

1. Uvod

Cilj ove vježbe je uspostava trodimenzionalnog numeričkog modela strujanja za pravokutne bazene s duljinom 5000m, širinama 500m i 5000m te s dubinama 10m i 20m. Strujanje je inducirano homogenim poljem vjetra s brzinama vjetra od 10m/s i 20m/s. Vjetar se linearno pojačava od inicijalne vrijednosti 0m/s do konačne vrijednosti tijekom perioda „zagrijavanja“ modela od 3600s. Nadalje, varirana je horizontalna i vertikalna rezolucija modelske domene. Nakon postizanja stacionarnog polja strujanja i denivelacije vodnog lica, uspoređuju se vertikalni profili brzine strujanja i kinematskog koeficijent turbulente viskoznosti dobiveni modelom i proračunati temeljem analitičkih (teoretskih) izraza.

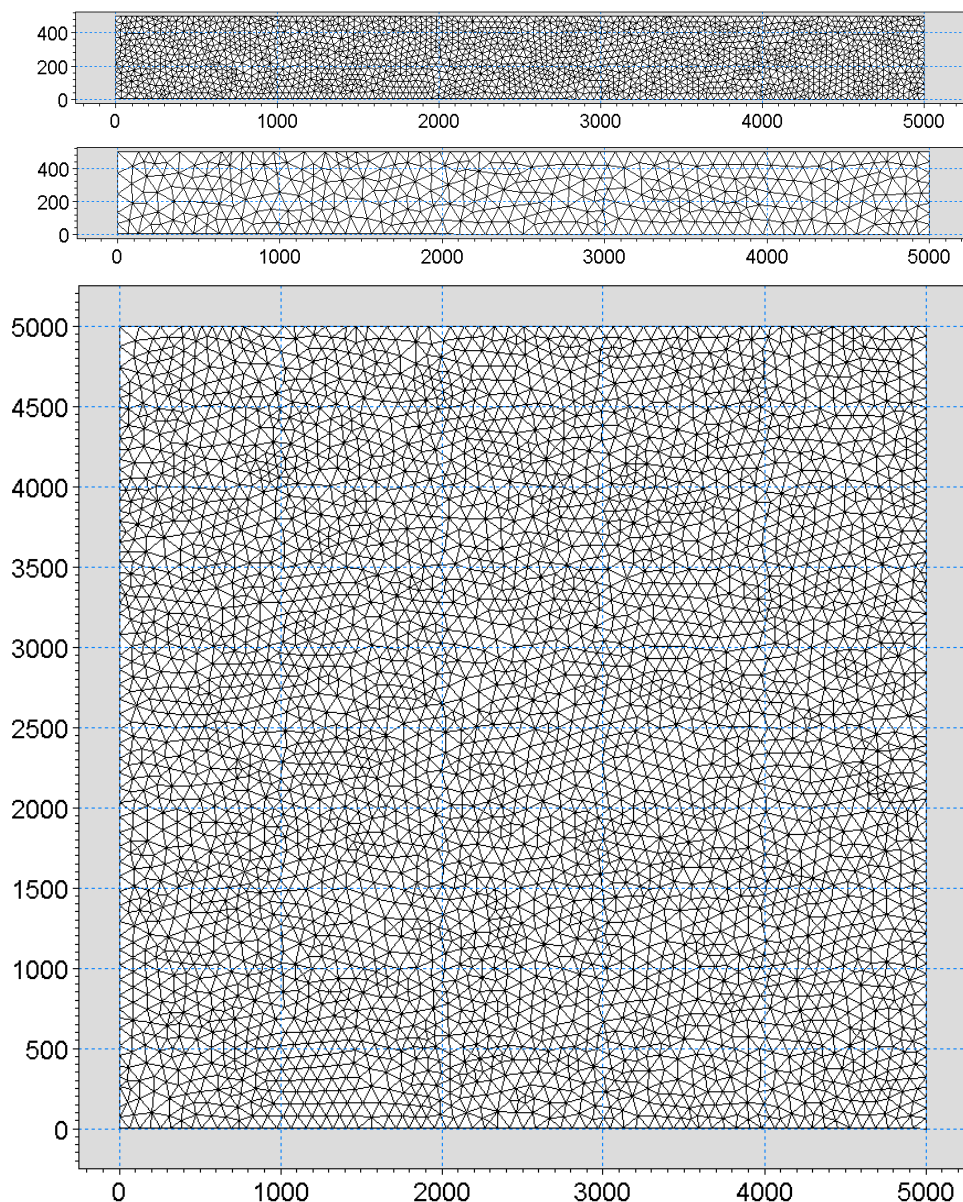
2. Prostorna domena problema i provedeni pokusi

Modelske domene s prostornom diskretizacijom u vidu nestrukturirane mreže prikazane su na slici 2.1. Horizontalni prostorni korak između težišta diskretizacijskih trokutnih ćelija (proračunskih čvorova) je od 50-80m u slučaju grublje rezolucije i 20-30m u slučaju finije prostorne rezolucije. U vertikalnom smjeru korišteno je 10 i 20 vertikalnih slojeva s ekvidistantnim debljinama slojeva. Gustoća tekućine je homogena u vertikalnom i horizontalnom smjeru. Nomenklatura provedenih analiza, zajedno s karakterističnim modelskim obilježjima prikazana je u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Nomenklatura provedenih analiza s karakterističnim modelskim obilježjima

analiza	hor. rez. (m)	vert. rez. (slojevi)	dubina (m)	širina (m)	brzina vjetra (m/s)
1	50-80	10	10	500	10
2	50-80	10	10	500	20
3	50-80	20	10	500	10
4	50-80	20	10	500	20
5	50-80	20	20	500	10
6	50-80	20	20	500	20
7	20-30	10	10	500	10
8	20-30	10	10	500	20
9	50-80	10	10	5000	10
10	50-80	10	10	5000	20
11	50-80	20	20	5000	10
12	50-80	20	20	5000	20
13	20-30	10	10	5000	10
14	20-30	10	10	5000	20

U svima analizama vjetar puše s lijeve na desnu stranu modelske domene.



Slika 2.1 Modelske domene s prostornom diskretizacijom u vidu nestrukturirane mreže (gore – finija proračunska mreža s prostornm korakom 50-80m između težišta diskretizacijskih trokutnih ćelija; sredina i dolje – grublja proračunska mreža s prostornm korakom 20-30m između težišta diskretizacijskih trokutnih ćelija)

U parametrizaciji modela korištene su iste vrijednosti konstanti za sve provedene analize. Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije (TKE) i disipacije (ε) usvojeni su s vrijednostima 1 (TKE) i 1.3 (ε) u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Hrapavost i Smagorinsky koeficijent u modelu su usvojeni kao prostorno homogeni s vrijednostima 0.01m i 0.28. Koeficijent trenja (povlačenja) vjetra usvojen je s vrijednosti 0.002425.

3. Teorijski model

Vjetar uzrokuje površinsko naprezanje τ_W s intenzitetom:

$$\tau_W = \rho_A C_D U_w |U_w| \quad (2.1)$$

gdje je: ρ_A gustoća zraka ($1,23\text{kg/m}^3$); C_D koeficijent povlačenja vjetra (0.002425); U_w brzina vjetra na 10m od površine. Uz pretpostavku da je dubina bazena d znatno veća od denivelacije vodnog lica Δh uzduž simetrale bazena duljine L (uslijed djelovanja vjetra; eng: wind set-up) ravnoteža sila može se napisati u obliku (bazen ispunjen vodom s gustoćom $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$):

$$\rho g d \frac{\Delta h}{L} = \tau_W \quad (2.2)$$

Na određenoj udaljenosti L od lijevog ruba bazena, uzduž simetrale bazena, očekuje se izdizanje Δh u odnosu na najnižu kotu vodnog lica koja se pojavljuje na lijevom rubu bazena:

$$\Delta h = \frac{\tau_W L}{\rho g d} \quad (2.3)$$

Uslijed djelovanja vjetra formirati će se tzv. baroklini vertikalni profil brzina karakteriziran s površinskim strujama koje prate smjer djelovanja vjetra i kompenzacijskim strujama u dubljim slojevima koje su suprotnog smjera. Profil brzina na određenoj udaljenosti od početka kanala po teoretskom modelu opisan je logaritamskim zakonom:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left(1 + \ln \frac{-z}{h} \right) \quad (2.3)$$

gdje je: u brzina strujanja na dubini z (gledano od površine); h dubina na poziciji promatranog vertikalnog profila; κ Karmanova konstanta (0,41); $u_* = \max(u_*^W, u_*^B)$ brzinsko naprezanje na površini i dnu $u_*^W = \sqrt{\tau_W / \rho}$; $u_*^B = \sqrt{\tau_B / \rho}$.

Usvajanjem logaritamskog profila brzina moguće je odrediti i vrijednosti kinematskog koeficijenta turbulentne viskoznosti temeljem izraza:

$$\nu_T = u_* \kappa h \frac{-z}{h} \left(1 - \frac{-z}{h} \right) \quad (2.4)$$

4. Rezultati provedenih analiza

Rezultati provedenih numeričkih modelskih analiza uspoređuju se s rezultatima teoretskog proračuna. Kontrolna točka KT za koju se provodi usporedba definirana je koordinatom ($x=2500\text{m}$, $y=250\text{m}$) u slučaju užeg bazena i ($x=2500\text{m}$, $y=2500\text{m}$) u slučaju šireg bazena.

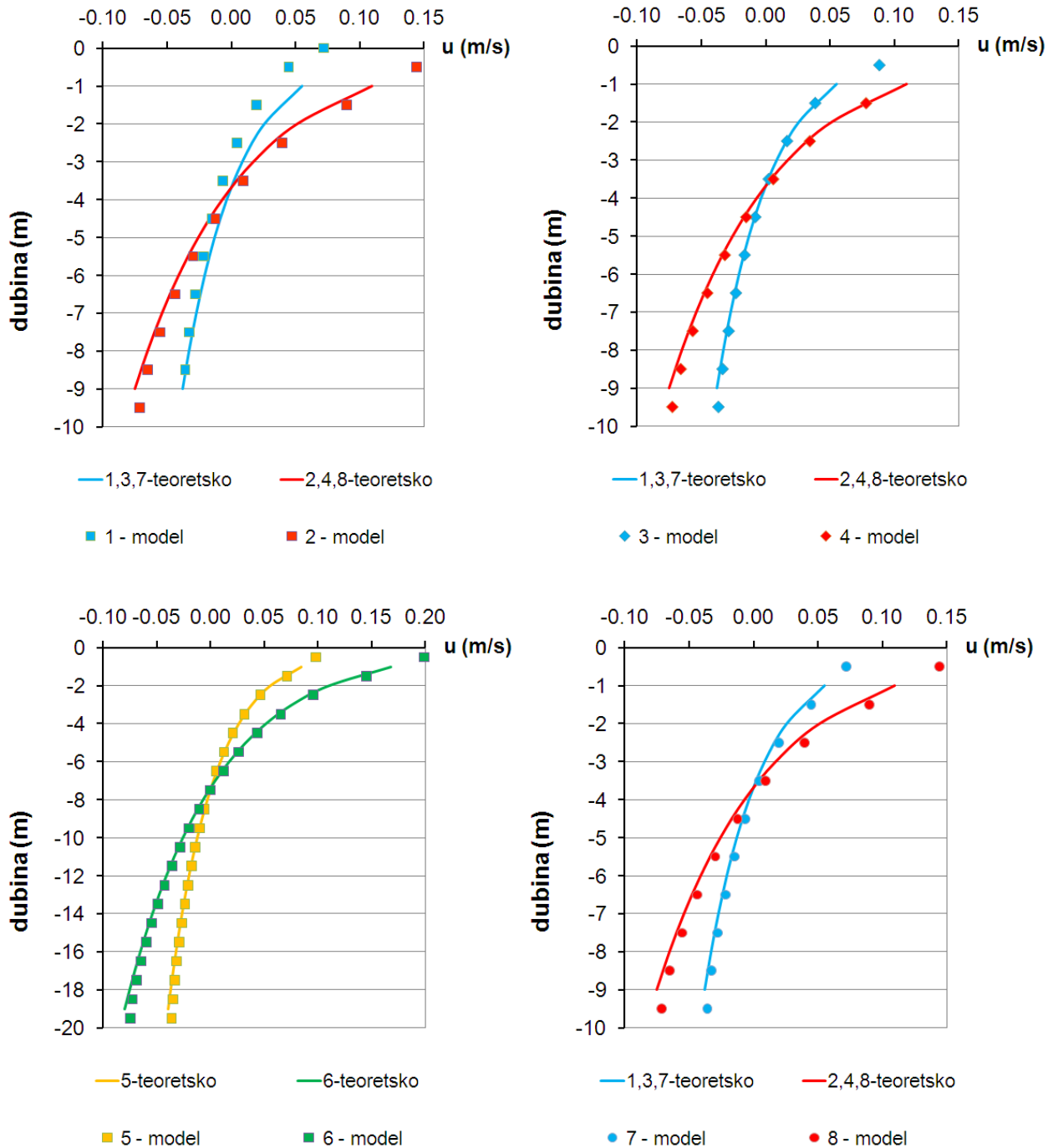
Prvo se uspoređuju denivelacije površine Δh za poziciju kontrolne točke KT. U tablici 4.1 prikazani su rezultati.

analiza	dubina (m)	ρ_o (kg/m ³)	C_D (1)	U_w (m/s)	Δh (m) – teor.	Δh (m) – model
1	10	1,23	0,002425	10	0,008	0,008
2	10	1,23	0,002425	20	0,030	0,032
3	10	1,23	0,002425	10	0,008	0,008
4	10	1,23	0,002425	20	0,030	0,032
5	20	1,23	0,002425	10	0,004	0,004
6	20	1,23	0,002425	20	0,015	0,016
7	10	1,23	0,002425	10	0,008	0,008
8	10	1,23	0,002425	20	0,030	0,032
9	10	1,23	0,002425	10	0,008	0,008
10	10	1,23	0,002425	20	0,030	0,032
11	20	1,23	0,002425	10	0,004	0,004
12	20	1,23	0,002425	20	0,015	0,016
13	10	1,23	0,002425	10	0,008	0,008
14	10	1,23	0,002425	20	0,030	0,032

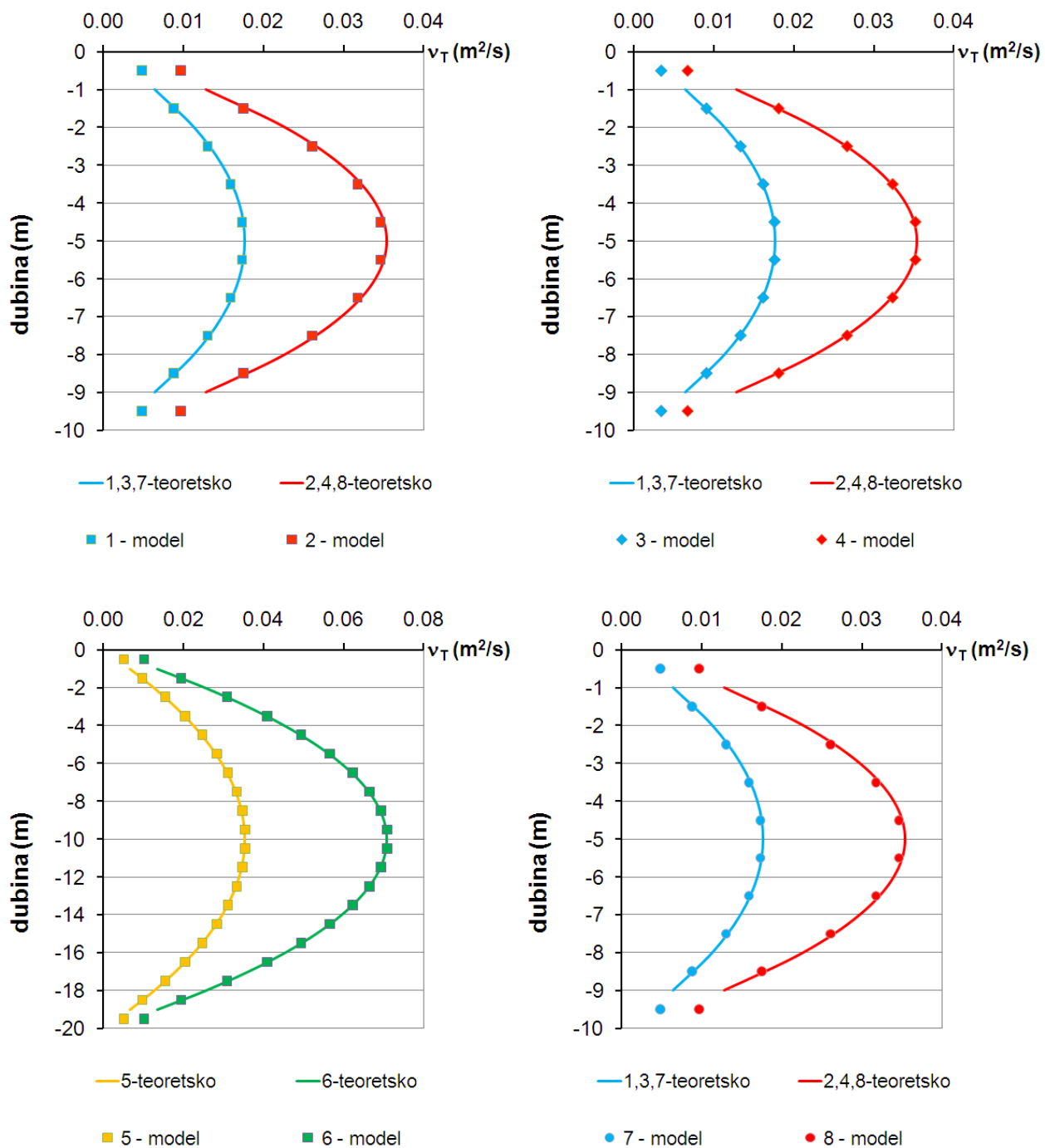
Na slici 4.1 prikazana je usporedba vertikalnih profila brzina za poziciju kontrolne točke, dobivenih modelom i teoretskim jednadžbama. Na slici 4.2 prikazana je usporedba vertikalnih profila kinematskog koeficijenta turbulentne viskoznosti za poziciju kontrolne točke, dobivenih modelom i teoretskim jednadžbama. Prikazanim rezultatima obuhvaćene su analize 1,2,3,4,5,6,7,8 (vidi tablicu 2.1).

Rezultati modelskih analiza i teoretskih proračuna su vrlo bliski. Promjena dubine nije utjecala na odstupanje modelskih i teorijskih rezultata, kao ni promjena brzine vjetra. Promjena širine analiziranog bazena također nije utjecala na rezultate. Jedino izraženije odstupanje pojavljuje se u površinskom djelu profila brzina iz analiza 1 i 2 (dubina bazena $d=10\text{m}$), u kojima se koristi grublja proračunska mreža u horizontalnom smjeru i 10 slojeva u vertikalnom smjeru (slika 4.1 gore lijevo). Povećanjem vertikalne modelske rezolucije na 20 slojeva (analize 3,4) ili horizontalne rezolucije proračunske mreže na 20-30m (analize 7,8) smanjeno je odstupanje rezultata modelskih i teoretskih proračuna.

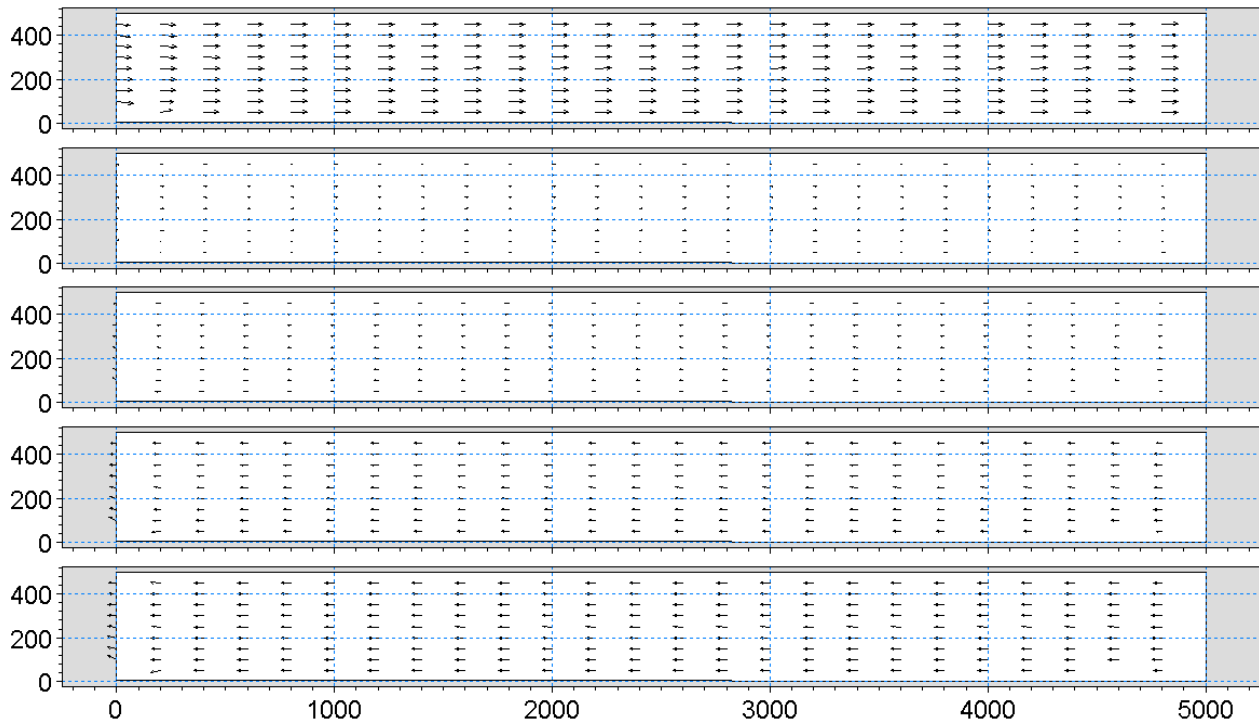
Na slikama 4.3 i 4.4 prikazana su polja brzina za dubine 1, 3, 5, 7 i 9m, dobivena provedbom analiza 3 i 4.



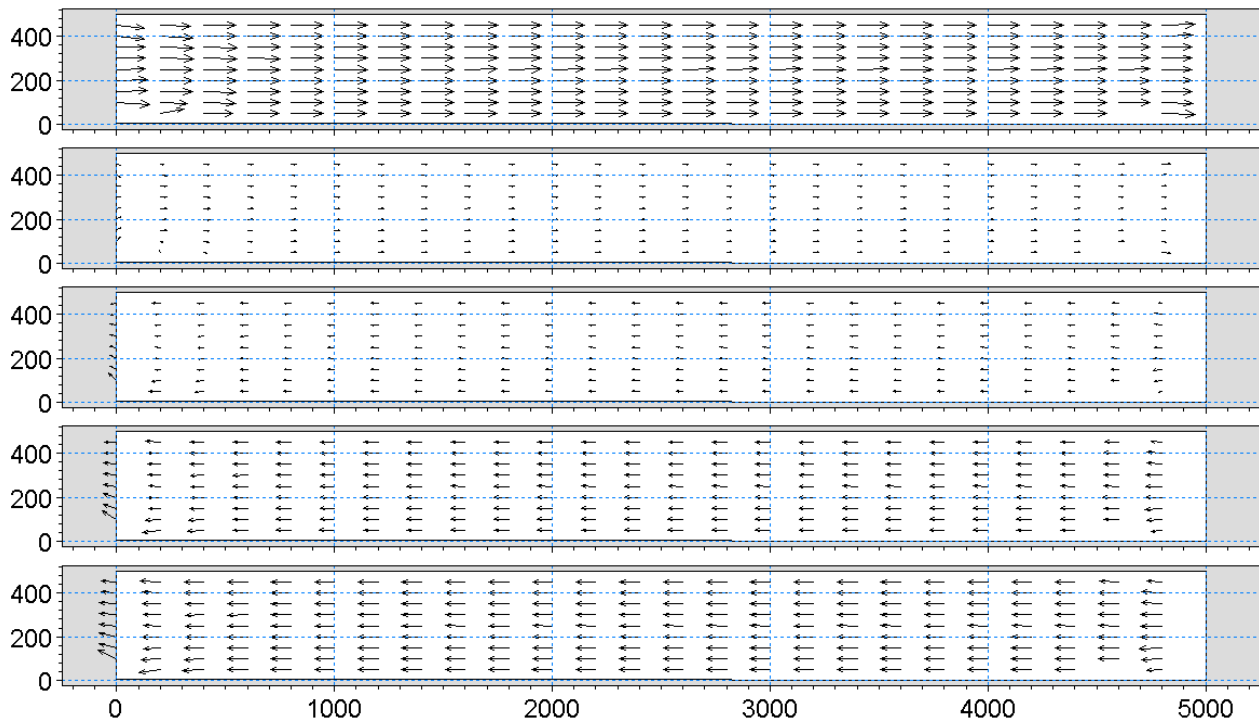
Slika 4.1 Usporedba vertikalnih profila brzina za poziciju kontrolne točke, dobivenih modelom i teoretskim jednadžbama (analize 1,2,3,4,5,6,7,8)



Slika 4.2 Usporedba vertikalnih profila kinematskog koeficijenta turbulentne viskoznosti za poziciju kontrolne točke, dobivenih modelom i teoretskim jednadžbama (analize 1,2,3,4,5,6,7,8)



Slika 4.3 Polja brzina za dubine 1, 3, 5, 7 i 9m dobivena analizom 3 (dubina 10m ; brzina vjetra 10m/s)



Slika 4.4 Polja brzina za dubine 1, 3, 5, 7 i 9m dobivena analizom 4 (dubina 10m ; brzina vjetra 20m/s)

5. Korišteni numerički model

Numerički model Mike 3fm (www.dhigroup.com) temelji se na fleksibilnom diskretizacijskom pristupu a njegov hidrodinamički modul numerički rješava 3D Reynolds-ove jednadžbe uz usvajanje Boussinesqove pretpostavke o hidrostatskoj razdiobi tlaka u vertikalnom smjeru. Morska razina uzima se preko sigma-koordinatnog pristupa. Za diskretizaciju jednadžbi se koristi metoda konačnih volumena, bazirana na jednoj ćeliji i podjeli kontinuuma s nepreklapajućim elementima. U horizontalnom smjeru korištena je nestrukturirana a u vertikalnom smjeru strukturirana diskretizacija. Za izračunavanje konvektivnog toka koristi se približni Riemann-ov solver čime je omogućeno računanje i u slučajevima diskontinuiranih rješenja. Za vremensku integraciju se koristi polu implicitni pristup, gdje se horizontalni parametri tretiraju eksplicitno a vertikalni implicitno. Modul turbulencije koristi k- ϵ formulaciju u vertikalnom smjeru i Smagorinsky koncept u horizontalnom smjeru (vidi poglavlje A6 i primjer 1).