

# Numerički modeli zajedničkog rada podmorskih ispusta otpadnih voda

Goran Lončar, Roko Andričević, Vedran Petrov

## Ključne riječi

podmorski ispušt, numerički modeli, otpadne vode, stratifikacija, Brački kanal, Splitski kanal

## Key words

subsea outfall, numerical models, waste water, stratification, Brač canal, Split canal

## Mots clés

exutoire sous-marin, modèles numériques, eaux usées, stratification, canal de Brač, canal de Split

## Ключевые слова

## Schlüsselworte

Unterseeauslauf, numerische Modelle, Abwässer, Stratifizierung, Kanal von Brač, Kanal von Split

G. Lončar, R. Andričević, V. Petrov

Pregledni rad

## Numerički modeli zajedničkog rada podmorskih ispusta otpadnih voda

Na području gradova Splita, Solina, Kaštela i Trogira nadograđuju se postojeći kanalizacijski sustavi s uređajima za pročišćavanje otpadnih voda i podmorskim ispuštima. Prikazuju se rezultati proračuna utjecaja postojećih ispusta Katalinića brig, Stobreč, Duilovo, Hotel Lav, Omiš, Sutivan na Braču i planiranih ispusta Čiovo, Supetar na Braču i Podstrana na stanje akvatorija Bračkog i Splitskog kanala u pogledu prostorne i vremenske dinamike koncentracije fekalnih koliforma.

G. Lončar, R. Andričević, V. Petrov

Subject review

## Numerical models for joint operation of subsea wastewater outfalls

The existing sewerage systems are currently being improved, by adding wastewater purification devices and subsea outfalls, in the towns of Split, Solin, Kaštela and Trogir. The authors present the results obtained by the analysis of environmental impacts of the existing outfalls at Katalinić brig, Stobreč, Duilovo, Hotel Lav, Omiš, Sutivan (on the Brač Island), and of the planned outfalls for Čiovo, Supetar (on the Brač Island) and Podstrana, specifically relating to the space and time concentration of faecal coliforms.

G. Lončar, R. Andričević, V. Petrov

Ouvrage de synthèse

## Modèles numériques pour l'opération conjuguée des exutoires sous-marins

Les systèmes d'égouts existants sont en train d'être améliorés, par l'introduction des usines de traitement des eaux usées et des exutoires sous-marins, dans les villes de Split, Solin, Kaštela et Trogir. Les auteurs présentent les résultats obtenus par l'analyse de l'impact sur l'environnement des exutoires déjà aménagés à Katalinić brig, Stobreč, Duilovo, Hotel Lav, Omiš, Sutivan (sur l'île de Brač), et des exutoires planifiés à Čiovo, Supetar (sur l'île de Brač) et Podstrana, notamment en ce qui concerne l'espace et le temps de concentration des coliformes fécaux.

G. Lončar, R. Andričević, V. Petrov

Übersichtsarbeit

## Numerische Modelle der gemeinsamen Arbeit der Unterseeausläufe für Abwässer

Im Bereich der Städte Split, Solin, Kaštela und Trogir werden bestehende Abwässersysteme mit Abwässerreinigungsanlagen und Unterseeausläufe angebaut. Dargestellt sind die Ergebnisse der Berechnung des Einflusses der bestehenden Ausläufe Katalinića brig, Stobreč, Duilovo, Hotel Lav, Omiš, Sutivan na Braču und der geplanten Ausläufe Čiovo, Sutivan na Braču und Postrana auf den Zustand des Aquatoriums der Kanäle von Brač und Split vom Blickpunkt der Raum- und Zeitdynamik der Konzentration von Fäkalkoliformen.

Autori: Doc. dr. sc. **Goran Lončar**, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; prof. dr. sc. **Roko Andričević**; **Vedran Petrov**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu;

## 1 Uvod

Dinamika analiziranog procesa pronosa efluenta u naravi je izraženije vertikalno promjenjljiva u razdoblju od sredine svibnja (formiranje stratifikacije) do sredine listopada, kada dolazi do ponovne homogenizacije *termohalinskih* svojstava po cijeloj vertikali. Pronos efluenta izraženog u obliku koncentracije fekalnih koliforma na prostornoj domeni numeričkog modela analiziran je kao nestacionaran uz punu prostornu i vremensku varijabilnost hidrauličkih parametara (dubina, hrapavost, hod morskih razina, protok/brzina/smjer na ispuštima, gustoća/salinitet/temperatura, disperzija) i meteoroloških parametara (trajanje dnevne svjetlosti u svakom pojedinom danu, broj sunčanih sati, raspodjela dozračne sunčeve energije, koeficijent svjetlosnog prigušenja, prozirnosti, intenzitet i smjer djelovanja vjetra). Za analizu cjelokupnog područja Splitskog i Bračkog kanala u kojem se nalaze (Katalinića brig, Stobreč, Duilovo, Hotel Lav, Omiš, Sutivan na Braču) ili su projektom predviđeni (Čiovo, Supetar na Braču i Podstrana) podmorski ispusti uporabljeni su 3D i 2D numerički modeli MIKE 3 i MIKE 21 [1,2,3,4,5]). Numerički model upotrebljava 4 modula, PP-pretprocesiranje/postprocesiranje podataka, HD-hidrodinamički modul, AD-konvektivno disperzivni modul, ECO LAB-ekološki modul za analizu bilo koje pojave vezane za kvalitetu vode ili eutrofikaciju. PP je modul koji se rabi za pretprocesiranje/postprocesiranje te grafičku interpretaciju vrijednosti parametara u prostornoj i vremenskoj domeni modula numeričkog modela. HD model jest osnovni modul koji daje rješenja hidrodinamike strujanja na modeliranom području sa svim vanjskim utjecajima poput djelovanja prostorno i vremenski varijabilnog vjetra, saliniteta, temperature i toplinske izmjene s atmosferom te svim vrstama ponora i izvora. AD modul služi za analizu konvektivno – disperzivnog pronosa topline i mase otopljene ili suspendirane tvari (bilo koje vrste), i to na osnovi dobivene slike strujanja iz HD modula. Analiza prostorne i vremenske raspodjele koncentracija fekalnih koliforma ostvaruje se modulom ECO-LAB koji se ponovno oslanja na rješenje hidrodinamike strujanja i pronosa odnosno rješenja dobivena iz HD i AD modula. Ovi numerički moduli za ulazne parametre odnosno za njegovu kvalitetnu upotrebu primjenjuju veliki broj raspoloživih podataka (hidrauličkih, ekoloških i klimatoloških karakteristika) na cijelom modeli-

ranom području, osnovanim na stvarno izmjerenim vrijednostima u naravi. Za vrijednosti početnih i rubnih uvjeta uporabljenih u sklopu 3D i 2D numeričkih modela odnosno za njegovu kvalitetnu upotrebu iskorišten je velik broj raspoloživih podataka (hidrauličkih, ekoloških i meteoroloških karakteristika) na cijelom modeliranom području, a osnovanim na stvarno izmjerenim vrijednostima u naravi [6,7,8,9,10,11,12,13].

## 2 Odabir prostorne domene numeričkih modela

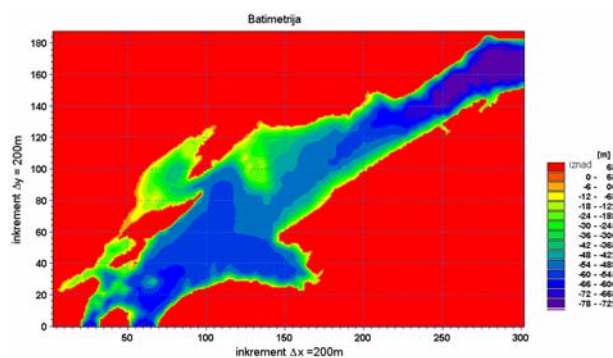
Numeričko modeliranje provedeno je na prostornoj domeni prikazanoj na slici 1. s ucrtanim otvorenim granicama i položajima difuzora podmorskih ispusta. Batimetrija na modeliranom području dobivena je iz digitalizirane batimetrijske karte (WorldSeaCharts, DHI-2005) te bilinearnom interpolacijom na području numeričkih čvorova u kojima nema direktne registrirane dubine. Na slici 2. dan je 3D prikaz batimetrije na području obuhvaćenom numeričkim modelom. U tablici 1. je prikaz projektnih najvećih protoka i koncentracija koliforma na izlazima iz sapnica difuzora.



Slika 1. Prostorna domena numeričkog modela s otvorenim granicama i položajima difuzora podmorskih ispusta

Tablica 1. Podmorski ispusti (najveći projektni protoci, brzine na sapnicama difuzora, stupanj pročišćavanja, koncentracija koliforma)

Ispust	Q <sub>max</sub> (l/s)	V sapnice (m/s)	Stupanj pročišćavanja	FC (num./100ml)
Stobreč	1900	3	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Katalinića brig	1250	3	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Čiovo	800	3	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Omiš	200	3	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Duilovo	120	2.5	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Supetar	100	2.5	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Sutivan	100	2.5	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Hotel Lav	80	2.5	mehaničko	10 <sup>7</sup>
Podstrana	80	2.5	mehaničko	10 <sup>7</sup>

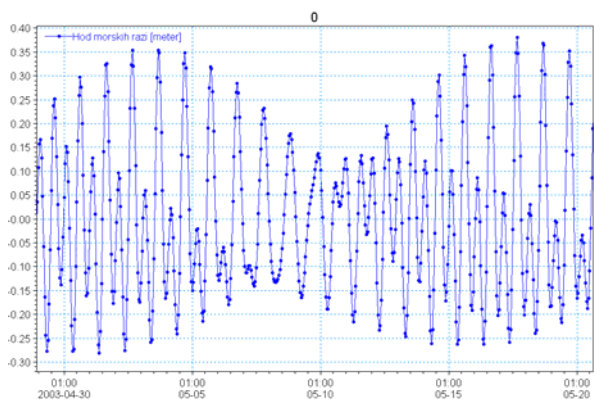


Slika 2. 3D prikaz batimetrije na prostornoj domeni obuhvaćenoj numeričkim modelom

Prostorni je inkrement numeričkog modela  $\Delta x = \Delta y = 200$  m i  $\Delta z = 1$  m (73 vertikalna sloja), uz vremenski inkrement numeričkog modela  $\Delta t = 20$  s. Numerički model ima 750 000 numeričkih čvorova.

### 3 Analizirani period, rubni uvjeti modela i dinamika rada podmorskih ispusta

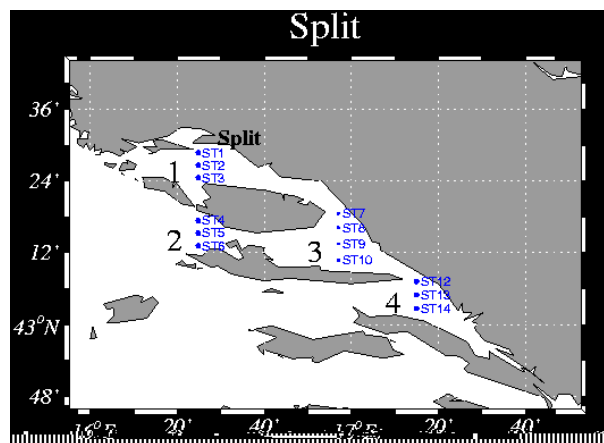
3D i 2D numeričkim modelima strujanja i pronosa fekalnih koliforma obuhvaćeno je razdoblje 29.4. do 14.5.2003. godine budući da u tom razdoblju počinje formiranje stratifikacije a počinje i sezona kupanja. Za vrijednosti dinamike amplituda i faza na otvorenim granicama upotrijebljene su komponente M2, K1, S2 i O1 [14,15,16]. Za otvorene granice oko Velikog Drvenika označene zelenom bojom na slici 1. upotrijebljene su vrijednosti referentne za položaj Rogoznica (Lat 43,53 ; Long 16, 97), za otvorenu granicu između Šolte i Brača vrijednosti referentne za položaj Split i Vis (Lat 43,5 ; Long 16, 43), a za istočnu otvorenu granicu označenu plavom bojom vrijednosti referentne za položaj Split i Ploče (slika 3.).



Slika 3. Hod morskih razina na rubnim uvjetima dobivenim putem harmonijske analize 4 osnovna konstituenta (M2, K1, S2, O1) u analiziranom razdoblju

Vrijednosti saliniteta, temperature mora, solarne radijacije, naoblake, temperature zraka i vlažnosti zraka dobivene su iz mjerenja u sklopu projekta ADRICOSM [8]

(slike 5. do 9.), insolacija u podne (najmanja izmjerena vrijednost za svibanj) iz [9], prozornost mora  $SD = 12$  m je najmanja vrijednost registrirana mjerenjem na cijelom području prostorne domene [7]. Rijeke Jadro i Cetina analizirane su kao izvori količine gibanja s vremenski varijabilnim protocima, temperaturama i salinitetom. Kao ulazni podaci za numerički model upotrijebljeni su hidrografi s hidrografskih mjernih postaja koje su najbliže samom položaju ušća zajedno sa mjesečnom varijacijom temperatura [17].

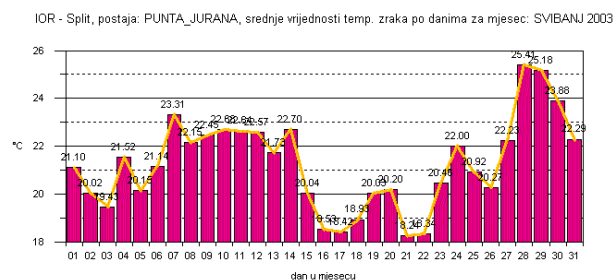


Slika 4. Položaj CTD-sonda upotrijebljenih u sklopu projekta ADRICOSM

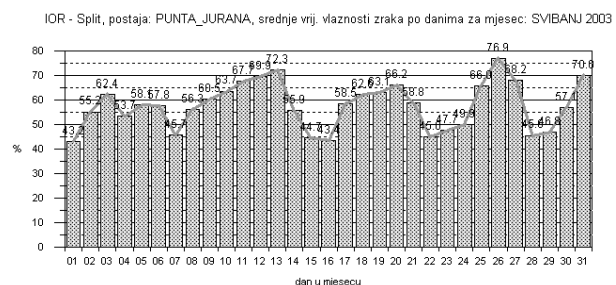
Za rubne uvjete vertikalne raspodjele saliniteta i temperatura numeričkog modela upotrijebljene su izmjerene vrijednosti sa CTD sonde ST7 za «istočnu» granicu numeričkog modela između Brača i kopna, a ST4 za «srednju granicu između Brača i Šolte. S obzirom na to da u istim terminima nije bilo provedeno mjerenje na poziciji koja bi odgovarala položaju „zapadnih“ otvorenih granica oko Velikog Drvenika, upotrijebljene su srednje vrijednosti između izmjerenih na ST2 i ST4. Kako su horizontalni gradijenti gustoće dominantni generatori strujanja u kanalima takvog tipa, usvajanje osrednjenih vrijednosti dovodi u pitanje i pouzdanost dobivenih numeričkih rješenja. Na slici 4. prikazan je položaj CTD-sondi upotrijebljenih u sklopu projekta ADRICOSM. Početni uvjeti (prostorni raspored saliniteta i temperatura) na modelskoj domeni usvojen je na temelju izmjerenih vrijednosti sa CTD sonda ST 1,2,3,4,7 (29.4.2003.) koje su bilinearne interpolirane horizontalno i vertikalno na područje cjelokupne prostorne domene numeričkog modela.

Podaci o vremenskoj varijabilnosti brzine i smjera vjetrova preuzeti su iz registriranog zapisa sekundnih vrijednosti i obrade 10 - minutnih srednjaka s anemometra postavljenog na lokaciji meteorološke stanice DHMZ Marjan. Ruža vjetrova 10-minutnih srednjaka za cjelokupni svibanj nalazi se na slici 10. Anemometar na mjernejoj postaji Split-Marjan postavljen je na visini 145 m n.m. Numerički se model koristi vrijednostima brzina 10 m n.m.

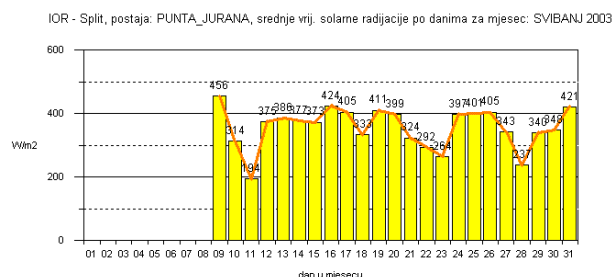
Smanjenje brzina vjetra s obzirom na izmjerene vrijednosti na 145 m n.m. dobiveno je izrazom za vertikalnu raspodjelu brzina u vjetrenom graničnom sloju  $v_2 = v_1 (z_2 / z_1)^\alpha$ , gdje su  $v_1$  i  $v_2$  brzine na visinama  $z_1$  i  $z_2$ , a koeficijent raspodjele brzine vjetra usvojen je s vrijednosti  $\alpha = 0,16$  [18, 19]. Konačno, odnos između brzina 10 m iznad mora (uporabljenih u numeričkom modelu) i izmjerenih na 145 m n.m iznosi  $v_{10} = 0,65 v_{145}$ -Marjan.



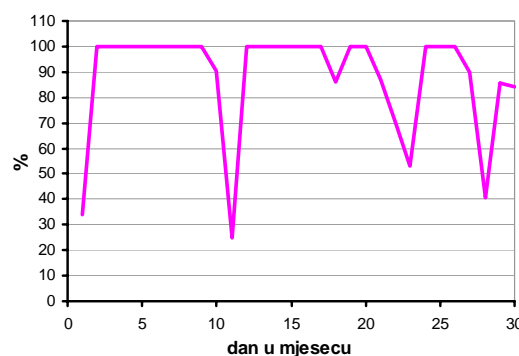
Slika 5. Dnevno osrednjene vrijednosti temperatura zraka [3]



Slika 6. Dnevno osrednjene vrijednosti vlažnosti zraka [3]

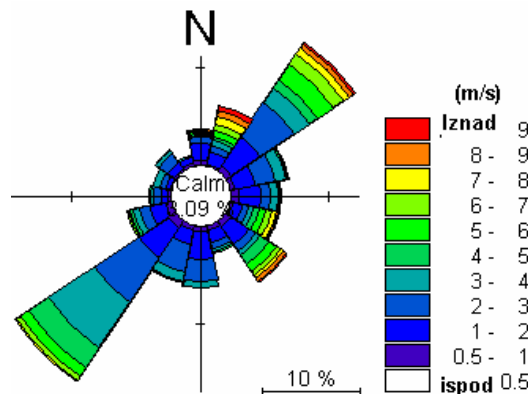


Slika 7. Dnevno osrednjene vrijednosti solarne radijacije [3]

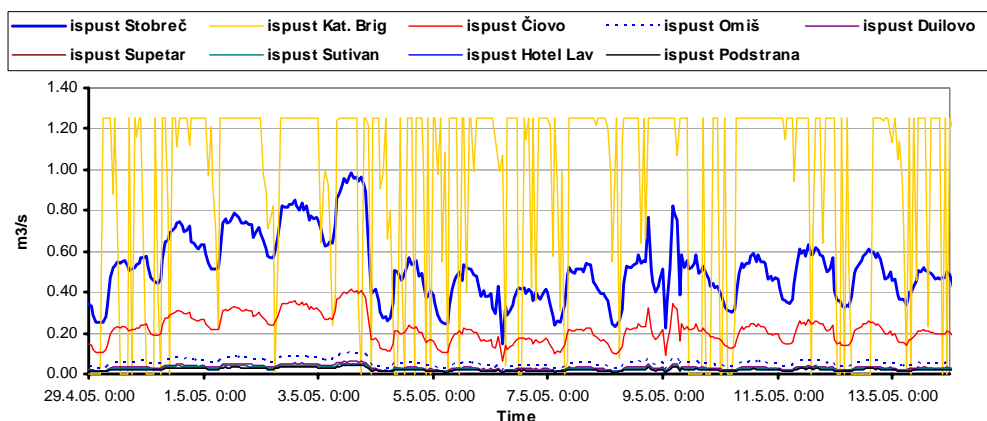


Slika 8. Srednje dnevne vrijednosti naoblake odnosno čistine (eng. «clearness») za svibanj 2003. godine[3]

Koeficijenti turbulentne disperzije promatanih polja u pronosu proporcionalni su kinematskom koeficijentu turbulentne viskoznosti za količinu gibanja s koeficijentom proporcionalnosti 1 za horizontalni i 0,5 za vertikalni smjer [20, 21, 22, 23]. Za faktor prigušenja kinematskog koeficijenta turbulentne viskoznosti u vertikalnom smjeru prema formulaciji Munk - Andersona (1948.) usvojena je vrijednost 10 [24].



Slika 10. Ruža vjetrova na temelju 10-minutnih srednjaka izmjerenih na mjernoj postaji Split-Marjan za svibanj 2003. godine

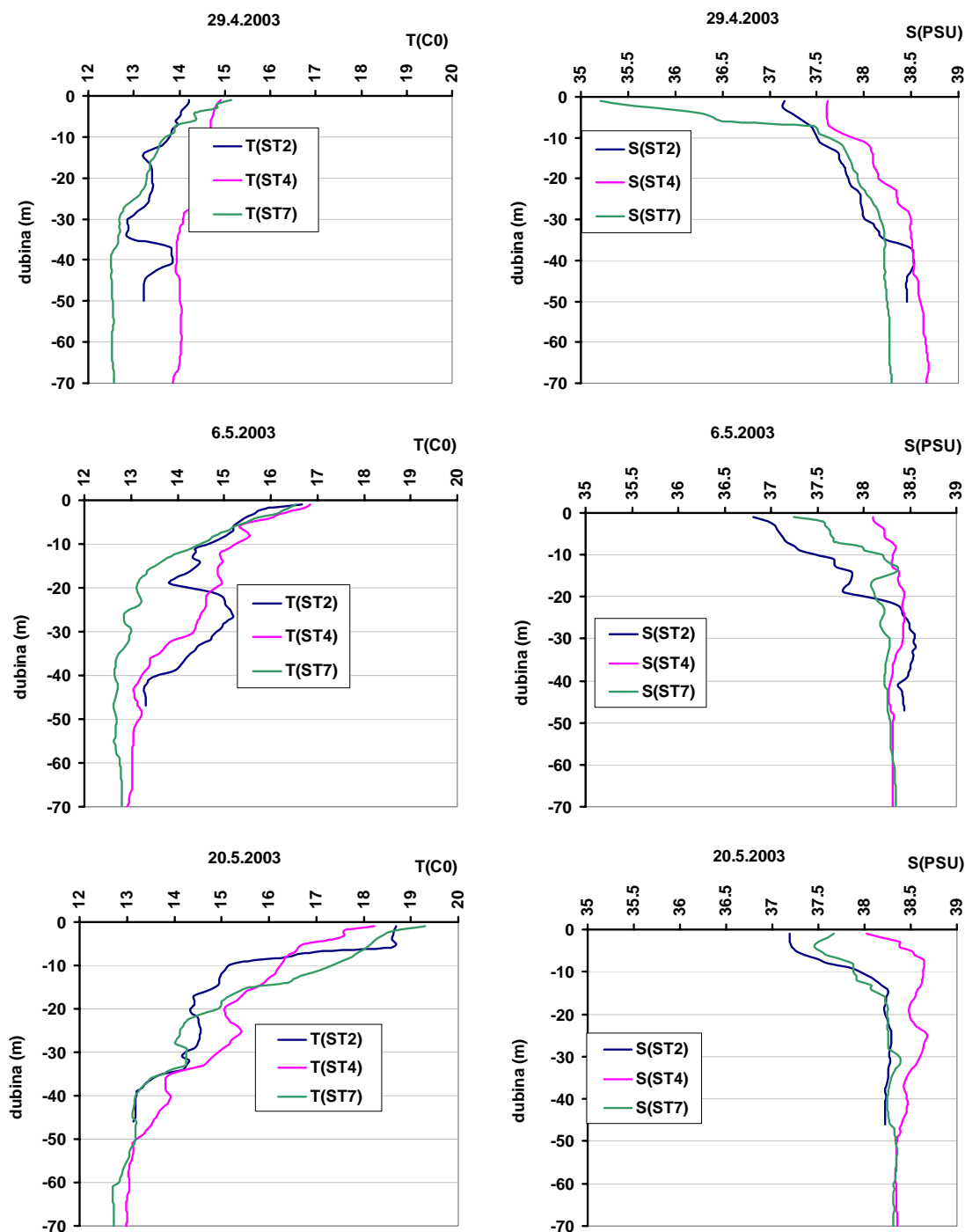


Slika 11. Prikaz dnevne dinamike protoka upuštanja za analizirano razdoblje

U tablici 1. prikazane su najveće projektne satne vrijednosti protoka upuštanja. U okviru numeričkog modela, a vezano za analizirano razdoblje svibnja iskorištene su realne vrijednosti protoka upuštanja snimljene na podmorskom ispustu Katalinića brig. Stvarno snimljene vrijednosti na podmorskom ispustu Stobreč uvećane su množenjem s koeficijentom 1,9/0,86, koji predstavlja omjer između sadašnjega i budućega projektog maksimuma

upuštanja. Za ostale podmorske ispuste usvojena je pretpostavka o sličnosti dinamike dnevne razdiobe protoka upuštanja s ispustom Stobreč. Na taj se način dobivaju istodobni projektne maksimumi protoka upuštanja na svim podmorskim ispustima, što je najnepovoljniji scenarij u ekološkom smislu.

Dinamika protoka upuštanja za analizirano razdoblje prikazana je na slici 11.



Slika 9. Vertikalni profili saliniteta i temperatura [3]

#### 4 Numerički modeli

3D numerički model MIKE 3 analizira Newtonov fluid provedbom analize jednadžbe količine gibanja, jednadžbama kontinuiteta za masu, salinitet i unutrašnju energiju te jednadžbama stanja kojom se povezuju lokalne vrijednosti gustoće, saliniteta, temperature i tlaka. MIKE 3 rabi matematičku formulaciju jednadžbe kontinuiteta (1), jednadžbe količine gibanja za tri smjera, uključujući učinak turbulencije i varijacije gustoća na temelju Reynoldsovih jednadžbi osrednjenog strujanja (2) i konvektivno-disperzivne jednadžbe pronosa za analizu skalar-nih polja saliniteta, temperatura i koncentracija otopljenih ili suspendirane tvari (3) koje glase:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = SS_{JK} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} \bar{u}_j = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \bar{u}_i SS_{KG} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\Pi}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\Pi}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_i \frac{\partial \bar{\Pi}_i}{\partial x_j} \right) + SS_{JP} \quad (3)$$

gdje je:

- $\rho$  - lokalna gustoća kapljevine,
- $c_s$  - brzina zvuka u promatranom fluidu
- $\bar{u}_i$  - osrednjena komponenta brzine u  $x_i$  smjeru
- $\Omega_{ij}$  - Coriolisov tenzor
- $\bar{p}$  - osrednjeni tlak
- $\nu_T$  - kinematski koeficijent turbulentne viskoznosti
- $\delta$  - Kroneckerova delta
- $k$  - turbulentna kinetička energija
- $t$  - vrijeme
- $D_i$  - koeficijent disperzije za analizirano polje  
( $i = T, S, c$ )
- $SS_i$  - odgovarajući termin ponora ili izvora
- $\bar{\Pi}_i$  - osrednjena vrijednost analiziranog polja u pronosu ( $i = T, S, c$ )

Iako je analizirani fluid u modelu pretpostavljen kao nestlačiv, primjena pripadnih jednadžbi kontinuiteta u sklopu cjelokupnog sustava jednadžbi dovodi do matematički problematičnih uvjeta rješavanja. Taj je problem uklonjen usvajanjem pretpostavke o hidrostatskoj raspodjeli tlakova tako da je tlak na svakoj točki definiran osnovnom informacijom o položaju vodnog lica. No

kako bi se zadržala jednadžba količina gibanja i u vertikalnom smjeru, a koja gubi smisao uz pretpostavku hidrostatske raspodjele tlakova, u MIKE 3 primjenjuje se tzv. metoda umjetne kompresibilnosti [25] pa sustav jednadžbi postaje hiperbolno dominantan. Jednadžbe (4) i (5) rješavaju se metodom konačnih razlika u sklopu hidrodinamičkog modula, a jednadžba (6) rješava se u sklopu konvektivno disperzivnog modula.

Hidrodinamički se modul koristi tzv. ADI (*Alternating Direction Implicit*) tehnikom za integraciju jednadžbi očuvanja mase i količine gibanja u vremenskoj i prostornoj domeni. Matrice jednadžbi rješavaju se DS (*Double Sweep*) algoritmom. Diskretizacija je provedena na Arakawa - C numeričkoj rešetki čime je postignuta točnost drugoga reda. Za analizu transporta primijenjena je 3D QUICKEST-SHARP shema koja je posebno pogodna za slučajeve naglašenih gradijenata i pripada skupini tzv. CWC shema (*Consistency With Continuity*) kojima se osigurava konzistentnost s jednadžbom kontinuiteta mase u hidrodinamičkom modulu.

Naprezanja na dnu definirana su jednadžbom (4) a s obzirom na standardni 3D  $k-\varepsilon$  model turbulencije pretpostavlja se logaritamski profil brzina definiran prema jednadžbi (5).

$$\tau_0 / \rho = C_d u^* |u^* \quad (4)$$

$$C_d = \left[ \frac{1}{\kappa} \log \left( \frac{2}{k_s / 30} \right) \right]^{-2} \quad (5)$$

gdje je:

- $C_d$  - koeficijent otpora dna,
- $u^*$  - proračunana brzina u prvom numeričkom diskretizacijskom čvoru iznad dna
- $k_s$  - duljinska mjera hrapavosti
- $\kappa$  - von Karmanova konstanta.

Postojanje izvora i ponora s intenzitetom  $Q_0$  i brzinom  $U_0$  uz odgovarajući horizontalni ( $\sigma$ ) i vertikalni ( $\varphi$ ) kut prema horizontalnoj ravnini u numeričkom modelu uzeto je u obzir putem jednadžbi (6) za  $x, y$  i  $z$  smjer ( $\theta_{NYC}$  - orijentacija koordinatnih osi modela):

$$\begin{aligned} \frac{Q_0}{\Delta x \Delta y \Delta z} U_0 \sin(\sigma - \sigma_{NYC}) \cos \varphi \\ \frac{Q_0}{\Delta x \Delta y \Delta z} U_0 \cos(\sigma - \sigma_{NYC}) \cos \varphi \quad \frac{Q_0}{\Delta x \Delta y \Delta z} U_0 \sin \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

Utjecaj vjetra u modeliranom području obuhvaćen je silom (naprezanja) po vodnom licu izraženom u obliku kvadratnog zakona :

$$\tau_w = C_W \frac{\rho_{zrak}}{\rho_{voda}} V^2 \quad (7)$$

gdje je:

$C_w$  - koeficijent trenja (usvojena vrijednost 0,0016)

$V$  - brzina vjetra 10 m iznad površine vode.

Uporabljen je standardni k- $\varepsilon$  model turbulencije koji se oslanja na rad Rodija (1980., [26]) u kojem su jednadžbe za turbulentnu kinetičku energiju i disipaciju definirane na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_T \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \beta g_j \frac{\nu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \Delta}{\partial x_j} - \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left( \nu_T \left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} + c_{3\varepsilon} \beta g_j \frac{\nu_T}{\sigma_T} \frac{\partial \Delta}{\partial x_j} \right) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

gdje su:

$c_{1\varepsilon}$ ,  $c_{2\varepsilon}$ ,  $c_{3\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $\sigma_T$  - empiričke konstante (0,09; 1,44; 1,92; 0; 1; 1,3; 0,9)

$\beta$  - obujamski koeficijent ekspanzije

$\Delta$  - skalarna veličina uzgorskog djelovanja zbog razlike u gustoći.

Modul za analizu toplinske izmjene u MIKE 3 proračunava četiri parametra kojima se predstavljaju relevantni fizikalni procesi: konvekcija (izravno vođenje topline), evaporacija (latentna toplina), ukupna radijacija kratkih valova (eng: *net short wave radiation*) i ukupna radijacija dugih valova (eng: *net long wave radiation*). Cjelovita jednadžba bilance topline (10) koja se tretira u sklopu MIKE 3 glasi:

$$\begin{aligned} \Delta q = q_{io} + q_{ss} + q_p - q_c + q_s - \\ - q_{sr} - q_{su} + q_l - q_{lr} - q_{lu} + q_g + q_{sed} - q_v \end{aligned} \quad (10)$$

gdje je:

$\Delta q$  - ukupni prijenos topline na površini mora kontrolnog obujma

$q_{io}$  - prijenos topline kroz ulaz/izlaz kontrolnog obujma

$q_{ss}$  - prijenos topline kroz ponor/izvor u kontrolnom obujmu

$q_p$  - prijenos topline kroz oborine

$q_v$  - toplina isparavanja (latentna toplina)

$q_c$  - izravno vođenje topline

$q_s$  - radijacija kratkovalnoga sunčeva zračenja

$q_{sr}$  - reflektirana radijacije kratkih valova

$q_{su}$  - radijacije kratkih valova emitirane vode

$q_l$  - radijacije dugih valova iznad površine vode

$q_{lr}$  - reflektirana radijacija dugih valova

$q_{lu}$  - emisija energije dugih valova od vode

$q_g$  - toplinska izmjena između tla i vode

$q_{sed}$  - toplinska izmjena između sedimenta i vode.

U sklopu provedbe numeričkih analiza formulacija je svedena na jednostavniji oblik zanemarivanjem utjecaja toplinske izmjene između tla i vode i toplinske izmjene između sedimenta i vode ( $q_g = q_{sed} \approx 0$ ). Potom radijacija kratkih i dugih valova formulirana je zajedničkim članom.

Analiza dinamike koncentracija fekalnih koliforma ostvarena je modulom ECO-LAB koji se ponovno oslanja na rješenje hidrodinamike strujanja i pronosa odnosno rješenja dobivena iz HD i AD modula. Jednadžba procesa odumiranja fekalnih koliforma glasi:

$$\begin{aligned} \frac{dFC}{dt} = -[K_{coli} * corSTI * MAX(0, FC)] \\ K_{coli} = \frac{Ln(10)}{T_{90}} = 0,8 \quad [1/dan] \end{aligned} \quad (11)$$

gdje je  $FC$  koncentracija fekalnih koliforma [1/100 ml],  $K_{coli}$  koef.odumiranja pri 20°C u svježoj vodi u mraku, a  $CorSTI$  korekcijski koeficijent odumiranja za temperaturu, salinitet i svjetlost.

$$corSTI = \Theta_T^{Trec-20} * \Theta_S^{SAL} * \Theta_I^{VD} \quad (12)$$

gdje je:

$\Theta_T$  - temperaturni koeficijent korekcije za koef. odumiranja pri temperaturama različitim od 20 C<sup>0</sup> (usvojeno 1,09 [27])

$\Theta_S$  - koeficijent korekcije saliniteta za salinitet različit od čiste vode (usvojeno 1,006 [27])

$\Theta_I$  - koeficijent korekcije za utjecaj svjetlosti (usvojeno 7,4 [27])

$SAL$  - salinitet na modeliranom području

$VD$  - distribucija svjetlosti po vertikalni vodnog stupca =  $f$  (prozirnosti (m), najveća insolacija u podne (W/m<sup>2</sup>), dubina, svjetlosni intenzitet na temelju pretpostavljene sinusne varijacije u tijeku dana za odabrano kalendarsko razdoblje simulacije i stvarni geografski položaj modeliranog područja).

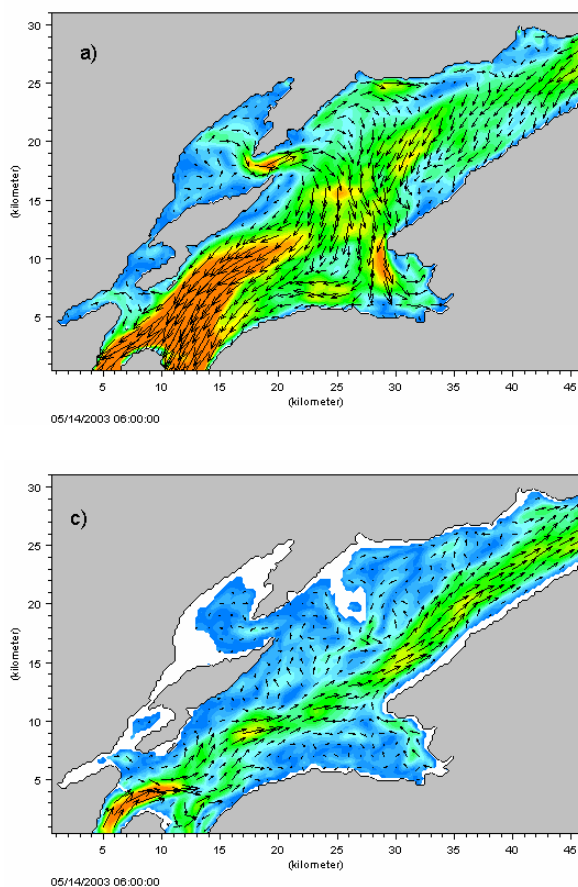
Smanjenje svjetlosnog intenziteta definirano je eksponencijalnim zakonom u ovisnosti o dubini  $I = I_0^{-kz}$  ( $I_0$  - intenzi-

tet smjetlosti na površini mora,  $I$  – intenzitet svjetlosti na dubini  $z$ ,  $k$  – koeficijent svjetlosnog prigušenja s vrijednosti dobivenoj na temelju usvajanja pretpostavke da prozornost mjerena uranjanjem *secchi* ploče predstavlja dubina na kojoj je intenzitet svjetla 10 % od površinske vrijednosti.

Numerički model MIKE 21 također omogućuje analizu hidrodinamičkih, transportnih i ekoloških parametara u akvatičkim sredinama karakterističnim za priobalna mora. Njime je moguće ostvariti numeričke simulacije nestacionarnog i stacionarnog strujanja u dvije dimenzije i jednom vertikalnom homogenom sloju. Detalji o primijenjenim numeričkim formulacijama za model MIKE 21 mogu se naći u literaturi [4-5]. Važno je napomenuti da su vrijednosti koeficijenta disperzije u longitudinalnom i transverzalnom smjeru usvojene vrijednostima 10 i 1 [28].

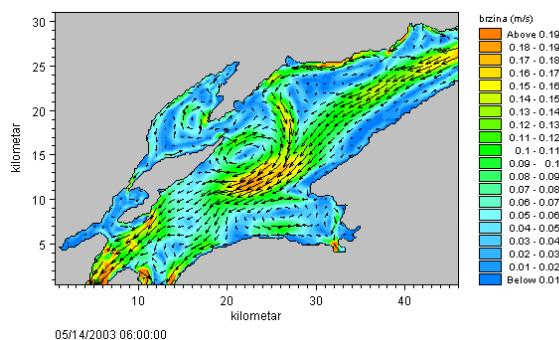
## 5 Rezultati numeričke analize

Na slikama 12.a, b, c, d jest prikaz prostornih raspodjela satno osrednjenih brzina strujanja na dubinama -1,-16,-21,-26 m dobivenih sa 3D modelom, a na slici 13. sa 2D modelom (14.5.2003.06:00).



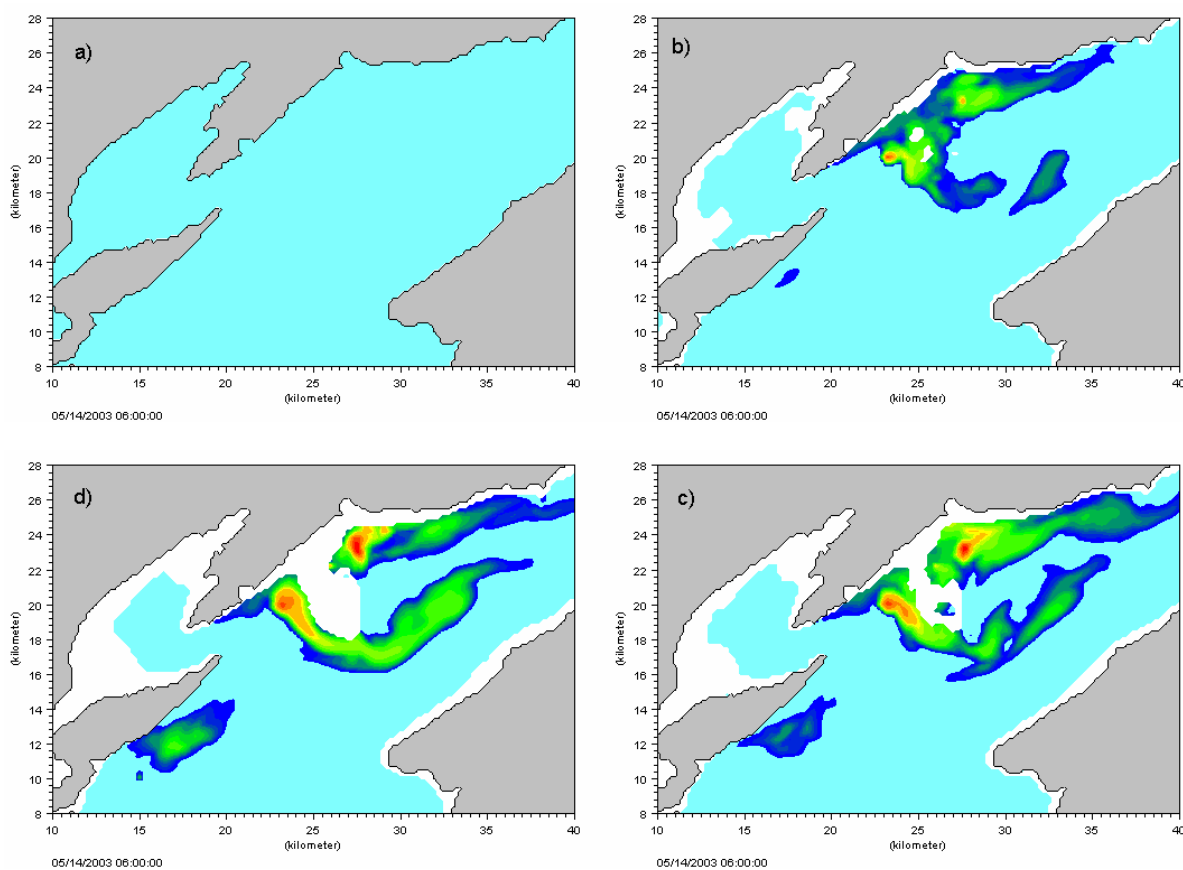
Slika 12. Prikaz prostornih raspodjela satno osrednjenih brzina strujanja na dubinama -1, -16, -21, -26 m

Usporedbom polja brzina na dubinama -1 m i dubinama -16, -21, -26 m može se uočiti izraženi baroklini oblik strujanja s relativno velikim brzinama površinskog sloja na dubini -1 m kao posljedica višesatnog i kontinuiranog vjetrova intenziteta 6-8 m/s iz smjera NNE/NE. Prodor mora iz potpiknoklinskog sloja u površinski sloj u takvim je situacijama intenziviran te predstavlja potencijalnu opasnost za izdizanje oblaka efluenta u površinski sloj i njegovo brzo širenje strujama *drifta* (iznad piknokline).



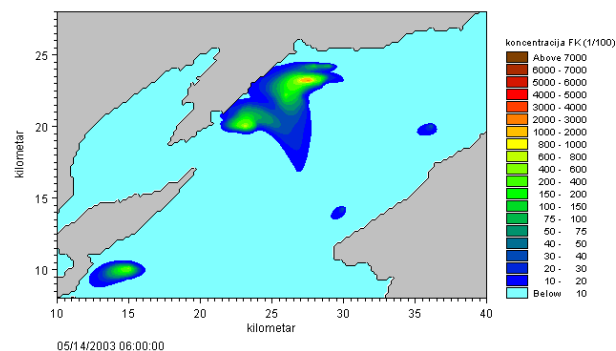
Slika 13. Prikaz prostornih raspodjela satno osrednjenih brzina strujanja (2D model)





Slika 14. Prikaz prostornih raspodjela koncentracija fekalnih koliforma na dubinama -1, -16, -21, -26 m

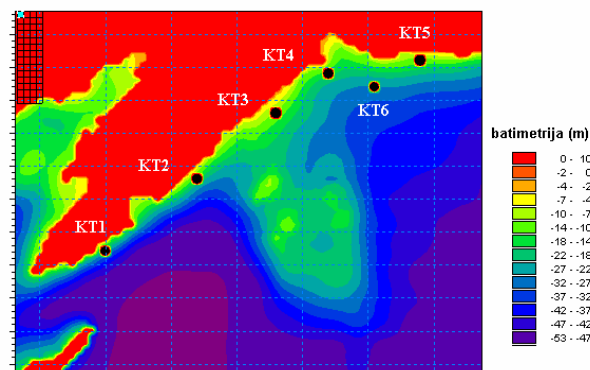
Na slikama 14.a, b, c, d dan je prikaz prostornih raspodjela satno osrednjenih koncentracija fekalnih koliforma dobivenih sa 3D modelom, a na slici 15. sa 2D modelom (14. 5. 2003. 6:00).



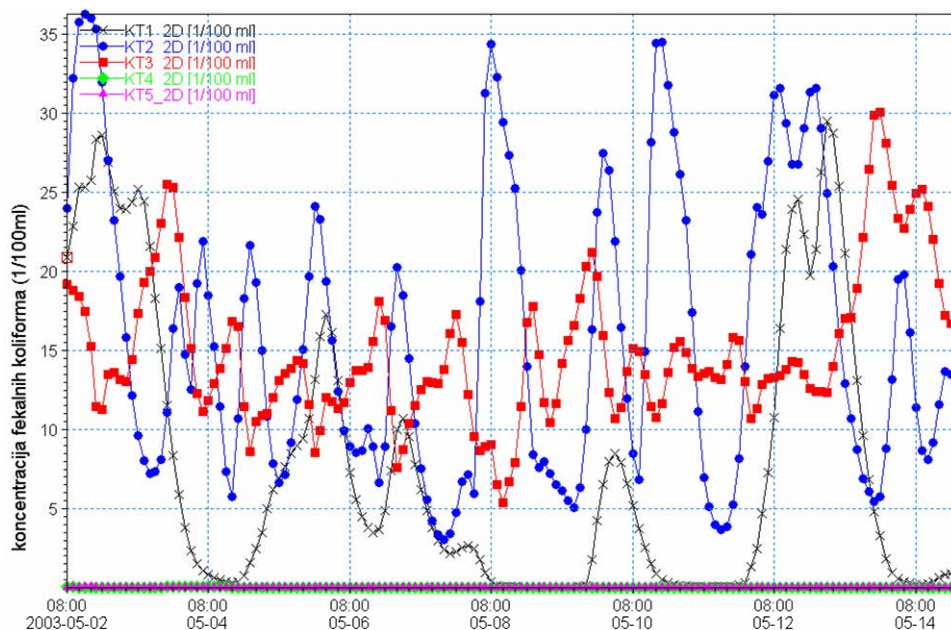
Slika 15. Prikaz prostornih raspodjela satno osrednjenih koncentracija fekalnih koliforma (2D model)

Dinamika srednjih satnih vrijednosti koncentracija fekalnih koliforma (FC/100 ml) dobivena numeričkim 2D modelom na odabranim kontrolnim točkama KT1-KT6 na udaljenosti 300 m od obale prikazana je na slici 17. (razdoblje 1.5.-15.5.2003.). Važno je naglasiti da vrijednosti srednjih satnih koncentracija fekalnih koliforma na

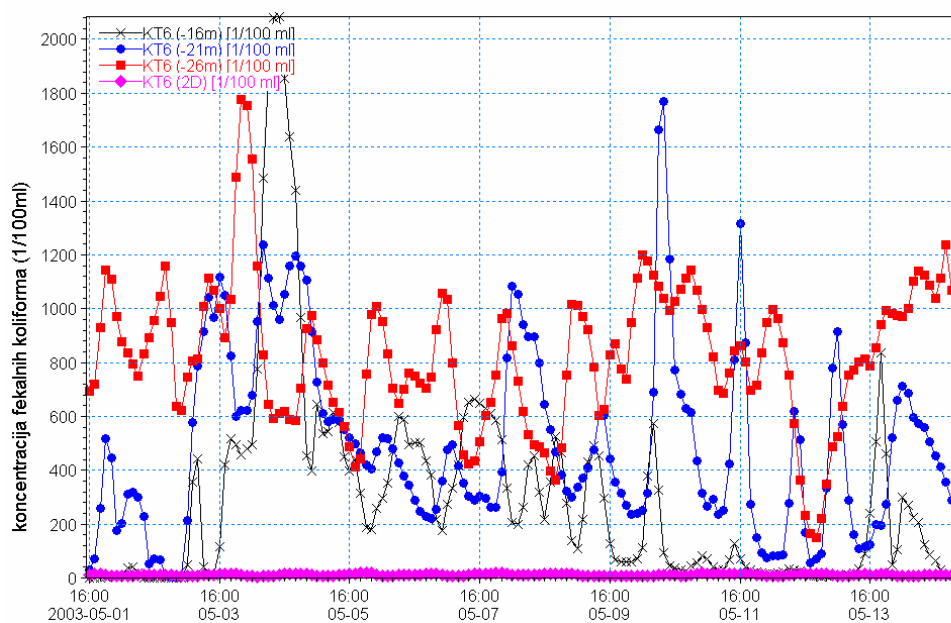
istim kontrolnim točkama KT1-KT6 na dubini -1 m dobivene sa 3D modelom imaju kontinuiranu vrijednost 0 FC/100 ml. Na slici 18. prikazana je dinamika srednjih satnih vrijednosti koncentracija fekalnih koliforma (FC/100 ml) na kontrolnoj točki KT6 na udaljenosti 1000 m od obale na dubinama -16, -21, -26 m dobivena sa 3D modelom i sa 2D modelom (razdoblje 1. 5. - 15. 5. 2003.). Vrijednosti dobivene sa 2D modelom, naravno, predstavljaju osrednjenu vrijednosti po vertikali vodnog stupca



Slika 16. Odabrane kontrolne točke uzduž crte na udaljenosti 300 m od obale (područje Split)



Slika 17. Srednje satne koncentracije fekalnih koliforma na odabranim kontrolnim točkama na udaljenosti 300 m od obale dobivene sa 2D modelom (razdoblje 1 - 15. 5. 2003.)



Slika 18. Usporedba dinamike srednjih satnih vrijednosti koncentracija koliformnih bakterija na kontrolnoj točki KT6 na udaljenosti 1000 m od obale na dubinama -16,-21,26 m dobivene sa 3D modelom i osrednjih vrijednosti po vertikali vodnog stupca sa 2D modelom (razdoblje 1-15.5.2003.)

Analiza i usporedba dinamike srednjih satnih vrijednosti koncentracija koliformnih bakterija na odabranim kontrolnim točkama jasno pokazuje utjecaj stratifikacije koji onemogućuje širenje oblaka zagađenja u vertikalnom smjeru i njegovo izdizanje na površinu zbog čega su koncentracije dobivene sa 3D modelom u površinskom sloju 0. S druge strane, piknoklinski sloj zbog blo-

kiranja širenja oblaka efluenta u vertikalnom smjeru uzrokuje intenziviranje širenja u horizontalnom smjeru pridnenog sloja ispod piknokline. Istodobno, smanjeni intenzitet svjetlosti i niže temperature u pridnenom sloju znatno pridonose smanjenju brzine odumiranja fekalnih koliforma, a što sve zajedno rezultira relativno velikom površinom oblaka efluenta s rubnim koncentracijama od 10FC/100 ml.

## 6 Zaključak

U radu je prikazana provedena numerička analiza utjecaja postojećih i planiranih podmorskih ispusta u Splitskom i Bračkom kanalu na stanje akvatorija što se tiče prostorne i vremenske dinamike koncentracije fekalnih koliforma. Numerička analiza nestacionarnog polja brzina i širenja oblaka efluenta nastalih radom podmorskih ispusta provedena je sa 2D i 3D numeričkim modelima u kojima su za rubne uvjete upotrijebljeni podaci u realnom vremenu. Numerička formulacija odumiranja fekalnih koliforma dana je zakonom prvog reda uz korekcijskim koeficijentima kojima su obuhvaćeni utjecaji prostorne i vremenske varijabilnosti saliniteta, temperatura i svjetlosti na prostornoj domeni modela.

Usporedba rezultata numeričkih analiza provedenih sa 2D i 3D numeričkim modelima pokazuje znatnu razliku u vrijednosti najvećih koncentracija fekalnih koliforma uzduž crte šticeenog priobalnog pojasa na 300 m od obale kao posljedica formirane stratifikacije koju je moguće

obuhvatiti samo sa 3D numeričkim modelom. Za analizirani 3D slučaj na dubini -1 m vrijednosti koncentracija fekalnih koliforma kontinuirano zadržavaju vrijednost  $\approx 0$  čime prema internom kriteriju Ministarstva zaštite okoliša i prostornog uređenja za čistoću mora namijenjenog za kupanje cijelo područje duž obale zadovoljava uvjete za dobivanje «plave» zastavice (koncentracija fekalnih koliforma  $FC_{\max} < 10/100$  ml). S druge strane rezultati dobiveni sa 2D numeričkim modelom koji pokazuju znatno veće koncentracije na 300 m od obale mogu biti relevantni samo za razdoblje u kojima se pojavljuju izrazito nepovoljna tranzijentna stanja jakih i dugotrajnijih vjetrova kada dolazi do homogenizacije gustoća po vertikali vodnog stupca.

Rezultati hidrodinamike te pogotovo pronosa tvari dobiveni primjenom numeričkih modela trebali bi se usporediti s detaljno koncipiranim mjerenjima. Budući da to u analiziranoj problematici predmetnog područja nije obavljeno, procjena kvalitete dobivenih rezultata provest će se tek u nastavku istraživanja.

## LITERATURA

- [1] DHI: *MIKE 21 - Coastal Hydraulics and Oceanography*, 2005.
- [2] DHI: *MIKE Zero – Marine Tools*, 2005.
- [3] DHI: *MIKE Zero – Ecological modelling*, 2005.
- [4] DHI: *MIKE 21 - Coastal Hydraulics and Oceanography*, 2005.
- [5] DHI: *MIKE 21/3 – Scientific Documentation*, 2005.
- [6] HHI-IOR: *Rezultati istraživanja mora za potrebe projektiranja podmorskog ispusta Split – Stobreč*, HHI/IOR-Split, 1998.
- [7] HHI-IOR: *Istraživanja mora za potrebe projektiranja podmorskog ispusta za I. fazu analizacijskog sustava Kaštela – Trogir*, 2001.
- [8] ADRICOSM PROJECT – [www.bo.ingv.it/ADRICOSM/](http://www.bo.ingv.it/ADRICOSM/)
- [9] Tehnička enciklopedija, 12, str 427-432.
- [10] Pomorska enciklopedija, 3, 536-553.
- [11] PMF-Zagreb - [www.gfz.hr/](http://www.gfz.hr/) ADRICOSM/
- [12] HEP-PPHE JUG: *Izlazni hidrogram iz HE Zakućac*, 2005.
- [13] DMZ: *Statistička obrada kontinuiranog mjerenja vjetrovne klime na opažačkoj postaji Marjan- Split (1970.-2000.)*, 2004.
- [14] HHI: *Izješće o mjerenjima na mareografskoj postaji ploče u razdoblju od ožujka 2002. do ožujka 2003. godine*, 2003.
- [15] Janeković, I., Bobanović, J., Kuzmić, M.: *The Adriatic sea M2 and K1 tides by 3D model and data assimilation*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, pp 873-885, 2003.
- [16] <http://skola.gfz.hr>
- [17] PAP/RAC: *River Cetina Watershed and Adherent Coastal Area: Environmental and Socio- Economic Profile*, 2000.
- [18] GFZ, *Smjernice-preporuke za projektiranje vjetrobrana*, 2005.
- [19] ISO norma, *Wind Action on Structures*, ISO/DIS4354/, 1991.
- [20] Odd, N., Rodger, J.: *Vertical Mixing in Stratified Tidal Flows*, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol 104, 1978.
- [21] French, R.: *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1991.
- [22] Lončar, G., *Hidrauličko modeliranje pronosa fizikalnih veličina – disertacija*, Građevinski fakultet, Zagreb, 2005.
- [23] Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R., Imberger, J., Brooks, N.H.: *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979.
- [24] Munk, W., Anderson, E.R.: *Notes on a theory of the thermocline*, *Marine Research*, Vol. 7, 1948.
- [25] Rasmussen, E.: *Three dimensional Hydrodynamic Models*, u Abbott, M.,B., i Price, F. (ed.), *Coastal, Estuarine and Harbour Engineers Reference Book*, Chapman and Hall, London, 1993.
- [26] Rodi, W.: *Turbulence Models and their Application in Hydraulics – A state of the art Review*, Special IAHR Publication, 1980.
- [27] Jorgensen, S., Bendoricchio, G.: *Fundamentals of ecological modelling*, Elsevier-academic press, 2001.
- [28] Gjetvaj, G., Ravlić, N.: *Efluent plume modelling in coastal waters – mathematical vs. hydraulic model*, 2nd international conference Marine waste water discharges, Istanbul, 2002.