

Mehanika fluida-zadatak 6

Modeliranje turbulencije u okolini mostovskih stubova primenom softverskog paketa i-RIC 4

Opis CFD-a

CFD (Computational Fluid Dynamics) ili Računarska dinamika fluida je grana mehanike fluida koja koristi numeričke metode i računске algoritme za rešavanje i analizu problema vezanih za tok fluida. Omogućava simulaciju fluidnih tokova, pritiska, temperature, brzine i drugih relevantnih parametara.

CFD se koristi u mnogim industrijama, uključujući automobilski, vazduhoplovni, brodski, građevinski sektor, pa čak i u biomedicinskom inženjeringu za analizu protoka krvi. Što se tiče primene u hidrotehnici:

1. obstrujavanje tela (mostovski stub, ...)
2. tečenje vode u cevima (koleno, zatvarač, ...)
3. strujanje vode u rezervoarima (kod postrojenja za prečišćavanje)
4. transport materije (zagađenje, hlorisanje, ...)
5. strujanje vode oko hidrotehničkih objekata (prelivi, ustave, ...)

Modeliranje turbulencije: $\kappa - \varepsilon$ model

$\kappa - \varepsilon$ model je bio prvi model turbulencije koji je postao standard za CFD. Model se sastoji od dve transportne jednačine, jedne za turbulentnu kinetičku energiju (k), a druge za turbulentnu disipacionu stopu (ε).

Rezime ($\kappa - \varepsilon$ model)

k jednačina:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\kappa \bar{u}_j)}{\partial x_j} = P_\varepsilon - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$$

ε jednačina:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\varepsilon \bar{u}_j)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)$$

gde su:

$$\mu_T = \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \text{turbulentna viskoznost vrtloga } \left[\frac{kg}{ms} \right].$$

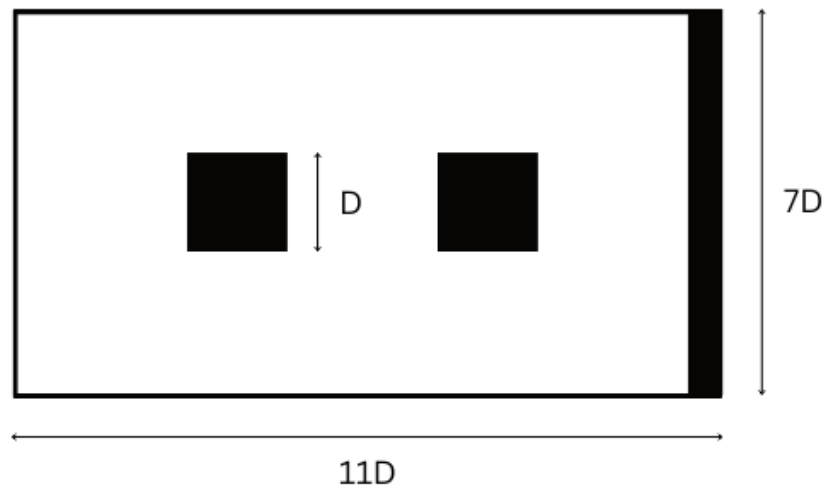
$$C_{\varepsilon 1} = 1.44 ; C_{\varepsilon 2} = 1.92 ; C_\mu = 0.09 ; \sigma_k = 1.0 ; \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Da bi se ovako modelirana turbulencija rešila potrebno je numeričko rešavanje osnovnih jednačina ili upotreba različitih softvera.

Turbulencija modelirana $\kappa - \epsilon$ modelom u ovom zadatku će se rešavati pomoću NaysCUBE solvera.

Zadatak

Cilj ovog zadatka je da se uradi simulacija turbulentnog tečenja u kanalu, širine 35m i dužine 55m, u okolini mostovskih stubova u i-RIC NaysCUBE version 4.43.79. Raspored mostovskih stubova je prikazan na slici 1.



Slika 1-Položaj mostavskih stubova u kanalu

Potrebno je uraditi simulaciju turbulentnog tečenja koristeći dve vrednosti protoka koje su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1-Vrednosti protoka i odgovarajućih dubina, brzina i kritičnih dubina

Q [m ³ /s]	h [m]	V [m/s]	h_{kr} [m]
225.9	3.03	2.13	1.62
479.5	3.87	3.54	2.68

Kritična dubina je određena koristeći formulu za Frudov broj.

$$Fr = \frac{Q^3 B_{kr}}{g A_{kr}^3} = 1$$

gde su:

Q-protok [m³/s]

B_{kr}-kritična širina [m]

g-gravitaciono ubrzanje [m/s²]

$$A_{kr} = h_{kr} B_{kr}$$

A_{kr}-površina poprečnog preseka [m]

Kreiranje modela u IRIC NaysCUBE solver

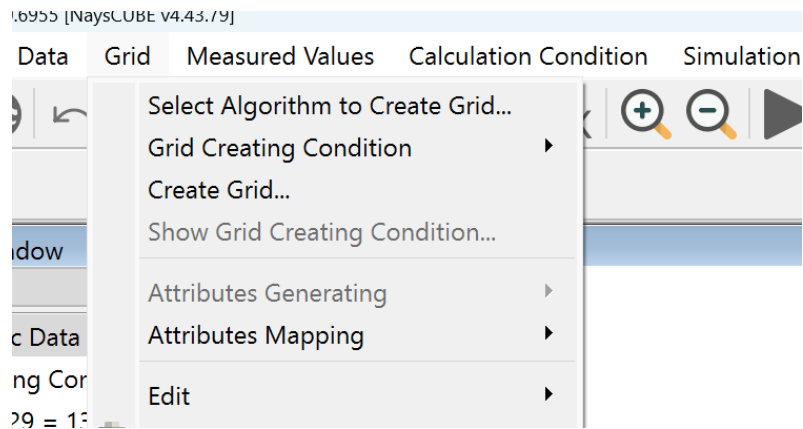
IRIC NaysCUBE solver je trodimenzionalni solver koji služi za simulaciju tečenja vode u kanalima, rečnim deonicama, sa ili bez prepreka u toku. U ovom solver se turbulencija modelira pomoću k-ε modela. Modeliranje turbulencije κ – ε modelom je opisano na početku ovog zadatka.

Da bi se ovaj zadatak uradio potrebno je:

1. zadati geometriju prizmatičnog kanala
2. zadati prepreku u kanalu
3. zadati hidrauličke parameter
4. pokrenuti simulaciju
5. uraditi pregled rezultata

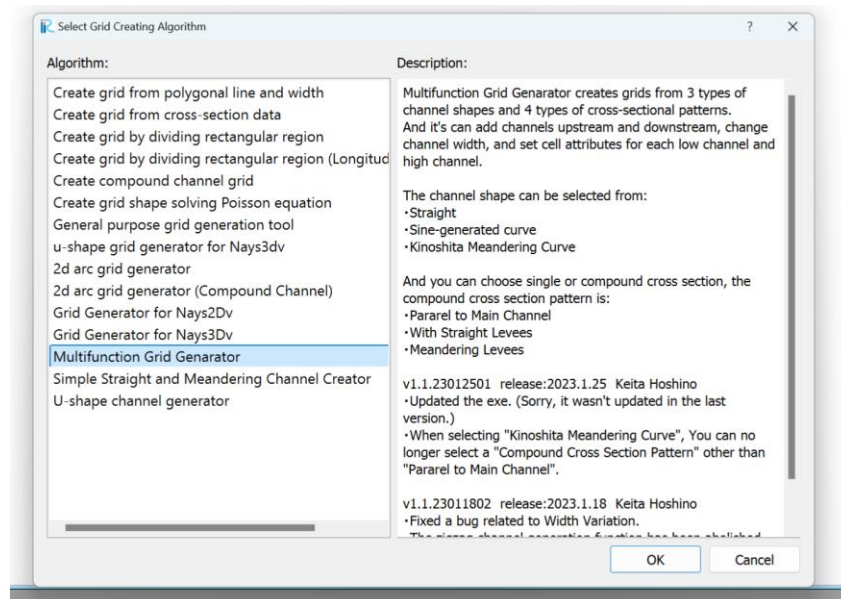
Zadavanje geometrije prizmatičnog kanala

Zadavanje geometrije prizmatičnog kanala u ovom zadatku će se uraditi preko komande Grid → Select Alforithm to Create Grid, kao što se može videte na slici ispod.



Slika 2 – Kartica Grid za odabir načina unosa geometrije

Odabirom Select Alforithm to Create Grid otvara se prozor koji je prikazan na slici 3.

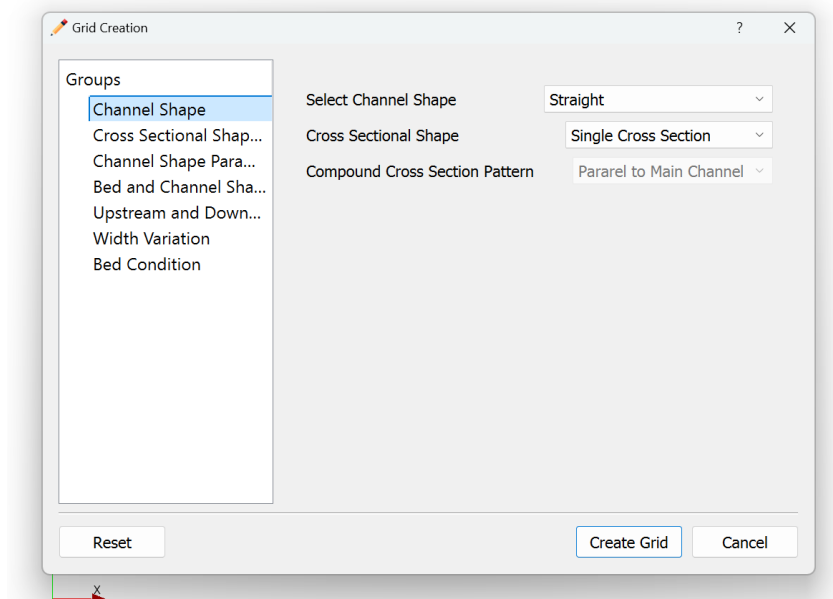


Slika 3 – Odabir algoritma za kreiranje mreže

Za način unošenja geometrije odabran je Multifunction Grid Genarator i sa desne strane je prikazan detaljniji opis ove metode.

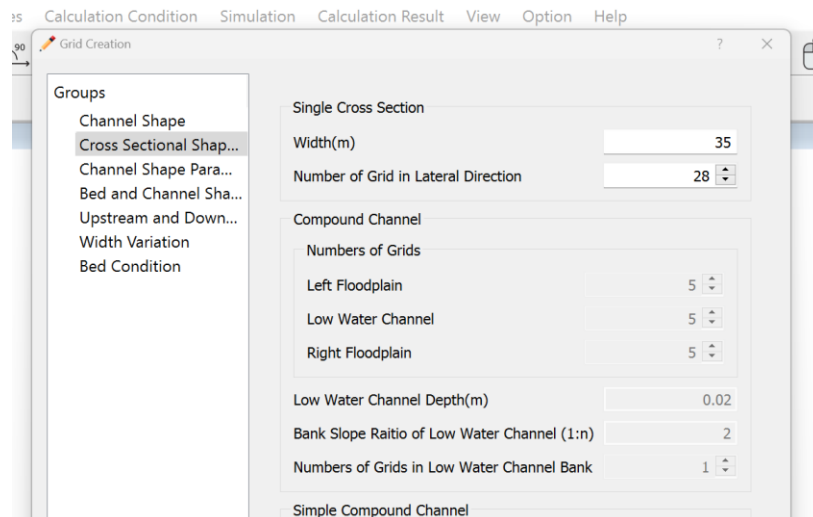
Nakon odabira načina formiranja geometrije potrebno je da definišemo oblik kanala, dužinu, širinu,..

Kao što je prikazano na slici 4, želimo da nam kanal bude pravolinijski i sa jednostavnim poprečnim presekom.



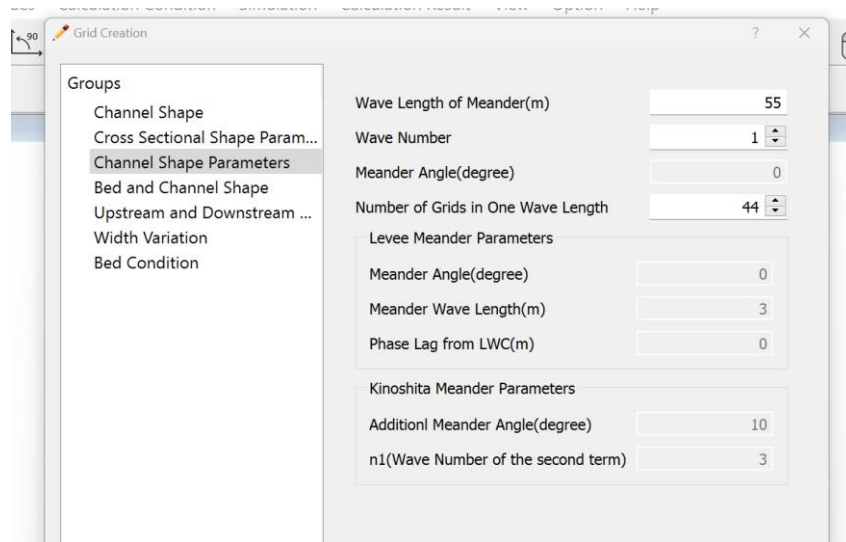
Slika 4 – Definisiranje oblika kanala i poprečnog preseka

U kartici Cross Sectional Shape (slika 5) treba da definišemo dimenzije poprečnih preseka, odnosno dimenzije širine i gustine mreže po širini. Širina kanala je 35m (28 kockica x 1.25m).



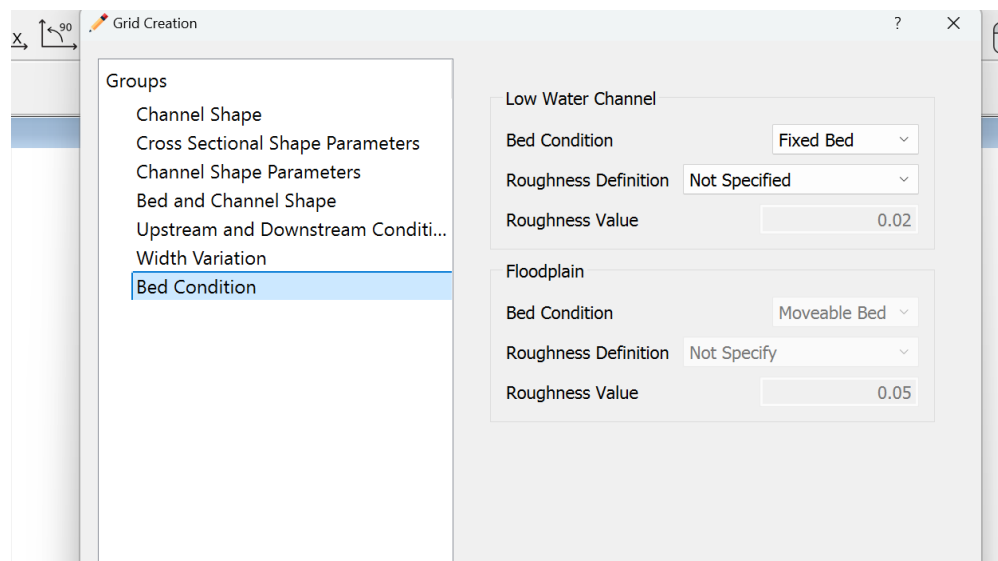
Slika 5 – Definisiranje širine i gustine mreže poprečnih preseka

Dužina kanala i mrežu po dužini je potrebno definisati u kartici Channel Shape Parameters (slika 6). Dužina kanala je 55m (44 kockica x 1.25m).



Slika 6 – Definisanje dužine kanala i gustine mreže

U kartici Bed Condition (slika 7) je potrebno definisati da li će dno kanala biti fiksno ili će se pomerati. Biramo fiksno dno.

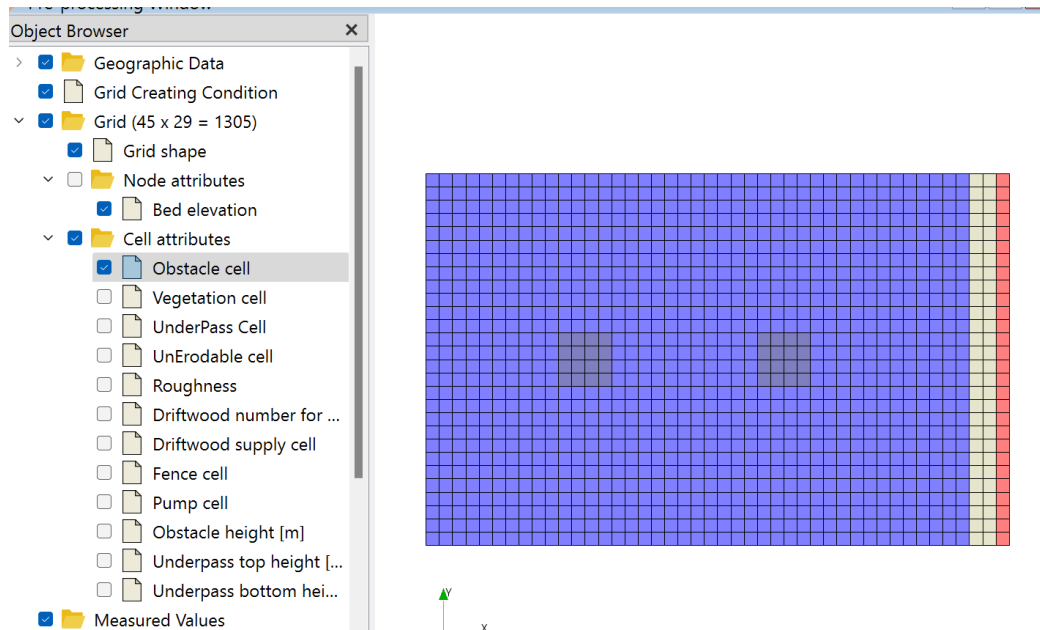


Slika 7 – Definisanje dna kanala

Zadavanje prepreke u kanalu

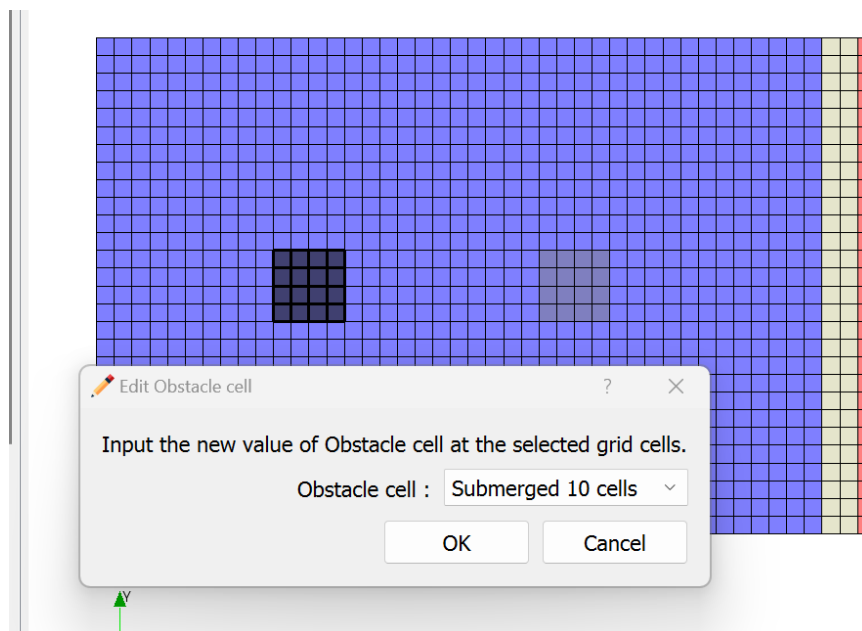
Da bi se zadala prepreka u kanalu potrebno je odabrati Object browser → Cell attributes → Obstacle cell (slika 8). Pored zadavanja prepreke moguće je zadati vegetaciju, prolaz ispod dna, ostatke od drveta u koritu,...

Selektovanjem kanala odaberemo veličinu prepreke, desnim klikom biramo opciju Edit value.



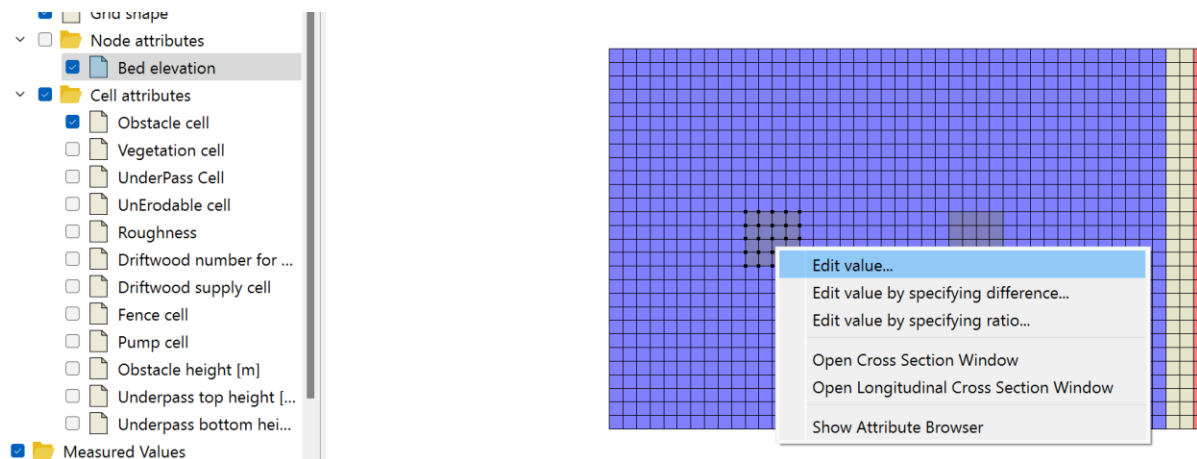
Slika 8 – Cell attributes

Nakon odabrane opcije Edit value otvoriće nam se prozor kao što je prikazan na slici 9. Potrebno je upisati željeni broj ćelija u odnosu na visinu vode.



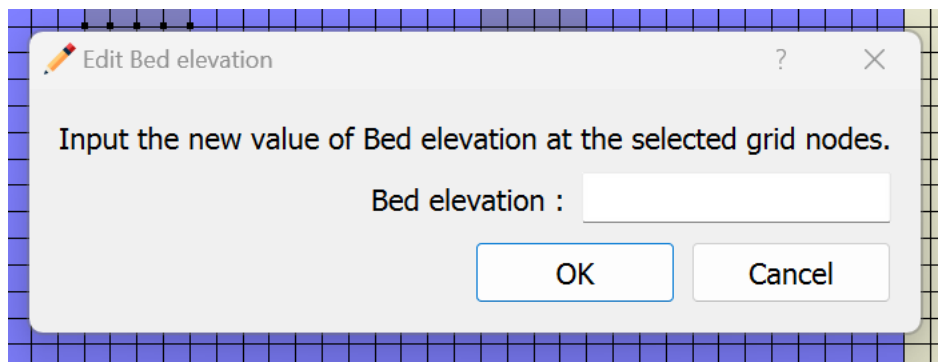
Slika 9 – Prozor za definisanje broja ćelija

Kada smo definisali položaj prepreka, potrebno je da definišemo dimenzije prepreke i to radimo preko opcije Node attributes → Bed elevation. Desnim klikom na označene tačke izaći će prozor kao na slici 10.



Slika 10 – Opcija Bed elevation

Odabirom opcije Edit value dobija se prozor kao što je prikazan na slici ispod, gde je potrebno upisati zahtevanu visinu prepreke.



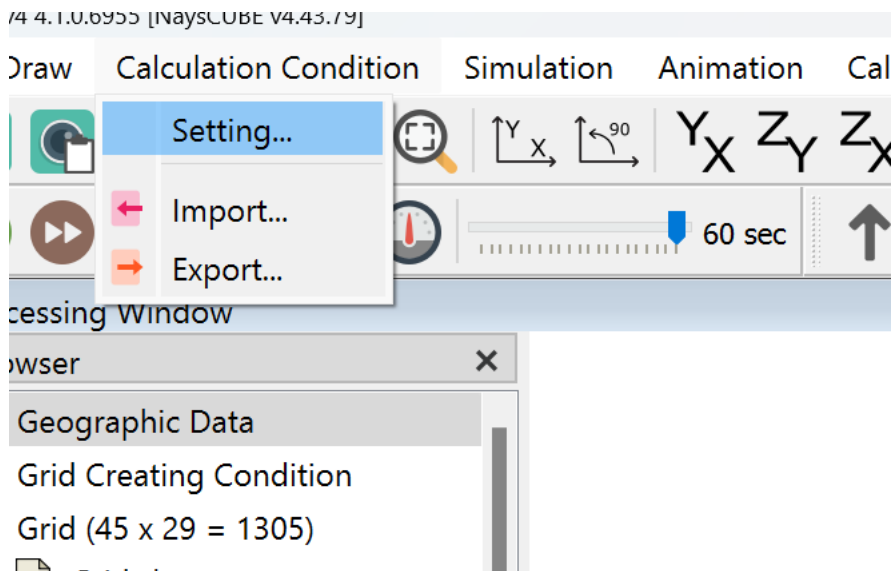
Slika 11 – Prozor za definisanje dimenzija prepreka

Dimenzije prepreke su definisane na osnovu broja ćelija po pravcima:

- $x = 3$ ćelije
- $y = 28$ ćelija
- $x = 2,2,1$ ćelija

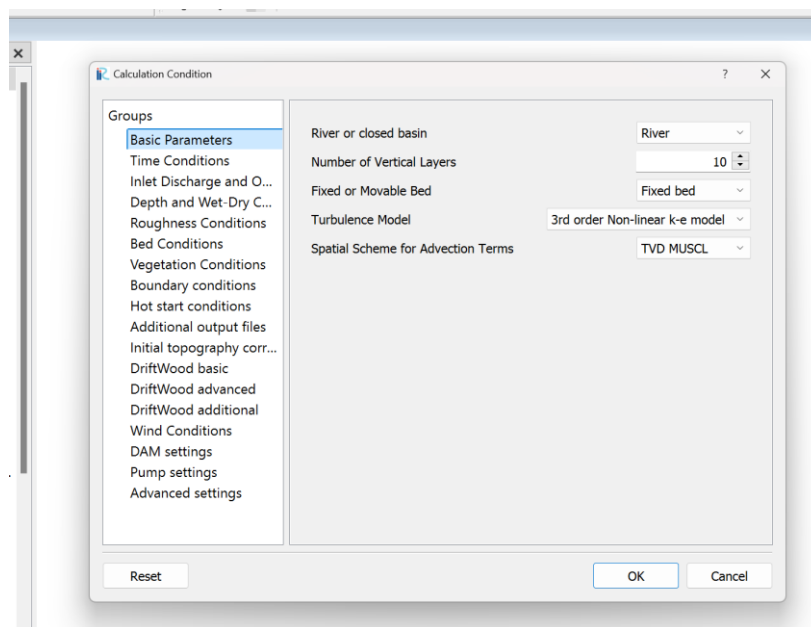
Zadavanje hidrauličkih parametara

Hidraulički parametri koji se zadaju su protok, nagib, početna dubina vode, vreme diskretizacije, početak i kraj simulacije,... Na slici 10 je prikazano kako se dolazi do prozora gde se navedeni parametri unose (Calculation Condition → Setting).



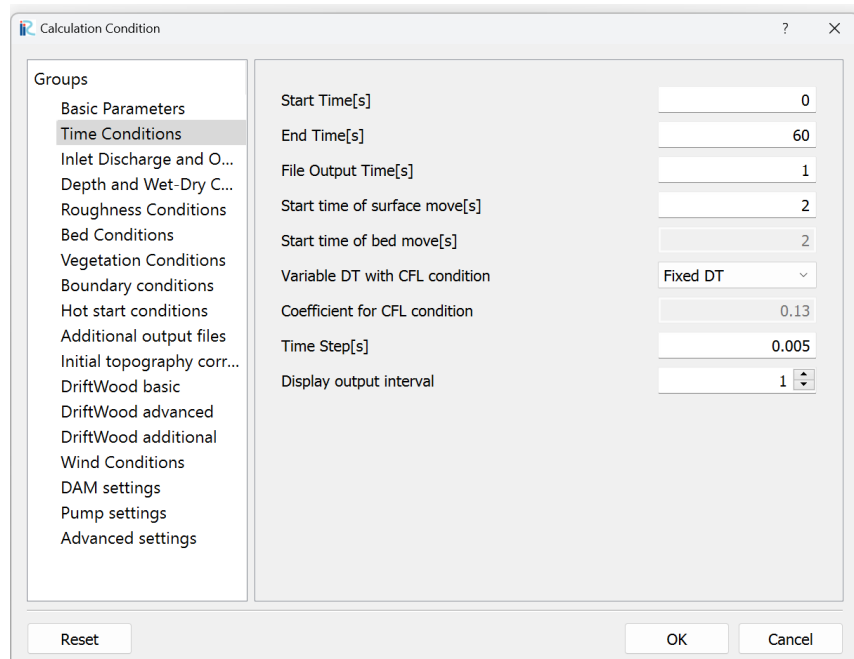
Slika 12 – Calculation Condition

U delu Basic Parameters je potrebno uneti broj slojeva po dubini po kojoj će program da računati, zatim biramo da li nam je dno kanala pokretno ili fiksno, model turbulencije. U našem slučaju koristiće se trodimenzionalni nelinearni k-ε model.



Slika 13 – Basic Parameters

U delu Time Conditions potrebno je zadati početak i kraj proračuna, vreme diskretizacije pri samom proračunu (Δt). Start time of surface move predstavlja vreme kada protok počinje da se javlja na uzvodnoj strani, dok start time of bed move predstavlja vreme početka deformacije korita.



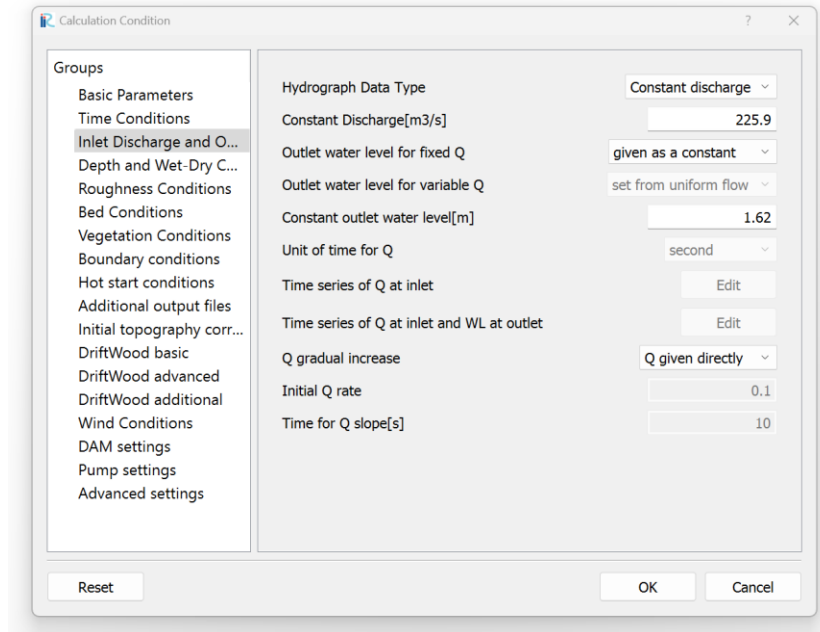
Slika 14 – Time Conditions

Formula za proračun minimalne vrednosti vremenskog koraka za proračun je data u nastavku:

$$\Delta t \leq \min \left[\frac{\Delta x}{U + \sqrt{gh}}, \frac{\Delta y}{V + \sqrt{gh}}, \frac{\Delta z}{W} \right]_{\text{all cells}}$$

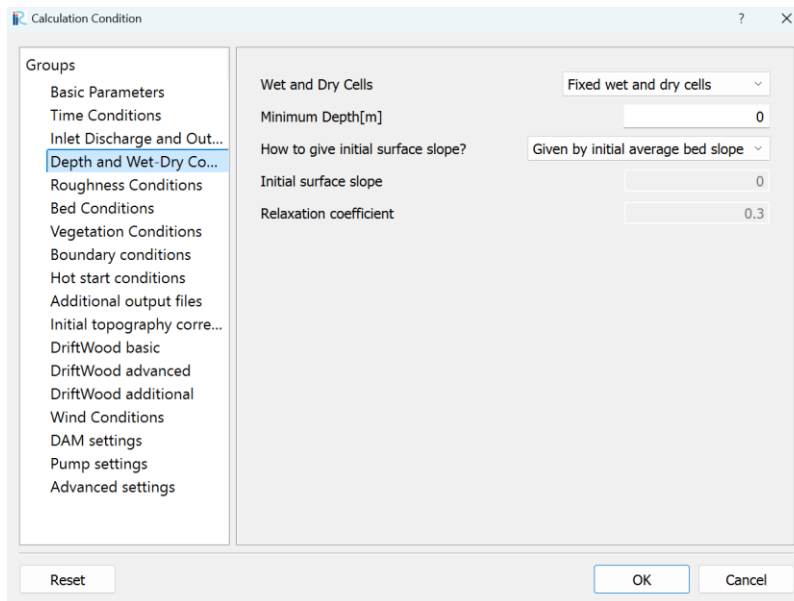
gde su U, V i W maksimalne brzine u pravcima x, y i z.

U kartici Flow Conditions se zadaju parametri tečenja. Potrebo je zadati protok, zatim je potrebno definisati da li se nivo vode zadaje direktno (Given Directly) ili prema laminarnom tečenju, bez uticaja donje vode (uni-flow).



Slika 15 – Inlet Discharge and Outlet WaterLevel

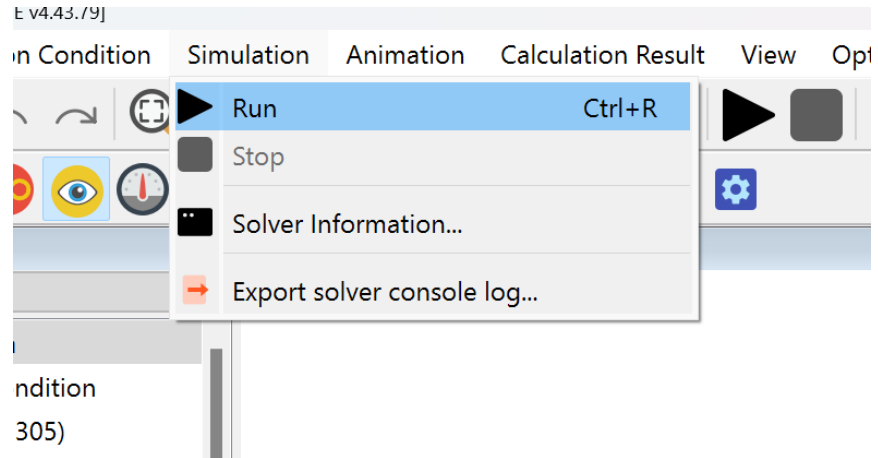
Za opciju zadavanja nagiba vodene površine ćemo izabrati da je zadat prema srednjem nagibu dna kanala. Takođe, ćemo zadati da je minimalna dubina jednaka nuli.



Slika 16 – Depth and Wet-Dry Conditions

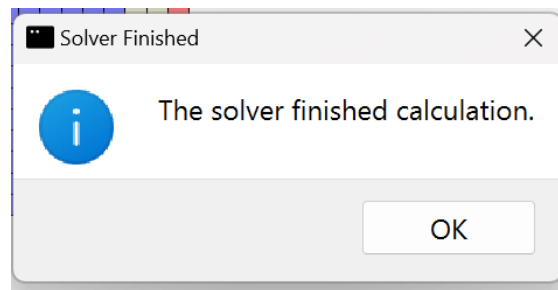
Pokretanje simulacija

Nakon što smo definisali kanal sa preprekom, definisali hidrauličke parametre možemo da pokrenemo simulaciju. Simulacija se pokreće preko Simulation → Run.



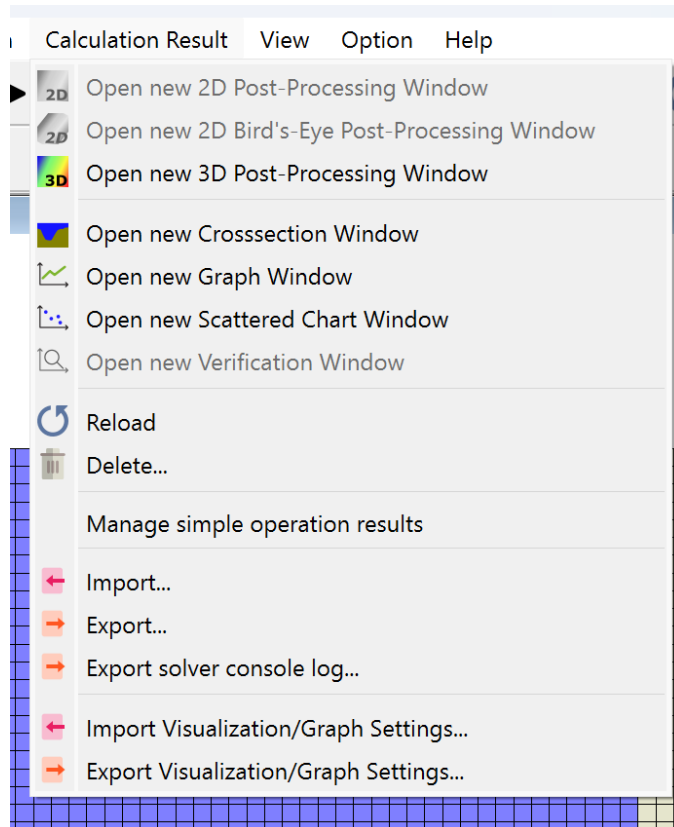
Slika 17 – Pokretanje simulacije

Nakon završene simulacije solver nas obaveštava o tome, kao što je prikazano na slici 16.



Slika 18 – Obaveštenje o završenoj simulaciji

Nakon završene simulacije moguće je pregledati rezultate. Rezultati se pregledaju pomoću Calculation Result. Tu je moguće odabrati 3D prikaz rezultata ili grafički prikaz (promena protoka, dubine, brzine kroz vreme,..).



Slika 19 – Pregled rezultata

Stabilnost modela i vreme trajanja simulacije

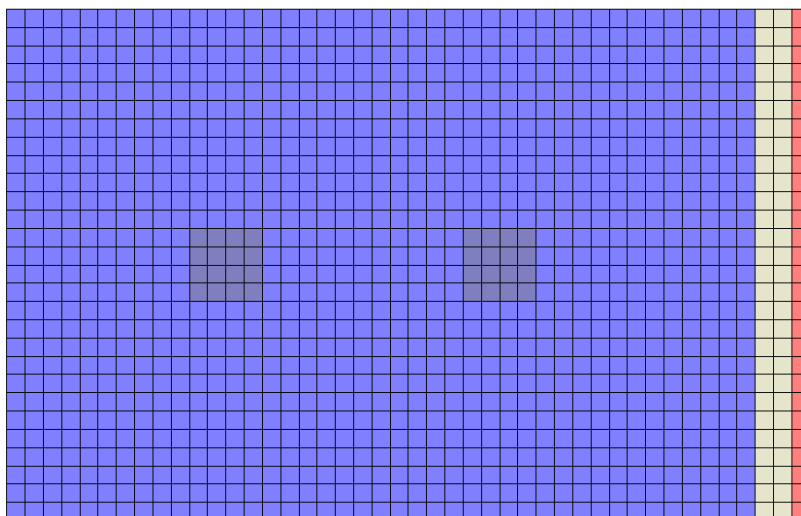
Uslov stabilnosti

$$c \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1, c - \text{Kurantov broj}$$

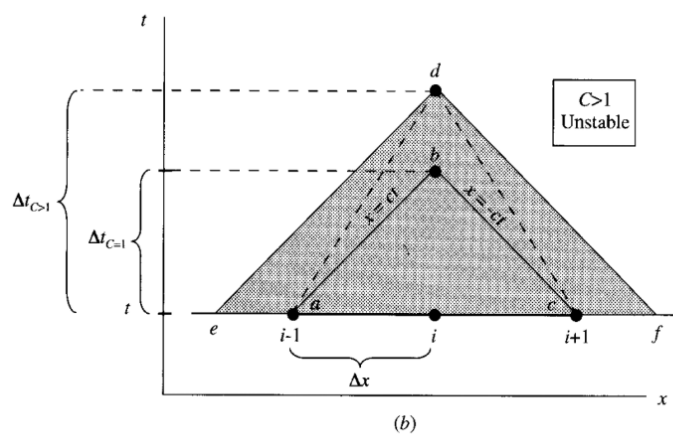
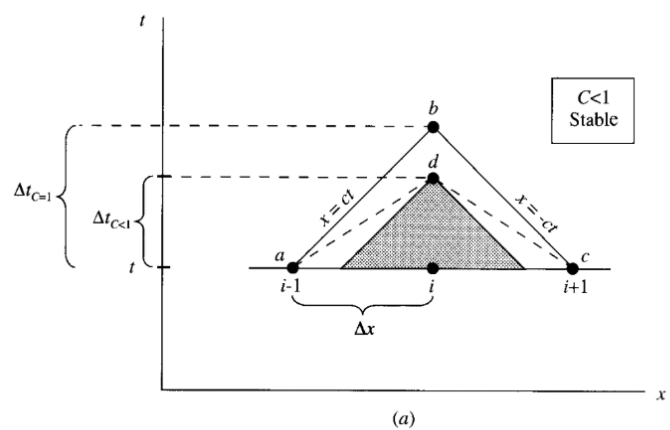
U ovom zadatku je kanal dimenzija 55x35m. Na osnovu slike 20 se vidi da po x osi imamo 44 (dx = 0.8), po y osi 28 (dy = 0.8).

Broj slojeva po dubini za mostovske stubove je 10, dok je za preliv 2,2 i 1.

Iz uslova stabilnosti je određeno da je vreme diskretizacije $\Delta t = 0.005s$.



Slika 20 – Mreža (Grid) sa stubovima i prelivom



Slika 21 – a) Ilustracija stabilnog slučaja. Numerički domen obuhvata sav analitički domen.
 b) Ilustracija nestabilnog slučaja. Numerički domen ne uključuje sav analitički domen. [3]

Na osnovu prethodne slike može da se zaključi da je potrebno da Kurantov broj (c) bude manji ili jednak jedinici kako bi model bio stabilan.

Vreme trajanja simulacije

Vreme trajanja simulacije u modelu turbulencije oko mostovskih stubova koristeći k-ε model je 60 sekundi.

Potrebno je da vreme simulacije bude duže ili jednako vremenu koje je potrebno da se uspostavi konstantan nivo, bez oscilacija.

$$T_{sim} = \Delta t * N_{steps}$$

gde su:

Δt – vremenski korak simulacije

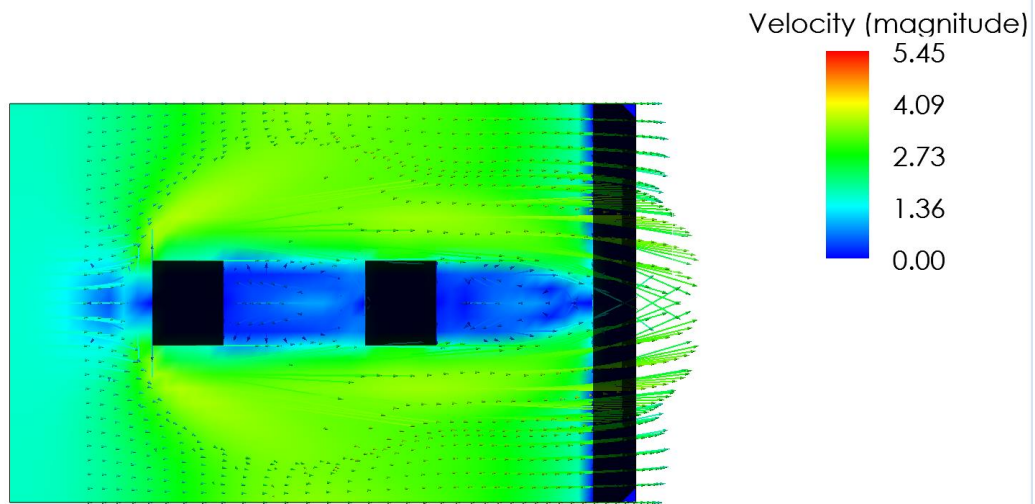
N_{steps} – broj koraka proračuna

Pregled rezultata

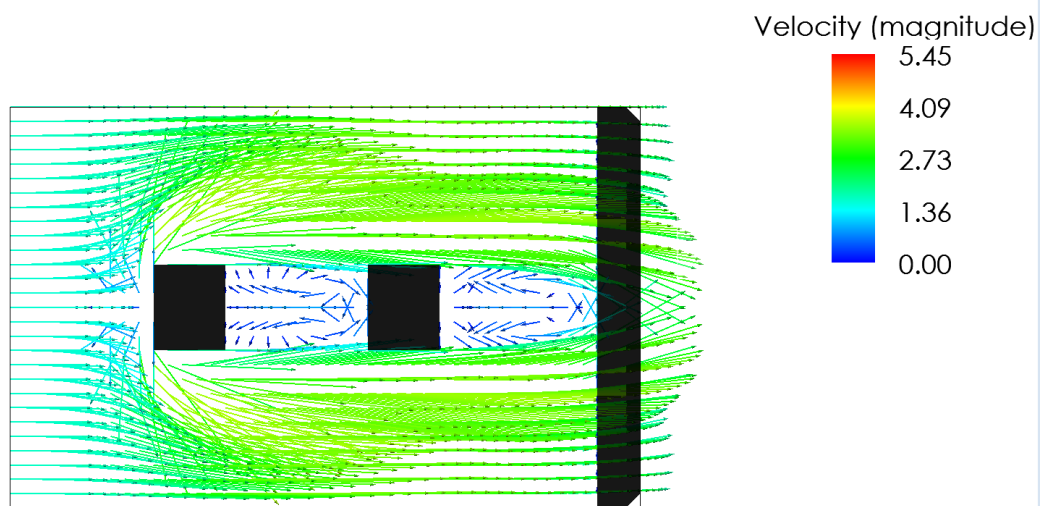
Od rezultat će za obe vrednosti protoka biti prikazani:

1. brzine pri dnu i pri površini
2. turbulentna kinetička energija pri dnu i na površini
3. nivo vode sa desne strane stubova
4. pritisak po boku uzvodnog i nizvodnog stuba
5. promena pritiska kroz vreme

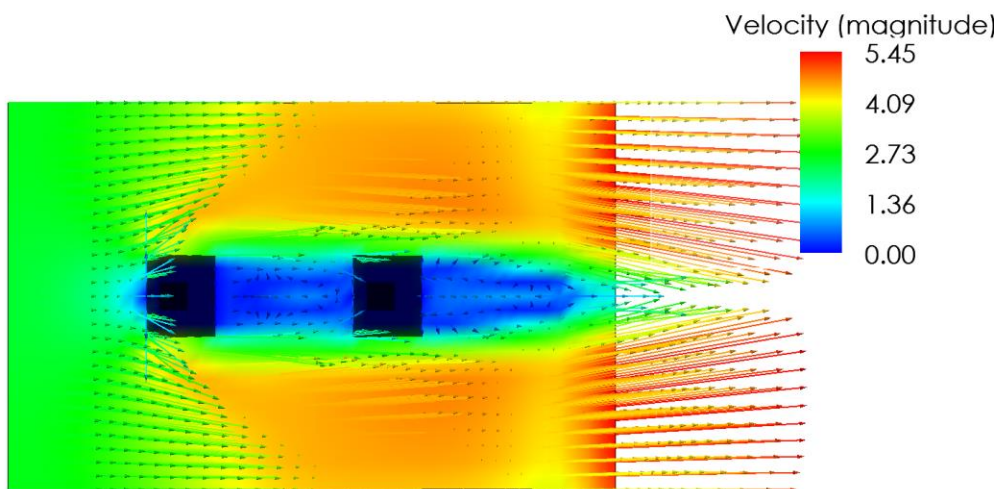
Prvi primer sa srednjim protokom za datu godinu ($Q = 225.9 \text{ m}^3/\text{s}$)



Slika 22 - Brzina pri dnu kanala

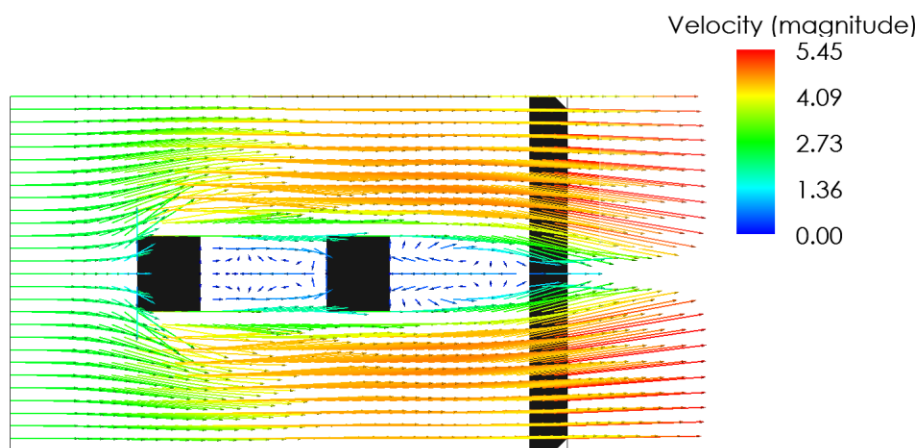


Slika 23 - Strujnice pri dnu kanala



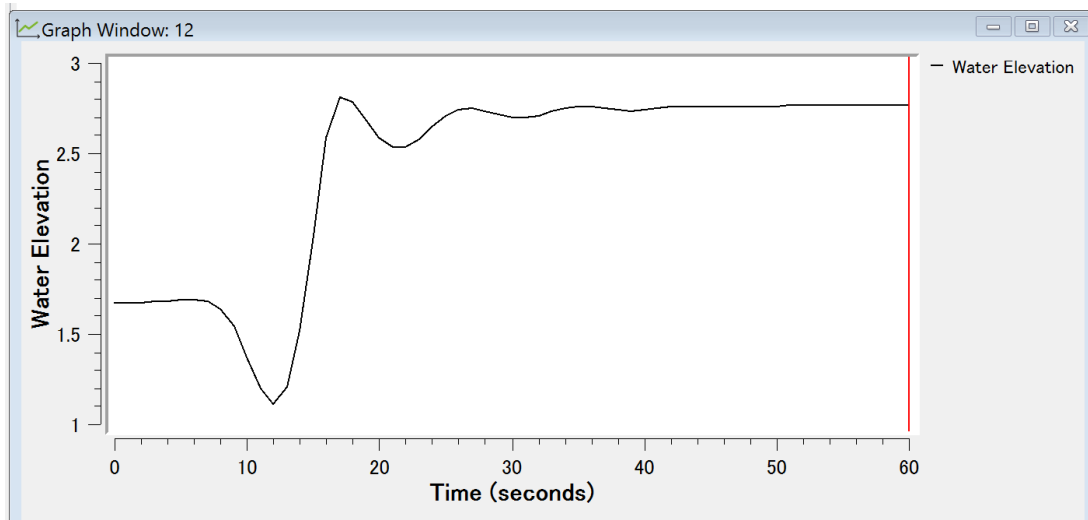
Time: 60 sec

Slika 24 - Brzina pri površini vode

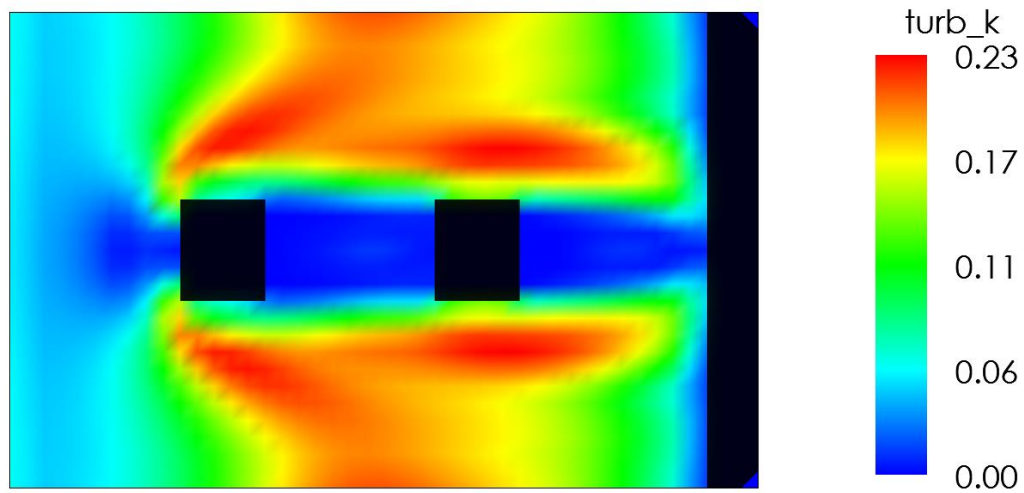


Time: 60 sec

Slika 25 - Strujnice pri površini vode

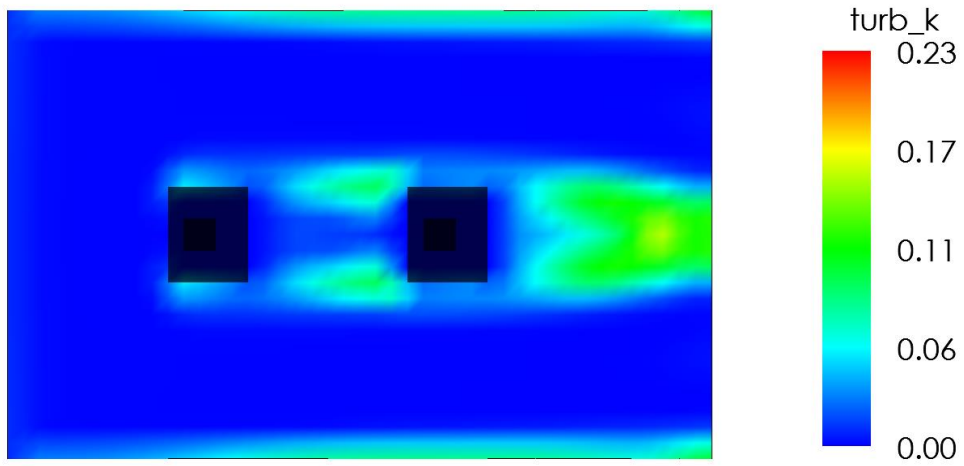


Slika 26 - Promena nivoa vode u vremenu



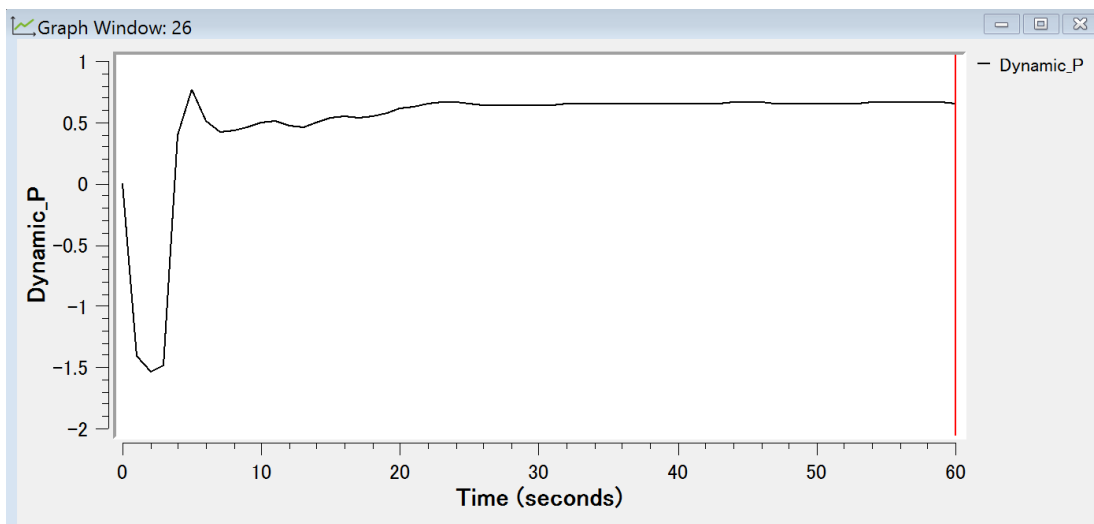
Time: 60 sec

Slika 27 - Promena turbulentne kinetičke energije pri dnu kanala

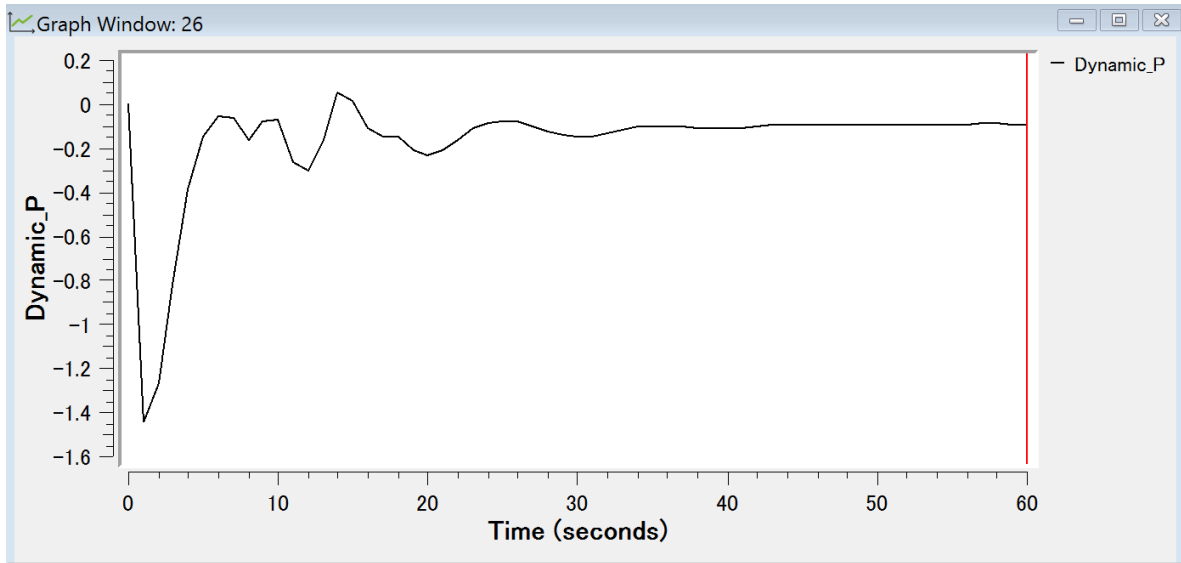


Time: 60 sec

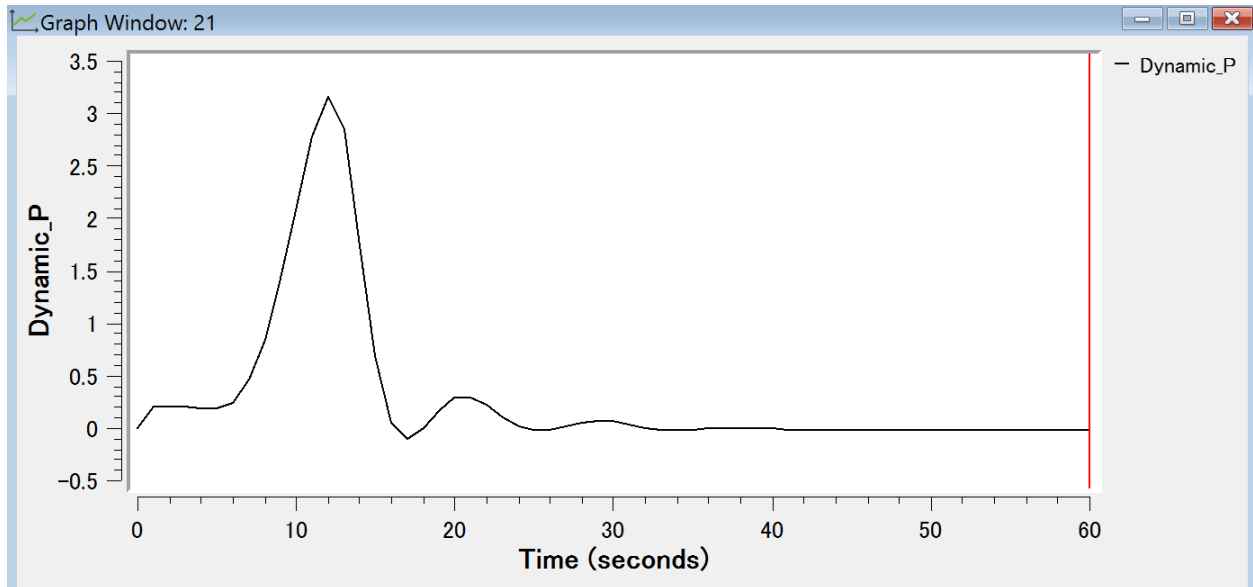
Slika 28 - Promena turbulentne kinetičke energije pri površini vode



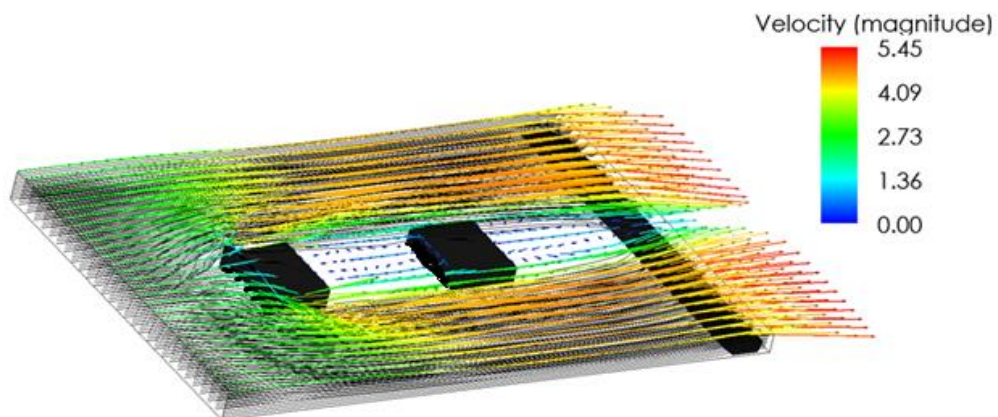
Slika 29 – Pritisak po sredini boka uzvodnog stuba



Slika 30 – Pritisak po sredini boka nizvodnog stuba

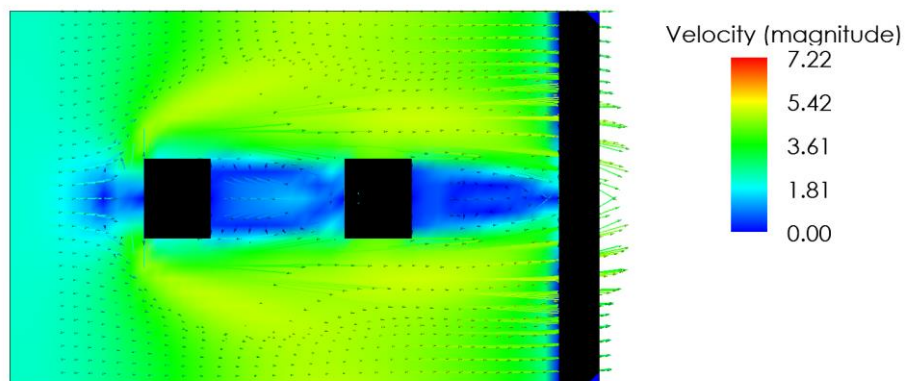


Slika 31 – Promena pritiska kroz vreme

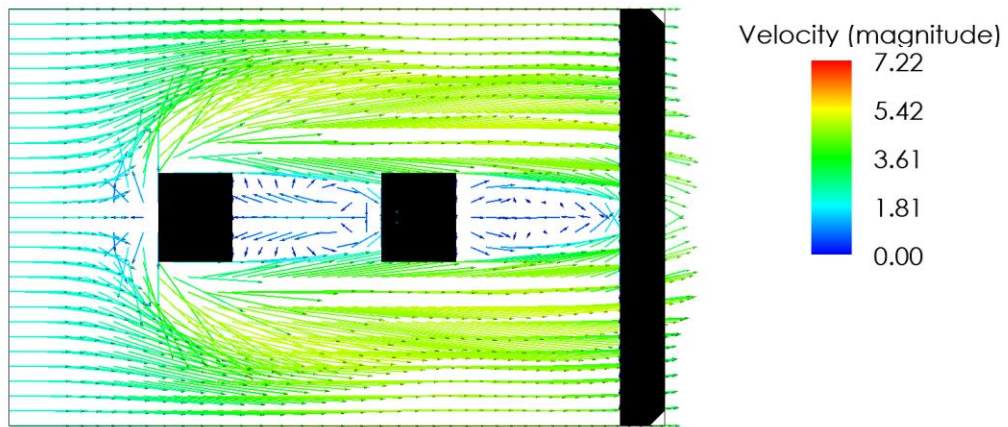


Slika 32 – 3D prikaz kanala sa stubovima i prelivom

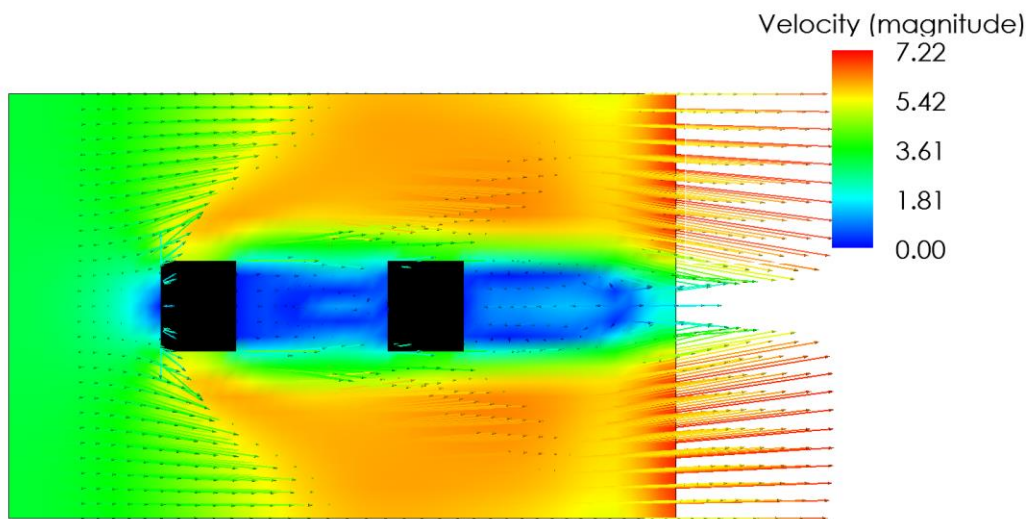
Drugi primer sa maksimalnim protokom poplave koji se javlja jednom u 50 godina ($Q = 479.5 \text{ m}^3/\text{s}$)



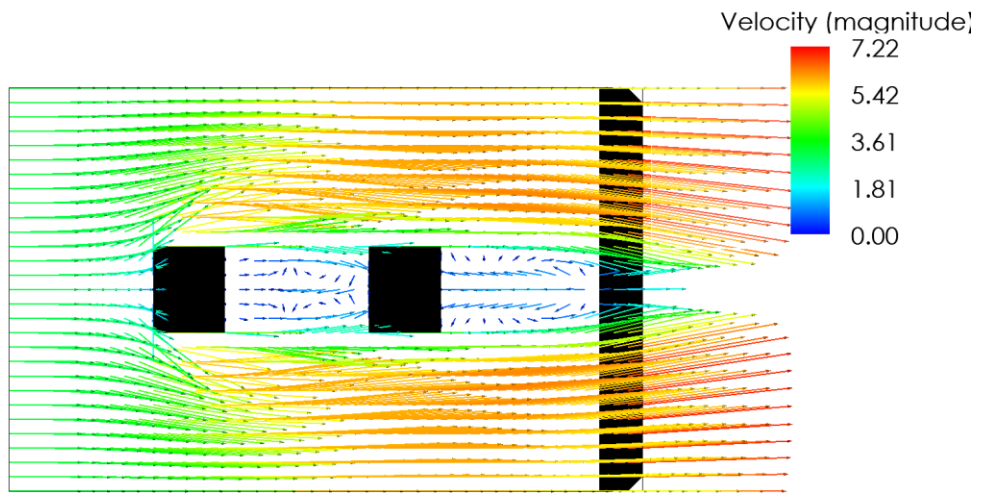
Slika 33 - Brzina pri dnu kanala



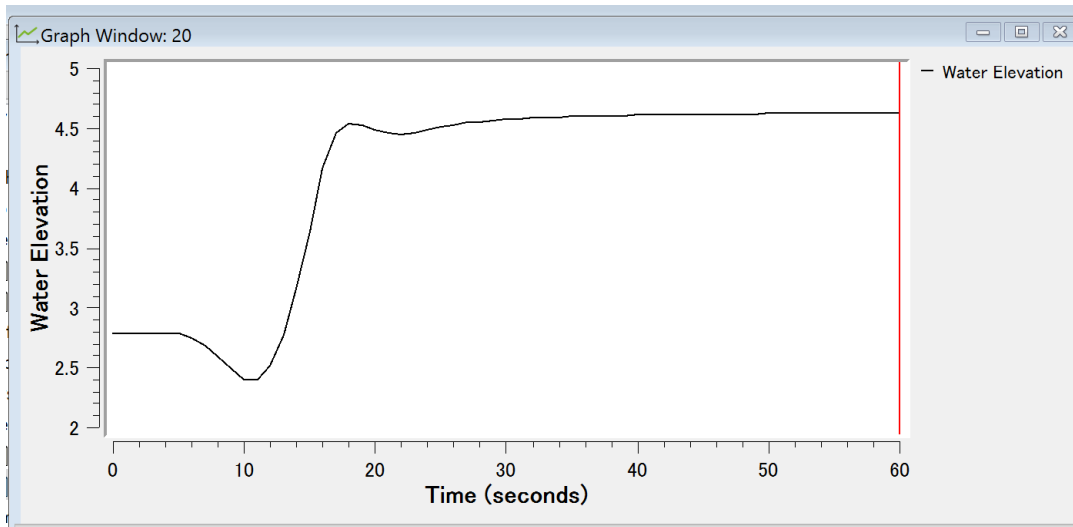
Slika 34 - Strujnice pri dnu kanala



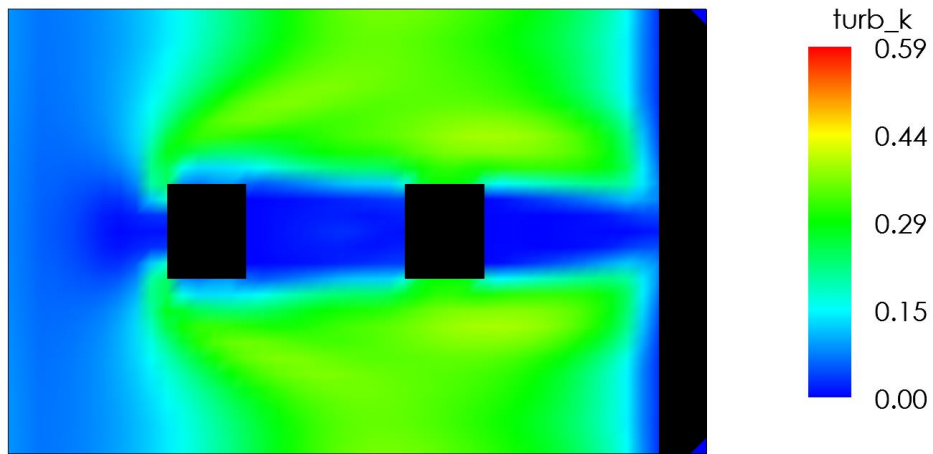
Slika 35 - Brzina pri površini vode



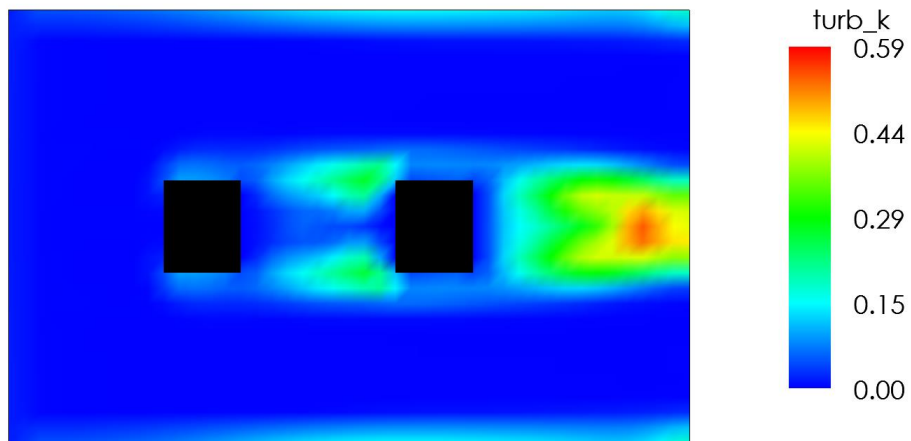
Slika 36 - Strujnice pri površini vode



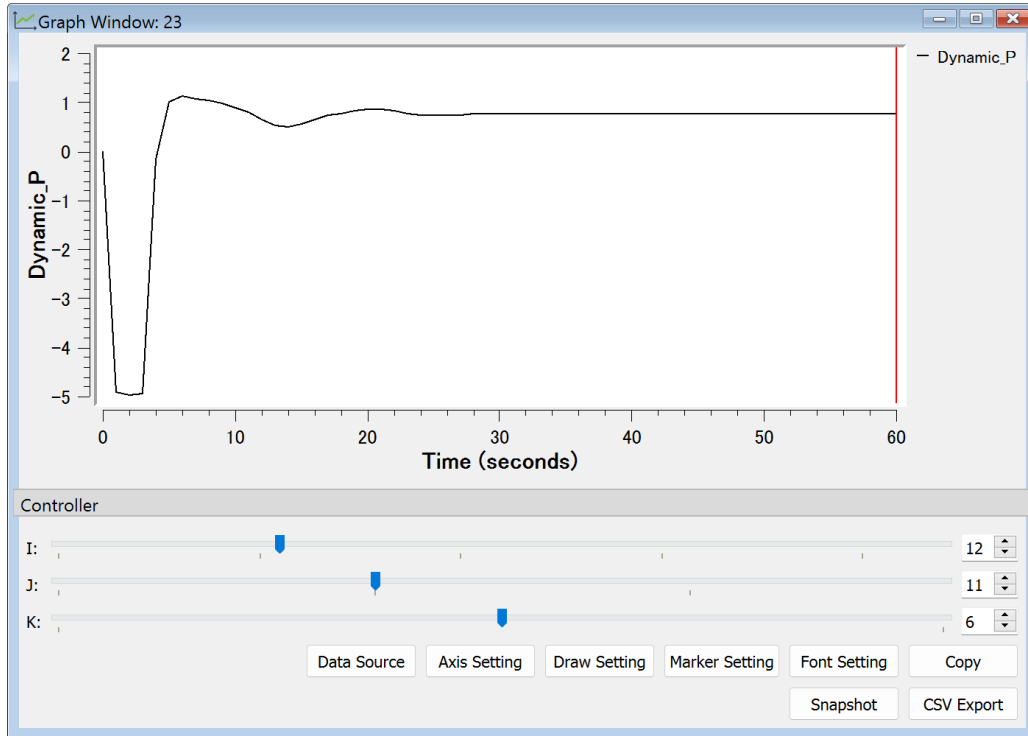
Slika 37 - Promena nivoa vode u vremenu



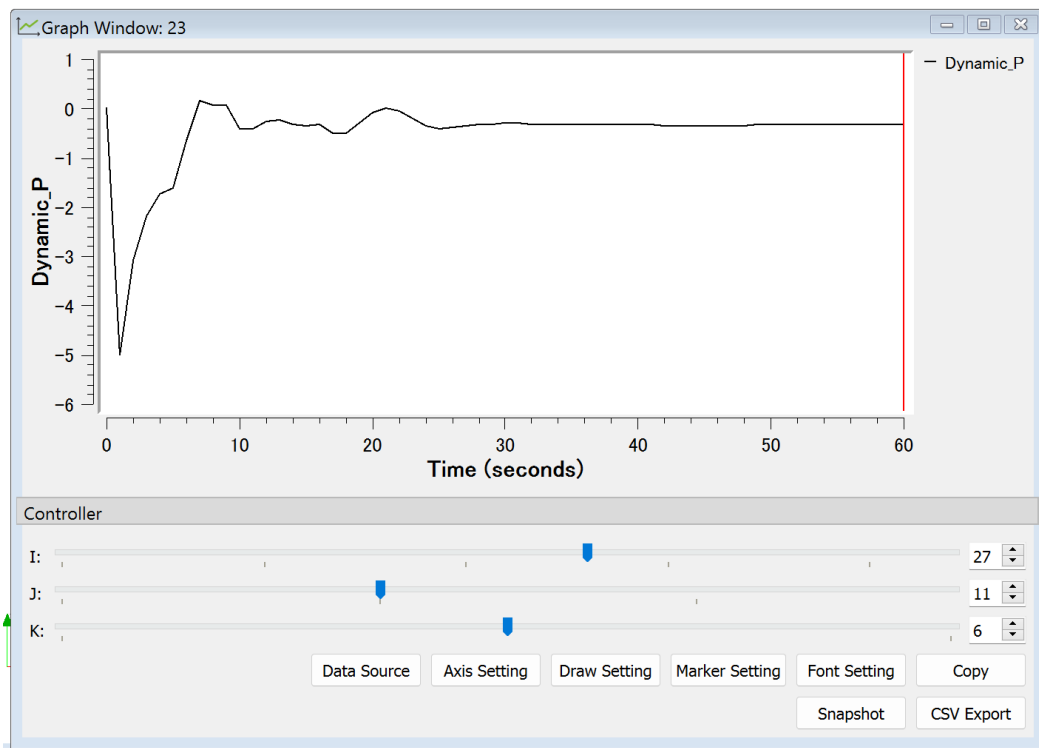
Slika 38 - Promena turbulentne kinetičke energije pri dnu kanala



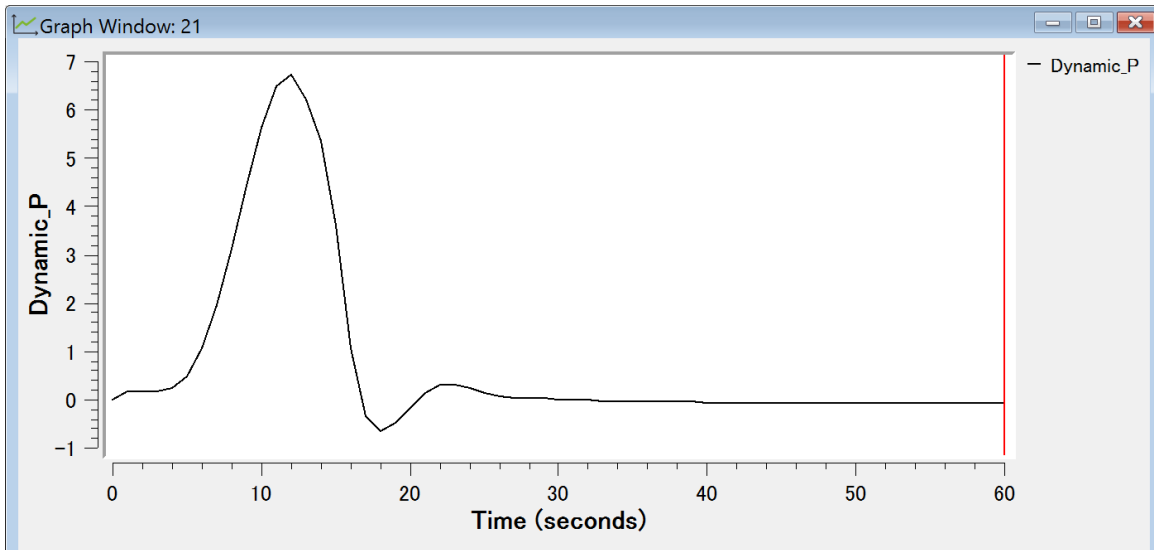
Slika 39 - Promena turbulentne kinetičke energije pri površini vode



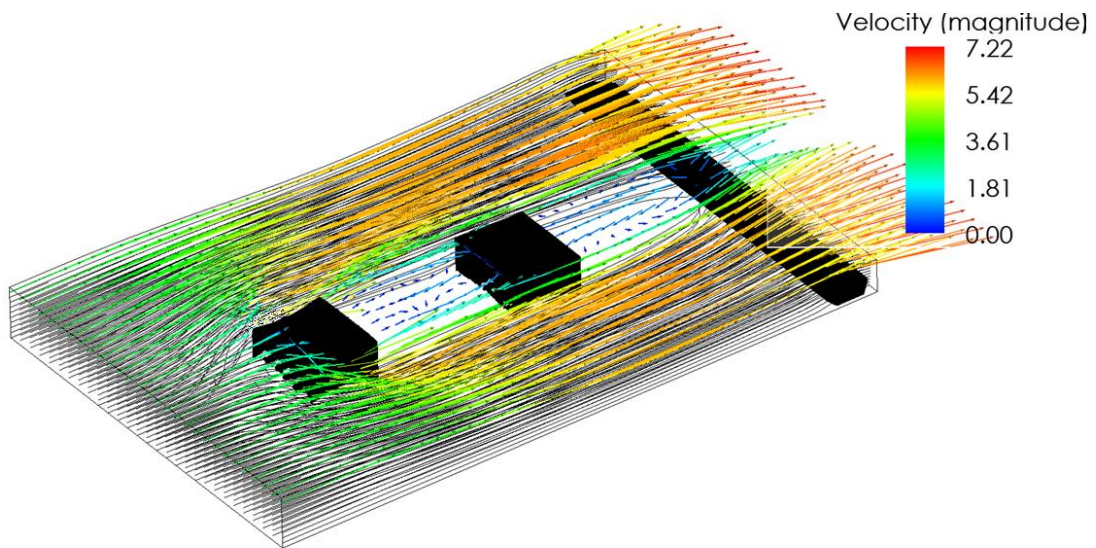
Slika 40 – Pritisak po sredini boka uzvodnog stuba



Slika 41 - Pritisak po sredini boka nizvodnog stuba



Slika 42 – Promena pritiska kroz vreme



Slika 43 – 3D prikaz kanala sa stubovima i prelivom

Diskusija rezultata i zaključna razmatranja

Poređenje rezultata modela

Urađen je proračun turbulentnog strujanja oko mostovskih stubova za dve vrednosti protoka. Kao nizvodni granični uslov uzeta je kritična dubina. Međutim, kod proračuna sa maksimalnim protokom poplave koja se javlja jednom u 50 godina, bilo je potrebno prilagoditi nizvodni granični uslov. Vrednosti korišćene u proračunu su prikazane u tabeli 2.

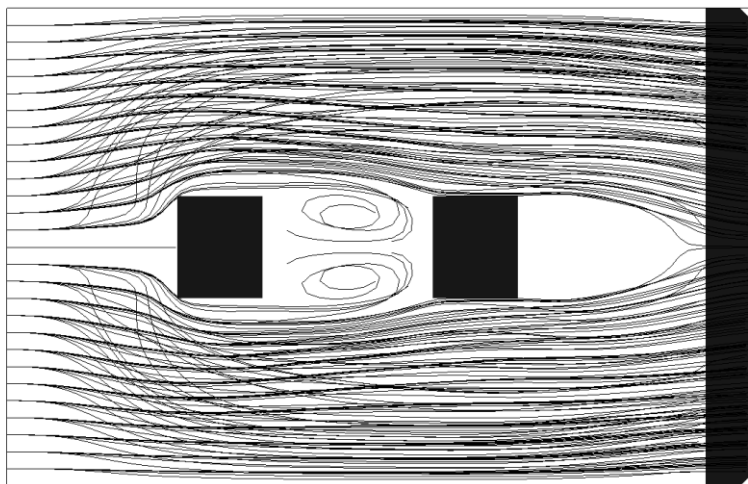
Tabela 2 – Vrednost kritičnih dubina i dubina koje su korišćene kao nizvodni granični uslov u modelu

Q [m ³ /s]	h _{kr} [m]	h _{ngu} [m]
225.9	1.62	1.62
479.5	2.68	2.73

Takođe, oba modela su urađena sa vremenskim korako 0.005s, dok je primer sa manjim protokom prošao i sa većim vrednostima Δt (0.05s).

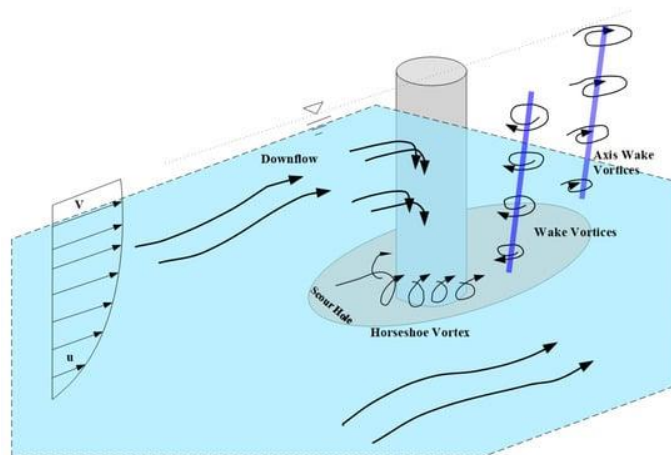
Kao što se može videti na slikama 29, 30, 40 i 41, a što je i bilo i očekivano, na drugom stubu su veće oscilacije pritiska i potrebno je duže vremena da se uspostavi konstantan pritisak.

Analizirajući strujnice jasno se može videti da između dva stuba postoji vrtložno kretanje struje, slike 44. Ova pojava je od izuzetnog značaja u rečnim koritima, jer može da dođe do potkopavanja stuba, pri čemu on gubi stabilnost i ugrožava stabilnost i bezbednost mosta.



Slika 44 – Vrtložno kretanje između dva stuba

Na slici 45 su prikazani vrtlozi koji se javljaju oko mostovskog stuba. Na slici je prikazan kružni mostovski stub, dok je nama u zadatku stub kvadratnog poprečnog preseka. Kvadratni poprečni presek ostvaruje veće hidrodinamičke otpore u odnosu na kružni poprečni presek.



Slika 45 – Vrtlozi koji nastaju oko mostovskog stuba

Predlog korekcije zadatka

Pošto smo videli da je za drugi protok bilo neophodno izvršiti korekciju nizvodnog graničnog uslova, možda bi bilo poželjno uraditi simulaciju modela, ali sa produženim kanalom kako ne bi morao da se koriguje nizvodni granični uslov.

Zaključci o NaysCUBE solveru:

Potrebno je veliko strpljenje oko variranja ulaznog parametara, kao što je nizvodni granični uslov.

Nedostaci NaysCUBE solvera:

- dugo trajanje proračuna
- nemogućnost preuzimanja tabelarnog proračuna
- nemogućnost promene geometrije bez da ta stara geometrija bude potpuno obrisana
- nejasno zbog čega proračun nije prošao (nema jasno objašnjenje zbog čega je prekinut proračun).

Literatura

1. Ranka Erić (2016). - Modeliranje turbulencije u okolini mostovskog stuba primenom softverskog paketa I RIC 2.3 - prezentacija za studente doktorskih studija Građevinskog fakulteta
2. Cvetković Marko (2015). – Master rad
3. John D. Anderson, JR. (1995). - Computational Fluid Dynamics-The basics with applications