

## STANDARD FOR VERIFICATION AND VALIDATION IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AND HEAT TRANSFER

### STANDARD ZA VERIFIKACIJU I VALIDACIJU U RAČUNARSKOJ MEHANICI FLUIDA I PRENOSU TOPLOTE

V. prof. dr. Edin Berberović  
Polytechnic faculty in Zenica, University of Zenica  
Bosnia and Herzegovina

#### REZIME

*U ovom radu daje se osvrt na Standard za verifikaciju i validaciju u računarskoj mehanici fluida i prenosu toplote ASME V&V 20-2009. Standard je namijenjen za specificiranje, tj. unifikaciju pristupa i procedura koje je potrebno provesti u cilju verifikacije i validacije numerički dobivenog rješenja, a kojima bi se u kvantitativnom smislu na jedinstven način odredio stepen tačnosti na osnovu poređenja numeričkog rezultata i raspoloživih podataka iz drugih izvora za pojedinačnu specificiranu varijablu od interesa u specificiranim tačkama proračuna odabranim za validaciju. Cilj ovog rada je dati uvid u ovaj standard i njegove osnovne koncepte široj tehničkoj i inženjerskoj populaciji u našoj zemlji, za primjenu i podizanje nivoa kvaliteta u stručnim i naučno-istraživačkim projektima u okviru računarske mehanike fluida i prenosa toplote.*

**Ključne riječi:** standard, verifikacija, validacija, računarska mehanika fluida, prenos toplote

#### ABSTRACT

*In this paper an overview of the Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer ASME V&V 20-2009 is given. The objective of the Standard is the specification, i.e. unification of the verification and validation approaches and procedures to be carried out aimed at quantifying in a unique manner the degree of accuracy, by comparison of the numerical solution and other available data for a specified variable at specified validation points. The purpose of the present paper is to provide insight into this standard and its basic concepts to a broader technically-oriented and engineering audience in our country, for the application and improving the level of quality in professional and scientific research projects in the framework of computational fluid dynamics and heat transfer.*

**Keywords:** standard, verification, validation, computational fluid dynamics, heat transfer

#### 1. UVOD

U proteklih par decenija, zahvaljujući rapidnom razvoju informacionih tehnologija, a posebno računarskog hardvera i softvera, računarske simulacije sve više su zastupljene kao alat za dobijanje rješenja za kompleksne probleme i sisteme, koji su do nedavno bili nerješivi. Računarska simulacija je proračun na računaru kojim se reproducira ili predviđa ponašanje nekog realnog sistema korištenjem odgovarajućeg matematskog modela kojim se realni sistem ili pojava modelira u matematskom obliku pogodnom za programiranje na računaru. U

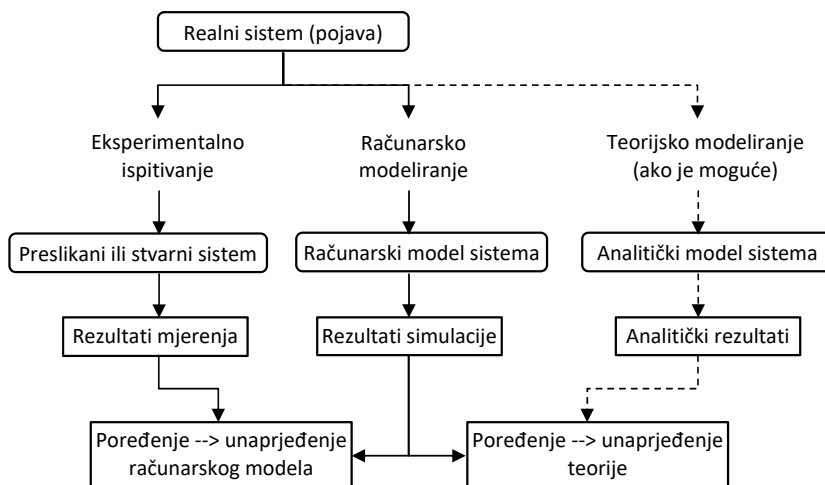
današnjem modernom svijetu i vremenu u kojem živimo, računarske simulacije su široko rasprostranjene u modeliranju mnogih pojava u svim prirodnim naukama, a čvrsto su etablirane kao neizbježan i posebno važan sastavni dio inženjerskih proračuna i projekata, u kojima se intenzivno koriste za stjecanje novih saznanja u tehnologijama koje su u razvoju ili za predviđanje ponašanja inženjerskih sistema. Ovo posljednje navedeno je posebno izraženo u inženjerskim proračunima i istraživačkim projektima u oblasti tzv. računarske mehanike fluida – CFD (*Computational Fluid Dynamics*) i računarskog prenosa toplote – CHT (*Computational Heat Transfer*), koji su zbog svoje kompleksnosti analitički nerješivi [1].

Zbog velikog broja i kompleksnosti različitih problema koji se rješavaju, kao i zbog raznolikosti načina dobijanja ulaznih podataka za simulaciju i obezbjeđenja validnih eksperimentalnih podataka za poređenje, nametnula se potreba za postavljanjem jedinstvenih kriterija i procedura za verifikaciju i validaciju rezultata generiranih računarskom simulacijom. Drugim riječima, postoji potreba da se standardiziraju pojmovi, načini i procedure koje se provode za provjeru računarskih modela, programa i njihovih rezultata, neovisno o posmatranom konkretnom inženjerskom problemu koji se rješava. U tom smislu, u ovom radu se predstavlja jedan takav standard pod nazivom *Standard za verifikaciju i validaciju u računarskoj mehanici fluida i prenosu toplote* ASME V&V 20-2009 [2], koji je izdalo američko društvo mašinskih inženjera ASME, a koji obuhvata sve gore navedene aspekte. Treba napomenuti da predmetni standard predstavlja korisne i značajne smjernice i kao takav nije obavezan za primjenu na svjetskom nivou, ali zbog nivoa razrađenosti svih detalja svakako ima veliki značaj i potencijal za primjenu.

## 2. RAČUNARSKE SIMULACIJE I STANDARD

Standard ASME V&V 20-2009 obuhvata verifikaciju i validaciju u inženjerskim proračunima za CFD i CHT. Kompleksni transportni fenomeni koji se računarskim simulacijama rješavaju u okviru CFD i CHT, koji su često i multidisciplinarni, opisani su sistemima parcijalnih diferencijalnih jednačina, obično drugog reda. Ti sistemi jednačina zahtijevaju prethodno provođenje posebnih složenih matematičkih procedura za aproksimaciju svih članova algebarskim izrazima, koji se mogu programirati za iterativno rješavanje [3]. Simulirani problem i rezultati proračuna moraju se prije prihvatanja provjeriti sa stanovišta vjerodostojnosti u odnosu na realni sistem ili pojavu koja se modelira i simulira, slika 1. Predmet bavljenja navedenog standarda je upravo metodologija za procjenu tačnosti, tj. vjerodostojnosti računarske simulacije za CFD i CHT.

ASME je američka organizacija koja ima za cilj promovisanje saradnje, dijeljenje znanja i razvoj vještina i kompetencija u inženjerskim disciplinama, s ciljem pružanja podrške široj, globalnoj, inženjerskoj zajednici u razvoju tehničkih rješenja za podizanje kvaliteta života. Formirana 1880. godine kao mala grupa vodećih industrijalaca tog vremena, prerasla je u respektabilnu organizaciju koja danas okuplja preko 100 hiljada članova u preko 150 zemalja širom svijeta, od čega je nekoliko desetina hiljada studenata inženjerstva. ASME nudi paletu standarda iz oblasti mašinskog inženjerstva, u kojoj se izdvaja niz standarda za verifikaciju i validaciju (tzv. *V&V standardi*) za računarsko modeliranje i simulacije u naponskoj analizi čvrstih tijela (V&V 10), fluidno-termalnim sistemima u nuklearnoj tehnici (V&V 30), medicinskoj tehnici i uređajima (V&V 40), naprednim proizvodnim tehnologijama (V&V 50), energetskim sistemima (V&V 60), te mehanici fluida i prenosu toplote (V&V 20) koji je u fokusu ovog rada.



Slika 1. Računarsko modeliranje i veza sa eksperimentalnim i teorijskim rezultatima.

Sušтина procesa validacije je procjena opsega u kojem se nalazi greška računarske simulacije, koja se dobija poređenjem rezultata simulacije sa eksperimentalnim rezultatima kod iste pojave (sistema) za određene odabrane varijable pri postavljenim određenim uslovima. Bitno je naglasiti da bez raspoloživih rezultata mjerenja, ne može se pristupiti validaciji (za slučaj kompleksnih sistema koji su analitički nerješivi). Validacijom je obično moguće uporediti jedan set, tj. jedno područje uslova koji vladaju u proračunskoj simuliranoj domeni. Standard preporučuje da se isti pristup primjenjuje za greške i nesigurnost rezultata simulacije, kao i za greške i nesigurnost rezultata eksperimenta, odnosno tretirajući ih konceptualno na isti način. Pri tome treba znati da standard služi za kvantifikaciju stepena tačnosti samo za slučajeve u kojima primijenjeni početni i granični uslovi moraju biti isti kao i u eksperimentu koji se simulira. Tačnost rezultata simulacije u prostoru i vremenu koji ne pripadaju prostornoj i vremenskoj domeni eksperimenta ne može se obuhvatiti standardom i predstavlja segment za koji se eventualno može dati inženjerska procjena, zavisno od specifičnog problema.

Procedure za verifikaciju i validaciju predložene u standardu V&V 20 vrijede za sve inženjerske probleme iz oblasti CFD i CHT, od jednostavnih 1-D stacionarnih strujanja, do kompleksnih 3-D nestacionarnih turbulentnih strujanja sa prenosom toplote. Prema ovom standardu, pojam *validacija* se definiše kao proces određivanja stepena u kojem model predstavlja tačnu reprezentaciju realnog sistema ili pojave iz perspektive namjene (korištenja) tog modela. S tim u vezi, samoj validaciji mora prethoditi verifikacija programa (računarskog koda) kao i verifikacija samog numeričkog rješenja. Pojam *verifikacija koda* definiše se kao kriterij kojim se uspostavlja vjerodostojnost da kompjuterski kod tačno rješava matematski model koji je u njemu implementiran, tj. da sam računarski program ne proizvodi greške u simulaciji, dok se pojam *verifikacija rješenja* definiše kao kriterij za procjenu numeričke tačnosti određenog konkretnog proračuna.

### 3. SADRŽAJ STANDARDA

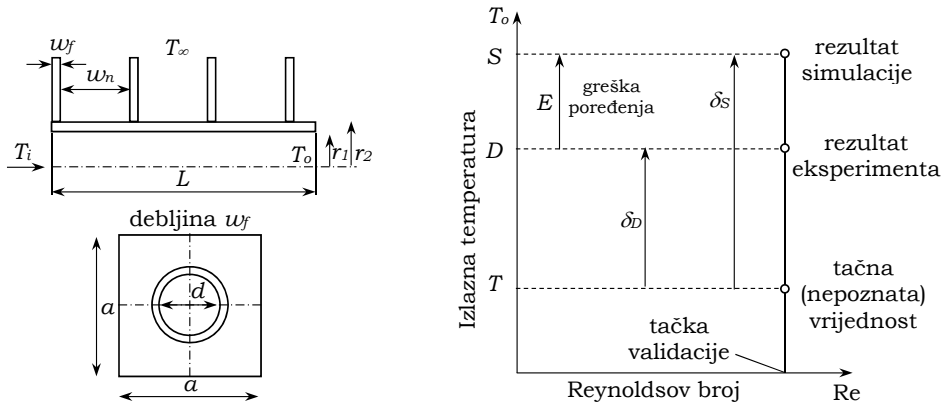
Sam standard se sastoji od sedam povezanih cjelina, odnosno sekcija, u kojima se detaljno obrazlažu pojmovi i definiraju smjernice, procedure i načini primjene procedura za verifikaciju i validaciju pojedinih segmenata u numeričkim inženjerskim proračunima u mehanici fluida i prenosu toplote. Pojedini dijelovi standarda su:

- Uvod u metodologiju validacije
- Verifikacija programskog koda i numeričkih rješenja

- Utjecaj nesigurnosti ulaznih parametara na nesigurnost numeričke simulacije
- Nesigurnost eksperimentalnih rezultata
- Procjena nesigurnosti same validacije
- Interpretacija rezultata validacije
- Konkretni primjeri primjene

### 3.1. Osnovna metodologija validacije

Osnovni pojmovi i koncepti mogu se objasniti pomoću primjera strujanja kroz cijev u izmjenjivaču toplote, na koju su ugrađena rebra za poboljšanje prenosa toplote, slika 2.



Slika 2. Primjer kombinovanog CFD-CHT problema i definicije vrijednosti i grešaka [2].

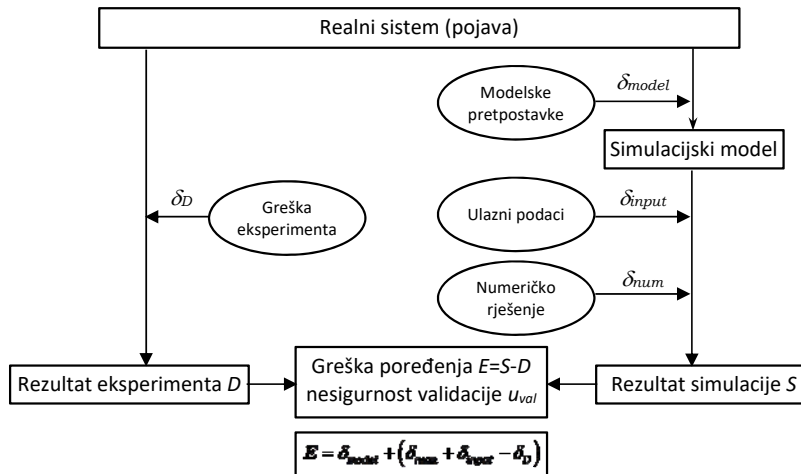
Izlazna varijabla, koja se direktno mjeri i koja će biti predmet validacije je temperatura fluida na izlazu iz izmjenjivača toplote,  $T_o$ . Prenos toplote na fluid u cijevi od ulaza prema izlazu dat je izrazom  $\dot{q} = \rho \dot{V} c_p (T_i - T_o)$ , a tačka validacije određena je Reynoldsovim brojem  $Re = 4\rho \dot{V} / (\mu d^2 \pi)$ . Ulazni podaci za simulaciju su toplotni fluks ( $\dot{q}$ ) i svi ostali parametri, tj. geometrija ( $r_1, r_2, L, \dots$ ), fizikalne osobine ( $c_p, \rho, \mu$ ), ulazna temperatura ( $T_i$ ) i protok ( $\dot{V}$ ). Referirajući se na oznake na slici 2, greška poređenja numeričkog i eksperimentalnog rezultata određena je razlikom rezultata simulacije i eksperimenta  $E = S - D$ . Vrijednosti grešaka numeričkog rješenja i eksperimentalnog rezultata mjerenja su po definiciji  $\delta_s = S - T$  i  $\delta_D = D - T$ , respektivno, što znači da je greška poređenja zapravo određena greškama rezultata simulacije i eksperimenta, odnosno izrazom  $E = \delta_s - \delta_D$ . Sve greške sadržane u rješenju dobivenom u simulaciji mogu se kategorizirati kao greške modeliranja  $\delta_{model}$ , greške numeričkog rješenja  $\delta_{num}$ , i greške ulaznih parametara  $\delta_{input}$ , slika 3, tako da je ukupna greška sadržana u numeričkom rješenju zbir  $\delta_s = \delta_{model} + \delta_{num} + \delta_{input}$ . Greška numeričkog modeliranja se sada može izraziti kao

$$\delta_{model} = E - (\delta_{num} + \delta_{input} - \delta_D). \quad \dots (1)$$

Za poznate vrijednosti  $S$  i  $D$ , procjena vrijednosti greške modeliranja  $\delta_{model}$  svodi se na određivanje vrijednosti u zagradi u izrazu (1). Standardna nesigurnost validacije [4] se definiše kao procjena standardne devijacije za populaciju kombinacije grešaka u izrazu (1)  $u_{val} = (\delta_{num} + \delta_{input} - \delta_D)$  iz čega slijedi da se greška numeričkog modeliranja nalazi u intervalu  $\delta_{model} \in [E - u_{val}, E + u_{val}]$ . Sa stanovišta numerički dobivenog rješenja, u fokusu metodologije

verifikacije i validacije je procjena vrijednosti za  $u_{val}$ . Ako su pojedine greške u zagradi u izrazu (1) nezavisne, tada se standardna nesigurnost validacije izražava preko standardnih devijacija distribucija pojedinih grešaka, tj.

$$u_{val} = \sqrt{u_{num}^2 + u_{input}^2 + u_D^2} . \quad \dots (2)$$



Slika 3. Shematski pregled procesa validacije [2].

### 3.2. Verifikacija programskog koda i numeričkog rješenja

Za proces verifikacije i validacije, od suštinskog je značaja procijeniti nesigurnost numeričkog rezultata usljed greške numeričkog rješavanja  $u_{num}$ . Prvo se vrši verifikacija samog programskog koda, radi osiguranja da sam kod ne unosi dodatnu nepoznatu grešku, a zatim se provodi validacija samog rješenja (rezultata) s ciljem određivanja vrijednosti  $u_{num}$ . Verifikacija koda kojom se procjenjuje njegova ispravnost jedino se može provesti sistematskim testovima konvergencije u odnosu na poznata testna rješenja (tzv. *benchmark testovi*). U idealnom slučaju, ti testovi su analitička matematička rješenja koja omogućuju da se pojedinačno testira svaki član u jednačinama koje predstavljaju računarski model. Ako analitička rješenja ne postoje, tada se provode sistematski testovi konvergencije sa rastućom rezolucijom prostorne i vremenske domene (tzv. *grid convergence tests*). Konvergencija se testira kroz monitoring promjene vrijednosti varijable koja se validira sa smanjivanjem karakteristične vrijednosti prostornog i vremenskog pomaka ( $h \rightarrow 0, h = \Delta x, \Delta t$ ), pa se red konvergencije numeričke metode definiše na osnovu razlike računarskog rezultata  $f(h)$  i egzatnog rezultata  $f^{exact}$  kao  $E_h = f(h) - f^{exact}$ . Za numeričku metodu ili model se kaže da ima red konvergencije  $p$  kada je greška numeričkog rezultata  $E_h$  asimptotski proporcionalna sa  $h^p$ .

Procjena standardne nesigurnosti validacije numeričkog rješenja vrši se postupkom GCI (*Grid Convergence Index*) [5]. GCI postupak određuje nesigurnost validacije preko faktora sigurnosti  $F_s$  u proceduri u pet koraka:

- Korak 1: Definiše se reprezentativna karakteristična veličina prostorne mreže od  $N$  ćelija

$$h = \left[ \left( \sum_{i=1}^N \Delta V_i \right) / N \right]^{1/3} . \quad \dots (3)$$

- Korak 2: Odaberu se najmanje 3 različite prostorne mreže i faktor povećanja prostorne rezolucije (tzv. *ufinjavanja*)  $r = h_{coarse} / h_{fine}$ , koji na bazi iskustva treba biti veći od 1,3.
- Korak 3: Računa se red konvergencije za numerički dobivenu vrijednost posmatrane varijable  $\varphi$  dobivene u proračunima sa različitim mrežama, iz izraza

$$p = \frac{\ln \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1} + q(p)}{\ln r_{21}}, \quad q(p) = \ln \frac{r_{21} - s}{r_{32} - s}, \quad s = \operatorname{sgn} \left( \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1} \right). \quad \dots (4)$$

Izraz za  $p$  svodi se na jednostavniji oblik kada se vrši sistematsko ufinjavanje mreže sa konstantnim faktorom  $r = \text{const}$ , tako da je  $q(p) = 0$ , što se u praksi najčešće i koristi.

- Korak 4: Izračunava se ekstrapolirana vrijednost za posmatranu varijablu

$$\varphi_{ext}^{21} = (r_{21}\varphi_1 - \varphi_2) / (r_{21} - 1). \quad \dots (5)$$

- Korak 5: Izračunava se relativna greška i GCI indeks

$$e_a^{21} = |(\varphi_2 - \varphi_1) / \varphi_1|, \quad e_{ext}^{21} = |(\varphi_{ext}^{21} - \varphi_1) / \varphi_{ext}^{21}|, \quad GCI^{21} = F_s e_a^{21} / (r_{21} - 1), \quad \dots (6)$$

pri čemu se, na bazi iskustvenih rezultata, faktor sigurnosti uzima  $F_s = 1,25$  za strukturirane, a  $F_s = 3$  za nestrukturirane mreže [2,5]. Uzimajući u obzir približno Gaussovu distribuciju greške oko ekstrapoliranog rješenja  $\varphi_{ext}^{21}$ , dobija se procjena nesigurnosti numeričkog rješenja

$$u_{num} = GCI / k = GCI / 1,15. \quad \dots (7)$$

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je dat kratak osvrt na Standard za verifikaciju i validaciju u računarskoj mehanici fluida i prenosu toplote ASME V&V 20-2009, izdat od strane američkog društva mašinskih inženjera ASME. Standard predlaže jedinstveni pristup i metodologiju za verifikaciju i validaciju numerički dobivenih rješenja, kvantificiranjem stepena tačnosti numeričkog rješenja njegovim poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima, preko procjene svih identificiranih vrsta grešaka i neovisno o samom posmatranom problemu. Iako standard sam po sebi nije obavezan za primjenu, nego daje korisne smjernice, očigledan je njegov potencijal za korištenje u stručnim i naučno-istraživačkim proračunima u oblasti računarske mehanike fluida i prenosa toplote, s ciljem u podizanja kvaliteta i vjerodostojnosti dobivenih numeričkih rezultata.

#### 5. LITERATURA

- [1] Angermann L. (Ed.): Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics, InTech, Rijeka, 2010.
- [2] The American Society of Mechanical Engineers: Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer ASME V&V 20-2009, ASME <https://www.asme.org/>, 2016.
- [3] Moukalled F., Mangani L., Darwish M.: The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics – An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®, Springer International Publishing, Switzerland, 2016
- [4] Coleman H.W., Stem E: Uncertainties in CFD Code Validation, ASME J. Fluids Engineering, 119, 795-803, 1997.
- [5] Roache P.J.: Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Press, Albuquerque, 1998.