pārvietojums,  $k$  - viļņu skaits  $3(1/m)$ ,  $f$  - frekvence  $1(\text{Hz})$ ,  $c$  - viļņa fāzes ātrums  $\frac{1}{3}(m/s)$ .



2.2. att. Kalmāra-tipa robots un tā shematisks attēlojums. [12]

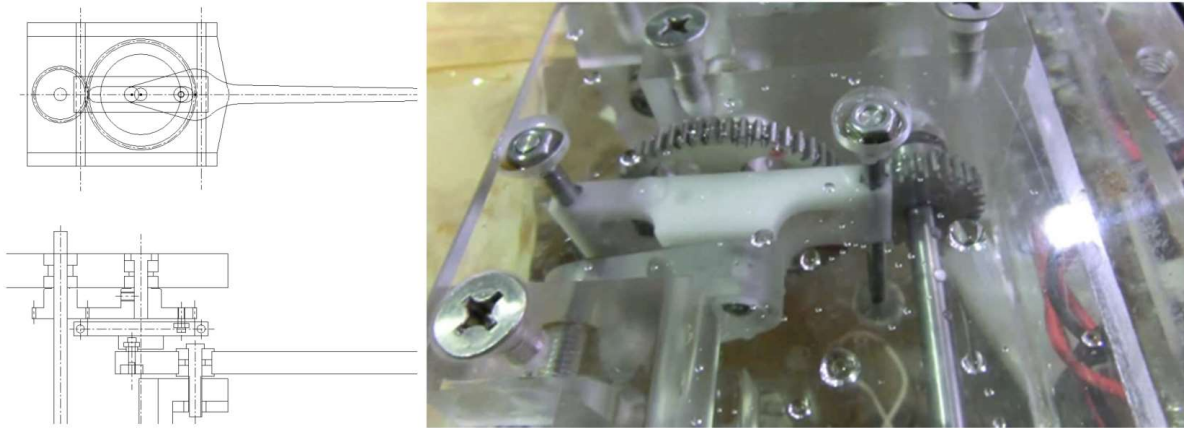
Zemāk attēla 2.3. grafikā ir attēlota spuras forma, kas mainās katru  $1/8$  daļu no sekundes. Laikā  $t=0T$  ir arī attēloti spuras virsmas ātruma normāles vektori. Ir pieņemts, ka spura nevirzās uz priekšu, bet tikai veic viļņveida kustības uz vietas. Augstā spiediena apgabals tiek novērots labajā spuras pusē (spuras augšpusē), jo to tā grūž ūdeni, attiecīgi tajā pašā vietā zemā spiediena apgabals tiek novērots zem spuras (kreisajā pusē). Šī spiedienu starpība veido spēku virzienā pa kreisi, šajā virzienā veidojot dzinējspēku.



2.3. att. Spuras viļņveida kustības grafiks. [12]

Lai realizētu spuras viļņveida kustības, robotā ir iestrādāts turp-atpakaļ kustības kulises mehānisms, kas apskatāms attēlā 2.4. Robotam ir arī realizēta astes spura, ar kuras palīdzību tiek mainīts dziļums, kamēr robots kustas uz priekšu vai aizmuguri, līdzīgi kā planieris. Šāda

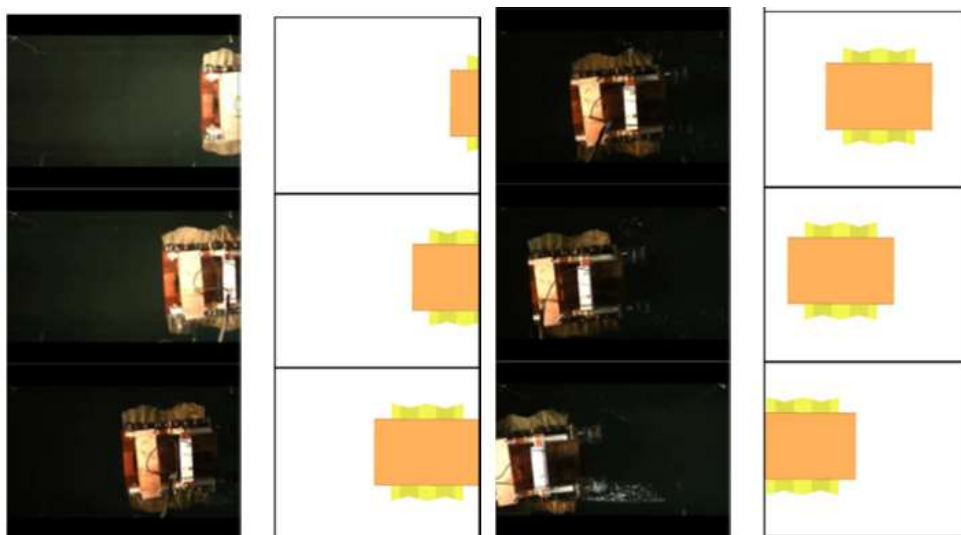
risinājuma dēļ transportlīdzeklim manevra veikšanai ir nepieciešama liela distance. Tāpēc kā viens no nākamajiem soļiem ierīces pilnveidošanā bija nodrošināt tā spēju pārvietoties vertikālā virzienā pa šauru telpu, saglabājot horizontālo stāvokli. Tas tika panākts sekojoši –



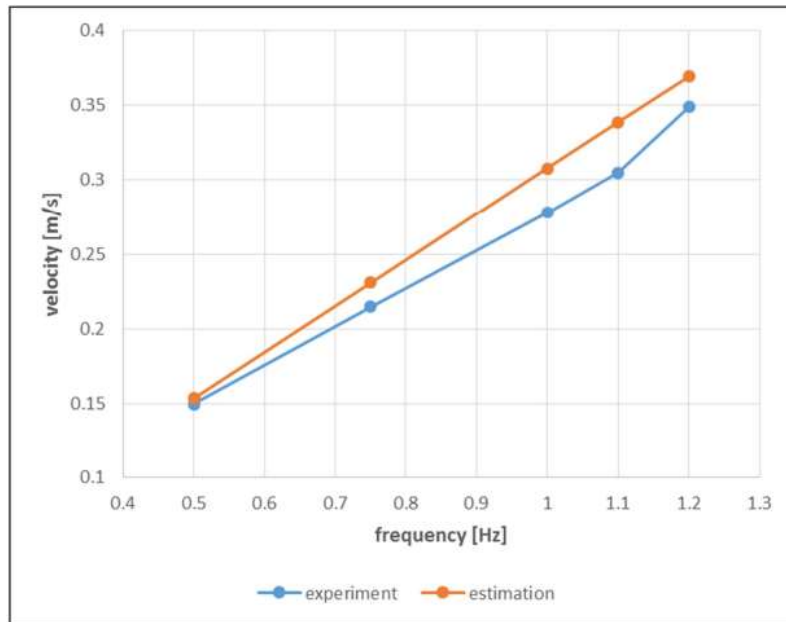
2.4. att. Turp-atpakaļ kustības kulises mehānisms. [12]

darbinot tikai vienu no sānu spurām, transportlīdzeklis spēj griezties ap savu vertikālo asi. Un kombinējot šo rotācijas kustību ar astes spuru speciālu stāvokli, var panākt robota dziļuma maiņu. Šī transportlīdzekļa mērķis nav attīstīt lielus pārvietošanās ātrumus, bet gan vairāk kustības manevru precizitāte un spēja precīzi apstāties, kas ir īpaši noderīga zemūdens izpētē.

Šim robotam ir arī izveidots datormodelis, ar kura palīdzību tika pārbaudīta tā manevrējamība ūdenī. Paralēli iegūtie rezultāti tika arī salīdzināti ar fiziskā prototipa eksperimentiem reālā vidē. Kā redzams attēlā 2.5., virtuālā modeļa simulētais pārvietojums ļoti tuvu sakrīt ar fiziskā prototipa pārvietošanos. Tāds pats apliecinājums arī apskatāms frekvences-ātruma grafikā, attēlā 2.6., kur zilā līkne ir eksperimentālā un oranžā - aprēķinātā.

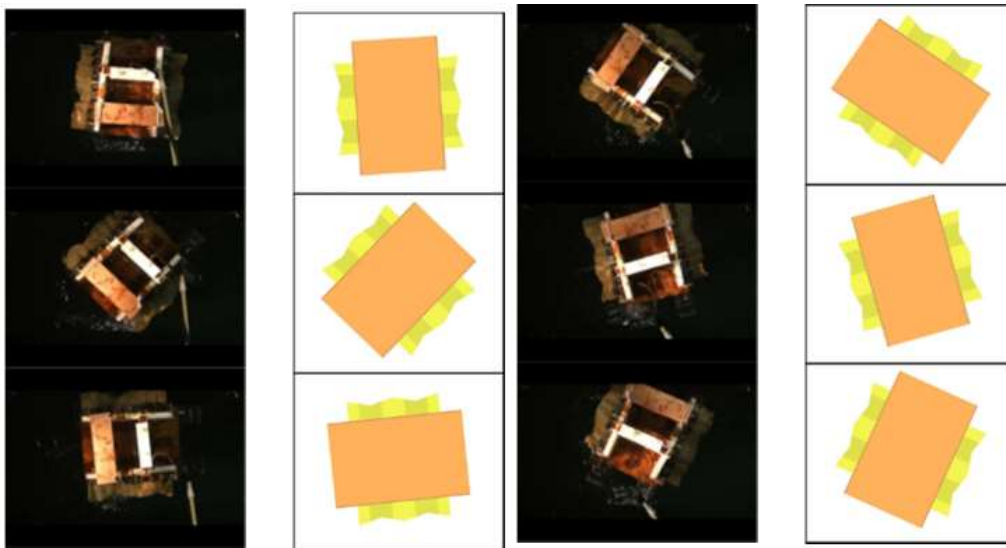


2.5. att. Robota pārvietojuma salīdzinājums ar matemātisko modeli (spuru frekvence 0.75 Hz). [12]

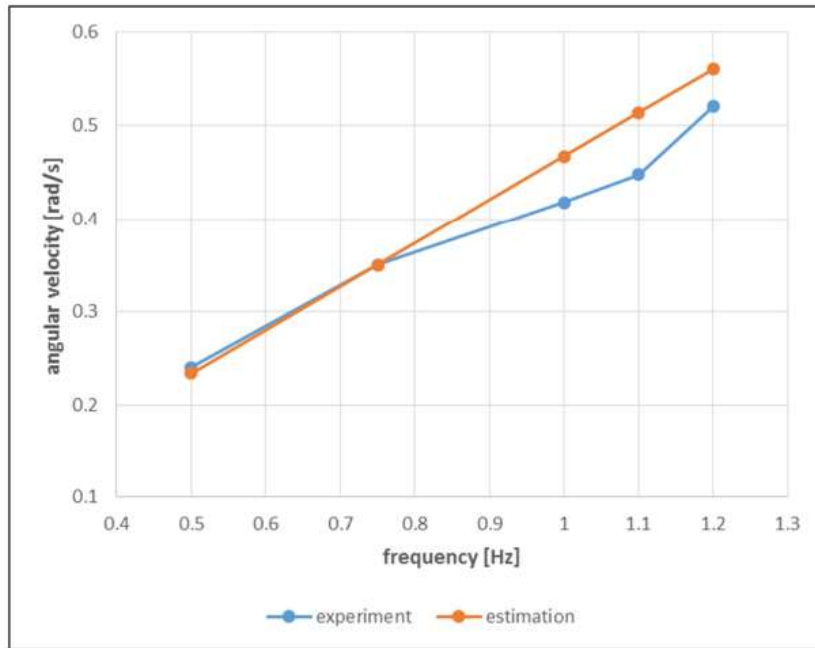


2.6. att. Frekvences-ātruma grafiks. [12]

Līdzīgs eksperiments tika arī veikts, lai apskatītu robota rotācijas kustību. Līdzīgi kā translācijas kustībā, arī šeit aprēķinātie rezultāti ir ļoti tuvi reālās vides eksperimenta rezultātiem. Attēlā 2.7. var salīdzināt, cik līdzīgi mainās pozīcija, savukārt attēlā 2.8. var apskatīt leņķiskā ātruma atkarību no spuras frekvences. Kā redzams, eksperimentāli iegūtie dati pie augstākas frekvences nobīdās, ko autori skaidro kā iespējamo ietekmi no robotam pievienotā vada spriegojuma. Attēli uzņemti katras 2s.



2.7. att. Robota rotācijas kustības salīdzinājums ar matemātisko modeli (spuru frekvence 0.75 Hz). [12]



2.8. att. Frekvences-leņķiskā ātruma grafiks. [12]

Beigās tika pārbaudīta arī spēja nobremzēt. Arī šeit, kā redzams attēlā 2.9., iegūtie dati uzrāda labus rezultātus – robots ir spējīgs strauji apstāties un mainīt kustības virzienu. [12]



2.9. att. Robota spējas nobremzēt salīdzinājums ar matemātisko modeli (spuru frekvence 0.75 Hz). [12]

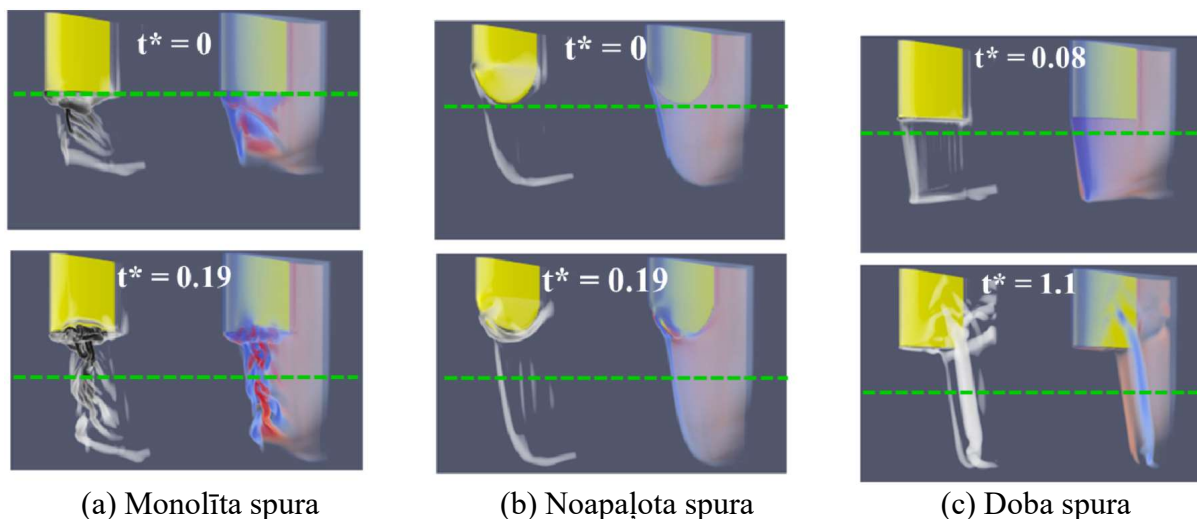
## 2.2. AZT veikspējas uzlabošana ar dzīvajā dabā gūtu iedvesmu

Centieni rast iespējas pētniecībā pielietot augstas veikspējas risinājumus ievērojami paaugstina pieprasījumu pēc tehnoloģijām, kas acumirkļi spēj radīt lielu fluīda spēku manevrēšanai lielā ātrumā, tajā pašā laikā ar uzlabotu energoefektivitāti nepārtrauktai piedziņas nodrošināšanai. Dzīvnieki, radot nestabilus fluīda spēkus, spēj sasniegt apbrīnojamus rezultātus manevrēšanā un efektivitātē, to panākot ar savas formas izmaiņšanu. Iedvesmojoties no šī novērojuma, Apvienotās Karalistes Sauthemptonas universitātē tika apskatīti vairāki iegremdēti ķermeņi, kas fluīda spēku radīšanai krasi izmaina savu ķermeņa formu. To skaitā ir relatīvi vienkāršas formas izmaiņas, kā, piemēram, ātri izmainīts spuru/spārniņu virziens, lai izpildītu tūlītēju apstāšanos, vai arī tandēmā vicināti spārniņi, kas rada trīs reizes lielāku par vidējo dzinējspēku, nekā kas iegūt no viena spārniņa vicināšanas. Bet to skaitā ir arī vairāk netradicionālas formas maiņas, kā, piemēram, ķermeņi, kas ļoti ātri saraujas, lai izpildītu griešanās vai ieniršanas manevrus. Un arī mīkstā robotika, ar kuras palīdzību var panākt strauju elipsoīda priekšējās daļas saraušanos, lai iegūtu 50% efektivitāti ātriem kustības uzsākšanas manevriem, vai pat pilnībā izslēgt pretestības spēkus ar 90% kvazipiedziņas efektivitāti. Zemāk tiks apskatīti pāris piemēri ar formu mainošiem ķermeņiem, kas tādā veidā uzlabo savu manevrēšanās spēju, kā arī energoefektivitāti.

Salīdzinājumā ar cieto ķermeņu kinemātiku, nav daudz pētījumu, kur apskatīti pārvietošanās veidi, kas sevī ietver krasu izmēru vai formas maiņu, lai gan dabā tie ir ļoti izplatīti. Daudzi dzīvnieki peldēšanā izmanto strauju, impulsīvu manevru pārvietošanās uzsākšanai, kā, piemēram, strauja spuru sakļaušana, un turpina peldēt nekustīgi, tādā veidā taupot kustībai patērēto enerģiju līdz 50% [13] [14]. Arī ekstrēma formas izmaiņa bieži tiek izmantota situācijās, kur ir nepieciešamība pēc ekstrēmiem paātrinājumiem, lai palīdzētu dzīvniekam medīt vai izvairīties no uzbrukuma. [15]

Seni pētījumi, kā [16], parāda to, ka tāda strauja kustība jeb pārvietošanās ūdenī atstāj ievērojamu virpuli, radot lielus spēkus. Rakstā [17] centās eksperimentāli un skaitliski izpētīt šo straujās pārvietošanās fenomenu – ātri ievēlot spuru visā tās vertikālā augstumā, kamēr tā tiek vilkta uz priekšu. Šāda ievilkšana ir daudz vienkāršāka un prasa mazāk enerģijas, nekā spuras strauja airēšana. Attēlā 2.10 ir apskatāma šāda eksperimenta trīsdimensionāla spuras simulācija plūsmā. Situācijā 2.10(a) parāda līdzīgu simulāciju, kā augstāk aprakstītajā eksperimentā.





2.10. att. Simulācijas ar vertikāli ievelkamu spuru pie  $Re = 1000$  trim dažādām spuras formām. Katrā variantā attēlots pa kreisi – virpuļu kodoli, un pa labi – krāsainas virpuļu izovirsmas. [18]

Pēc veiktajiem pētījumiem variantā ar noapaļotu spuru tika secināts, ka objekti, kas ierosmes iegūšanai pielieto ķermeņa formas samazināšanas, spēj būt ļoti efektīvi. Kā nākamais piemērs no dabas, kas šādu metodi pielieto, ir galvkāji (kalmāri, astoņkāji). Tie ievērojami palielina savus izmērus, piepildot sevi ar ūdeni, līdz izgrūž to, veidojot spēcīgu reaktīvu strūklu un arī samazinot atpakaļ savus izmērus, kas tiem palīdz strauji pazust no esošās atrašanās vietas. [19] Astoņkājiem līdzīgie transportlīdzekļi, kas veidoti pēc mīksto audu robotikas tehnoloģijas, izplūdes brīdī mēdz sarauties no lodes formas uz 5:1 elipsoīdu. Paātrinājumu šādiem objektiem aprēķina pēc sekojošā vienādojuma:

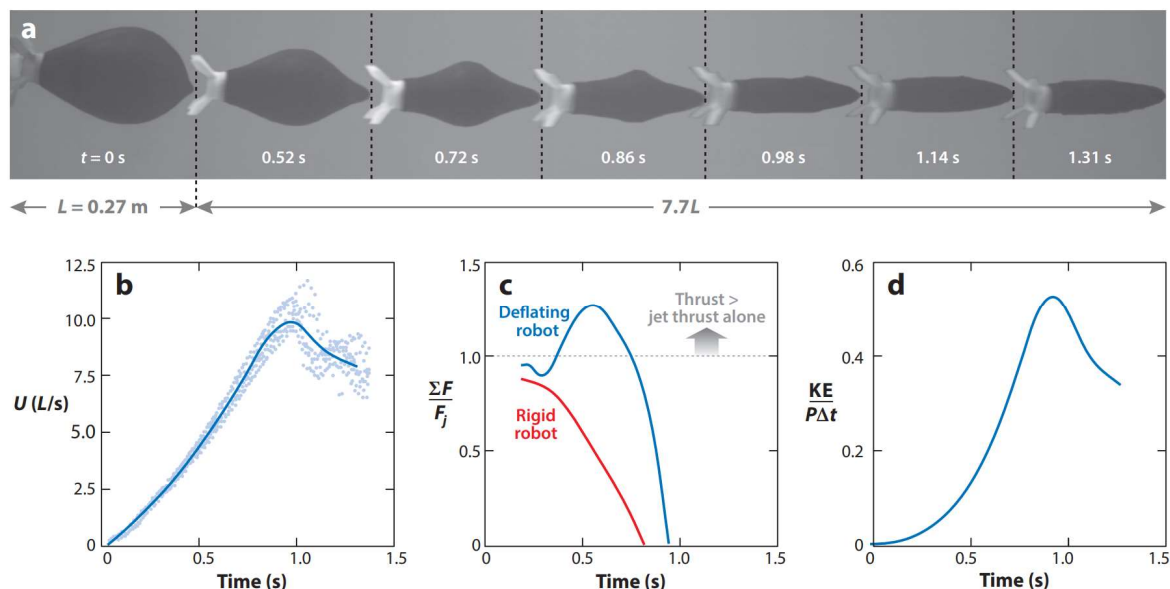
$$\ddot{x} = \frac{F - \dot{m}U_j}{m} = \frac{\Sigma F}{m}, \quad (2.2.)$$

kur  $\Sigma F$  ir summārais spēks, kas ir fluīda spēks, plus strūklas dzinējspēks  $T_j = -\dot{m}U_j$ ,  $-\dot{m}$  ir masas samazinājuma ātrums un  $U_j$  ir strūklas izejas ātrums. [8]

Simulāciju rezultāti uzrādīja, ka šādi ķermeņi spēj sasniegt ātrumus, kas pārsniedz  $3.5U_j$ . Zemāk, attēlā 2.11(a) apskatāms šī transportlīdzekļa prototips, kas veidots no mīkstas membrānas un iekšā ietvertu cietu konstrukciju. Tā pat, kā astoņkāja apvalks, šī membrāna var tikt piepūsta ar šķidrumu, liekot tai ieņemt sākotnēji lielu, trulu formu, tādā veidā uzglabājot pietiekamu enerģijas daudzumu, lai panāktu savu straujo aizsaušanos. Pilnībā iztukšojies korpuss ieņem elipsoīda formu proporcijās aptuveni 5:1, un tā plūdlīnija ir pietiekami laba, lai transportlīdzeklī atļautu nopeldēt attālumu, kas sasniedz desmitiem sava ķermeņa garumus. Šī ķermeņa garums ir  $L = 27$  cm un tā tilpums pēc pilnīgas izlādes ir  $1030$  cm<sup>3</sup>, tātad manevrā paātrinātā kravas masa  $m_f = 1.03$  kg.

Kolīdz korpuss ir uzpildījies, robots tiek atbrīvots no stiprinājuma, ļaujot tam tīri paša enerģijas ietekmē paātrināties uz priekšu atvērtā ūdens telpā. Ātrā starta manevra sniegums ticis mērīts ar precīzām, augstas izšķirtspējas kamerām ar 150 kadriem/sekundē. Attēlā 2.11.

apskatāms šī robota pašpiedzītais straujais paātrinājums un izlāde. Ātrums pārsniedz  $10L/s$  jeb  $2.7\text{ m/s}$  aptuveni pēc  $t=0.95\text{ s}$  pēc palaišanas. [20]



2.11. att. Astonkājīm līdzīgā transportlīdzekļa rezultāti pēc pašpiedzīšanas testa, kur  $F_j = T_j$  ir strūkļas spēks. [15]

Šis transportlīdzeklis ļāvis secināt, ka papildus pievienoto masu var arī izmantot dzinējspēka radīšanā, ar to savā veidā sākumā uzlādējot transportlīdzekli un ļaujot tam strauji izlādēties, šādā veidā iegūstot apbrīnojami ātru startu.

Augstāk aprakstītajam transportlīdzeklī ir viena ļoti būtiska īpašība, kas sakrīt ar Durbi – pats transportlīdzekļa korpuss kalpo dzinējspēka radīšanai. Un, kā šeit redzams, ar šādu metodi ir iegūstami ievērojami rezultāti, kas sevī ietver gan energoefektivitāti, gan dinamisko sniegumu.

### 2.3. FILOSE projekta robota zivs

Iepriekš minētā iezīme, kas saistīta ar transportlīdzekļa korpusu, ir arī citiem robotiem, kam iedvesma gūta no dabas. Aizvien daudz roboti tiek veidoti iedvesmojoties no zivīm. Droši vien tāpēc, ka tās ir tik plaši sastopamas un apskatāmas. FILOSE projektā, kur piedalījās arī Rīgas Tehniskās universitātes Mehānikas institūts, tika izstrādāta robota zivs (2.12. attēls) ar gumijotu astes daļu. Robota forma ir veidota pēc varavīksnes foreles līdzības. Šeit arī pats korpuss pilda dzinējspēka radīšanas funkciju, vismaz  $2/3$  no tā – purna daļa (galva) ir no cieta materiāla, kur ir izvietota vadības sistēma, bet astes daļa ir elastīga, kas ar krūškurvī novietota servomotora mehānisma palīdzību veic viļņa veida kustības, radot dzinējspēku kustībai ūdenī.



2.12. att. FILOSE zivs robota prototips. [21]

Prototipa galva ir veidota hermētiska, lai pasargātu iekšā iebūvētās vadības sistēmas. Ar ARM9 procesoru aprīkotais kontrolieris ar 64 atsevišķu kanālu palīdzību ļauj pieslēgt 64 dažādus plūsmas sensorus. Sensoru signālu apstrādes programmatūra un darbināšanas vadības programmatūra tiek augšupielādēta uz Linux balstīta kodola. [21]

Robotam tika izveidota speciāla mākslīgā sānu līnija, izmantojot MEMS (Mikro ElektroMehānisko Sistēmu) tehnoloģiju, ko izstrādāja Itālijas Nacionālā Nanotehnoloģiju laboratorija. Sānu līnijas sensori imitē zivju sānu līnijas orgānu virspusējās matiņ veida šūnas, kas deformējas plūsmas ietekmē. Zivis sānu līniju izmanto, lai sajustu kustību, vibrāciju vai spiediena izmaiņas fluīda vidē. Pateicoties pjezoelektriskajiem signāliem, ir iespējams nolasīt mākslīgo matiņu deformācijas, kas ir izteiktas ar elektrisku signālu. Pateicoties šai sistēmai, robots pats ir spējīgs sajūst apkārtesošā ūdens straumi un pat veikt kustību pret straumi, gluži kā to dara tā dabiskais prototips – varavīksnes forele. Šī sensoru sistēma ir kā papildinājums sonāra un vizuālajiem sensoriem. [22]

#### **2.4. Tasmānijas universitātes *ISE Explorer AZT***

Neatkarīgi no plašā pētījumu klāsta, kuros iedvesma transportlīdzekļu formai un piedziņas veidam ir gūta no bioloģiskās vides, kas arī sevi apliecina ar lieliskiem rezultātiem, lielākā daļa tirgū esošo AZT vēl aizvien darbojas ar tradicionālo propellera piedziņu. Neatkarīgi no pētījumos iegūtajiem labajiem rezultātiem, alternatīvajiem piedziņas veidiem vēl nepieciešams sevi apliecināt neskaitāmi dažādajos vides apstākļos, kā arī no ekonomiskā

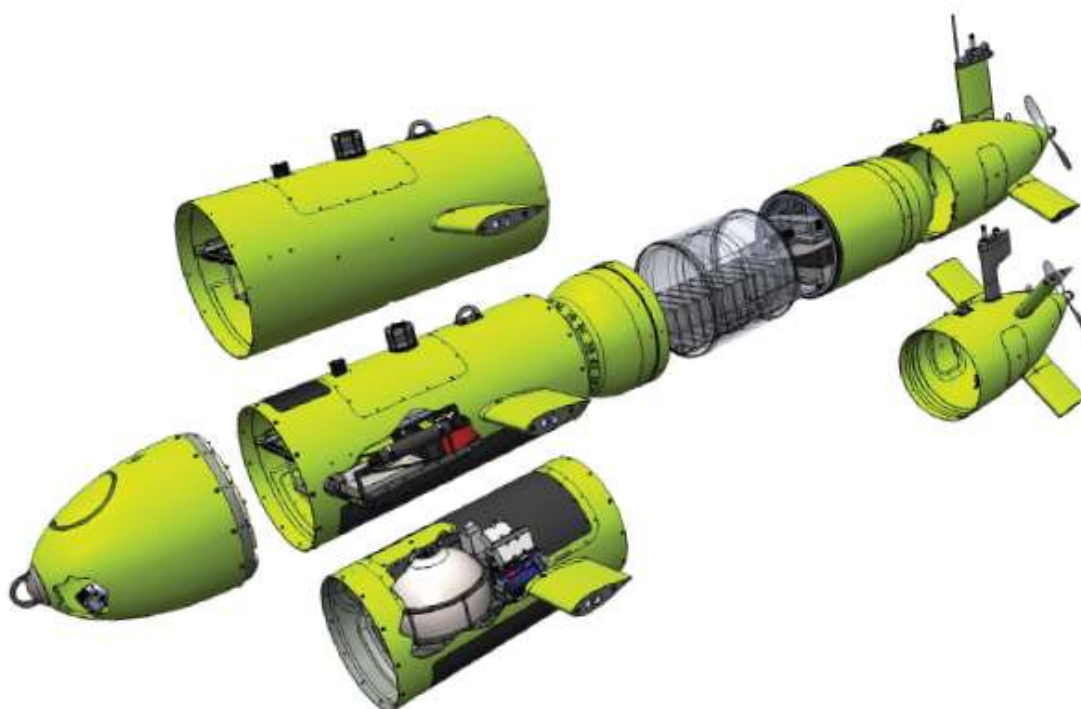
aspekta, ko propelleri ir panākuši jau gandrīz pāris gadsimtu izmantošanas periodā. Tāpēc tiem pastāv ļoti daudz dizainu un modifikācijas, kas katra paredzēta specifiskiem apstākļiem.

Ar samērā vienkāršu, divu spārnu propelleri tiek piedzīts AZT *Explorer* (2.13. attēls), ko izstrādājusi kompānija *ISE (International Submarine Engineering Ltd.)* jeb Starptautiskā Zemūdens inženierija. *Explorer* ir šī paša uzņēmuma izstrādātā iepriekšējā modeļa *Theseus* pēctecis. *ISE Explorer AZT* modularitāte ir optimizēta šī transportlīdzekļa ilgmūžībai un spējai adaptēties jauniem uzdevumiem. Cilindriskais spiediena korpusa un mitrais kravas nodalījums ir veidoti modulāri un tos var pagarināt vai arī saīsināt. Aprīkojuma nodalījumi sausajā alumīnija korpusā var uzņemt pat 19 collu, jeb 48.26 cm lielus plauktus. Slapjie kravas nodalījumi, kuru diametrs ir 69 cm, sevī spēj ietilpināt plašu sānu skenēšanas sonāru klāstu, kā arī daudzstaru akustiskos skenerus un daudzus citus rīkus ūdens kolonnas parametru noteikšanai. Lai būtu iespējams integrēt jauno aprīkojumu, tiek nodrošināta piekļuve transportlīdzekļa vadības programmatūrai. Ievāktie dati tiek augšupielādēti uz bāzes staciju caur ātru tīkla Ethernet porta saiti, kas novietota un korpusa. Un bateriju uzlādei ir savs atsevišķs ports.



2.13. att. *ISE Explorer* autonomais zemūdens transportlīdzeklis. [23]

Šis transportlīdzeklis atļauj modifikācijas, kas izmaina tā garumu no 4.5 m līdz 6 m. Pieejams arī divos korpusa izmēros – 0.69 m un 0.74 m attiecīgi dziļuma versijām 3000 m un 6000 m. Pēc pieprasījuma ir pieejami izpildījumi arī citiem dziļumiem, bet tā svars, atkarībā no modifikācijas, ir no 752 līdz 1250 kg. Realizējama ātruma diapazons ir 0.5 – 2.5 m/s, un darbības distance var sasniegt 120 km ar 1.5 m/s ātrumu un 75 vatu kravas aprīkojumu, kuras maksimālais svars ir līdz 200 kg. Šo distanci var palielināt līdz par 450 km ar papildus baterijām, kas standartā ir 1.6 kWh litija jonu bateriju moduļi. Virziena maiņa tiek nodrošināta ar 3 spārniem un 2 priekšspārni ir piekoplektējami pēc vajadzības. Vadības sistēma ir aprīkota ar *IxSea Fibre-Optic* vai *Kearfott* riņķa lāzera žiroskopa inerciālo navigācijas rīku, *Teledyne RDI Workhorse* 300 vai 600 kHz doplera ātruma reģistrācijas ātruma sensoru, pozicionēšana tiek nodrošināta pateicoties *Motorolla* GPS antenai un *USBL (Ultra Short Baseline)* retranslatoram. Akustiskā komunikācija notiek caur *ORCA MATS 200* vai *LinkQuest UMW4000* rīkiem. Daļēja šī transportlīdzekļa struktūra apskatāma attēlā 2.14. [24]



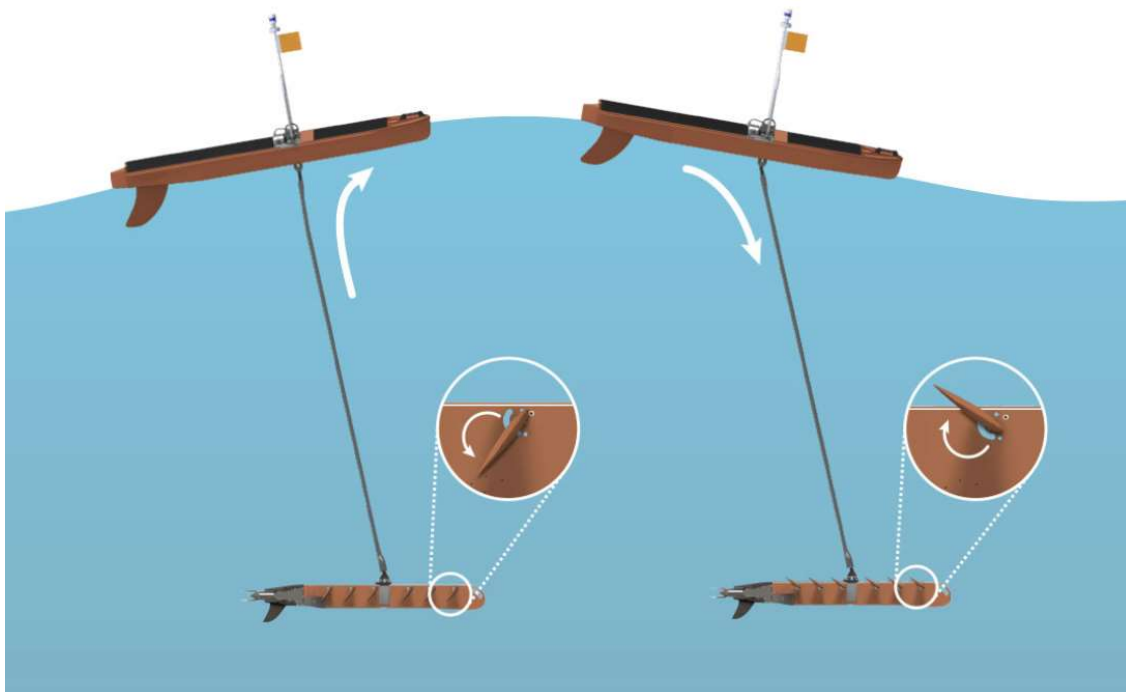
2.14. att. *ISE Explorer* autonomais zemūdens transportlīdzeklis, izvērstis CAD modelis. [23]

Transportlīdzeklis spēj veikt pagriezienu 5 m rādiusā un max leņķis, kādā tas var iegrimt vai pacelties, ir līdz 45 grādiem. Tam ir iespējams arī veikt misijas laikā iegūto datu apstrādi. Ar to ir arī iespējams veikt pētījumus zem ledus, pateicoties attiecīgi izvietotām bojām, tāpēc sistēmas ir pielāgotas zemūdens uzlādei un datu translēšanai. [23]

## 2.5. Viļņu planieris

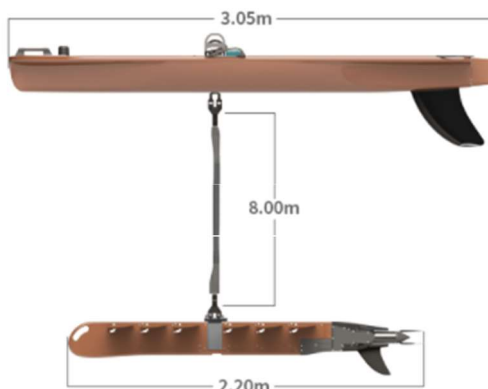
Ļoti savdabīgs autonomis ūdens transportlīdzeklis ir viļņu planieris, no angļu valodas *wave glider*. Tas sastāv no divām daļām – laivas veida korpusa, kas atrodas virs ūdens, un planiera zem ūdens. Tā kā transportlīdzekļa galvenais elements atrodas virs ūdens, tas nav pieskaitāms pie AZT, jo zem ūdens virsmas novietotais planieris pilda galveno piedziņas funkciju. Tas vairāk klasificējas kā bezpilota ūdens virsmas transportlīdzeklis (autonoma laiva), kas spēj pārvietoties pa ūdeni bez apkalpes palīdzības. Ūdens virsmas elements ir modulāra platforma, kas sevī ietver datu apstrādes ierīces, plaši konfigurējamus sensoru moduļus, reāllaika komunikācijas sistēmas, kā arī saules paneļus un baterijas enerģijas uzglabāšanai un realizēšanai.

Šis transportlīdzeklis dzinējspēka iegūšanai galvenokārt izmanto viļņu enerģiju. Tā vislielākā ir pie ūdens virsmas, un attiecīgi strauji samazinās palielinoties dziļumam. Viļņu planiera unikālā divdaļīgā uzbūve, kā redzams attēlā 2.15., izmanto šo enerģijas diferenci ūdens slāņos, ar to nodrošinot nepieciešamo piedziņu. Tā kā viļņi veido ūdens plūsmu uz augšu un leju, zemūdenes spārni, pat pie mazākās viļņu kustības, attiecīgi grozās līdz – uz augšu un leju līdz noteiktam leņķim, tādā veidā virzot transportlīdzekli uz priekšu.



2.15. att. Viļņu planiera darbības principa attēlojums. [25]

Attēlā 2.16. apskatāmi *Boeing* uzņēmumam piederošā *Liquid Robotics, Inc.* veidotā viļņu planiera izmēri. Pats planieris ir savienots ar laivas daļu caur 8 m garu virves veida saiti, kura sevī ietver arī kabeļus komunikācijām un enerģijas padevei. Tam pie astes ir pievienots papildus dzinējs ar propelleri, kas, iegūstot enerģiju no saules paneļu uzlādētajām baterijām, ļauj iegūt papildus dzinējspēku. Tipiskais pārvietošanās ātrums ir 1.3 mezgli, ar maksimālo ātrumu līdz 3 mezgliem. Misijas ar šādiem transportlīdzekļiem parasti ilgst mēnešiem, bet, atkarībā no apstākļiem un vietas, tās var ieilgt pat līdz gadam, ar spēju šķērsot okeānus un izturēt skarbus laika apstākļus. [26] Pie planiera daļas caur speciālu kabeli ir iespējams piestiprināt vēl papildus aparāturu datu ievākšanai, kuras svars, izvērtējot ūdens pretestību, var sasniegt līdz 500 kg. [25]



2.16. att. Viļņu planiera tipiskie izmēri. [25]

## 2.6. Secinājumi

Kā redzams pēc visiem nodaļā apskatītajiem AZT, to, ja ne visā uzbūvē, tad vismaz konkrētos konstrukcijas elementos iedvesma ir gūta no dzīvās dabas. Dabas dzīvie organismi dažādos pētījumos ir pierādījuši savu veikspēju dažādos uzdevumos, tāpēc pasaulē tiek ar vien plašāk izmantota biomimikrijas zinātnes nozare transportlīdzekļu attīstīšanai. Mērķis ir ne tikai nodrošināt AZT funkcionalitāti, bet arī palielināt to darbības ilgumu, kas ir izaicinājums. Saglabājot funkcionalitāti, jāreķinās, ka katrs sensors un komponentes prasa savu enerģijas resursu. Šis ir viens no iemesliem, kuru dēļ transportlīdzekļa izveidē tiek ieviesti pat hibrīda dizaini.

### 3. REINOLDSA SKAITLIS

Navjē-Stoksa momentu vienādojumiem ir dažādi nosacījumi, un ar tiem var aprakstīt tā saukto inerto un viskozo īpašību relatīvo nozīmi, izmantojot bezdimensionālu skaitli (3.1.):

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu}, \quad (3.1.)$$

kur  $\rho$  – vielas blīvums ( $\text{kg/m}^3$ );

$v$  – vidējais plūsmas ātrums ( $\text{m/s}$ );

$l$  – raksturīgais objekta izmērs ( $\text{m}$ );

$\mu$  – vielas dinamiskā viskozitāte ( $\text{Pa s}$ );

$\nu$  – kinemātiskās viskozitātes koeficients ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\nu = \mu/\rho$ .

Šo skaitli sauc par Reinoldsa skaitli, nosaukts par godu īru matemātiķim un fiziķim Osbornam Reinoldsam (1842-1912). Tas raksturo viskoza šķidrums vai gāzes plūsmu un rāda attiecību starp inerces spēku un berzes spēku, kā arī plūsmas dabu – lamināra vai turbulenta.

Kad Reinoldsa skaitlis ir liels, inertās īpašības (konvekcija, skalošanās īpašības) ir dominējošas. Kad Reinoldsa skaitlis ir mazs, viskozās, biežuma īpašības ir pārākas.

Plūsmās, kur ir augsts  $Re$  skaitlis, viskozajiem efektiem vajadzētu būt niecīgiem. Izņēmums ir robežslānī, kur, pēc definīcijas, garuma mērogs ir tāds, ka Reinoldsa skaitlis, aprēķināts robežslānim, vairs nav liels, un viskozie efekti ieņem svarīgu lomu. Liels Reinoldsa skaitlis ir nepieciešams ideālas plūsmas teorijā, lai tā būtu derīga, bet jāievēro arī citi noteikumi, piemēram, robežslāņi nedrīkst sadalīties, nedrīkst būt turbulenta plūsma vai nevienmērīga plūsma.

Plūsmā ar maziem Reinoldsa skaitļiem ir pretēji, viskozie efekti ņem virsroku, bet inertās īpašības ir neievērojamas, un šķidrums pārstās plūst gandrīz uzreiz pēc dotā kustības impulsa. Šādās plūsmās nebūs nekādas pēdas no turbulences, un, acīmredzot, nekādas atšķirības starp robežslāni un galvenās plūsmas apgabalu. [27][28][29]

Viskoza plūsma ir lamināra pie Reinoldsa skaitļa, kas mazāks kā  $\approx 10^5$ . Tālākā tabulā 3.1. ir apskatāmas kinemātiskās viskozitātes koeficienta  $\nu$  vērtības.

3.1. tabula

Masas blīvums ( $\rho$ ) un kinemātiskā viskozitāte ( $\nu$ ) ūdenim un gaisam

Temperature	Freshwater		Saltwater (salinity 3.5%)		Dry air	
	$\rho(\text{kg m}^{-3})$	$\nu \cdot 10^6(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$\rho(\text{kg m}^{-3})$	$\nu \cdot 10^6(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$\rho(\text{kg m}^{-3})$	$\nu \cdot 10^6(\text{m}^2\text{s}^{-1})$
0°C	999.8	1.79	1028.0	1.83	1.29	13.2
5°C	1000.0	1.52	1027.6	1.56	1.27	13.6
10°C	999.7	1.31	1026.9	1.35	1.25	14.1
15°C	999.1	1.14	1025.9	1.19	1.23	14.5
20°C	998.2	1.00	1024.7	1.05	1.21	15.0

Pāreja uz turbulentu plūsmu notiek starp Reinoldsa skaitļiem  $2 \cdot 10^5$  un  $3 \cdot 10^6$ . Turbulenta plūsma tiek raksturota ar ātrumu un spiedienu, kas neregulāri svārstās augstā frekvencē.



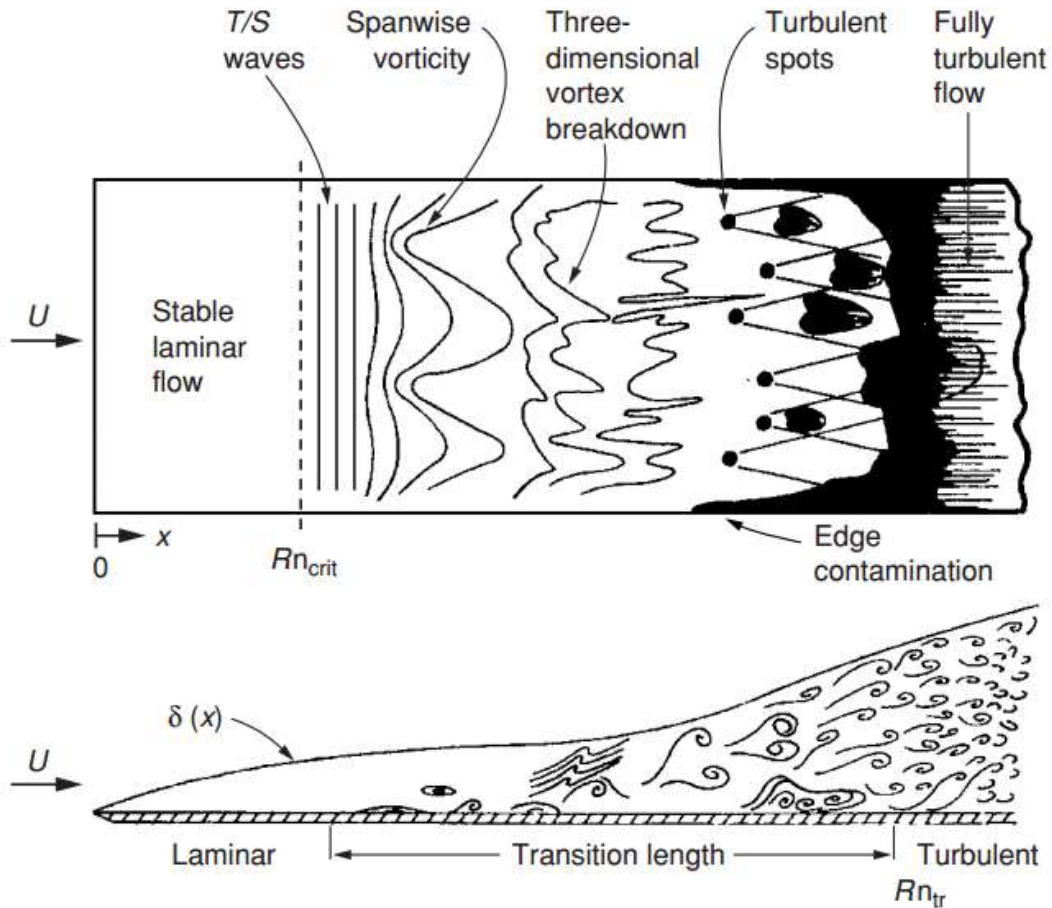
Lamināra plūsma nozīmē to, ka plūsma ir sakārtota pa slāņiem. Tā ir vienmērīga, kad raksturojošais ātrums ir vienmērīgs.

Šeit analogs piemērs starp lamināru plūsmu un skolas klasi, kas piedalās gājienā. Katrs skolēns ietur tādu pozīciju attiecībā viens pret otru, lai veidotos tīra līniju un kolonnu struktūra. Tad šī kārtība pārtrūkst un skolēni skraida haosā, kur katram pagadās, vienīgi ievērojot galveno virzību uz priekšu. Tā ir kā turbulenta plūsma. Šī analogija starp cilvēku un hidrodinamiku tiek izmantota, simulējot pasažieru evakuēšanu no avārijā cietušiem pasažieru transporta līdzekļiem. Hinze (1987) dod sekojošu definīciju turbulencei: „Turbulenta fluīda kustība ir neregulārs plūsmas stāvoklis, kurā dažādas vērtības uzrāda nejaušas vērtības laika un telpas koordinātēs, lai tiktu saskatītas noteiktas statistiskās vērtības. [30]

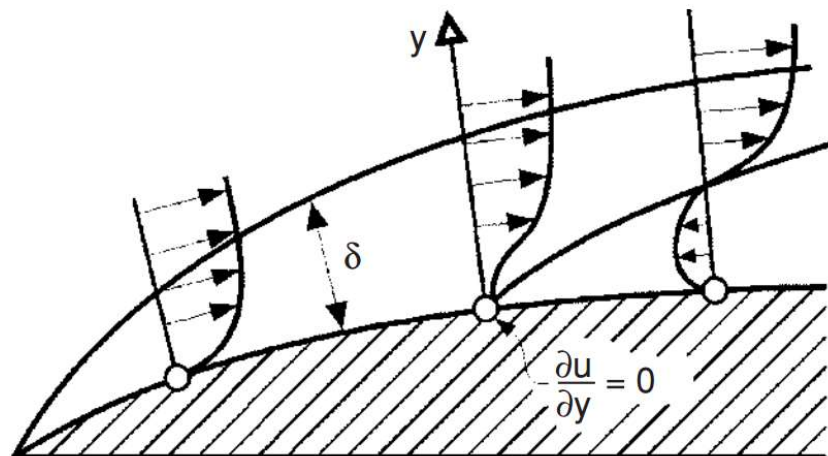
Turbulences frekvence var variēt no 1 līdz 10000 s<sup>-1</sup>, un turbulences svārstības ir aptuveni 10% no vidējā ātruma. [30] Augšējie un apakšējie turbulences frekvences ierobežojumi ir atkarīgi no tās pielietojuma. Piemēram, šķērsplūsmā ap cilindru vajadzētu izvēlēties augstu Reinoldsa skaitli. Tas ir saistīts ar virpuļa izplešanās frekvenci, ko raksturo Strouhla skaitlis kā funkcija no Reinoldsa skaitļa. [31] Atkarībā no cilindra diametra un apkārtējās plūsmas, virpuļa izplešanās frekvence ūdens aparatūrai var būt 1 Hz.

Attēls 3.1. attēlo, kā plūsma izmainās no lamināras uz turbulentu, plūstot gar gludu, plakanu plakni. Lamināra 2D plūsma paliek nestabila pie kritiskā Reinoldsa skaitļa  $Re_{krit}$ . Ja notiekošā plūsmā ir nenozīmīga turbulences intensitāte, tas atbilst  $Ux/\nu=2 \cdot 10^5$ .  $Re_{krit}$  var atrast pēc lineārās stabilitātes analīzes. Attēlā 3.1. parādītie nestabilie 2D viļņi tiek saukti par Tollmeina-Šlictinga (T/S) viļņiem. Augot T/S viļņu amplitūdai, notiek stabilitātes zudums trīs dimensijās. Pilnīgi turbulenta plūsma sākas pie pārejas Reinoldsa skaitļa  $Rn_{tr}$ . Ja šeit notiekošā plūsmā ir pieļaujama turbulences intensitāte,  $Rn_{tr}$  ir  $3 \cdot 10^6$ .

Attēlā 3.2. redzams, kā atdalās plūsmas slānis, un kā izveidojas pretējas plūsmas slānis.



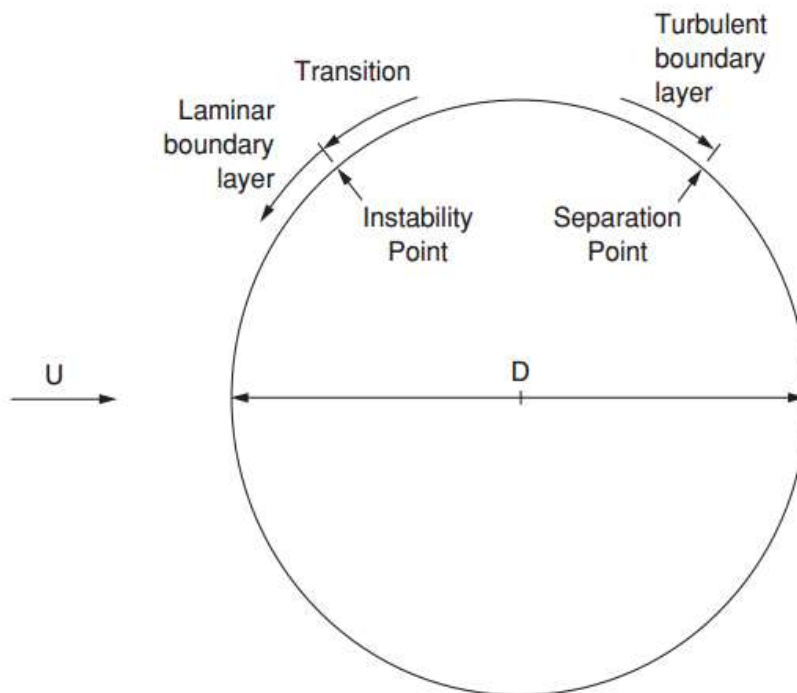
3.1. att. Idealizēta pārejas procesa skice no lamināras uz turbulentu plūsmu gar plakanu, gludu plātņi. [32]



3.2. att. 2D plūsmā ar robežslāni un biezumu  $\delta$ . Attēloti nosacījumi, kad plūsmā sadalās, t.i.,  $du/dy=0$  pie virsmas punktā  $S$ , un netālu veidojas pretplūsmā. Plūsmā sadalīsies punktā  $S$ . [33]

Šķērsplūsmā ap apaļu cilindru ir klasisks gadījums plūsmas dalīšanās gadījumā. Attēls 3.3. attēlo robežslāņa plūsmas dažādus režīmus 2D šķērsplūsmā ap cilindru pie kritiskās pārejas. Laminārā robežslāņa plūsmas nestabilitātes punkts ir atkarīgs no Reynolds skaitļa.

Šis punkts neveidosies pirms plūsmas sadalīšanās punkta mazāk kritiskā plūsmā. Šādas plūsmas režīms ir pie Reynoldsa skaitļiem  $Re=UD/\nu$ , kas mazāki par  $\approx 2 \cdot 10^5$ , plūsmai ap gludu, apaļu cilindru, ar diametru  $D$ , vienmērīgā plūsmā, ar ātrumu  $U$ . Kritiskais plūsmas režīms ir  $\approx 2 \cdot 10^5 < Re < \approx 5 \cdot 10^5$ . Kritiski bīstams plūsmas režīms ir robežās  $\approx 5 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$ , un kritiskā pārejas plūsma ir pie Reynoldsa skaitļiem, kas lielāki par  $3 \cdot 10^6$ .



3.3. att. Shematisks plūsmas domēnu attēlojums robežslānī ap cilindru vienmērīgā šķērsplūsmā pie kritiskās pārejas plūsmas. Plūsmas ātrums  $U$  ir nemainīgs. Nestabilitātes plūsmas sadales punkts atkarīgs no Reynoldsa skaitļa  $UD/\nu$ . [34]

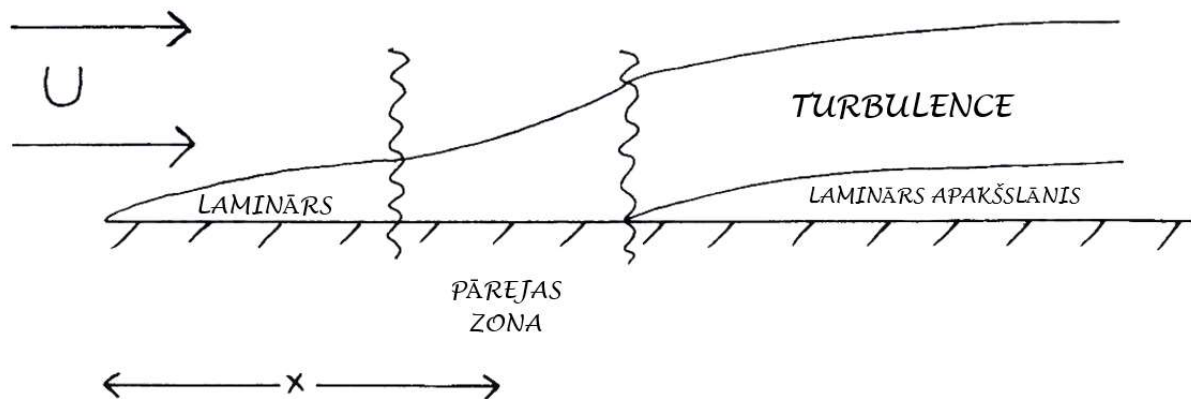
Ja plūsma ir turbulenta pirms plūsmas sadalīšanās punkta  $S$ , sadalīšanās notiek zemāk nekā, kad plūsma ir lamināra pirms sadalīšanās punkta  $S$ . Iemesls tam ir tas, ka, atšķirībā no laminārām plūsmām, turbulentā plūsmā notiek liela fluīdu momentu apmaiņa, kas samazina robežslāņa ātrumu. Balstoties uz  $Re$  skaitļiem praksē, pat tad, ja robežslānis paliek laminārs līdz notiek sadalīšanās, augšupejošā plūsma kļūs turbulenta,.

Turbulentās plūsmas sadalīšanās rezultātā, vidējais pretestības spēks uz cilindru samazināsies. Tas ir saistīts ar to, ka viļņojums aiz cilindra ir šaurāks nekā lamināras plūsmas sadalīšanās rezultātā. Berzes pretestība uz cilindru pie augstiem  $Re$  skaitļiem būs mazāka lamināram robežslānim, nekā turbulentam robežslānim, tas arī bija redzams plūsmā gar plakānu plakni. Lai nu kā, Reynoldsa skaitļiem praksē berzes pretestībai ir maza loma pretestībā uz cilindru. [34]

Kopumā, plūsmām, kurām viskozie efekti ir izteikti, vai kurām ir pietiekami mazi ātrumi (respektīvi, pie pietiekami maza Reynoldsa skaitļa), ir plūsmas līnijas, kas atbilst šķidrums slāņiem, kuri slīd viens pār otru diezgan strukturētā veidā. Pavisam pretēji, turbulence sevi raksturo ar plūsmas nestabilitāti un veidojošos slāņu jaukšanos jeb maisīšanos. Starp šķidrums slāņiem, pa visu robežslāni, apmainās enerģija un momenti, un vairs nav iespējams noteikt

tiešus plūsmas deterministiskos raksturojumus kā, piemēram, ātrumu. Ir jābūt apmierinātam ar izmantotajām vidējām vērtībām, kurām ir pievienoti nejauši no teorijas novirzīti dati. Tālāk pa plūsmu, pa plātņi, raksturīgās novirzes plūsmā tai traucēs, mainot plūsmu no lamināras uz turbulentu, kas notiek pārejas zonā.

Vēl tālāk pa plūsmu, kur plūsmas robežslānis var tikt uzskatīts jau par turbulentu, būs tomēr saglabājies mazs lamināras plūsmas apakšslānis tieši pie ķermeņa; un, tāpat, kā iepriekš, viskozie efekti tuvu pie ķermeņa ir pietiekami, lai saglabātu lamināras plūsmas īpašības, kā arī uz ķermeņa virsmas nenotiks plūsmas slīdēšana, fluīda daļiņas it kā aizķeras. Ja ar  $x$  apzīmē attālumu pa plūsmu no plātnes sākuma šķautnes, tad pārejas zona (skatīt 3.4. attēlu) atrodas tur, kur Reinoldsa skaitlis  $Re_x = Ux/\nu$  ir apmēram  $3 \cdot 10^5$  un  $10^6$ . [35][36][37][38]

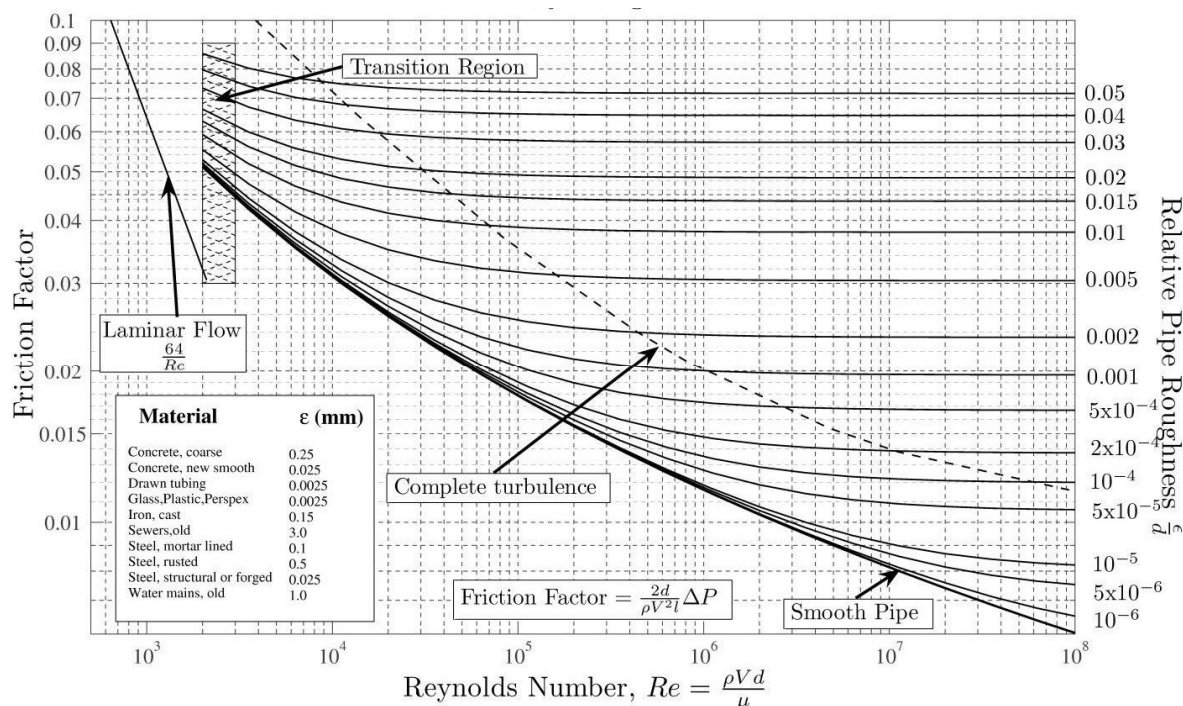


3.4. att. Plūsmas struktūras attēlojums uz plātnes.

Plūsmai caurulē ar apaļu šķērs griezumu, un diametru  $D$ , atbilstošās plūsmas pārejas zonas Reinoldsa skaitļa vērtības var aprēķināt:

$$Re = UD/\nu \cong 2300. \quad (3.2.)$$

Tālāk 3.5. attēlā redzama *Moody* diagramma, kuru izmantojot var paredzēt spiediena kritumus pilnīgām fluīdu plūsmām caurulēs. Viena ass apzīmēta ar Dārsija-Veisbaha berzes faktoru pret Reinoldsa skaitli uz otras ass un relatīvo gludumu  $\epsilon/d$ . Diagramma skaidri parāda lamināras, pārejas un turbulenta plūsmas režīmus, paaugstinoties Reinoldsa skaitlim.



3.5. att. *Moody* diagramma. [39]

Cilindriskam peldošam objektam, kas rotē pateicoties lāpstiņām vai vītnei, būtiskais lielums ir „maisītāja” diametrs  $D$ . Ātrums ir  $ND$ , kur  $N$  ir rotācijas ātrums (apgriezieni sekundē). Šādam objekta Reinoldsa skaitlis  $Re$  ir:

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu}, \quad (3.3.)$$

kur  $\rho$  – vielas blīvums ( $\text{kg/m}^3$ );

$D$  – lāpstiņu/vītnes ārējais diametrs (m);

$N$  – rotācijas ātrums (apgriezieni sekundē);

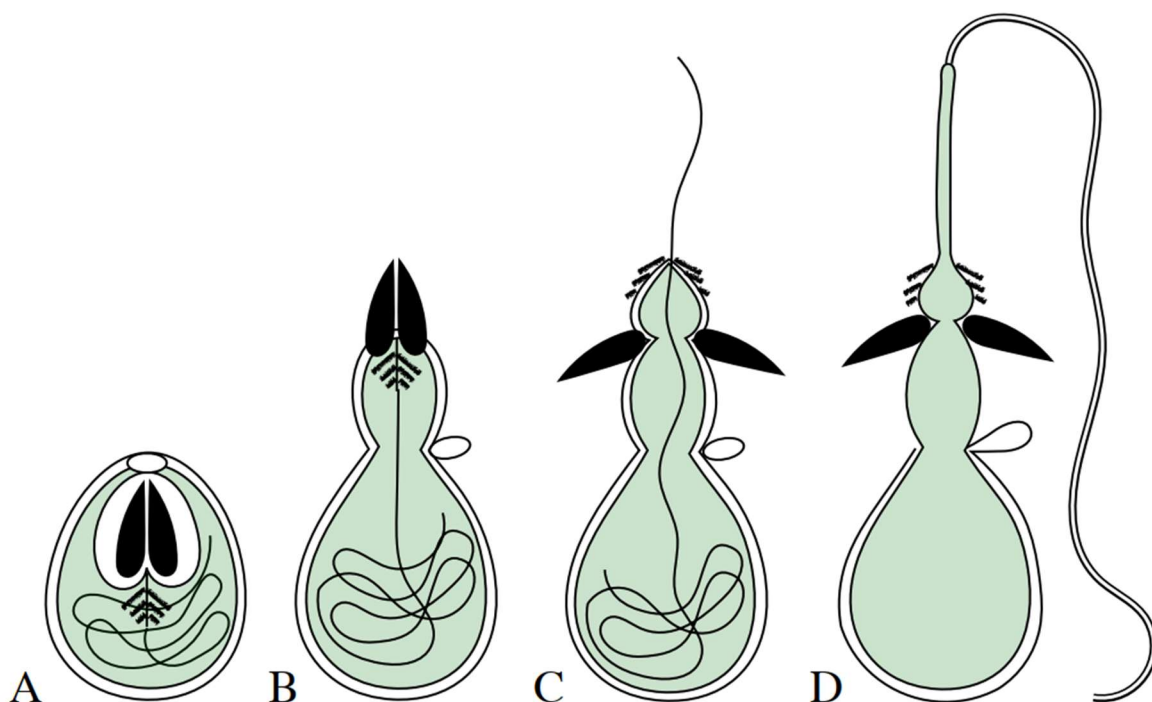
$\mu$  – vielas dinamiskā viskozitāte ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$  vai  $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ).

Sistēma ir pilnībā turbulenta pie Reinoldsa vērtībām  $Re=10000$ . [40]

### 3.1. Nematocistas

Nematocistas, latviski sauktas arī par dzeļkapsulām, ir orgāni, kuru galvenais mērķis ir gan aizsardzība, gan uzbrukums. Šie orgāni ir raksturīgi dzelējzarndobumaiņu dzīvnieku tipam, no kuriem pazīstamākās būtu medūzas. Lielākā daļa no šī tipa sugām dzīvo sālsūdenī. Nematocistu morfoloģijā un funkcijās ir plaša daudzveidība, ar ap 30 dažādiem klasificētiem tipiem, un bieži vien vienā organismā atrodami vairāki šie tipi. [41] [42] Un tomēr visiem šiem tipiem ir līdzīga pamata struktūra, kas sevī ietver ar šķidrumu pildītu kapsulu, kurā atrodas satīts kanāla pavediens, ar galā piestiprinātu dakšas veida irbulīti jeb dzeloņus. Saņemot kairinājumu, kapsula ar osmotiskā spiediena palīdzību izšauj dzeloņus, kas caurdur mērķi, ļaujot ar kanāliņa palīdzību injicēt indi. Attēlā 3.6. apskatāms dzeļošās nematocistas izšaušanas process. Ar nematocistu palīdzību tiek modelēts, piemēram, mikroinžektora

dizains, ar kuru noteiktā ķermeņa vietā, arī dziļajos audos, injicētu zāles. [43] [44] Un, lai būtu vieglāk aprakstīt un atdarināt izšaušanas mehānismu, kas sastāv no kanāliņa izšaušanas pēc vāciņa atvēršanās, šobrīd ir liela interese nematocistu komponentu īpašību un struktūras kategorizēšanā un klasificēšanā. [42] [45]



3.6. att. Dzeļošās nematocistas izšaušanās posmi.

(A) pirms izšaušanās, (B) vāciņš, apzīmēts ar ovālu, atveras, ļaujot izšauties dzeloņiem, (C) dzeloņi caurdur mērķi un pēc tam, izvērsot iekšas uz āru, penetrējas mērķī, un (D) kanāliņš iekļūst mērķī un izlaiž nematocistā esošo fluīdu. Zaļā krāsa apzīmē nematocistas iekšējo vidi, tās fluīdu, bet biezās taisnās svītriņas apzīmē no iekšas uz āru izvērsošās lamelītes, atbrīvojot ceļu slaidajai caurulītei ar kanāliņu. [46] Viss process aizņem mazāk nekā 0.03s.

Kamēr šajā procesā iesaistītie ātrumi starp daudzšūņiem ir pieticīgi, vidēji 9-18 m/s [47], dzeloņu izmešana nematocistas izšaušanās laikā pretendē uz vienu no visātrākajiem zināmajiem paātrinājumiem jebkura mēroga dzīvnieku pasaulē, sasniedzot paātrinājumus, kas pārsniedz 5000000 g. [47] [48] Turklāt, mikroskopiskos mērogos šie ātrumi ir relatīvi lieli.

Visi dzelējzarndobumaini dzīvo ūdenī, tāpēc tiek izvirzīta hipotēze, ka nematocistas dzeloņu mijiedarbība ar ūdeni ievērojami ietekmē izšaušanas procesu un iespējamību sasniegt medījumu jeb mērķi. Fizika, kas mikroskopiskā mērogā apraksta struktūru kustības šķidrā vidē, nosaka to, ka šie procesi ir pārmērīgi slāpēti, jo šādos mērogos fluīda vidē viskozie efekti dominē pār inerces spēkiem. [49] Kad sistēmas raksturīgā garuma mērogs ir relatīvi mazs, kā viensūnas organismu gadījumā,  $1.0 - 10.0 \times 10^{-5}$  m, tad  $Re \ll 1$ , un fluīda plūsmā dominē viskozie spēki. Tā arī augsti viskozos stāvokļos norisinās lielākā daļa šūnu procesu un kustīguma. Fluīdu dinamika šādās šūnu vidēs var būt neintuitīva.

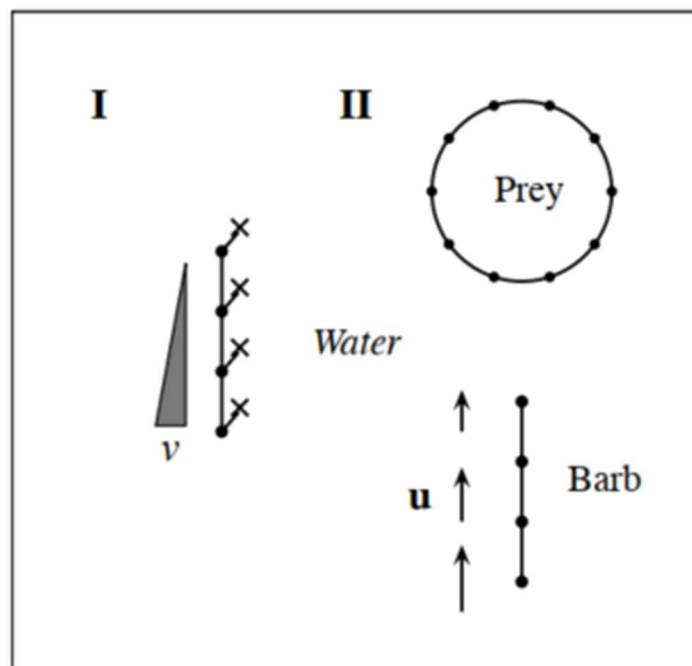
Piemēram, šo mikrovižu organismi, veicot turp-atpakaļ jeb airēšanas veida kustības, pie tipiskajiem ātrumiem (0-0.007 m/s, [50]) nevar iegūt neto pārvietojumu. Šāds rezultāts ir

pazīstams kā ķemmīšgliemeņu teorēma. [49] Tikai tādas kustības, kuras neraksturo turp-atpakaļ veida kustības, kā, piemēram, baktērijas viciņas rotācija, rezultējas ar neto pārvietojumu. Turklāt, robežslāņu efekti ir ievērojami. Šūnas efektīvais robežslānis var sasniegt pat vairāk kā desmitkārtīgu izmēru pret tās rādiusu. Bet jāņem vērā, ka nematocistas izšaušanās pieder  $Re$  starpposma diapazonam, pie  $Re \sim 900$ , kur arī inerciālie spēki ir ņemami vērā. Tāpēc tiek paredzēts, ka šādas sistēmas fluīdu dinamika ir principiāli atšķirīga no lielas daļas citām mikromēroga sistēmām.

### **3.2. Reinoldsa skaitļa apskats nematocistas izšaušanās aprēķina piemērā**

Lai apskatītu nematocistas mijiedarbību ar fluīdu, saskaņā ar avotu [51], ir izveidojamas struktūras - ballistiskais elements (dzelonis) un mērķis jeb medījums, kas iemērkti viskozā fluīdā, kura īpašības nosaka Navjē-Stoksa vienādojumi nesaspiežamam šķidrumam. Dzelonis tiek paātrināts līdz maksimālajam ātrumam ar savā starpā saistītu punktu palīdzību, kur katram pielikts spēks, veidojot pavedienu, kas, savukārt, dzelonim ir pievienots ar stingru elastīgu atsperi. Gala ātrums – 18 m/s. Šajā piemērā dzelonis īsā mirklī tiek paātrināts līdz tā galējam ātrumam. Pēc tam tiek likvidēts savienojums starp dzeloni un pavedienu ar punktiem, tādā veidā dzeloņa pārvietošanās paliek atkarīga tikai un vienīgi no mijiedarbības ar fluīdu. Izsakoties citiem vārdiem, tas aizpeld līdz mērķim bez piedziņas spēka.

Idealizēts mērķa sasniegšanas modelis sastāv no relatīvi stingra dzeloņa un elastīga apļveida medījuma, kas iemērkti viskozā fluīdā (ūdenī). Abas komponentes ir nelokāmas un nestiepjamas. Sistēmas shematiskais modelis apskatāms attēlā 3.7. Simulācijas domēns izvēlēts kā kvadrāts ar malu garumiem, kas ir 10 reizes garāki par dzeloņa sākotnējo garumu. Dzelonis un mērķis domēnā ir horizontāli iecentrēti, un vertikālā virzienā izvietoti vienādos atstatumos tā, ka domēna nulles koordinātu krustpunkts atrodas pa vidu distancei starp tiem.



3.7. att. Diskretizētu struktūru diagramma. [52]

Pirmajā simulācijas posmā (I, pa kreisi), diskretizēts dzelonis ir piesiets punktiem (apzīmēti ar x), kas kustas ar noteiktu ātrumu  $v$  pozitīvā vertikālā virzienā. Trijstūris apzīmē, ka ātrums palielinās lineāri laikā, līdz tiek sasniegta maksimālā vērtība 18 m/s. Nākamajā simulācijas posmā (II, pa labi) dzelonis vairs nav fiziski saistīts ar kustīgajiem punktiem, un tā kustība ir atkarīga vienīgi no mijiedarbības ar fluīdu. Ātruma bultas  $u$  ilustrē to, ka dzeloņa (un fluīda) ātrums pēc laika samazinās, lai gan ne obligāti lineāri. Dzelonis sasniedz medījumu, kas sākotnējā konfigurācijā ir apļa formā. Visas struktūra ir iegremdētas ūdenī.

Komponentu izmēru izvēlē ņemti vērā avoti [46], [53], [45], [47]. Šie parametri ir apkopoti tabulā 3.2. Jāņem vērā, ka sākotnējā distance starp dzelonī un mērķi ir vienāda ar vienu dzeloņa bāzes garumu, lai mērķa sasniegšanai tam būtu jāveic vismaz viens sava ķermeņa garums. Racionāls skaidrojums šādai attāluma izvēlei ir balstīts uz faktu, ka dzelonis, kas caurdur medījumu, ir saistīts ar organoīdu. Tāpēc ir saprātīgi pieņemt, ka dzelonis neveiks tālas distances, lai sasniegtu medījuma virsmu, un daudzos gadījumos kā, piemēram, ar dzeļošajām nematocistām, dzelonis izvēršas no iekšas uz āru kā daļa no izšaušanās mehānisma, tāpēc ķermeņa garuma distances šķērsošana ir saprātīga sākotnējā vērtība.

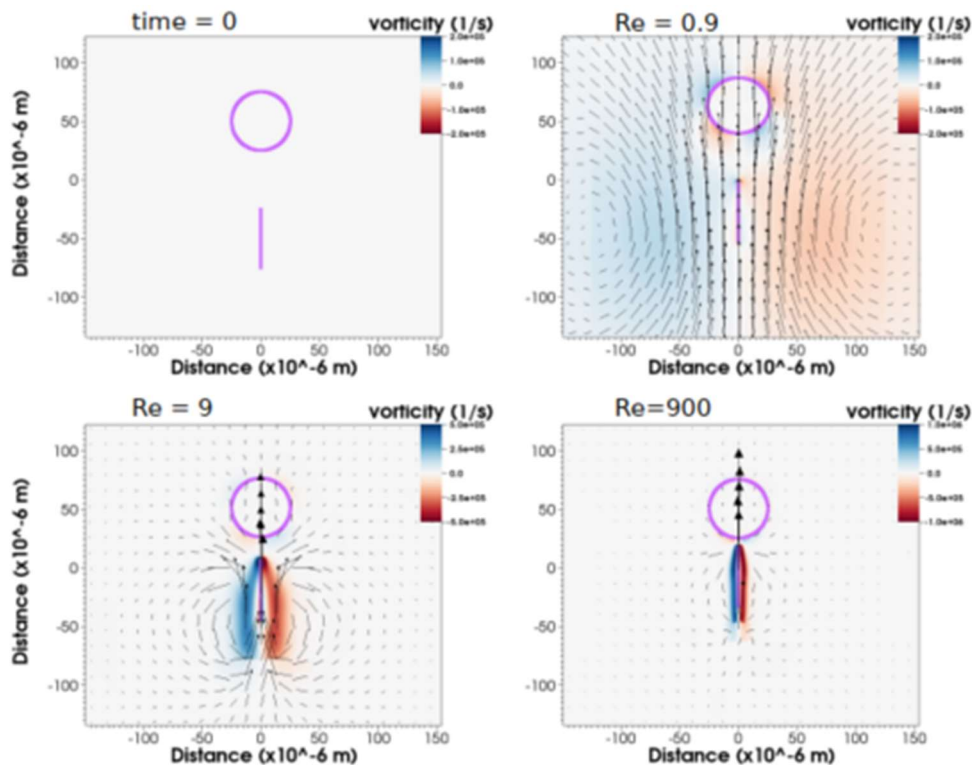


Simulācijās izmantotie parametri.  $Re$  ir aprēķināts ņemot vērā dzeloņa maksimālo sasniegto ātrumu paātrinājuma fāzes beigās. Tīklojuma izmēri variē no 128-512 punktiem, abos  $x$  un  $y$  virzienos, un  $dx$  definē smalkāko adaptīvā tīklojuma režģa izmēru. [52]

Simulation Parameter Values	
Structure	Length
Length of barb ( $L$ )	$5.0 \times 10^{-5}$ m
Spacing between objects ( $h$ )	$5.0 \times 10^{-5}$ m
Radius of prey ( $R$ )	$2.5 \times 10^{-5}$ m
$Re$	0.9–900 *
Domain size ( $\Omega$ )	$5.0 \times 10^{-4}$ m
$dx$ *	$9.766 \times 10^{-7}$ m
$k_{spring}$	$1.64 \times 10^{11}$ N/m
$k_{beam}$	$7.65 \times 10^{10}$ N·m
$k_{target}$	$1.64 \times 10^{11}$ N/m

Zemāk aprakstītajos rezultātos, ar  $Re$  skaitli ir variēts, mainot dinamisko viskozitāti  $\mu$ . Tika mainīta vienīgi viskozitāte, lai visi garumu un laika mērogi būtu fiksēti. Ņemot vērā, ka pie lielāka  $Re$  spēks nemērogojas līdz ar ātrumu, ir iespējams arī nofiksēt dzeloņa un medījuma elastīgās īpašības. Attēlā 3.8 apskatāma fluīda virpuļošana un ātrumi pie attiecīgiem  $Re = 0.9, 9$  un  $900$ , pēc  $\frac{3}{4}$  no kopējā simulācijas laika. Tā kā dzelonis vienkārši peld fluīdā palēninājuma ietekmē, simulācijas laikā efektīvais  $Re$  mainās. Lai būtu ērtāk salīdzināt,  $Re$  tiek aprēķināts izmantojot dzeloņa maksimālo ātrumu tieši pirms piedziņas spēku noņemšanas.

Pie augstāk minētajiem  $Re$  ir novērojamas zīmīgas izmaiņas. Kopumā, Reynolds skaitlim samazinoties, robežslāņa biezums palielinās un palēninājuma efekts ir izteiktāks. Gadījumā ar vislielāko viskozitāti pie  $Re = 0.9$ , ir redzams ievērojams fluīda ātrums un virpuļojums tālu no dzeloņa un medījuma. Ņemot vērā lielo fluīda daudzumu, ko ietekmē dzelonis, mērķis tiek stumts prom, uz priekšu, un pats dzelonis strauji samazina ātrumu. Apskatot rezultātus pie  $Re = 9$ , dzeloņa ietekmētais fluīda apjoms ir ievērojami samazinājies, bet tālu no dzeloņa joprojām ir novērojama maznozīmīga plūsma. Šis ietekmētais fluīda apjoms attiecīgi vēl samazinās pie augstākas  $Re = 900$  vērtības. Attēlos vienīgi nav parādīts, kā kontakta gadījumā mērķis tiek pavirzīts uz augšu.



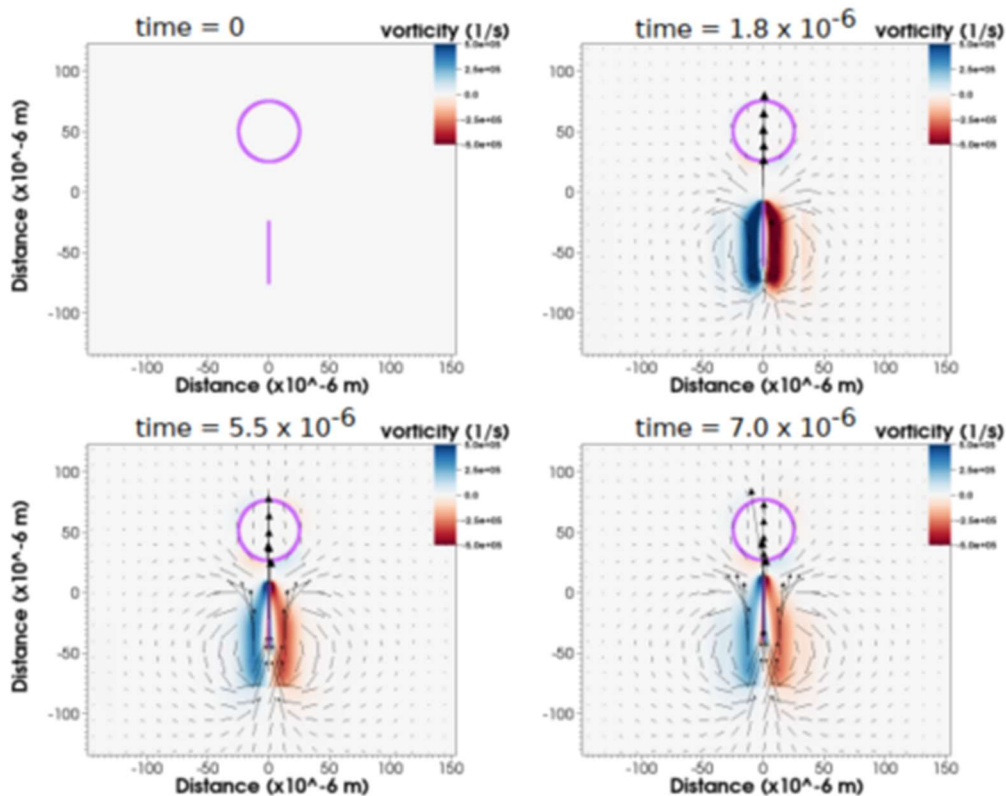
3.8. att. Virpuļojums, ātrums, dzelonis un mērķis pēc laika aprēķinā  $5.50 \times 10^{-6}$  s (aptuveni  $\frac{3}{4}$  no kopējā aprēķina laika) pie  $Re = 0.9, 9$  un  $900$ . [52]

Augšējā kreisā diagramma attēlo simulācijas sākotnējo stāvokli. Ņemt vērā, ka mērķis nav piesaistīts un kustas līdz ar fluīdu.

Sekojošie attēli 3.9. un 3.10. attēlo virpuļojuma krāsu kontūrus un ātruma vektorus simulāciju aprēķiniem pie  $Re = 0.9$  un  $9$ . Pie  $Re = 0.9$ , dzelonis strauji sev sāk vilkt līdz lielu fluīda apjomu, un abās pusēs ir novērojami pretējos virzienos vērsti virpuļi. Savukārt pie lielāka  $Re$  šāda plūsma netiek novērota. Šī lielā robežslāņa un virpuļu veidošanās rezultātā mērķis tiek stumts prom, uz augšu (skatoties attēlā) visu simulācijas laiku. Pie  $Re = 9$  virpuļojums ap dzeloni ir daudz lokālāks un spēcīgāks. Robežslāņa izmērs ir nenozīmīgs, un dzelonis sāk stumt mērķi tikai tam pietuvojoties.

Lai labāk saprastu  $Re$  efektus, tiek salīdzināta dzeloņa veiktā distance pēc  $\frac{3}{4}$  no simulācijas kopējā laika katrā gadījumā. Visos šajos gadījumos pēc šī laika dzelonis nav vēl sasniedzis mērķi, bet ir veicis ne vairāk kā  $0.95L$ , kur  $L$  apzīmē dzeloņa garumu. Pie  $Re = 9$ , dzelonis veica aptuveni  $0.72L$  pēc  $\frac{3}{4}$  no simulācijas kopējā laika, un pie  $Re = 0.9$ , tas veica aptuveni vien  $0.55L$ . Šī ievērojamā ātruma samazināšanās ir pateicoties robežslāņa pieaugošajai ietekmei, kas iedarbojas uz dzeloņa uz priekšu vērsto momentu.

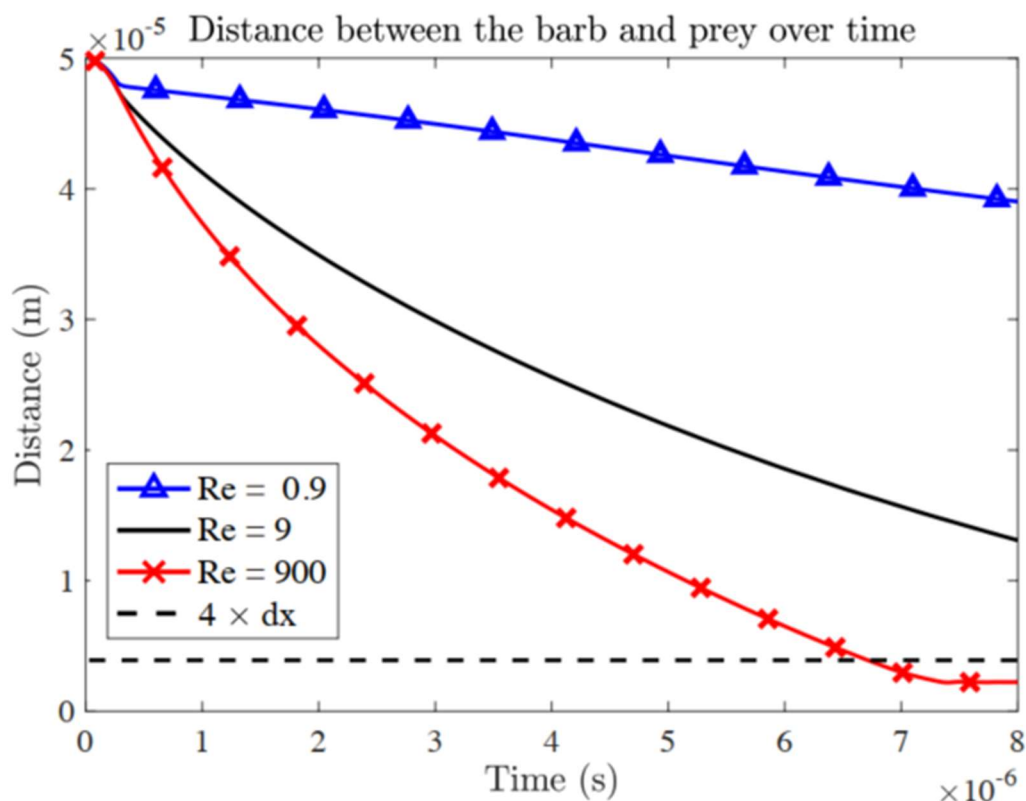




3.10. att. Momentuzņēmumi, kuros redzams virpuļojums un ātruma vektoru lauks pie  $Re = 9$ . [52]

Dzelonis un mērķis attēloti fuksīna krāsā, laukuma iekrāsojums abās pusēs apzīmē virpuļojumu un bultas apzīmē fluīda ātrumu. Ņemt vērā, ka mērķis nav piesaistīts un kustas līdz ar fluīdu.

Attēlā 3.11. tiek novērots, ka jebkurā simulācijas laika punktā,  $Re$  palielinoties, beigu distance starp dzeloni un mērķi monotoni samazinās. Šis monotona distances samazinājums novērojams līdz simulācijas beigām. Gadījumā ar  $Re = 0.9$ , distance samazinās tikai par aptuveni 20% un līkne ir gandrīz lineāra. Kad  $Re = 9$ , distance simulācijas laikā samazinās par aptuveni 75%, un starp laiku un distanci novērojama nelineāra saistība. Pie  $Re = 900$ , distance sākumā strauji samazinās un tad līkne horizontāli izlīdzinās. Taisnā līknes daļa simulācijas beigās vistīcāmāk ir pateicoties interpolētam robežslānim.



3.11. att. Distance starp dzeloņa galu un mērķa tuvāko punktu, izteikta kā funkcija laikā pie  $Re = 0.9, 9$  un  $900$ . [52]

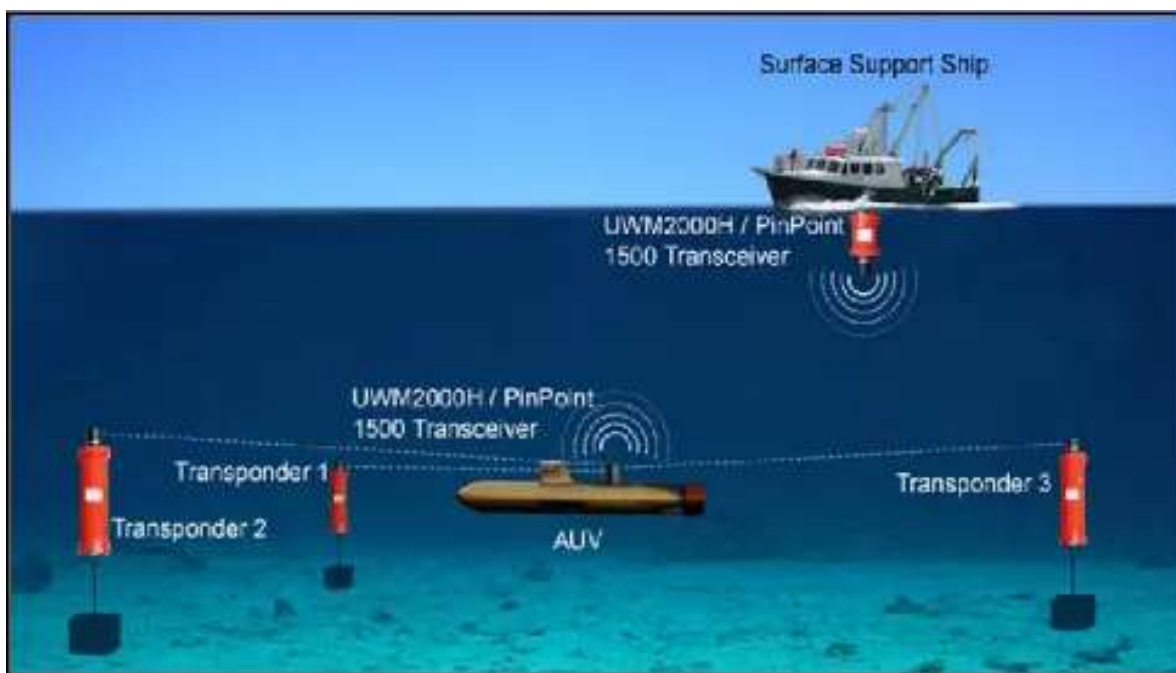
Melnā raustītā līnija –  $4dx$  vērtības slietnis, kur  $dx$  ir ņemts kā vissmalkākā režģa vērtība. Citus simulācijas parametrus skatīt tabulā 3.2.

### 3.3. Secinājumi

Reinoldsa skaitlis parāda attiecību starp fluīda vai gāzes viskozajām un inertajām īpašībām, kā arī plūsmas dabu - vai tā ir lamināra vai turbulenta. Respektīvi, tas ļauj noteikt, kā viens un tas pats fluīds iedarbosies uz objektiem dažādos izmēru mērogos. Tas mainās atkarībā no vides īpašībām un pētāmā objekta ģeometrijas. Pie lieliem  $Re$  skaitļiem, kas dažādām konstrukcijām ir atšķirīgi, raksturīga turbulenta plūsma, kur virsroku ņem fluīda inertās īpašības, bet pie maziem  $Re$  skaitļiem raksturīga lamināra plūsma, kur dominē viskozās īpašības. Plūsmas raksturojošie parametri ātrums un spiediens, turbulences gadījumā, svārstās neregulāri un augstā frekvencē, bet lamināras plūsmas gadījumā ātrums ir vienmērīgs. Aprakstītajā piemērā ar nematocistām, lai izpildītu savu mērķi, mikro mēroga dzelonim ūdens vidē izšaujoties nepieciešams pārvarēt milzīgu vides viskozo pretestību, tāpēc tam ar paātrinājuma palīdzību, kas pārsniedz pat 5000000 g, ir jāsasniedz relatīvi liels pārvietošanās ātrums. Šādai konstrukcijai makro mērogā tajā pašā ūdens vidē nebūtu nepieciešams sasniegt tik lielu paātrinājumu, jo dominētu vides inertās īpašības un ūdens pretestība būtu daudz mazāka.

## 4. ZEMŪDENS ROBOTU ORIENTĒŠANĀS SISTĒMA

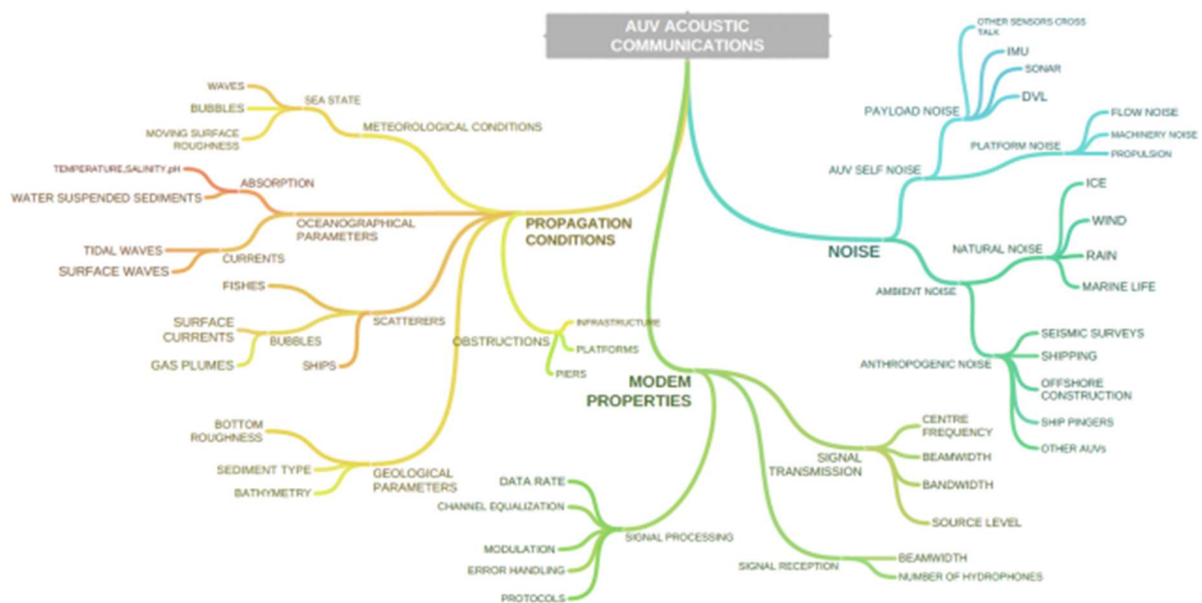
Pateicoties mūsdienu augstajām tehnoloģijām, praktiski jebkuras ierīces atrašanās vietu ir iespējams noteikt ar augstu precizitāti. Piedaloties GPS satelītiem, dažādas ierīces un transportlīdzekļi nodod informāciju ne tikai par savu pozīciju, bet arī par pārvietošanās ātrumu. Ne tikai pozīcijas, bet arī dažādu citu datu apraide notiek ar virszemes signālu palīdzību. Ar šiem signāliem ir iespējams pat pārraidīt tiešsaistes video ievērojamos attālumos. Labs piemērs ir mūsdienās augstu popularitāti guvušie gaisa bezapkalpes aparāti, jeb droni, ar kuriem var lidot kilometriem tālu un tajā pašā laikā ar tiešsaistes video palīdzību var gūt pieredzi no to skata punkta. Signāli virszemē ir tik labi attīstīti, jo šeit notiek visa cilvēka ikdiena, sadzīve, komunikācija. Savukārt citā vidē, kā, piemēram, zem ūdens, šī nozare kļūst ļoti specifiska, jo ir nepieciešama speciāla tehnika, lai izpildītu uzdevumus, kas virszemes vidē būtu visai vienkārši. Taču ASV flote un Jūras Okeanogrāfijas birojs ir izvirzījuši mērķus padarīt AZT pieejamus, samazināt to izmaksas, kā arī panākt to, ka tie daudzos pielietojumos spēlē kritisku lomu [55]. Tipiskas AZT pētniecības misijas aprīkojums attēlots zemāk redzamajā attēlā 4.1.



4.1. att. Tipiskas AZT pētniecības misijas aprīkojums. [56]

Vadoties pēc raksta [57] autoru pieredzes, ir izšķiramas trīs kategorijas, kas ietekmē AZT komunikācijas kvalitāti: skaņas izplatīšanās apstākļi, specifiski aprīkojuma modemu iestatījumi un fona trokšņi saziņas kanālā. Attēlā 4.2. šīs kategorijas ir sazarotas vēl detalizētāk. Dažādu sensoru ievērojamā tehnoloģiskā attīstība ir ievērojami uzlabojusi AZT pozicionēšanās precizitāti un komunikāciju. Ar devēja palīdzību, kas ir uzstādīts uz transportlīdzekļa virsmas, kā, piemēram, augstas precizitātes akustiskā pozicionēšanas sistēma (APAPS), var tikt izmantota ultraīsviļņu bāzlinijas (no angļu *ultra-short baseline*, *USBL*) sistēma [58], lai noteiktu apakšējo retranslatoru atrašanās vietu un uzsāktu AZT

pozicionēšanu. Kad uzsākta, precīza akustiskā navigācija tiek panākta pateicoties modernajam zemūdens retranslatoru pozicionēšanas (ZRP, angļiski *Underwater Transponder Positioning, UTP*) paņēmienam. Šīs pozicionēšanas sistēmas priekšrocība ir tāda, ka, pretstatā garo viļņu bāzlīnijas (no angļu *Long Baseline, LBL*) sistēmai, kas pieprasa kā minimums 2 retranslatorus (vēlams vairāk), sistēmas darbībai pietiek sākot ar vienu retranslatoru. ZRP retranslatori arī var tikt novietoti izpētāmā apgabala zonā, nevis kā garo viļņu bāzlīnijas sistēmā, kur nepieciešams šos retranslatorus izvietot pa pētāmā apgabala perimetru. Ieviestā ciešā integritāte starp ZRP attāluma noteikšanu un transportlīdzekļa inerciālo navigācijas sistēmu (INS) ievērojami uzlabo reāllaika atrašanās vietas noteikšanas precizitāti.



4.2. att. Zemūdens komunikāciju ietekmējošo faktoru pārskats. [57]

Bez nepārtrauktiem pozīcijas labojumiem no globālās pozicionēšanas sistēmas (GPS) vai atskaites stacijas, lai sasniegtu nepieciešamo atrašanās vietas noteikšanas precizitāti, ir nepieciešams izmantot INS. Lai šī sistēma spētu veiksmīgi uztvert un mazināt inerces mērījumu bloka (IMB, angļiski *inertial measuring unit, IMU*) ātruma kļūdu, tai ir nepieciešams neatkarīgs un uzticams paša transportlīdzekļa ātruma mērījums. Doplera ātruma reģistrs (DĀR, no angļu *Doppler Velocity Log, DVL*) nodrošina šo vērtību, padarot to par kritiski nepieciešamu komponenti ar garo viļņu bāzes sistēmu aprīkotajiem AZT, jo DĀR atbalstītā INS ir galvenais faktors pozicionēšanas precizitātē.

Pēc empīriskajiem testiem ir redzams, ka arī manevrēšanas spēja atstāj ievērojamu ietekmi uz IMB ātruma kļūdu. Zāles plāvēja veida izpētes maršrutam ir par kārtu mazāka pozīcijas kļūda, gan maršruta garenvirzienā, gan šķērsvirzienā, nekā garu taisnu līniju. Rezultātā, situācijās, kad dreifs pārsniedz pieļaujamo šķērsvirziena kļūdas vērtību, maršrutā var tikt ieprogrammēti pagriezieni. Reāllaika navigācijas procesora izmēģinājuma maršruti uzrāda, ka dreifa kļūdas vērtība nepārsniedz 0.1% robežu no veiktās distances. Hidrogrāfam maršruta plānošanas procesā obligāti ir jāņem vērā pozicionālo dreifu, jo tas ir atslēgas parametrs

nosakot izpētes maršruta līnijas garumu, un tam ir jābūt nodefinētam katrai AZT izpētes sistēmai.

Precīzai pozicionēšanas sistēmai ir nepieciešami divi būtiski rīki – uz klāja jeb borta esošs navigācijas procesors un aprīkojums navigācijas datu pēcapstrādei.

Uz borta esošais reāllaika navigācijas procesors nodrošina pilnīgu laika sinhronizāciju un šīs navigācijas sistēmas integrāciju ar vides sensoriem. To arī var aktivizēt attālināti, uzraudzīt un apgādāt ar atjauninātiem virszemes pozīcijas datiem izmantojot akustisko modemu no ultraīsviļņu bāzlīnijas sistēmas. Papildus šim, navigācijas procesors izmanto ciešu savienojumu starp INS un ZRP, kā arī navigācijas un vides sensoru ievades datus, lai aprēķinātu pēc iespējas precīzāku esošo atrašanās vietu.

Navigācijas pēcapstrādes programmatūra, ko izstrādājis *MATLAB*®, izmanto pozīcijas un ātruma mērījumus pirms un pēc dotā laika brīža, tādejādi iegūstot visprecīzāko pēcapstrādes rezultātu, pielietojot Kalmāna filtrā (zināms arī kā lineāri kvadrātiskais novērtējums, no angļu *linear quadratic estimation*) ietvertu optimālās izlīdzināšanas algoritmu. Navigācijas pēcapstrāde ir nepieciešama reāllaika pozīcijas datu uzlabošanai, lai iegūtu nepieciešamo pozīcijas precizitāti.

Batimetrijas, jeb dziļuma mērīšanas mērījumos lielu daļu no kļūdas ietekmē plūdmaiņas svārstības. AZT uzdevuma laikā bieži vien nav pieejami dati, kas iegūti no uz sauszemes izvietotiem plūdmaiņas mērinstrumentiem. Kā alternatīvu var pielietot no GPS ekstrahētus plūdmaiņas mērījumus, izmantojot elipsoīdās atsauces uzskaites (EAU, no angļu *ellipsoid-referenced survey, ERS*) tehniku, kas var palīdzēt apmierināt vajadzību pēc ūdenslīmeņa korekciju nosūtīšanas no virszemes transportlīdzekļiem. Diemžēl problēmu sarežģī AZT spējas trūkums nepārtraukti noteikt elipsoīdo augstumu. Lai šo problēmu atspēkotu, no GPS bojas, viļņu planiera vai tuvumā esoša virszemes transportlīdzekļa var tikt aprēķinātas virtuālās plūdmaiņas korekcijas (VPK) un ekstrapolētas AZT nosūtāmos skaņas signālos.

Pētnieciskā misija kopumā sastāv no dažādiem izmēģinājuma izbraucieniem. Katrs izbrauciens ietver transportlīdzekļa pārvietošanos un tiek vadīts no sākuma līdz transportlīdzekļa savākšanai. Lai pienācīgi saplānotu misiju, ir ļoti svarīgi apzināties izbraucieniem skaitu un parametrus, kas sevī ietver:

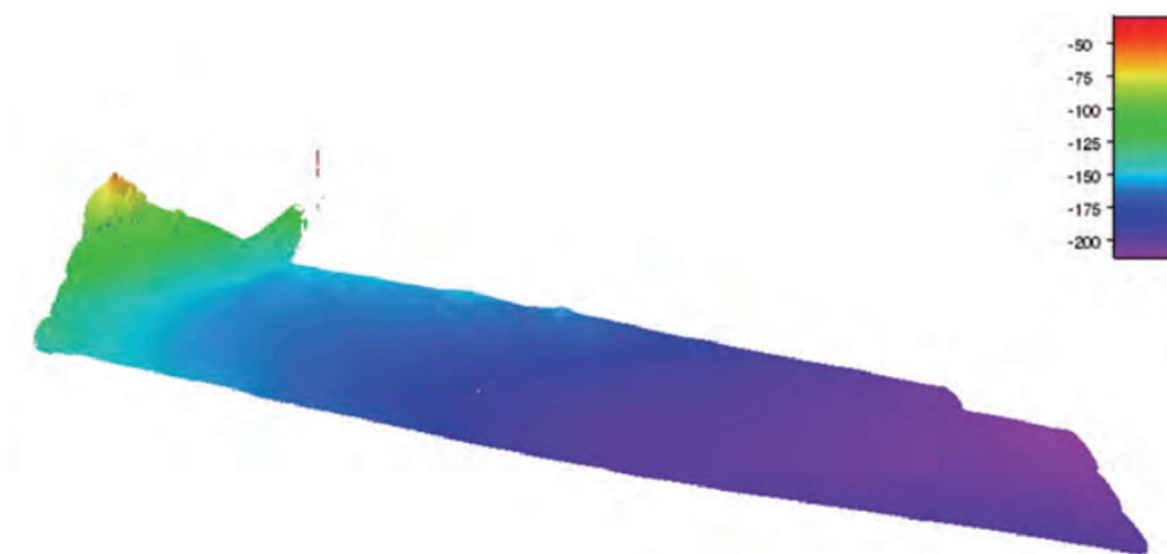
- augstumu no gultnes dibena un rezultējošā starojuma platumu,
- zemāko punktu,
- straumes,
- baterijas izturību,
- cik bieži transportlīdzeklis sniedz datus par savu pozīciju,
- retranslatora pozīcijas maiņas biežumu,
- ZRP retranslatoru lokāciju, izvietojumu un skaitu,
- Maksimālo pozīcijas dreifu,
- Līniju un pagriezienu skaitu,
- Izbraucieniem skaitu misijas noslēgšanai,
- Okeanogrāfiskos apstākļus,
- Līniju virzienus,
- Pozīcijas dreifa ietekmi,



- Virzības ātrumu.

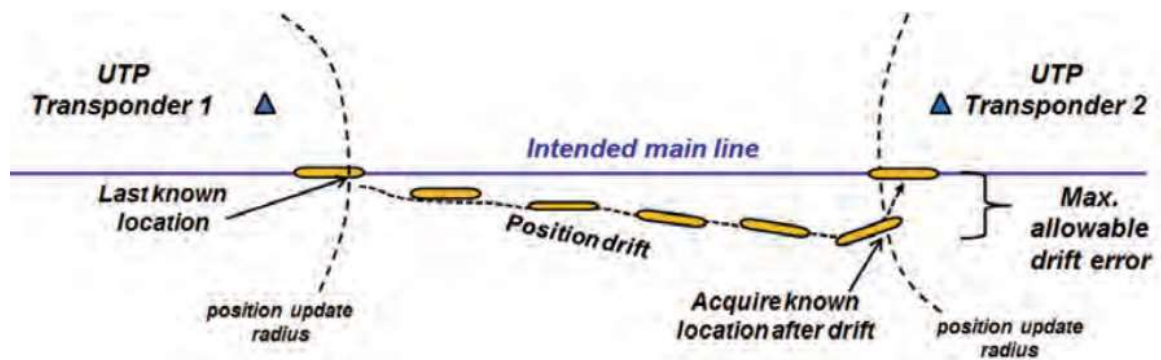
Vēl citi parametri izrietēs no paša transportlīdzekļa konfigurācijas un pozicionēšanas sistēmas.

AZT ir ļoti efektīvs datu ievākšanas rīks, jo tas spēj noturēt konstantu dziļumu, tādējādi izslēdzot skenēto šaurjoslas datu plūsmas iztrūkumus. Optimālais augstums ir augstākais punkts ar platāko skenera starojuma pārklājumu, bet nepazaudējot spēju DĀR un daudzstaru hidrolokatora signālam sasniegt zemāko konstatēto punktu. Attēls 4.3. attēlo autonomās zemūdens ierīces REMUS 600 daudzstaru starojuma savāktos datus dziļumā no 50m līdz vairāk kā 200m dziļumam. Nemainīgais augstums nodrošina nepārtrauktību datu plūsmā.



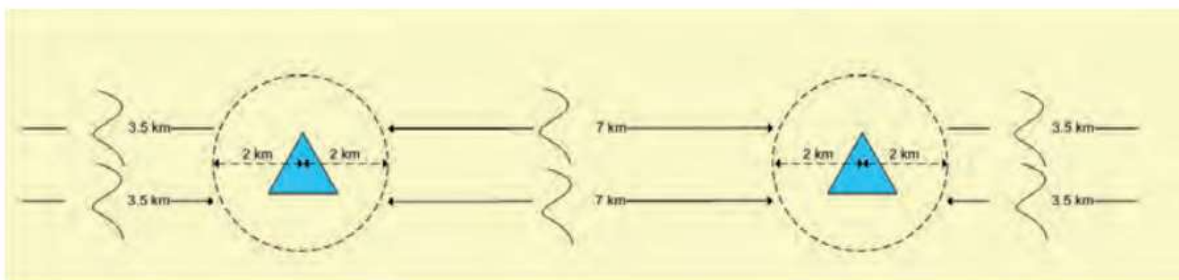
4.3. att. REMUS 600 EM3002 vienā izbraucienā ievāktie dati ar daudzstaru skeneri, gultne ar plašā diapazonā mainīgu dziļumu. [55]

Gadījumā, ja reāllaika pozīcija aizdreifē pārāk tālu no plānotā maršruta, nepieciešamas papildus korekcijas. Pozīcijas analīze pēc laika palīdzēs uzlabot nepieciešamo aprēķinu pozīcijas datu atjaunošanas biežumam. Tāpēc šķērsvirziena pozīcijas dreifs ir atslēgas lielums misiju plānošanā. Aģentūra, kas veic izpēti, nosaka maksimālo pieļaujamo pozīcijas dreifu, kas ievērojami ietekmē retranslatoru izvietojumu un apjomu. Kā redzams attēlā 4.4., retranslatori ir izvietoti tā, lai reāllaika pozīcija tiktu atsvaidzināta pietiekami laicīgi pirms transportlīdzekļa ir pārsniedzis maksimālo maršruta dreifu. Papildus transportlīdzekļa dreifu ietekmē arī straumju virziens un spēks. Pareizs maršruta līniju virziens, kā arī transportlīdzekļa ātrums, var tikt stratēģiski izmantoti, lai pārvarētu straumju ietekmi un mazinātu transportlīdzekļa dreifu.



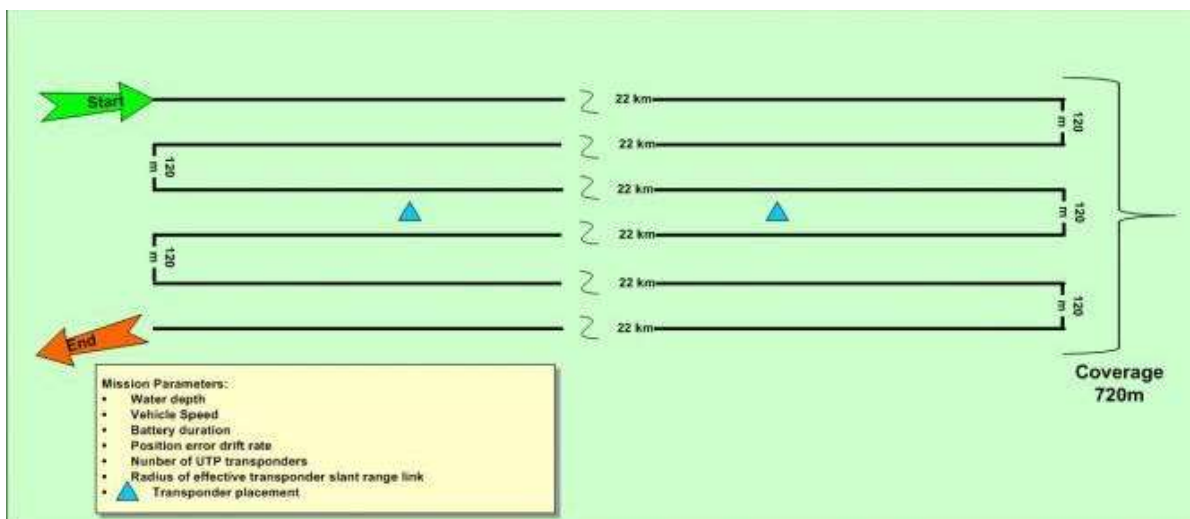
4.4. att. Retranslatoru izvietojums pēc vajadzības. [55]

Katrs ražotājs saviem ZRP retranslatoriem pie dažādiem vides apstākļiem norāda nosakāmo pozīcijas precizitāti 2 km rādiusā no retranslatora. Realitātē dažādi okeāna vides apstākļi ietekmēs akustiskā signāla kvalitāti un distanci starp retranslatoru un transportlīdzekli, un tie būs atšķirīgi dažādās vidēs. Attēlā 4.5. ir apskatāma pētnieciskā izbrauciena shēma ar diviem retranslatoriem un 2 km komunikāciju signāla rādiusu. Šo pētnieciskā maršruta līnijas garumu nosaka Hidrogrāfijas birojs, nosakot arī pieļaujamo šķērsvirziena dreifu un pozīcijas nobīdes vērtības.



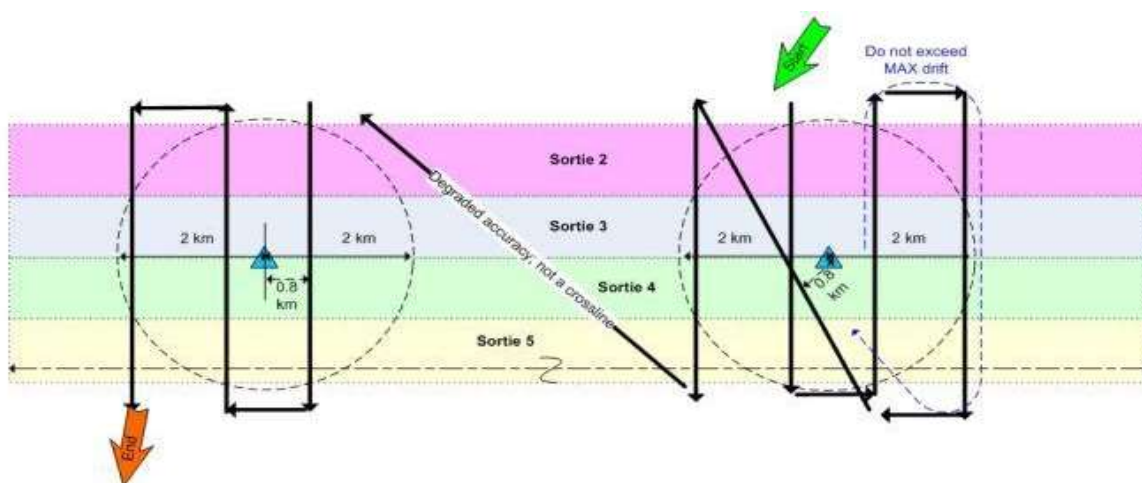
4.5. att. ZRP retranslatoru izvietojums relatīvi veicamā ceļa līnijas plānam. [55]

Galvenais faktors, kas ietekmē ievākto datu apjomu vienā izbraucienā, ir baterijas kapacitāte. Tāpēc datu ievākšana tiek ierobežota līdz pāris stundām, atstājot resursus transportlīdzekļa palaišanai, atgūšanai, un kopējā tehniskā dokumenta saņemšanai. Attēls 4.6. attēlo izbrauciena pamatlīnijas shēmu, kura ir izbraucama ar vienu baterijas uzlādi (REMUS 600). Redzamajā piemērā līniju skaits ir speciāli izrēķināts, un ir izvietotas ar 120m atstarpēm.



4.6. att. Pamatlīnijas shēma vienam izbraucienam. [55]

Veiksmīgus izbraucienus var veikt līdz tiek sasniegta maksimālā šķērsvirziena distance no retranslatoriem, saglabājot maksimāli kvalitatīvu akustisko signālu. Kad šī distance tiek pārsniegta – retranslatori jāpārvieta. Var arī veidot izbraucienus grupas, lai samazinātu nepieciešamību pēc retranslatoru pārvietošanas, kā, piemēram, attēlots attēlā 4.7. Izbraucienus skaits, ar kuriem plānībā pabeigt misiju, var tikt noteikts tikai pēc visu iepriekš minēto faktoru izvērtēšanas. [55]



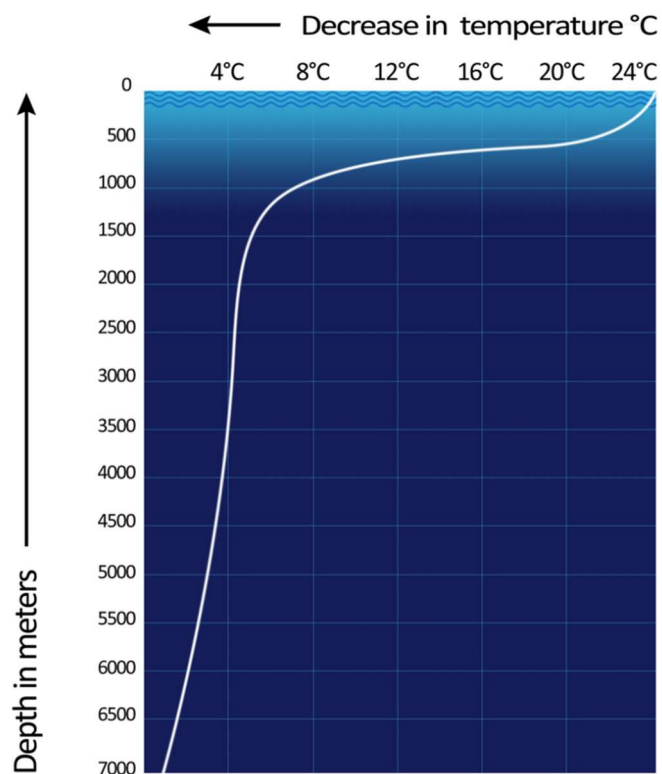
4.7. att. Pamatlīnijas shēma vienam izbraucienam. [55]

#### 4.1. Skaņas noteikšanas un attāluma mērīšanas kanāls

Atkarībā no okeāna ūdens galvenajiem raksturojošajiem faktoriem – temperatūras, spiediena un sāļuma līmeņa, okeāna ūdens vide dziļuma virzienā iedalās slāņos. Skaņas noteikšanas un attāluma mērīšanas (SNAM) kanāls (no angļu *SOund Fixing And Ranging* jeb *SOFAR*), saukts arī par dziļo skaņas kanālu (no angļu *deep sound channel* jeb *DSC*), ir horizontāls ūdens slānis okeānā, kura dziļumā skaņas pārvietošanās ātrums ir vismazākais. Šis

kanāls kalpo kā norobežojoša eja, par kuru fokusētā veidā pārvietojas akustiskā enerģija, un zemfrekvenču skaņu viļņi šeit var pārvietoties tūkstošiem kilometru, līdz tie izkliedējas. [59] Šis process notiek pateicoties skaņas viļņu īpašībām: skaņas viļņi tiek nepārtraukti liekti un laužti zemākā skaņas ātruma reģiona virzienā. Pieņemot, ka skaņas avots atrodas dziļajā skaņas kanālā, skaņa, kas ceļo augšup no skaņas avota, savu ceļa trajektoriju izliec atpakaļ uz skaņas ātruma minimumu. Līdzīgi ir arī uz leju vēršam skaņas signālam – tas novirzās atpakaļ un minimuma slāni.

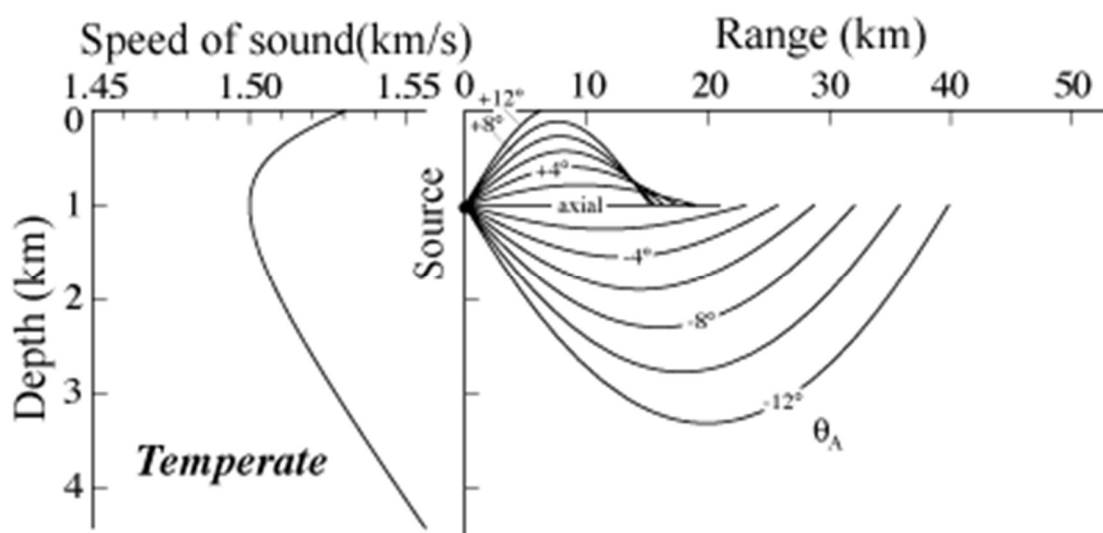
Dziļais skaņas kanāls centrējas tādā dziļumā, kur kombinējas temperatūras un ūdens spiediena (mazākā mērā sāļuma) savstarpējie efekti, ūdens kolonnā (iedomāts cilindrs atklātā okeāna ūdeņos) veidojot minimālo skaņas ātruma reģionu. Spiediens okeānā līdz ar dziļuma palielināšanos palielinās lineāri, savukārt temperatūra ir daudz mainīgāka - galvenokārt strauji krītas galvenajā termoklīnā, no ūdens virsmas līdz apmēram 1000 m dziļumam, līdz tā gandrīz vairs nemainās līdz pašai okeāna gultnei (attēls 4.8.). Tuvu ūdens virsmai strauji krītošā temperatūra izraisa skaņas ātruma samazināšanos, jeb negatīvu skaņas ātruma gradientu. Pielielinoties dziļumam, pieaugošais spiediens izraisa skaņas ātruma pieaugšanu, jeb pozitīvu skaņas ātruma gradientu. Dziļums, kurā skaņas ātrums ir vismazākais, tiek dēvēts par skaņas kanāla asi [60]. Šī parādība plaši tiek izmantota zemūdeņu karadarbībā. Kā arī šajā kanālā bieži ir sastopamas zemfrekvenču skaņas, par kuru avotu uzskata finvaļus (*Balaenoptera physalus*). Zinātnieki uzskata, ka šie vaļi, iespējams, ienirst šajā kanālā un “dzied”, tādā veidā komunicējot ar citiem finvaļiem kilometriem tālu [61].



4.8. att. Tropiskā okeāna termoklīnas grafiks, kas attēlo dziļuma-temperatūras attiecību.  
Autors: Praveenron (CC BY-SA 3.0)

Šajā skaņas kanālā saglabājas tikai konkrēti skaņas viļņi, kas nerasniedz okeāna virsmu vai gultni. Skaņas viļņi, kas ceļo virzienā uz augšu leņķī, kas ir mazāks par apmēram  $12^\circ$ , tiek laužti atpakaļ virzienā uz skaņas ātruma minimumu, līdz tas vispār sasniedz okeāna virsmu. Līdzīgi ir arī ar viļņiem, kas izplatās okeāna gultnes virzienā – viļņi ar izplatīšanās virziena leņķi, kas mazāks par apmēram  $12^\circ$ , tiek laužti atpakaļ virzienā uz minimumu, pirms tie sasniedz gultni. Skaņas viļņi, kas no skaņas avota izplatās virzienā uz augšu stāvākā leņķī, vēl joprojām tiek laužti, bet ne pietiekami, lai tie izvairītos no ietriekšanās okeāna virsmā. Analogiski tas pats notiek virzienā uz leju. Attēlā 4.9., kur labajā pusē uzskatāmi attēloti skaņas viļņu izplatīšanās ceļi uz skaņas kanāla asi, 1000 m dziļumā, līnijas, salīdzinājumā ar horizontālajiem lielumiem, ir ievērojami pārspīlētas. Realitātē šī trajektorija ir gandrīz horizontāla.

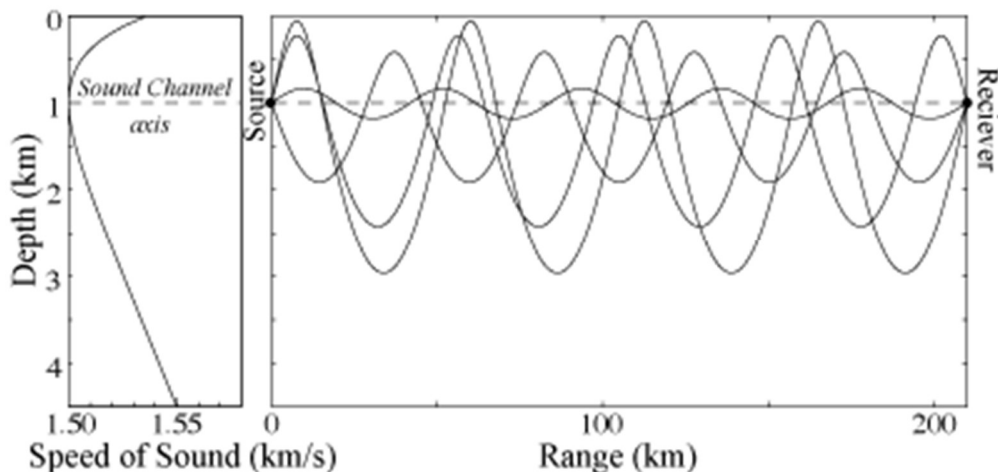
Kad vien skaņa ietriecas ūdens virsmā vai gultnē, tā zaudē enerģiju. Savukārt, kad tā atstarojas no nelīdzenās okeāna virsmas vai gultnes, daļa enerģijas tiek izkliedēta un zaudēta. Skaņas vilnis, kas pārāk bieži ieskrien kādā no šīm robežām, būs pārāk vājš, lai to uztvertu.



4.9. att. Skaņas ātruma profila grafiks atkarībā no dziļuma (pa kreisi) un skaņas pārvietošanās trajektorijas caur ūdens kolonnu no skaņas avota (pa labi). Uzrādīti tikai tie stari, kas neietriecas ne okeāna ūdens virsmā, ne gultnē. [60]

Arī skaņa, kas neietriecas ūdens virsmā vai gultnē, joprojām zaudēs enerģiju pateicoties absorbcijai. Lai gan zemo frekvenču skaņas absorbcijas dēļ zaudē mazu enerģijas apjomu. Tā rezultātā zemo frekvenču skaņas var tik uztvertas pēc ļoti lielās okeānā noceļotās distancēs. Palielinoties skaņas frekvencei, arī absorbcijas līmenis palielinās, tāpēc augstāku frekvenču skaņas ir uztveramas mazās distancēs. Pati distance, kādā skaņa ir uztverama, ir atkarīga gan no frekvences, gan cik skaļš ir skaņas avots, gan arī no vides fona trokšņa.

Skaņas viļņi, kas pārvietojas skaņas kanālā, pārvietojas pa daudziem dažādiem ceļiem. Kad skaņas avots un uztvērējs ir novietoti skaņas ātruma minimuma dziļumā, sauktu par skaņas kanāla asi, kā attēlā 4.10., skaņas viļņi ceļo praktiski taisni gar asi, ap to svārstoties un gandrīz sasniedzot gan kanāla augšu, gan apakšu.

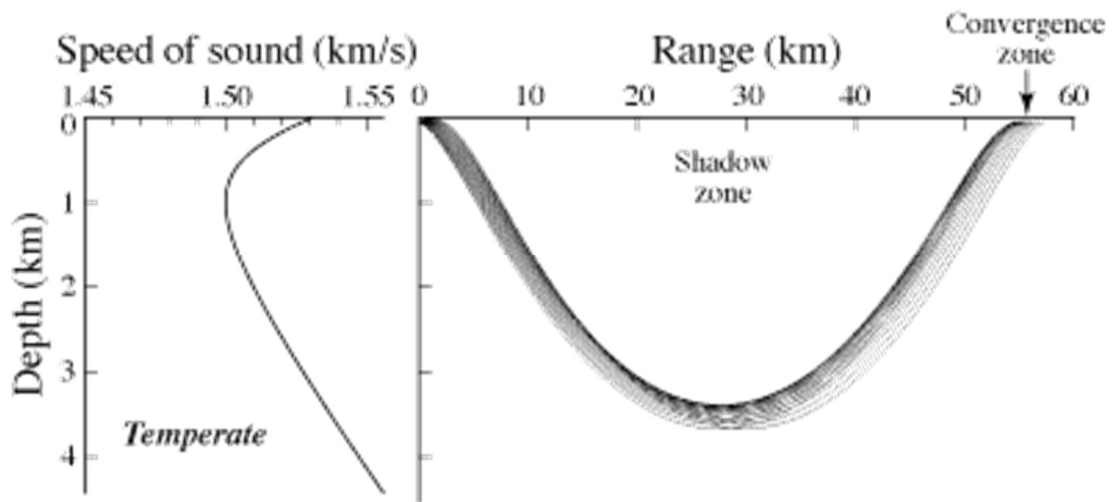


4.10. att. Skaņas kanāla ass vidējā platuma grādos. [60]

Pa kreisi šajā attēlā ir redzams skaņas ātruma profils vidējos platuma grādos. Pa labi ir attēloti ceļi, pa kuriem skaņa pārvietojas no avota līdz uztvērējam, abi novietoti 1000 m dziļumā, 210 km attālumā.

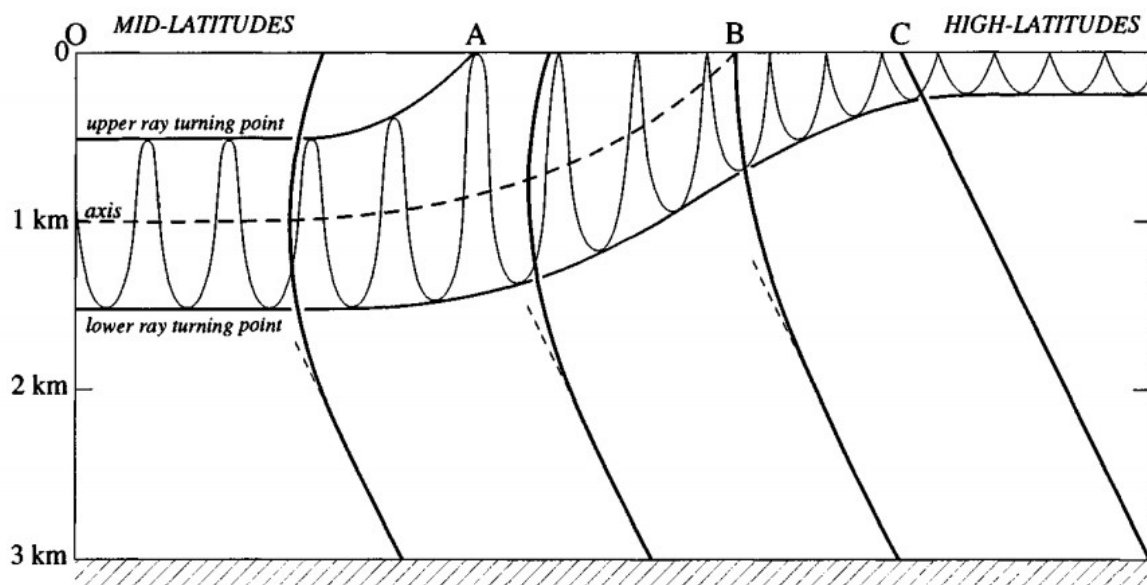
Neskatoties uz to, ka skaņa no avota izplatās visos virzienos, konkrētā vietā novietotu uztvērēju sasniegs tikai tie viļņi, kas no avota izplatās pa ceļiem konkrētos slīpuma grādos. Skaņas viļņi, kas pārvietojas par šiem dažādajiem ceļiem, mērķi sasniedz arī dažādos laikos. Piemēram, konkrēta viena sprādziena avots būs dzirdams kā vairāki secīgi klusāki sprādzieni, secīgi skaļāki, līdz kulminācijai. Parasti pēdējais pulss ir visskaļākais un nāk no skaņas viļņa, kas ceļojis teju pa skaņas kanāla asi. Lai gan tas ir ceļojis pa īsāko distanci, tas ir ceļojis tuvu skaņas ātruma minimuma reģionam, kur skaņas ātrums ir vismazākais.

Ceļi, par kuru skaņa pārvietosies no okeāna virsmāi tuvumā esoša avota, ir diezgan atšķirīgi. Ja skaņas kanāla ass zona izplešas līdz okeāna virsmāi, stari, kas iziet no avota tuvu horizontālam virzienam, neietrieksies okeāna virsmā vai gultnē. Šos skaņas viļņus, tā pat, kā viļņus, kas izplatās no dziļumā esoša avota, var uztvert ļoti lielās distancēs. Skaņas viļņi no šādiem tuvu virsmāi esošiem avotiem saplūst, ik pa 50-60 km veidojot paaugstināta skaņas spiediena apgabalus aptuveni tādā pašā dziļumā, kādā atrodas avots. Šīs zonas tiek sauktas par konverģences zonām. Un starp šīm zonām ir zemāka skaņas spiediena reģioni, saukti par ēnas zonām, kā attēlā 4.11.



4.11. att. Skaņas ātruma profila grafiks atkarībā no dziļuma (pa kreisi); skaņas viļņu izplatšanās ceļi no avotu, kas atrodas relatīvi tuvu ūdens virsmai, 50 m dziļumā (pa labi). Uzrādīti tikai tie stari, kas neietricas ne okeāna ūdens virsmā, ne gultnē. [60]

Kā jau iepriekš minēts, skaņas kanāla ass tradicionāli atrodas apmēram 1000 m dziļumā, taču, kā attēlots attēlā 4.12., šis dziļums mainās – mierīgos ūdeņos šis kanāls ir seklāks un pie lielākiem platuma grādiem (zemeslodes ziemeļu un dienvidu reģionos) tas pat sasniedz okeāna virsmu. Grafikā attēloti četri skaņas ātruma profili. Vides apstākļi pieņemti kā nemainīgi. Punktā A kanāla augšējā robeža pirmo reizi sasniedz okeāna virsmu. Skaņas kanāla ass sasniedz ūdens virsmu punktā B un skaņas ātruma gradients paliek konstants punktā C. [60]



4.12. att. Skaņas kanāla ass dziļuma izmaiņas atkarībā no platuma grādiem. [60]

## 4.2. Secinājumi

Komunikācija zem ūdens tiek aktīvi attīstīta, ar mērķi to padarīt pietiekami precīzu un uzticamu. Attīstoties komunikācijas tehnoloģijām, arī AZT kļūs daudz pieejamāki, ar mazākām izmaksām. Zemūdens vidē galvenokārt tiek izmantoti akustiskie signāli. Signālus un plānoto AZT misiju zem ūdens stipri ietekmē daudzi vides faktori, kā, piemēram, temperatūra un straumes, tāpēc misijas aprīkojums, neskaitot pašu AZT ar komplicēto uzbūvi, sastāv no dažādiem raidītājiem un uztvērējiem. Papildus aprīkojumam, misija parasti notiek operatora uzraudzībā, kurš pēc nepieciešamības ievieš korekcijas AZT maršrutā. Misijas ilgumā atslēga ir baterijas kapacitāte.

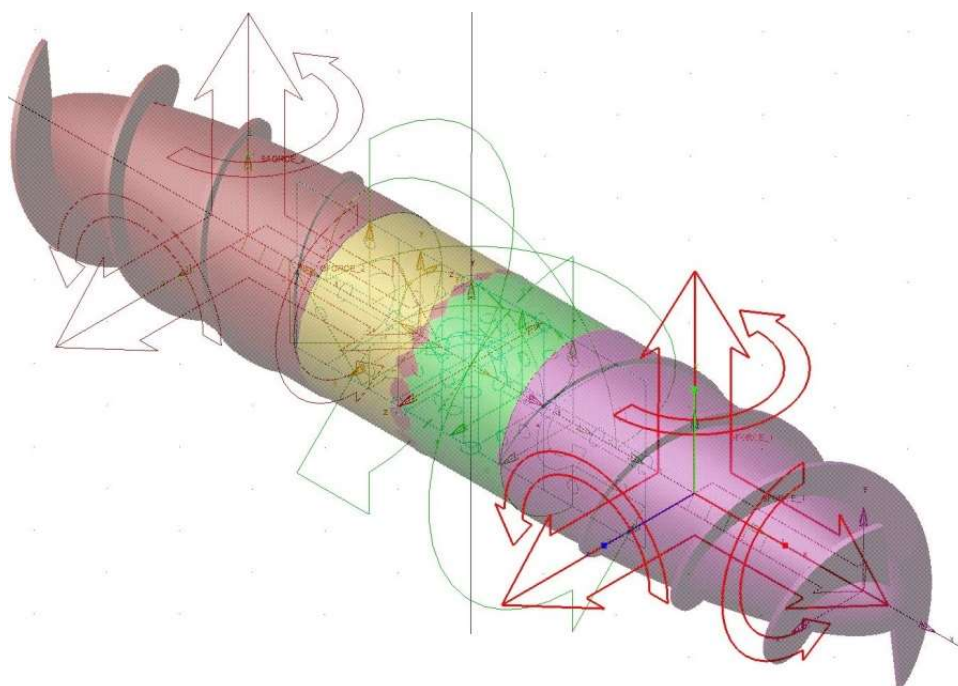
Tālsakaru komunikācijai tiek izmantots īpašs okeāna slānis, saukts par skaņas noteikšanas un attāluma mērīšanas kanālu, kurā zemfrekvenču skaņu viļņi spēj pārvietoties pat tūkstošiem kilometru tālu. Plaši tiek izmantots zemūdeņu karadarbībā.



## 5. MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ *MSC ADAMS*

### 5.1. Modeļa ģeometrija

Lai analizētu Durbja ģeometrijas shēmas uzvedību ar lokāmu vidus korpusu, tika izveidots matemātisks modelis daudzķermeņu mehānismu dinamikas modelēšanas programmā *MSC Adams*, kas apskatāms 5.1. attēlā. Pati vītņu ģeometrija ir iepriekš izveidota un importēta no datormodelēšanas programmas *SolidWorks*.



5.1. att. *MSC Adams* matemātiskais modelis.

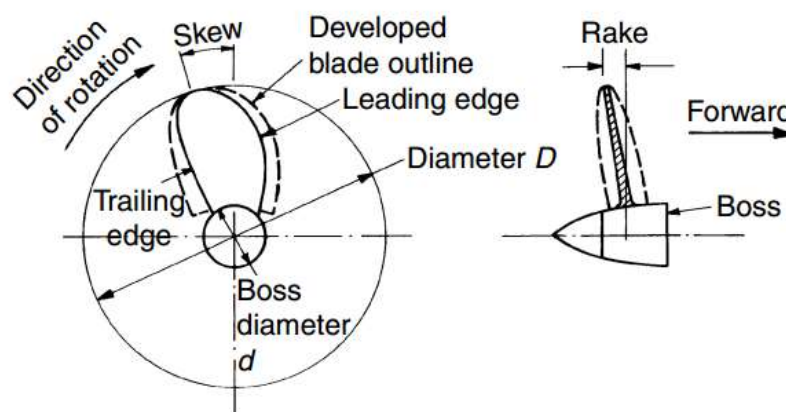
Tas veidots tā, lai tam būtu visas tās pašas brīvības pakāpes, kā paredzētajam modelim. Viduskorpusss sastāv no sfēras un diviem cilindriem, kas savā starpā savienoti ar kustīgiem šarnīriem. Pie cilindriem pievienoti vītņkorpusi, kas spēj veikt rotāciju, kā paredzēts reālajam mehānismam. Modelim tādējādi ir 10 brīvības pakāpes. To var traktēt kā vidusdaļas šarnīra krustiņu, kam ar diviem šarnīriem pievienota priekšdaļa un ar diviem aizmugures daļa. Būtībā šeit ir izveidots 6.3.4. nodaļā minētais krustiņa tipa šarnīru mehānisms. *MSC Adams* paredzēta daudzķermeņu mehānismu dinamikas modelēšanai, bet tā nemodelē automātiski ūdens pretestību, kā to dara plūsmas modelēšanas programma *Flow3D*. Tā kā ir praktiski neiespējami CFD programmās izveidot simulāciju kustīgam mehānismam ar 10 brīvības pakāpēm tā, lai tiktu ņemta vērā pilna fluīda un mehānisma saišu mijiedarbība, praksē tiek plaši pielietota metamodelēšanas tehnoloģija [62]. Vadības principa pārbaudei tika izveidots ūdens pretestības metamodelis, kurā pieņemts, ka uz transportlīdzekļa sastāvdaļām (vidusdaļu, priekšgalu un aizmuguri) darbojas pretestības spēki un momenti, kuri ir proporcionāli lineārā un leņķiskā ātruma kvadrātiem. Tiek lietots modelis, kurā kustības ātruma un leņķātruma vektori tiek projicēti uz kustīgo koordinātu sistēmu (*Adams*

terminoloģijā marķieru) asīm. Attiecīgās pretestības koeficientu vērtības tika atrastas, lietojot programmu *Flow3D* ar plūsmā iestiprinātām Durbja sastāvdaļām. Modelis tika veidots tikai lai pārbaudītu transportlīdzekļa veiktspēju un manevrējamību. Tajā netika ņemti vērā tādi parametri kā:

- pievienotās masas efekts;
- virsmas berze;
- plūsmas izmaiņas uz aizmugurējo korpusu, kamēr transportlīdzeklis ir saliektā stāvoklī.

## 5.2. Durbja ģeometrijas izstrādē izskatītie dzenskrūvju parametri

Tā kā Durbja priekšējā un aizmugurējā korpusa kā dzenošo orgānu galvenais elements ir uz tiem izveidotās vītņes, tika apskatītas dzenskrūves, kas tehniski ir tuvākais risinājums Durbja vītņotajiem korpusiem. Šajā nodaļā tiks apskatīti dzenskrūves konstruēšanas pamati, lāpstiņu forma un īpašības. Šie formu kritēriji un īpašības ir praktiski galvenie nosacījumi, kas nosaka dzenskrūves darbību un tās veiktspēju. Pamatā to ģeometrija tiek veidota tā, lai, tām griežoties, veidotos spirāles plakne. Zemāk, attēlā 5.2., ir apskatāmi dzenskrūves galvenie ģeometriskie rādītāji.



5.2. att. Dzenskrūves ģeometrija. [63]

### 5.2.1. Dzenskrūves raksturojošie parametri

#### 1) Diametrs

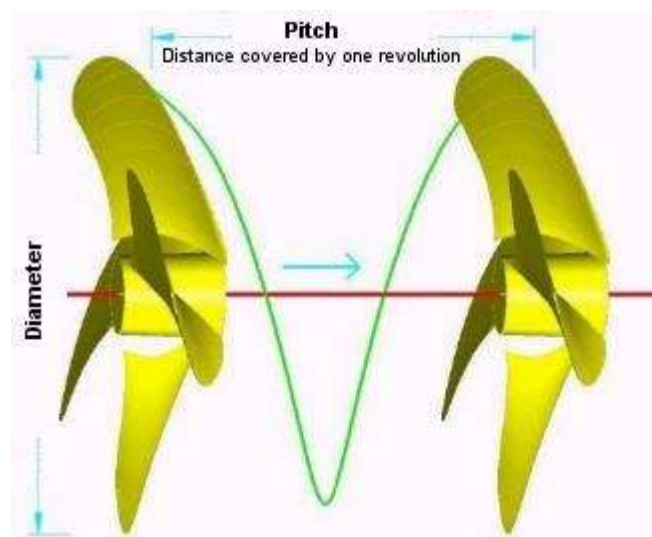
Dzenskrūves izveidē viens no galvenajiem izmēriem ir tās kopējais diametrs  $D$ . Tās izvēlē lielu lomu spēlē transportlīdzekļa dizains, bet tomēr pats galvenais šī aspekta izvēlē ir tās griešanās ātrums un tai pievadītā jauda. Diametrs būtībā ir galvenais faktors, kas nosaka dzenskrūves spēju absorbēt un novadīt jaudu, tāpēc arī tas ir galvenais faktors tās grūst spējas (aksiālās slodzes) noteikšanā. Vienkārši rēķinot, jo lēnāks transportlīdzekļa vārpstas paredzētais ātrums, jo lielāks dzenskrūves diametrs tādas pašas slodzes pārņemšanai.

Samazinoties dzenskrūves griešanās ātrumam saistībā ar dzinēja ātrumu un/vai pārnesumu kārbu, diametram vajadzētu palielināties. Tās diametrs parasti tiek uzrādīts uz rumbas.

Lāpstiņu laukuma attiecība ir laukums, ko lāpstiņas nosedz pret kopējo riņķa diametru. Šis lielums, kā arī diametrs, ir jaudas novadītāji.

## 2) Solis

Solis (5.3. attēlā - *pitch*) ir distance, par kuru dzenskrūve pārvietotos uz priekšu vienā apgriezienā, kā uzgrieznis ap skrūvi. Lai dzenskrūve darbotos pareizi, ievēro likumu – jo lielāks rotācijas ātrums, jo lielāks solis. Ja solis būs par mazu, dzinējs „dzīsies” par daudz, kas izraisīs lieku slodzi un palielinātu degvielas patēriņu. Šajā gadījumā kā zīmes var vērot palielinātu paātrinājumu un mazu maksimālo ātrumu. Pārāk liels solis atsauksies uz samazinātu dzinēja rotācijas ātrumu un griezes momentu. Pazīmes tam var novērot kā sliktu paātrinājumu un zemu vilces spēku. Bet maksimālais ātrums var netikt ļoti ietekmēts.



5.3. att. Dzenskrūves soļa attēlojums. [64]

## 3) Lāpstiņu skaits

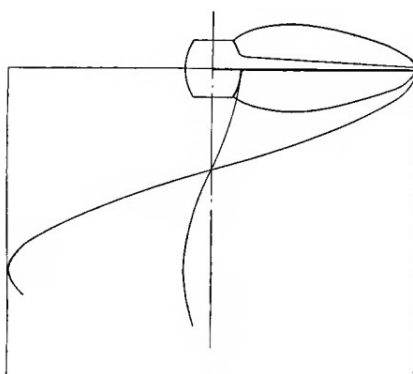
Ir iemesls kādēļ izvēlas 3, 4, 5, vai vairāku lāpstiņu skaitu. Jo mazāk lāpstiņu uz dzenskrūves, jo tā ir efektīvāka. Ideālais lāpstiņu skaits būtu 1, jo tādā gadījumā nekas netraucētu pienākošajai ūdens plūsmai. Izgatavošanas nolūkiem vispiemērotākais variants ir 3 lāpstiņas, bet darba laukumam un līdzsvaram tas būtu 4 vai 5 lāpstiņas, vai vairāk. Jo vairāk lāpstiņu, jo labāk izlīdzinās spiedienu, kas noslogo dzenskrūvi, un arī vibrācijas samazinās. Lāpstiņu nepāra skaitam piemīt labākas vibrāciju īpašības, nekā pāra skaitam. [63] Piecu lāpstiņu dzenskrūves darbība ir ļoti vienmērīga, bet 3-lāpstiņu dzenskrūve, ar pareizu lāpstiņu laukuma attiecību pret diametru, var būt vēl efektīvāka kā 5-lāpstiņu dzenskrūve ar līdzīgu šo laukumu attiecību. Attēlā 5.4. apskatāma piecu lāpstiņu dzenskrūve.



5.4. att. Piecu lāpstiņu dzenskrūve. [65]

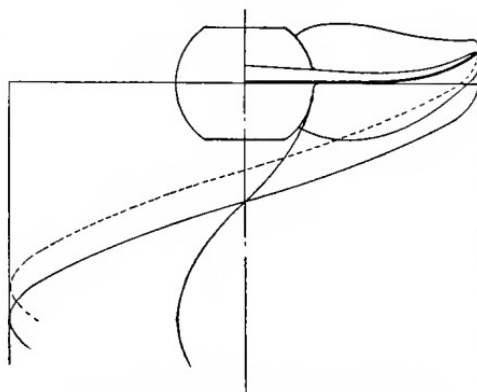
#### 4) Slīpums

Šeit slīpums ir domāts kā dzenskrūves lāpstiņu izvērsums uz priekšu vai, visbiežāk, aizmuguri (5.2. attēlā – *rake*). Šo modifikāciju izmanto, lai lielāka diametra dzenskrūve aizņemtu mazāk vietas, un to, piemēram, varētu ievietot attiecīgā korpusā, kam paredzēta mazāka diametra dzenskrūve. Tālākos attēlos 5.5. – 5.8. apskatīti pāris tipiskie lāpstiņu slīpumi.

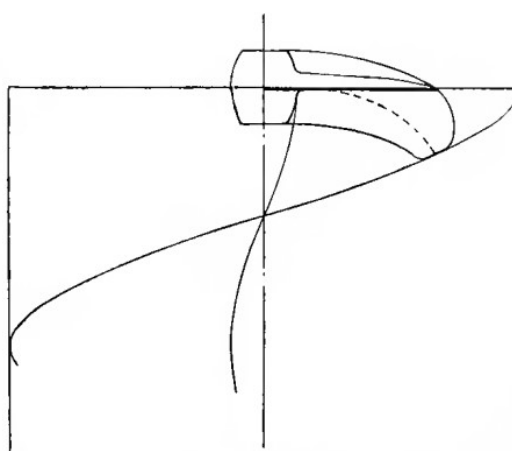


5.5. att. Dzenskrūve bez slīpuma.

Attēlā 5.5. redzama dzenskrūve bez šī slīpuma. Tai rotējot veidojas taisna spirāles plakne. 5.6. attēlā lāpstiņa ir izliekta uz priekšu. Šai lāpstiņai viena puse un divas trešdaļas no visa tās garuma ir taisns posms, un tad tā ir izliekta. Šāda dizaina autors ir Deivids Varks Griffīts, un pēc viņa vairāki citi inženieri sāka izmantot savās konstrukcijās izliektas un/vai slīpas lāpstiņas. Vēl vairāki citi inženieri dod priekšroku taisnai spirāles plaknei, piešķirot lāpstiņai slīpumu, veidojoties tā sauktajai „V vītnei” (attēls 5.8. a)).

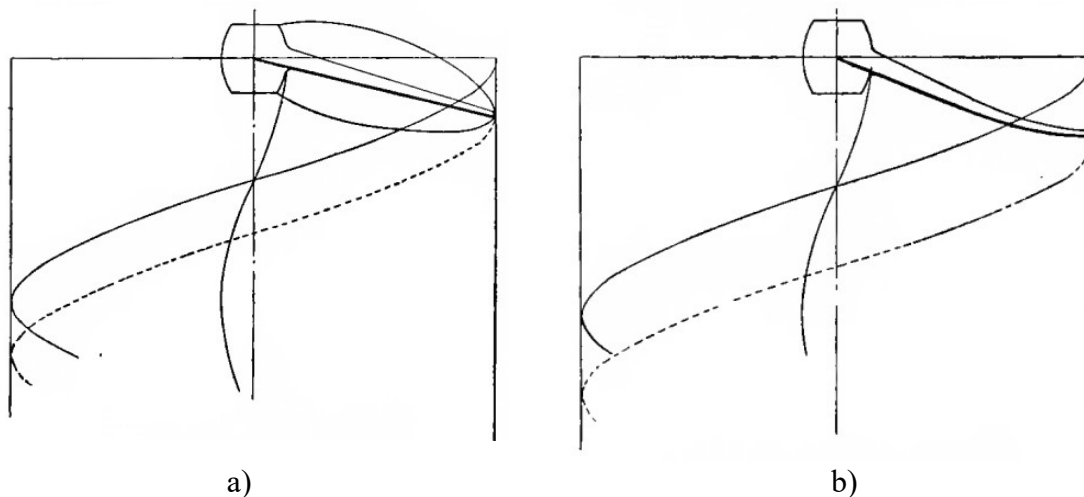


5.6. att. Dzenskrūves lāpstiņa ar izliekumu uz priekšu; Griffita patents.



5.7. att. Dzenskrūve ar izliekumu uz aizmuguri.

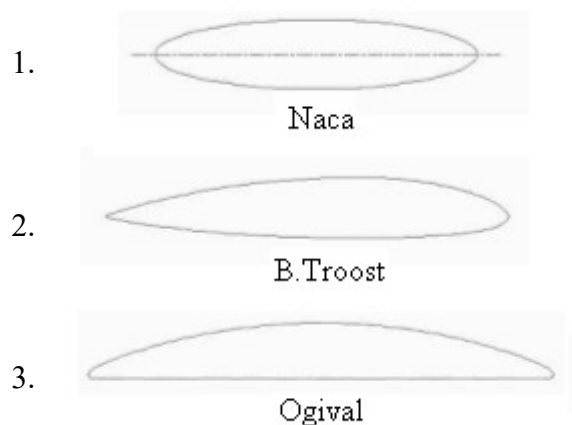
Ir arī tādi, kas šo lāpstiņu formu veido tā, lai tās virsotne tiktu atmesta atpakaļ pat tālāk par dzenskrūves pamatni, bet saglabājot spirāles līniju kā lāpstiņai bez slīpuma (5.7. attēls). To panāk tā, ka tomēr lāpstiņas centra virsotne paliek uz šīs oriģinālās spirāles plaknes līnijas. Bet ir arī tādi, kas savās dzenskrūvju konstrukcijās apvieno šo lāpstiņas slīpumu un tās virsotnes izliekumu, kā redzams attēlā 5.8. b). Šo slīpumu izvēlas tikai mazliet mazāku par 90 grādiem, attiecībā pret asi, uz kuras atrodas dzenošā vārpsta. [66] Ar visiem šiem lāpstiņu stāvokļiem iespējams panākt to pašu darba zonas attiecību kā oriģinālai dzenskrūvei bez slīpumiem vai izliekumiem, ietaupot aizņemto vietu.



5.8. att. Dzēnskrūves ar lāpstiņu slīpumiem uz aizmuguri.

### 5) Lāpstiņu tipiskākās formas

Attēlā 5.9. attēlotas dzēnskrūvju lāpstiņu tipiskākās profilu formas. Variantā nr. 1 redzama vienkārša simetriski apaļa forma, saukta par „Naca”. Šādam šķērsgriezumam veikspēja ir vienāda gan režīmā uz priekšu, gan atpakaļ. Variantā nr. 2 sauktais „B. Troost” profils ir visbiežāk izmantotais ražošanā. Šī arī ir aerodinamiskā forma.



5.9. att. Tipiskākās lāpstiņu formas. [64]

„Ogival” šķērsriezuma lāpstiņas tiek izmantotas pie augstākiem spiediena-kavitācijas apstākļiem. Šī forma iztur lielāku spiedienu, līdz kavitācija sasniedz 3-4%, bet tā nav tik efektīva kā šķērsriezums nr. 2. Tiek arī veidotas hibrīdlāpstiņas, apvienojot šīs formas, lai iegūtu lielāku veikspēju. piemēram, apvienojot otrā un trešā varianta formas, palielinās to abu sniegtais labums.

### 6) Kavitācija

Ūdens vārīšanās temperatūra jūras līmenī ir 100°C, bet kad atmosfēras spiediens krītas, šis ūdens vārīšanās punkts arī. Kā zināms, dzēnskrūvei kustoties ūdenī, spiediens pirms tās ir samazināts. Šis arī ir viens no vēra ņemamiem apstākļiem atsaucoties uz lāpstiņām. Pieaugot

dzenskrūves ātrumam, spiedieni paliek zemāki, liekot ūdenim vārīties un veidot burbulišus. Šie burbuliši veļas pāri lāpstiņām, līdz nonāk augstāka spiediena zonā, kur šī vārīšanās vairs nenotiek, un tie sadalās. Šī burbulišu sadalīšanās uz lāpstiņām izraisa lāpstiņu nodilumu, jeb saēšanu (skatīt 5.11. attēlu), izraisot kavitāciju. Kavitāciju var noteikt novērojot mazu degvielas patēriņu, jo dzenskrūve nav spējīga pilnībā absorbēt dzinēja piedoto jaudu, kā rezultātā dzinējs darbojas ar nepilnīgu slodzi. [67] Attēlā 5.10. apskatāma šī parādība ar dzenskrūvi ūdens tuneļa eksperimentā.



5.10. att. Dzenskrūves modelis ar kavitāciju ūdens tuneļa eksperimentā. [68]

Iemesli šai parādībai var būt pārāk asa vadošā šķautne (5.2. attēlā – *leading edge*), kas izraisītu pazeminātu spiediena zonu pie dzenskrūves, plaisas, vai arī vienkārši slikts dzenskrūves dizains. Ir ļoti svarīgi dzenskrūvi saglabāt tīru.



5.11. att. Kavitācijas rezultātā noēsta dzenskrūve. [64]

### 5.2.2. Momenta teorija

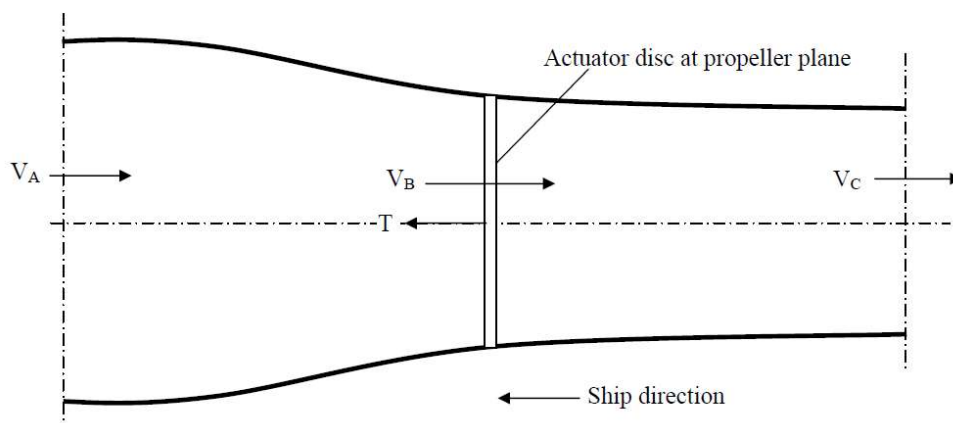
Momentu teorija dzenskrūvei ir arī labi zināma kā Disku Aktuatora Teorija (*Disk Actuator Theory*). Momentu teorija pieņem, ka:

- plūsma ir ideāla (vienmērīga un nav viskozitātes), tādā veidā dzenskrūve nepieredz enerģijas zaudējumus berzes pretestības rezultātā;
- rotors pieņemts kā aktuatora diska ar bezgalīgu skaitu lāpstiņām, un ar bezgalīgu ģeometrisku attiecību;
- dzenskrūve spēj radīt grūdējspēku slīdstraumē bez rotācijas ietekmes.

No pamata aksiālās slodzes vienādojuma, ir zināms, ka aksiālās slodzes lielums ir atkarīgs no dzenskrūves caurplūstamības un ātruma izmaiņām piedziņas sistēmā. Attēlā 5.12. plūsma plūst no kreisās uz labo pusi. Pieņemsim „A un C” par stāvokļa indeksiem tālā ieplūdē un izplūdē uz dzenskrūvi, un aktuatora diska novietojumu apzīmēsīm ar indeksu „B”.

Aksiālā slodze ( $T$ ) ir vienāda ar masas caurplūstamību ( $m$ ) reizinājumā ar ātruma izmaiņu ( $V$ ).

$$T = m(V_C - V_A) \quad (5.1.)$$



5.12. att. Straumju ātrumu shēma. [69]

Šeit nevar runāt par spiediena zonu, jo spiediens izplūdē C ir vienāds ar spiedienu ieplūdē A.

Jauda  $P_D$ , ko absorbē dzenskrūve, iegūstama no vienādojuma:

$$P_D = \frac{1}{2} m(V_C^2 - V_A^2) \quad (5.2.)$$

Kaut gan pievadītā jauda  $P_D$  ir arī vienāda ar aksiālās slodzes padarīto darbu:

$$P_D = TV_B \quad (5.3.)$$

Vienādojot vienādojumus (5.2.) un (5.3.), plūsmas ātrums pie dzenskrūves iznāk:

$$V_B = \frac{1}{2} (V_C + V_A) \quad (5.4.)$$



Ja  $V_B$  un  $V_C$  tiek izteikti ar  $V_A$ , iegūst:

$$\begin{aligned} V_B &= V_A + u_a \\ V_C &= V_A + u_{a1}, \end{aligned} \quad (5.5.)$$

kur  $u_a$  un  $u_{a1}$  apzīmē ātruma pieaugumu B un C pozīcijās.

Kā rezultātam, pie tālās ieplūdes un izplūdes apstākļiem, jābūt pēcplūsmas norimšanai, respektīvi, plūsmas slāņu stabilizēšanās, lai tiktu apmierināts nepārtrauktības vienādojums:

$$\begin{aligned} Q_A &= Q_B = Q_C - \text{tilpuma caurplūdums} \\ \rho V_A A_A &= \rho V_B A_B = \rho V_C A_C \\ V_A A_A &= (V_A + u_a) A_B = (V_A + u_{a1}) A_C, \end{aligned} \quad (5.6.)$$

kur:

$$A_A = \frac{\pi D_A^2}{4}, \quad A_B = \frac{\pi D^2}{4}, \quad A_C = \frac{\pi D_C^2}{4}.$$

Varam iegūt sekojošo:

$$\begin{aligned} D_A^2 &= \frac{V_A + u_a}{V_A} D^2 \\ D_C^2 &= \frac{V_A + u_a}{V_A + u_{a1}} D^2. \end{aligned} \quad (5.7.)$$

Momenta nemainīguma likums vienādo uz plūsmu uzspiesto spēku ar tīro izplūdes momentu. Kontrolējamais tilpums ir caurules posms no  $A_A$  līdz  $A_C$ . Masa laika vienībā caur šķērsriezumu  $A_A$  ir  $\rho V_A A_A$  un ieplūdes moments ir  $\rho V_A^2 A_A$ . Līdzīgi arī var pierakstīt izplūdes momentu caur  $A_C$ , un momentu nemainība pieprasa, lai:

$$\rho V_A^2 A_A - \rho (V_A + u_{a1})^2 A_C + T = 0 \quad (5.8.)$$

Izmantojot vienādojumu (5.7.), aksiālo slodzi var pierakstīt kā:

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho (V_A + u_a) u_{a1}. \quad (5.9.)$$

Aksiālā slodze arī pierakstāma kā  $T = \Delta p A$ .

Var izmantot Bernulli vienādojumu, lai sasaistītu spiedienu un ātrumu dzenskrūves diska ieplūdē un izplūdē, bet ne caur disku. Dzenskrūves diska ieplūdei un izplūdei ir sekojoši vienādojumi:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho V_A^2 + p_A &= \frac{1}{2} \rho (V_A + u_a)^2 + p_B \\ \frac{1}{2} \rho (V_A + u_{a1})^2 + p_C &= \frac{1}{2} \rho (V_A + u_a)^2 + p_B + \Delta p \end{aligned} \quad (5.10.)$$

$$p_A = p_C.$$

Sadalot augstākos vienādojumus, iegūst:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (2V_A u_{a1} + u_{a1}^2). \quad (5.11.)$$

Vēl viens pieraksts dzenskrūves aksiālajai slodzei ir:

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho (V_A + \frac{u_{a1}}{2}) u_{a1}. \quad (5.12.)$$

Pēc tam apvienojot vienādojumus (5.9.) un (5.12.), tiek iegūts, ka:

$$u_{a1} = 2u_a. \quad (5.13.)$$

Tas parāda, ka puse no paātrinājuma notiek pirms dzenskrūves diska, un atlikusī puse paātrinājuma notiek pēc dzenskrūves diska. Citiem vārdiem sakot, aksiāli radītais ātrums dzenskrūvē  $u_a$  ir puse no aksiāli radītā ātruma punktā C.

Sakarība starp dzenskrūves aksiālo slodzi un aksiāli inducēto ātrumu ir:

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho (V_A + u_a) 2u_a \quad (5.14.)$$

Dzenskrūves aksiālā slodze tiek panākta bezdimensionāla ar dzenskrūves laukumu un ieplūdes ātrumu  $V_A$ :

$$C_T = \frac{T}{\frac{\pi}{4} D^2 \frac{1}{2} \rho V_A^2} \quad (5.15.)$$

Kur  $C_T$  ir dzenskrūves slodzes aksiālās slodzes koeficients. Vienādojumu (5.15.) iespējams pārveidot par

$$C_T = 4 \frac{u_a}{V_A} (1 + \frac{u_a}{V_A})$$

vai

$$(5.16.)$$

$$\frac{u_a}{V_A} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + C_T}$$

Inducētais ātrums pēcplūsmā aiz objekta attēlo enerģijai pievadi straumei aiz dzenskrūves. Tas ir rezultāts tam, ka fluīds padodas, jeb dod ceļu, kad uz to iedarbojas aksiālā slodze. Enerģijas zudumi atainojas lietderības koeficientā, kas tādā gadījumā ir mazāks par 1. Lietderības aprēķināšanai dzenskrūves diska kustas ar ātrumu  $V_A$  un realizē spēku  $T$ . Jauda ir  $TV_A$ . Objekta pēcplūsmā sava daļība ir arī ātrumam  $2u_a$ . Ar masu izteiktu kā masu, kas plūst cauri dzenskrūves diskam, kas ir vienāda ar pēcplūsmā plūstošo masu, tiek aprakstīta zaudētā enerģija:

$$E_{zud} = \rho(V_A + u_a)\left(\frac{\pi}{4}D^2\right)(2u_a)^2 \quad (5.17.)$$

Dzenskrūves lietderības koeficientu var pierakstīt kā:

$$\eta_0 = \frac{TV_A}{TV_A + E_{zud}} \quad (5.18.)$$

Ievietojot vienādojumu (5.17.) vienādojumā (5.18.), iegūst:

$$\eta_0 = \frac{1}{1 + \frac{u_a}{V_A}} \quad (5.19.)$$

vai

$$\eta_0 = \eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_T}}$$

Šis koeficients apraksta maksimālo lietderību, kas ir teorētiski iespējama plūsmā bez viskozitātes, ar dzenskrūvi pēcplūsmā, neveicot nekādu rotāciju. Tāpēc tā ir nosaukta par ideālo efektivitāti. [69]

### 5.3. Ūdens pretestība

Ir neskaitāmas objektu konstrukcijas, uz kurām iedarbojas fluīda izraisītie spēki. Tāpēc pieņem pāris pamata formas ar kurām operēt, piemēram, plakana plātne, lode un cilindrs. Ar šo pamatformu palīdzību tiek apskatītas tipiskas inženierijas situācijas, kas saistītas ar virpuļu izraisītām vibrācijām, kuģu un citu peldošu objektu pretestību, ceļošo lāpstīņu īpašībām un propelleru darbības principiem. Šajā nodaļā tiks apskatīts vilces (*drag*) pretestības un cēlēj (*lift*) pretestības spēks.

#### 5.3.1. Vilces un cēlējspēks

Uz objektu, kas ievietots fluīdā, iedarbojas attiecīgi spēki, kas uzskatāmi attēloti attēlā 5.13. un shematiski attēlā 5.14. Fluīda spēcīgā ietekme uz objektu rada spēku  $F$ . Horizontālā komponente ir vilces pretestības spēks, bet vertikālā komponente ir cēlējspēks. Šis objekts var arī radīt svārstības fluīdā, jeb viļņus, kuros mainīgos virzienos noteiktā frekvencē nepārtraukti izplatās virpuļi.

Aplūkosim fluīdu ar blīvumu  $\rho$ , viskozitāti  $\mu$ , un tilpuma elastības moduli  $E$ , kas aptver objektu, ko raksturo garums  $L$  un ātrums  $v$ . Fluīda iedarbība uz objektu rada vilces spēku  $F_D$  un cēlējspēku  $F_L$ . Fluīda pacēlumi rada virpuļus ar frekvenci  $f$ .

Dimensiju analīze dod sekojošu funkciju saistību:

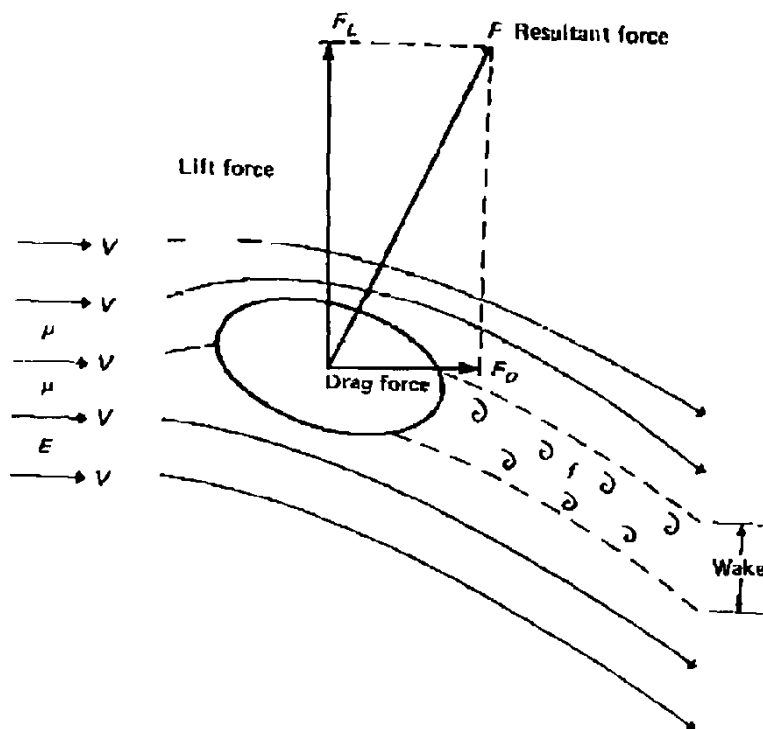
$$f(C_D, C_L, Re, M, S) = 0 \quad (5.20.)$$

Šeit Strouhla skaitlis  $S$  ir bezdimensionāls lielums, kas apraksta inertuma attiecību pret vibrācijas spēkiem ( $S=Lf/v$ ). Viļņu ar izplatošos virpulīšu veidošanās atkarīga no inertuma un viskozo spēku attiecības, jeb Reinoldsa skaitļa, kas noved pie tā, ka Strouhla skaitlī jābūt ietvertai Reinoldsa funkcijai:

$$S=f(Re) \quad (5.21.)$$

Un funkcijas (5.20.) parametri vienkāršojas:

$$f(C_D, C_L, Re, M)=0 \quad (5.22.)$$



5.13. att. Vilces un cēlējspēku attēlojums. [70]

Tā kā cēlējspēki un vilces spēki ir neatkarīgi viens no otra, vilces pretestības spēkam sastādās izteiksme:

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2 A}{2g_c} \quad (5.23.)$$

kur  $C_D=f(Re,M)$  – vilces koeficients;

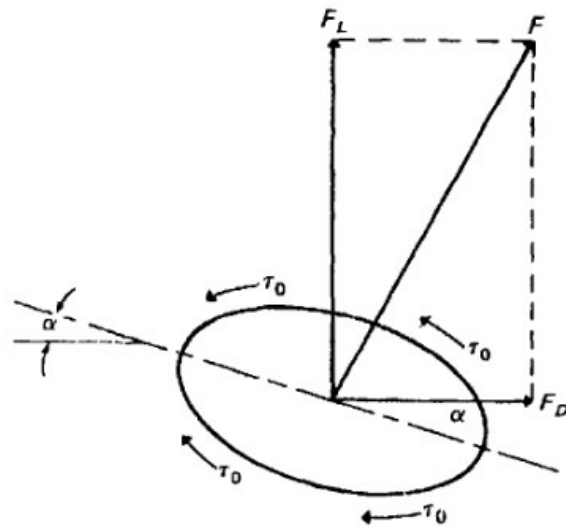
$A$  – raksturojošais laukums.

Šādā pašā veidā arī veidā arī pierakstāma cēlējspēka izteiksme:

$$F_L = C_L \frac{\rho v^2 A}{2g_c} \quad (5.24.)$$

Pretestības spēks, kas attēlots izteiksmēs (5.23.) un (5.24.), cēlies no diviem avotiem, proti, no iedarbības starp objektu un plūsmu, sauktu par spiediena vai formas pretestību, un

berzes pretestību sakarā ar sieniņu bīdes spriegumu  $\tau_0$ , kas saukts par virsmas berzes pretestību. Pretestības koeficienti sastāv no divām daļām:



5.14. att. Spēku un vides shematisks attēlojums. [70]

$$F_D = F_p + F_t - C_D \frac{\rho v^2 A}{2g_c} = C_f \frac{\rho v^2 A_s}{2g_c} + C_s \frac{\rho v^2 A}{2g_c} \quad (5.25.)$$

vai

$$C_D = C_s \frac{C_f A_s}{A}, \quad (5.26.)$$

kur  $C_s$  – formas koeficients;

$C_f$  – virsmas berzes koeficients;

$A_s$  – spriegumu darbības laukums.

Cēlējspēks attēlos 5.13. un 5.14. ir funkcija no objekta formas un iedarbības leņķa  $\alpha$ , kā arī no Reinoldsa un Maha skaitļiem.

## 5.4. Formas pretestība

Eksperimenti ar objektiem, kas orientēti normāli pa plūsmu, uzrāda to, ka pretestības koeficienti ir būtībā nemainīgi pie Reinoldsa skaitļa, kas lielāks par 1000. Tas nozīmē, ka pie Reinoldsa skaitļa, kas mazāks par 1000, pretestību izraisa forma. Tabulā 5.1. parādītas pāris tipiskākās vērtības, ko izmanto inženieri savos aprēķinos un dizaina izveidē.

Formas koeficienti  $C_s$ , ja  $Re > 1000$  [70]

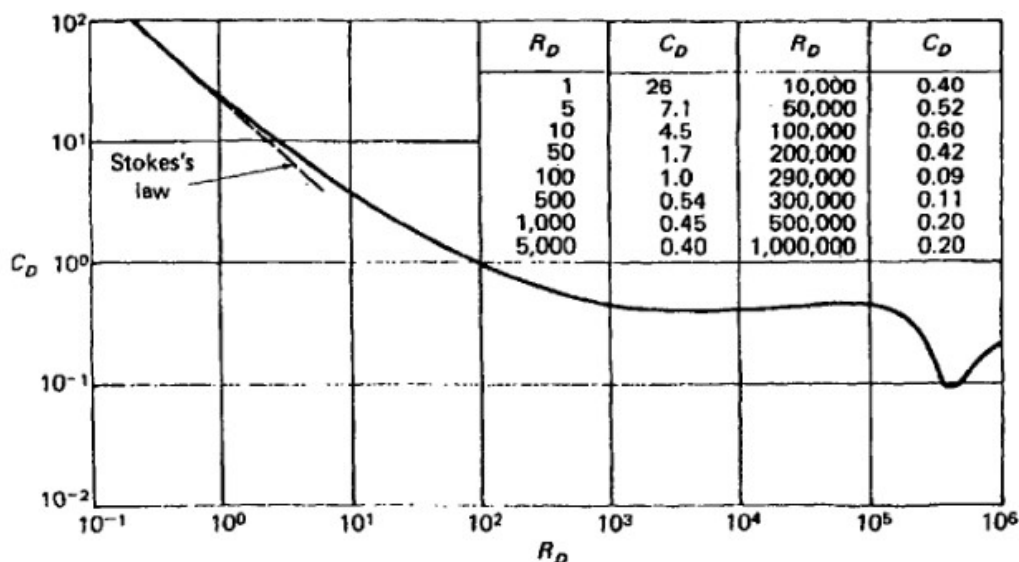
Flat plate	Normal to flow	Length:width	1	5	10	20	30	$\infty$
			$C_s$	1.18	1.2	1.3	1.5	1.6
Disk	Normal to flow	$C_s = 1.18$						
Trains	Locomotive + tender, streamlined	$C_s = 0.40$						
	Locomotive + tender, conventional	$C_s = 0.93$						
	Railroad cars, streamlined	$C_s = 0.15$						
	Railroad cars, conventional	$C_s = 0.40$						
Automotive	Automobiles, racing	$C_s = 0.17$						
	Automobiles, streamlined	$C_s = 0.23$						
	Automobiles, fast-back	$C_s = 0.34$						
	Automobiles, conventional	$C_s = 0.52$						
	Truck, conventional	$C_s = 0.60$						
Ship	Passenger, conventional	$C_s = 0.90$						

#### 5.4.1. Lodes pretestība

Lodes pretestības aprēķinā, lodes diametrs  $D$  kā raksturīgais garums, un lodes projekcijas laukums  $\pi D^2/4$  tiek izmantots kā pretestības laukums. Vienādojumā grūdejspēka iedarbības laukumu aizvietojo ar lodes projekcijas laukumu, iegūst lodes pretestības vienādojumu:

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2 A}{2g_c} = C_D \frac{\rho v^2 \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}{2g_c} = C_D \frac{\pi D^2 \rho v^2}{8g_c} \quad (5.27.)$$

Attēla 5.15. grafikā apskatāmas lodes pretestības koeficientu vērtības, attiecībā pret Reinoldsa skaitli. [70]



5.15. att. Lodes pretestības koeficienti  $C_D$  attiecībā pret Reinoldsa skaitli. [70]

### Lamināra plūsma

Laminārā plūsmā Stoksa likums tiek pielietots pie Reinoldsa skaitļiem, kas nepārsniedz vērtību 0.5. Stoksa likumu var pierakstīt ar izteiksmi:

$$C_D = \frac{24}{Re_D} = \frac{24\mu g_c}{\rho D v} \quad \text{kur } 0 < Re_D < 0.5 \quad (5.28.)$$

Apvienojot vienādojumus (5.27.) un (5.28.), iegūš vienādojumu lodes pretestības spēka aprēķināšanai laminārā plūsmā:

$$F_D = C_D \frac{\pi D^2 \rho v^2}{8g_c} = \left( \frac{24\mu g_c}{\rho D v} \right) \frac{\pi D^2 \rho v^2}{8g_c} = 3\pi\mu D v \quad (5.29.)$$

### Turbulenta plūsma

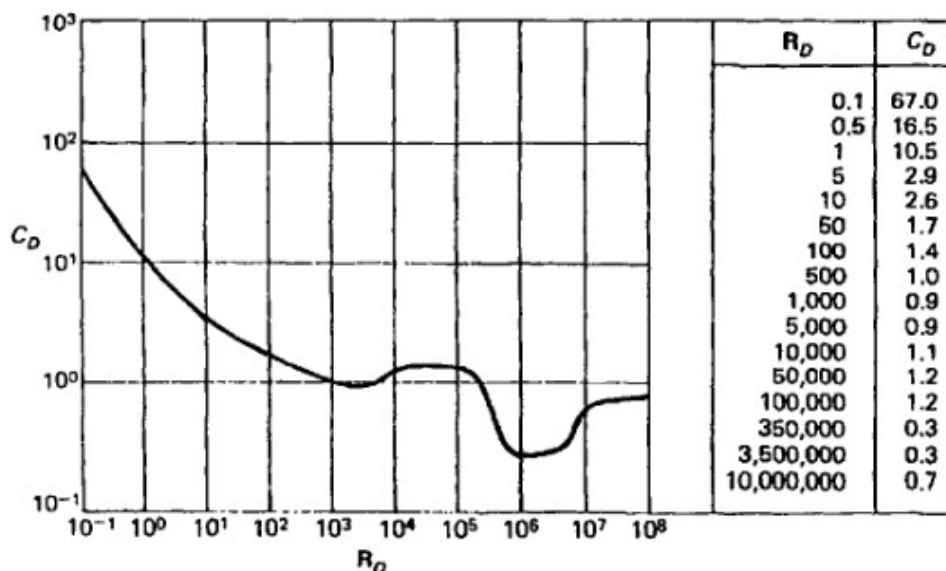
Turbulentā plūsmā lodes pretestības koeficientu aprēķināšanai nav izstrādāti īpaši vienādojumi. Koeficientu noteikšanai var izmantot to pašu 5.15. attēla grafiku, un izmantojot to pašu lodes pretestības vienādojumu (5.27.) (aprēķinot  $Re$  skaitli, nosaka pretestības koeficientu un vērtību ievieto vienādojumā).

#### 5.4.2. Cilindra pretestība

Apaļa cilindra pretestības aprēķinā cilindra diametrs  $D$  tiek izmantots kā raksturojošais garums, bet tā projekcijas laukums  $LD$  tiek izmantots kā pretestības laukums. Cilindra pretestību var aprēķināt vienādojumā (5.23.) aizstājot raksturojošo laukumu ar cilindra projekcijas laukumu:

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2 A}{2g_c} = C_D \frac{\rho v^2 LD}{2g_c} \quad (5.30.)$$

Attēla 5.16. grafikā var noteikt pretestības koeficientu cilindram ar bezgalīgu garumu, bet tabula 5.2. dod šīs vērtības cilindriem ar noteiktu garumu. [70]



5.16. att. Pretestības koeficients cilindram ar bezgalīgu garumu atkarībā no  $Re$  skaitļa. [70]

5.2. tabula

Pretestības koeficients cilindram ar noteiktu garumu,  $Re > 1000$  [70]

$L/D$	1	5	10	20	30	$\infty$
$C_D$	0.63	0.80	0.83	0.93	1.00	1.20

### 5.4.3. Vienkāršots ūdens pretestības modelis DHAZT sistēmai

Tālāk tiks apskatīts vienkāršots ūdens pretestības modelis DHAZT sistēmai. Uz DHAZT komponentēm katru darbojas griezes moments, kas izsakāms kā:

$$T = K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4, \quad (5.31.)$$

kur  $K_T$  – dzinēsjspēka koeficients;

$\rho$  – ūdens blīvums ( $\text{kg/m}^3$ );

$n$  – rotācijas frekvence (apgr./s);

$D$  – vītnes diametrs (m).

Veicot pārveidojumus, šis vienādojums pierakstāms kā:

$$T = k \cdot \omega, \quad (5.32.)$$

kur  $k$  – pretestības spēka koeficients;

$\omega$  – rotācijas ātrums ( $\text{rad/s}$ ).



Piešķirot korpusiem koeficientus: 1 – priekšgals, 2 – vidus korpus, 3 – aizmugurējais korpus, katrai daļai tiek sastādīta  $x, y, z$  koordinātu sistēma ar attiecīgo koeficientu, kas aizstāts ar  $i$ . No tā izriet sekojošais:

$$\begin{aligned}TF_{xi} &= K_{Txi} \cdot \omega_{xi}^2 = K_{Txi} \cdot \omega_{xi} \cdot \|\omega_{xi}\| \\TF_{yi} &= K_{Tyi} \cdot \omega_{yi}^2 = K_{Tyi} \cdot \omega_{yi} \cdot \|\omega_{yi}\| \\TF_{zi} &= K_{Tzi} \cdot \omega_{zi}^2 = K_{Tzi} \cdot \omega_{zi} \cdot \|\omega_{zi}\|\end{aligned}\tag{5.33.}$$

Līdzīgi izsakāms arī pretestības spēks uz korpusiem:

$$F = k \cdot v^2 = k \cdot v \cdot \|v\|\tag{5.34.}$$

(5.34.) izvērsts koordinātu sistēmā:

$$\begin{aligned}F_{xi} &= k_{xi} \cdot v_{xi}^2 = k_{xi} \cdot v_{xi} \cdot \|v_{xi}\| \\F_{yi} &= k_{yi} \cdot v_{yi}^2 = k_{yi} \cdot v_{yi} \cdot \|v_{yi}\| \\F_{zi} &= k_{zi} \cdot v_{zi}^2 = k_{zi} \cdot v_{zi} \cdot \|v_{zi}\|\end{aligned}\tag{5.35.}$$

Garenvirzienā darbojas  $x$  ass, bet  $y$  un  $z$  asu komponentes, tā kā ķermeņi ir simetriski, ir vienādas. No vienādojumiem secināms, ka ir nepieciešami 4 koeficienti: garenvirzienā un perpendikulārā virzienā pretestības spēkam un momentam. Priekšdaļai un aizmugurējai daļai šie koeficienti ir vienādi. Kā arī divi koeficienti vidusdaļai. Šos koeficientus iespējams noteikt ar plūsmas dinamikas simulāciju programmā *Flow3D*.

## 5.5. Reinoldsa skaitļa aprēķins modelim

Lai noteiktu, kādu plūsmas režīmu izmantot aprēķinos, tika noteikts Reinoldsa skaitlis modelim. Šim modelim izmantojama formula (3.3.).

Ūdens temperatūra pieņemta 20°C, pie kuras tā blīvums  $\rho = 998,23 \text{ kg/m}^3$  un dinamiskā viskozitāte  $\mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Vītnes ārējais diametrs  $D = 0,064 \text{ m}$ . Rotācijas ātrums  $N$  pieņemts 22 rad/s, jeb 3.5 apgr./s.

Reinoldsa skaitļa aprēķins:

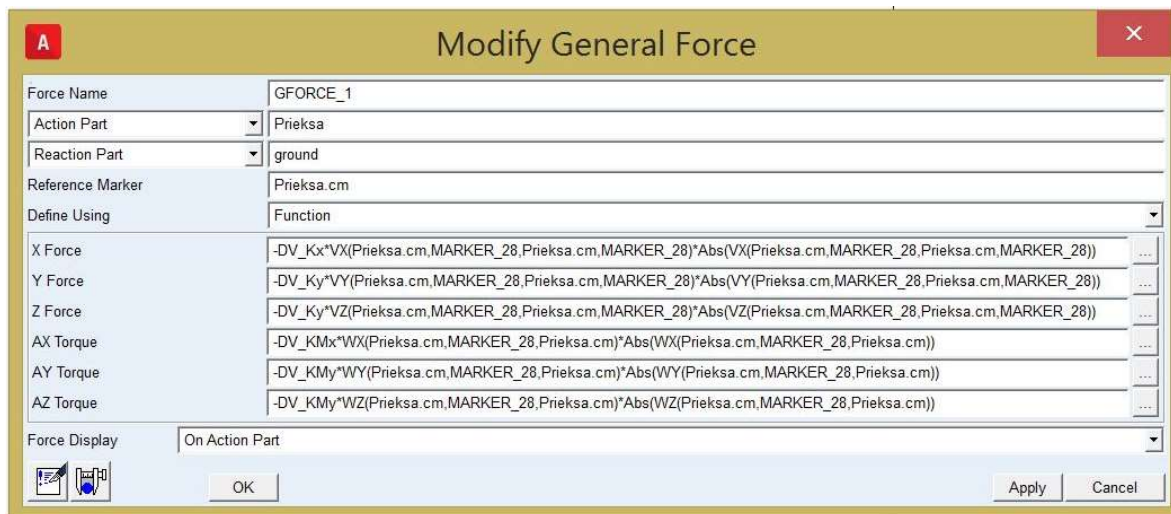
$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} = \frac{998.23 * 3.5 * 0.064^2}{0.001002} = 14282$$

Šādas sistēmas robežvērtība plūsmas tipam ir 10000. Kā redzams, iznākuma rezultāts pārsniedz šo vērtību, kas nozīmē to, ka plūsma šādā sistēmā ir turbulenta.

## 5.6. Plūsmas pretestības modeļa izveide

Kā iepriekš minēts, tiek lietots skaitliskajos eksperimentos iegūts plūsmas pretestības metamodelis, kurā kustības ātruma un leņķātruma vektori tiek projicēti uz kustīgo koordinātu

sistēmu. Šīs projekcijas uz priekšgalu apskatāmas 5.17. attēlā. Analogiski vienādojumi arī izveidoti aizmugurējam korpusam.

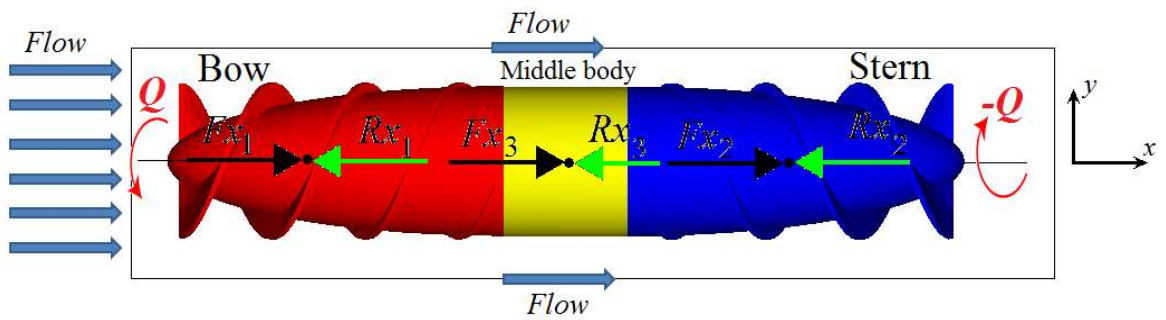


5.17. att. Plūsmas metamodeļa spēku projekcijas uz priekšgalu.

Šo vienādojumu sākumā ietverti pretestības koeficienti, kuri tika aprēķināti ar *Flow3D*. Tie ir ātruma kvadrātam proporcionāli pretestības spēku koeficienti, kas iegūti modelējot rotējošu, plūsmā nekustīgi iestiprinātu Durbi. Tika lietoti dažādi plūsmas ātrumi un Durbja orientācijas. Lai modelis nekļūtu pārāk komplicēts, pagaidām nav ievēroti efekti no Durbja izlieces. Modelētajā ūdens plūsmā Durbis ir ievietots cilindriska domēna centrā, kura izmēri y un z virzienos tika izvēlēti saskaņā ar rekomendācijām no [71] – aptuveni 1.4 reizes lielāki par transportlīdzekļa diametru. Kā robežnosacījums cilindra sienām tika iestatīts noteikts spiediens, nevis cieta robežvirsmā, tam vienā galā ieplūde ar nodefinētu ieplūdes plūsmas ātrumu, un otrā galā izplūde ar nepārtrauktības robežnosacījumu. Uz Durbja priekšējo un aizmugurējo korpusu iedarbojas pielikti ārēji griezes momenti  $Q$  ap x asi, vērsti pretējos virzienos. Mums šeit interesē programmas piedāvātie aprēķinātie reakciju spēki un griezes momenti uz katru komponenti, kur katram no korpusiem ir trīs reakciju spēku komponentes un divas griezes momenta komponentes. Šajā plūsmas pretestības metamodelī aktuālākās ir garenvirzienā vērstās spēku un momentu reakciju komponentes. Lai pieņemtu, ka modelētā kustība ir vienlīdzīga transportlīdzekļa peldēšanai ar konstantiem piedziņas momentiem  $q_1 = q_2 = Q$ , ir nepieciešams, lai reakcijas spēku summas vērtība garenvirzienā būtu vienāda ar nulli (skatīt attēlu 5.18.):

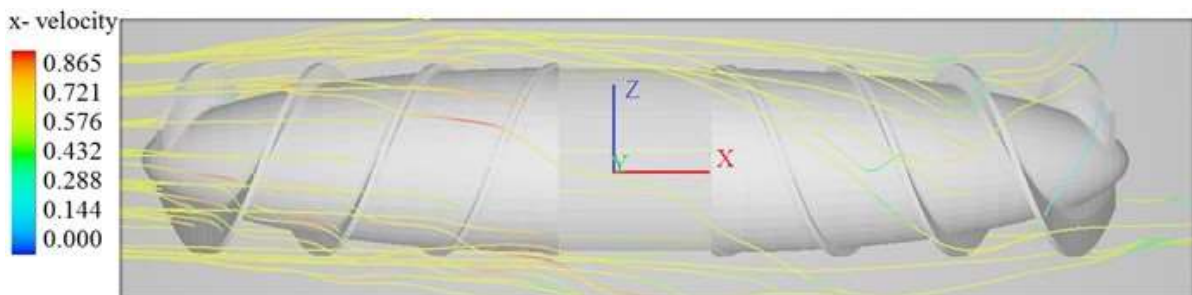
$$R_{x1} + R_{x2} + R_{x3} = 0 \quad (5.36.)$$

Šo stāvokli var sasniegt vienīgi eksperimentālā ceļā pie katras fluīda plūsmas ātruma vērtības nosakot ārēji pieliktā dzinējspēka griezes momenta vērtību  $Q$ , pielāgojot dažādus programmas ievades parametrus.

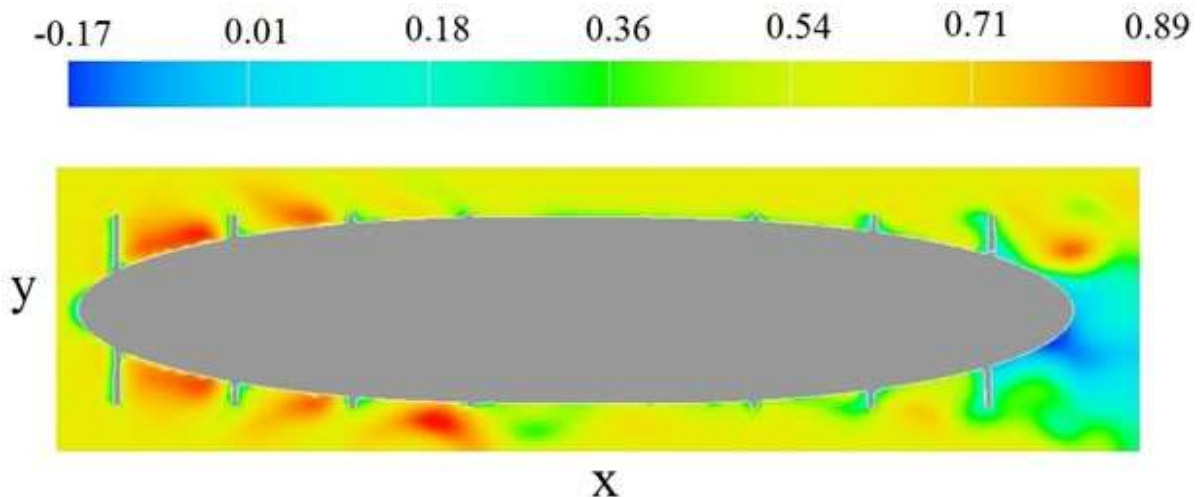


5.18. att. Durbis galīga tūpuma aprēķinu domēnā, skatā no augšas programmā *Flow3D*.

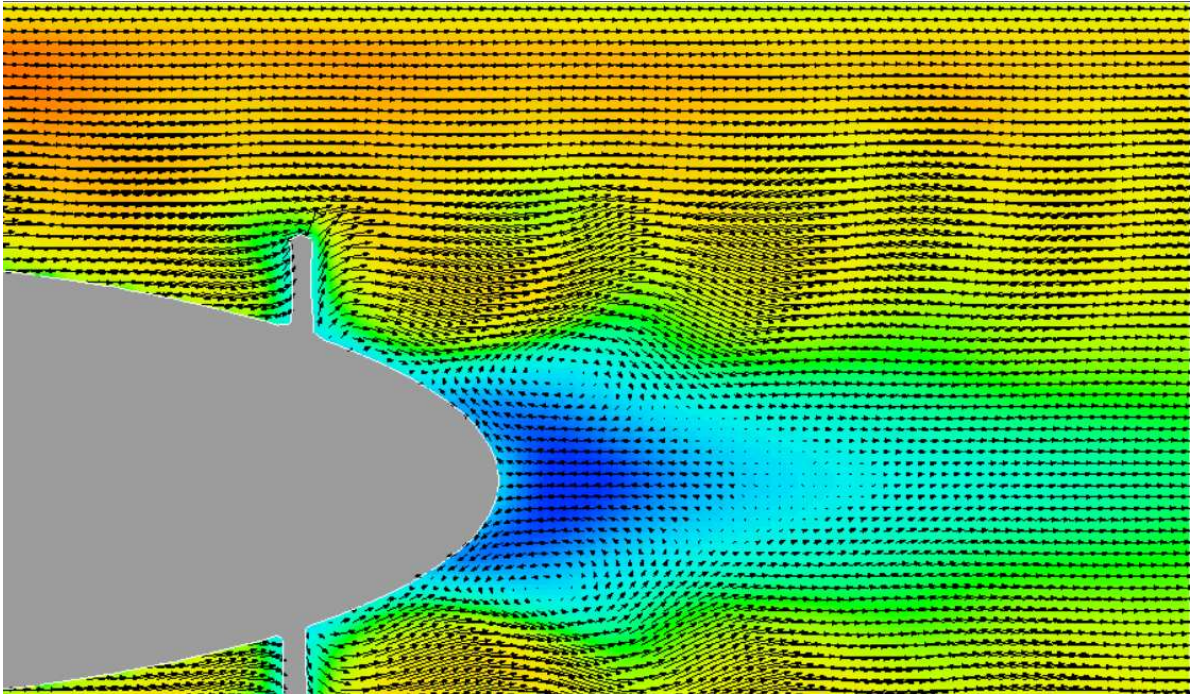
Zemāk attēlos 5.19. un 5.20. ir apskatāmas fluīda plūsmas līnijas un plūsmas horizontālā ātruma kontūri pie plūsmas ātruma 0.6 m/s. Savukārt attēlā 5.21. ir apskatāmi plūsmas vektoru uz ātruma kontūriem horizontālajā griezumā. Ir novērojams, ka turbulences iespaidā plūsma Durbja aizmugurē ieņemt pat pretēju virzienu, ar ātrumu līdz 0.17 m/s.



5.19. att. Fluīda plūsmas līnijas ap Durbi pie plūsmas ātruma 0.6 m/s.



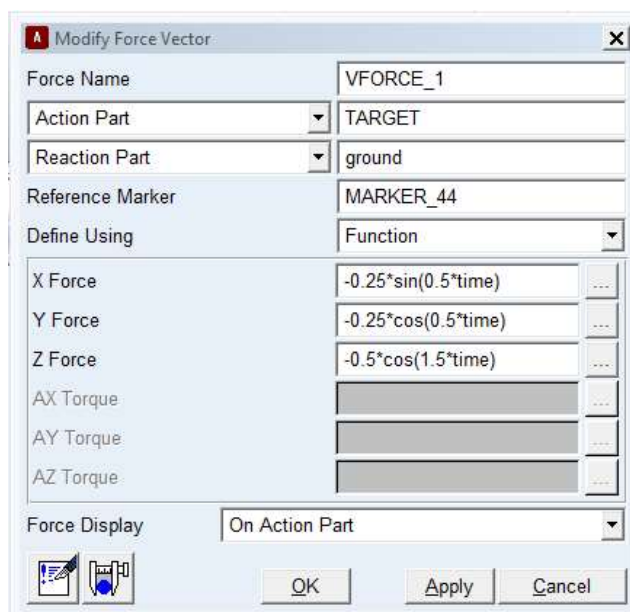
5.20. att. Fluīda ātruma kontūri vidus šķērsgriezuma x-y plaknē.



5.21. att. Plūsma ar vektoriem modeļa aizmugurē.

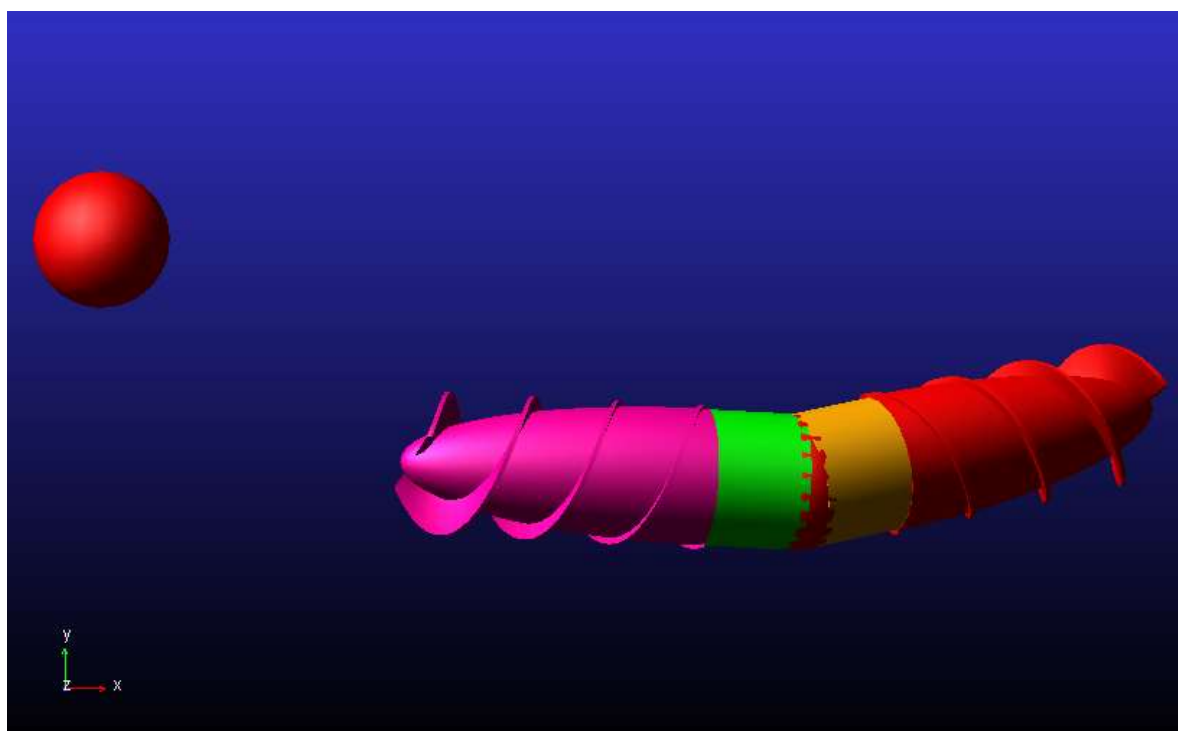
Programma ļauj Durbi iestiprināt dažādās pozīcijās, kā arī grozīt modelēšanas laikā, kas ļauj izmērīt pretestības spēku galveno vektoru un momentu. Pēc šiem skaitliskajiem eksperimentiem ar kvadrātisko aproksimāciju pēc lineārā un leņķiskā ātruma tika iegūti maināmie koeficienti, piemēram, DV\_Kx un DV\_KMx.

Pēc ūdens pretestības modeļa izveidošanas ir iespējams pārbaudīt, vai modelis darbojas. Matemātiskajam modelim tiek pievienots trīsdimensionālā telpā kustīgs mērķis, kam pielikts pēc sinusoidāla likuma mainīgs spēks  $x(t) = -0.25\sin(0.5t)$ ,  $y(t) = -0.25\cos(0.5t)$ ,  $z(t) = -0.5\cos(1.5t)$ , kas to virza (apskatāms arī 5.22. attēlā ar programmas dialoglodziņu).



5.22. att. Mērķa kustības spēka funkcijas.

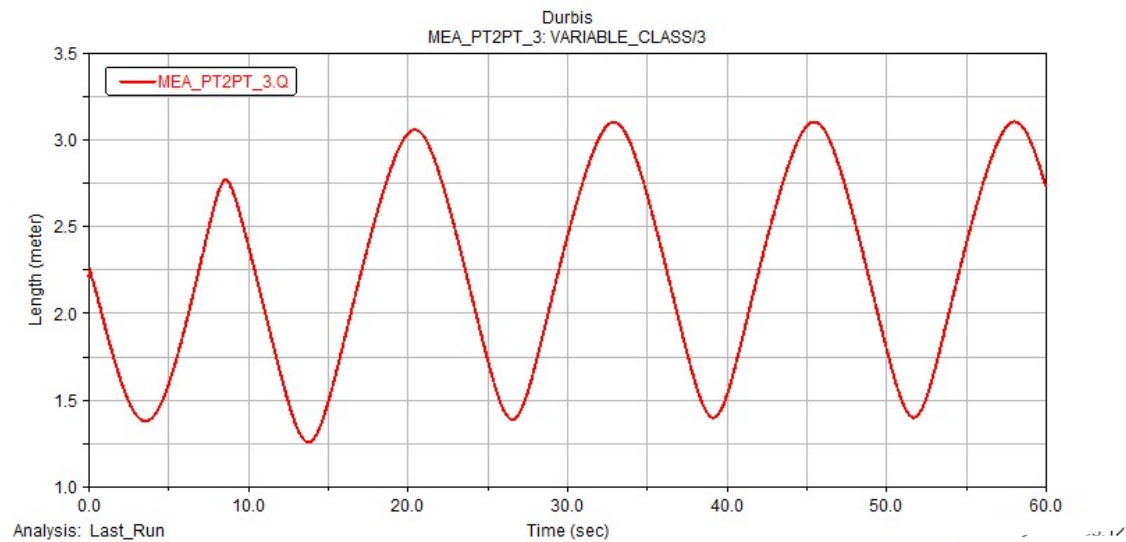
Sekojošā 5.23. attēlā apskatāma modeļa sistēma ar sasniedzamo mērķi.



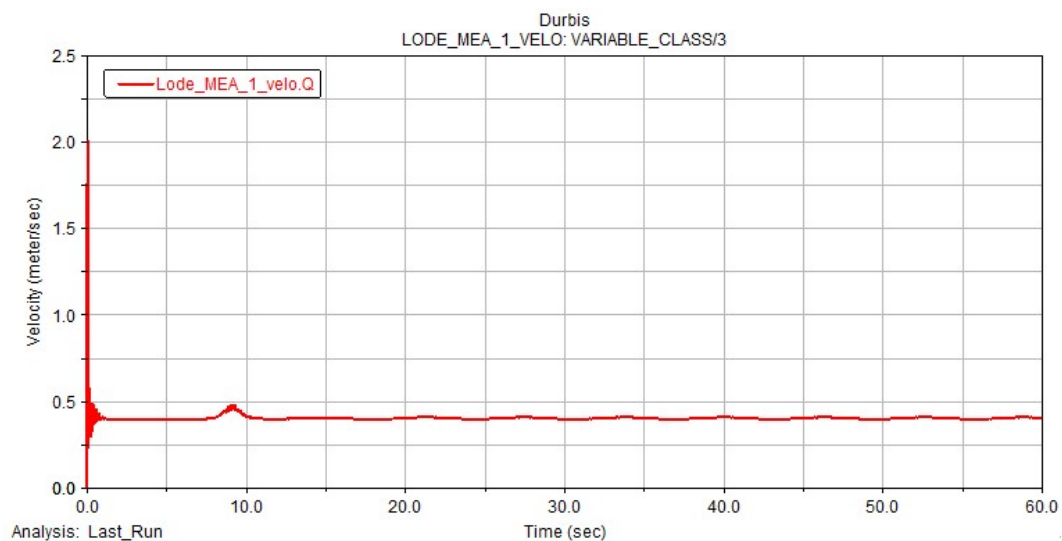
5.23. att. Transportlīdzeklis ar izsekojamo mērķi.

Sākuma stāvoklī transportlīdzeklis atrodas nesaliektā stāvoklī, bet, sākoties simulācijai, tas laika momentā ieņem virzienu un uzsāk kustību uz mērķi. Transportlīdzekļa ātrums mērķa panākšanas laikā būtiski nemainās un, kā redzams 5.25. attēlā, tas ir robežās konstants. Līdzīgi notiek ar attālumu līdz mērķim. Laika gaitā, apmēram no 20 sekundes (5.24. attēls),

attāluma izmaiņa ieņem vienu amplitūdu, kas nozīmē, ka transportlīdzeklis diezgan stabili seko mērķim.



5.24. att. Transportlīdzeklis attālums līdz mērķim.



5.25. att. Transportlīdzekļa mērķim sekošanas ātrums.

## 5.7. Secinājumi

Dzenskrūvju konstruēšanā liela nozīme tiek pievērsta to diametram  $D$ , ko izvēlas pēc vārpstas rotācijas ātruma un pievadāmās jaudas, un solim, kura izvēlē vadās pēc dzenskrūves rotācijas ātruma. Lāpstiņu skaita izvēlē galvenais ir nepieciešamība pēc vibrāciju novēršanas un spiedienu izlīdzināšanas. Vietas ietaupīšanas nolūkos dzenskrūvēm var izveidot slīpumus un izliekumus. Ar šo konstrukcijas īpatnību var saglabāt lielāka diametra dzenskrūves jaudu, aizņemot mazāk vietas. Arī lāpstiņu formai ir liela nozīme, kuras prasmīgi apvienojot var vēl vairāk uzlabot dzenskrūvju darbaspēju.

Tā kā tehnikā ir daudz dažādas formas, ar kurām mijiedarbojas vides, tiek pieņemtas pāris galvenās formas, kā, piemēram, lode, cilindrs un plakana plātne. Ar šo formu palīdzību pēta spēkus, ko fluīds izraisa iedarbojoties uz objektu, un otrādi. Šis pretestības spēks  $F$  sastāv no divām komponentēm – vilces ( $F_D$ ) un cēlējspēka ( $F_L$ ). Gadījumos, kad šie spēki nav labvēlīgi, nepieciešams veikt formas optimizāciju, lielāka darbaspējīguma iegūšanai. Prakse rāda, ka formas pretestība darbojas sistēmās, kur  $Re$  skaitlis mazāks par 1000.

Tā kā HAZT sistēma ir simetriska gan garenvirzienā, gan perpendikulārā, pavisam sistēmai nosakāmi 6 koeficienti.

No esošajiem eksperimentu datiem var spriest, ka ūdens pretestības modelis darbojas un izmantotie pretestības metamodeļi ir derīgi. Ir iespējams pielāgot modeli un apskatīt dažādus vadības algoritmus.

## 6. DINAMIKAS MODELĒŠANA, LIETOJOT DAŽĀDUS VADĪBAS ALGORITMUS

Durbja dinamikas modelēšana norisinājās datorprogrammā *MSC Adams*. Modeļa sistēmai tika pielikti un definēti plūsmas videi raksturīgi spēki, un komponentēm pielikti kustības likumi, kas apraksta iepriekš aprakstītus vadības algoritmus. Modelēšanas nolūkos tiek apskatīta AZT dinamikas modelēšana un izstrādāts helikoīdā transportlīdzekļa vadības princips.

### 6.1. Autonomo zemūdens transportlīdzekļu dinamikas modelēšana

Zemūdens transportlīdzeklim sešās brīvības pakāpēs kustības vienādojumi sastāv no trim elementiem: transportlīdzekļa kinemātikas, transportlīdzekļa cieto ķermeņu dinamikas un transportlīdzekļa mehānikas. Šajā nodaļā tiks apskatīta bezpilota zemūdens transportlīdzekļu (BZT) dinamikas matemātiskā modelēšana, kas paredzēta uz modeļa bāzētas vadības sistēmas dizainam. Ērtākai uztverei, izklāsts ir pielāgots garenvirziena torpēdas tipa bezpilota zemūdens transportlīdzeklim, kā attēlā 6.1.



6.1. att. No kalmāra iedvesmots torpēdas tipa BZT. [72]

Transportlīdzeklim, kas pārvietojas inerciālā atskaites sistēmā, saistošos spēkus apraksta Eilera-Ņūtona vienādojums:

$$F = \frac{d}{dt}(mU) \quad (6.1)$$

Pieņemot, ka transportlīdzekļa masa ir konstanta un spēki tiek aprēķināti saskaņā ar ķermenim piesaistītu atskaites sistēmu, kas pārvietojas kopā ar inerciālo atskaites sistēmu, vienādojums izsakāms sekojoši:

$$F = m\left(\left(\frac{dU_0}{dt}\right)_{xyz} + \Omega + U_0 + \frac{d\Omega}{dt} \times r_G + \Omega \times (\Omega \times r_G)\right), \quad (6.2)$$



kur  $\mathbf{U}_o$  ir ķermeņa koordinātu sistēmas lineārais ātruma vektors;  $\boldsymbol{\Omega}$  - ķermeņa koordinātu sistēmas leņķiskā ātruma vektors;  $\mathbf{r}_G$  – transportlīdzekļa masas centra pozīcijas vektors attiecībā pret ķermeņa asīm.

Izteiksmes sekojošas:

$$\begin{aligned}\mathbf{U}_o &= u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k} \\ \boldsymbol{\Omega} &= p\mathbf{i} + q\mathbf{j} + r\mathbf{k} \\ \mathbf{r}_G &= x_G\mathbf{i} + y_G\mathbf{j} + z_G\mathbf{k}\end{aligned}\tag{6.3}$$

Nodefinējot sekojošo attiecību un tās sareizinot:

$$\begin{aligned}\left(\frac{d\mathbf{U}_o}{dt}\right)_{xyz} &= \dot{u}\mathbf{i} + \dot{v}\mathbf{j} + \dot{w}\mathbf{k} \\ \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} &= \dot{p}\mathbf{i} + \dot{q}\mathbf{j} + \dot{r}\mathbf{k}\end{aligned}\tag{6.4}$$

spēku vienādojumu var sadalīt trīs skalārās komponentēs:

$$\begin{aligned}X &= m[\dot{u} + wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} + ur - wp - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\ Z &= m[\dot{w} + vp - uq - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rp + \dot{p})]\end{aligned}\tag{6.5}$$

Pēc šī paša principa, momentu vienādojumi nolasās sekojoši:

$$\begin{aligned}\mathbf{h}_x &= p \int_{\nabla} (y^2 + z^2) dm - q \int_{\nabla} xy dm - r \int_{\nabla} xz dm \\ \mathbf{h}_y &= -p \int_{\nabla} xy dm + q \int_{\nabla} (z^2 + x^2) dm - r \int_{\nabla} yz dm \\ \mathbf{h}_z &= -p \int_{\nabla} xz dm - q \int_{\nabla} yz dm + r \int_{\nabla} (x^2 + y^2) dm\end{aligned}\tag{6.6}$$

Ja transportlīdzekļa masas centrs nesakrīt ar individuālā ķermeņa koordinātu asu sākumpunktu, momentu izteiksmes komponenti var izteikt:

$$\begin{aligned}
K &= I_{xx}\dot{p} + I_{xy}(\dot{q} - pr) + I_{xz}(\dot{r} + pq) + I_{yz}(q^2 - r^2) + (I_{zz} - I_{yy})qr \\
&\quad + m[y_G(\dot{w} + vp - uq) - z_G(\dot{v} + ur - wp)] \\
M &= I_{yy}\dot{q} + I_{yz}(\dot{r} - qp) + I_{xy}(\dot{p} + qr) + I_{xz}(r^2 - p^2) + (I_{xx} - I_{zz})pr \\
&\quad + m[z_G(\dot{u} + wq - vr) - x_G(\dot{w} + vp - uq)] \\
N &= I_{zz}\dot{r} + I_{xz}(\dot{p} - rq) + I_{yz}(\dot{q} + rp) + I_{xy}(p^2 - q^2) + (I_{yy} - I_{xx})pq + \\
&\quad m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)],
\end{aligned} \tag{6.7}$$

kur

$$\begin{aligned}
I_{xx} &= \bar{I}_{xx} + \int_{\mathcal{V}} m(y_G^2 + z_G^2) \\
I_{yy} &= \bar{I}_{yy} + \int_{\mathcal{V}} m(x_G^2 + z_G^2) \\
I_{zz} &= \bar{I}_{zz} + \int_{\mathcal{V}} m(x_G^2 + y_G^2)
\end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned}
I_{xy} &= \bar{I}_{xy} + \int_{\mathcal{V}} m(x_G y_G) \\
I_{xz} &= \bar{I}_{xz} + \int_{\mathcal{V}} m(x_G z_G) \\
I_{yz} &= \bar{I}_{yz} + \int_{\mathcal{V}} m(y_G z_G)
\end{aligned} \tag{6.9}$$

Šajā brīdī ir iespējams izteikt ārējos spēkus un momentus, kas iedarbojas uz BZT. Tos var definēt sekojoši:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{G-B} + \mathbf{F}_{pievienotā\ masa} + \mathbf{F}_{miera\ stāv.} + \mathbf{F}_{piedzīņas} + \mathbf{F}_{vadība} \tag{6.10}$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{G-B} + \mathbf{M}_{pievienotā\ masa} + \mathbf{M}_{miera\ stāv.} + \mathbf{M}_{piedzīņas} + \mathbf{M}_{vadība} \tag{6.11}$$

Pirmās spēku un momentu komponentes ir saistītas ar gravitāciju un peldspēju (no angļu *gravity & buoyancy*, formulā  $G$  un  $B$ ), kas apraksta hidrostatiskos spēkus. Izsakot šīs komponentes kustīgajā koordinātu sistēmā, hidrostatiskie spēki un momenti pierakstāmi sekojoši:

$$\mathbf{F}_{G-B} = \rho g \mathcal{V} (\sin \theta \mathbf{i} - \sin \varphi \cos \theta \mathbf{j} - \cos \varphi \cos \theta \mathbf{k}) \tag{6.12}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{G-B} &= -\rho g \mathcal{V} [(y_B \cos \varphi \cos \theta + z_B \sin \varphi \cos \theta) \mathbf{i} \\
&\quad \times (-z_B \sin \theta - x_B \cos \varphi \cos \theta) + (x_B \sin \varphi \cos \theta + y_B \sin \theta) \mathbf{k}]
\end{aligned} \tag{6.13}$$

Un otrās komponentes attiecas uz pievienoto masu, kas, pateicoties transportlīdzekļa paātrinājumam, ir hidrodinamiskais spēks. Standarta ķermenim pievienotā masa tiek izteikta ar tenzoru, kur  $A_{ij}$  elementi, sakarā ar paātrinājumu  $-j$  virzienā, apraksta pievienotās masas palielinājumu  $-i$  virzienā. Apzīmējumu  $i, j$  vērtības no 1 līdz 3 apzīmē masas, kas saistītas ar kustībām uz priekšu/atpakaļ, uz sāniem un uz augšu/leju. Savukārt vērtības no 4-6 apzīmē inerces momentus velšanās kustībai (jeb pagriešanās ap garenasi), garensveres leņķa maiņai (jeb priekšgala virziena maiņa vertikālajā virzienā) un rotācijas kustībai ap vertikālo asi. Tāpēc matrica izskatās sekojoši:

$$\text{Pievienotā Masa} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \quad (6.14.)$$

BZT, kas ir simetriski plāknēs  $x$ - $z$  un  $x$ - $y$ , augstāk redzamā matrica reducējas sekojoši:

$$\text{Pievienotā Masa} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 & 0 & A_{26} \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (6.15.)$$

Izsakot ar ekvivalentiem atvasinājumu koeficientiem:

$$\text{Pievienotā Masa} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{v}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{r}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (6.16.)$$

Pievienotās masas spēkus un momentus var izteikt sekojoši:

$$\mathbf{F}_{PM} = - \sum_{j=1}^6 (\dot{U}_j A_j + U_j \boldsymbol{\Omega} \times A_j) \quad (6.17.)$$

$$\mathbf{M}_{AM} = - \sum_{j=1}^6 (\dot{U}_j A_j + U_j \boldsymbol{\Omega} \times A_j + U_j \mathbf{U} \times A_j) \quad (6.18.)$$

, kur pievienotās masa vektors spēkiem un momentiem:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_j &= A_{1j}\mathbf{i} + A_{2j}\mathbf{j} + A_{3j}\mathbf{k} \\ \mathbf{A}_j &= A_{4j}\mathbf{i} + A_{5j}\mathbf{j} + A_{6j}\mathbf{k} \end{aligned} \quad (6.19.)$$

Pēc pienācīgas mainīgo aizstāšanas un reizinājuma izvēršanas, sekojošās pievienotās masas spēku un momentu skalārās komponentes izskatās sekojoši:

$$\begin{aligned} X_A &= X_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{w}}w\dot{q} + Z_{\dot{q}}q^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{r}}r^2 \\ Y_A &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp - Z_{\dot{q}}pq \\ Z_A &= Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + X_{\dot{u}}uq - Y_{\dot{v}}vp - Y_{\dot{r}}rp \\ K_A &= K_{\dot{p}}\dot{p} \end{aligned} \quad (6.20.)$$

$$\begin{aligned} M_A &= M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})uw - Y_{\dot{r}}vp - (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp - Z_{\dot{q}}uq \\ N_A &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv - Z_{\dot{q}}wp - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq - Y_{\dot{r}}ur \end{aligned}$$

Pielikto spēku un momentu atvasināto koeficientu vērtības ir atkarīgas no transportlīdzekļa ģeometrijas un var tikt aprēķinātas, piemēram, izmantojot Slokšņu teorijas (*Strip Theory*) metodi.

Miera stāvokļa spēki un momenti ir viskozā fluīda efekta rezultāts un parasti tiek aprēķināti balstoties uz daļēji vai pilnībā empīrisku formulu. [72]

## 6.2. Zemūdens transportlīdzekļa simulācija *MSC Adams* vidē

Tālvadāms zemūdens transportlīdzeklis (TZT, no angļu *ROV* jeb *Remotely operated vehicle*) ir pie stacijas caur kabeli piesaistīta zemūdens mobilā ierīce, ko parasti sauc par zemūdens robotu. Šiem transportlīdzekļiem ir izteikti nelineāra dinamika, kas ir pateicoties to gan dinamiskajiem, gan arī hidrodinamiskajiem spēkiem. TZT pārvietojas ar līdzīgiem ātrumiem visu trīs asu virzienā un vadības metodes, kuras balstās uz linearizētu kustības vienādojumu vienā virzienā (kā lidaparātiem un tradicionālajām zemūdenēm), nedarbojas efektīvi. Tāpēc, modelējot TZT dinamiku un hidrodinamiskos spēkus, ir svarīgi izvērtēt nepieciešamību pēc nelineāriem kustības vienādojumiem. [73]

Hidrodinamiskie koeficienti var tikt aprēķināti balstoties uz zemūdens robota ģeometriju. Pievienotā masa un plūsmas pretestības spēki šajā gadījumā ir vissvarīgākie no hidrodinamiskajiem spēkiem. Aprēķinot šos koeficientus, var izmantot tabulā apkopotus datus, kas atrodami avotā. [74]

Šajā piemērā, izmantojot *MSC Adams/View* programmatūru, ir uzbūvēts nelineārs daudzķermeņu TZT modelis. Tajā ir ietverts TZT cieta ķermeņa modelis ar sešām brīvības pakāpēm, hidrodinamiskie spēki, manipulatora modelis, dzinēju modelis un diskretizēts piesaistītā kabeļa modelis. Šajā piemērā smalkāk tiks apskatīti tikai rezultāti, kas ietver paša

transportlīdzekļa pārvietošanos hidrodinamisko spēku ietekmē. Manipulatori un piesaistītais kabelis smalkāk netiks apskatīti. Ir vērts pieminēt vienīgi to, ka kabeļa modelis sastāv no daudziem maziem savā starpā savienotiem galīgiem elementiem, kur uz katru iedarbojas jūras straumju ietekmes radītie hidrodinamiskie spēki. Kā arī jāņem vērā, ka [75] autoru galvenais mērķis bija izveidot zemūdens misiju treniņu simulāciju, izmantojot *MSC Adams*. Attēlā 6.2. ir apskatāms šīs simulācijas prototips, *Fugro G3* TZT.



6.2. att. Tālvadāms zemūdens transportlīdzeklis *Fugro G3*. [75]

Pats transportlīdzeklis var tikt attēlots kā ciets ķermenis ar sešām brīvības pakāpēm. Tā kustības vienādojums var tikt izteikts sekojoši:

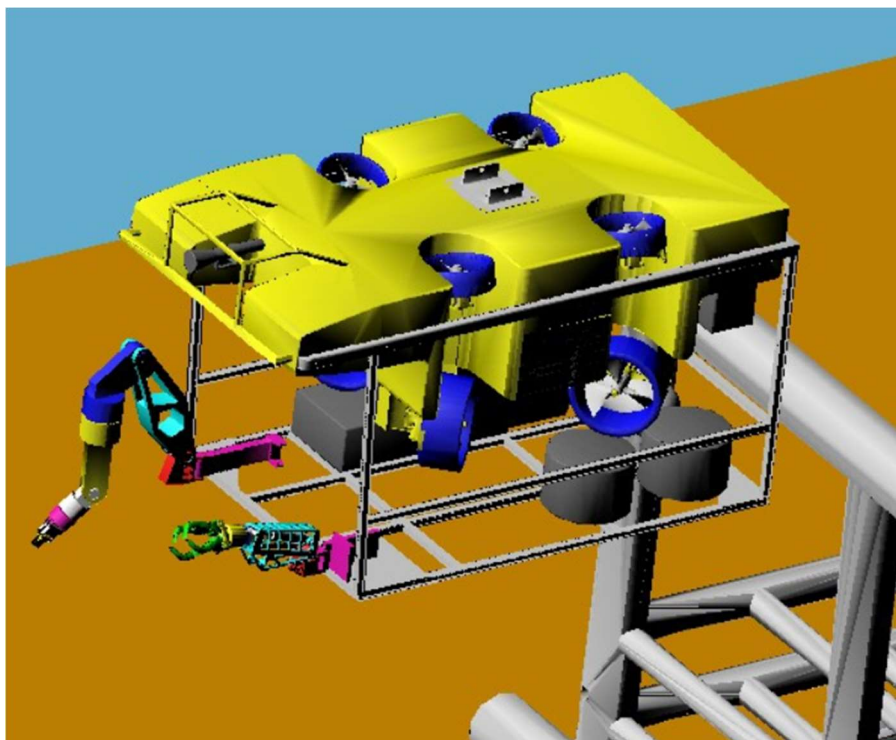
$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (6.21.)$$

Masas matrica  $M$  atbild par transportlīdzekļa inerci un pievienoto masu,  $C$  matrica ietver Koroilisa un centrīces spēkiem, matrica  $D$  ir slāpējošā matrica, kas atsaucas uz virpuļplūsmas slāpējošajiem efektiem, balstīta uz Morisona vienādojumu. Matrica  $g$  atbild par gravitācijas un peldspējas spēkiem. Vektors  $\tau$  ir transportlīdzeklim piešķirtais dzinējspēks. Šajā vienādojumā nav ietverti kabeļa spēki un griezes momenti, kā arī manipulatoru dinamika.

*MSC Adams* ļauj konstruēt katru modeļa sistēmu atsevišķi un pēc tam tās var savienot ar attiecīgu bibliotēkas piedāvātu savienojumu un spēka elementiem. Lai iegūtu kopējā modeļa pilno kustības vienādojumu, šeit nav nepieciešams ievadīt visus vienādojumus ar roku. Uz TZT nepieciešamos hidrodinamiskos spēkus un griezes momentus panāk ar pieliktu vispārīgo spēku elementus.

Lai reproducētu vidi tuvāk realitātei un uzlabotu simulāciju, *MSC Adams* modelī ir iespējams importēt ģeometriju no citas CAD programmatūras, izmantojot standarta formātus

(STEP, PARASOLID, IGES). Tas palīdz pilotam labāk sagatavoties reālās vides misijai. Attēlā 6.3. apskatāms *MSC Adams* vidē izveidotais TZT modelis, kopā ar apkārtējās vides ģeometriju.



6.3. att. *MSC Adams/View* izveidotais tālvadāmais zemūdens transportlīdzeklis. [75]

Hidrodinamiskie spēki, kas iedarbojas uz TZT, tiek aprakstīti pieņemot, ka fluīds ir bez virpuļiem, ar garenvirziena straumes ātrumu  $U_f$ . Relatīvais ātrums starp TZT un fluīdu, ir:

$$U_r = U - U_f, \quad (6.22.)$$

kur  $U$  – TZT ātrums garenvirzienā (m/s),  $U_f$  – fluīda plūsmas ātrums (m/s), un  $U_r$  – TZT relatīvais ātrums (m/s).

Hidrodinamiskos spēku un momentus, kas iedarbojas uz TZT, var lineāri superpozicionēt. Tiek ņemtas vērā trīs komponentes [74]:

- Pievienotā masa, kas izriet no iekļaujošā fluīda,
- Slāpējošais spēks, kas atkarīgs no virpuļplūsmas iedarbības (Morisona sakarība),
- Spēki, kas atjaunojas (svars un peldspēja).

Lai tiktu ņemta vērā apkārtējā fluīda efektīvā masa, kas pātrinās kopā ar transportlīdzekli, pievienotās masas ir izteiktas kā papildus TZT modeļa izraisītā inerce. Koeficienti šīm masām ir pieņemti kā konstanti.

Viskozā fluīdā berzes spēku ietekmē sistēma nav konservatīva. Viskošie slāpējošie spēki, kas iedarbojas uz transportlīdzekli, tika modelēti izmantojot Morisona vienādojumu:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w A U_r |U_r| + C_m \rho_w A \dot{U} \quad (6.23.)$$

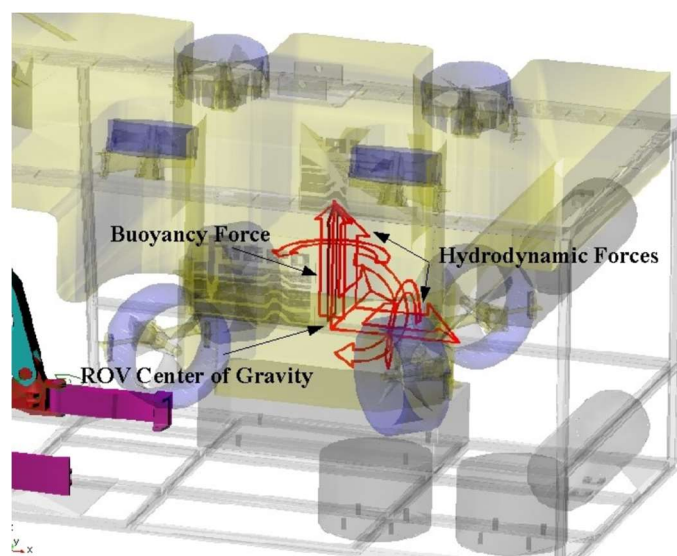
Šeit  $C_d$  ir slāpēšanas koeficients,  $\rho_w$  – jūras ūdens blīvums,  $A$  – TZT projicētais laukums,  $U$  un  $\dot{U}$  – relatīvie ātrumi un paātrinājumi starp TZT un fluīdu.

Atjaunotājspēki ir gravitācijas un peldspējas spēki. Peldspējas spēks ir vienāds ar TZT pārvietotā fluīda svaru, un tiek aprakstīts sekojoši:

$$F_B = \rho_w g V, \quad (6.24.)$$

kur  $V$  – transportlīdzekļa pārvietotā fluīda tilpums un  $g$  – brīvās krišanas paātrinājums.

Šie spēki tiek ievadīti *MSC Adams/View* programmatūrā ar vispārināto spēku funkciju, kas iedarbojas uz transportlīdzekļa masas centru. Šie spēki attēloti attēlā 6.4.



6.4. att. TZT modelim pieliktie hidrodinamiskie spēki. [75]

Propelleru dzinējspēka  $T$  modelēšanai tiek izmantots pirmās kārtas aproksimācijas modelis. Šis paņēmieni ir aizgūts no [76], kur ir izmantoti cēlējspēku aprēķini par pamatu atvērtā propellera diagrammas aproksimācijai. Propellera veiktspēja tiks izteikta caur ūdens plūsmas ātruma funkciju, kur seko propellera apgriezieni sekundē  $n$  un propellera diametrs  $D$ . Atvērtās ūdens tilpnes bezdimensionālās īpašības izteiktas ar atklātā ūdens plūsmas koeficienta palīdzību [74]:

$$J_0 = V_a I(nD) \quad (6.25.)$$

Caur propelleri plūstošā ūdens relatīvais ātrums ir izteikts ar:

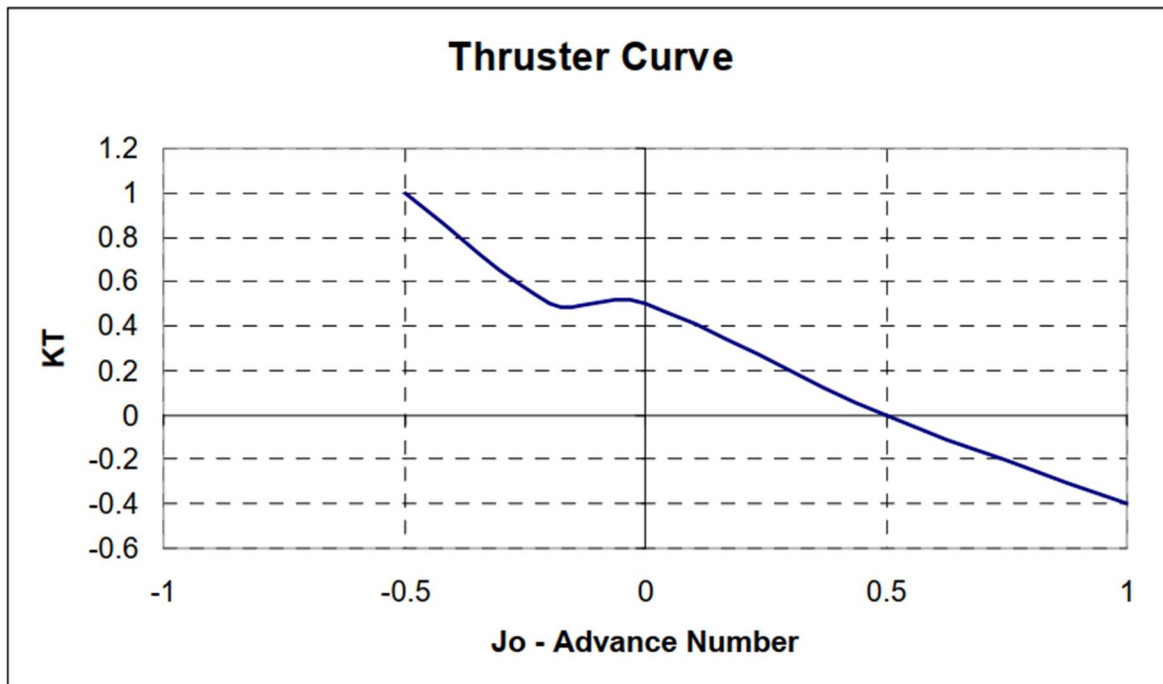
$$V_a = (1 - \omega)U, \quad (6.26.)$$

kur  $\omega$  apzīmē propellera/transportlīdzekļa ātrumu attiecību (0.1-0.4) un  $U$  ir uz priekšu vērstais TZT ātrums.

Pozitīvais dzinējspēks ir izteikts ar sekojošo vienādojumu:

$$T = \rho_w D^4 K_T(J_0) |n|n \quad (6.27.)$$

Bezdimensionālais propellera dzinējspēka koeficients  $K_T$  ir funkcija no ūdens plūsmas koeficienta un to var attēlot ar grafika palīdzību, kā zemāk attēlā 6.5. [74].

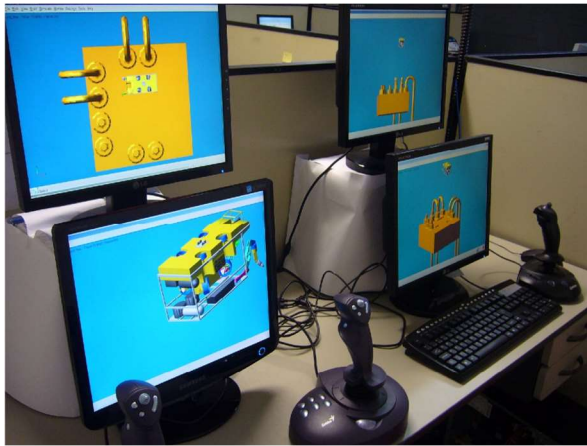


6.5. att. Dzinējspēka līkne. [74]

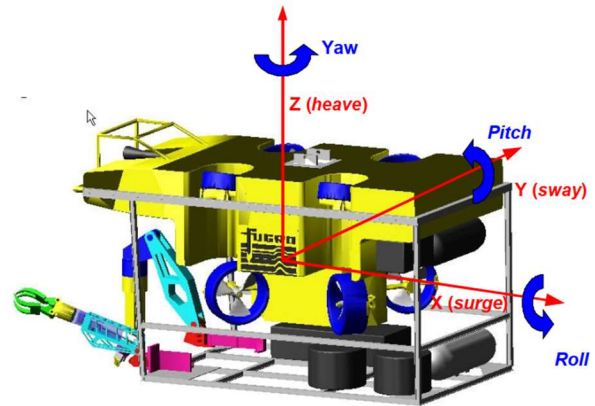
Rezultātā autori *MSC Adams* vidē ir izveidojuši sev interesējošā TZZ simulatoru, kura aprīkojums apskatāms attēlā 6.6. a). Tas sastāv no divām pultīm (jeb kursorsvirām) manipulatoru vadībai, un viena pulsts paredzēta dzinēju kontrolei. Manipulatoru vadība realizēta caur *Matlab/Simulink* programmatūru. Šādas sistēmas vadībai vienlaicīgi nepieciešami divi cilvēki. Un ar 4 LCD ekrānu palīdzību treniņu simulācija ir pilnībā pārskatāma no dažādiem rakursiem.

Tika veikta eksperimentālā validācija, balstoties uz skaitliskajos eksperimentos iegūtajiem datiem. Attēlā 6.6. b) ir apskatāmi pieņemtie TZZ pozīcijas leņķi un pārvietojumi. Eksperimentā veiktā trajektorija apskatāma attēlā 6.7. Tika konstatēts, ka šī reālā laika simulācija veikspējas ziņā izpildījās ļoti labi ar esošo aparatūru, kas ir stacionārais dators ar *Pentium IV* mikroprocesoru, 2.6 GHz, divkodolu, ar 8 GB RAM un divām *GeForce* grafikas kartēm.





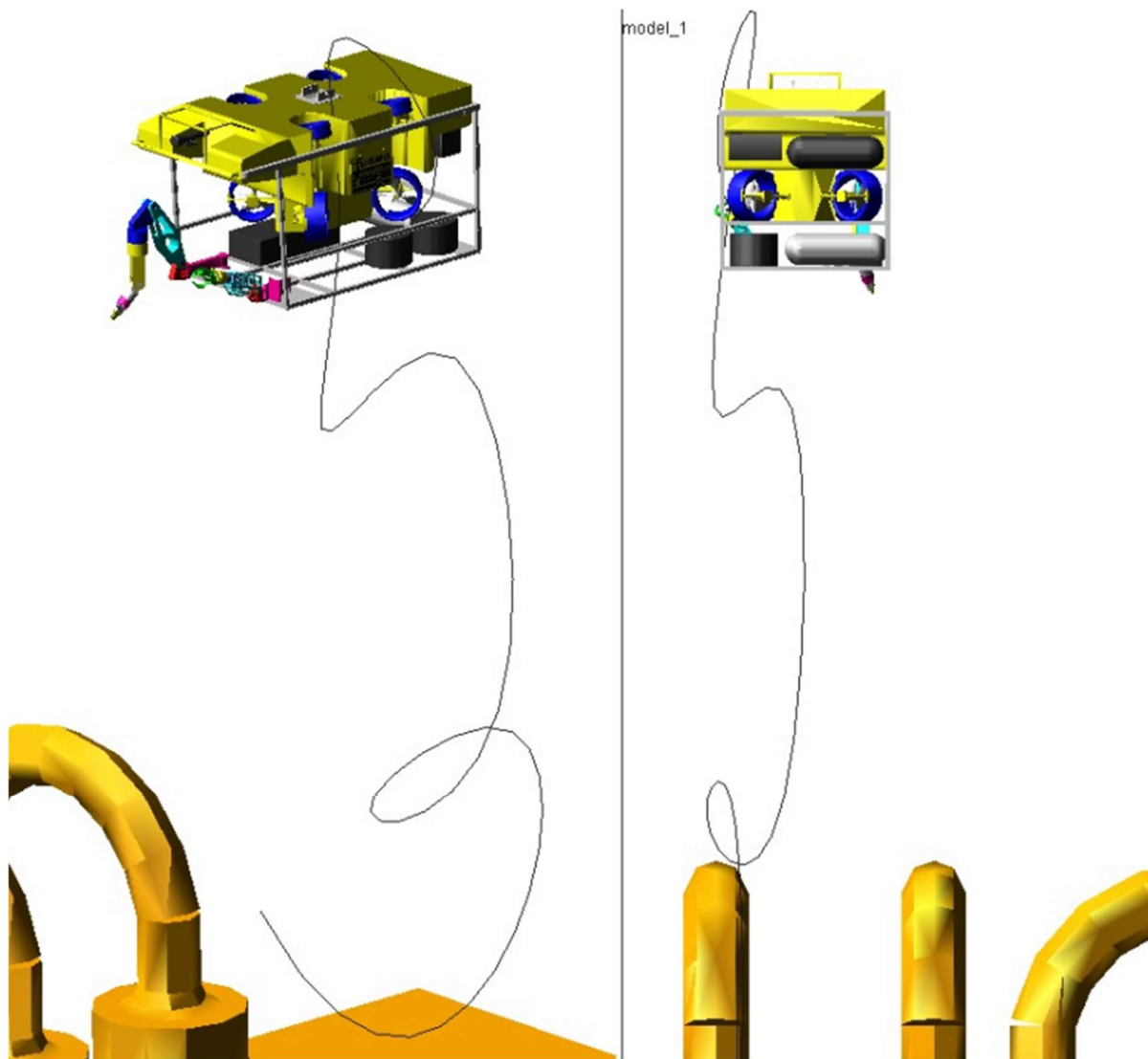
(a)



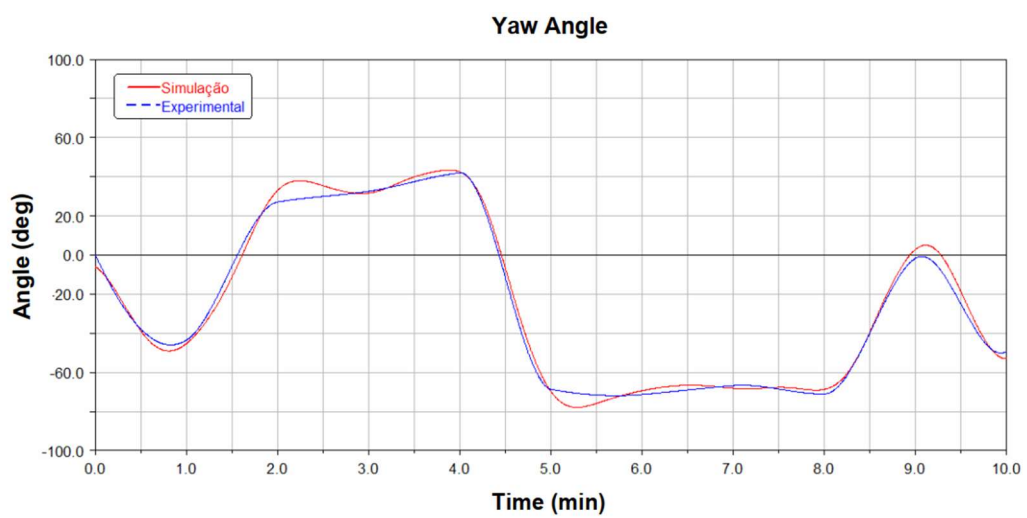
(b)

6.6. att. TZT simulators *MSC Adams* vidē, ar 4 LCD ekrāniem un 3 vadības pultīm (2 transportlīdzekļa manipulatoriem un 1 dzinēju vadībai) (a); pieņemtie TZT pozīcijas leņķi un pārvietojumi (b). [75]

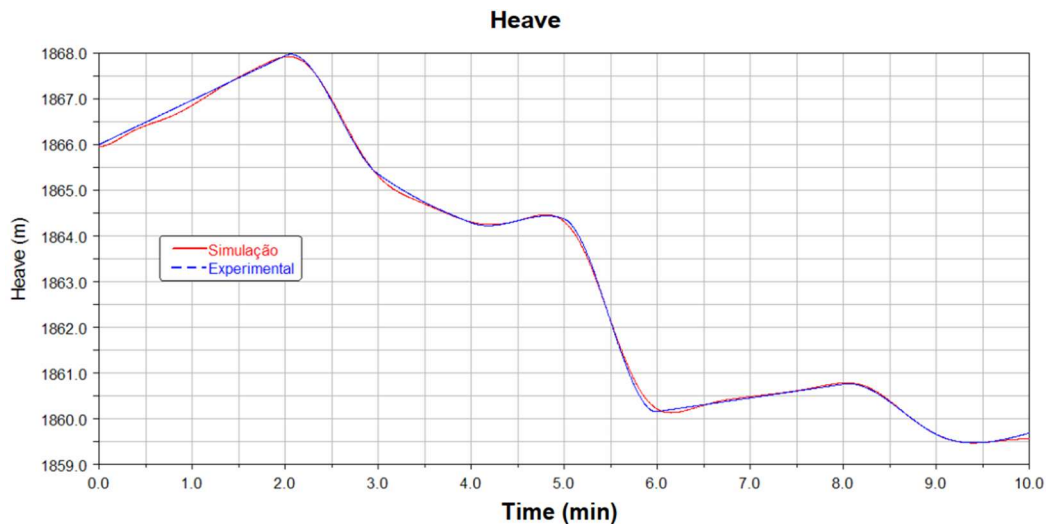
Attēlos 6.8., 6.9. un 6.10. attiecīgi attēloti grafiki ar rotācijas leņķi ap vertikālo Z asi (no angļu *yaw*), lineārās pozīcijas maiņu virzienā gar vertikālo Z asi (no angļu *heave*), un virzību uz priekšu gar X asi (no angļu *surge*). Sarkanā līkne apzīmē simulētos datus, un zilā līkne apzīmē eksperimentālos datus. Kā novērojams, abas līknes ir ļoti tuvas, apstiprinot to, ka virtuālā modeļa dinamiskā uzvedība ir ļoti tuva reālās vides TZT uzvedībai. [75]



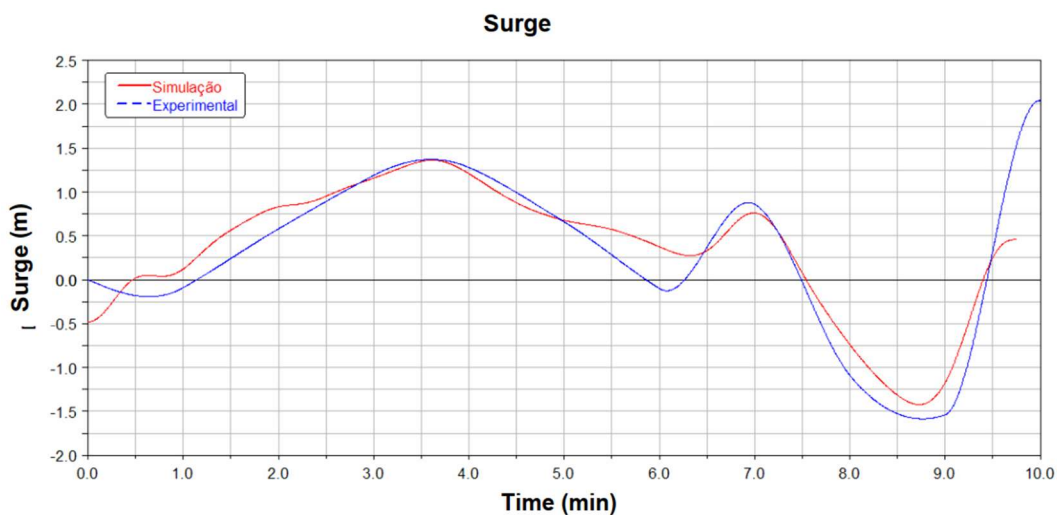
6.7. att. TZT eksperimentā veiktā trajektorija. [75]



6.8. att. Līknes ar rotācijas leņķi ap vertikālo Z asi. [75]



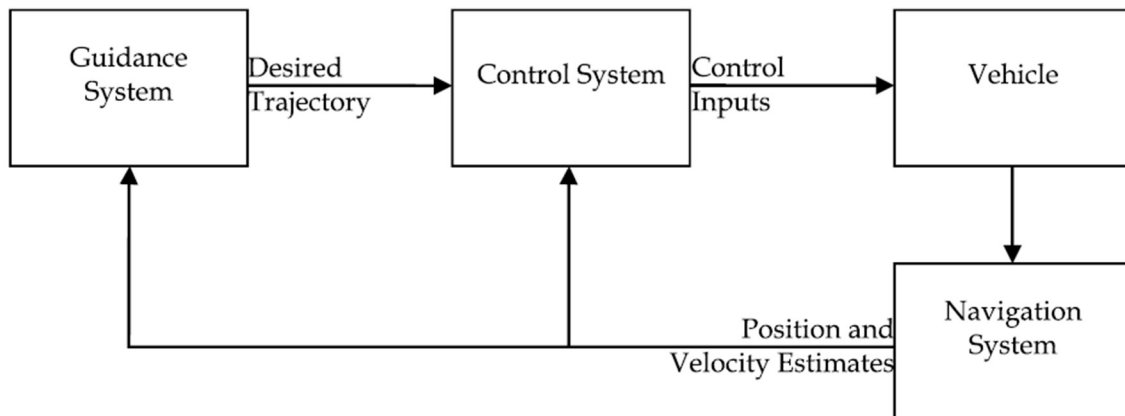
6.9. att. Līknes ar lineārās pozīcijas maiņu virzienā gar vertikālo Z asi. [75]



6.10. att. Līknes ar virzību uz priekšu gar X asi. [75]

### 6.3. Helikoīdā transportlīdzekļa vadības principa izstrāde

Vadība ir viens no jautājumiem, kas vienmēr prasījis risinājumus tehnoloģijas pasaulē, gan pētījumiem dzīvos organismos, gan tehnikā. Daudzos gadījumos procesiem vadības problēma tiek risināta, ieviešot automātisko vadības sistēmu. Par automātiskās vadības sistēmām sauc sistēmas, kas bez tiešas cilvēka līdzdalības veic dažādu tehnisku procesu vadību. [77] Lai šāda sistēma darbotos, tai ir trīs galvenās komponentes, kas sastāda AZT autonomijas arhitektūru, un tās ir vadības sistēma, navigācijas sistēma un kontroles sistēma. (6.11. attēls) Visām trim šīm sistēmām ir veicami katrai savī individuāli uzdevumi, bet, lai transportlīdzeklis stabili sasniegtu savu mērķi, visām šīm sistēmām arī jādarbojas saskaņoti savā starpā. [78]



6.11. att. Vadības, navigācijas un kontroles bloku diagramma. [78]

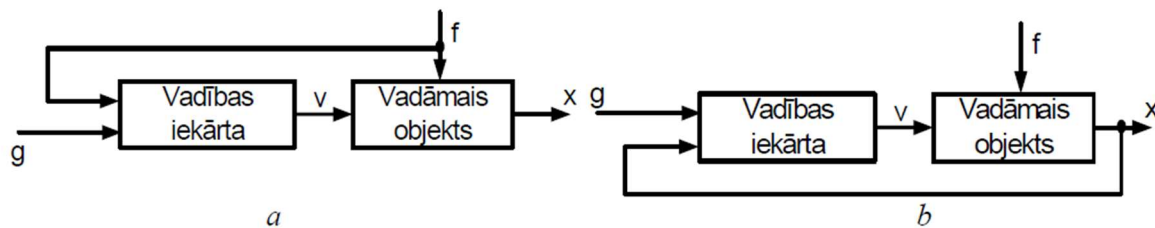
Veidojot automātiskās vadības sistēmas izmanto divus vadības principus - vadības princips pēc izraisošās iedarbes (kompensācijas princips) un atgriezeniskās saites princips (vadība pēc novirzes).

Sistēmās ar kompensācijas principu (6.12.a. attēls) izraisošā iedarbe  $F$  tiek padota uz vadības iekārtu, kura formē vadības signālu  $V$  tā, lai tas, iedarbojoties uz vadāmo objektu, kompensētu izraisošās iedarbes iespaidu uz izejas lielumu  $X$ . Automātiskās vadības sistēma šinī gadījumā ir invarianta attiecībā pret izraisošo iedarbi.

Invariances nosacījumu var realizēt pilnībā vai arī ar precizitāti līdz kādam mazam lielumam. Tas nozīmē, ka regulējamā lieluma novirze no dotās vērtības (kļūda) pilnībā tiek likvidēta, vai paliek pieļaujama kļūdas vērtība.

Invarianto sistēmu trūkums - tiek kompensēta tikai viena izraisošā iedarbe un netiek novērsta citu izraisošo iedarbju nevēlamā ietekme uz objektu. Ja arī ievēro visas izraisošās iedarbes, tad kļūda vienmēr būs, jo nevar ievērot objekta iekšējo īpašību izmaiņas. Līdz ar to sistēmas ar kompensācijas principu izmanto ļoti reti.

Automātiskās vadības sistēmās ar atgriezenisko saiti vadības signāls tiek formēts atkarībā no izejas mainīgā vērtībām. Informācija par objekta koordinātas stāvokli pa atgriezenisko saiti nonāk vadības iekārtas ieejā, kur pēc atbilstošiem pārveidojumiem tiek salīdzināta ar sistēmas ieejas lielumu  $g$  (6.12.b attēls). Salīdzināšanas rezultātā iegūtais signāls (kļūdas signāls) tiek izmantots, lai formētu atbilstoši uzdotam algoritmam (pastiprināts, integrēts, diferencēts) vadošo iedarbi  $V$ . Vadošā iedarbe cenšas samazināt izejas lieluma novirzi un atgriezt objektu uzdotā stāvoklī.



6.12. att. Sistēmas funkcionālās shēmas; a – kompensācijas princips; b – atgriezeniskās saites princips. [77]

Galvenā priekšrocība sistēmām ar atgriezenisko saiti ir to spēja nodrošināt uzdoto izejas mainīgā izmaiņu lielumu neatkarīgi no novirzēm, ko izsauc izraisošās iedarbes, kuras, kā iepriekš bija minēts, ne vienmēr var izmērīt. Sistēmu precizitāte ir ievērojami augstāka kā kompensācijas principā.

Abi apskatītie vadības principi var būt arī apvienoti vienā sistēmā. Šādā gadījumā iegūstam kombinēto vadības principu, kurā apvienojas kompensācijas un atgriezeniskās saites principu priekšrocības. [77]

### 6.3.1. Zemūdens transportlīdzekļu vadības principi

Nodaļā tiks apskatīti pāris zemūdens transportlīdzekļu kinemātiskie vadības principi. Pastāv vairāki veidi, kā kontrolēt šādu transportlīdzekļu kustības virzienu. Kustības virziena maiņu iespējams panākt ar spārnu/spuru pagriešanu, ar astes kustināšanu, ar dzinēja pagriešanu. Atkarībā no transportlīdzekļa parametriem un konstrukcijas, ir piemērotāks un ir ne tik piemērots princips.

Viena no zemūdenēm, kam tiek izmantota spārnu pagriešana virziena regulēšanai, ir AZT *NPS<sup>2</sup> Aries* (skatīt 6.13. attēlu) [79]. To uz priekšu dzen divi aizmugurē piestiprināti dzinēji, bet virziena maiņai tiek izmantotas grozāmas spuras. Tās palīdz tam mainīt virzienu kā uz sāniem, tā dziļumā. Šai zemūdenei ir speciāli konstruēti slīdošā režīma kontrolieri, kur ņemts vērā tas, ka tā ir pilnīga sistēma ar stāvokļa raksturojumu  $x = [v^T \ \omega^T \ x^T \ \Theta] = [u \ v \ \omega \ | \ p \ q \ r \ | \ x \ y \ z \ | \ \varphi \ \vartheta \ \psi]^T$ , kas atkarīgs no aktuatoriem [80]:

$$u(t) = [\delta_r(t) \ \delta_s(t) \ n(t)]^T,$$

kur  $\delta_r(t)$  – pakalģala stūres novirzes komanda (rad);

$\delta_s(t)$  – pakalģala augstuma stūres plaknes komanda (rad);

$n(t)$  – propellera apgriezieni (rad/s).

(6.28.)

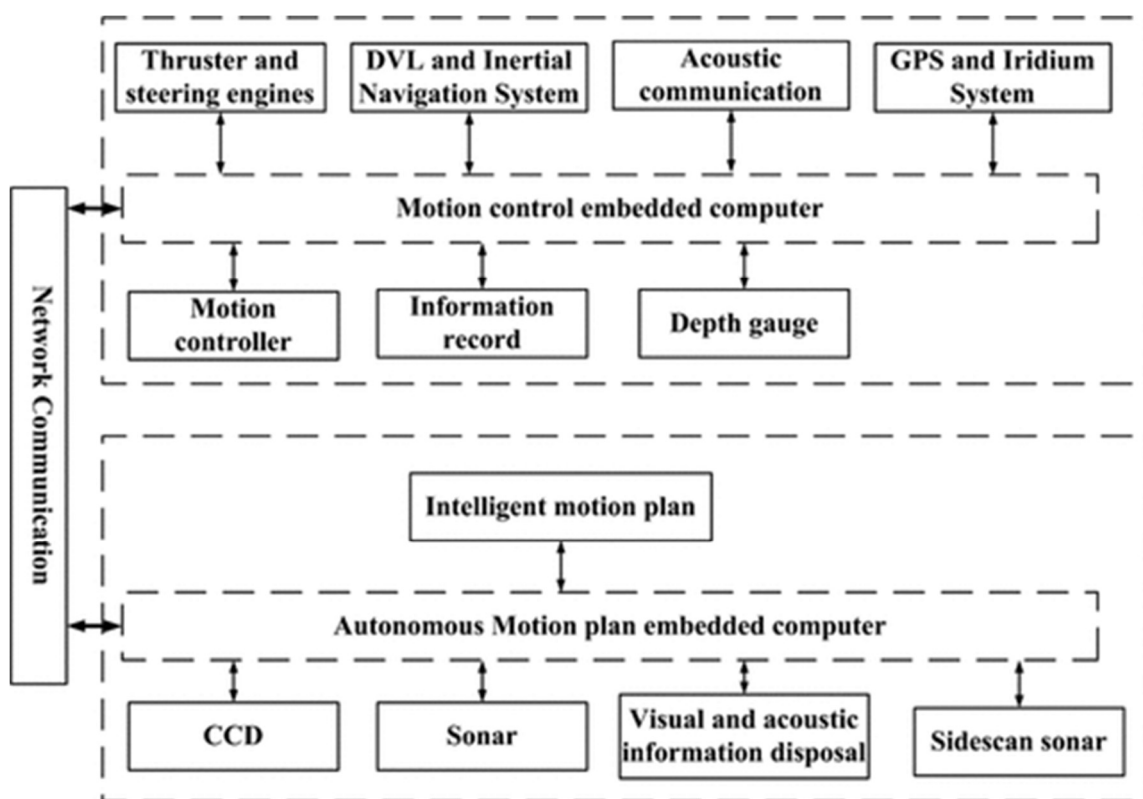


6.13. att. Autonomas zemūdens transportlīdzeklis *NPS<sup>2</sup> Aries*. [79]

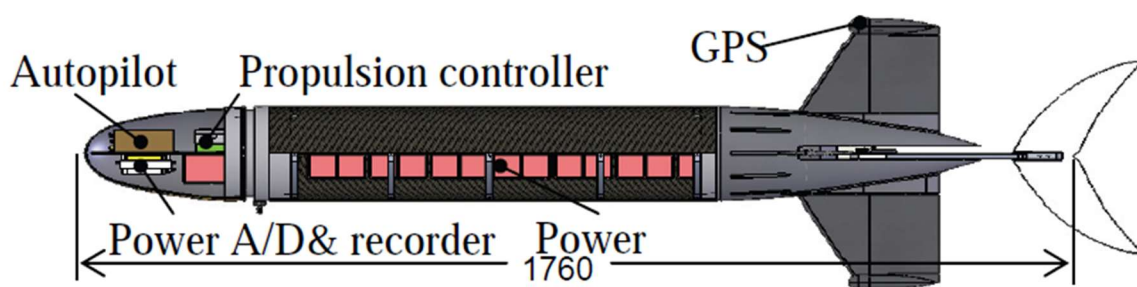
Pielikumā 1 apskatāmi šī transportlīdzekļa modeļa dinamikas aprēķināti parametri. Minētie parametri ir daļa no Ņūtona-Eilera dinamikas modeļa vienādojumiem, kas sastādīti *NPS<sup>2</sup> Aries* autonomajam zemūdens transportlīdzeklim, kuram ir 6 brīvības pakāpes. Ja tiek izmantota tāda daudzķermeņu mehānikas dinamikas programmatūra, kā, piemēram, *MSC Adams*, programmatūra pati veido Ņūtona-Eilera dinamikas modeļus, lietojot mehānisma kinemātiskās shēmas aprakstu.

Attēlā 6.14 ir apskatāma šāda veida transportlīdzekļa vadības programmatūras arhitektūra bloku diagrammas formā.

Šim transportlīdzeklim piedziņai izmantota izplatītā propelleru piedziņa, bet, paralēli propelleriem, tiek pētīta arī piedziņa ar zivs astes formas spuras kustināšanu. Šāda piedziņa apskatīta *SPC-III* biorobotikas AZT (skatīt 6.15. attēlu).



6.14. att. Vadības programmatūras arhitektūra torpēdas tipa AZT. [81]



6.15. att. *SPC-III* biorobotikas autonoms zemūdens transportlīdzeklis. [82]

Kā redzams 6.15. attēlā, astes spura, kas realizē grūdienu, ir uzstādīta piedziņas pārvada beigās. Astes spura ir izgatavota no 1mm bieza oglekļšķiedras materiāla un imitē tunča astes spuras formu. Spurai piestiprinātās saites kustina motori ar reduktoru palīdzību (6.16. attēls), kam reducēšanas attiecība ir 30. Pieņemsim  $A$  par atvēziena amplitūdu,  $\alpha$  – relatīvas straumes leņķis, un  $\theta_1, \theta_2$  - motoru realizējamie izejas leņķi pēc reduktora. No šiem parametriem var sastādīt sekojošo sakarību:

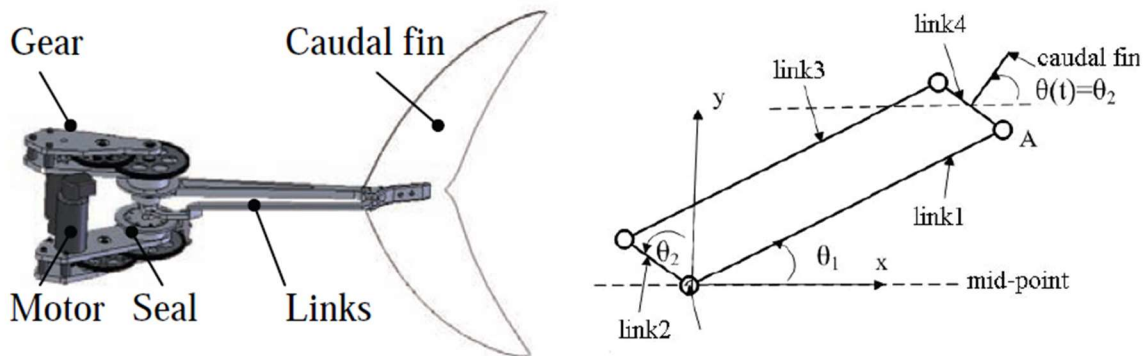
$$\{A = L \sin\theta_1 \alpha = \theta_2 \quad (6.29.)$$

Peldēšanas stāvoklī astes spuras veiktspējas efektivitāti ietekmē parametri. Tie ir bezdimensionāla atvēziena amplitūda  $A$ , astes spuras atvēziena leņķis pret plūsmu  $\alpha_0$ , fāzes nobīde  $\Phi$  un Stroha skaitlis  $St. = f \cdot A_0 / V$ , kur  $f$  – frekvence,  $A_0$  – spuras atvēziena virsotne,  $V$  – ieplūdes ātrums. Astes spuras kustības likumu jūras dzīvniekiem ar astes spuras piedziņu, kā delfīnam un tuncim, var aprakstīt ar sakarību [82]:

$$\{A = \frac{1}{2A_0 \cos \cos(2\pi t)} \alpha = \alpha_0 \cos(2\pi t - \Phi) \quad (6.30.)$$

Šādi ir skaidrs, ka iepriekš minēto faktoru precīza noregulēšana, var tikt realizēta tikai ar motoru kustības likumu izejas parametru  $\theta_1, \theta_2$  pielāgošanu. Kā vadības sistēma astes spuras piedziņas (6.30.) kustības likuma realizēšanai tiek izmantots 2-asu kustības koordinators.

Tā kā ir sarežģīti uzstādīt divas dzenošas komponentes astes nodalījuma šaurajā konusa telpā, tikai izveidots ļoti plānu zobratu reduktors. Tajā pašā laikā motora-reduktora-aptverošā korpusa salikums uzstādīts ļodzīgā stāvoklī, lai pilnveidotu astes spuras piedzinēju. Šādi vienīgi nav iespējams vairs pievienot griezes un ātruma sensorus.



6.16. att. Astes spuras piedziņas mehāniskā shēma. [82]

Grupai zemūdens transportlīdzekļu tiek izmatots arī dzinēja pagriešanas princips transportlīdzekļa kontrolēšanai. Šāds princips nepieciešams dinamiskajām zemūdenēm. Tas tāpēc, jo tām nav balasta sistēmas un tā dēļ tās tiek iegremdētas ūdenī ar aktīva spēka palīdzību, pretējā situācijā tās uzpeld atpakaļ ūdens virspusē. Daudzas lētas dinamiskās radio vadāmās (RV) zemūdenes tiek būvētas pēc „*dvīņu-motoru*” principa, ar kuriem tās spēj ienirt, uzpeldēt, pagriezties utt. Ar iespējām regulēt propelleru pagrieziena leņķus, ar šīm zemūdenēm iespējams veikt dažādas kustības. Šāda tipa zemūdenes apskatāmas 1.5. un 6.17. attēlos.

Jāatzīmē, ka iepriekš, 1. nodaļā, apskatītajām baktērijām ar spirālveida viciņas piedziņu kustības vadība nav ļoti attīstīta, tāpēc to kustība ir haotiska.



6.17. att. RV rotaļu zemūdene ar „dvīņu-propelleru” piedziņas principu.

### 6.3.2. Vadības algoritmu apskats

Zemūdens transportlīdzekļiem pastāv vairāki pielietojami vadības algoritmi, piemēram, vadība pēc virziena, vadība pēc ātruma un kinemātiskā vadība, trajektoriju plānošana. Vadoties pēc vides apstākļiem, kurā jāoperē transportlīdzeklim, kā arī pēc paša transportlīdzekļa tehniskajiem raksturlielumiem, izvēlas piemērotāko no vadības veidiem.

Vadībā pēc virziena objekta uzdevums ir ieņemt kustības virzienu uz mērķi. 6.18. attēlā redzamais vektors  $b$  ir objekta virzības virziens, bet vektors  $a$  ir objekta ieņemamais virziens, leņķis  $\varphi$  ir šo vektoru leņķiskā starpība  $k$  – korekcijas koeficients. Šie lielumi saistāmi ar griezes momenta sakarību vispārīgā formā:

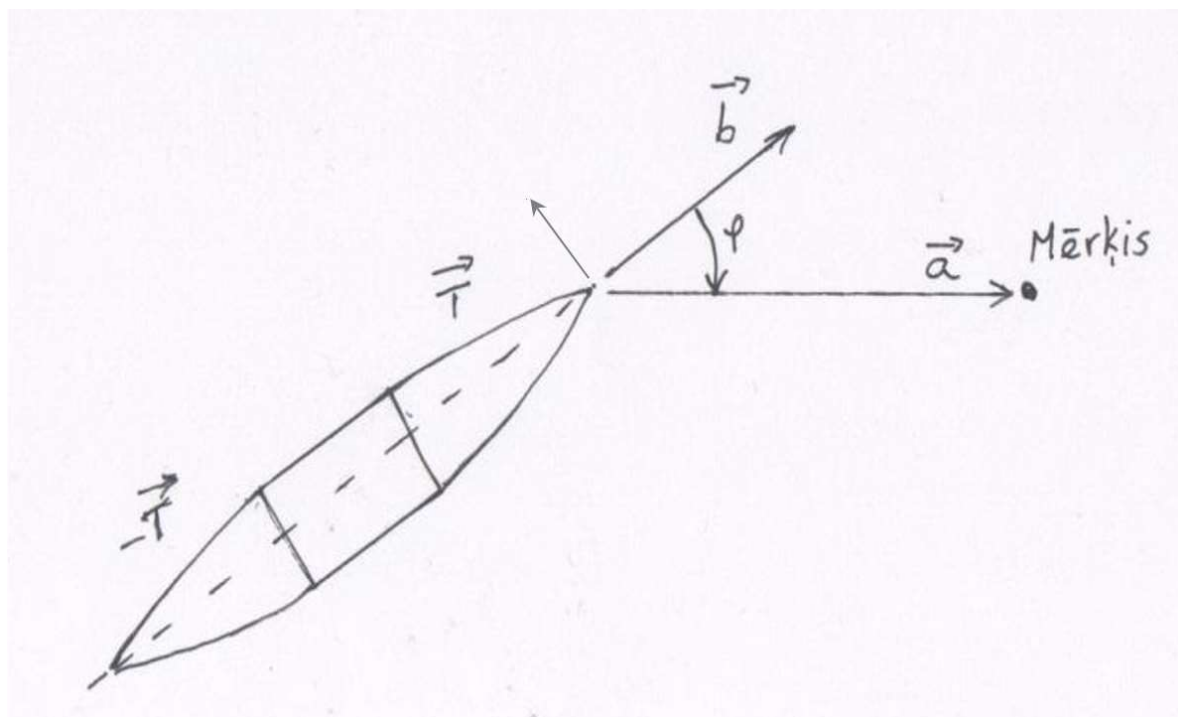
$$\vec{T} = k(\vec{a} \times \vec{b}) = \frac{k^*}{\|a\|\|b\|} \cdot \vec{a} \times \vec{b} \quad (6.31.)$$

Operējot ar griezes momentu, būtu iespējams piedzīt objekta vektoriālo virzienu, iegūstot vēlamo virzienu mērķa sasniegšanai jeb sekošanai. Vadības dzinēji rada iekšējo spēku momentu. Izteiksme (6.31.) attiecas uz transportlīdzekļa priekšdaļu. Uz aizmugures daļu tādējādi darbosies pretēji vērsts spēku moments  $-\vec{T}$ . Abu vadības dzinēju radītā spēku momenta lielums (vektora norma) būs:

$$\|\vec{T}\| = k\|a\| \cdot \|b\| \cdot \sin(\varphi) \quad (6.32.)$$



Algoritma mērķis ir uzturēt minimālu vektoru savstarpējo novirzi,  $\varphi$  tuvinās  $0$  vērtībai. Šī metodika labi darbotos apstākļos, kur nav ārējo spēku iedarbības, kā, piemēram, upes straumes plūsma.

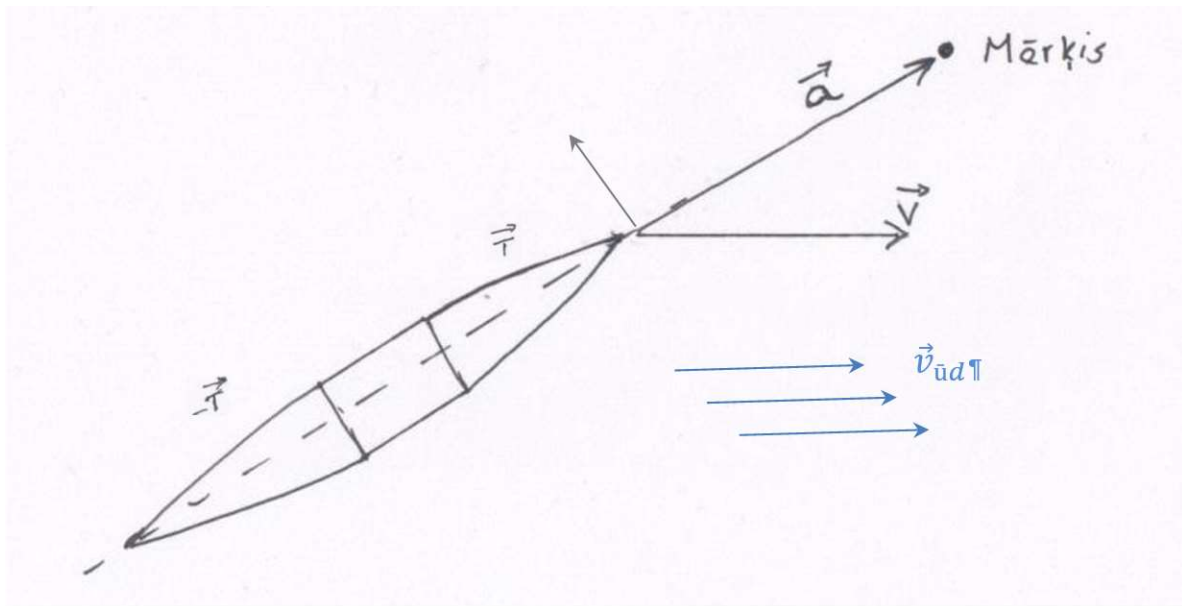


6.18. att. Shematisks attēlojums vadībai pēc virziena.

Vadības algoritmā pēc ātruma princips mazliet atšķiras. Objekta centrālās ass virziens var nesakrist ar ātruma  $v$  virzienu, ko ietekmē kāds ārējs faktors, kā, piemēram, straume. Šis algoritms būs veiksmīgi pielietojams gadījumos, kad straumes virziens sakrīt ar ātruma  $v$  vektoru (skatīt 6.19. attēlu). Pieņemsim, ka sasniedzamais mērķa punkts ir nekustīgs, tā koordinātes telpā nemainās, bet AZT atrodas vidē ar straumes ietekmi. Ja objektam vēlamā virziena ieņemšanai nākas ieņemt straumei perpendikulāru stāvokli, tad straumes spēks to nepārtraukti dzīs tālāk un, neatkarīgi no tā, vai virziena vektors ir vēlamajā virzienā, tas netuvosies sasniedzamajam mērķim. Tas tāpēc, ka ātruma vektors vēl aizvien ieņem stiprākās straumes virzienu. Šī iemesla dēļ nepieciešams mainīt ātruma vektora  $v$  virzienu tā, ka tas ieņem virzienu uz mērķi. Tas nozīmē, ka šādā situācijā pats zemūdens transportlīdzeklis varētu ieņemt arī straumei pretēji (ne pilnīgi) vērstu orientāciju, bet ar dzinēju spēka palīdzību tiktu pārvarēta straumes pretestība un notiktu kustība vēlamajā virzienā.

Algoritms aprakstāms ar griezes momenta  $\vec{T}$  sakarību:

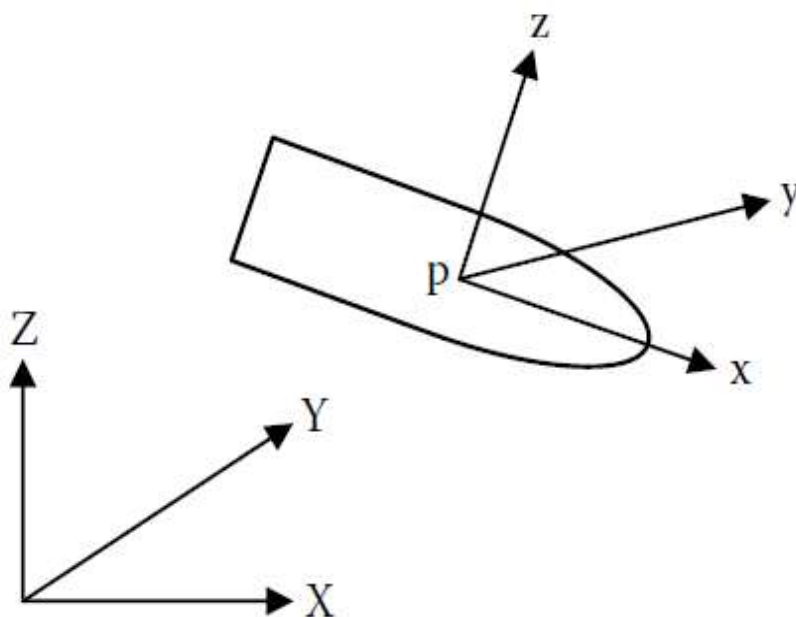
$$\vec{T} = \frac{k}{\|a\|\|v\|} \cdot \vec{v} \times \vec{a} \quad (6.33.)$$



6.19. att. Shematisks attēlojums vadībai pēc ātruma.

Sistēmas kinemātiskā modeļa vienādojumi neietver faktiskos spēkus, kas izraisa kustību, un transportlīdzekļa dinamiskās īpašības. Šis modeļa tips atļauj nošķirt transportlīdzekļa dinamiku no tā kustības. Praktiski gan dzinēja griezes moments, gan pagrieziena leņķis vai ātrums tiek realizēti ar nobīdi laikā. Tas nozīmē, ka dzinēja pagrieziens laika momentā  $t$  atbilst transportlīdzekļa orientācijai laika momentā  $t-\Delta$ , kur  $\Delta$  – laika nobīde. Modelējot šādas sistēmas ar universālajām daudzķermeņu sistēmu simulācijas programmām, var rasties simulācijas nestabilitāte, jo dzinēja pagrieziens ir atkarīgs no orientācijas, bet tā savukārt atkarīga arī no dzinēju pagrieziena. Šī nestabilitāte nenozīmē fizisko vadības sistēmas nestabilitāti, bet tā nav izslēgta.

Zemūdens transportlīdzekļa kinemātiskā modeļa aprakstīšanai tiks izmantotas ortogonālas koordinātu sistēmas – globālas koordinātes  $(O, X, Y, Z)$  un lokālas koordinātes  $(p, x, y, z)$ , kā redzams 6.20. attēlā.



6.20. att. Zemūdens transportlīdzekļa koordinātu sistēmas.

Transportlīdzekļa kinemātika tiek izskaidrota ar sešiem stāvokļa mainīgajiem un četriem ieejas mainīgajiem. Kinemātiskajām sakarībām, kas apraksta divu koordinātu sistēmu transformācijas, var būt vairākas parametrizācijas. Šeit tiek izmantota Eilera leņķu parametrizācija. [83] Eilera leņķu attēlojumā inerciālās un lokālās koordinātu sistēmas orientācija tiek izteikta ar trīs rotāciju sekvenci – velšanās  $\Phi$ , slīpums  $\theta$  un novirze no kursa  $\psi$ , attiecīgi ap  $x$ ,  $y$  un  $z$  asīm.

Pieņemsim  $q=[p \ \eta]^T$  par sešu vispārinātu koordinātu vektoru, kas nepieciešamas transportlīdzekļa kinemātikas specificēšanai. Šīs sešas koordinātes ir Dekarta koordinātu vektors  $p=[x,y,z]^T$  transportlīdzeklim lokālajā sistēmā un orientācijas koordinātu vektors  $\eta=[\Phi,\theta,\psi]^T$ . Orientācijas vektors ir Eilera leņķu vektors, kas dod ķermeņa sistēmas orientāciju attiecībā pret inerciālo sistēmu. Transformācija no lokālās koordinātu sistēmas uz globālo koordinātu sistēmu panākama ar *rotācijas matricas*  $R \in S(O3)$  transformāciju palīdzību, kur  $S(O3)$  ir cietā ķermeņa rotāciju grupa. Matrica  $R$  ir ortogonāla matrica, kas apmierina sakarību  $RR^T=I$ , tas ir,  $R^T=R^{-1}$  un  $\det(R)=1$ .  $R$  matrica tiek dota kā  $R=[n \ s \ a]$ :

$$R = [r_{11} \ r_{12} \ r_{13} \ r_{21} \ r_{22} \ r_{23} \ r_{31} \ r_{32} \ r_{33}] = [n \ s \ a], \quad (6.34.)$$

kur matricas locekļi:

$$\begin{aligned}
r_{11} &= \cos\theta \cos\psi \\
r_{12} &= \sin\theta \sin\Phi \cos\psi - \cos\Phi \sin\psi \\
r_{13} &= \sin\theta \cos\Phi \cos\psi \\
r_{21} &= \cos\theta \sin\psi \\
r_{22} &= \sin\theta \sin\Phi \sin\psi + \cos\Phi \cos\psi \\
r_{23} &= \sin\theta \cos\Phi \sin\psi - \sin\Phi \cos\psi \\
r_{31} &= -\sin\theta \\
r_{32} &= \sin\Phi \cos\theta \\
r_{33} &= \cos\Phi \cos\theta
\end{aligned} \tag{6.35.}$$

Pieņemsi  $v=[v_x \ 0 \ 0]^T$  par transportlīdzekļa lineāro ātrumu, t.i., transportlīdzeklī piešķirts lineārs ātrums tikai gar  $x$  asi. Tāpat pieņemsim  $\omega=[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  par leņķiskā ātruma komponentēm ap asīm  $x, y, z$  attiecīgā ķermeņa sistēmā. Ātruma vektors ap trīs koordinātu asīm un Eilera leņķu laika atvasinājums iegūstams no sekojošām sakarībām:

$$\dot{p} = Rv = [n \ s \ a]v \tag{6.36.}$$

$$\dot{R} = RS(\omega), \tag{6.37.}$$

kur  $S(\omega)$  ir sašķiebtā matrica:

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \tag{6.38.}$$

Augstāk esošie vienādojumi dod sekojošu atrisinājumu:

$$\dot{p} = J_1(\eta)v, \eta = J_2(\eta)\omega, \tag{6.39.}$$

kur:

$$J_1(\eta) = [\cos\theta \cos\psi \ \cos\theta \sin\psi \ -\sin\theta]^T \tag{6.40.}$$

$$J_2(\eta) = [1 \ \sin\Phi \tan\theta \ \cos\Phi \tan\theta \ 0 \ \cos\Phi \ -\sin\Phi \ 0 \ \sin\Phi \sec\theta \ \cos\Phi \sec\theta] \tag{6.41.}$$

Augstāk esošos vienādojumus iespējams pārrakstīt sekojoši:

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= r_{11}v = \cos\psi \cos\theta v \\
\dot{y}(t) &= r_{21}v = \sin\psi \cos\theta v \\
\dot{z}(t) &= r_{31}v = -\sin\theta v \\
\dot{\Phi}(t) &= \omega_x + \sin\Phi \tan\theta \omega_y + \cos\Phi \tan\theta \omega_z \\
\dot{\theta}(t) &= \cos\Phi \omega_y - \sin\Phi \omega_z \\
\dot{\psi}(t) &= \sin\Phi \sec\theta \omega_y + \cos\Phi \sec\theta \omega_z
\end{aligned} \tag{6.42.}$$

Sakarības (6.42.) pārrakstāmas sekojošā matricas formā:

$$\begin{aligned}
& [\dot{x}(t) \dot{y}(t) \dot{z}(t) \dot{\Phi}(t) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) ] \\
& = [\cos\psi \cos\theta \sin\psi \cos\theta - \\
& \sin\sin\theta \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \Phi \tan\theta \cos\cos\Phi \\
& \sin\sin\Phi \sec\sec\theta \ 0 \ 0 \ 0 \ \cos\cos\Phi \tan\theta \Phi \cos\cos\Phi \\
& \sec\sec\theta \ ] [v \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z \ ]
\end{aligned} \tag{6.43.}$$

Matrica pārrakstāma arī vispārinātā vektoru formā:

$$\begin{aligned}
& [\dot{x}(t) \dot{y}(t) \dot{z}(t) \dot{\Phi}(t) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) ] \\
& = [\cos\psi \cos\theta \sin\psi \cos\theta - \\
& \sin\sin\theta \ 0 \ 0 \ 0 \ ]v + [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ ]\omega_x \\
& + [0 \ 0 \ 0 \ \sin\sin\Phi \tan\theta \cos\cos\Phi \sin\sin\Phi \\
& \sec\sec\theta \ ]\omega_y \\
& + [0 \ 0 \ 0 \ \cos\cos\Phi \tan\theta \Phi \cos\cos\Phi \sec\sec\theta \ ]\omega_z
\end{aligned} \tag{6.44.}$$

Šeit apskatītā sistēma ir pakļauta diviem neholonomiem ierobežojumiem. Šie ierobežojumi ir uz lineārajiem ātrumiem  $y$  un  $z$  asu virzienos. Ātrumi šajos virzienos ir vienādi ar 0. Šie ierobežojumi ir:

$$\begin{aligned}
s^T \dot{p} &= 0 \\
a^T \dot{p} &= 0,
\end{aligned} \tag{6.45.}$$

kurus var pārrakstīt sekojoši:

$$\begin{aligned}
r_{12}\dot{x} + r_{22}\dot{y} + r_{32}\dot{z} &= 0 \\
r_{13}\dot{x} + r_{23}\dot{y} + r_{33}\dot{z} &= 0
\end{aligned} \tag{6.46.}$$

Augstāk esošie vienādojumi ir aprakstīti no  $A(q)\dot{q} = 0$  formas:

$$A(q) = [r_{12} \ r_{13} \ r_{22} \ r_{23} \ r_{23} \ r_{33} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (6.47.)$$

Izsakot iespējamus ātrumus kā lineāru kombināciju no vektoru laukiem  $g_1(q)$ ,  $g_2(q)$ ,  $g_3(q)$  un  $g_4(q)$ , apvienojot matricas  $A(q)$  nulles zonu, iegūstams sekojošs kinemātisks modelis:

$$\begin{aligned} \dot{q}(t) &= g_1(q)v_1 + g_2(q)v_2 + g_3(q)v_3 + g_4(q)v_4 \\ \dot{q}(t) &= [g_1(q) \ g_2(q) \ g_3(q) \ g_4(q)] [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4] \end{aligned} \quad (6.48.)$$

Šeit  $v_1=v_x$ ;  $v_2=\omega_x$ ;  $v_3=\omega_y$ ;  $v_4=\omega_z$  un

$$\begin{aligned} g_1(q) &= [\cos \cos \theta \ \cos \cos \psi \ \cos \cos \theta \ \sin \sin \psi \ \ -\sin \sin \theta \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ g_2(q) &= [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \\ g_3(q) &= [0 \ 0 \ 0 \ \sin \sin \Phi \ \tan \tan \theta \ \cos \cos \Phi \ \sin \sin \Phi \ \sec \sec \theta]^T \\ g_4(q) &= [0 \ 0 \ 0 \ \cos \cos \Phi \ \tan \tan \theta \ \Phi \ \cos \cos \Phi \ \sec \sec \theta]^T \end{aligned} \quad (6.49.)$$

Sakarību (6.48.) vispārinātā forma:

$$\dot{q} = G(q)v \quad (6.50.)$$

Augstāk uzskaitītie vienādojumi ir sistēmas kinemātiskajam modelim. Sistēma ir nelineāra un nav sekojoša patvaļīgai trajektorijai vektoriālajā telpā, kas nozīmē to, ka sistēmas ieejas faktoru skaits ir mazāks par tās stāvokļu skaitu. Vispārinātais ātruma vektors  $\dot{q}$  nevar pieņemt nekādas neatkarīgas vērtības. Pieļaujami vispārināti ātrumi, kā dots sakarībā (6.34.), ir ietverti ierobežojumu matricas  $A(q)$  nulles zonā. [1]

### 6.3.3. Atsauces trajektorijas ģenerēšana

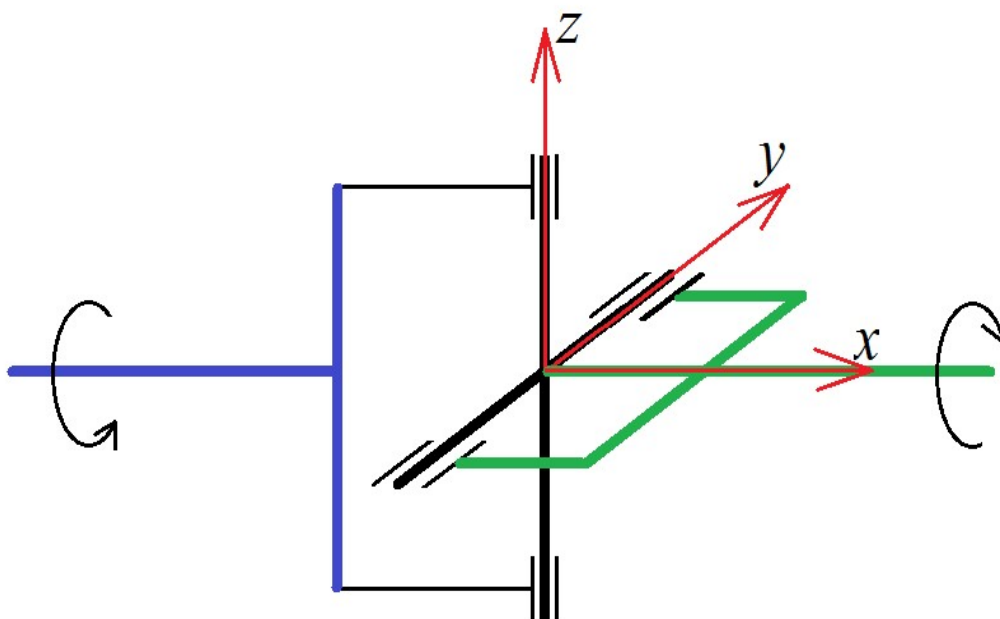
Augstāk aprakstītais vadības algoritms var tikt klasificēts kā vadība no punkta uz punktu vai sekošana kustīgam mērķim. Augstāka līmeņa vadības sistēmas iekļauj arī trajektorijas plānošanu [1], piemēram šķēršļu apiešanu un mērķa kustības prognozēšanu. Šā līmeņa vadības algoritmi šajā darbā netiks aplūkoti.

### 6.3.4. Durbja vadāmās konstrukcijas shēma

Lai panāktu Durbja vadāmību, Durbis tika izveidots pēc vadāmības principa, kas ir līdzīgs dzinēja pagriešanas principam, tikai Durbja gadījumā tiek pagriezti vītņotie korpusi, precīzāk tikai priekšējais, ar kura palīdzību mainās priekšgala piedziņas spēka virziens, līdz ar to tas ļauj šim transportlīdzeklim mainīt virzienu. Te gan jāatzīmē, ka algoritms paredz pagriezienu

dzinēju korekciju, lai panāktu priekšgala kustību vajadzīgajā virzienā. Bet virziena dzinēji rada iekšējus momentus, tāpēc pakaļējais gals griezīsies pretējā virzienā. Abu daļu pagriezieni nebūs vienādi, jo ūdens pretestība uz tiem ir dažāda.

Šis princips tiek panākts ar lokāma vidus korpusa palīdzību, kurā locīšanas procesu visos nepieciešamajos virzienos veic kardāna tipa konstrukcija. Šai konstrukcijai pielīdzināma krustiņa tipa koordinātu sistēma, kur locīšanas šarnīri ir ap  $y$  un  $z$  asīm, kā redzams 6.21. attēlā. Ja piedziņas vītņkorpusem tiek pielikti griezes momenti  $\vec{T}$ , tad uz priekšējo daļu darbojas moments  $Q_y y - Q_z z$ .



6.21. att. Krustiņa koordinātu sistēma.

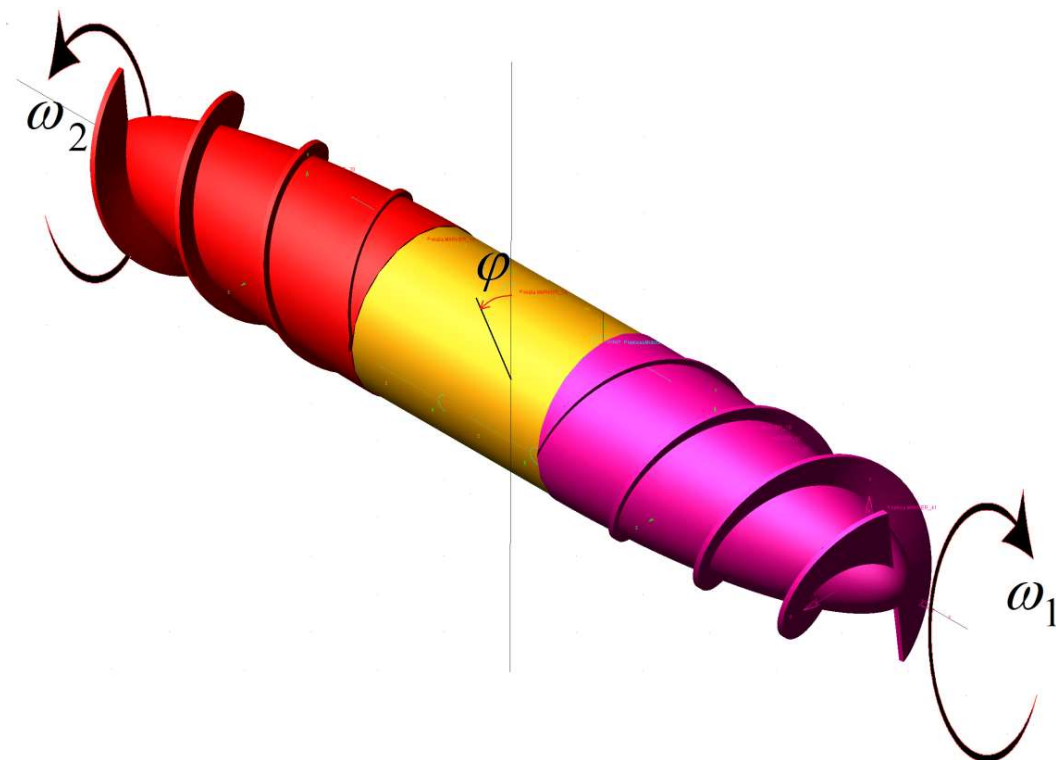
Pieņemot  $\vec{a}$  par mērķa koordinātes vektoru projekcijās krustiņa koordinātu sistēmā un  $\vec{v}$  ir Durbja priekšgala ātrums (6.19. attēls) krustiņa koordinātu sistēmā, tad priekšgalam būtu jāpieliek iepriekš apskatīts momenta vektors (6.33.). Bet pielikt var tikai vektoru  $Q_y y - Q_z z$ . Tas nozīmē, ka ir nepieciešams atrast tādas  $Q_y y$  un  $Q_z z$ , lai radītais moments pēc iespējas mazāk atšķirtos no  $\vec{T}$ . Būtībā tas ir atrisināms vienkārši pieliekot  $T_y$  projekciju šarnīrā uz  $y$  ass un  $T_z$  projekciju šarnīrā uz  $z$  ass.

### 6.3.5. Vidus korpusa stabilizācija

Saistībā ar Durbja unikālo dizainu, tā vidusdaļa var brīvi pagriezties ap transportlīdzekļa garenvirziena asi. Ņemot vērā mūsdienu datorsistēmu spēju ātri apstrādāt datus, tas sevišķi netraucē Durbja kā autonoma transportlīdzekļa pārvietošanās procesā. Bet to ir iespējams arī novērst, pievienojot vertikālā virziena sensoru – žiro-akselerometru, ko nodrošina MEMS tehnoloģija. Ja šī vidusdaļas rotācija tiktu novērsta, cilvēka operatoram būtu daudz ērtāk to vadīt, jo vairs nebūtu situācijas, kad operatoram ātri jānoreagē un jāpagūst invertēt virzienu vadības signālus, lai ieturētu plānoto kursu. Citiem vārdiem sakot, augša vienmēr būtu augšā

un apakša vienmēr apakšā. MEMS žiro-akselerometrs savienojumā ar *ArduinoUNO* mikrokontrollera plati izveido references punktu, kas sakrīt ar vidusdaļas krustiņa jeb Durbja kardāna tipa mehānisma koordinātu sistēmu. Šī sistēma elektroniski nosaka modeļa centra asu virzienu, to nobīdi no fiziskās sistēmas koordinātu asīm, kas apzīmēta ar  $\Delta\varphi$ . Šo vērtību ir paredzēts kompensēt ar viena (vai abu) rotējošā vītņkorpusa ģenerētā rotācijas spēka palīdzību. Zemāk attēlā 6.22. tiek attēlota minētā koordinātu asu nobīde  $\Delta\varphi$  uz transportlīdzekļa ģeometrijas. Šī ideja ir aizgūta no apgrieztā svārsta stabilizācijas problēmas [84], ko apraksta vienādojums:

$$f(t) = k_1x(t) + k_2x'(t) + k_3(\theta(t) - \frac{\pi}{2}) + k_4\theta'(t) \quad (6.51.)$$



6.22. att. Vertikālās koordinātu ass leņķiskās nobīdes principiāls attēlojums.

Tā kā mūsu modelis var pagriezties ap y un z asīm nezaudējot vidusdaļas vertikālo orientāciju, kompensācija ir nepieciešama tikai rotācijai ap modeļa garenvirziena x asi, jeb nobīdei no z ass, kā norādīts attēlā 6.23. Pateicoties šim nosacījumam, mūsu problēma kļūst par 1-dimensionālu, kā sekojošajā vienādojumā:

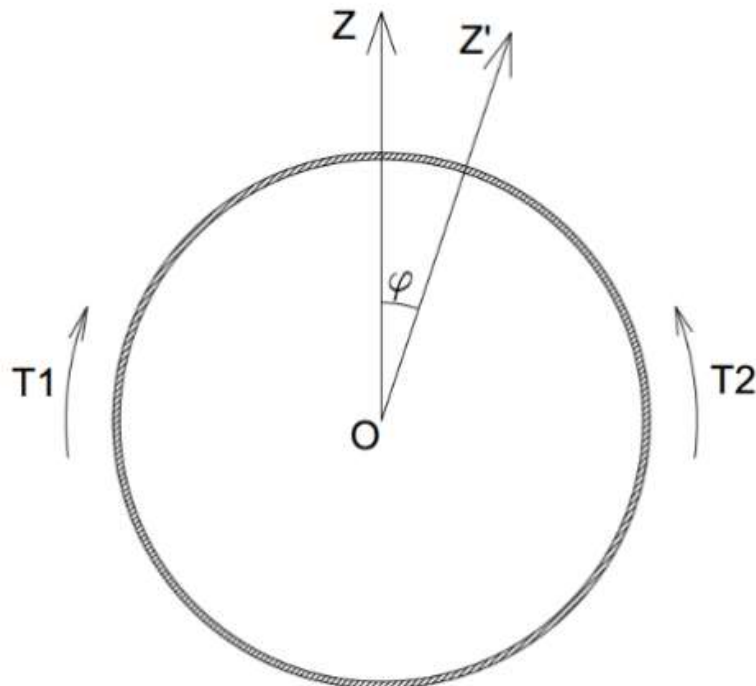
$$f(t) = k_1\varphi(t) + k_2\varphi'(t) \quad (6.52.)$$

Rezultāts, ko vēlamies panākt, ir pārvietošanās laikā saglabāt noteiktu nemainīgu transportlīdzekļa ātrumu. Stabilizācija būtu panākama manipulējot ar vītņoto korpusu rotācijas ātrumu projekcijām  $\Delta\omega_i$  uz kardāna tipa mehānisma koordinātu sistēmas garenvirziena ass, kam vienādojums sekojošs:



$$\begin{cases} \Delta\omega_1 = k_1\varphi + k_2 \frac{d\varphi}{dt} \\ \Delta\omega_2 = -k_1\varphi - k_2 \frac{d\varphi}{dt} \end{cases} \quad (6.53.)$$

Un vītņoto korpusu rotācijas ātruma manipulācija būtu panākama, aprīkojot šo korpusu iegriezošos dzinējus ar proporcionāli integrālā diferenciālā regulatora (PID) vadību, kas pielāgotu šo dzinēju rotācijas ātrumu starpību starp priekšējo un aizmugurējo korpusu.



6.23. att. Vidusdaļas stabilizācijas shematiskais attēlojums, z-y šķērs griezumus.

### 6.3.6. Vadības algoritma varianti

Ņemot vērā to, ka Durbis tālākās attīstības versijās iespējams kā AZT, tam būtu apsvērti divi vadības algoritma varianti.

Viens variants būtu realizēt konkrētu dzinēja griezes momentu, iegūstot vadību pēc ātruma, kas ļautu pielāgoties peldēšanai vidēs ar mainīgu vai konstantu straumes ātrumu. Ar šo vadības algoritmu zemūdens modelis spētu pielāgoties un pretoties vides dinamiskajai ietekmei, sasniedzot savu mērķi.

Otrs apsvērtais vadības algoritms būtu motora pagriezienu leņķa realizācija, kas būtu panākams ar soļa dzinēja piedāvātajām funkcijām. Laika momentā modeļa lokālajās koordinātēs tiktu realizēts dzinēja pagrieziens, kas pielāgotu transportlīdzekļa kustības kursu uz globālajās koordinātēs lokalizētu mērķi.

## 6.4. Vadības algoritms pēc virziena

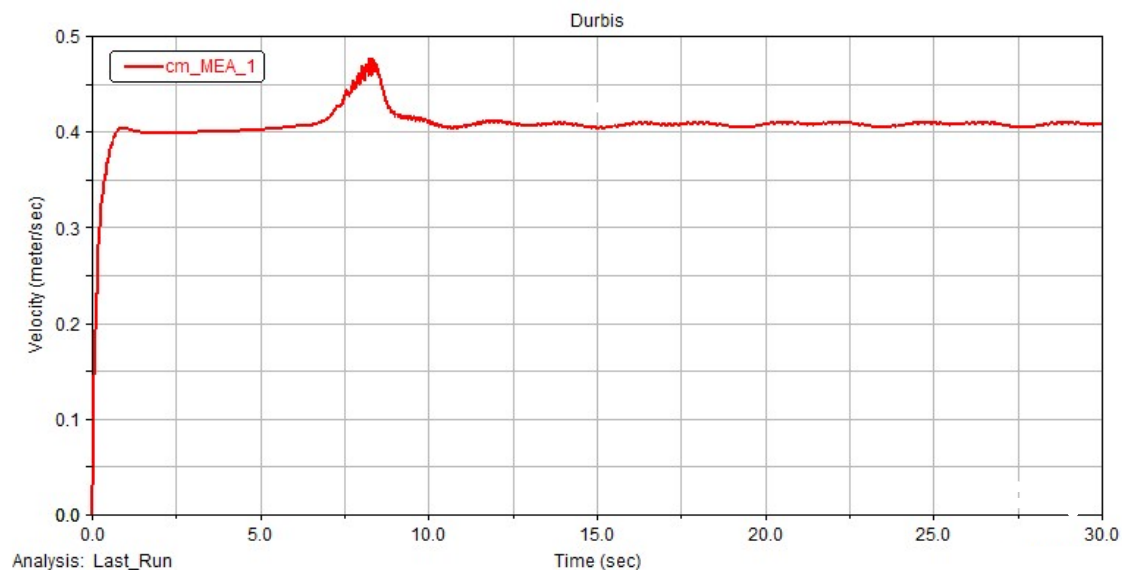
Tika uzmodelēts un apskatīts algoritms, kur matemātiskais modelis 30 sekundes peld telpā, savu virzienu regulējot ar vadības dzinēja palīdzību. Attēlā 6.24. redzams transportlīdzekļa un mērķa novietojums  $xy$  globālajā koordinātu plaknē. Mērķa kustība uzdota tā pat, kā iepriekš norādīts nodaļā 5.6., pie attēla 5.22.



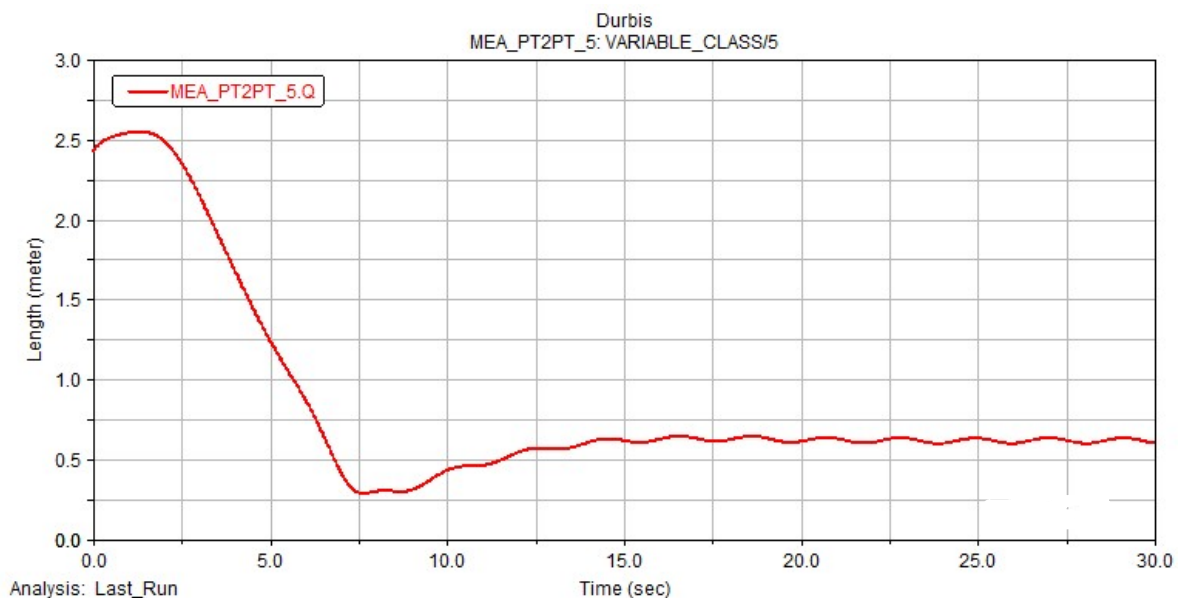
6.24. att. Objektu novietojums  $xy$  koordinātu plaknē.

Uzsākot kustību, transportlīdzeklis mierīgi ieņem virzienu uz mērķi un pāris sekunžu laikā tam pietuvojas, ieturot distanci, bet precīzi tam sekojot. Attēlā 6.25. apskatāms transportlīdzekļa ātruma grafiks.

Pēc ātruma grafika redzams, ka kustības sākumā transportlīdzeklis ātri un bez triecieniem ieņem noteiktu ātrumu. Pēc 7 sekundēm tam palielinās ātrums, paralēli pietuvojoties mērķim, kas redzams 6.26. attēla grafikā. To varētu izraisīt mērķa pēkšņā kustības izmaiņa, pēc kuras transportlīdzeklis ir paguvis pietuvojoties mērķim. Pēc šīs nestabilitātes transportlīdzeklis ieņem būtiski nemainīgu ātrumu, kā rezultātā tas mazliet attālinās no mērķa, bet turpmāk ietur stabilu distanci.



6.25. att. Transportlīdzekļa ātruma grafiks (vadība pēc virziena).



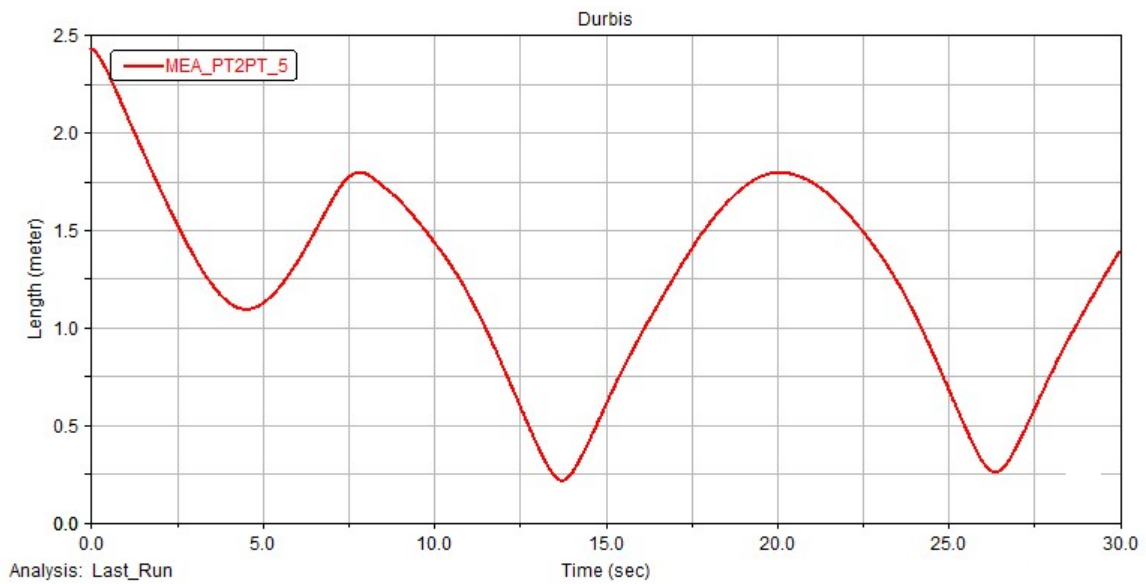
6.26. att. Transportlīdzekļa priekšas attālums līdz mērķim.

## 6.5. Vadības algoritms pēc ātruma

Vadības algoritmu salīdzināšanai tika izveidots arī algoritms pēc ātruma vadības. Objektu sākuma stāvoklis ir tāds pats, kā redzams 6.24. attēlā, to sākuma distance nav mainīta. Pirmais novērojums lika pievērst uzmanību tam, ka transportlīdzekļa ātruma grafiks šim algoritmam sakrīt ar vadības pēc virziena transportlīdzekļa ātrumu, kas redzams 6.25. attēla grafikā. Tas identiski uzsāk kustību, veic nestabilu ātruma izmaiņu, kas vēlāk nostabilizējas.

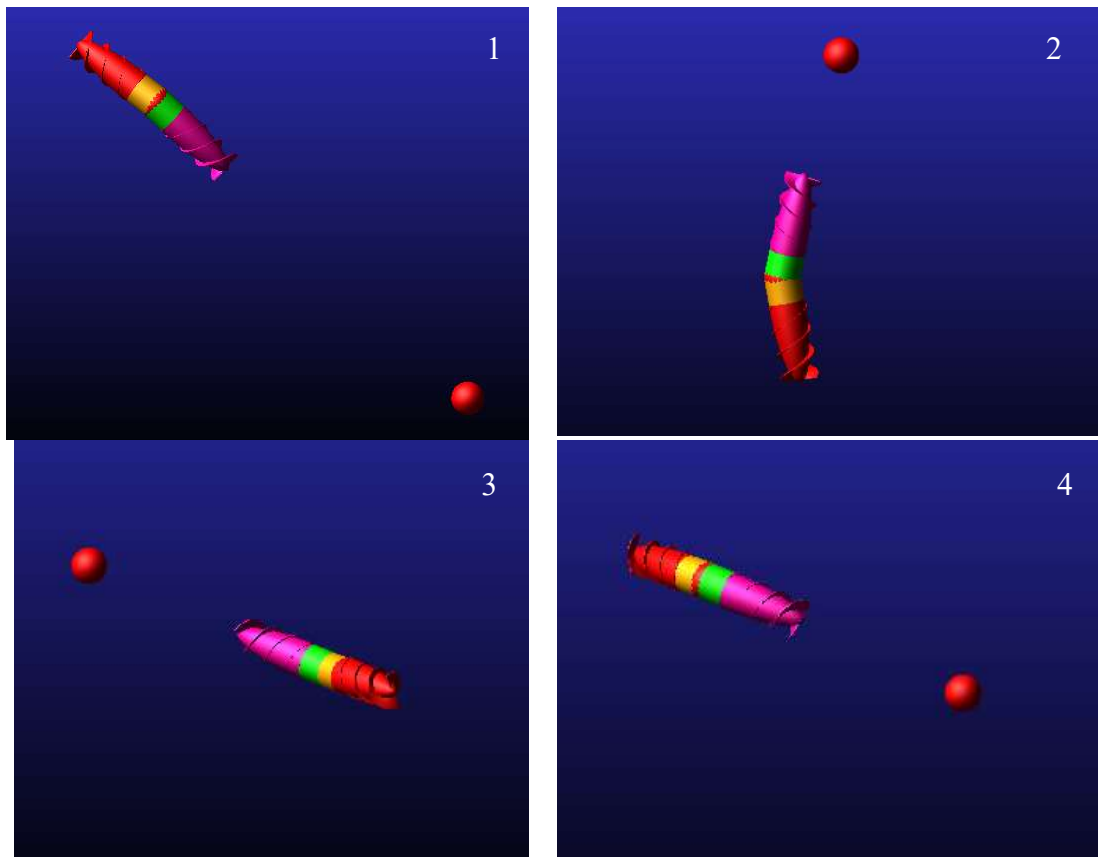
Savukārt transportlīdzekļa priekšas attāluma līdz mērķim grafiks gan būtiski atšķiras. Attēlā 6.27. redzams, ka transportlīdzeklis ar šo vadību nespēj ieturēt stabilu distanci, tā ir laikā svārstīga. Tas ir skaidrojams ar to, ka mērķa objekts svārstās telpā, bet ātruma vektors tik strauji nemaina savu virzienu, kā rezultātā modeļa priekšgals neieņem tuvāko stāvokli uz

mērķi. Neskatoties uz to, transportlīdzekļa vidējais attālums līdz mērķim nemainās. Tas ietur noteiktu attāluma izmaiņas amplitūdu un neatpaliek no mērķa



6.27. att. Transportlīdzekļa ātruma grafiks (vadība pēc ātruma).

Sekojošā 6.28. attēlā redzams, kā transportlīdzeklis laika momentos seko mērķim.



6.28. att. Transportlīdzekļa sekošana mērķim laika momentos: 1) 5s; 2) 10s; 3) 20s; 4) 26.5s.

## 6.6. Secinājumi

Zemūdens transportlīdzeklim, kam piemīt sešas brīvības pakāpes, kustības vienādojumi sastāv no trim galvenajiem elementiem: transportlīdzekļa kinemātikas, transportlīdzekļa cieto ķermeņu dinamikas un transportlīdzekļa mehānikas. Saistošos spēkus var aprakstīt ar Eilera-Ņūtona vienādojumu. Ņemot vērā, ka vides parametri sevišķi nemainās, tad faktori, kas visvairāk ietekmē transportlīdzekļa dinamiku, ir tā ģeometrija un aprīkojums. *MSC Adams* ir plaši pazīstama programmatūra, kas atbalsta datu apmaiņu starp daudzām tirgū pieejamām programmatūrām. Pateicoties šādai iespējai, ir iespējams izveidot komplicētus modeļus un simulācijas. Kā arī veiksmīgai sistēmas darbībai nav nepieciešams manuāli ar roku ievadīt katru kustības vienādojumu. Ir iespējams izveidot modeļus, kuru rezultāti sakrīt ļoti tuvu ar reālo eksperimentu rezultātiem.

Nodaļā apskatīti vairāki vadības veidi, no kuriem katram ir savi plusi un mīnusi, līdz ar to kāds algoritms ir labāk piemērots, nekā cits. Darba mērķim Durbim iespējams pielāgot jebkuru no šiem vadības modeļiem, bet perspektīvākie ir soļa dzinēji, kuri dod vajadzīgo pagrieziena leņķi, nevis griezes momentu.

Abi no modelētajiem vadības algoritmiem ir spējīgi darboties, bet, pēc apskatītajiem datiem redzams, ka vadība pēc virziena, kur praksē tiktu izmantoti soļa dzinēji, ir efektīvāka.

## 7. MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ *EDEM*

### 7.1. Diskrēto elementu metode

Līdz šim, cik ir redzēts dabā un tehnikā, transportlīdzekļi, kas pārvietotos visaptverošā granulētā vidē, nav izplatīti. Varbūt tāpēc, kā šāda vide nav praktiska priekš pārvietošanās, salīdzinājumā ar sauszemes vai pat ūdens transportlīdzekļiem, jo, piemēram, ar cietzemes transporta līdzekli ekvivalentas distances veikšanai pārvietošanās process prasa mazāk enerģijas, nekā pārvietojoties pa irdeni vidi. Savukārt ūdens transportlīdzekļiem pārvietojoties palīgā nāk to inerces spēks, kas ļauj turpināt noteiktu distanci pat tad, ja tiek atslēgtas piedziņas sistēmas. Irdenā vidē šādos apstākļos apkārtējā pretestība ir pārāk liela, līdz ar to visa kinētiskā enerģija tiek ļoti ātri absorbēta, savukārt citā situācijā pretestība ir par mazu, lai piedziņas elements, kā, piemēram, automašīnas riteņi, dotu pienācīgu efektu. Viens no dabā sastopamajiem piemēriem, kas pārvietojas pa šādu granulētu vidi, ir Floridas smilšu scinks (*Plestiodon reynoldsi*) (attēls 7.1.), kas ir scinku dzimtas ķirzaka un ar viļņveida dīdīšanos spēj iegrimt zem smiltīm. Beramai videi pie noteiktiem apstākļiem piemīt gan cietas, gan šķidrās vides īpašības. Sakarības starp tām tiek apskatītas pētījumā, kur ar robotu kustību palīdzību cenšas izprast balansu starp cietvielu tipa un šķidrums tipa granulētās vides īpašībām. [85] Vienkāršiem vārdiem sakot beramai videi piemīt fluīda īpašības, kad tās daļiņas atrodas kustībā, savukārt cietvielas īpašības – kad tās atrodas statiskā stāvoklī.



7.1. att. Momentuzņēmums ar Floridas smilšu scinku (*Plestiodon reynoldsi*) iznirstot no smilšu gultnes. Attēls aizgūts: *Alessandro Catenazzi*.

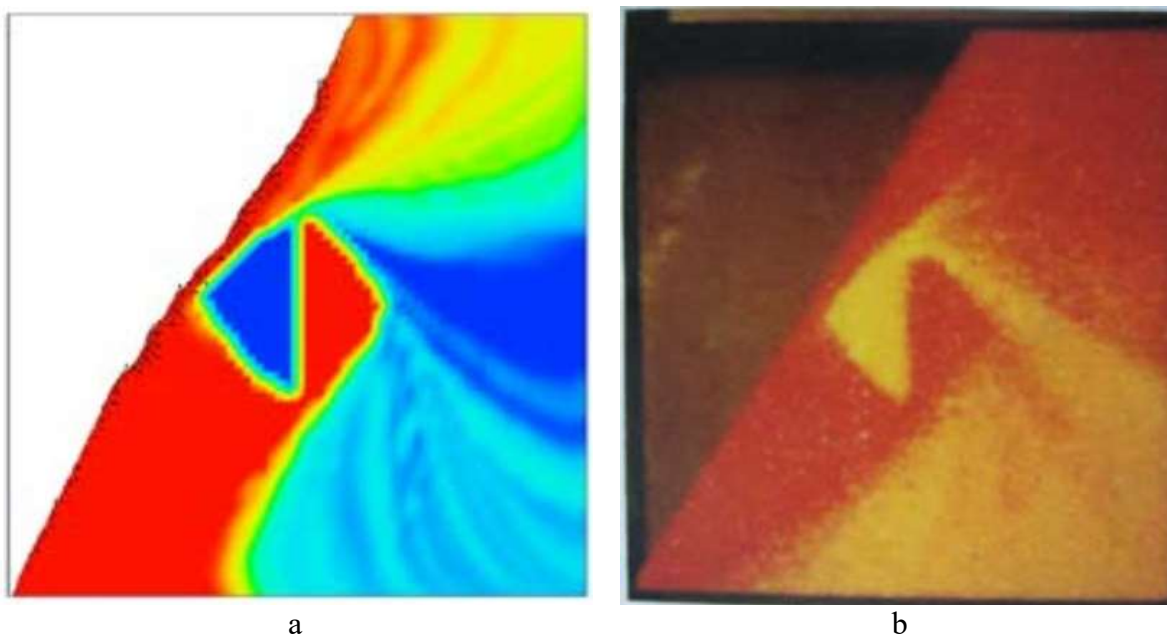
Tā kā tradicionālie piedziņas veidi sevi nespēj pierādīt ar pārvietošanos irdenās vidēs, tad Durbis tiek piedāvāts kā svaigi izstrādāts un patentēts piedziņas veids, kas sākotnēji paredzēts kā zemūdens piedziņa, bet praksē uzrādījis arī amfībijas īpašības. Tāpēc tika veikti eksperimenti, kuros tika pētīta šī piedziņas veida spēja mijiedarboties ar beramu materiālu vidi. Šim piedziņas principam piešķirts dēvējums dubult-helikoidāls (DH).

Šādu DH piedziņas principu var pielietot autonomiem robotiem, kurus var laist izpētīt cilvēkam grūti vai pat neiespējami sasniedzamās vietās, kā, piemēram, lielā okeāna dziļumā ļoti šaurās alās, vai arī milzīgos graudu konteineros un tvertnēs, lai ievāktu nepieciešamos datus. Aprīkojot ar nepieciešamo aprīkojumu, kā temperatūras un mitruma sensoru, tas ar bezvadu signālu varētu sniegt nepieciešamo informāciju reālajā laikā.

### 7.1.1. Granulāras vides modelēšana

Beramas vielas dabā pārsvarā ir statiskā stāvoklī, taču šo miera stāvokli, tāpat, kā fluīdiem, ir diezgan viegli izjaukt. Kamēr beramās vielas ir miera stāvoklī, tām piemīt cietas vielas īpašības, bet, kad beramā viela sāk plūst, tai var piedēvēt fluīda īpašības. Taču būtiskākais, kas atšķir fluīdu no granulētas vielas, pat mikro izmēros, ir tas, ka granulēta viela sastāv no atsevišķām, savā starpā nesaistītām daļiņām. Vienkāršākais piemērs šim apgalvojumam izsakāms ar šajās vidēs iemērktu objektu – fluīds iemērktu objektu pilnībā ieskaus, nokļājot pilnīgi visu kontaktvirsmu, uz ko iedarbojas vienmērīgi izkliedēti fluīda spēki. Savukārt uz objektu, kas ir iegremdēts beramā vielā, iedarbosies katra atsevišķā daļiņa, kas ar šo objektu ir kontaktā, koncentrējot spiedienu uz virsmas kontakta punktā.

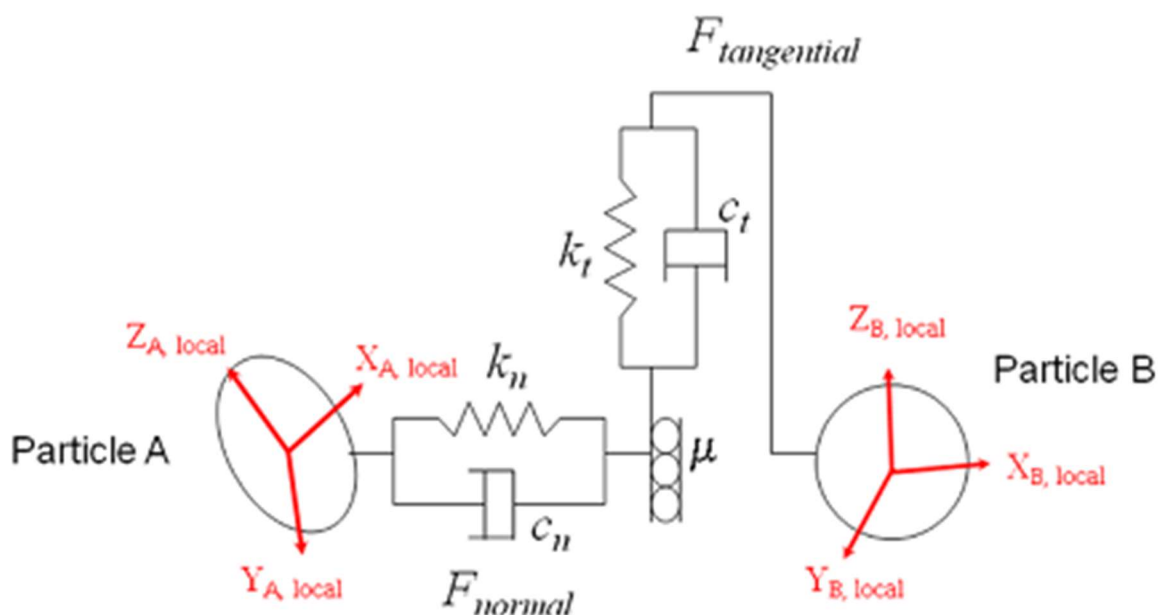
Vairumā situāciju berama viela nav spējīga absolūti noklāt objekta virsmu, jo starp daļiņām vienmēr būs kāda neaizpildītā telpa. Te gan jāpiebilst, ka smalkāka sastāva beramām vielām, kā smiltīm vai pulveriem, modeļos tiek pielietots nepārtrauktības princips, kur viela ir kā fluīds, kas sastāv no daļiņas un gāzes vai fluīda kombinācijas. [86] Tādā veidā beramā viela tiek apskatīta kā viena vesela, kā fluīds, nevis kā daudzu atsevišķu daļiņu kopums. Šāda mikstūra ir divu fāžu plūsma, kurā gaiss un cietviela plūst katrs ar savu ātrumu, bet savā starpā ir saistīti caur impulsu apmaiņu, kas rezultējas no spiediena un viskozajiem spriegumiem. Pie augstām cietvielu daļiņu koncentrācijām pastāv spēcīga saite starp daļiņu un gaisu, tāpēc maisījums var tikt aproksimēti modelēts kā viens vesels, kompozīta fluīds. [87] Lai arī šim nepārtrauktības modelim ir savi ierobežojumi, tas uzrāda rezultātus ar reālistiskām iezīmēm, kā piemēram, apskatāms attēlā 7.2. Tāpat šis modelis arī atdarina daudzas granulētas plūsmas raksturīgās īpašības, kas nav novērojamas tīros šķidrumos. Piemēram, vietās, kur plūsma ir pilnībā neaktīva var izveidoties sagrupētu daļiņu apgabali, vai arī realizējas tikai gar brīvo virsmu, kuru slīpums pārsniedz miera stāvokļa robežleņķi. [86]



7.2. att. Rotējošs taisnstūrveida mikseris: a – simulācijas rezultāti pēc 1.25 apgriezieniem; b – eksperimentālie rezultāti pēc 1.25 apgriezieniem. [86]

Citos modeļos netiek pielietots šāds nepārtrauktības princips. Tajos beramā viela sastāv no atsevišķām daļiņām, kuras spēj mijiedarboties viena ar otru. Modelējot vidi ar šādām vielām, tiek pielietoti kontaktu modeļi, kā, piemēram, Herca-Mindlina kontaktu modelis, kura vienkāršota shēma attēlota 7.3. attēlā [88]. Šis ir bezslīdes kontaktu modelis, ko pielieto kontaktu modelēšanai starp daļiņām. Tas ir atsperes-amortizatora varianta nelineārs kontaktu modelis, kas balstīts uz Herca-Mindlina kontaktu teoriju. Spēka normālā komponente ir balstīta uz Herca kontaktu teorijas [89], un tangenciālie spēki balstīti uz Mindlina-Deresēviča darbu [90][91]. Abiem spēkiem gan normālam, gan tangenciālam ir slāpēšanas komponentes, kur slāpēšanas koeficients ir saistīts ar restitūcijas koeficientu [92]. Tangenciālais berzes spēks balstās uz Kulona berzes likuma modeli, kā piemēram [93]. Savukārt rites berze tiek izpildīta kā no kontakta neatkarīgs virzienā konstants griezes momenta modelis, kā piemēram, avotā [94].



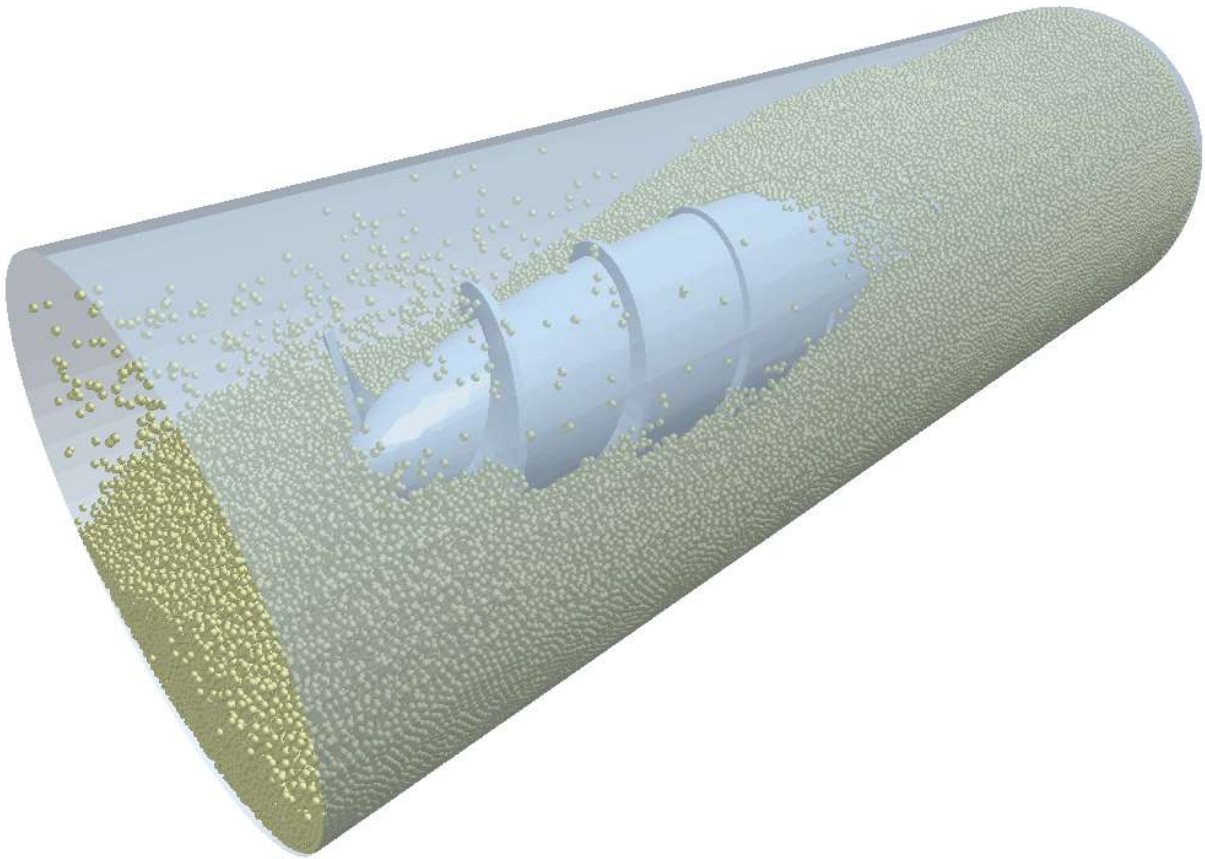


7.3. att. Vienkāršota Herca-Mindlina kontaktu modeļa shēma:  $k$  – daļiņu stinguma koef.,  $c$  – slāpēšanas koef.,  $\mu$  - berzes koef. [88]

Tiek pielietota arī neelastīgi cieto sferu (IHS – *inelastic hard sphere*) molekulārā dinamika ar izkliedējošu bināru mijiedarbību. Šeit mijiedarbību starp daļiņām pārvalda divi galvenie koncepti: brīvais tilpums starp daļiņām un izkliede. Šādos modeļos ir problēma, ka nepārtraukti starp daļiņām kontaktu brīžos var iestāties galīga laika singularitātes stāvoklis – neelastīgā sadursme. Tā ir idealizēta matemātiskā modeļa pataloģija [95]. Neelastīgā sadursme izpaužas kā bezgalīgs skaits sadursmju galīgā laika posmā. Viens no veidiem, kā no tā var izvairīties, ir pielietot tā saukto kontakta laika, jeb TC (*Time of Contact*) modeli [96]: ja pēc pēdējās sadursmes daļiņa ļoti īsā laika brīdī nonāk jaunā sadursmē, šī sadursme tiek uzskatīta par elastīgu sadursmi.

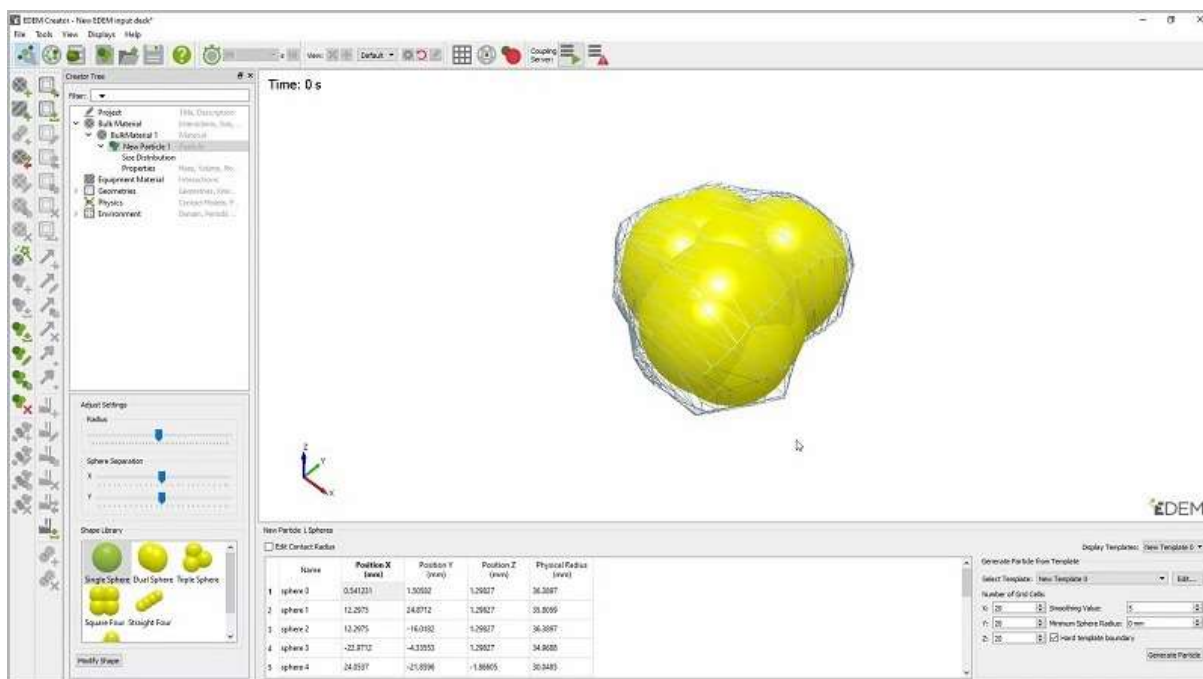
## 7.2. Matemātiskā modeļa izveide programmā *EDEM*

Pēc veiksmīgiem eksperimentiem ar Durbi ūdens vidē un konstatējot tam piemītošās amfībija īpašības, tika veikti tālāki eksperimenti, lai novērtētu tā spējas beramā vidē. Simulācijām ar Durbi granulārā vidē tika izmantota diskreto elementu modelēšanas programmatūra *EDEM*. Arī šī programmatūra ļauj importēt citā CAD sistēmā iepriekš sagatavotu ģeometriju. Simulāciju mēģinājumos modelis tika veidots pēc analogiska paņēmiena, kāds tika izmantots šķidrās vides modeļos. Esošās Durbja vītnes fiksēti novietotas cilindriskā aprēķinu domēnā, piešķirot tām vienīgi vienu brīvības pakāpi - spēju rotēt ap centrālo asi, un Durbis no priekšgala tiek “appludināts” ar beramu vielu. Beramā viela ieplūst horizontālā virzienā, ar piešķirtu plūsmas ātrumu  $v=0.6$  m/s. Darbojas arī gravitācija, plūsmai perpendikulārā virzienā. Abām, priekšējai un aizmugurējai vītnei ir piešķirts sākotnējs leņķiskais ātrums. Cilindra diametrs, kurā atrodas Durbis, ir 1.4 reizes lielāks par vītnes diametru, kas sakrīt ar rekomendācijām modeļos ar fluīdu [71]. Durbja ģeometrija ievietota aprēķina domēnā, ar ieskaujošajām daļiņām, apskatāma attēlā 7.4.



7.4. att. Durbis simulācijas fāzē, kurā aprēķinu domēns piepildās ar diskrētajām daļiņām.

Simulācijas modeļa vienkāršībai ir izvēlētas vienkāršas sfēriskas daļiņas, aptuveni kviešu grauda izmērā. Zemāk, attēlā 7.5., ir apskatāma *EDEM* programmatūras lietotāja saskarnes sadaļa, kurā tiek definēti daļiņu parametri. Simulācijā, kā minēts iepriekš, izmantotas sfēriskas daļiņas, taču attēlā priekšstatam ir attēlota daļiņa ar citu konfigurāciju. Ir iespējams arī importēt ģeometriju, kas ir izveidota citā CAD programmatūrā. Daļiņām piešķirtas attiecīgās īpašības: Puasona koeficients  $\nu=0.25$ , cietvielas blīvums  $\rho=600 \text{ kg/m}^3$  un bīdes modulis  $G=4e+06 \text{ Pa}$ . Atjaunošanās koeficienta un statiskās berzes koeficienta vērtības tiek saglabātas saskaņā ar *EDEM* materiālu modeļu datubāzes noklusētajām vērtībām, respektīvi, 0.55 un 0.2. Fizikas sadaļā, lai saglabātu simulācijas vienkāršību, bet tajā pašā laikā iegūtu pietiekami akurātus rezultātus, abos, gan daļiņa-daļiņa, gan daļiņa-ģeometrija mijiedarbības gadījumos tika izmantots Herca-Mindlina (bez slīdes) kontaktu modelis.



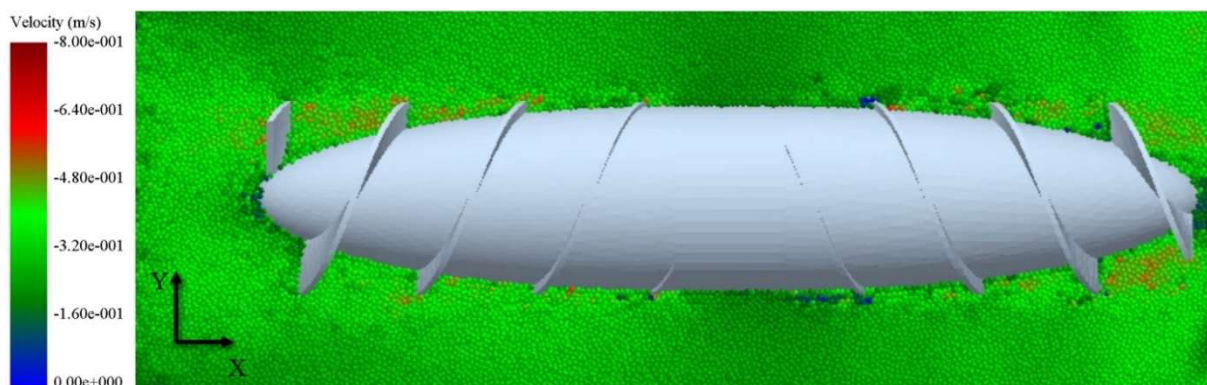
7.5. att. EDEM programmatūras lietotāja saskarne, daļiņas konfigurēšana.

Jāņem vērā, ka šajā simulācijas fāzē, kurā cilindrs tiek piepildīts ar diskrētajām daļiņām, Durbja korpusiem nav piešķirts rotācijas ātrums – lai lieki nenoslogotu sistēmas resursus. EDEM jebkurā simulācijas laikā ir pieejama pauzēšanas funkcija, ļaujot simulāciju apstādināt, izmainīt kādu parametru un turpināt no apturētās vietas.

Eksperimenta mērķis bija noskaidrot, vai Durbis var iegūt kādu dzinēj spēku beramā vidē un ir spējīgs tajā pārvietoties. Pēc rezultātiem, kas iegūti eksperimentos fluīda vidē, ir redzams, ka priekšējās un aizmugurējās vītnes leņķiskie ātrumi bija atšķirīgi, respektīvi,  $\omega_1=39$  rad/s un  $\omega_2=34.5$  rad/s, pie fluīda plūsmas ātruma  $v=0.6$  m/s. Tāpēc sākotnējais daļiņu plūsmas ātrums tika iestatīts tāds pats. Un korpusa daļu leņķisko ātrumu atšķirība ir novērojama pateicoties plūsmas stāvokļa maiņai gar Durbja korpusa daļām. Savukārt šeit, beramā vidē, šāda plūsmas stāvokļa maiņa nav paredzēta. Šī iemesla dēļ gan priekšējam, gan aizmugurējam korpusam leņķiskais ātrums ir iestatīts vienāds.

Daļiņu plūsmai tika iestatīts mainīgs plūsmas ātrums. Pateicoties šim mainīgajam plūsmas ātrumam, tika noteikts mirklis, kura laikā vītņu starptelpā plūstošo daļiņu ātrums bija aptuveni vienāds ar apkārtējās vides daļiņu ātrumu. Zemāk attēls 7.6. attēlo šo laika momentu. Plūsma notiek  $x$  ass pozitīvajā virzienā. Šajā momentā konstatētais plūsmas ātrums ir 0.4 m/s, pie iestatītajiem vītņu korpusu rotācijas ātrumiem  $\omega=35$  rad/s.

Šeit parādās iezīme, kas tika novērota arī simulācijās fluīda vidē. Durbja aizmugurē ir zona, šajā situācijā, ar daļiņām, kas stāv gandrīz uz vietas. Simulācijās ar fluīdu šajā zonā plūsmas ātrums samazinājās tuvu pie nulles, izveidojot virpuļus turbulentas plūsmas iespaidā. Šī ir viena no iezīmēm, kas apstiprina beramai vielai piemītošās fluīda tipa plūsmas īpašības, jeb citiem vārdiem sakot – līdzība fluīdam. Attēlā ir arī novērojams ātruma samazinājums daļiņām pie priekšgala – tas norāda uz purngala neefektivitāti šajā vidē. Izveidojot galu smailāku un spicāku, atļautu daļiņām šķērsot šo zonu daudz ātrāk, ar mazāku pretestību.



7.6. att. Durbis diskrēto daļiņu plūsmā, *EDEM* simulācija.

Tā kā Durbim nav paredzēts pārvietoties irdenā vidē ar relatīvi lieliem ātrumiem, stājas spēkā liela objekta īpašības granulārā vidē, kas pārvietojas ar mazu ātrumu [97]: pretestības spēks ir neatkarīgs no ātruma. Tāpēc pretestības spēks šajā situācijā speciāli netika apskatīts.

### 7.3. Secinājumi

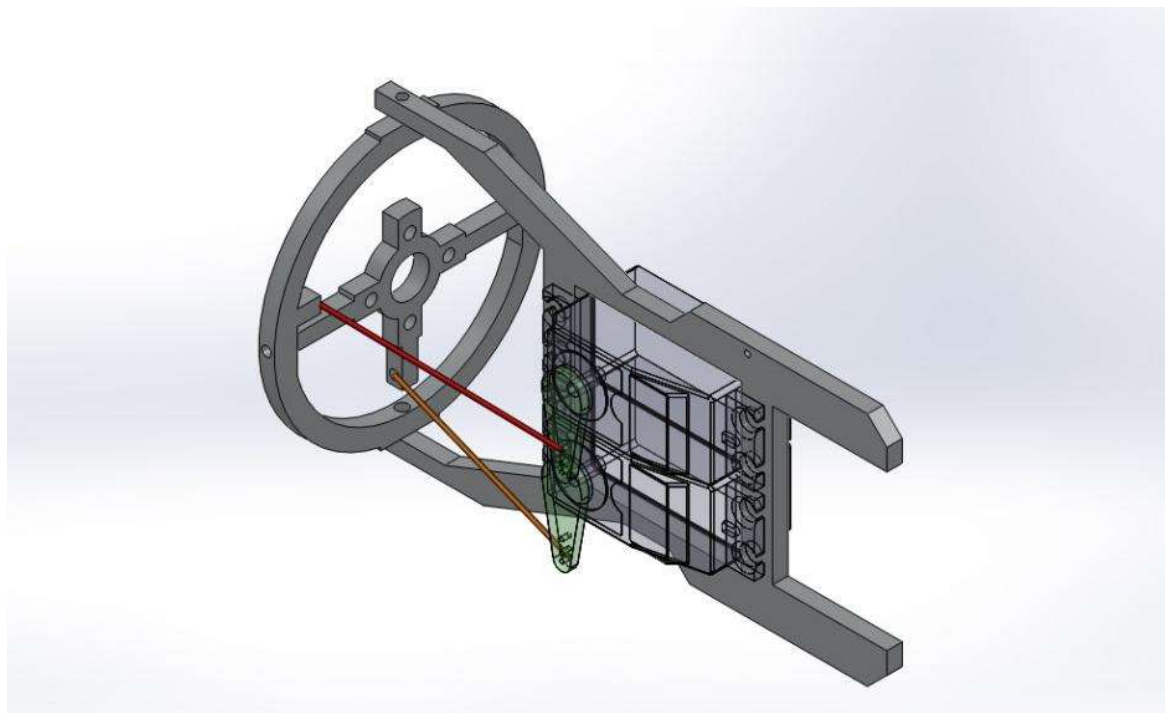
Rezultāti uzrāda, ka šāda veida piedziņas sistēma ir spējīga radīt piedziņas spēku beramā vidē, pat ar esošo vītņu un korpusu konfigurāciju. Noteikti vēl labāki rezultāti būtu iegūstami pēc vītņu un korpusu ģeometrijas optimizācijas.

Eksperimentu laikā apstiprinājās hipotēzes par granulāras vielas cietvielas un fluīda tipa īpašībām. Eksperimentos parādījās pāris iezīmes, kādas bija novērojamas eksperimentos ar Durbi fluīda vidē.

Veicot korpusu optimizāciju un aprīkojot Durbi ar atbilstošiem sensoriem, kā mitruma un termiskajiem sensoriem, tas varētu autonomi pārvietoties, piemēram, pa graudu uzglabāšanas tvertnēm un ievākt nepieciešamos datus.

## 8. MODEĻA PROTOTIPS

Lai pārbaudītu, kā teorija un datorprogrammu simulāciju aprēķini darbojas praksē, tika izveidots Durbja prototips ar vadības funkcijām. Durbja vadība tika realizēta ar elastīgu jeb lokāmu viduskorpusu, kuru iespējams saliekt ar šarnīru sistēmu, kuru izmanto motorizētu lidojošu gaisa pūķu vadīšanai. Šī sistēma būtībā ir balstīta uz kardāna tipa mehānisma stiprinājuma idejas, kur viena daļa ļauj kustību virzienā uz augšu-leju, bet otra – uz sāniem, iestiprinātas viena otrā (skatīt 8.1. attēlu).



8.1. att. Kardāna tipa vadības mehānisms.

Tika apsvērtas arī citas vadības iespējas, kā, piemēram, mazi pjezomateriāla spārniņi vītņu galos, kas, vītnēm rotējot, zibenīgi maina savu virzienu, tādējādi kontrolējot modeļa kustības virzienu, bet izvēlēta vadības sistēma bija tehnoloģiski vispieejamākā un vienkāršākā.

Durbja prototipam ārējais vadības gredzens, kas piestiprināts pie fiksēta rāmja, atbild par virziena mainīšanu uz sāniem, bet vidusdaļa, kas iestiprināta ārējā gredzenā, atbild par vertikālā virziena maiņu. Šīs abas komponentes tiek kontrolētas ar servo motoriem, kuriem tiek dots analogs signāls no tālvadības pults. Tika piemeklēti speciāli zemā profila servo motori, kuri ietaupa vietu vidus korpusā, kas nepieciešama 11.1 V akumulatoram, piedziņas motoru ātruma kontrolierim un 4 kanālu uztvērējam. Mehānisms tika izgatavots no 4mm bieza EN AW-5754 ar lāzera griešanas tehnoloģiju.

Domājot par viduskorpusu, kur norisinās visa vadāmība, vidus lokāmajai daļai noteikti jābūt no gluda, elastīga elastomēra (silikona), lai būtiski nepalielinās plūsmas pretestība un turbulence. Tika apsvērta gofrēta elementa izmantošana šim nolūkam, bet tā ģeometrija palielinātu sistēmas plūsmas pretestību un turbulenci, kas nebūtu labs rādītājs. Elastīgajam pārvalkam/membrānai viduskorpusam vajadzētu būt ne biežam, tā lai brīvi padodas stiepei,

neradot spēcīgus pretestības spēkus, kā arī viegli jāmet krunkām, lai netraucētu kustību amplitūdai un pārējai konstrukcijas darbībai. Silikona apvalks tika izveidots no ātri žūstoša divkomponentu silikona, to uzklājot uz rotējošas virsmas, tā novēršot nevienmērīgus uzklājumus un notecējumus. Šī sistēma apskatāma 8.2. attēlā.



8.2. att. Uzklāts silikons (zilā krāsā) uz rotējošas virsmas.

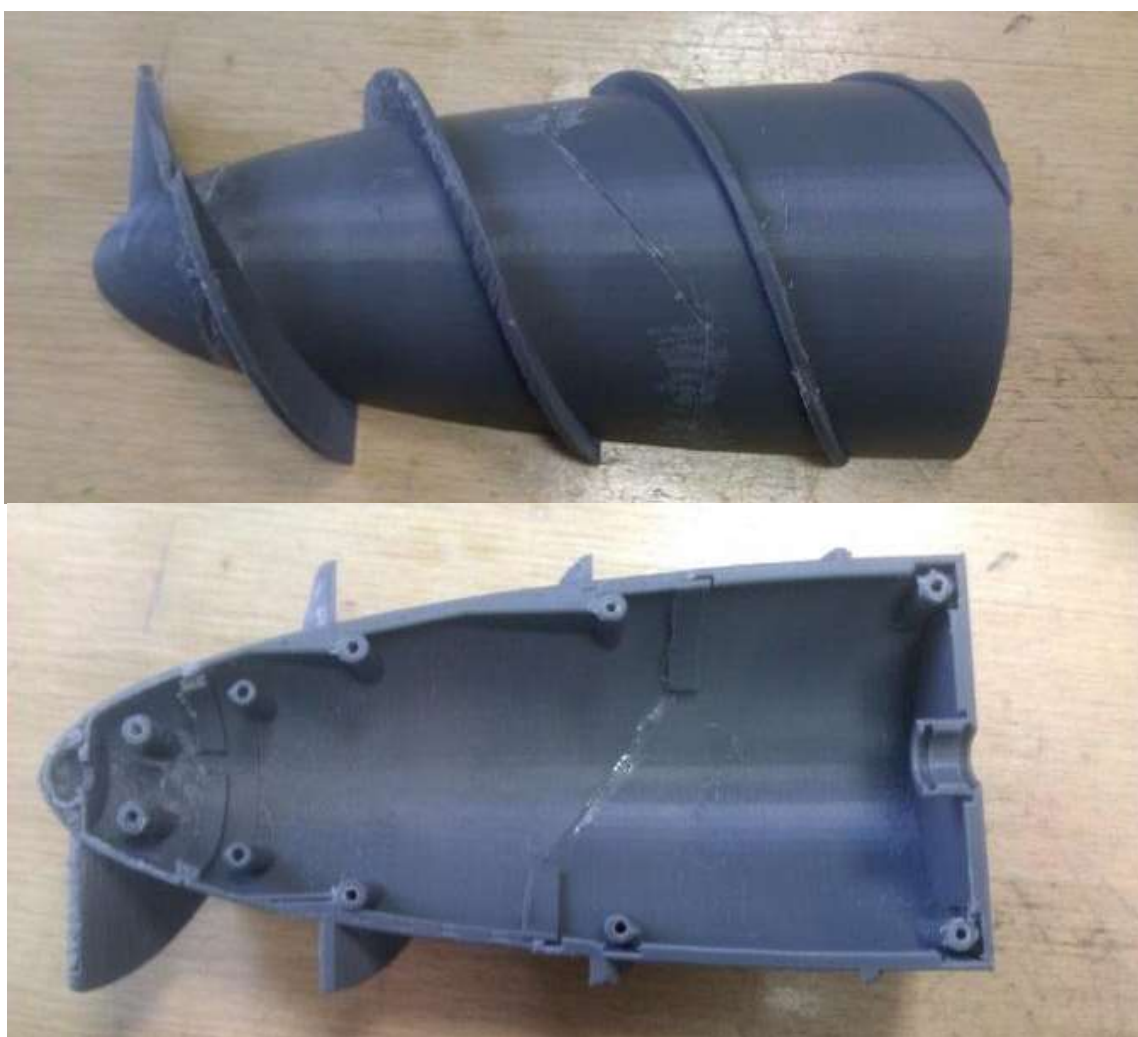
Pārējās modeļa komponentes, tā kā tās nav vienkāršas konstrukcijas, nācās izgatavot ar modernās 3D printera tehnoloģijas palīdzību. Drukāšanas parametri apskatāmi 2. pielikumā. Tā kā tehnoloģijai un konkrētajai iekārtai ir savi ierobežojumi, detaļas nācās sadalīt mazākās komponentēs, lai iegūtu kvalitatīvāku galaproduktu, pēc tam tās salīmējot, kā paredzēts, ar ciānakrilāta superlīmi (skatīt 8.5. attēlu). Vienas vītņkorpusa daļas drukāšanas process apskatāms 8.3. un 8.4. attēlos.



8.3. att. Vītņkorpusa daļas drukāšana.



8.4. att. Vītņkorpusa gatavā daļa.



8.5. att. Salīmētas vītņkorpusa daļas.

Kad visas detaļas prototipam bija izgatavotas, tās tika liktas kopā, padomājot par hermētiskumu viduskorpusam, kur atrodas visa vadība un galvenā elektronika. Vītņkorpusiem, kuros atrodas dzinēji, kas griež šos korpusus, ir paredzēts piepildīties ar ūdeni iegrimis iegūšanai, tāpēc tiem nav paredzēts hermētiskums. Pati dzinēju konstrukcija gan ir nodrošināta darbībai appludinātā telpā. Tālākos attēlos 8.6. un 8.7. apskatāma modeļa konstrukcija montēšanas procesā.



8.6. att. Durbis montēšanas procesā.



8.7. att. Durbis samontētā stāvoklī, bez silikona apvalka.



Kad viss bija pienācīgi samontēts un bija pienācīgi veikti mitrumizolācijas pasākumi, tika veikti pirmie darbības izmēģinājuma testi. Modelis tika ielaists baseinā. Sākumā tests tika veikts neizmantojot papildus masu iegrimis iegūšanai. Kā paredzēts, vītņkorpusi piepildījās ar ūdeni un modelis mazliet iegrima ūdenī, bet ne pilnībā. Ar tam esošo pašmasu un atlikušo gaisa tilpumu konstrukcijā, modelim bija problēmas iegrimt pilnībā, bet tika novērots, ka ar dzinēju palīdzību, ja izmēģinājumos izmantotā ūdenstilpne būtu dziļāka, ieņemt pilnīgu zemūdens stāvokli būtu izdevies, jo modelis, cenšoties ienirt, ar purnu atdūrās pret tilpnes dibenu, nespēdams tikt dziļāk.

Lai izdotos tomēr ieņemt pilnīgu zemūdens stāvokli, tika nolemts prototipam pievienot papildus svaru, skatīt attēlu 8.8. Izmēģinājumā tika izmantots 500 gramu papildus svars. Tagad modeļa kopējais svars modeli iegremdēja mazliet dziļāk par pusi no kopējā diametra, bet šis svars bija pietiekams, lai varētu veikli operēt kā zemūdens stāvoklī, tā arī virs ūdens. Pēc veiktajiem izmēģinājumiem, tika novērots, ka Durbis spēj zemūdens stāvoklī sekundes laikā nopeldēt apmēram sava korpusa kopējo garumu, kas aptuveni ir 60 cm/s. Šis ir ievērojams pārvietošanās ātrums, kā arī ar vītņkorpusu rotācijas ātrumu, kas ir  $\sim 10$  apgr./s, un novērotajām manevrēšanas spējām, redzams, ka transportlīdzeklis darbojas efektīvi. Eksperimentos, kas tika veikti ezerā, Durbis bija spējīgs pat izlekt virs ūdens virsmas, skatīt attēlu 8.9. Lai arī efektivitāte transportlīdzeklim ir, tā vadītspēju ir iespējams uzlabot, kas būtu panākams orientācijas ieturēšanu, lai modeļa apakša vienmēr būtu apakša un augša – vienmēr augša.



8.8. att. Durbis ielaists ūdenī ar papildus masu.



8.9. att. Durbis lēcienā iznirst virs ūdens virsmas.

Papildus tika atklāts, ka Durbis ir spējīgs arī kontrolēti pārvietoties pa sauszemi. Beramās vidēs tas notiek līdzīgi kā ūdens vidē, bet uz cietzemes, kur vītnes nespēj iegūt nepieciešamo saķeri ar virsu, pārvietošanās ir panākama ar stūrēšanas mehānisma palīdzību. Veicot kustību, kas ar priekšgalu veidotu apli, modelis ir spējīgs velties. Velšanās kustība panākama arī ūdenī. Šī papildus pārvietošanās iespēja noder situācijās, kad nepieciešams, piemēram, krastā izrāpot no ūdens, lai būtu iespējams veikt aparāta apkopi, un otrādi. Pateicoties šai spējai pārvietoties ļoti dažādās vidēs, transportlīdzeklim tiek saskatīts ne tikai potenciāls izpildīt uzdevumus uz zemes, bet arī, piemēram, pētniecībā uz citām planētām.

## 8.1. Secinājumi

Darba ietvaros tika veiksmīgi izveidots pilnībā funkcionējošs Durbja prototips, kas praksē parādīja augstu veiktspēju. Tam ir atsaucīga vadība, kas ļauj ar to operēt visā telpā, gan arī efektīva piedziņas konstrukcija, kas palīdz tam veikli pārvietoties šķidrā vidē. Tas ir spējīgs veiksmīgi pārvietoties gan pa fluīdu, gan pa sauszemi, kas paver plašas izmantošanas iespējas. Eksperimenti ar prototipu stāvoša ūdens ūdenstilpnē uzrādīja labus rezultātus, kas lieliski sakrīt ar veiktajiem datoreksperimentiem – dabā aptuveni noteiktais pārvietošanās ātrums ir 0.6 m/s, +/- 5 %, ko var ietekmēt tā brīža durbja vidējā korpusa izliekums.

## SECINĀJUMI

No darba rezultātiem ir izdarāmi sekojoši secinājumi.

1. Piedāvātais transportlīdzekļa piedziņas princips, kas sākotnēji tika izstrādāts pielietošanai zem ūdens, ir līdzīgs dabā mikropasaulē sastopamajam baktērijas *Salmonella typhimurium* kustības principam, bet atšķiras ar to, ka arī rotējošā priekšdaļa rada papildus dzinējspēku. Tehniski piedāvātais princips ir oriģināls un līdz šim zemūdens, kā arī cita veida transportlīdzekļos, nav realizēts.
2. Telpiska mehānisma un fluīda dinamikas modelēšanai izstrādāts metamodelēšanas princips – ar CFD programmatūru veikti modelēšanas eksperimenti, kuru apstrādes rezultātā radīti ūdens pretestības modeļi. Ūdens pretestības modeļi realizēti daudzķermeņu dinamikas modelēšanas programmā *MSC Adams*. Validācija ar naturālo prototipu pilnībā apstiprināja matemātiskā modeļa adekvātumu. Ar prototipu bija iespējams veikt manevrus reālā ūdenstilpnē, ne brīdi nezaudējot tā veiktspēju un spējot saglabāt konstantu ātrumu – apmēram 0.6 m/s, kas sakrīt ar *Flow3D* modelēšanas rezultātiem. Ņemot vērā to, ka naturālajam prototipam ātrums tika noteikts aptuvenus, ar vizuālo metodi, ir pieņemta iespējama 5-10% atšķirība no modelēšanas rezultātiem. Verifikācijā starp *Flow3D* un *MSC Adams* ātruma rezultāti uzrādīja 33% atšķirību – mērķim sekošanas ātrums 0.4 m/s.
3. Izstrādātā kinemātiskā shēma ar lokāmu vidusdaļu un locīšanas dzinēju vadību apstiprināja darbaspējas, simulējot transportlīdzekļa dinamiku plūsmas modelēšanas programmatūrā *Flow3D*, diskrēto elementu modelēšanas programmatūrā *EDEM* un daudzķermeņu dinamikas analīzes programmatūrā *MSC Adams*.
4. Tika izveidots transportlīdzekļa fiziskais prototips, lietojot moderno tehnoloģiju: CAD programmatūru *SolidWorks*, *Flow3D*, *EDEM* un *MSC Adams*. Matemātiskās modelēšanas un fiziskā prototipa izmēģinājumi pilnībā apstiprina piedāvātā piedziņas principa darbību un efektivitāti. Pie relatīvi nelielas motora jaudas un griezes momenta ūdens vidē ir sasniedzams visai liels kustības ātrums – 0.6 m/s. Savukārt beramā vidē – 0.4 m/s.
5. Šis piedziņas princips ir pielietojams autonomajos bezapkalpes transportlīdzekļos, kuri pārvietojas šķidrums vai beramās vidēs. Izveidojot korpusu un vītnes no elastīga materiāla, šāds transportlīdzeklis varētu pārvietoties pa caurulēm. Mikroizmēru mehānisms varētu tādējādi tikt pielietots arī, piemēram, medicīnā, pārvietojoties pa asinsvadiem un veicot medicīniskas manipulācijas. Ja elastīgo vidusdaļas korpusu būtu iespējams izgatavot no mākslīgo muskuļu šūnām, tad varētu iztikt bez esošās vidus korpusa mehānikas, galvenokārt diviem servo motoriem, atvēlot vietu citām svarīgām komponentēm. Savukārt izveidojot korpusu un vītnes no materiāliem, kam ir augsta diluma noturība un maza berzes pretestība pret iežiem, tas varētu urbties zem zemes, veicot nepieciešamās manipulācijas, kā arī veikt glābšanas darbus iežu vai cita veida nogruvumos.

6. Turpmākā darba virzieniem vajadzētu būt izpētei šo transportlīdzekļu vadības jomā, izveidojot, piemēram, pjezoelektriski realizētu vītnes priekšdaļas profila mainīšanu, lai veiktu kustības virziena maiņas manevrus. Dziļi pētījumi ir veicami priekšējās un aizmugures daļas dzenošo vītņu formas optimizācijā, lai sasniegtu maksimālo ātrumu, manevrējamību un energoefektivitāti. Aprīkojot ar piemērotu enerģijas avotu, šādam transportlīdzekļa dizainam ir potenciāls ārpus zemes operāciju veikšanā uz citām planētām.
7. Radīti divi PD tipa algoritmi sekošanai kustīgam mērķim. Matemātiskā modelēšana apstiprināja algoritmu efektivitāti.
8. Vadības jomā vēl ir veicami pētījumi, lai noteiktu piemērotāko vadības principu izstrādātajai piedziņas sistēmai pie dažādiem apstākļiem. Nepieciešams realizēt aprakstīto principu vidus daļas rotācijas stabilizācijai. Taču šis aspekts nav kritisks autonomajiem bezpilota aparātiem, jo modernās datorsistēmas spēj pietiekami ātri pārrēķināt koordinātu sistēmas datus, lai sistēma neapjuktu un spētu ieturēt paredzēto kursu. Situācijās, kad ierīcei nav iespējams tiešā veidā sazināties ar misijas centru caur GPS vai kādu citu tuvumā izvietotu antenu, neskaitot mākslīgā intelekta tehnoloģiju, tiek pielietotas autonomās navigācijas sistēmas, kas zemūdens transportlīdzekļiem pamatā sastāv no akustiskās pozicionēšanas un inerciālās navigācijas sistēmām. Citās vidēs ir pielietojamas metodes kā Monte Karlo lokalizācija un paralēlā lokalizēšana un kartēšana.

## **PIELIKUMI**

# 1. pielikums

*NPS<sup>2</sup> Aries* modeļa dinamiskie parametri

$$\begin{aligned}
 W &= 53.4 \text{ kN} & B &= 53.4 \text{ kN} & L &= 5.3 \text{ m} & I_x &= 13587 \text{ Nms}^2 \\
 I_{xy} &= -13.58 \text{ Nms}^2 & I_{yz} &= -13.58 \text{ Nms}^2 & I_{xz} &= -13.58 \text{ Nms}^2 & I_y &= 13587 \text{ Nms}^2 \\
 I_x &= 2038 \text{ Nms}^2 & x_G &= 0.0 \text{ m} & x_B &= 0.0 \text{ m} & y_G &= 0.0 \text{ m} \\
 y_B &= 0.0 \text{ m} & z_G &= 0.061 \text{ m} & z_B &= 0.0 \text{ m} & g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 \rho &= 1000.0 \text{ kg/m}^3 & m &= 5454.54 \text{ kg} \\
 X_{pp} &= 7.0 \cdot 10^{-3} & X_{qq} &= -1.5 \cdot 10^{-2} & X_{rr} &= 4.0 \cdot 10^{-3} & X_{pr} &= 7.5 \cdot 10^{-4} \\
 X_{u\dot{}} &= -7.6 \cdot 10^{-3} & X_{wq} &= -2.0 \cdot 10^{-1} & X_{vp} &= -3.0 \cdot 10^{-3} & X_{vr} &= 2.0 \cdot 10^{-2} \\
 X_{q\delta s} &= 2.5 \cdot 10^{-2} & X_{q\delta b/2} &= -1.3 \cdot 10^{-3} & X_{r\delta r} &= -1.0 \cdot 10^{-3} & X_{vv} &= 5.3 \cdot 10^{-2} \\
 X_{ww} &= 1.7 \cdot 10^{-1} & X_{v\delta r} &= 1.7 \cdot 10^{-3} & X_{w\delta s} &= 4.6 \cdot 10^{-2} & X_{w\delta b/2} &= 0.5 \cdot 10^{-2} \\
 X_{\delta s\delta s} &= -1.010^{-2} & X_{\delta b\delta b/2} &= -4.0 \cdot 10^{-3} & X_{\delta r\delta r} &= -1.0 \cdot 10^{-2} & X_{q\delta sn} &= 2.0 \cdot 10^{-3} \\
 X_{w\delta sn} &= 3.5 \cdot 10^{-3} & X_{\delta s\delta sn} &= -1.6 \cdot 10^{-3} \\
 Y_{p\dot{}} &= 1.2 \cdot 10^{-4} & Y_{r\dot{}} &= 1.2 \cdot 10^{-3} & Y_{pq} &= 4.0 \cdot 10^{-3} & Y_{qr} &= -6.5 \cdot 10^{-3} \\
 Y_{v\dot{}} &= -5.5 \cdot 10^{-2} & Y_p &= 3.0 \cdot 10^{-3} & Y_r &= 3.0 \cdot 10^{-2} & Y_{vq} &= 2.4 \cdot 10^{-2} \\
 Y_{wp} &= 2.3 \cdot 10^{-1} & Y_{wr} &= -1.9 \cdot 10^{-2} & Y_v &= -1.0 \cdot 10^{-1} & Y_{vw} &= 6.8 \cdot 10^{-2} \\
 Y_{\delta r} &= 2.7 \cdot 10^{-2} \\
 Z_{q\dot{}} &= -6.8 \cdot 10^{-3} & Z_{pp} &= 1.3 \cdot 10^{-4} & Z_{pr} &= 6.7 \cdot 10^{-3} & Z_{rr} &= -7.4 \cdot 10^{-3} \\
 Z_{w\dot{}} &= -2.4 \cdot 10^{-1} & Z_q &= -1.4 \cdot 10^{-1} & Z_{vp} &= -4.8 \cdot 10^{-2} & Z_{vr} &= 4.5 \cdot 10^{-2} \\
 Z_w &= -3.0 \cdot 10^{-1} & Z_{vv} &= -6.8 \cdot 10^{-2} & Z_{\delta s} &= -7.3 \cdot 10^{-2} & Z_{\delta b/2} &= -1.3 \cdot 10^{-2} \\
 Z_{qn} &= -2.9 \cdot 10^{-3} & Z_{wn} &= -5.1 \cdot 10^{-3} & Z_{\delta sn} &= -1.0 \cdot 10^{-2} \\
 K_{p\dot{}} &= -1.0 \cdot 10^{-3} & K_{r\dot{}} &= -3.4 \cdot 10^{-5} & K_{pq} &= -6.9 \cdot 10^{-5} & K_{qr} &= 1.7 \cdot 10^{-2} \\
 K_{v\dot{}} &= 1.3 \cdot 10^{-4} & K_p &= -1.1 \cdot 10^{-2} & K_r &= -8.4 \cdot 10^{-4} & K_{vq} &= -5.1 \cdot 10^{-3} \\
 K_{wp} &= -1.3 \cdot 10^{-4} & K_{wr} &= 1.4 \cdot 10^{-2} & K_v &= 3.1 \cdot 10^{-3} & K_{vw} &= -1.9 \cdot 10^{-1} \\
 K_{\delta b/2} &= 0.0 & K_{pn} &= -5.7 \cdot 10^{-4} & K_{prop} &= 0.0 \\
 M_{q\dot{}} &= -1.7 \cdot 10^{-2} & M_{pp} &= 5.3 \cdot 10^{-5} & M_{pr} &= 5.0 \cdot 10^{-3} & M_{rr} &= 2.9 \cdot 10^{-3} \\
 M_{w\dot{}} &= -6.8 \cdot 10^{-2} & M_{uq} &= -6.8 \cdot 10^{-2} & M_{vp} &= 1.2 \cdot 10^{-3} & M_{vr} &= 1.7 \cdot 10^{-2} \\
 M_{uw} &= 1.0 \cdot 10^{-1} & M_{vv} &= -2.6 \cdot 10^{-2} & M_{\delta s} &= -4.1 \cdot 10^{-2} & M_{\delta b/2} &= 3.5 \cdot 10^{-3} \\
 M_{qn} &= -1.6 \cdot 10^{-3} & M_{wn} &= -2.9 \cdot 10^{-3} & M_{\delta sn} &= -5.2 \cdot 10^{-3} \\
 N_{p\dot{}} &= -3.4 \cdot 10^{-5} & N_{r\dot{}} &= -3.4 \cdot 10^{-3} & N_{pq} &= -2.1 \cdot 10^{-2} & N_{qr} &= 2.7 \cdot 10^{-3} \\
 N_{v\dot{}} &= 1.2 \cdot 10^{-3} & N_p &= -8.4 \cdot 10^{-4} & N_r &= -1.6 \cdot 10^{-2} & N_{vq} &= -1.0 \cdot 10^{-2} \\
 N_{wp} &= -1.7 \cdot 10^{-2} & N_{wr} &= 7.4 \cdot 10^{-3} & N_v &= -7.4 \cdot 10^{-3} & N_{vw} &= -2.7 \cdot 10^{-2} \\
 N_{\delta r} &= -1.3 \cdot 10^{-2} & N_{prop} &= 0.0
 \end{aligned}$$

## 2. pielikums

### *Mass Portal* delta tipa 3D printera printēšanas parametri

- *Mass Portal* Delta tipa 3D printeris
- printēšanas materiāls - PLA
- printēšanas parametri:
  - pamatnes temperatūra: 60 C
  - printēšanas temperatūra: 210 C; no sākuma bija iestatīta 220 C temperatūra, bet materiāls izkusa pārāk mīksts un tecēja, veidojos pilienus pie galvas, kas nonāca arī uz drukājamās detaļas;
  - slāņa biezums: 0.3mm
  - čaulas/sieniņas biezums: 2mm
  - printēšanas ātrums: 30mm/s, programmā 100% (pieminēts, jo programmā maināms ātrums ar procentiem)
  - papildus balsti (*support type*): visur (*everywhere*)
  - pārkares leņķis, pie kuriem izmantot balsts (*overhang angle for support*): 60deg
  - balsta struktūra: režģis
  - balsta pildījums: 15%
  - šķiedra (PLA) (*filament*): d=1.75mm, 100%

Sīkāka info: <http://massportal.com/>

## LITERATŪRA

1. Wadoo S., Kachroo P., *Autonomous underwater vehicles: modeling, control, design, and simulation*. - Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
2. KEMPCO INC. *Amphibious land reclamation vehicle*. Peter Kovacs, Mihaly Kovacs, Endro Kovacs (inventors). US Cl. US5509370A. Publ. 1996-04-23.
3. Shardcore, “e coli (2006)”, <http://www.shardcore.org/shardpress2019/2006/01/19/e-coli-2006/>, piekļūts 14.09.2021.
4. Kon K., “Treponema pallidum, spirochetes bacteria that cause syphilis, 3D illustration”, <https://www.shutterstock.com/image-illustration/treponema-pallidum-spirochetes-bacteria-that-cause-783390835>, piekļūts 14.09.2021.
5. Macnab R.M. Flagella and motility. In *Escherichia coli and Salmonella: Cellular and Molecular Biology*. F. C. Neidhart, et al., eds., 2nd Ed. American Society for Microbiology, Washington, D.C. 1996. 123-145.
6. Hudson A., “Mechanisms of Cell Communication”, <https://slideplayer.com/slide/13300685/80/images/18/Bacterial+chemotaxis+depends+on+a+two-component+signaling+pathway.jpg>, piekļūts 14.09.2021.
7. Erhardt M., Singer H. M., Wee D. H., Keener J. P. and Hughes K.T., An infrequent molecular ruler controls flagellar hook length in *Salmonella enterica*. *The EMBO Journal* 30: 2948–2961., 2011.
8. Weymouth G. D., Triantafyllou M. S. Ultra-fast escape of a deformable jet-propelled body. *Journal of Fluid Mechanics*, 721:367–385, 2013
9. Vincent J.F.V. et al. Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*. 22 August 2006, 3 (9), pp.471–482. doi:10.1098/rsif.2006.0127. PMC 1664643. PMID 16849244
10. Budiyo A. Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspectives. *Indian Journal of Marine Science*. 2009, vol. 38. pp.282-295.
11. Korea Institute of Ocean Science & Technology. *Manufacturing Method for Separating Type Combined-Thruster Dynamometer Driving Device*. Kim K., Park Y., Seol H. (inventors). KR patent 1020130027318 (2013.03.14).
12. Toda Y., Rahman Md. M., Hashimoto S., Mino J. Development of the Osaka University Squid-Like Underwater Robot, No: *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'16*, Itālija, Cortona, 17.-19. oktobris, 2016. Cortona: 2016, 283.-296.lpp.
13. Weihs, D., Webb P. W. Optimal avoidance and evasion tactics in predator-prey interactions. *Journal of Theoretical Biology*, 106(2):189-206, 1984.
14. Chung M.H. On burst-and-coast swimming performance in fish-like locomotion. *Bioinspiration & biomimetics*, 4(3):036001, 2009.



15. Triantafyllou M.S., Weymouth G.D., Miao J. Biomimetic survival hydrodynamics and flow sensing. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48(1):null, 2016. doi: 10.1146/annurev-fluid-122414-034329. URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034329>.
16. Taylor G.I. Formation of a vortex ring by giving an impulse to a circular disk and then dissolving it away. *Journal of Applied Physics*, 24(1):104{104, 1953.
17. Wibawa M.S., Steele S.C., Dahl J.M., Rival D. E., Weymouth G. D., Triantafyllou M. S. Global vorticity shedding for a vanishing wing. *Journal of Fluid Mechanics*, 695:112{134, 2012.
18. Steele S.C., Dahl J.M., Weymouth G.D., Triantafy M.S. Shape of retracting foils that model morphing bodies controls shed energy and wake structure. *Journal of Fluid Mechanics*, to appear, 2016.
19. Huffard, C. L. Locomotion by *abdupus aculeatus* (cephalopoda: Octopodidae): walking the line between primary and secondary defenses. *J. Expl. Biol.*, 209:3697{3707, 2006.
20. Weymouth G.D., Biologically Inspired Force Enhancement for Maritime Propulsion and Maneuvering, No: *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'16*, Itālija, Cortona, 17.-19. oktobris, 2016. Cortona: 2016, 401.-414.lpp.
21. "FILOSE research project", <http://www.filose.eu/>, piekļūts 06.03.2021.
22. Venturelli R., Akanyeti O., Visentin F., Ježov J., et.al., Hydrodynamic pressure sensing with an artificial lateral line in steady and unsteady flows. *Bioinspiration & Biomimetics* Volume 7, Number 3, (2012) 036004, doi:10.1088/1748-3182/7/3/036004.
23. International Submarine Engineering Ltd., "Explorer AUV", <https://ise.bc.ca/product/explorer/>, piekļūts 10.03.2021.
24. International Submarine Engineering Ltd., "EXPLORER AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV)", [https://auvac.org/files/uploads/platform\\_pdf/ise%20explorer%202009\\_2.pdf](https://auvac.org/files/uploads/platform_pdf/ise%20explorer%202009_2.pdf), piekļūts 10.03.2021.
25. Liquid Robotics, Inc., "The Wave Glider – How It Works", <https://www.liquid-robotics.com/wave-glider/how-it-works/>, piekļūts 23.03.2021.
26. Carlon R., Masters J. Oceans of Earthquakes, *Hydro International*, 2016, vol. 20, pp. 15-17.
27. Acheson, D. J., *Elementary Fluid Dynamics*, - Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series, Oxford University Press. 1990.
28. Paterson A. R. *A First Course in Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
29. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Fluid Mechanics*. - Pergamon Press, Oxford, 1959.
30. Hinze J. O. *Turbulence, second edition*. - New York: McGraw-Hill Book Company. 1987

31. Faltinsen O. M., *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. - Cambridge: Cambridge University Press. 1990.
32. White, F.M., *Viscous Fluid Flow. (2nd ed.)*. New York: McGraw-Hill. 1974.
33. Walderhaug H. *Ship Hydrodynamics, Basic Course*. Trondheim: Tapir Publishers. 1972.
34. Faltinsen O.M., *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. - Cambridge: Cambridge University Press. 2005. pp. -14.,-15.,-27.
35. Munson B. R., Young D. F., Okiishi T. H. *Fundamentals of fluid mechanics*. - Wiley, Vol.96(4) 1998.
36. Fay J. A., *Introduction to fluid mechanics* -, MIT Press, 1994.
37. Sabersky R. H., Acosta A. J., Hauptmann E. G., *Fluid flow - a first course in fluid mechanics*. - Macmillan, 1971.
38. Streeter V. L., Wylie E. B. *Fluid mechanics*. - McGraw-Hill, 1985.
39. Moody, L. F., Friction factors for pipe flow, *Transactions of the ASME* **66** (8), 1944, 671–684 pp.,
40. Coulson S., Richardson R.K. *Chemical Engineering, Volume 6: Chemical Engineering Design, 4th ed.* Butterworth-Heinemann. p. 473
41. Fautin, D. Importance of nematocysts to actinian taxonomy. In *The Biology of Nematocysts*; Hessinger, D.A., Lenhoff, H.M., Eds.; Academic Press, Inc.: San Diego, CA, USA, 1988; Chapter 25, pp. 487–500.
42. Fautin D.G. Structural diversity, systematics, and evolution of cnidae. *Toxicon*. 2009 Dec 15;54(8):1054-64. doi: 10.1016/j.toxicon.2009.02.024. Epub 2009 Mar 4. PMID: 19268491.
43. Ayalon, A., Shichor, I., Tal, Y., Lotan, T. Immediate topical drug delivery by natural submicron injectors. *Int. J. Pharm.* **2011**, *419*, 147–153.
44. Lotan, T. Leveraging Nematocysts Toward Human Care. In *The Cnidaria, Past, Present and Future: The World of Medusa and Her Sisters*; Goffredo, S., Dubinsky, Z., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2016; pp. 683–690.
45. Östman, C. A guideline to nematocyst nomenclature and classification, and some notes on systemic value of nematocysts. *Sci. Mar.* **2000**, *64*, 31–46.
46. Tardent P. The cnidarian cnidocyte, a hightech cellular weaponry. *BioEssays* **1995**, *17*, 351–362.
47. Nüchter, T., Benoit, M., Engel, U., Özbek, S., Holstein, T.W. Nanosecond-scale kinetics of nematocyst discharge. *Curr. Biol.* **2006**, *16*, R316–R318.
48. Holstein T., Tardent P. An ultrahigh-speed analysis of exocytosis: Nematocyst discharge. *Science* **1984**, *223*, 830–833.
49. Purcell, E.M. Life at low Reynolds number. *Am. J. Phys.* **1977**, *45*, 3–11.
50. Lisicki, M., Rodrigues, M.F.V., Goldstein, R.E., Lauga, E. Swimming eukaryotic microorganisms exhibit a universal speed distribution. *eLife* **2019**, *8*, e44907.

51. Strychalski W., Bryant S., Jadamba B., Kilikian E., Lai X., Shahriyari L., Segal R., Wei N., Miller L.A. Fluid Dynamics of Nematocyst Prey Capture. In *Understanding Complex Biological Systems with Mathematics*; Association for Women in Mathematics; Springer: Cham, Switzerland, 2018; Volume 14, pp. 123–144.
52. Hamlet C., Strychalski W., Miller L. Fluid Dynamics of Ballistic Strategies in Nematocyst Firing. *Fluids* **2020**, *5*, 20. <https://doi.org/10.3390/fluids5010020>
53. Gavelis, G.S. Wakeman, K.C. Tillmann, U. et. al. Microbial arms race: Ballistic “nematocysts” in dinoflagellates represent a new extreme in organelle complexity. *Sci. Adv.* **2017**, *3*.
54. Jones S.A. *Computational Fluid Dynamics Study of the Smallest Flying Insects*. Ph.D. Thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, 2016.
55. Sebastian S.M., Haselmaier L.H., Ladner R.W. AUVs in Hydrography, *Hydro International*, 2016, vol. 20, pp. 9-11.
56. Sathishkumar R., Rajavel R. Studies on autonomous underwater vehicle systems, *Int. J. Of Current Research*, 2014, vol. 6(07), pp. 7453-7457.
57. Giodini S., Binnerts B., Blom K. Can I Communicate With My AUV?, *Hydro International*, 2016, vol. 20, pp. 24-27.
58. Soppet T.J. *Ultra-Short Baseline Acoustic Positioning System*, California Polytechnic (Cal Poly) State University publication, 2011.
59. Munk W.H., Spindel R.C., Baggeroer A., Birdsall T.G. The Heard Island Feasibility Test. *J. Acoustical Society of America*. Vol.96(4), 1994, pp. 2330-2342.
60. Munk, W., Worcester, P., Wunsch, C. *Ocean acoustic tomography*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1995.
61. Payne R., Webb D. Orientation by Means of Long Range Acoustic Signaling in Baleen Whales, in *Annals NY Acad. Sci.*, **188**: 110–41 (1971)
62. Carroll, J., Marcum, D. *Developing a Surrogate-Based Time-Averaged Momentum Source Model from 3D CFD Simulations of Small Scale Propellers*. Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering, London, United Kingdom, July 2013, pp. 1622–1627, (2013).
63. Bertram V. *Practical ship hydrodynamics*. – Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2000., 37.-40.pp
64. Olds Engineering, “Boat propeller and propulsion terminology”, <http://www.olds.com.au/marine/terminology.html>
65. Nautic Expo, “The Online Boating and Maritime Exhibition”, <http://www.nauticexpo.com/prod/van-voorden-gieterij/fishing-boat-propellers-bronze-5-blades-35699-264043.html>
66. Seaton A.E. *The screw propeller: and other competing instruments for marine propulsion*. - London, C. Griffin & company, limited; Philadelphia, J.B. Lippincott company, 1909. 104.-108.pp.
67. Wilson J.D.K., Fuel and Financial Savings of Small Fishing Vessels. –Rome: FAO, 1999. 46 pp.

68. Allenspach-Bootsmotoren GmbH, “Propeller-Technik”, <http://www.allenspach-bootsmotoren.ch/News/Propeller.htm>
69. SHIP HYDRODYNAMICS. LECTURE NOTES OF PROPULSION PART, “Propeller Theories”, [http://traktoria.org/files/personal\\_submarine/propulsion/propeller/lecture\\_notes/](http://traktoria.org/files/personal_submarine/propulsion/propeller/lecture_notes/)
70. Bloomer J.J. *Practical fluid mechanics for engineering applications*. – New York: Marcel Dekker, Ink., 2000. 261.-291.p.
71. Watanabe T., Kawamura T., Takekoshi Y., Maeda M., Rhee S.H. Simulation of steady and unsteady cavitation on a marine propeller using a RANS CFD code. *5th Int. Symp. on Cavitation (CAV2003)*, November 1-4, 2003, Osaka, pp.1-4.
72. Budiyo, A., Kartidjo, M., Sugama, A. Coefficient diagram method for the control of an unmanned underwater vehicle. *Indian Journal of Marine Science*. 2009, vol. 38. 316-323.
73. Yuh, J. Modeling and Control of Underwater Robotic Vehicles, *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*, Vol.20, No. 6, November, December, pp. 1475-1990.
74. Fossen, T.I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Ed. John Wiley & Sons, Baffins Lane, England, 480 p., 1994.
75. Prado M., Costa A., Brand G., Tannuri E.A. A real time ROV simulator for underwater mission training, in *20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado, Brazil, November 15-20, 2009.
76. Blanke, M. *Ship Propulsion Losses Related to Automated Steering and Prime Mover Control*, PhD thesis, The Technical University of Denmark, Lyngby, 1981.
77. Klimavičius V., *Automātiskā vadība*. – RTU, 2002
78. Kokegei M., He F., Sammut K. Fully Coupled 6 Degree-of-Freedom Control of an Over-Actuated Autonomous Underwater Vehicle. No: *Autonomous Underwater vehicles*, In: *Tech*, 2011, pp.147-170.
79. Marco D., Healey A. Command control and navigation experimental results with the NPS Aries AUV, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (4): 466–476., 2001.
80. Healey A., Lienard D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles, *Oceanic Engineering IEEE Journal of* 18(3): 327 –339., 1993.
81. Hai H., Guocheng Z., Hongde Q., Zexing Z., Autonomous underwater vehicle precise motion control for target following with model uncertainty, *SAGE International Journal of Advanced Robotic Systems*. July 2017. doi:10.1177/1729881417719808.
82. Alexander, V. I., Underwater Vehicles, In: *Tech*, 2009, 184.-185.lpp.
83. Sordalen O.J., Dalsmo M., Egeland O. An exponentially convergent law for a nonholonomic underwater vehicle, in *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, May 2–7, 1993, 790–795.
84. Gäfvert M. Modelling the Furuta Pendulum. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH), 1998. (Technical Reports TFRT-7574).

85. Lia, C., Umbanhowar P.B., Komsuoglu H. etc. Sensitive dependence of the motion of a legged robot on granular media. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, March 3, 2009, USA, pp. 3029-3034.
86. Hirt C.W. A Continuum Model for Granular Flow. Flow Science Report 02-13, January 2013, Copyright Flow Science
87. Hirt C.W. Scale Analysis of Two-Fluid Relative Velocity Equation: Evaluation of Drift-Flux Approximation. Flow Science, Inc. Technical Note 77, November 2007, Copyright Flow Science
88. DEM Solutions, EDEM 2.6 Theory Reference Guide, 2014, p. 5.
89. Hertz H. On the contact of elastic solids. *Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik*, Vol. 1882, issue 92, pp. 156-171.
90. Mindlin R.D. Compliance of elastic bodies in contact. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 16, 1949, pp. 259-268.
91. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. *ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 20, 1953, pp. 327-344.
92. Tsuji Y. et al. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology*, Vol. 71(3), 1992, pp. 239-250.
93. Cundall, P.A., Strack, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, 1979, pp. 47-65.
94. Sakaguchi H. et al. Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo. *International Journal of Modern Physics B*, 07(09n10), 1993, pp. 1949-1963.
95. McNamara S., Young W.R. Inelastic collapse in two dimensions. *The American Physical Society*, Vol. 50(1), 1994, pp 28-31.
96. Luding S., McNamara S. How to handle the inelastic collapse of a dissipative hard-sphere gas with the TC model, *Granular Matter*, Vol. 1, 1998, pp. 1-15.
97. Albert, R., Pfeifer, M. A., Barab'asi A. -L., Schiffer, P. Slow drag in granular medium. *Physical Review Letters*, Vol. 82, 2005.