

# Numerički proračuni međudjelovanja fluida i konstrukcije

---

**Bakica, Andro**

*Source / Izvornik:* **Zajednički temelji 2023. - uniSTem : deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, Split, 14.-17. rujna, 2023. : zbornik radova, 2023, 140 - 145**

**Conference paper / Rad u zborniku**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.18>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:676916>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-03**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.18>

## NUMERIČKI PRORAČUNI MEĐUDJELOVANJA FLUIDA I KONSTRUKCIJE

Andro Bakica<sup>1</sup>

(1) Pomorski fakultet, Sveučilište u Splitu, Hrvatska, [abakica@pfst.hr](mailto:abakica@pfst.hr)

### Sažetak

U ovom radu prikazan je ukratko numerički pristup međudjelovanja fluida i konstrukcije. Fundamentalne razlike njihovih matematičkih modela podrazumijevaju razvijanje odvojenog modula interakcije čija je funkcija povezivanje opterećenja uzrokovanog strujanjem fluida i naprezanja u konstrukciji. Ovaj rad naglasak će staviti na dvije osnovne vrste međudjelovanja: kvazi-statičku (jednosmjernu) i dinamičku (dvosmjernu). Kvazi-statički pristup povezuje isključivo polje tlaka tj. opterećenje s modelom konstrukcije, dok dinamički pristup uzima u obzir pomak konstrukcije unutar domene fluida i samu inerciju konstrukcije. Numerički model fluida temelji se na Računalnoj Dinamici Fluida (RDF) i diskretizaciji domene metodom konačnih volumena, a programski paket korišten pri proračunu je *OpenFOAM*, programski kod otvorenog tipa (*eng. open-source*). Za model konstrukcije je korištena dobro poznata Metoda Konačnih Elemenata (MKE) koristeći programski paket NASTRAN. Poveznica između dva modela razvijena je koristeći programski jezik C++.

*Ključne riječi: Međudjelovanje fluida i konstrukcije, OpenFOAM, NASTRAN, MKE, RDF*

## NUMERICAL CALCULATIONS FOR FLUID-STRUCTURE INTERACTION

### Abstract

In this work, a numerical fluid-structure interaction model is briefly presented. Fundamental differences between their mathematical models require the development of a separate interface whose function is to connect the loads applied by the fluid flow and the stresses exhibited by the structure. This paper is focused on two main types of interactions: quasi-static (one-way) and dynamic (two-way). The quasi-static approach links the fluid pressure field, i.e. loading with the structural model, while the dynamic approach includes both the structural motions inside the fluid domain and the structural inertia. The numerical fluid model is based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) with finite volume discretization, and the software used for the study is the open-source framework OpenFOAM. For the structural model, a well-known finite element method is employed using the solver NASTRAN. The interface between the two programs is developed using the programming language C++.

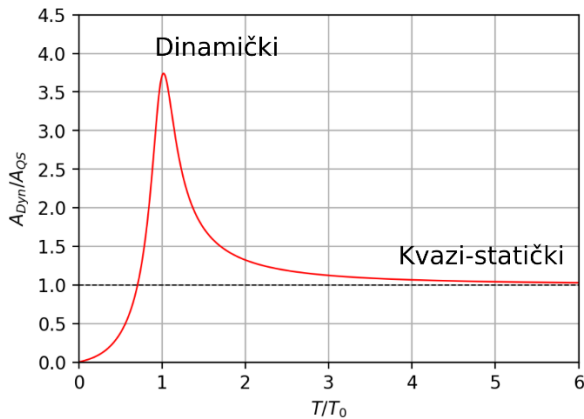
*Keywords: fluid-structure interaction, OpenFOAM, NASTRAN, FEM, CFD*

## 1. Uvod

Razvoj kompjuterskih alata doveo je do sve češćeg korištenja numeričkih metoda pri projektiranju inženjerskih konstrukcija. Zbog kompleksnosti i visoke cijene takvih proračuna njihova primjena u praksi rezervirana je samo za zahtjevne i nestandardne konstrukcije tj. inovativne i nedovoljno istražene objekte. Jedan od naprednih pristupa projektiranju su direktni proračuni međudjelovanja fluida i konstrukcije (*eng. Fluid-Structure Interaction, FSI*) kako bi se dobila realnija procjena opterećenja fluida na konstrukciju, ali i naprezanja uzrokovana tim opterećenjem. Numerički modeli potrebni za FSI proračune se u prvom redu razlikuju po složenosti pojedinačnih modela, kako strukturnog, tako i modela fluida, počevši od analitičkih formula za opterećenje fluida, preko 1D numeričkih modela konstrukcije (npr. greda za strukturni model [1]) do potpunog 3D numeričkog modela i fluida i konstrukcije koji predstavlja najveću razinu točnosti [2]. Nevezano za kompleksnost numeričkih modela fluida i konstrukcije, njihovo međudjelovanje zahtjeva razvijanje trećeg alata koji ima za svrhu povezivanje dva fundamentalno različita matematička modela. U ovom radu bit će okvirno prikazana FSI implementacija koja se temelji na 3D modelima konstrukcije i fluida. Model fluida temeljen je na diskretizaciji konačnih volumena koristeći programski paket OpenFOAM otvorenog koda [3], dok je model konstrukcije diskretiziran metodom konačnih elemenata koristeći NASTRAN. Iako je primjena u radu prikazana na pomorskim objektima, metoda je jednako upotrebljiva na bilo kojim inženjerskim konstrukcijama koje uključuju nezanemarivo opterećenje fluida (npr. mostovi, padobrani, avioni, vjetrenjače itd.).

## 2. Međudjelovanje fluida i konstrukcije

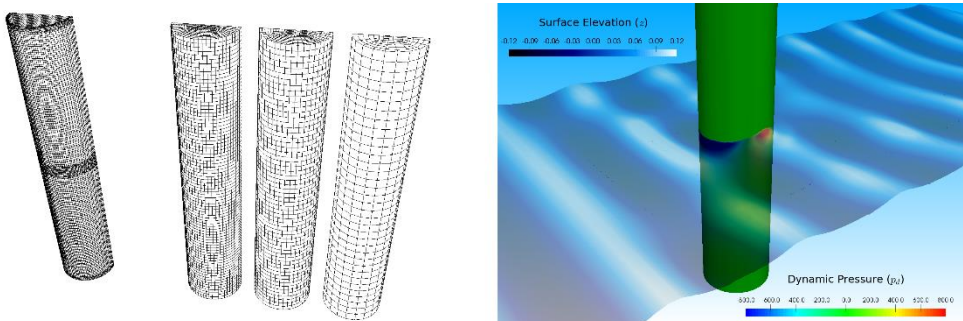
Kada promatramo bilo koji FSI problem, najvažniji čimbenik u definiranju prikladnog FSI pristupa je odnos uzbude uzrokovane opterećenjem fluida i fizikalnih svojstva konstrukcije. Time se prvenstveno misli na odnos perioda uzbude i perioda konstrukcije (prirodni period vibracija). Uobičajeni FSI pristupi koji se koriste nazivaju se: kvazi-statički (jednosmjerni) i dinamički (dvosmjerni). Kvazi-statički pristup odnosi se na interpolaciju polja tlaka s oplakane površine konstrukcije (ploha u doticaju s fluidom) na površinu strukturnog modela. Riječ „kvazi“ u suštini obilježava neovisnost sile opterećenja o pomaku konstrukcije ili, drugačije rečeno, konstrukcija ima stalan oblik u domeni fluida. S druge strane, dinamički ili dvosmjern pristup, često nazivan aeroelastičan u polju avio industrije ili hidroelastičan u pomorskoj industriji, uzima u obzir pomak strukturnih čvorova u procesu simulacije strujanja fluida. Međutim, važno je za naglasiti da nije presudna apsolutna veličina pomaka, već je inercija konstrukcije faktor koji drastično utječe na dinamičko povećanje naprezanja, tj. kada se prirodni periodi vibracija konstrukcije nalaze u području rezonancije s periodom opterećenja. Slika 1. prikazuje odnos perioda opterećenja i prirodnog perioda konstrukcije s označenim područjima prikladnih FSI pristupa. Na slici je vidljivo da je jednak period uzbude i opterećenja kritičan u pogledu povećanja amplitude odziva te jedino za odnose perioda u blizini tog područja postoji svrha provođenja dinamičkog FSI proračuna. U suprotnom je nepotrebno provoditi dinamički proračun jer dovodi do jednakog rješenja kao i jednosmjerni kvazi-statički pristup.



Slika 1. Dinamički odziv na harmonijskom opterećenju

## 2.1. Kvazi-statičko (jednosmjerno) međudjelovanje

Cilj jednosmjernog međudjelovanja se svodi na što točniju interpolaciju tlaka s oplakane površine konstrukcije koja je u dodiru s fluidom na istu oplakanu površinu konstrukcije, ali modeliranu preko metode konačnih elemenata. Interpolacija korištena u ovom radu se temelji na metodi projekcije [4]. Kvaliteta implementirane interpolacije može se vrlo lako izračunati uspoređujući sile na strani fluida i na strani konstrukcije. Na primjeru ukliještenog cilindra primijenjena je interpolacija polja tlaka. Na Slici 2. prikazana je simulacija cilindra na valovima te oplakana površina u domeni fluida te 3 strukturne mreže na koje je opterećenje interpolirano. Prosječna greška prilikom interpolacije iznosi 0.5 %, 0.24 % i 0.22 % redom za grubu, srednju i finu mrežu konstrukcije. Važno je napomenuti da interpolacijska procedura uzima veći broj točaka po elementu kako bi se što točnije izračunale čvorne sile na strukturni model te iz tog razloga zadržava visoku točnost i na gruboj mreži konstrukcije.



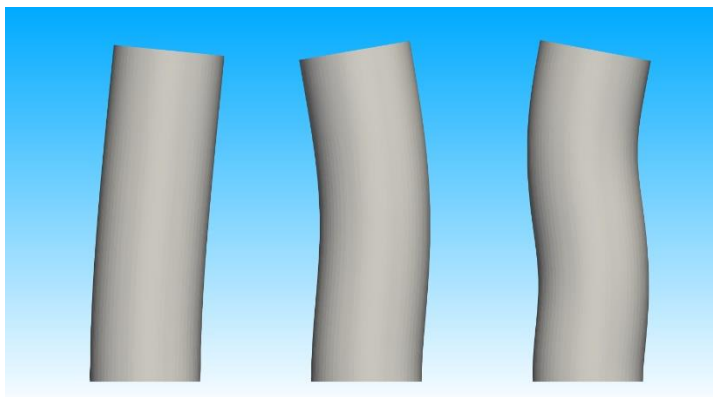
Slika 2. Simulacija cilindra na valovima i oplakane površine modela fluida i konstrukcije [4]

## 2.2. Dinamičko (dvosmjerno) međudjelovanje

Dvosmjerno međudjelovanje uzima u obzir inerciju konstrukcije što je ključno za određivanje dinamičkog uvećanja odziva. Postoje različite metode modeliranja dinamike konstrukcije, a u ovom radu je prikazana implementacija preko prirodnih oblika vibriranja [2]. Svojstvo ortogonalnosti omogućava razmatranje svakog prirodnog oblika vibriranja pojedinačno čime se pri određenom harmonijskom uzбудom može odvojiti dinamički utjecaj kritičnih prirodnih oblika od preostalih visoko frekventnih prirodnih vibracija koje imaju kvazi-statični odziv. Implementacija FSI dinamičkog modela provodi se u nekoliko koraka. Prvi korak je izračunavanje prirodnih oblika vibriranja u strukturnom modelu te njihova interpolacija u domenu fluida. Drugi korak je rješavanje dinamičke jednadžbe koja glasi:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}_e + \mathbf{Q}, \quad (1)$$

gdje je  $\mathbf{M}$  matrica masa,  $\mathbf{B}$  matrica prigušenja,  $\mathbf{K}$  matrica krutosti,  $\mathbf{F}_e$  generalizirani vektor vanjskih sila,  $\mathbf{Q}$  predstavlja sve kvadratne članove, a  $\mathbf{q}$  je vektor amplituda prirodnih vibracija. Navedena jednadžba (1) riješena je izravno u hidrodinamičkoj domeni kako bi se izbjegla učestala komunikacija s modelom konstrukcije. Treći korak je uz pomoć strukturnog modela očitati naprezanja nastala u konstrukciji koja odgovaraju dobivenim dinamičkim amplitudama prirodnih oblika vibriranja. Primjer prirodnih oblika vibriranja na cilindru s uklještenje prikazan na Slici 3.



**Slika 3.** Prirodni oblici vibriranja

Kada bismo cilindar prikazan na Slici 3. stavili u polje nailaznih valova i mijenjali njihov period, za prvi oblik vibriranja dobili bismo vrlo sličnu sliku kao Sliku 1. s uvjetom da bi maksimalni odziv bio na periodu koji odgovara prirodnom periodu konstrukcije. S obzirom da se radi o konstrukciji koja se nalazi djelomično pod vodom, taj period bi bio ponešto umanjen zbog utjecaja dodane mase. Osim na opterećenjima pod valovima, dinamički proračuni se nerijetko koriste za harmonijska opterećenja uzrokovana vrtlozima koji se stvaraju pri stalnoj brzini strujanja fluida.

### 3. Zaključak

U ovom radu predstavljen je općeniti prikaz međudjelovanja fluida i konstrukcije s primjerom ukliještenog cilindra. Opisane su glavne značajke jednosmjernog i dvosmjernog međudjelovanja te njihova primjena ovisno o tipu opterećenja.

### Literatura

- [1] I. Senjanović, N. Vladimir, M. Tomić, N. Hadžić, and Š. Malenica, "Global hydroelastic analysis of ultra large container ships by improved beam structural model," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 1041–1063, 2014, doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0230.
- [2] A. Bakica, Š. Malenica, N. Vladimir, and I. Senjanović, "Hydroelastic analysis of Pre-Swirl Stator," *Mar. Struct.*, vol. 85, no. June, p. 103267, 2022, doi: 10.1016/j.marstruc.2022.103267.
- [3] H. Jasak, "OpenFOAM: Open source CFD in research and industry," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 89–94, 2009.
- [4] A. Bakica, Š. Malenica, and N. Vladimir, "Hydro-structure coupling of CFD and FEM - Quasi-static approach," *Ocean Eng.*, vol. 217, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108118.

