

# SIMULIRANJE ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA MORA KVARNERSKOG ZALJEVA IZ PRIOBALNIH ISPUSTA

---

Mrša Haber, Iva

Doctoral thesis / Disertacija

2016

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:498267>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA**

**Iva Mrša Haber**

**SIMULIRANJE ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA  
MORA KVARNERSKOG ZALJEVA IZ  
PRIOBALNIH ISPUSTA**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Rijeka, 2016.**

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA

Iva Mrša Haber

**SIMULIRANJE ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA  
MORA KVARNERSKOG ZALJEVA IZ  
PRIOBALNIH ISPUSTA**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Rijeka, 2016.**



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA

Iva Mrša Haber

**SIMULIRANJE ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA  
MORA KVARNERSKOG ZALJEVA IZ  
PRIOBALNIH ISPUSTA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentori: prof. dr. sc. Tarzan Legović  
prof. dr. sc. Julijan Dobrinić,

Rijeka, 2016.

UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF ENGINEERING RIJEKA

Iva Mrša Haber

**SIMULATION OF POLLUTION  
SPREADING OF THE KVARNER BAY  
SEA FROM COASTAL SEWAGE**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2016.

Mentori disertacije:

prof. dr. sc. Tarzan Legović, Institut Ruđer Bošković, Zavod za istraživanje mora i  
okoliša

prof. dr. sc. Julijan Dobrinić, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Doktorska disertacija obranjena je dana \_\_\_\_\_ u Rijeci na  
Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_





## ZAHVALA

Zahvaljujem Danskom Hidrauličkom institutu, DHI, koji mi je dozvolio korištenje softvera MIKE 3 za znanstveno istraživanje opisno u ovom radu.

Gospođi Eileen Andreis, rukovoditeljici Službe uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Delta, koja mi je ustupila mjerenja protoka na ispustu Delta, hvala.

Hvala dragom mentoru Tarzanu Legoviću, koji me vrlo predano i stručno vodio kroz istraživanje, pisanje znanstvenih članaka i disertacije.

Zahvaljujem profesoru Julijanu Dobriniću, koji je sve moje ideje i prijedloge vezane uz rad bez oklijevanja prihvatio.

Veliko hvala suprugu zbog podrške koju mi je pružao prilikom pisanja svakog članka i disertacije. Mojoj djeci hvala na strpljenju kojeg su pokazali dok sam bila odsutna da bih postala „doktorica“.

Roditeljima od srca hvala na cijeloživotnoj ljubavi i podršci.

## SAŽETAK/ ABSTRACT

Cilj ovog rada je definiranje biološkog modela sanitarne kakvoće stanja mora u Kvarnerskom zaljevu s posebnim naglaskom na priobalno more grada Rijeke gdje se nalazi komunalni ispust (onečišćivač) i plaže za kupanje i rekreaciju, te računalna simulacija gibanja mora, advekcije i difuzije spregnute s kemijskim reakcijama fekalnih koliforma i fekalnih streptokoka te otopljenog kisika. Za kompjutorsku simulaciju korišten je softver MIKE3 danskog hidrološkog instituta. Period simulacije obuhvaća 36 sati od početka ispusta oblaka onečišćenja, što je dovoljan period za dostatno razrjeđenje koncentracije bakterija. Za spektar vjetrova iz svih osam smjerova tipičnih za Kvarnerski zaljev, te dva različita intenziteta, umjeren i orkanski, forsirano je gibanje morskih masa s realnim rubnim i početnim uvjetima preuzetim iz meteoroloških izvješća i mjernih postaja, uz istovremeno ispuštanje kanalizacijskih voda. Postignuta je mrežna konvergencija, te je zaključeno da treba raditi s dvije mreže: grubom, za područje cijelog zaljeva i finijom za sjeverni dio zaljeva oko ispusta Delta i grada Rijeke.

Kod svih vjetrova oblak kritičnog onečišćenja fekalnih koliforma granične koncentracije od 100 bakterija po 100 ml mora se kreće uglavnom u smjeru paralelnom s obalom i to ili u smjeru istoka ili zapada, ne izlazi na površinu mora, ostaje negdje na dubini od 10 do 20 m ispod površine. To je rezultat strujnog polja gibanja masa Kvarnerskog zaljeva, koje pri buri ima svojstvo da se topli površinski sloj mora istiskuje iz zaljeva kroz Mala i Vela vrata, dok donji hladni slojevi ulaze u zaljev. Pri tome je prosječna vertikalna komponenta brzine uz obalu oko  $1 \text{ mm s}^{-1}$ , dovoljna da nakon 3 sata podigne hladnu vodu uz sjevernu obalu Kvarnerskog zaljeva za 10 m i značajno rashladi površinski priobalni sloj.

Osnovni je zaključak da je gradski kanalizacijski ispust Delta dobro projektiran i izveden, te su sva sanitarna onečišćenja unutar zakonom i pravilnicima ograničenih vrijednosti. Ispust je dovoljno udaljen od obale da zalazi u dijelove zaljeva gdje su lokalne struje uglavnom u smjeru paralelnom s obalom te se oblak onečišćenja ne približava zonama za kupanje i rekreaciju. Čak i ako se poveća protok ispusta za 50% onečišćenja će i dalje biti unutar dozvoljenih granica.

The goal of this work is the definition of water quality model of Rijeka bay sea, with special emphasis on coastal sea of city of Rijeka where sewage disposal site and recreation and swimming area are situated, as well as computer simulation of the sea motion with advection and diffusion coupled by chemical reactions of fecal coliforms, fecal streptococci and dissolved oxygen. Danish hydrodynamic Institute software MIKE3 is used for computer simulation. The simulation period is 36 hours following the discharge of the pollution plume, which period is sufficient for significant extinction of bacteria. For the wind spectra typical for Rijeka bay, and for two intensities, moderate and high, the forcing of sea flow with real boundary and initial conditions taken from meteorological predictions and measurements and sewage discharge were simulated. Mesh convergence has been obtained, with the conclusion that it is sufficient to work with two mesh sizes: coarse, for the whole bay and fine, for the north part of the bay close to sewage discharge and city of Rijeka.

For all winds, the pollution plume with the concentration more than 100 fecal coliforms and 100 fecal streptococci per 100 ml of water, is conveyed mostly parallel to the coast in direction east or west, it does not rise to surface but stays at 10 to 20 meters below the surface. This is the result of the sea motion of Rijeka bay: bora wind conveys surface water layer out of bay through Small and Big doors while deep cold layers of water enter the bay. Mean vertical velocity component close to coast is about  $1 \text{ mms}^{-1}$  high enough to rise cold water in 3 hours and significantly cools surface coastal sea.

Main conclusion is that the sewage discharge Delta is well designed and constructed and all sanitary pollution are within regulatory given boundaries. The discharge site is far enough from the coast where local streams are mostly parallel to coast and the pollution plume does not come close to swimming and recreational areas. Even if discharge is increased 50% the pollution will be within regulatory given boundaries.

## KLJUČNE RIJEČI / KEYWORDS

- Onečišćenje priobalnog mora
- Biološki model
- Numerički model
- Simulacija strujanja
- Kvarnerski zaljev
- Kanalizacijski ispust Delta

- Coastal sea pollution
- Biological model
- Numerical model
- Flow simulation
- Rijeka bay
- Sewage discharge Delta

## SADRŽAJ

<b>1.</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Problem i predmet istraživanja.....	1
1.2.	Svrha i ciljevi istraživanja .....	2
1.3.	Obrazloženje hipoteze .....	2
1.4.	Znanstveni doprinos .....	3
1.5.	Primjena rezultata istraživanja .....	4
1.6.	Primijenjene znanstvene metode .....	4
1.7.	Struktura rada .....	4
<b>2.</b>	<b>OPIS FIZIKALNIH, KEMIJSKIH I BIOLOŠKIH SVOJSTAVA MORA KVARNERSKOG ZALJEVA.....</b>	<b>6</b>
2.1.	Općenito .....	6
2.2.	Fizikalna i geohidrološka svojstva mora Kvarnerskog zaljeva .....	8
2.3.	Hidrografske karakteristike .....	8
2.4.	Dinamika vodenih masa .....	9
2.5.	Kemijska svojstva kvarnerskog zaljeva.....	9
2.5.1.	<i>Otopljeni kisik i hranjive soli .....</i>	<i>9</i>
2.5.2.	<i>Primarna produkcija i stupanj eutrofikacije .....</i>	<i>10</i>
2.5.3.	<i>Kemijske osobine sjevernog Jadrana .....</i>	<i>11</i>
2.5.4.	<i>Biološke osobine sjevernog Jadrana.....</i>	<i>11</i>
<b>3.</b>	<b>KANALIZACIJSKI ISPUST DELTA .....</b>	<b>13</b>
3.1.	Općenito o ispustu .....	13
3.2.	Opis kanalizacijskog ispusta Delta.....	16
<b>4.</b>	<b>PREGLED DOSDAŠNJIH ZNANSTVENIH ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>18</b>
<b>5.</b>	<b>MATEMATIČKI MODEL.....</b>	<b>21</b>
5.1.	Osnovne značajke modela .....	21
5.2.	Fizikalni zakoni mehanike fluida .....	26
5.3.	Numerička formulacija.....	28
5.4.	Rubni uvjeti hidrodinamičkog modela .....	30
5.5.	Trenje vjetra .....	30
5.6.	Otpor dna .....	30
<b>6.</b>	<b>BIOLOŠKI MODEL .....</b>	<b>31</b>
6.1.	Sanitarna kvaliteta obalnog mora .....	31

6.2.	Onečišćenje mora .....	32
6.3.	Indikatorski organizmi i standardi za procjenu sanitarne kvalitete mora .....	33
6.4.	Koliformni organizmi .....	34
6.4.1.	<i>Fekalni koliformi (FK)</i> .....	35
6.4.2.	<i>Fekalni streptokoki (FS)</i> .....	36
6.5.	Kriteriji i standardi za procjenu sanitarne kvalitete mora .....	36
6.6.	Biološki model ECOLab .....	38
6.6.1.	<i>Predlošci za određivanje kvalitete vode</i> .....	38
6.7.	Predložak ECOLaba za kvalitetu vode .....	39
6.7.1.	<i>Modelirani procesi s kisikom</i> .....	39
6.7.2.	<i>Koliformi</i> .....	41
<b>7.</b>	<b>MREŽE KONAČNIH RAZLIKA .....</b>	<b>43</b>
<b>8.</b>	<b>REZULTATI MJERENJA NA KANALIZACIJSKOM ISPUSTU DELTA .....</b>	<b>48</b>
8.1.	Intenzitet ispusta i koncentracija bakterija .....	49
<b>9.</b>	<b>REZULTATI I ANALIZA SIMULACIJA STRUJANJA I DISPERZIJE ONEČIŠĆENJA .....</b>	<b>50</b>
9.1.	Analiza rezultata za jugo (135 stupnjeva) .....	51
9.2.	Analiza rezultata za buru (45 stupnjeva) .....	62
<b>10.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>72</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>74</b>
	<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>81</b>
	<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>90</b>
	<b>POPIS OZNAKA I SIMBOLA .....</b>	<b>91</b>
	<b>PRILOG: SLIKE SIMULACIJE STRUJANJA I GIBANJA OBLAKA FEKALNIH KOLIFORMA ZA PREOSTALE VJETROVE .....</b>	<b>93</b>
	<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>156</b>
	<b>POPIS OBJAVLJENIH RADOVA .....</b>	<b>157</b>



# 1. UVOD

## 1.1. Problem i predmet istraživanja

Otpadne vode sustava javne odvodnje grada Rijeka dovode se na lokaciju Delte gdje se pročišćavaju na uređaju koji se sastoji od grube i fine rešetke te aeriranog pjeskolova. Nakon pročišćavanja otpadne vode se preko dozažnog bazena ispuštaju u podmorski ispust. Cilj je osigurati odlaganje onečišćujućih tvari u obalno more tako da njihove koncentracije u željenim zonama Kvarnerskog zaljeva, namijenjenim kupanju i rekreaciji, budu unutar zakonom i uredbama ograničenih vrijednosti.

Kako bi se ostvarili ovi ciljevi, novi tehnički koncepti i inovacije u zbrinjavanju i ispustu otpadnih gradskih i industrijskih voda u priobalno more se neprekidno razvijaju i usavršavaju. Ovaj segment tehničkog razvoja je izuzetno propulzivan i predmet je rada velikog broja istraživača i predmet jake regulativne djelatnosti nacionalnih i međunarodnih organizacija. Kod razvoja novih tehnologija očuvanja okoliša, prvenstveno radi komparativnih prednosti, efikasnosti i niskih troškova, sve se više koristi CFD (computational fluid dynamics) tehnologija.

CFD omogućuje primjenu na proces konstruiranja i projektiranja, sustava za zbrinjavanje i ispust otpadnih voda u priobalna mora u samom početku te znatno skraćuje razvojni proces novih, naprednih rješenja.

U posljednja tri desetljeća računalne simulacije pomoću numeričkih metoda pružaju znatno bolji pristup od korištenja tradicionalnih eksperimentalnih metoda i fizikalnih modela. Razlog tome je činjenica da su računala postala izuzetno brza i jeftinija. Pored toga modeli turbulentnog strujanja s kemijskim reakcijama, koji se primjenjuju za simulaciju advekcije i difuzije onečišćenja u vode priobalnih mora, toliko su napredovali da zajedno s dostupnom znatnom računalnom snagom omogućuju primjenu na vrlo kompleksne sustave u industrijskoj primjeni.

Unatoč razvoju modela, numeričke metode mogu dovesti do pogrešaka koje su veće od onih koje proizlaze iz pretpostavki koje modeli turbulentnog strujanja s kemijskim reakcijama uključuju.

Pored toga, numeričke sheme, koje se koriste za simulacije realnih sustava, sadrže izuzetno složene fizikalne i kemijske procese te geometrijske oblike domena što može biti uzrok problema kod numeričke stabilnosti.



Da bi se ovi problemi riješili, razni modeli su u fazi razvoja kako bi omogućili transfer tehnologije iz istraživačke faze na praktičnu primjenu u fazi projektiranja i izrade sustava za simulaciju strujanja onečišćenja.

## **1.2. Svrha i ciljevi istraživanja**

Svrha ovog znanstvenog istraživanja je predviđanje sanitarne kakvoće mora Kvarnerskog zaljeva na temelju matematičkog modela. Kao glavni onečišćivač je uzet kanalizacijski ispust vode Delta.

Cilj istraživanja je validacija odabranog modela i numeričke sheme usporedbom rezultata simuliranja s mjerenim podacima, te primjena tako validiranog modela na analizu utjecaja parametara ispusta (geometrijsko mjesto, količina i sastav) na kvalitetu mora Kvarnerskog zaljeva.

Detaljnije je obrađen utjecaj onečišćenja na plaže blizu ispusta Delta.

## **1.3. Obrazloženje hipoteze**

Sanitarna kakvoća mora je određena karakteristikama ispusta, strujnim poljem, rubnim uvjetima, forsiranjem vjetra i atmosferskog pritiska te raspadom mikroorganizama.

Osim gornjim procesima, otopljeni kisik je određen dotokom u polje utjecaja ispusta te procesima uzimanja od strane mikroorganizama i otpuštanja kisika od strane fitoplanktona.

Dinamika promjene koncentracije pojedinog onečišćivača i otopljenog kisika moguće je uspješno modelirati sustavom običnih diferencijalnih jednadžbi, koje spregnute s transportnim jednadžbama mogu predvidjeti vrijednost koncentracije u željenim točkama i vremenskim trenucima. Transportne jednadžbe se mogu modelirati upotrebom modula EcoLaba softverskog paketa MIKE 3.

#### 1.4. Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos ovog rada je definiranje biološkog modela sanitarne kakvoće stanja mora u Kvarnerskom zaljevu s posebnim naglaskom na priobalno more grada Rijeke gdje se nalazi komunalni ispust (onečišćivač) i plaže za kupanje i rekreaciju, te računalna simulacija gibanja mora, advekcije i difuzije spregnute s kemijskim reakcijama fekalnih koliforma i fekalnih streptokoka te otopljenog kisika.

Period simulacije obuhvaća 36 sati od početka ispusta oblaka onečišćenja, što je dovoljan period za dostatno razrjeđenje koncentracije bakterija. Za spektar vjetrova iz svih osam smjerova tipičnih za Kvarnerski zaljev, te dva različita intenziteta umjeren i orkanski, forsirano je gibanje morskih masa s realnim rubnim i početnim uvjetima preuzetim iz meteoroloških izvješća i mjernih postaja, uz istovremeno ispuštanje kanalizacijskih voda. Postignuta je mrežna konvergencija tj. pronađena je mreža pri kojoj daljnje usitnjavanje ne dovodi do bitno različitih rezultata, te je zaključeno da treba raditi s dvije mreže grubom, za područje cijelog zaljeva i devet puta finijom za sjeverni dio zaljeva oko ispusta Delta i grada Rijeke.

Kod svih vjetrova oblak kritičnog onečišćenja fekalnih koliforma granične koncentracije od 100 bakterija po 100 ml mora se kreće uglavnom u smjeru paralelnom s obalom i to ili u smjeru istoka ili zapada, ne izlazi na površinu mora, ostaje negdje na dubini od 10 do 20 m ispod površine. To je rezultat strujnog polja gibanja masa Kvarnerskog zaljeva, koje pri buri ima svojstvo da se topli površinski sloj mora istiskuje iz zaljeva kroz Mala i Vela vrata, dok donji hladni slojevi ulaze u zaljev. Pri tome je prosječna vertikalna komponenta brzine uz obalu oko  $1 \text{ mms}^{-1}$ , dovoljna da nakon 3 sata podigne hladnu vodu uz sjevernu obalu Kvarnerskog zaljeva za 10 m i značajno rashladi površinski sloj.

Osnovni je zaključak da je gradski kanalizacijski ispust Delta dobro projektiran i izveden, te su sva sanitarna onečišćenja unutar zakonom i pravilnicima ograničenih vrijednosti. Ispust je dovoljno udaljen od obale da zalazi u dijelove zaljeva gdje su lokalne struje uglavnom u smjeru paralelnom s obalom te se oblak onečišćenja ne približava zonama za kupanje i rekreaciju. Čak i ako se poveća protok ispusta za 50% onečišćenja će i dalje biti unutar dozvoljenih granica.

### **1.5. Primjena rezultata istraživanja**

Rezultati istraživanja omogućavaju uvid u kakvoću mora Kvarnerskog zaljeva proteklih vremenskih perioda i prognozu u budućim vremenskim periodima. Ovo istraživanje može omogućiti procjenu utjecaja promjene karakteristika postojećeg kanalizacijskog ispusta Delta na kakvoću mora Kvarnerskog zaljeva posebno na plažama koje su najbliže ispustu te su potencijalno izložene najvećem utjecaju onečišćenja.

### **1.6. Primijenjene znanstvene metode**

Analiziran je fizikalni model strujanja priobalnih morskih masa u Kvarnerskom zaljevu pod utjecajem različitih forsirajućih oceanografskih i meteoroloških faktora, te s njim spregnut model dilucije, advekcije i disipacije uz kemijske reakcije oblaka biološkog onečišćenja fekalnim koliformima i fekalnim streptokokima iz gradskog kanalizacijskog ispusta Delta.

Taj fizikalni model pretočen je u matematički model kojeg čini sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi uz odgovarajuće početne uvjete u domeni i rubne uvjete na njenom rubu.

Jednadžbe tog modela su riješene približno numeričkom metodom konačnih razlika primjenom postojećeg softvera MIKE3 (Danish Hydraulic Institute, 2014). Rezultati su validirani usporedbom s mjerenim podacima. Simulirano je stanje mora za odabrane vremenske intervale i meteorološke uvjete. Analizom rezultata simulacije predložene su potrebne intervencije za poboljšanje kakvoće mora Kvarnerskog zaljeva.

### **1.7. Struktura rada**

U prvom je poglavlju dan uvod. Drugo poglavlje sadrži opis fizikalnih, bioloških i kemijskih svojstava mora Kvarnerskog zaljeva. U trećem je poglavlju opis kanalizacijskog ispusta Delta. Četvrto poglavlje sadrži pregled dosadašnjih znanstvenih istraživanja. U petom poglavlju je opis korištenog matematičkog modela predviđanja kakvoće mora. Opis odabranog biološkog modela koji je korišten za određivanje kvalitete mora dan je u šestom poglavlju. Sedmo poglavlje sadrži opis numeričke sheme i softvera korištenih za rješavanje jednadžbi matematičkog modela. Rezultati mjerenja protoka na kanalizacijskom ispustu Delta dani su u osmom poglavlju.

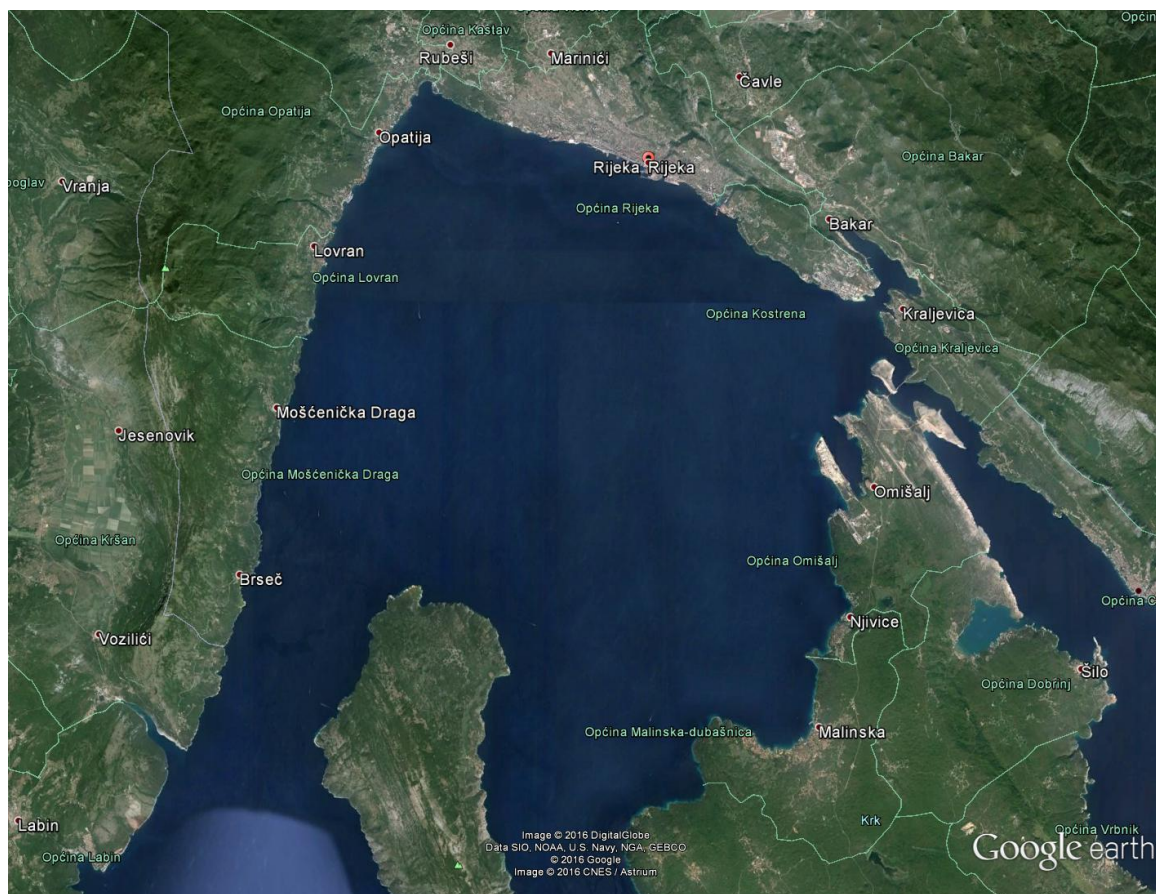
Rezultati i analiza simulacija strujanja i disperzije onečišćenja za situacije: bura, jugo, bez vjetra, prikazani su i komentirani u devetom poglavlju.

U zaključnom, desetom poglavlju, je ocijenjena uspješnost istraživanja, opravdanost odabranog matematičkog modela i dane su smjernice za daljnji istraživački rad.

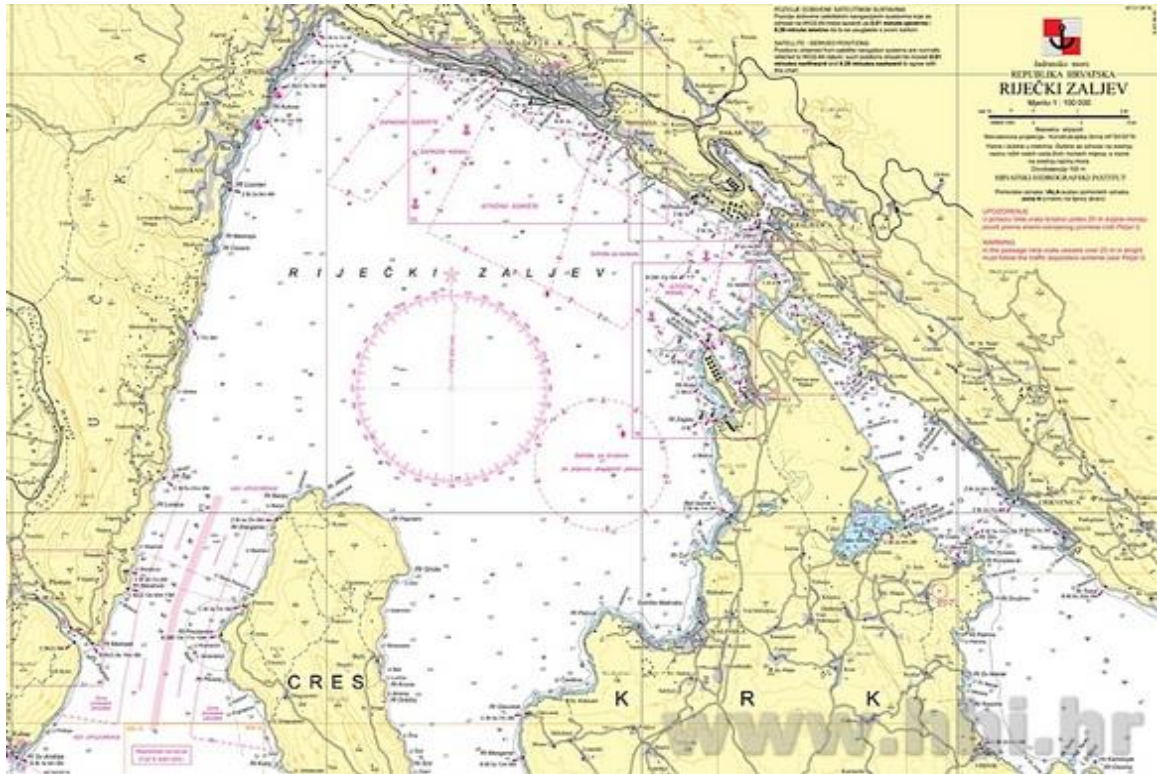
Nakon zaključka slijedi popis slika, popis oznaka i simbola i literatura. Nakon literature, u prilogu su prikazane slike simulacije strujanja i gibanja oblaka fekalnih koliforma za preostalih šest vjetrova (koji su uz buru i jugo obrađeni ali rezultati nisu prikazani i komentirani u radnji).

## 2. OPIS FIZIKALNIH, KEMIJSKIH I BIOLOŠKIH SVOJSTAVA MORA KVARNERSKOG ZALJEVA

### 2.1. Općenito



SLIKA 1. KVARNERSKI ZALJEV - SATELITSKI SNIMAK (GOOGLE EARTH, 2015)



SLIKA 2. KVARNERSKI ZALJEV - KARTOGRAFSKI PRIKAZ (**HRVATSKI HIDROGRAFSKI INSTITUT, 2015**)

Kvarnerski zaljev se nalazi se između istočne obale Istre, obale grada Rijeke i Kostrene, otoka Krka i Cres.

Kroz Vela vrata spojen je s Kvarnerom, kroz Srednja vrata s Kvarnerićem, kroz Tihi kanal s Vinodolskim kanalom.

Na kvalitetu mora utječu:

- uplivi slatkih voda s kopna; vrulje uz Opatijsku rivijeru i iz Bakarskog zaljeva,
- ispusti otpadnih komunalnih i industrijskih voda u blizini većih naselja,
- izmjena vodenih masa s drugim dijelovima Jadrana kroz Srednja i Vela vrata te Tihi kanal.

## **2.2. Fizikalna i geohidrološka svojstva mora Kvarnerskog zaljeva**

Površina Kvarnerskog zaljeva je oko 500 km<sup>2</sup>, a obujam oko 27 km<sup>3</sup>. Prosječna dubina zaljeva je 60 metara. Geološka osnova Kvarnerskog zaljeva je pretežno od vapnenca (Jeftić L. , 1982), s nešto dolomita u sjevernom dijelu.

Najveća rijeka je Rječina (duga oko 17 km, širina pri ušću 15 m) s protokom od 10 do 50 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Duž sjeverne obale zaljeva i u Bakarskom zaljevu nalaze se mnoge vrulje čija je aktivnost promjenjiva s najaktivnijim periodom u rano proljeće i kasnu jesen. Prevladavajući vjetrovi pušu iz sjevernog (41%) i jugozapadnog smjera (11%). Srednja godišnja temperatura zraka je 13°C s apsolutnim maksimumom od 36°C i minimumom od -12°C. Godišnja precipitacija je oko 1400 mm s maksimumima u jesen i zimu. Prosječna godišnja inoslacija je 47% od ukupnog najvećeg mogućeg.

Voda Kvarnerskog zaljeva u najvećem dijelu vodenog stupca porijeklom je iz srednjeg Jadrana, dobro prozračena, vrlo prozirna (15-35 m, najčešće 20 m)

## **2.3. Hidrografske karakteristike**

Karakteristika Kvarnerskog zaljeva je promjenjivost hidrografskih svojstava uvjetovanih interakcijom s atmosferom (izmjena topline i vode, meteorološke pojave itd.), utjecajem slatkih voda iz vrulja, Rječine i ispusta otpadnih voda, te izmjenom vodenih masa s drugim dijelovima Jadrana (Kvarner, Kvarnerić) i cirkulacijom unutar zaljeva. Ta je promjenjivost izrazitija u sjevernom dijelu zaljeva, posebno u gornjem dijelu vodenog stupca, gdje je utjecaj slatkih voda najznačajniji, a i zbog postojanja cirkulacije kružnog tipa. Zimi slanija voda ulazi u zaljev kroz Srednja vrata. Ljeti površinski sloj, nešto nižeg saliniteta, ulazi kroz Vela vrata (Degobbis, i dr., 1978).

Raslojavanje vodenog stupca je značajnije izraženo ljeti kada se gustoća površinskog sloja smanjuje zbog povišenja temperature i sniženja saliniteta. Utjecaj slatkih voda na raslojavanje posebno je izražen u Bakarskom zaljevu gdje je u površinskom sloju (do 5 metara dubine) opažena značajna razlika gustoće (do 14 sigma-t jedinice). U sjevernom obalnom pojasu promjene gustoće (do 6 sigma-t jedinice) opažaju se u većem dijelu vodenog stupca. U većem dijelu zaljeva stupanj stratifikacije određuje temperatura i dotok slatkih voda. Zimi prevladava homogenost u vodenom stupcu te smo povremeno dolazi do značajnog raslojavanja zbog utjecaja slatkih voda (Jeftić L. , 1982) .

## **2.4. Dinamika vodenih masa**

S aspekta promatranja širenja potencijalnih onečišćujućih tvari važno je poznavati mehanizme strujanja u različitim slojevima morske vode. Za poznavanje tih procesa neophodno je direktno mjerenje morskih struja, a analizom dobivenih podataka može se naći korelacija strujanja i faktora koji ih uzrokuju (Degobbis, i dr., 1978), (Ilić, Smirčić, & Vučak, Dinamika vodenih masa, 1979).

U Kvarnerskom zaljevu postoje dva perioda godine u kojima je jasno izražena razlika u smjeru i intenzitetu morskih struja (Legović & Sekulić, 1979). U zimskom periodu je smjer struja ciklonalan, a u ljetnom anticiklonalan. Lipanj se razlikuje od ljetnog i zimskog perioda te se može smatrati prijelaznim periodom.

Vrijeme izmjene vodene mase nije jednako za cijeli zaljev (Jeftić, Kuzmić, Orlić, & Policastro, 1980). Vodena masa u sjevernom i sjeverozapadnom dijelu zaljeva sporije se izmjenjuje nego u sjevernom i južnom dijelu. Varijacije tijekom godine pokazuju da postoje dvije situacije izmjene vodene mase (Orlić & Kuzmić, 1980): kraća- ljetna i duža- zimska (Ilić, Jeftić, Nožina, & Smirčić, 1978).

Vrijeme izmjene vode računato iz mjerenja struja u moru u Velim i Srednjim vratima, varira između jednog do dva tjedna zimi i oko tri puta duže ljeti, uz maksimum od 10 tjedana tijekom prijelaznih razdoblja između ovih sezona.

## **2.5. Kemijska svojstva kvarnerskog zaljeva**

### *2.5.1. Otopljeni kisik i hranjive soli*

Kvarnerski zaljev je dobro prozračen. Povremeno je, krajem ljeta sadržaj kisika nizak pri dnu (do 55% zasićenja) u istočnom i središnjem dijelu zaljeva, kao posljedica razgradnje akumulirane organske tvari (Degobbis, 1979).

Jesenskim vertikalnim miješanjem dolazi do nadoknađivanja otopljenog kisika u pridnom sloju.

Zaljev je prilično siromašan fosforom. Povišenje vrijednosti koncentracija fosfata i ukupnog fosfora opažene su jedino u priobalnim područjima koja su pod direktnim utjecajem otpadnih voda (ispred Rijeke, Voloskog, Opatije i Bakarskog zaljeva).

Koncentracije dušikovih soli (amonijak, nitriti i nitrati) i silikat znatno variraju sezonski (i do dva reda veličine) ovisno o tome prevladava li proces fitoplanktonske asimilacije ili



bakterijske remineralizacije iz organskih tvari, ovisno o slatkovodnim donosima, hidrografskoj situaciji i dinamici vodenih masa.<sup>3</sup>

### *2.5.2. Primarna produkcija i stupanj eutrofikacije*

Zaljev ima nisku biomasu, srednju primarnu proizvodnju, relativno malu gustoću mikrop planktonskih stanica, te u većem dijelu godine puno nanofitoplanktona (Pojed & Smoldlaka, 1979).

Iako je Kvarnerski zaljev oligotrofan, tijekom ljeta su opažene u površinskom sloju, u sjeverozapadnom dijelu zaljeva i Bakarskom zaljevu, pojave eutrofikacije ali uz biomasu nižu od one koja se opaža u zapadnom dijelu sjevernog Jadrana (Pojed & Smoldlaka, 1979). Te su pojave posljedica utjecaja znatnih količina slatkih i otpadnih voda s visokim sadržajem hranjivih soli i ostalih oligoelemenata (Deggobis, 1979).

Hranjive soli su anorganski spojevi fosfora (ortofosfat, ukupni fosfor), dušika (amonijeve soli, nitrit i nitrat) i silicija (ortosilikat) otopljeni u morskoj vodi, a imaju važnu ulogu u procesima primarne proizvodnje organske tvari i ograničavanju brzine te proizvodnje. Prilikom primarne proizvodnje ugrađuju se u partikularnu fazu (plankton i detritus), odnosno u bentoske mikro- i makroalge, uključujući se u hranidbeni lanac. Njihovo kruženje u ekosustavu obnavlja se procesima regeneracije iz organske (N i P) i anorganske (Si) tvari. Taloženjem detritus i izmjenom vodenih masa dolazi do prijenos hranjivih soli u vodenom stupcu među različitim područjima. U obalnom su području važni i vanjski donosi, prvenstveno kopnenim vodama. Prirodna eutrofikacija je poželjna za ekosustav, zbog povećanja bioloških resurs, ali antropogena eutrofikacija, izazvana nepravilnim ispuštanjem urbanih otpadnih voda nije poželjna jer može dovesti do hipoksije uz vrlo štetne posljedice. U slučaju antropogene eutrofikacije dolazi do prekomjernog razmnožavanja fitoplanktona, a time i proizvodnje organske tvari iznad granice „kapaciteta razgradnje“ ekosustava. Na taj se višak neiskorištene organske tvari znatno troši kisik, što rezultira izrazitom hipoksijom ili anoksijom u pridnom sloju u uvjetima raslojavanja vodenog stupca, uz ozbiljne posljedice za bentoske organizme. Moguće su i promjene u sastavu zajednica zbog većeg udjela vrsta koje su manje korisne za prehrambeni lanac, a u krajnjem slučaju i razmnožavanje onih čiji su metabolički proizvodi toksični (Građevinski fakultet, 2009).

### 2.5.3. *Kemijske osobine sjevernog Jadrana*

Sezonske i višegodišnje promjene u kruženju hranjivih soli u obalnom području sjevernog Jadrana znatno ovise o stalnim utjecajima onečišćenja s kopna, putem podzemnih i površinskih voda, i putem otpadnih voda koje se izravno ili neizravno preko uređaja za pročišćavanje ispuštaju u more.

Značajnu ulogu ima i dinamika voda u tom području, tj. sustav strujanja koji prevladava ovisno o sezoni. Većina pritoka površinskih voda izrazito su bujičnog karaktera, pa je s svakim kišnim razdobljem značajan unos suspendiranog materijala i organskog onečišćenja.

Zbog toga kolebaju i vodostaji, pa su u sušnim razdobljima izrazito niski, pogotovo u ljetnom, ali moguće i u zimskom razdoblju. Tijekom niskih vodostaja jače je izražen antropogeni utjecaj onečišćenja vodotoka, a time i mora.

Utjecaj donos hranjivih soli slatkim vodama ograničen je na sjeverozapadni dio zaljeva (priobalni pojas od Opatije do Rijeke) u kojem se povremeno javljaju umjerene cvatnje fitoplanktona, uz znatno smanjenje prozirnosti vode (<10 m) uzrokovano sporijom izmjenom vode u odnosu na veći dio Kvarnerskog zaljeva.

### 2.5.4. *Biološke osobine sjevernog Jadrana*

Osnovni pokazatelj za kriterij očuvanja obalnog mora je mikrobiološko opterećenje izraženo putem dopuštenih koncentracija koliformnih bakterija. Koliformne bakterije su primarno nepatogene, normalno obitavaju u donjem intestinalnom traktu (debelom crijevu) čovjeka i toplokrvnih životinja, odgovorne su za pravilnu probavu hrane. Izlučuju se fekalijama, te dospijevaju u otpadne vode, a preko njih u prirodne vode recipijente otpadnih voda. Ukoliko su u fekalijama prisutne i patogene bakterije, one će također dospjeti zajedno s koliformnim bakterijama u otpadne i prirodne vode predstavljajući opasnost za zdravlje ljudi. Tako mogu biti prisutni uzročnici: kolere (*Vibrio cholerae*), tifus (*Salmonella typhi*), salmoneloze (*Salmonella*), dizenterije (*Shigella*), gastroenteritis (*Campylobacter jejuni*).

U more putem zemlje zraka, otpadnih voda (Perović, 2003) ulaze autohtoni i alohtoni mikroorganizmi. Za neke alohtone organizme je domaća morska sredina strana i onemogućuje im dulji opstanak i aktivno razmnožavanje zbog nedostatka organskih supstrata i esencijalnih faktora rasta. Međutim putem prijenosnika (vektora) mogu se ugraditi u hranidbeni lanac morskih ekosustava (Metcalf & Eddy, 1979).

Dominantan izvor u okviru obalne zone gradova su kanalizacijski ispusti, kojima u more dospijevaju različite skupine mikroorganizama od kojih su pojedini patogeni. Iako ti organizmi relativno kratko prežive u moru, njihova prisutnost ukazuje na mikrobiološko onečišćenje koje je posljedica nepročišćenih ili djelomično pročišćenih komunalnih otpadnih voda (Steel, 1980).

Na osnovu stupnja mikrobiološkog onečišćenja definira se mikrobiološka ili sanitarna kvaliteta mora (Narodne novine 73, 2008).

Kao indikatori fekalnog zagađenja obalnog mora koriste se ukupni koliformi (UK), fekalni koliformi (FK), i fekalni streptokoki (FS), bakterije ljudsko-životinjskog porijekla. Otkrivanje tih bakterija moguće je u rutinskim laboratorijskim metodama (membranska filtracija) (Zavod za javno zdravstvo, 2014).

Mikrobiološko stanje mora na određenoj lokaciji može znatno varirati ovisno o meteorološkim prilikama i hidrografskim osobinama mora (vjetar, temperatura mora, salinitet, prekrivenost oblacima, morske struje, valovi itd.) te načinu ispuštanja otpadnih voda ((ne)isprekidanost ispuštanja, dnevne i sezonske varijacije količine otpadne vode, i sl.) (Perović, 2003).

Ulaskom u more koncentracija indikatorskih i patogenih organizama se naglo smanjuje zbog fizikalnih (sunčeva radijacija, temperatura), kemijskih (salinitet, teški metali, pH, ksenobiotici) i bioloških (predatorstvo, parazitizam, antibiotici, biotoksini) utjecaja. (Šolić & Krstulović, Mikrobiološko zagađenje mora (3): Sudbina indikatorskih i patogenih mikroorganizama poslije odlaska u morsku sredinu, 1997) (Šolić & Krstulović, 1992.). Zbog toga je za proučavanje kvalitete obalnog mora nužno poznavati ekološke i hidrodinamičke procese.

Matematičko modeliranje omogućuje da se pomoću matematičkih formulacija pristupa simulaciji složenih dinamičkih sustava, kao što je predviđanje kvalitete mora uvidom u putanju ispuštenog „oblaka“ efluenta. Takve je sustave nemoguće prikazati u analitičkom obliku, modeli su zadani u diferentnom (proceduralnom) obliku kojim se prikazuje način funkcioniranja sistema. Problem se potom rješava numerički, modelom koji oponaša stvarni sustav u vremenu.

Cilj modeliranja je uskladiti prividne (modelirane) situacije s stvarnošću.

### **3. KANALIZACIJSKI ISPUST DELTA**

#### **3.1. Općenito o ispustu**

U radu je kao dominantni onečišćivač vode zaljeva promatran kanalizacijski ispust Delta, odnosno putanja i koncentracija ispuštenog „oblaka“ onečišćenja iz uređaja Delta.

Grad Rijeka komunalne otpadne vode ispušta u more zaljeva. U ovisnosti o sastavu otpadne vode te namjeni i oceanografskim prilikama obalnog mora, odlaganje otpadne vode se može vršiti uz odgovarajući stupanj pročišćenja podmorskim ispustom na povoljnoj dubini i udaljenosti od obale. Nekada se projektiranje podmorskih ispusta svodilo na određivanje ekonomičnosti primjene većeg stupnja pročišćavanja i kraće dužine ispusta ili obratno, manjeg stupnja pročišćavanja i duljeg podmorskog ispusta. Međutim sve veći interes javnosti za zaštitu prirodnog okoliša doveo je do sveobuhvatnog istraživanja biocenoze mora, te do ispitivanja utjecaja kontaminanata na eventualnu promjenu biocenoze ove sredine. Opasnost također postoji od nekontroliranog razvoja industrije i ispusta njenih zagađivača u obalno more.

U ovisnosti o dinamici izmjena mora pojedinih prostora otvorenog ili zatvorenog mora i gradske otpadne vode mogu imati sasvim suprotan utjecaj - od povoljnog do nepovoljnog (eutrofija). Ispravan pristup rješavanju ispusta u more zahtijevao je prethodno ispitivanje kemijskih, fizičkih i bioloških karakteristika morskog ambijenta. Od oceanografskih podataka najvažniji su strujanje mora i izmjena morskih masa pojedinih prostora s vanjskom okolinom. Za more na području Kvarnerskog bazena ne može se govoriti kao o zatvorenom prostoru jer Kvarnerski zaljev, na koji se nastavlja more Kvarnerskog zaljeva, predstavlja veliki recipijent s naglašenom dinamikom gibanja koja osigurava značajnu izmjenu voda s otvorenim morem Jadrana. Dalje, jedan od bitnih razloga ekološke naravi je taj da niti jedan uređaj za pročišćavanje ne uklanja u potpunosti sve kontaminante. Zbog slabije cirkulacije u zatvorenim prostorima postoji opasnost nagomilavanja onečišćivača prethodno pročišćene otpadne vode.

Od osobite praktične važnosti, kod podmorskih ispusta u otvoreno more, je mogućnost etapne izgradnje pročišćivača, s manjim čišćenjem u početnoj fazi (suo mehaničkim), uz mogućnost interpolacija dodatnih uređaja konačnog rješenja (biološki pročišćivač), što je slučaj s ispustom Delta.

Oba se načina pročišćavanja, bilo artifičijelni, bilo prirodni odvijaju po istim biološkim zakonitostima. Autopurifikacijska moć morske vode uvjetovana je mnogim faktorima: fizičkim (adsorpcija, sedimentacija, disperzija i dilucija, sunčeva energija, temperatura, pH), kemijskim (soli, otopljeni kisik, hranjivi sastojci), biološki (baktericidnost vode, antibiotski sastojci, mikroorganizmi morske vode).

Dinamika ispuštene otpadne vode u more slijedi ovaj obrazac:

Mlaz otpadne vode nastoji, uslijed sila inercije, nastaviti tečenje u smjeru ispusnog cjevovoda, a zbog manje gustoće od okolnog mora, usmjerava svoj tok prema površini pod utjecajem sile uzgona. Putanja gibanja čestica otpadne vode u morskoj poprima oblik zakrivljene krivulje, promatrano od dna prema površini. Uslijed smičnih sila trenja na rubu mlaza otpadne vode i okolnog mora nastaje vrtložno strujanje unutar oblaka perjanice koje uvlači dijelove morske vode u oblak a vanjske dijelove otpadne vode izvlači iz oblaka u okolno more. Niz struju se oblak otpadne vode (sada već izmiješanog djelomično s okolnom morskom vodom) proširuje smanjujući brzinu i nastavljaajući intenzivno miješanje s morskom vodom. Nakon ove tzv. početne dilucije nastaje daljnja disperzija i dilucija nazvana naknadnom ili sekundarnom dilucijom u dijelu oblaka koji više nema veću količinu gibanja od okolnog mora. Mješavina morske i otpadne vode nošena je dalje morskim strujama, pri čemu se nastavlja proces miješanja uzrokovan turbulentim vrtlozima, a sve kao posljedica različitih gradijenata brzina između pojedinih zona toka zagađenog medija i ambijenta morske vode u kojem se ovaj fluid transportira. Daljnjim transportom zagađeni oblak se stalno širi, pri čemu se brzine izjednačuju s osnovnom brzinom morskih struja, a sama se mješavina otpadne i morske vode dalje razrjeđuje do konačnog izjednačenja s kvalitetom okolne morske (čiste) vode.

Red veličine dilucije (razrjeđenja) kod dobro projektiranih ispusta s difuzorom uz povoljne oceanografske prilike iznosi oko 150 do 200, što znači da je jedan volumen otpadne vode izmiješan s 149 do 199 volumena mora. Kod sekundarne dilucije red veličine je znatno manji.

Iz higijenskog aspekta od posebnog je interes odumiranje mikroorganizama (bakterija) u morskoj vodi. Faktor bakteriološke autopurifikacije se obično izražava vremenom (satima) u kojem odumire 90% mikroorganizama od početnog sadržaja. To je vrijeme potrebno odrediti eksperimentalno .



SLIKA 3. UREĐAJ ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA RIJEKA (**KOMUNALNO DRUŠTVO VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015**)

### 3.2. Opis kanalizacijskog ispusta Delta

Slijedi opis ugrađenog uređaja za obradu i ispušt otpadnih voda Delta.

Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda kanalizacijskog sustava smješten je na Delti na platou površine 2,8 ha. Dana 30. travnja 1994. godine izgrađen je i pušten u rad centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (mehanički predtretman, I. faza) s podmorskim difuzorskim ispustom, čime je ispuštanje otpadne vode premješteno s ušća Rječine i nekoliko dodatnih lokacija<sup>1</sup> na udaljenost 548 metara od obale, na dubini od 46 m, u smjeru jugozapad.

Uređaj je dimenzioniran za 200.000 ekvivalent stanovnika ili na  $3.000 \text{ ls}^{-1}$ , maksimalnog opterećenja s sanitarno potrošnom vodom i  $1.500 \text{ ls}^{-1}$  s oborinskom vodom.

Između 1994. i 1996. godine obavljen je monitoring efikasnosti rada uređaja i podmorskog ispusta (Institut građevinarstva Hrvatske, 1995) (Institut građevinarstva Hrvatske, 1996) (Institut građevinarstva Hrvatske, 1997).

Godine 1999. je provedeno istraživanje o onečišćenju obalnog mora pod direktnim utjecajem podmorskog ispusta i Rječine nakon 5 godina od puštanja u rad završnog dijela kanalizacijskog sustava Grada Rijeke (Institut građevinarstva Hrvatske, 1999).

Otpadne vode su vode koje su promijenile svoj prvobitni sastav unošenjem štetnih tvari čija prisutnost uzrokuje promjenu fizičkih, kemijskih, bioloških ili bakterioloških karakteristika vode.

Osnovna EU direktiva koja regulira prikupljanje i pročišćavanje otpadnih voda je Direktiva o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda 91/271/EEZ (European Commission, 1991) čiji su temeljni ciljevi:

- zaštititi okoliš od negativnih učinaka ispusta otpadnih voda,
- primijeniti standard efluenta (količine i kakvoće otpadnih voda).

Prema pretprijetnom ugovoru RH je dužna ispuniti ciljeve direktive do 2023. godine. Za područje aglomeracije Rijeka, zbog svoje veličine i osjetljivosti recipijenta, nužno je osigurati prikupljanje otpadnih voda i pročišćavanje drugim stupnjem (biološkim) prije ispuštanja u recipijent do 2018. godine.

---

<sup>1</sup> U 2002. godini na sustav je spojen zapadni dio grada, čije su otpadne vode dotad ispuštane u obalnom pojasu Kantride.

Specifični ciljevi odnose se na proširenje sustava odvodnje, uz koje je nužno provesti i rekonstrukciju postojećeg sustava da bi se smanjila infiltracija vanjskih voda u sustav što za posljedicu ima hidrauličko opterećenje sustava, prodor morskih voda u sustav i sprječavanje istjecanja otpadnih voda u podzemlje i obalno more.

Direktiva se u RH provodi kroz Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (Narodne novine 80, 2013; Narodne novine 43, 2014) (Narodne novine 27, 2015).

Analizu otpadnih voda, sukladno Pravilniku provodi:

- laboratorij PRJ Kanalizacija (svaki dan),
- vanjski, neovisni ovlaštenu laboratorij (55 puta u godini).

Kvaliteta otpadnih voda ispituje se utvrđenom dinamikom i parametrima sukladno vodopravnim dozvolama Hrvatskih voda.

U 2007. godini ukupno su ispitana 442 uzorka otpadnih voda, od čega je 93% zadovoljavalo zadane parametre. Odstupanja od maksimalno dopuštenih koncentracija zabilježena su na uređaju Delta zbog povećanja koncentracije suspendiranih (raspršenih) tvari i ukupnih masnoća. U 2008., 2010., 2011, 2012., 2013. i 2014. godini ispitano je 484, 470, 468, 487, 480, 400 uzoraka otpadne vode respektivno, od kojih niti jedan nije prelazio maksimalne dopuštene vrijednosti (Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015).



#### 4. PREGLED DOSDAŠNJIH ZNANSTVENIH ISTRAŽIVANJA

Prvu proceduru za izračunavanje izmjene vode Kvarnerskog zaljeva koja se osniva na mjerenju struja dao je 1982. godine Legović (Legović, 1982).

Justić i drugi prvi objavljuju rad 1987. godine koji je pokazao da trend eutrofikacije u gornjem Jadranu postoji te da datira od Drugog svjetskog rata na ovamo (Justić, Legović, & Rottini Sandrini, 1987).

Godine 1997. Legović i Justić u svojem članku (Legović & Justić, 1997) odgovaraju na pitanje kada će tijekom godine masovna pojava fitoplanktona doprinijeti najvećoj hipoksiji u gornjem Jadranu.

Prvi model fitoplanktona razvijaju Legović i Cruzado 1997. godine, koji se osniva na više od jedne hranjive tvari i koji govori da se Redfieldov omjer (omjer ugljika, dušika i fosfora nađen u planktonu i u dubokim oceanima C:N:P = 106:16:1) u vodi ne može uvijek koristiti da bi se doznalo koja je hranjiva tvar ograničavajuća (Legović & Cruzado, 1997).

Godine 1997. Legović u svom radu piše o utjecaju ispuštanja toksičnih tvari na predviđanje modela eutrofikacije (Legović, 1997).

Iste godine Legović objavljuje u radu pregled modeliranja za upravljanje kvalitetom voda u priobalju (Legović & Geček, 2001).

Projekt "Jadran" (Građevinski fakultet, 2009) razrađen na osnovi do tada postojećeg nacionalnog monitoringa, skupljenih podataka, i međunarodne aktivnosti u kojima sudjeluju hrvatske ustanove (u sljedećim intervalima: 1998., 1998.-2000., 2001., 2002.-2003., 2004., 2005.) imao je sljedeće ciljeve:

- sistematsko istraživanje ekosustava nacionalnog morskog područja, posebno zaljeva,
- određivanje mjere između izrabljivanja i zaštite morskih resurs,
- razvijanje i primjena novih tehnologija.

U radu objavljenom 2008. godine Vukić Lušić i drugi (Vukić Lušić, i dr., 2008) procjenjuju trofičko stanje i okolišnu limitiranost hranjivim tvarima računanjem trofičkog indeks (TRIX-a) i obogaćivanja hranjivima bioassya dijatoma *Phaeodactylum tricornutum* na dvije eutroficirane lokacije na sjeveroistočnom Jadranu u Kvarnerskom zaljevu. Pokazalo se

da je u luci Rijeka znatno veća koncentracija otopljenih anorganskih nutrijenata i TRIX indeks (do 7.53), u odnosu na stanicu blizu Opatije.

U okviru prve faze projekta Projekta “Jadran” završene u listopadu 2009. godine izvršena su:

- mjerenja bioloških, kemijskih i fizikalnih veličina na lokalno postavljenim mjernim postajama na nekoliko lokaliteta u Kvarneru,
- numerička simulacija kretanja vodenih masa, koncentracija onečišćivača i fitoplanktona računalnim paketima: POM, ROMS, MIKE 3, MIKE 3 FM,
- objavljivanje konačnih komentara provedene numeričke analize s modelom MIKE 3 FM na području Kvarnera - model se može prihvatiti kao verificiran, te bi trebalo provesti analizu dinamike polja strujanja na području koje se može shvatiti i kao poddomena do sada analizirane domene, i to područje Riječkog zaljeva uz korištenje detaljnije rezolucije numeričkih čvorova.

U lipnju 2012. godine, u okviru Projekta “Jadran” učinjeno je:

- određena fizikalna, kemijska i biološka svojstva morskog okoliša,
- navedeni su stanišni tipovi,
- mjerena je koncentracija ekotoksičnih metala, organokositrenih spojeva i postojanih organskih zagađivača,
- mjerena su opterećenja morskog okoliša: fizički gubici i fizička onečišćenja, onečišćenja opasnim tvarima, obogaćivanje hranjivim i organskim tvarima i biološke smetnje (sanitarna kakvoća plaža).

Janeković i drugi 2010. godine u radu uspoređuju oceanografske modele simulacije polja temperature i saliniteta u Jadranu za 2008. godinu s zapažanjima obalne provodljivosti temperature po dubinama (Coastal Conductivity Temperature Depth- CTD) i satelitski otkrivenoj temperaturi morske površine (Sea Surface Temperature- SST) kako bi se ocijenile prognostičke vještine modela (Janeković, Dutour Sikirić, Tomažić, & Kuzmić, 2010).

Lončar i drugi 2011. godine u sklopu istraživanja modeliraju polja temperature, saliniteta i gustoće pomoću 3D numeričkog modela primijenjenog na Kvarnerski zaljev kako bi se istražio njihov utjecaj na dinamiku oblaka efluenta u blizini četiri podmorska kanalizacijska ispusta u vrijeme puhanja bure (NE smjer) (Lončar, Beg Paklar, & Janeković, 2011).

U radu Lončara i drugih, 2012. godine obrađeno je nekoliko hipotetskih slučajeva izlivanja nafte iz tankera u Kvarnerskom zaljevu korištenjem trodimenzionalnih modela cirkulacije uparenih s modelom izlivanja ulja (Lončar, Beg Paklar, & Janeković, 2012).

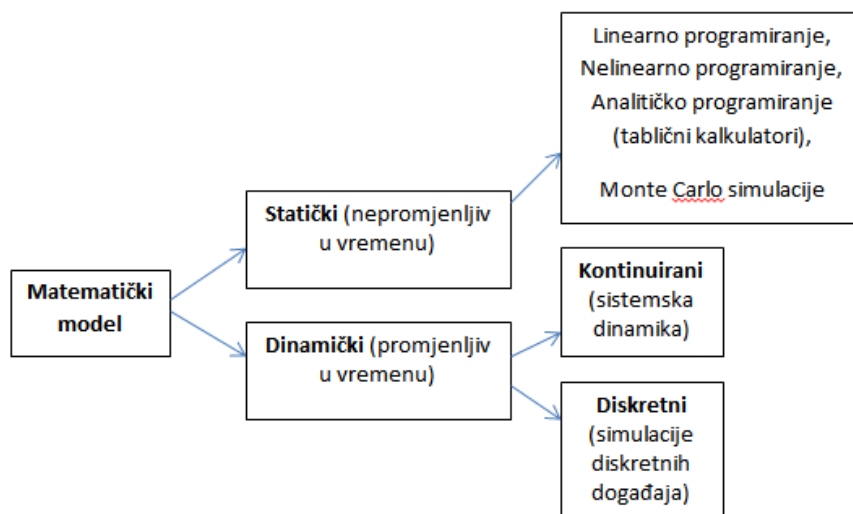
Cilj studije koju su proveli Vukić Lušić i drugi i objavili 2013. godine bio je ocijeniti kvalitetu obalnih voda u Kvarnerskom zaljevu korištenjem složenog trofičkog indeks (TRIX) koji uzima u obzir oceanografske parametre, koncentracije nutrijenata i klorofil *a* kao indikator biomase fitoplanktona (Vukić Lušić, i dr., 2013).

## 5. MATEMATIČKI MODEL

### 5.1. Osnovne značajke modela

Matematičko modeliranje omogućuje da se pomoću matematičkih formulacija pristupa složenim dinamičkim sistemima, kao što je određivanje kvalitete mora uvidom u putanju ispuštenog „oblaka“ efluenta. S obzirom da je takve sisteme nemoguće prikazati u analitičkom obliku, modeli su zadani u proceduralnom (diferencijalnom) obliku kojim se prikazuje način funkcioniranja sistema. Problem se potom rješava numerički, modelom koji oponaša stvarni sustav u vremenu. Cilj modeliranja je uskladiti prividne (modelirane) situacije s stvarnošću.

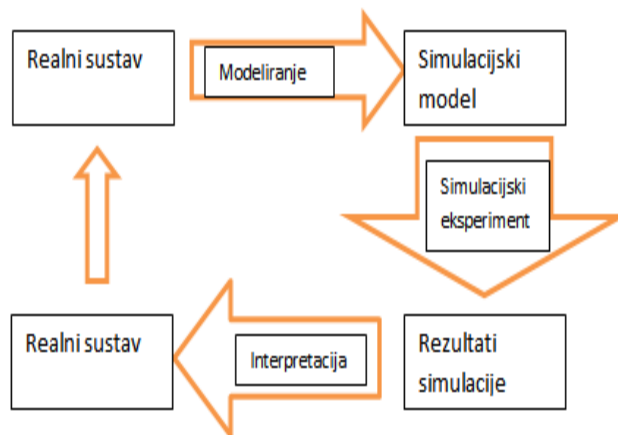
Simulacijski modeli se temelje na matematičkim modelima. Slika 4 prikazuje neke vrste matematičkih modela (Greasly, 2004).



SLIKA 4. OSNOVNE VRSTE MATEMATIČKIH MODELA

Metode matematičkog modeliranja imaju u nekoliko posljednjih desetaka godina sve veću primjenu zbog svoje pouzdanosti i niske cijene.

Slijedeći shematski prikaz ilustrira osnovnu zamisao simulacijskog modeliranja i veze između pojedinih komponenti modeliranja.



SLIKA 5. SIMULACIJSKI PROCES

U tehnici, medicini, biologiji i fizici fenomeni koji doživljavaju kontinuirane promjene u prostoru i vremenu u pravilu se predočavaju diferencijalnim jednadžbama, tj. jednadžbama koje opisuju beskonačno male promjene vrijednosti varijabli. Ako je npr. brzina promjene varijable  $y$  u ovisnosti o varijabli  $x$  zadana kao funkcija varijabli  $x$  i  $y$  jednadžba može biti oblika  $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$ , uz početni uvjet u točki  $x_0$ ,  $y(x_0) = y_0$  (Perović, 2003).

Ako se ovoj diferencijalnoj jednadžbi rješenje ne može pronaći analitički, rješenje  $y(x)$ , treba se riješiti *numerički*. Tri su glavne metode pretvaranja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u sustav algebarskih jednadžbi : *metoda konačnih elemenata*, *metoda konačnih razlika* i *metoda konačnih volumena*.

Za potrebe ovog rada korištena je *metoda konačnih razlika*, kojoj je osnovna ideja da se diferencijali (beskonačno male razlike) zamijene diferencijama (konačnim razlikama) vrijednosti varijabli. Kod upotrebe ove metode moguće je naići na problem pouzdanosti rješenja, jer sve veličine konačnih razlika vrijednosti varijabli ne daju točno i stabilno rješenje početne diferencijalne jednadžbe. Stoga se u sistemskoj dinamici problem originalno formulira u obliku diferencijalnih jednadžbi (Čerić, 1993).

Metoda konačnih razlika se može primijeniti na različite tipove mreža, koje su definirane različitim rasporedima varijabli u prostoru (Arakawa A. , 1972) (Mesinger, 1976).

Primjena određenog tipa mreže ovisi o promatranom problemu (npr. advekcija, difuzija, itd.) pri čemu može doći do neželjenih posljedica numeričkog rješavanja, npr. šum dva intervala mreže (Janjić, 1979) numerička difuzija (Smolarkiewicz, 1983) i sl. U cilju izbjegavanja numeričke neuravnoteženosti (nestabilnost) prilikom rješavanja jednadžbi potrebno je uskladiti vremenski korak s korakom mreže (CFL kriterij).

Uz primjenu odgovarajuće horizontalne sheme, modeliranje dinamike fluida u prostoru (modeli vremenske prognoze, hidrodinamički modeli...) omogućuje izbor vertikalne koordinate. Kod korištenja Kartezijskog koordinatnog sustava, vertikalna os može biti visina/dubina  $z$  (Bone, 1993), tlak, temperatura, veličina  $\sigma$  (Janjić, 1979), tj. modificirani  $\sigma$  sustav (Janjić, 1990).

Nelinearne jednadžbe se mogu riješiti pomoću više metoda, a vrijednosti pojedinih elemenata u budućem koraku se računaju *eksplicitnim*, *implicitnim* ili *kombiniranim* načinom. Važno je utvrditi i *početne* i *rubne* uvjete. Početni uvjeti mogu biti utvrđeni numeričkim vrijednostima u elementima mreže modela, a rubni se uvjeti odnose na rubna područja modela (Gelo, 2000).

U modeliranju morskog okoliša prvo treba definirati sustav, izdvojiti ga u odnosu na vanjski svijet te odrediti međudjelovanje s njim (Benque & Nihoul, 1982). Osnovu modela čine osnovne jednadžbe mehanike fluida koje je moguće proširiti uvođenjem dinamičkih elemenata ovisno o postavljenom cilju i svrsi modeliranja. Pri tom se za ulazne podatke koriste direktna mjerenja na istraživanom području, kao i rezultati mjerenja dobiveni u okviru drugih modela.

Ukoliko je cilj istraživanja utvrditi kvalitetu mora potrebno je proširiti osnovni hidrodinamički model s dodatnim parametrima: bakterije, otopljeni kisik, nafta i njeni derivati, Ph, i dr. Ako je poznata lokacija izvora onečišćenja moguće je simulirati transport željenog parametra onečišćenja (npr. koliformne bakterije) u skladu s kretanjem morske vode, koje je određeno kao funkcija vremena i prostora.

Za simuliranje transporta tvari od izvora u obalno more razvijena su dva pristupa: *near field* i *far field* (Legović, 1997).

Ukoliko je izvor podmorski ispust, *near field* promatra usko područje oko ispusta (do 5 km).

Ukupno razrjeđenje dobije se kao umnožak inicijalne dilucije, disperzije otpadne vode u more i brzine odumiranja bakterija (Metcalf i Eddy, 1979.). Simulacija koncentracije tvari (indikator fekalnog zagađenja) iziskuje poznavanje sljedećih parametara:

- konstrukcija svojstva podmorskog ispusta (broj difuzorskih otvora, duljina difuzorskih cijevi,...)
- sastav i svojstva otpadne vode (konc. Indikatorskih organizama, vrijeme odumiranja u morskoj vodi,...)
- hidrodinamička svojstva mora oko ispusta (struja, dubina, salinitet, temperatura,...).

Prilikom konstruiranja ispusta može se djelovati na početnu diluciju, odabirom duljine i dubine ispusta, a potom konstrukcijom difuzorske sekcije (broj, veličina, oblik otvora) (Fischer, List, Imberger, & Brooks, 1979).

Kod *far field* pristupa najvažniji su hidrodinamički procesi. Oni prenose tvari iz područja veće u područje manje koncentracije do postizanja potpunog razrjeđenja.

Prijenos toplinske energije u moru odvija se kroz *zračenje* (radijacija), *vođenje* (kondukcija) i *prenošenje* (konvekcija). Stoga gušća voda tona, rjeđa se diže, pojedini slojevi mora premještaju se pri čemu dolazi do izmjene topline. Ako se uz ovaj termički proces promatra prenošenje topline uvjetovano gibanjem vode zbog djelovanja vjetrova koji stvaraju valove dolazi do *advekcije*.

Gibanja u morima su najčešće turbulentna jer se tvar koja se prenosi u fluidu kreće turbulentno. Turbulenciju se može predočiti kao vrstu slučajnog gibanja, sastavljenu od mnoštva vrtloga koji se međusobno sudaraju i gibaju vrlo složeno u vremenu i prostoru (Ravlić, 1996).

U numeričkom modeliranju dinamike fluida, turbulencija se uvodi preko podmrežnih procesa, budući da se upotrebom metode konačnih razlika mogu razlučiti procesi do dva intervala mreže (Mesinger, 1976).

U jednadžbi kontinuiteta polja koncentracija, ovim procesima treba dodati *ekstinkciju*, koja se manifestira smanjenjem koncentracije promatrane tvari (npr. neke onečišćujuće tvari) zbog prirodnih procesa kojima je ta tvar podložna: odumiranje, predacija, kemijska reakcija, sedimentacija,...

Složenost hidrodinamike modela povećava se s prisutnošću *stratifikacije* (raslojenosti) tj. nejednolike distribucije saliniteta i temperature u vertikalnom stupcu mora. Čimbenici koji mogu dovesti do raslojenosti su: solarna radijacija, hlađenje gornjih slojeva mora noću ili zimi, razni unosi (rijeke, potoci, podmorski ispusti, padaline,...). Stratifikacija se izražava pomoću unesene topline i miješanja (morske mijene, vjetar). U morima s slabim morskim mijenama, kao što je Sredozemno more, osnovna pokretačka sila je površinsko djelovanje vjetra.

Zbog djelovanja Coriolisove sile gornji sloj mora ne slijedi smjer vjetra već skreće u desno na sjevernoj hemisferi. Na isti način niži slojevi mora također skreću (u odnosu na prethodni) pa im se zbog trenja smanjuje brzina. Na dubini od oko 100 metara smjer gibanja je suprotan smjeru vjetra, a brzina pada na nulu. Sloj mora opisan ovakvim gibanjem pod utjecajem vjetra zove se Ekmanov i karakterizira ga srednji Ekmanov transport u smjeru  $90^\circ$  (u desno na sjevernoj hemisferi) u odnosu na smjer vjetra. U uvjetima izrazite stratifikacije, utjecaj vjetra je najčešće ograničen samo na epilimniji (površinski, topliji i lakši sloj), dok je hipolimniji (duboka, hladnija voda) zaštićen slojem termokline (područje u moru u kojem postoji izraziti temperaturni gradijent tj. promjena temperature).

Fizikalna veličina koja predstavlja kriterij vertikalnog miješanja je Richardsov broj.

Ukratko, prisutnost tvari u moru je rezultat njenog unosa (kanalizacijski ispust, rijeka, nošenje vjetrom, padaline i dr.) i djelovanja hidrodinamičkih procesa (advekcija, difuzija) u ovisnosti o svojstvima mora (ekstinkcija). Kriteriji za ocjenjivanje kvalitete mora temelje se na koncentraciji pojedine tvari. Koncentraciju se može odrediti monitoringom, što je u praksi praćeno poteškoćama zbog velikog razrjeđenja u moru i troškova. Druga mogućnost je simuliranje gibanja mora i prijenos onečišćujuće tvari (Legović, 1997).

Nužno je povezati obje metode tj. simulirati polja koncentracija i usporediti ih s mjernim podacima monitoringa. Ovaj pristup omogućuje ukazivanje na potrebna dodatna mjerenja za situacije koje izlaze iz okvira provedenih mjerenja.



## 5.2. Fizikalni zakoni mehanike fluida

Pri analizi mogućih modela strujanja morskih masa i difuzije onečišćenja iz kanalizacijskih ispusta treba odabrati onaj koji:

- dobro modelira trodimenzionalno polje brzina mora u nestacionarnim uvjetima vremenski promjenljivih rubnih uvjeta i forsirajućih veličina;
- za tako izračunato polje brzina kvalitetno modelira advekciju i difuziju kemijskih sastojaka s istovremenim kemijskim reakcijama.

Komercijalni softverski paket MIKE3 Danskog hidrauličkog instituta zadovoljava spomenute kriterije. Korišten softverski paket MIKE3 (Danish Hydraulic Institute, 2014) namijenjen je modeliranju strujanja vodenih masa u deltama rijeka, zaljevima, priobalnim morima, ali i u oceanima. On služi za simulaciju nestacionarnog trodimenzionalnog strujanja fluida, uzimajući u obzir promjenljivu gustoću, batimetriju i vanjske uzbude kao što su: meteorološke (vjetar, insolacija, plima i oseka), dotok riječnih i kanalizacijskih voda, morske struje i druge vrste hidrografskih uzbuda. Model čine četiri osnovna fizikalna zakona: zakon očuvanja mase, zakon promjene količine gibanja, zakon promjene kinetičke energije, zakon promjene saliniteta te jednačba stanja tekućine. Ti su zakoni predočeni pomoću sedam jednačbi s sedam nepoznanica.

Matematički oblik tih jednačbi glasi:

Jednačba očuvanja mase:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = SS \quad (1)$$

Reynolds osrednjene Navier Stokes-ove jednačbe

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2 \sum_{j=1}^3 \Omega_{ij} u_j \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ijk} \right] + u_i SS, \\ i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (2)$$

transportna jednačba za salinitet:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial (su_j)}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D_s \left( \frac{\partial s}{\partial x_j} \right) \right] + SS \quad (3)$$

transportna jednačba za temperaturu:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial (Tu_j)}{\partial x_j} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D_T \left( \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] + SS \quad (4)$$

te jednačba stanja tekućine:

$$\rho = \rho(T, s, p) \quad (5)$$

Gdje je  $\rho$  lokalna gustoća fluida,  $c_s$  brzina zvuka u morskoj vodi,  $u_i$  brzina u  $x_i$  smjeru,  $\Omega_{ij}$  i,j-ta komponenta Koriolisovog tenzora,  $p$  tlak fluida,  $g_i$  i-ta komponenta vektora gravitacijskog ubrzanja,  $\nu_t$  koeficijent turbulentnog viskoziteta,  $\delta$  Kroneckerov delta simbol,  $k$  turbulentna kinetička enegija,  $s$  slanost i  $T$  temperatura fluida,  $D_s$  i  $D_T$  koeficijenti difuzije slanosti i temperature,  $x_i$  i-ta koordinata i  $t$  vrijeme.  $SS$  označava član izvora/ponora (source/sink) i različit je za razne jednačbe.  $\Omega$  je Koriolisov tenzor

$$\Omega = \omega \begin{bmatrix} 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \sin(\lambda) \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \sin(\lambda) \\ \cos(\varphi) \sin(\lambda) & -\cos(\varphi) \sin(\lambda) & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

pri čemu su  $\varphi$  i  $\lambda$  geografska širina i dužina a  $\omega$  kutna brzina rotacije Zemlje.

Slanost, temperatura i tlak definiraju gustoću mora preko UNESCO-ve jednačbe (UNESCO, 1981)

Upotrijebljen je dvojednačbeni  $k$ - $\varepsilon$  model turbulencije u kojem se koeficijent turbulentnog viskoziteta  $\nu_t$  računa iz loaklnih vrijednosti turbulentne kinetičke enegije  $k$  i njene disipacije  $\varepsilon$  :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

a  $C_\mu$  je eksperimentalna (Chorin, 1967) (Rasmussen, 1993) konstanta.

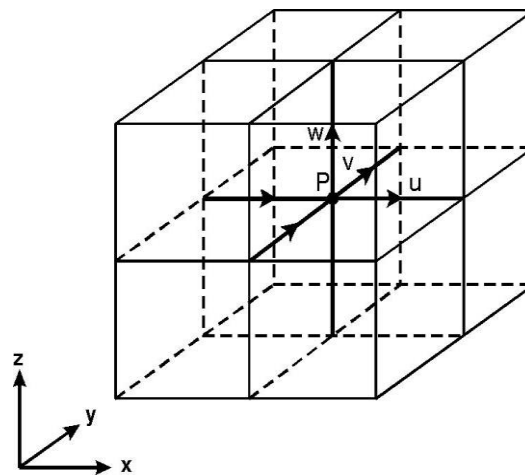
U jednadžbi (1) članu  $div \vec{v}$  dodan je prvi član vremenske derivacije tlaka, tzv. metoda umjetne stišljivosti kako bi cijeli sustav jednadžbi bio bolje definiran za numeričko rješavanje, tj. prestao biti previše krut i postao dominantno hiperboličan.

Cijeli je sustav jednadžbi podijeljen na Hidrodinamički modul: jednadžbe (1), (2), (5) i (6) i Advektivno-Disperzivan modul: jednadžbe (3) i (4).

### 5.3. Numerička formulacija

Hidrodinamički modul se numerički rješava metodom konačnih razlika. Cijela je domena podijeljena u diskretan skup točaka koji čini mrežu čvorova.

U čvorovima su diferencijalni operatori iz (1) i (2) aproksimirani konačnim razlikama koristeći tzv. ADI metodu (Alternative Direction Implicit). Matrične jednadžbe koje dobijemo za svaku jednadžbu i svaku mrežnu liniju se rješavaju algoritmom tzv. Dvostrukog prolaza (Double Sweep algorithm). Konačne se razlike formiraju na tzv. pomaknutoj (staggered) mreži poznatoj kao Arakawa C-mreža (Arakawa & Lamb, 1977) (vidi Sl. 7).



SLIKA 6. MREŽA KONAČNIH RAZLIKA U X, Y I Z PROSTORU

Hidrodinamički model ima sljedeća svojstva:

- nultu grešku mase i količine gibanja i zanemarivu grešku energije kroz vremensko centriranje svih konačnih razlika i dominantnih koeficijenata;
- diskretizacija na Arakawa-C mreži postiže točnost drugog reda za sve članove, tj. pogreška diskretizacije razvoja u Taylorov red je drugog reda;
- dobro uvjetovan rješavač rezultira točnošću, robusnošću i brzinom rješavanja.

Centriranje hidrodinamičkih jednadžbi postiže se rješavanjem niza jednodimenzionalnih prolaza (sweeps), alternirajući između x, y i z smjerova. U x-prolazu tlak p se propagira iz vremenskog trenutka  $n-1/6$  u trenutak  $n+1/2$ , brzina u iz trenutka n u  $n+1$ , dok se za brzine v i w uzimaju poznate vrijednosti u trenucima  $n-2/3$  i  $n+1/3$  te  $n-1/3$  i  $n+2/3$  respektivno. U y-prolazu tlak p se propagira iz vremenskog trenutka  $n+1/6$  u trenutak  $n+5/6$ , brzina v iz trenutka n u trenutak  $n+1$  izračunate u x-prolazu, dok se za brzinu w uzimaju vrijednosti u trenucima  $n-1/3$  i  $n+2/3$ .

Konačno u z-prolazu tlak p se propagira iz vremenskog trenutka  $n+3/6$  u trenutak  $n+7/6$ , brzina w iz trenutka  $n+2/3$  u  $n+5/3$ , dok se za brzine u i v uzimaju poznate vrijednosti iz prethodnih trenutaka n i  $n+1$  te  $n+1/3$  i  $n+4/3$  respektivno.

Sumarno sva tri prolaza zajedno daju perfektno vremensko centriranje na trenutak  $n+1/2$ . Sustav jednadžbi se rješava direktno, koristeći tehniku bočnog punjenja (side feeding).

U jednom vremenskom koraku x-prolaz se rješava u padajućem smjeru y i z vrijednosti, nazvanim dolje prolaz (down) a u sljedećem vremenskom koraku u rastućem smjeru y i z vrijednosti, tzv. gore prolaz (up).

Prostorno centriranje nije problem i rješava se klasičnim centralnim razlikama.

Jednadžbe (1) i (2) aproksimirane na gornji način u jednom jednodimenzionalnom prolazu rezultiraju algebarskim sustavom s trodijagonalnom matricom sustava:

$$A_j u_{j-1}^{n+1} + B_j p_j^{n+1/2} + C_j u_j^{n+1} = D_j / k, l \quad (8.1)$$

$$E_j p_j^{n+1/2} + F_j u_j^{n+1/2} + G_j p_{j+1}^{n+1/2} = H_j / k, l \quad (8.2)$$

Gdje su koeficijenti A, B, C, D, E, F, G, H svi izraženi preko poznatih vrijednosti. Jednadžbe (8.1) i (8.2) su dane za x-prolaz, analogne su jednadžbe za y- i z -prolaz.

#### 5.4. Rubni uvjeti hidrodinamičkog modela

Sustav jednažbi (1), (2) i (5) možemo riješiti za zadanu domenu jednoznačno smo uz poznate rubne i početne uvjete. Značaj rubnih uvjeta se ne može preneglasiti. Općenito potrebno je poznati sljedeće rubne uvjete:

- tlak (ili razinu mora) na otvorenim (ustrujnim i istrujnim) granicama i komponente brzina paralelne otvorenim granicama,
- batimetriju (dubine mora i zemne granice),
- otpor dna,
- brzinu i smjer vjetra i koeficijent trenja,
- barometarski tlak (gradijent).

#### 5.5. Trenje vjetra

Sila trenja vjetra nastaje zbog vertikalnog smika pod pretpostavkom izjednačenih vrijednosti smikova zraka i morske vode na morskoj površini:

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\rho_z}{\rho} C_w W W_x \quad (9)$$

Gdje je  $\rho_z$  gustoća zraka,  $W$  brzina vjetra i  $C_w$  koeficijent trenja prihvaćene vrijednosti

$$C_w = 0.0026$$

#### 5.6. Otpor dna

Pretpostavljen je logaritamski profil brzina između morskog dna i prvog računskog čvora koji je prilagođen turbulentnom modelu, prema tzv. Smagorinsky formulaciji turbulentnog viskoziteta.

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} = \left\{ \frac{2\sqrt{2}D}{3} \frac{1}{l} \left[ \left(1 - \frac{z_m}{D}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(1 - \frac{z_b}{D}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{l}{\kappa} \log\left(\frac{z_m}{k_s/30}\right) \right]^2 U(z_b) u(z_b) \right\} \quad (10)$$

Gdje je  $z_m$  udaljenost od dna kod koje se podudaraju profili brzina Smagorinsky i logaritamskog oblika,  $l$  Smagorinsky skala duljine,  $z_b$  udaljenost od dna,  $D$  dubina mora,  $U$  intenzitet brzine struje,  $\kappa$  Karmanova konstanta,  $k_s$  hrapavost dna.

## 6. BIOLOŠKI MODEL

### 6.1. Sanitarna kvaliteta obalnog mora

Kupanje u onečišćenom moru i konzumiranje hrane iz njega može djelovati nepovoljno na ljudsko zdravlje, što onečišćenje mora u obalnim zonama uz urbane sredine čini veliki problem (Perović, 2003).

Uslijed povećanog unos štetnih tvari dolazi do narušavanja prirodnog ciklus (eutrofikacija) u okviru kojeg heterotrofni organizmi razgrađuju organsku tvar stvarajući životne uvjete za autotrofne organizme koji uz pomoć Sunčeve svjetlosti i kisika stvaraju biomasu. Potrebni kisik dijelom potječe iz atmosfere, dijelom iz fotosinteze vodenih biljaka. Dovođenjem prevelike količine hrane (onečišćivači organskog porijekla koji su hrana heterotrofnim organizmima) sprječavanjem ili smanjenjem koncentracije kisika u moru ili onemogućavanjem dolaska svjetlosti (unošenjem suspendiranih tvari) u otpadne vode, onemogućuje se odvijanje proces samopročišćenja (TEH-Projekt, 1988).

Moć samopročišćenja morske vode uvjetovana je sljedećim čimbenicima:

- fizičkim: adsorpcija, sedimentacija, disperzija i dilucija, sunčeva energija, temperatura, pH;
- kemijskim: soli, otopljeni kisik, hranjivi sastojci;
- biološkim: baktericidno svojstvo, antibiotski sastojci, mikroorganizmi morske vode.

Posljedica može biti smanjena vidljivost, koja uzrokuje znatne poremećaje u ekosustavu.

Kanalizacijskim ispuštima u more stižu različite skupine mikroorganizama od kojih su pojedini patogeni (uzročnici raznih infekcija i bolesti ljudi i životinja). Postojanje takvih mikroorganizama u moru ukazuje na mikrobiološko onečišćenje, a na osnovi stupnja onečišćenja definira se *mikrobiološka* ili *asanitarna kvaliteta mora*. Mikrobiološko onečišćenje je izravna posljedica nepročišćenih ili djelomično pročišćenih komunalnih otpadnih voda. Osim kanalizacijom dio ovog onečišćenja može doći zračnim putem (vjetar, kiša) te rijekama i podzemnim vodama.

Mikroorganizmi su jednostanični i kolonijalni, prokariotski i eukariotski organizmi, nevidljivi golom oku. U prokariotske mikroorganizme (pripadnike carstva Monera) ubrajaju se bakterije i cijanobakterije, a u eukariotske (pripadnike carstva Protista) ubrajaju se jednostanične ili kolonijalne alge, gljive i jednostanični i kolonijalni heterotrofni organizmi (poznati kao praživotinje) (Margulis i Schwartz, 1999) .

## 6.2. Onečišćenje mora

Onečišćenje (zagađenje) mora je svako prirodno ili umjetno, izravno ili posredno unošenje i odlaganje tvari, energije i stranih mikroorganizama koji mogu poremetiti prirodnu ravnotežu morskog ekosustava, smanjiti primarnu produkciju moru, umanjiti njegove rekreativne, estetske i druge kvalitete te (ne)posredno ugroziti ljudsko zdravlje.

U obalnim zonama mogući izvor mikroorganizama su kupaći. Mikroorganizmi iz otpadne vode raspršuju se ispuštanjem u more. More sadrži malo organskih supstrata i esencijalnih čimbenika za rast, što onemogućuje njihovo optimalno razmnožavanje. Međutim patogeni se organizmi u moru zadržavaju ugradnjom u druge populacije, npr. planktonske unutar kojih se razmnožavaju. Kroz njih se višestruko koncentriraju u hranidbenom lancu morskih ekosustava. Ulogu prijenosnika (vektora) preuzima pretežno fitoplanktonska vegetacija koja filtrira, umnožava i raznosi mikroorganizme brzinom vlastite disperzije u moru (Perović, 2003).

Mikroorganizmi se mogu ugraditi i u zooplanktone te potom u cijeli niz konzumenata i predatora, a najčešće su to čistači mora u čijim se organizmima onečišćivači (bakterije, virusi, toksične i radioaktivne tvari itd.) višestruko koncentriraju. S epidemiološke točke gledišta, najveću pozornost zaslužuju školjkaši koji su često uzrok infekcija ili trovanja probavnog trakta. Hrane se filtriranjem morske vode (oko 40 l dnevno, u idealnim uvjetima i do 80 l dnevno) provođenjem kroz sustav škržnih organa gdje se filtrirana organska tvar izdvaja i zadržava. Na ovaj način se najveći dio mikroorganizama koncentrira u školjkama.

Štetno djelovanje mora na alohtone mikroorganizme dovodi do njihovog uništenja ili stres uslijed nagle promjene životnih uvjeta (niža temperatura, viši salinitet, pomanjkanje hrane).

Dio bakterija koji se prilagodi novim uvjetima gubi svoju sposobnost kultivacije do potpune neaktivnosti, međutim ako je riječ o patogenim organizmima oni pritom zadržavaju svoju infektivnost. Štetno djelovanje mora na mikroorganizme uključuje fizikalne, kemijske i biološke procese.

### 6.3. Indikatorski organizmi i standardi za procjenu sanitarne kvalitete mora

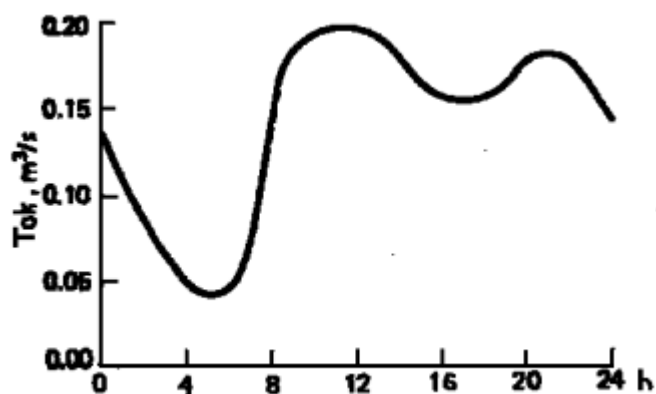
Sigurna procjena opasnosti koja prijeti kupačima zbog onečišćenog mora nameće potrebu da se definiraju:

- indikatorski organizmi,
- kriteriji i standardi za procjenu sanitarne kakvoće mora tj. stupnja rizika za ljudsko zdravlje.

Jedni od indikatora praćenja sanitarne kvalitete mora su fekalni organizmi- tri grupe bakterija koje potječu iz probavnog trakta ljudi i toplokrvnih životinja: **ukupni koliformi** (UK), **fekalni koliformi** (FK) i **fekalni streptokoki** (FS). U ovom istraživanju korišteni su FK i FS.

Otkrivanje kulturabilnih stanica (imaju sposobnost diobe, pa na hranjivoj podlozi stvaraju kolonije) je jednostavno i može se ostvariti rutinskim laboratorijskim testovima u trajanju manje od 48 sati. Ove bakterije ukazuju na prisutnost otpadnih kanalizacijskih voda. U otpadnim vodama koncentracije tih bakterija variraju ovisno o dijelu dana temperaturi (veća je danju, ljeti), količini oborina i dr. Prema Metcalfu (Metcalf & Eddy, 1979), tipične koncentracije indikatorskih organizama u neobrađenim otpadnim vodama kućanstva su:

- ukupni koliformi:  $10^7$ - $10^8$ (100 ml)<sup>-1</sup>,
- fekalni koliformi:  $10^6$ - $10^7$ (100 ml)<sup>-1</sup>,
- fekalni streptokoki:  $10^5$ - $10^6$ (100 ml)<sup>-1</sup>.



SLIKA 7. TIPIČNE SATNE VARIJACIJE TOKA OTPADNE VODE IZ DOMAĆINSTVA (METCALF & EDDY, 1979)



#### 6.4. Koliformni organizmi

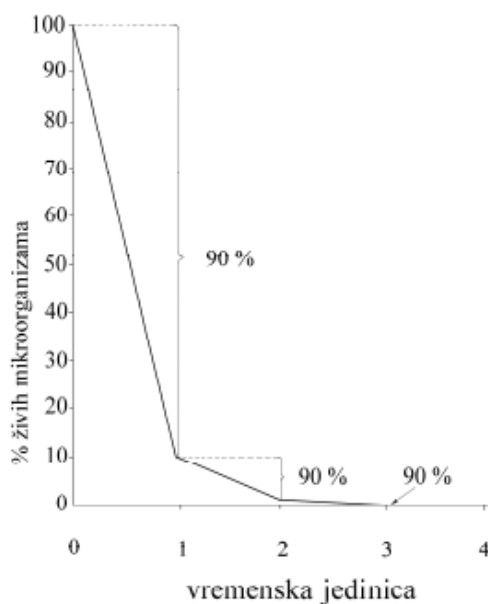
Ljudski crijevni trakt sadrži mnoštvo štapičastih koliformnih bakterija. Koliformi štite zdravlje čovjeka zbog odbojnog djelovanja na razne proteolitičke i patogene bakterije, ali patogeni koliformi uzrokuju razne crijevne zaraze.

Većina patogenih organizama prisutnih u otpadnim i onečišćenim vodama je malobrojna i teško ih je izolirati. Koliformni su organizmi brojniji i jednostavniji za testiranje pa se mogu koristiti kao indikatorski organizmi kvalitete vode, ukazujući svojim prisutstvom na mogućnost prisutstva patogenih organizama. Ukoliko ih nema u vodi može se pretpostaviti da nema ni patogenih organizama.

Realni kriterij smrti mikroorganizama je njihov gubitak sposobnosti reprodukcije (Karaklašević, 1987). Bitna karakteristika koliformnih organizama je ta što im se broj ne povećava u moru nego se smanjuje prema logaritamskoj funkciji (Slika 10). Postoje razlike između vrsta, ali sličnost im je da fermentiraju laktozu.

Većina koliformnih bakterija iz ljudskih fekalija pripadaju rodu *Escherichia*, manji broj rodu *Klebsibella*. Teškoću upotrebe ovih organizama kao indikatorskih predstavlja njihova mogućnost rasta na podlozi, pa njihovo prisutstvo u moru ne ukazuje uvijek na onečišćenje fekalnim otpadom (Perović, 2003).

Neposredno fekalno porijeklo koliformnih bakterija potvrđuje se ako se daljnjom bakteriološkom obradom identificiraju kao *Escherichia coli* ili ako su (bez obzira na rod, vrstu, grupu) udruženi s drugim klicama istog porijekla.



SLIKA 8. KRIVULJA UGINUĆA MIKROORGANIZAMA IZLOŽENIH SMRTNOM FAKTORU U KONSTANTNIM UVJETIMA U JEDINICI VREMENA (KARAKAŠEVIĆ, 1987)

#### 6.4.1. Fekalni koliformi (FK)

Fekalni koliformi fermentiraju laktozu na temperaturi od 44.5 °C pri čemu unutar 24 sta proizvode kiselinu i plin. Dnevne količine koje se odnose na ljude su oko 2 milijarde fekalnih koliforma (Metcalf & Eddy, 1979).

Fekalni koliformi visoko koreliraju s stupnjem fekalnog zagađenja koje potječe od toplokrvnih organizama te se smatraju boljim indikatorom sanitarne kvalitete od ukupnih koliforma. Mogućnost razmnožavanja u moru im je vrlo mala.

Najzastupljenija vrsta unutar ove grupe je *Escherichia coli* koja čini između 75 i 95% od ukupnih broja fekalnih koliforma (Krstulović & Šolić, 1997).

Srednja vrijednost  $T_{90}$  iznosi 2,2 sta na svjetlu i 76,4 sta u mraku (Šolić & Krstulović, 1992.) (Šolić & Krstulović, 1994).

#### 6.4.2. Fekalni streptokoki (FS)

FS su gram-pozitivni<sup>2</sup> ili ovalni koki koji dolaze u parovima ili u kratkim lancima. Osim crijevnog porijekla (prema (Metcalf & Eddy, 1979)) čovjek izbacuje dnevno oko 450 milijuna FS), nalaze se i u pojedinim biljkama i biljnim produktima, pa otpadne tvari prehrambene industrije mogu biti nefekalni izvor ovih bakterija u moru.

U kombinaciji s fekalnim koliformima mogu pružiti precizniju informaciju o izvoru onečišćenja, jer pojedine vrste imaju specifične domaćine. Omjer FK: FS se može upotrijebiti kao pokazatelj fekalnog onečišćenja (za čovjeka je nešto veći od 4).

Obzirom da duže preživljavaju u moru od ukupnih i fekalnih koliforma (7,4 sta na svjetlu i 148,3 sta u mraku, prema Metcalfu i Eddyju (Metcalf & Eddy, 1979) pokazatelj su malo starijeg onečišćenja te mogu poslužiti u određivanju mjesta uzrokovanja od izvora onečišćenja ili vremena koje je prošlo pri dolasku otpadnih voda fekalnog porijekla na mjesto uzorkovanja.

### 6.5. Kriteriji i standardi za procjenu sanitarne kvalitete mora

*Kriterij* određivanja kvalitete mora može se definirati kao kvantificirani odnos između gustoće indikatora u moru i potencijalnog rizika za ljudsko zdravlje. Na osnovu kriterija propisuje se *standard*, koji predstavlja prihvatljivu maksimalnu razinu indikatora u moru. Razina indikatora viša od maksimalne dopuštene vrijednosti nije prihvatljiva s obzirom na razinu rizika za ljudsko zdravlje.

Hrvatska je prihvatila i propisala preporučene kriterije Europske unije za određivanje kvalitete mora za kupanje prihvaćanjem i potpisivanjem Uredbe o kakvoći mora za kupanje (Narodne novine 73, 2008).

Pošto su u toj Uredbi kao indikatori za određivanje kakvoće mora crijevni enterokoki i *Escherichia coli*, a u softveru MIKE, korištenom u radu ih nema, za potrebe ovog rada

---

<sup>2</sup> Gram-pozitivne bakterije imaju staničnu stijenku koju čine debeli (višeslojni) sloj [peptidoglikani](#) (50-90 % stanične stijenke). Peptidoglikani zadržavaju boju (kristalviolet) unutar stijenke i nakon ispiranja alkoholom. Gram-negativne bakterije imaju tanji sloj peptidoglikana (10 % stanične stijenke), te se kristalviolet ispiri alkoholom. Gram-negativne bakterije imaju i dodatnu vanjsku membranu koja sadrži [lipide](#), a kod njih je i stanična stijenka odvojena od stanice periplazmatskim prostorom (Wikipedia, 2015).  
Wikipedia, 2015, Metoda bojanja po gramu, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_bojanja\\_po\\_Gramu](https://hr.wikipedia.org/wiki/Metoda_bojanja_po_Gramu), posjećena 27.12.2015.

korišteni su fekalni koliformi i fekalni streptokoki, indikatori propisni u ranijoj Uredbi o standardima kakvoće mora na morskim plažama (Narodne novine 82/94, 1996).

Na području Primorsko-goranske županije ispitivanje kakvoće mora vrši zdravstveno-ekološki odjel Zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije Rijeka. Kontrolu otpadnih voda vrši Odsjek za kontrolu otpada i otpadnih voda. Ispitivanja se provode sukladno sljedećim zakonskim aktima: Zakon o vodama (Narodne Novine 153, 2009) (Narodne Novine 63, 2011), (Narodne Novine 130, 2011), (Narodne Novine 56, 2013) i Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (Narodne novine 80, 2013).

Uredbom o standardima kakvoće mora na morskim plažama (Narodne novine 82/94, 1996) određeni standardi su prikazani u tabeli 1.

Određivanje	Granična vrijednost	Način određivanja
Fekalne koliformne bakterije u 100 ml	100 (u 80% uzoraka)	a) NBB*** 44.5°C
	200 (u 20% uzoraka)	b) MF***- selektivni agar 44.5°C
Fekalni streptokoki u 100 ml	100 (u 80% uzoraka)	a) NBB*** 35-37°C
	200 (u 20% uzoraka)	b) MF***- selektivni agar 35-37°C

Tabela 1. Standardi za ocjenu kakvoće mora nakon svakog ispitivanja, (Narodne novine 82/94, 1996)

\*\*\* NBB- najvjerojatniji broj bakterija

\*\*\* MF- membranska filtracija

## 6.6. Biološki model ECOLab

U provođenju istraživanja za ovaj doktorski rad korišten je biološki model Ecolab softverskog paketa MIKE.

ECOLab je numerički laboratorij za ekološko modeliranje. To je generički i otvoreni alat za prilagođavanje modela vodenih ekosustava koji opisuju kvalitetu vode i eutrofikaciju. ECOLab predlošci opisuju fizičke, kemijske i biološke procese povezane s određenim ekološkim problemima i zagađenjem vode. Predlošcima se mogu odrediti koncentracije brojnih varijabli, npr. bakterija (koje mogu narušiti kvalitetu vode za kupanje), smanjenje koncentracije kisika, povećane koncentracije nutrijenata, interakcije klorofil-nutrijenti i razgradnja kemijskih tvari (Danish Hydraulic Institute, 2003).

ECOLab je integriran unutar advekcijско-disperzijskog modela, koji opisuje proces fizičkog transporta u svakoj točki mreže koja je unutar područja interes. Potrebni podaci su koncentracije na rubovima promatranog područja, protok i koncentracija na izvorima zagađenja, temperatura vode i drugo.

Ovaj softver rješava jednadžbe sustava korištenjem metode racionalne ekstrapolacije u integriranoj dvostupanjskoj proceduri s advekcijо-disperzijskim modelom.

### 6.6.1. Predlošci za određivanje kvalitete vode

Predlošci za određivanje kvalitete vode se mogu koristiti za:

- proučavanje higijenskih problema vezanih uz bakterije iz kanalizacijskih ispusta ili drugih izvora,
- praćenje preživljavanja bakterija u odnosu na različite uvjete u okolini,
- utvrđivanje promjena koncentracija kisika vezanih uz BOD (biological oxygen demand) biološku potrebu za kisikom, amonijak i druge tvari koje konzumiraju kisik,
- praćenje širenja, razgradnje i interakcije između anorganskih hranjivih tvari: amonijak, nitriti, nitrati i fosfati,
- evaluaciju potencijalnih eutrofikacijskih problema vezanih uz količinu hranjivih tvari (dušika i fosfora) i koncentraciju klorofila-*a*,
- evaluaciju truljenja kemijskih tvari baziranu na razinama koncentracija.

## 6.7. Predložak ECOLaba za kvalitetu vode

Model za određivanje kvalitete vode WQ (water quality) je integriran s advekcijsko-disperzijski AD (advection-dispersion) modelom i simulira reakcije u složenim sistemima. WQ model rješava sustav diferencijalnih jednadžbi koje opisuju fizičke, kemijske i biološke interakcije preživljavanja bakterija, uvjetima kisika, i povećanim koncentracijama nutrijenata u vodenim ekosustavima. Rješenje se bazira na numeričkoj integracijskoj rutini (Danish Hydraulic Institute, 2003).

AD računa konzervativni transport modeliranih komponenti kao bazu za opis uvjeta za kvalitetu vode. WQ procesi u kombinaciji s AD transportom daju završni rezultat.

### 6.7.1. Modelirani procesi s kisikom

Brojni procesi utječu na koncentraciju kisika u vodi.

1. Reaeracija je proces koji opisuje razmjenu kisika između otopljenog kisika u vodi i u atmosferi.

Proces reaeracije je opisan jednadžbom:

$$\frac{dDO}{dt} = K_2(C_s - DO) \quad (11)$$

gdje je  $DO$  (dissolved oxygen) - otopljeni kisik,  $\text{mg O}_2\text{l}^{-1}$ ,

$C_s$  - sturacijska konstanta otopljenog kisika,

$$C_s = 14.652 - 0.0841S + T\{0.00256S - 0.41022 + T(0.007991 - 0.0000374S - 0.00007774T)\}$$

$T$  - temperatura vode,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$S$  – salinitet vode, ppt,

$K_2$  - reaeracijska konstanta pri  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{dan}^{-1}$ ,

$$K_2 = 3.93 \cdot V^{0.5} / H^{1.5} + \frac{0.728wsp^{0.5} - 0.371 \cdot wsp + 0.0372wsp^2}{H} \quad (12)$$

gdje je

$wsp$  - horizontalna komponenta brzine vjetra,

$V$  – brzina vode

$H$  - stvarna dubina vode.

2. Proces proizvodnje kisika, fotosinteza je unutar WQ (water quality) predložka opisna relativno prema maksimalnoj proizvodnji u podne i varira u ovisnosti o dijelu dana i relativnoj dužini dana.

Fotosinteza je opisna jednadžbom:

$$P = \begin{cases} P_{\max} \cdot \cos 2\pi(\tau / \alpha), za \tau \in [t_{gore}, t_{dolje}] \\ 0 za \tau \notin [t_{gore}, t_{dolje}] \end{cases}, \quad (13)$$

gdje je  $P$  - stvarna proizvodnja kisika,  $gO_2m^{-2}dan^{-1}$ ,

$P_{\max}$  - maksimalna proizvodnja kisika u podne,  $gO_2m^{-2}dan^{-1}$ ,

$\tau$ - stvarna duljina trajanja dana u odnosu na podne

$\alpha$ - stvarna relativna duljina dana

$t_{gore,dolje}$ - vrijeme izlaska i zalaska sunca

3. Disanje je proces kojim autotrofi i heterotrofi konzumiraju kisik i ovisi o temperaturi (Danish Hydraulic Institute, 2003).

U WQ modelu disnje je predstavljeno izrazom:

$$R = R_{20} \cdot \Theta_2^{(T-20)} \quad (14)$$

gdje je  $R$ - stvarna brzina disnja biljaka, bakterija i životinja,  $gO_2m^{-2}dan^{-1}$ ,

$R_{20}$  - brzina disnja pri 20°C,  $gO_2m^{-2}dan^{-1}$ ,

$\Theta_2$ - Arrheniusov temperaturni koeficijent (temperaturni koeficijent za disanje heterotrofa)

4. Potražnja sedimenta za kisikom (Sediment Oxygen Demand-SOD) iz raspadanja organske tvari koja ne potječe iz izvora zagađenja je opisna posebno. Pretpostavlja se da SOD ovisi smo o koncentraciji kisika i temperaturi. Michaelis-Mentenov izraz se koristi kako bi se simulirao proces pri uvjetima niskih koncentracija kisika.

Potražnja sedimenta za kisikom opisna je izrazom:

$$SOD = \frac{DO}{HS\_SOD + DO} \cdot \Theta_3^{T-20} \quad (15)$$

gdje je:

$DO$ - otopljeni kisik,  $mgO_2/l$ ,

$T$ -temperatura vode, °C,

$HS\_SOD$ - koncentracija poluzasićenja kisikom, mgO<sub>2</sub>/l,

$\Theta_3$ - Arrheniusov temperaturni koeficijent.

### 6.7.2. Koliformi

Najpatogeniji mikroorganizmi se najčešće ne mogu razmnožavati ili preživjeti u svim periodima u vodenim ekosustavima. Sedimentacija, gladovanje, sunčeva toplina, pH, temperatura i konkurencija i grabežljivost od drugih mikroorganizama su faktori koji utječu na smanjenje broja patogenih bakterija.

*Escherichia coli* (*E.coli*) je jedna od dominantnih vrsti bakterija u fekalijama ljudi i toplokrvnih životinja. Organizam se smatra ne patogenim, ali se često koristi kao pokazatelj zagađenja vode fekalijama što ukazuje na mogućnost postojanja patogenih organizama. Dvije grupe se metodološki razlikuju: „ukupni koliformi“ i „fekalni koliformi“. Koncept „fekalni koliformi“ može uključivati široki rang bakterija, od kojih se mnoge ne nalaze isključivo u fekalijama. Iako je izraz „fekalni koliformi“ specifičniji može uključivati brojne bakterije pored *E.coli*. Zbog navedenoga se od eksperimenta koji uključuju samo *E.coli* ne može očekivati da reproduciraju egzaktno ponašanje „totalnih koliforma“ ni „fekalnih koliforma“.

Brzina odumiranja koliformnih bakterija (ukupnih ili fekalnih) je u MIKE 11 WQ izražena izrazom koji sadrži ovisnost gore spomenutih okolišnih uvjeta.

$$K_d = K_{d0} \cdot \Theta_s^{sal} \cdot \Theta_I^I \cdot \Theta_T^{T-20} \quad (16)$$

gdje je  $K_d$ - brzina odumiranja ukupnih ili fekalnih koliforma, dan<sup>-1</sup>,

$K_{d0}$ - brzina odumiranja pri 20 °C, salinitetu od 0‰ i tami, dan<sup>-1</sup>,

$\Theta_s$  – koeficijent saliniteta za brzinu odumiranja

$sI$ - salinitet

$\Theta_I$ - koeficijent svjetla za brzinu odumiranja

$I$  - intenzitet svjetla integriran po dubini, Kw<sup>m<sup>-2</sup></sup>,

$\Theta_T$ - koeficijent temperature za brzinu odumiranja

$T$ - temperatura vode, °C.

Osim koeficijenata u gornjoj jednadžbi, ulazni parametri modela odumiranja koliforma su maksimalna inoslacija (Kw<sup>m<sup>-2</sup></sup>) u podne, i koeficijent slabljenja svjetla s stupcem vode (m<sup>-1</sup>).



Intenzitet svjetla u promatrano doba dana je računato uz pretpostavku da intenzitet svjetla varira kroz dan sinusoidalno. Srednja vrijednost intenziteta svjetla je nađena integriranjem po dubini.

#### DULJINA DANA

Određivanje uvjeta svjetla koji utječu na primarne proizvođače u vodenom stupcu u ekološkim se modelima najčešće sastoji od dva dijela: iradijativne energije vodene površine, i određivanje podvodnog svjetla, što slijedi iz iradijativne energije vodene površine.

#### OVISNOST O TEMPERATURI

Mnogobrojne okolišne reakcije ovise o temperaturi. Reakcije koje uključuju biološke elemente su direktno „pogođene“ promjenom temperature zbog povećanja biološke aktivnosti pri višim temperaturama. Druge se reakcije također mogu pojačati povećanjem temperature zbog veće molekularne aktivnosti.

Temperaturna funkcija (Arrheniusov izraz), centrirana u odnosu na 20° C, se mijenja u istom smjeru kao i temperatura:

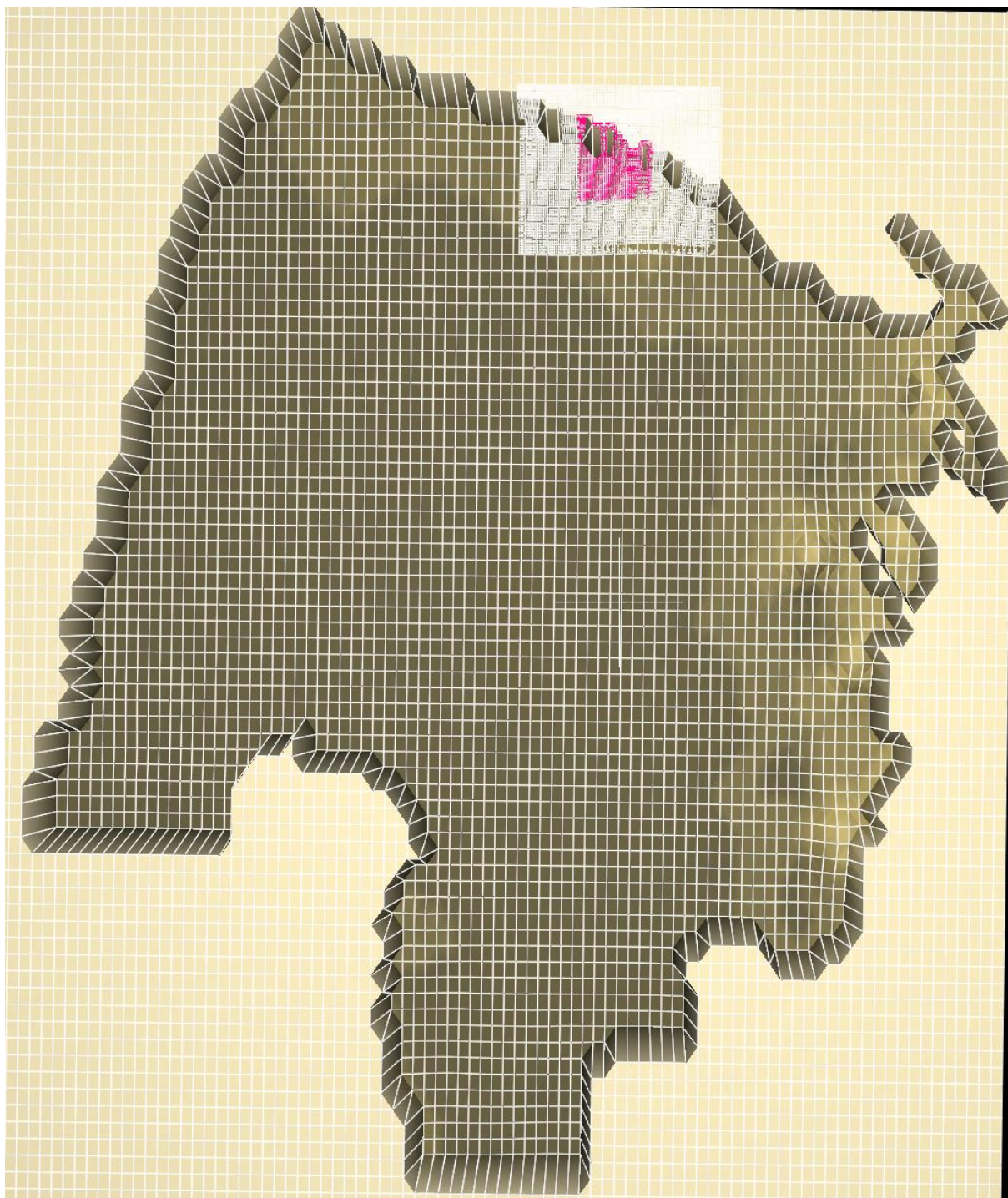
$$f(T) = \Theta^{(T-20)} \quad (17)$$

gdje je  $T$ -temperatura,  $\Theta$ -temperaturni koeficijent.

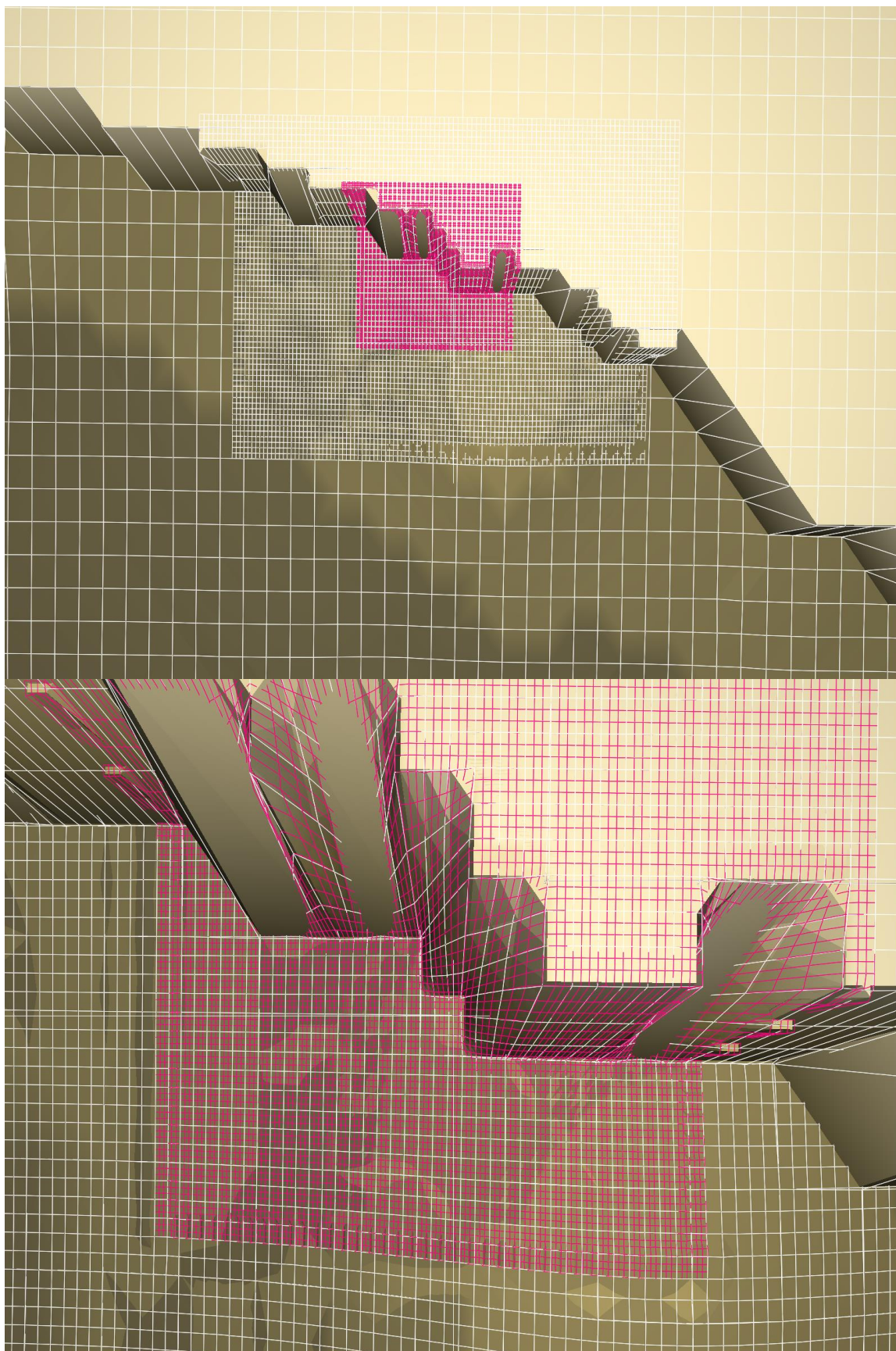
## 7. MREŽE KONAČNIH RAZLIKA

Modelirano je područje mora Kvarnerskog zaljeva koji se nalazi između istočne obale Istre, obale grada Rijeke i Kostrene, otoka Krka i Cres. Analiziran je utjecaj finoće mreže konačnih razlika na rezultat simulacije onečišćenja na način da su definirane tri mreže: gruba, fina i najfinija i za sve njih uspoređeni rezultati. Osnovna, gruba mreža ima korak (tj. udaljenost između susjednih čvorova) 165 m u ekvatorijalnom i 232 m u meridijalnom smjeru (vidi Sliku 9). Fina mreža je tri puta manjih dimenzija 55 m u ekvatorijalnom i 77,33 m u meridijalnom smjeru, ugniježđena je u gruboj i prekriva smo sjeverni dio Kvarnerskog zaljeva. Najfinija mreža je ugniježđena u finoj mreži i tri puta je finija od fine, dimenzija 18,33 m ekvatorijalno i 25,77 m meridijalno i prekriva smo dio Kvarnerskog zaljeva u okolici ispusta Delta. Vertikalne dimenzije svih mreža su jednake i iznose 2 m.

Dubine mora prikazane su na slikama 9 i 10 u nijansama smeđe boje. Uglavnom se one kreću oko 60 m, osim uz sjevernu obalu i otok Krk gdje su one manje.

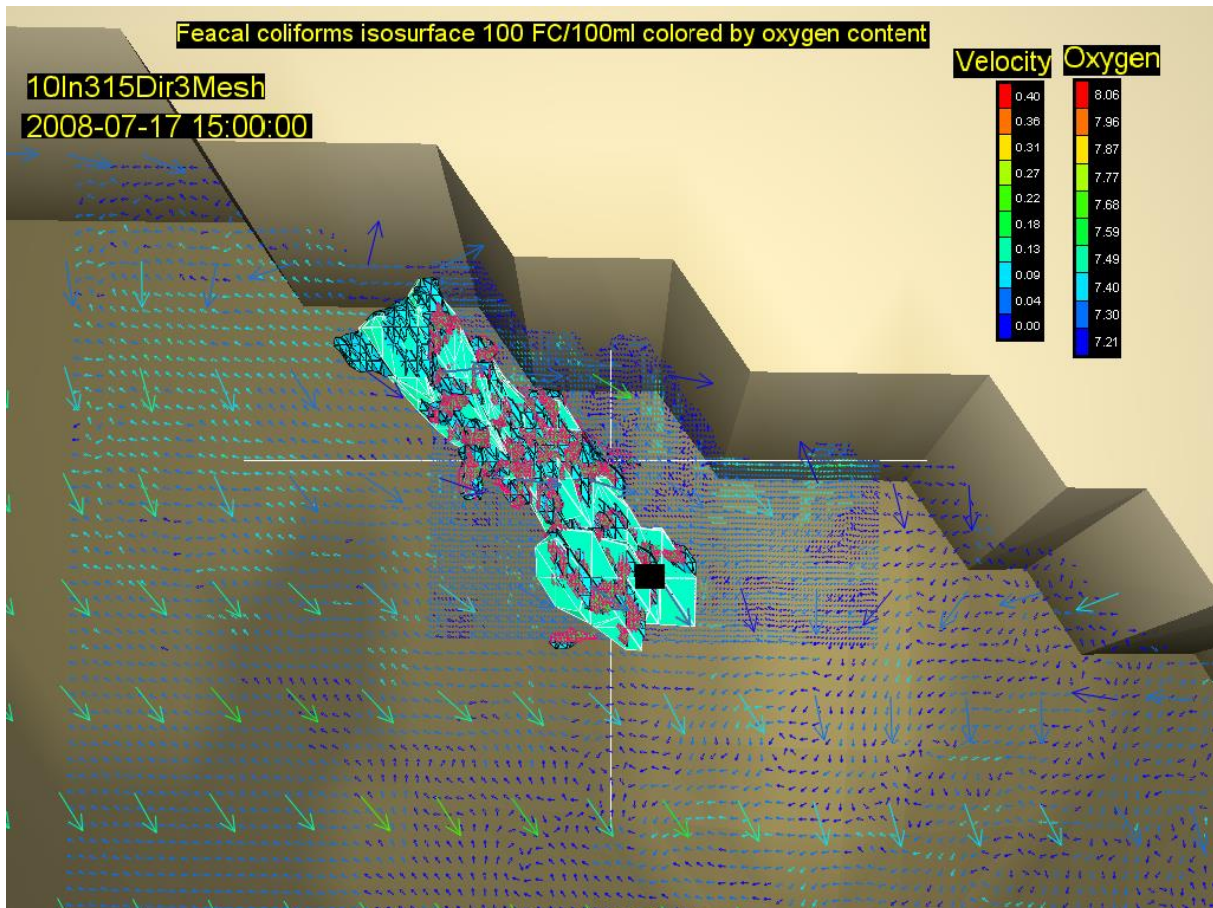


Slika 9. Prikaz tri mreže modela konačnih razlika: grube – bijele linije na tamnosmeđoj podlozi (165m X 232m) (prikazana svaka druga linija), fine – bijelo (55m X 77,33m) i najfinije – roza (18,33m X 25,77m)

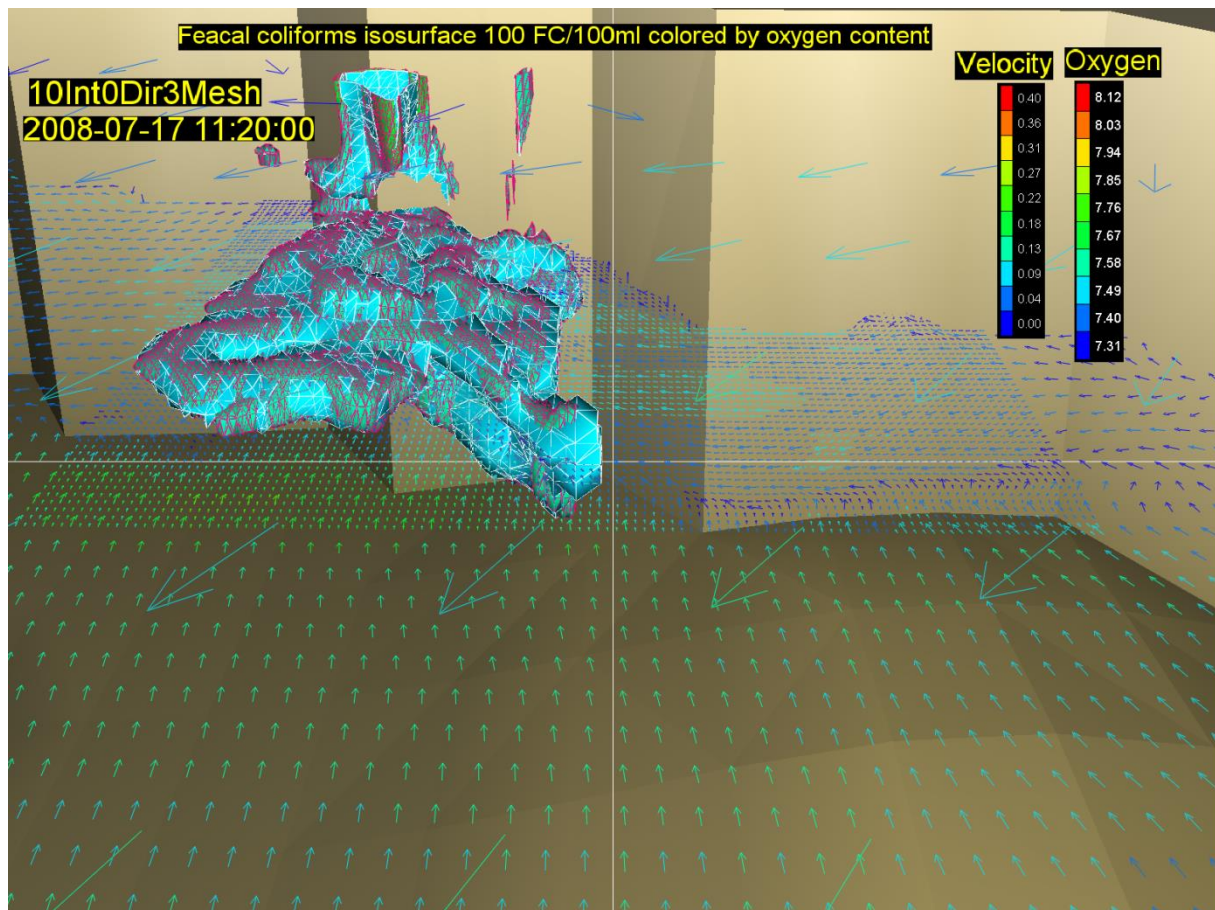


Slika 10. Uvećani detalj sve tri mreže (gore) i smo fine i najfinije (dolje) u okolici ispusta Delte

Nije bilo potrebno dalje smanjivati veličinu mreže na četvrti nivo jer je s drugim i trećim nivoem finoće već postignuta mrežna konvergencija. Na Sl. 11 vidljivo je da je oblak FC od 100 bakterija po 100 ml mora gotovo istog oblika za grubu mrežu (bijeli bridovi), za srednju mrežu (crni rubovi) i finu mrežu (crveni rubovi). Stoga je zaključeno da je dovoljno dalje raditi smo s dvije mreže: grubom i srednjom.



Slika 11. Vektori brzina i oblak FC koncentracije 100 bakterija po 100 ml mora na tri različite mreže: gruboj (bijeli bridovi), srednjoj (crni bridovi) i finoj (crveni bridovi) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  i smjer od 135 stupnjeva



Slika 12. Vektori brzina i oblak FC koncentracije 100 bakterija po 100 ml mora na tri različite mreže: gruboj (bijeli bridovi), srednjoj (crni bridovi) i finoj (crveni bridovi) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  i smjer od 0 stupnjeva

## **8. REZULTATI MJERENJA NA KANALIZACIJSKOM ISPUSTU DELTA**

Prostornim planom Primorsko-goranske županije more na području podmorskog ispusta Delta svrstano je u II kategoriju (Primorsko-goranska županija, 2000). Prema Državnom planu za zaštitu voda (Narodne novine 8, 1999) II kategorije je more u zoni utjecaja ispuštanja otpadnih voda s kopna (područje izvan kruga oko difuzora ispusta radijus 300 m). Uredbom o klasifikaciji voda (Narodne novine 77, 1998) površinske vode i podzemne vode razvrstane su u pet vrsta. Uredbom o opasnim tvarima u vodama (Narodne novine 78, 1998) propisane su najveće dopuštene koncentracije pojedinačnih opasnih tvari u moru 1 i 2. More 1 je obalno more, a more 2 je more pod izravnim utjecajem onečišćenja s kopna na mjestima ispusta otpadnih voda (približno 11 m od difuzora). Kriteriji za morsku vodu namijenjenu kupanju i rekreaciji propisani su Uredbom o standardima kakvoće mora na morskim plažama (Narodne novine 33, 1996). Ta uredba propisuje granične vrijednosti fekalnih koliformnih bakterija, u iznosu od 100 bakterija na 100 ml mora. Isti iznos vrijedi i za graničnu vrijednost fekalnih streptokoka.

Otpadne vode sustava javne odvodnje grada Rijeka dovode se na lokaciju Delte gdje se pročišćavaju na uređaju koji se sastoji od grube i fine rešetke te aeriranog pjeskolova. Nakon pročišćavanja otpadne vode se preko dozažnog bazena ispuštaju u podmorski ispust sljedećih karakteristika:

- dužina podmorskog cjevovoda 500 m, od toga dužina difuzora 48 m,
- promjer podmorskog cjevovoda 1100 mm, difuzora 700 mm,
- dubina na kraju ispusta 40,2 m. Glava ispusta podignuta je od morskog dna 2 m.

Udaljenost ispusta od granice obalnog mora namijenjenog kupanju i rekreaciji iznosi na istoku 1600 m, a na zapadu 2900 m. S zapadne strane ispusta nalazi se kvarnerska luka, rafinerija nafte i brodogradilište 3. maj, nakon kojeg se proteže rekreacijska zona Kantrida - Kostabela. Uz istočnu stranu ispusta nalazi se ušće Rječine i kontejnerski terminal Brajdica. Nakon terminala započinje kupališna zona Pećine.

Podmorskim ispustom uređaja na Delti odlaže se u more oko 34500 m<sup>3</sup> otpadnih voda dnevno. To je najveći ispust komunalnih otpadnih voda u Kvarnerskom zaljevu, pa je poznavanje utjecaja otpadnih voda odloženih ovim ispustom na kakvoću mora od velikog značaja.

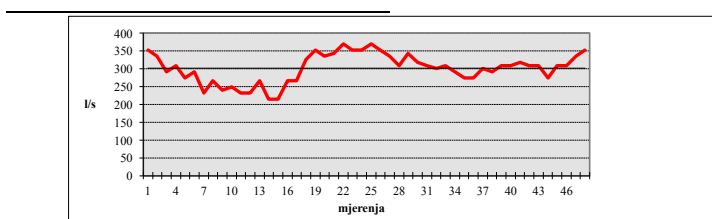
## 8.1. Intenzitet ispusta i koncentracija bakterija

Ulazni podaci simulacije širenja onečišćenja su intenzitet izvora i koncentracija fekalnih koliforma i fekalnih streptokoka. Vrijednosti ovih veličina za tipičan dan bez padalina dani su prema podacima poduzeća Vodovod i kanalizacija u donjoj tabeli.

06.03.14. Uređaj "DELTA" - Protok							
VRIJEME	Kanal 1	Kanal 2	Ukupno	VRIJEME	Kanal 1	Kanal 2	Ukupno
0:00	163,12	188,87	<b>351,99</b>	13:30	145,95	163,12	<b>309,07</b>
0:30	154,53	180,29	<b>334,82</b>	14:00	163,12	180,29	<b>343,41</b>
1:00	137,36	154,53	<b>291,89</b>	14:30	145,95	171,7	<b>317,65</b>
1:30	145,95	163,12	<b>309,07</b>	15:00	145,95	163,12	<b>309,07</b>
2:00	128,77	145,95	<b>274,72</b>	15:30	137,36	163,12	<b>300,48</b>
2:30	128,77	163,12	<b>291,89</b>	16:00	145,95	163,12	<b>309,07</b>
3:00	111,61	120,19	<b>231,8</b>	16:30	137,36	154,53	<b>291,89</b>
3:30	128,77	137,36	<b>266,13</b>	17:00	128,77	145,95	<b>274,72</b>
4:00	120,19	120,19	<b>240,38</b>	17:30	128,77	145,95	<b>274,72</b>
4:30	120,19	128,77	<b>248,96</b>	18:00	137,36	163,12	<b>300,48</b>
5:00	111,61	120,19	<b>231,8</b>	18:30	137,36	154,53	<b>291,89</b>
5:30	111,61	120,19	<b>231,8</b>	19:00	137,36	171,7	<b>309,06</b>
6:00	120,19	145,95	<b>266,14</b>	19:30	145,95	163,12	<b>309,07</b>
6:30	103,02	111,61	<b>214,63</b>	20:00	145,95	171,7	<b>317,65</b>
7:00	103,02	111,61	<b>214,63</b>	20:30	145,95	163,12	<b>309,07</b>
7:30	120,19	145,95	<b>266,14</b>	21:00	145,95	163,12	<b>309,07</b>
8:00	128,77	137,36	<b>266,13</b>	21:30	128,77	145,95	<b>274,72</b>
8:30	145,95	180,29	<b>326,24</b>	22:00	137,36	171,7	<b>309,06</b>
9:00	163,12	188,87	<b>351,99</b>	22:30	137,36	171,7	<b>309,06</b>
9:30	154,53	180,29	<b>334,82</b>	23:00	154,53	180,29	<b>334,82</b>
10:00	163,12	180,29	<b>343,41</b>	23:30	163,12	188,87	<b>351,99</b>
10:30	171,7	197,46	<b>369,16</b>				
11:00	163,12	188,87	<b>351,99</b>				
11:30	163,12	188,87	<b>351,99</b>				
12:00	171,7	197,46	<b>369,16</b>				
12:30	163,12	188,87	<b>351,99</b>				
13:00	154,53	180,29	<b>334,82</b>				

**PROSJEČNI PROTOK U l/s:** 301  
**MET. KUB. NA DAN:** 26006

Tabela 2. Satni protoci na ispustu Delta za prosječan dan (Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015)



Slika 13. Satni protoka na ispustu Delta za prosječan dan (Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015)

Stoga je zaključeno da je prosječan protok  $0,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , a koncentracija FC na ispustu u more 5 miliona  $(100 \text{ ml})^{-1}$  i FS 10 puta manja,  $500\,000(100 \text{ ml})^{-1}$ .



## 9. REZULTATI I ANALIZA SIMULACIJA STRUJANJA I DISPERZIJE ONEČIŠĆENJA

U ovom dijelu rada dan je uvid u rezultate simulacije numeričkih modela analize hidrodinamike u vidu brzina strujanja, saliniteta i temperature mora i indikatora fekalnog zagađenja: fekalnih koliforma (FK), fekalnih streptokoka (FS) i otopljenog kisika (DO) u području priobalnog dijela kvarnerskog mora i cijelog Kvarnerskog zaljeva. DO, FS i FK predstavljaju glavne komponente indeks sanitarne kvalitete mora.

Numerička simulacija strujanja mora i disperzije onečišćenja iz ispusta kanalizacije iz kolektora grada Rijeke na Delti provedena je korištenjem softvera MIKE3 za niz slučajeva za period od dva dana (to je period nakon kojeg bi trebale uginuti gotovo sve bakterije iz početnog djela oblaka, jer je vrijeme 90%-tnog raspada FK 2,2 sta na površini svijetlo do 76,4 sta na dubini (tama), nakon kojeg onečišćenje postaje prihvatljivo po zdravlje ljudi ako je koncentracija na početku perioda bila ispod granice dopuštenosti, tj. ispod 100 bakterija po 100 ml mora). Početak simulacije uzet je 16.07.2008. u 18h za čiji period postoje potrebni meteorološki i hidrografski podaci. Forsiranje strujanja dano je interpolacijom mjerenih podataka protoka topline i vlage te brzine i smjera vjetra na površini mora danih na temelju izlaznih polja simulacije strujanja atmosfere programom ALADIN, čija je horizontalna površinska rezolucija 8 km i vremenska rezolucija 3 sta.

Na otvorenim granicama mora, Vela i Mala vrata, zadane su za sve vremenske trenutke simulacije rubni uvjeti: 1D razine mora, 2D polja saliniteta i temperature izračunate pomoću ROMS softvera (Wilkin, 2005) prostorne rezolucije 2km i dane u (Građevinski fakultet, 2009) za veće područje Jadrana koje uključuje Kvarnerski zaljev. 2D polja koncentracije otopljenog kisika interpolirana su iz mjerenja na najbližim oceanografskom postajama.

Onečišćenja iz kanalizacijskog ispusta Delta karakterizirana su, između ostaloga, koncentracijom fekalnih koliforma (FC) i fekalnih streptokoka (FS). Iz studije mjerenja tih koncentracija (RiEKO-LAB, 2006) , (RiEKO-LAB, 2008) na izlazu iz ispusnog difuzora one variraju tijekom dana ali ne prelaze vrijednosti 10 milijuna FC  $100(\text{ml})^{-1}$  odnosno 1 milijun FS  $100(\text{ml})^{-1}$ .

Oblak (perjanica) onečišćenja ispusta karakteriziran je dvjema zonama: bliskom i dalekom. U bliskoj zoni prevladava količina gibanja mlaza ispusta nad okolnim brzinama mora, a u dalekoj zoni mlaz je praktički zaustavljen i oblak onečišćenja se pasivno odnaša morskim strujama. Temeljem tih usvojenih vrijednosti izračunate su vrijednosti koncentracija bakterija

na kraju bliske zone oblaka onečišćenja iz ispusta nakon kojeg se oblak pasivno prenosi lokalnom morskom strujom i difundira lateralno. U svrhu određivanja dilucije (omjera koncentracije onečišćenja na ispustu i na kraju bliske zone) korišten je program Cormix (Akar & Jirka, Buoyant spreading processes in pollutant transport and mixing, Part 1: Lateral spreading with ambient current advection, 1994), (Akar & Jirka, 1995), koji daje vrijednost dilucije od 68,3. Ta je vrijednost dva puta manja od omjera koncentracija izmjerenih od RiEKOLAB-a na dan 28.05.2006. u točkama 1ID -0,18 milijuna  $\text{FC}100(\text{ml})^{-1}$  (izlazni otvor ispusta Delte) i 3ID -9800  $\text{FC}/100 \text{ ml}$  (kraj bliske zone) - omjer je 163, (RiEKO-LAB, 2006), dakle prihvaćena je vrijednost konzervativna, na strani sigurnosti.

Za skup od osam smjerova vjetra: S (0), SI (45), I (90), JI (135), J (180), JZ (225), Z (270) i SZ (315), te za dva konstantna intenziteta brzine vjetra:  $10 \text{ ms}^{-1}$  i  $30 \text{ ms}^{-1}$ , koji odgovaraju umjerenim i orkanskim vjetrovima te za slučaj bez vjetra prikazan je izgled i kretanje oblaka zagađenja koncentracije rubnih  $100 \text{ FC}(\text{ml})^{-1}$ , koji predstavlja graničnu vrijednost za more kategorije 2, dakle namijenjeno kupanju, kako bi se procijenio utjecaj kanalizacijskog ispusta grada Rijeke na onečišćenje plaža kvarnerskog mora.

Opći je zaključak da je onečišćenje to veće i bliže obali što je vjetar slabijeg intenziteta. Kod svih smjerova vjetra oblak se kreće uglavnom u smjeru paralelnom s obalom ili u smjeru istoka ili zapada, ne izlazi na površinu, ostaje negdje na dubini od 10-20 m.

To je rezultat struja Kvarnerskog zaljeva koje pri buri (S i SI) imaju svojstvo da se površinski sloj mora istiskuje kroz Mala i Vela vrata, a donji, hladniji, slojevi ulaze u Zaljev. Pri jugu je situacija obrnuta, topli površinski slojevi ulaze u Zaljev, a hladni, pridnjeni, izlaze iz njega.

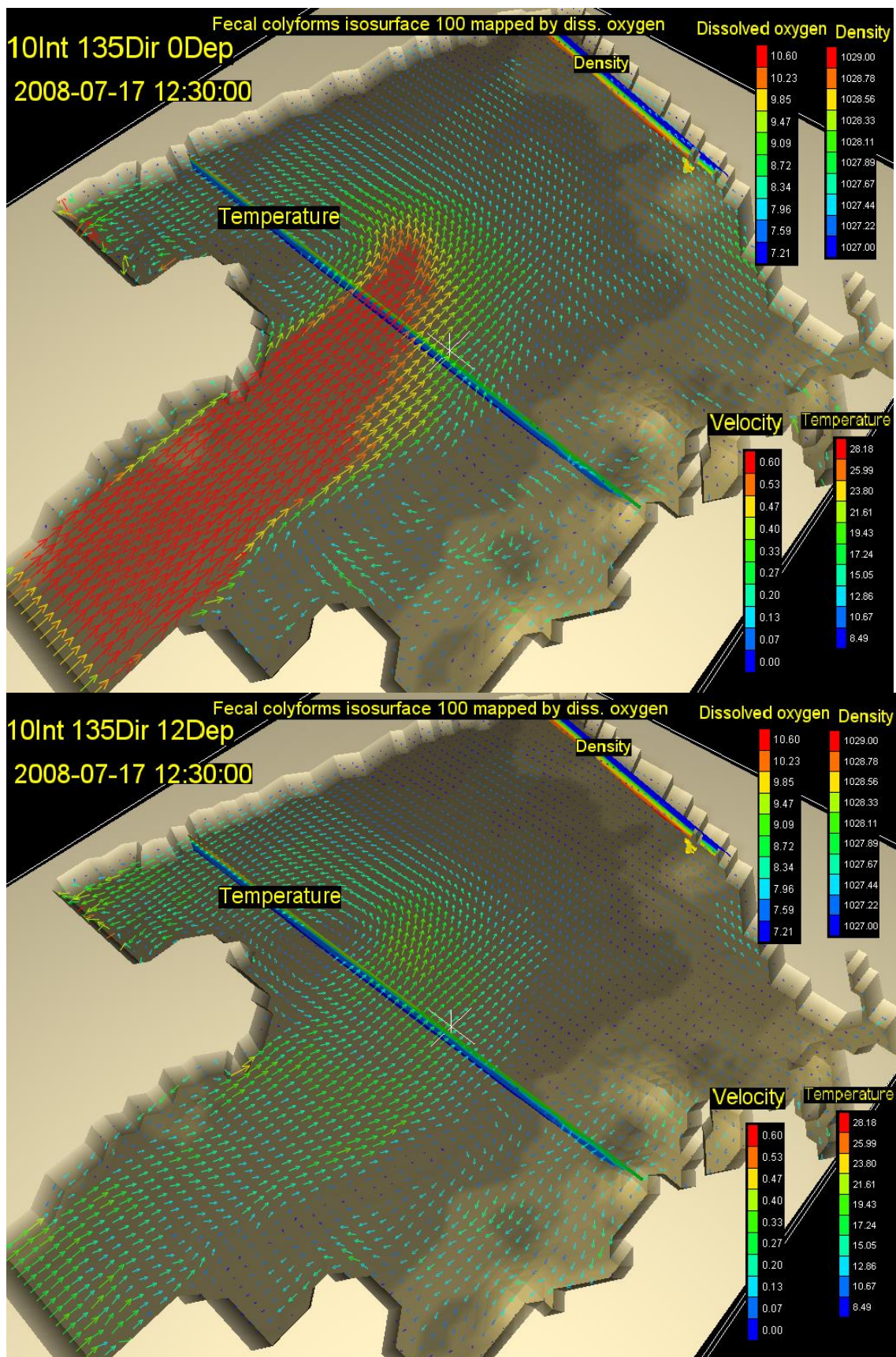
### **9.1. Analiza rezultata za jugo (135 stupnjeva)**

Na nizu slika koje slijede (slike 14, 15 i 16) prikazano je strujno polje brzina mora Kvarnerskog zaljeva za forsirajući vjetar umjerenog intenziteta od  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 135 stupnjeva (jugo). Prvi niz slika (slike 14, 15 i 16) prikazuje vektore brzina na najgrubljoj mreži za cijeli zaljev na različitim dubinama: 0 m, 12 m, 24 m, 36 m, 48 m, i 60 m za jedan trenutak 16,5 sti nakon početka forsiranja. Vidljivo je da je dominantna površinska struja iz smjera Malih vrata (između otoka Krka i Cres), koja okreće oko sjevernog rta otoka Cres, gdje radi lokalni vrtlog, te izlazi kroz Vela vrata iz Kvarnerskog zaljeva. Brzine preostalog

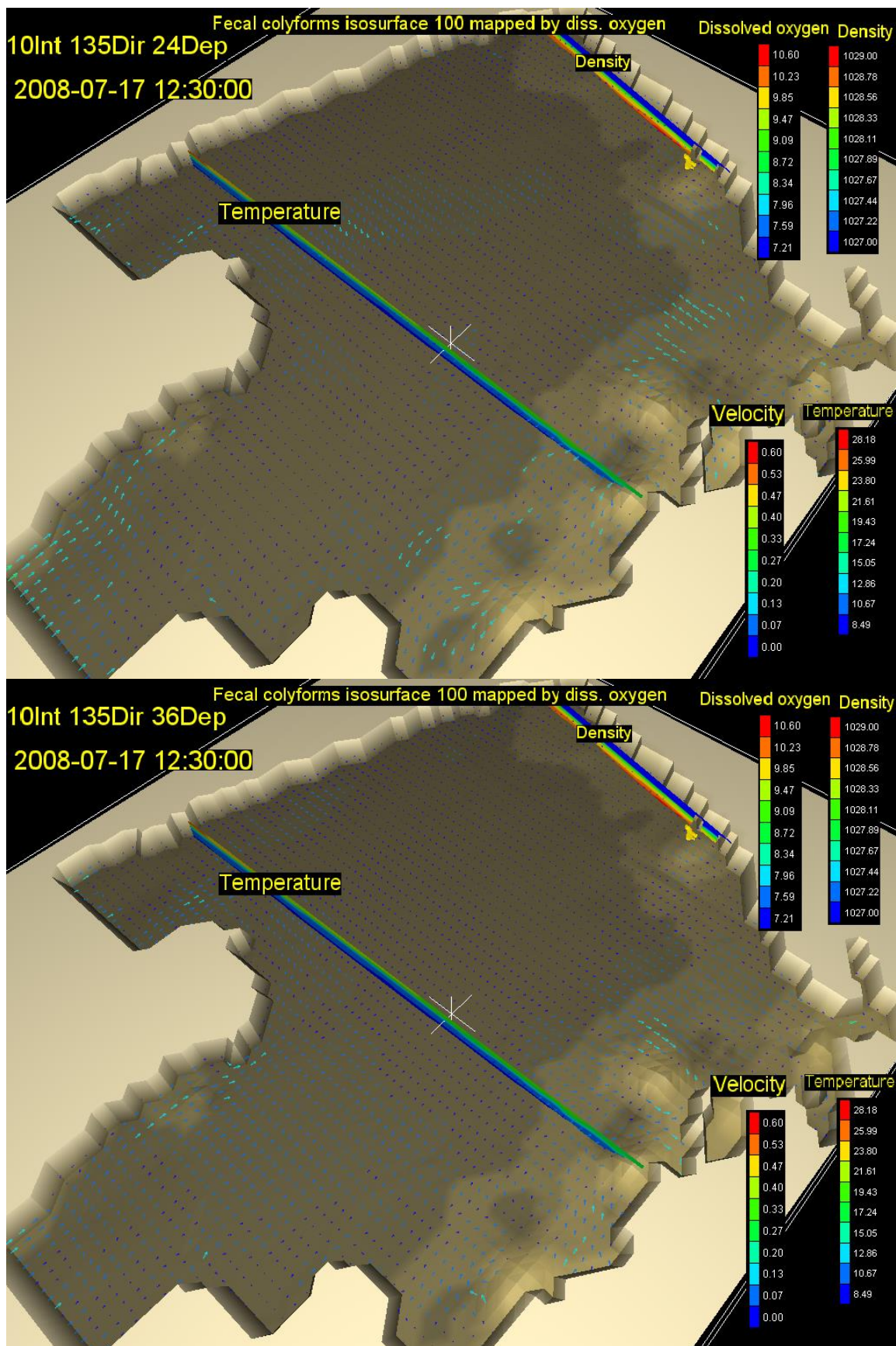
dijela mora zaljeva su puno manje od brzina u glavnoj struji. Takav se obrazac ponavlja i za ostale dubine, s tim da su brzine to manje što je veća dubina. Brzine uz sjevernu obalu zaljeva, uz grad Rijeku i ispušni kanal Delta su male na svim dubinama i imaju uglavnom smjer paralelan s obalom dakle istok-zapad ili obratno zapad-istok.

Sljedeći niz od dvanaest slika prikazuje uvećano smo dio strujanja u sjevernom dijelu Kvarnerskog zaljeva uz sm grad Rijeku i okolicu ispusta Delta i to na dvije različite mreže: gruboj i finoj. Slike brzina na površini su dane na gruboj mreži, a na dubini od 30 m na finoj mreži. Pored vektora brzina, koji pokazuju trend strujanja u danom trenutku, dan je i vertikalni presjek gustoće kroz ispušni kanal Delta u smjeru paralelnom s obalom, te vertikalni presjek temperatura u smjeru sjever jug. Također je prikazan oblak onečišćenja fekalnim koliformima koncentracije 100 bakterija na 100 ml mora koji je obojen koncentracijom otopljenog kisika. Slike su dane za svaka 3 sta od početka forsiranja vjetrom do 36 sti nakon početka. Prateći vremenski razvoj slika strujanja i gibanje oblaka onečišćenja možemo zaključiti da je za ovaj vjetar, jugo, slika lokalnog strujnog polja na površini uglavnom paralelna s obalom, ima smjer istok zapad, dakle smjer gibanja uzrokovan skretanjem dominantne struje iz Malih u Vela vrata, a na dubini ima često isti ili blizak smjer, ponekad suprotan površinskom, ali puno manjeg intenziteta.

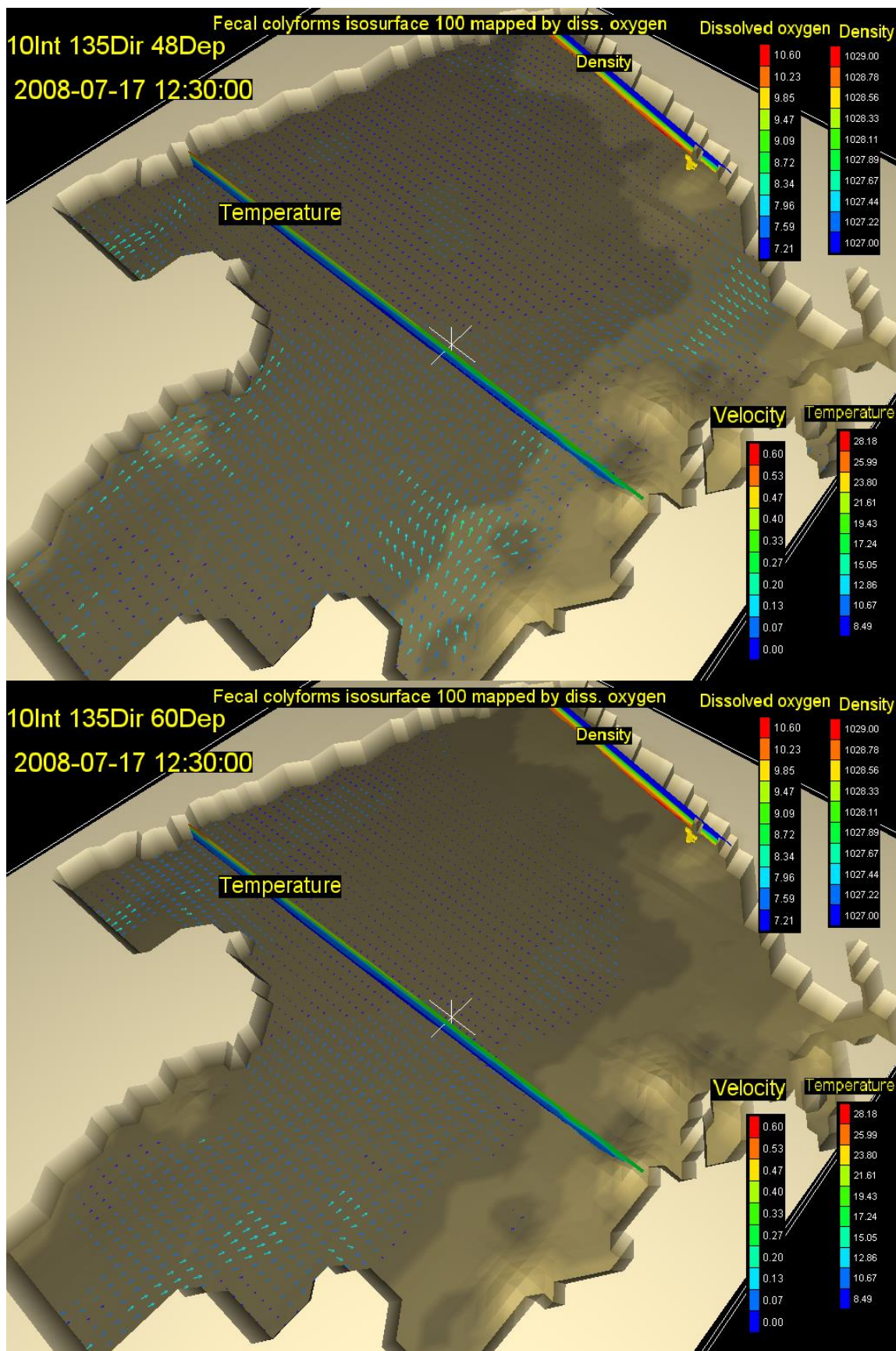
Oblak FC koncentracije 100 se proteže paralelno s obalom, jednom u smjeru površinske struje, drugi put u suprotnom smjeru, ali možemo zaključiti da ne dolazi do obale i ne izlazi na površinu već ostaje na dubini oko 30 mm, što potvrđuju i mjerenja (RiEKO-LAB, 2006) (RiEKO-LAB, 2008).



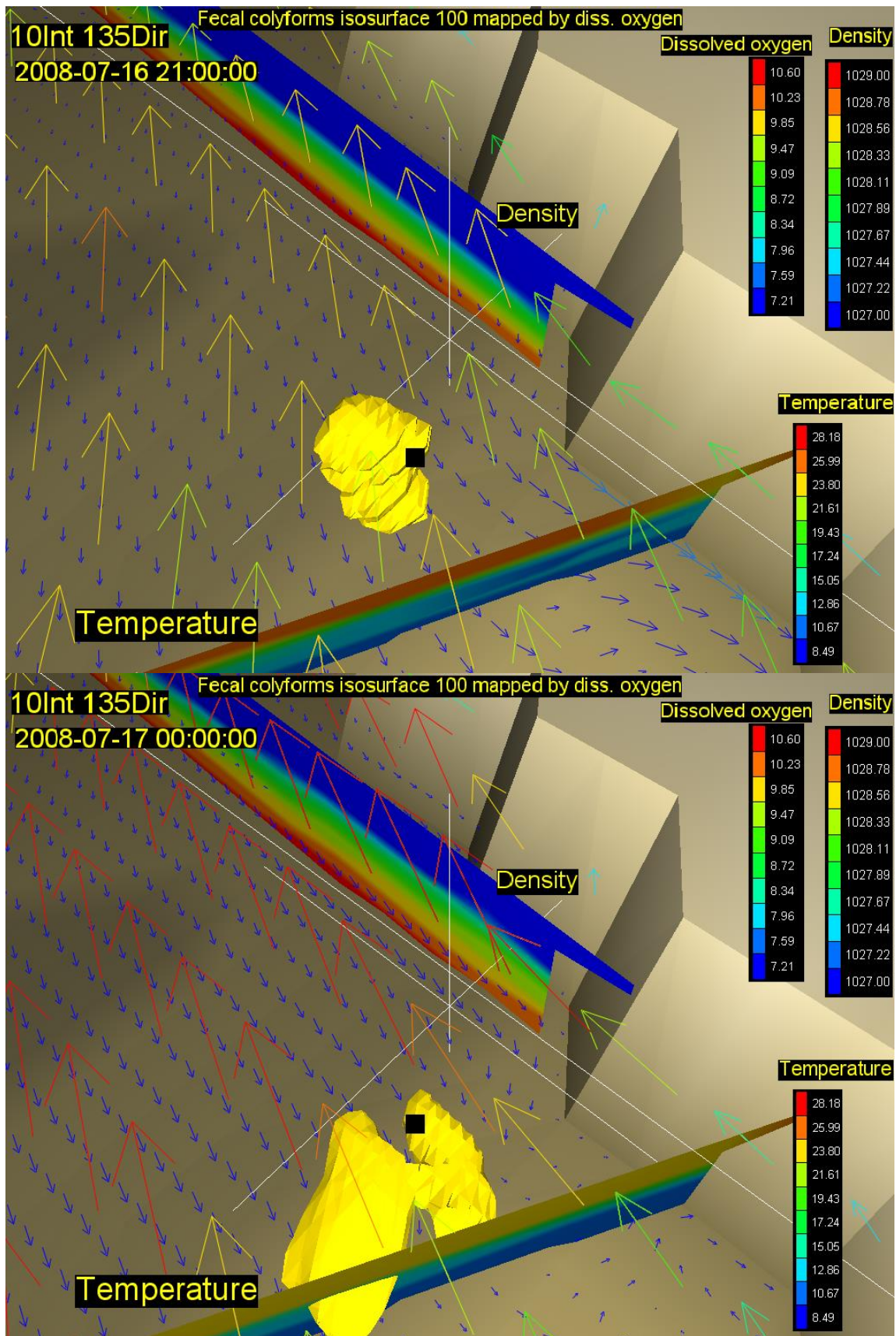
Slika 14. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblak onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva.



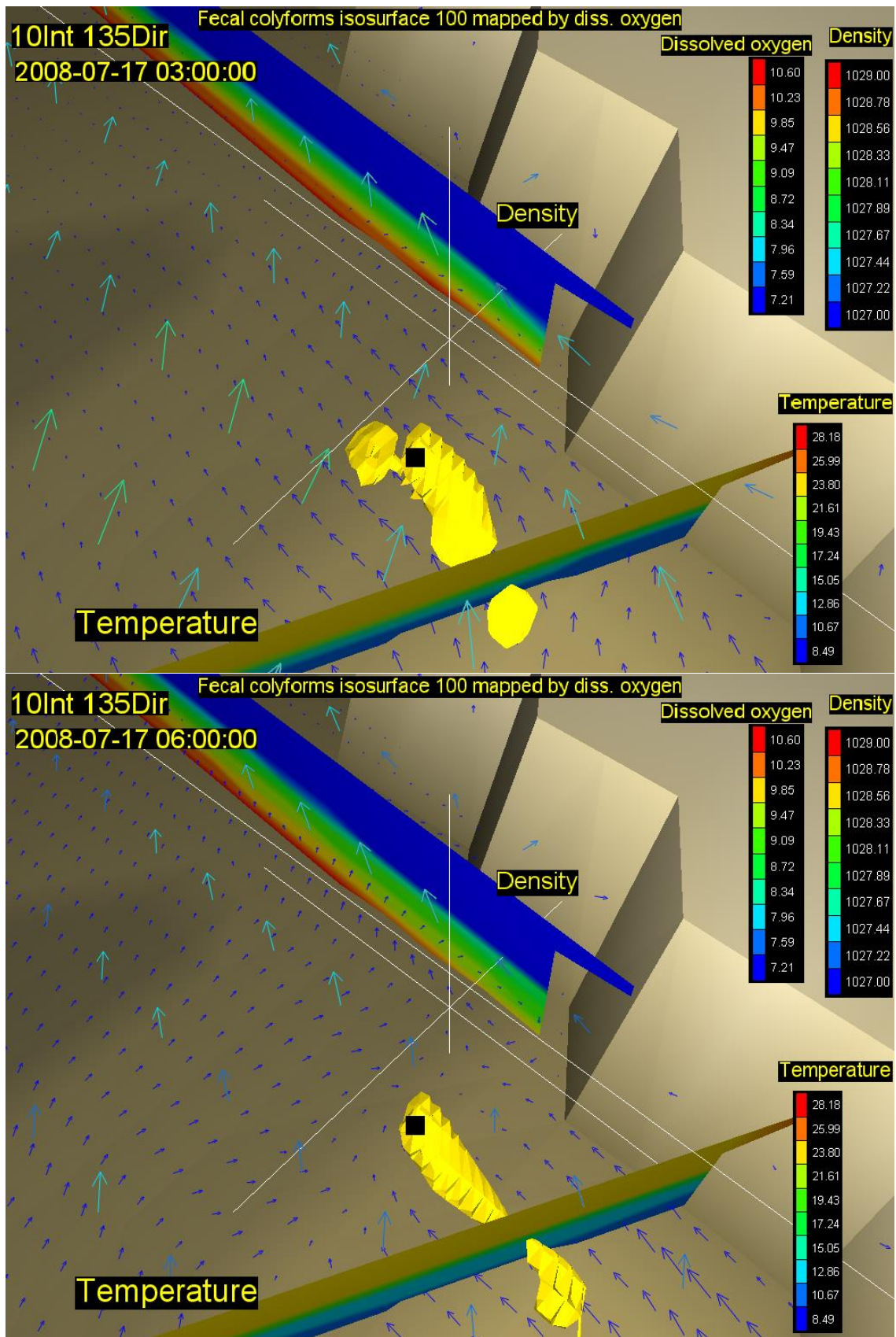
Slika 15. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 135 stupnjeva



Slika 16. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 135 stupnjeva

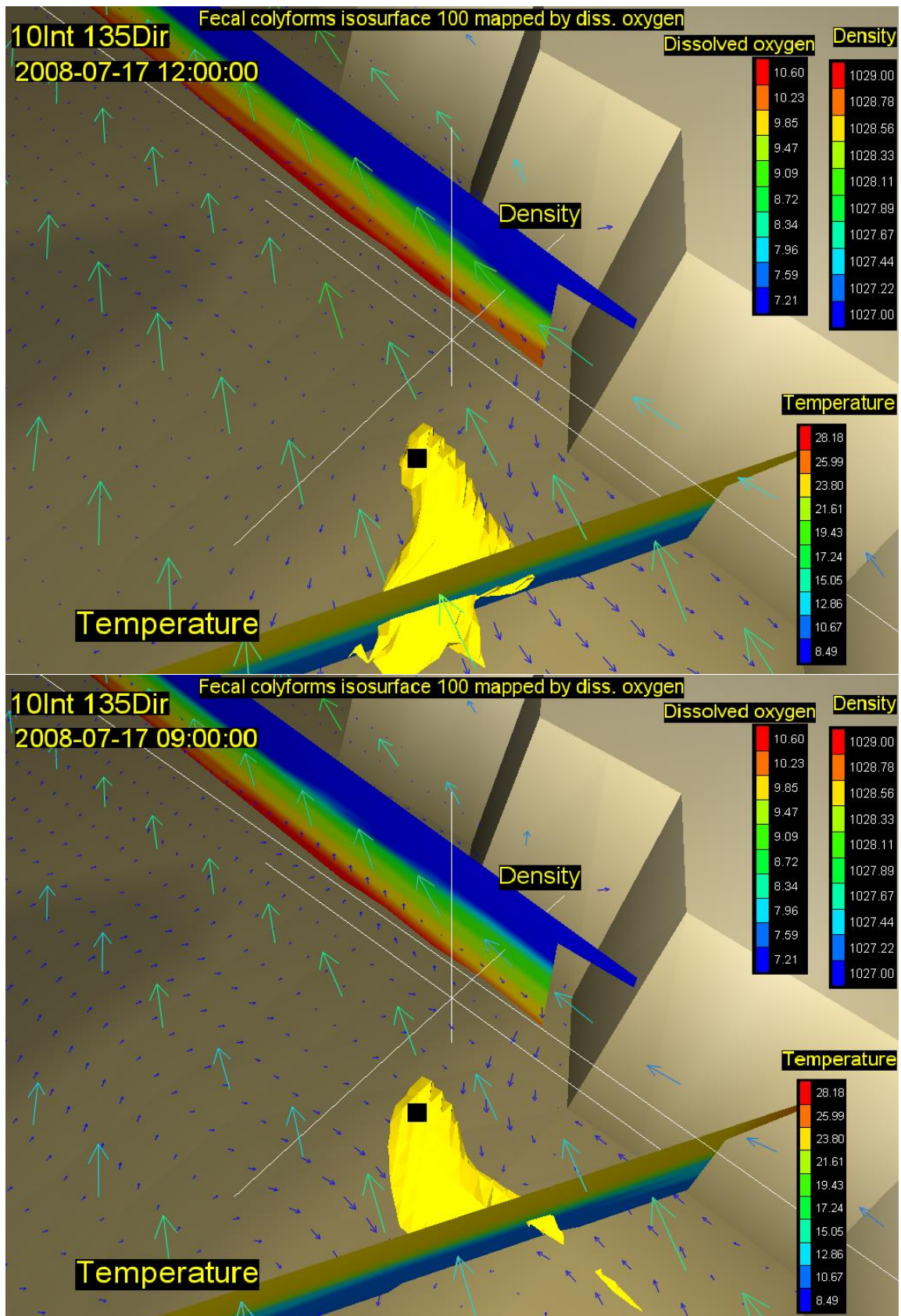


Slika 17. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 00. (gore) i 03. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva

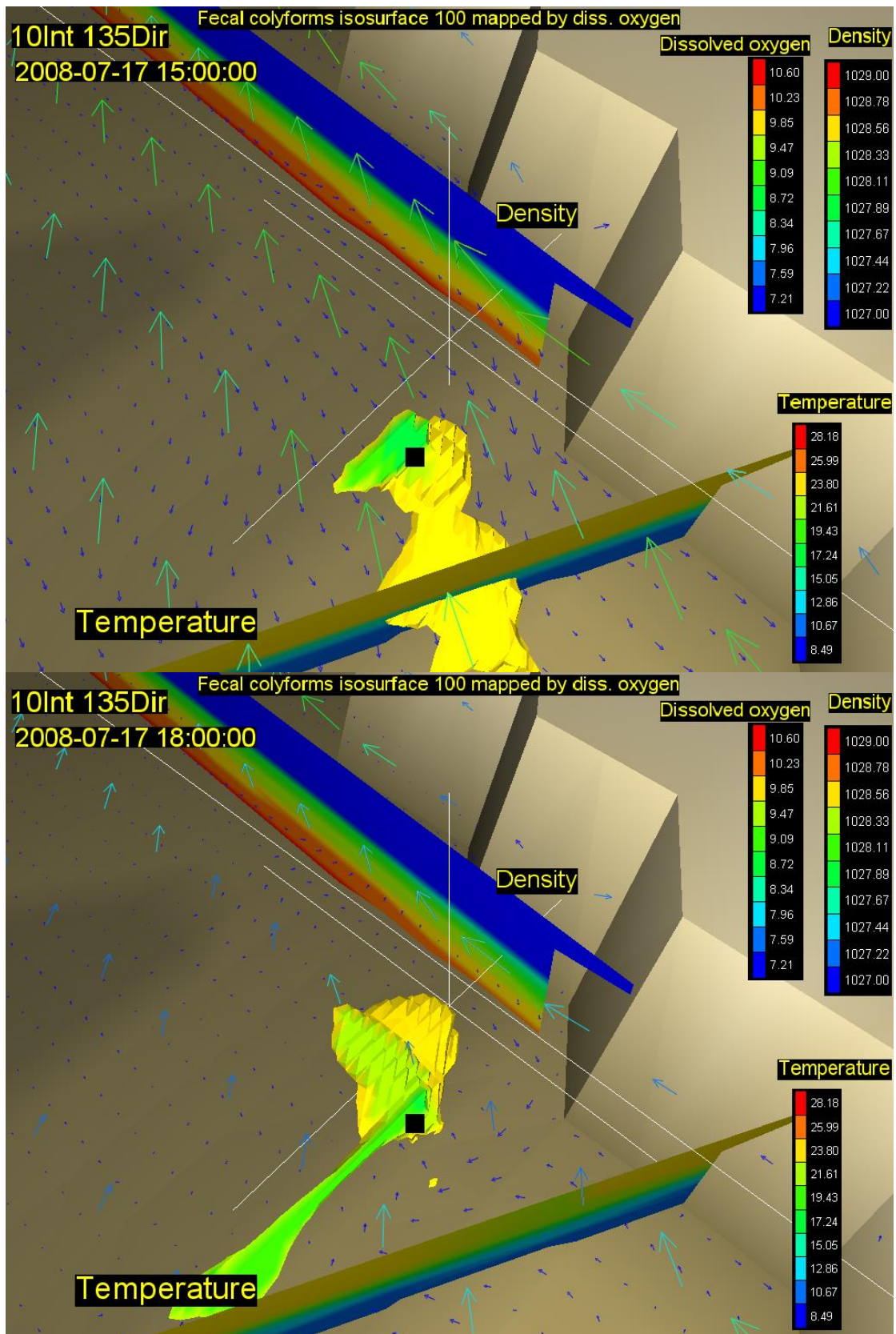


Slika 18. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 06. (gore) i 09. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva

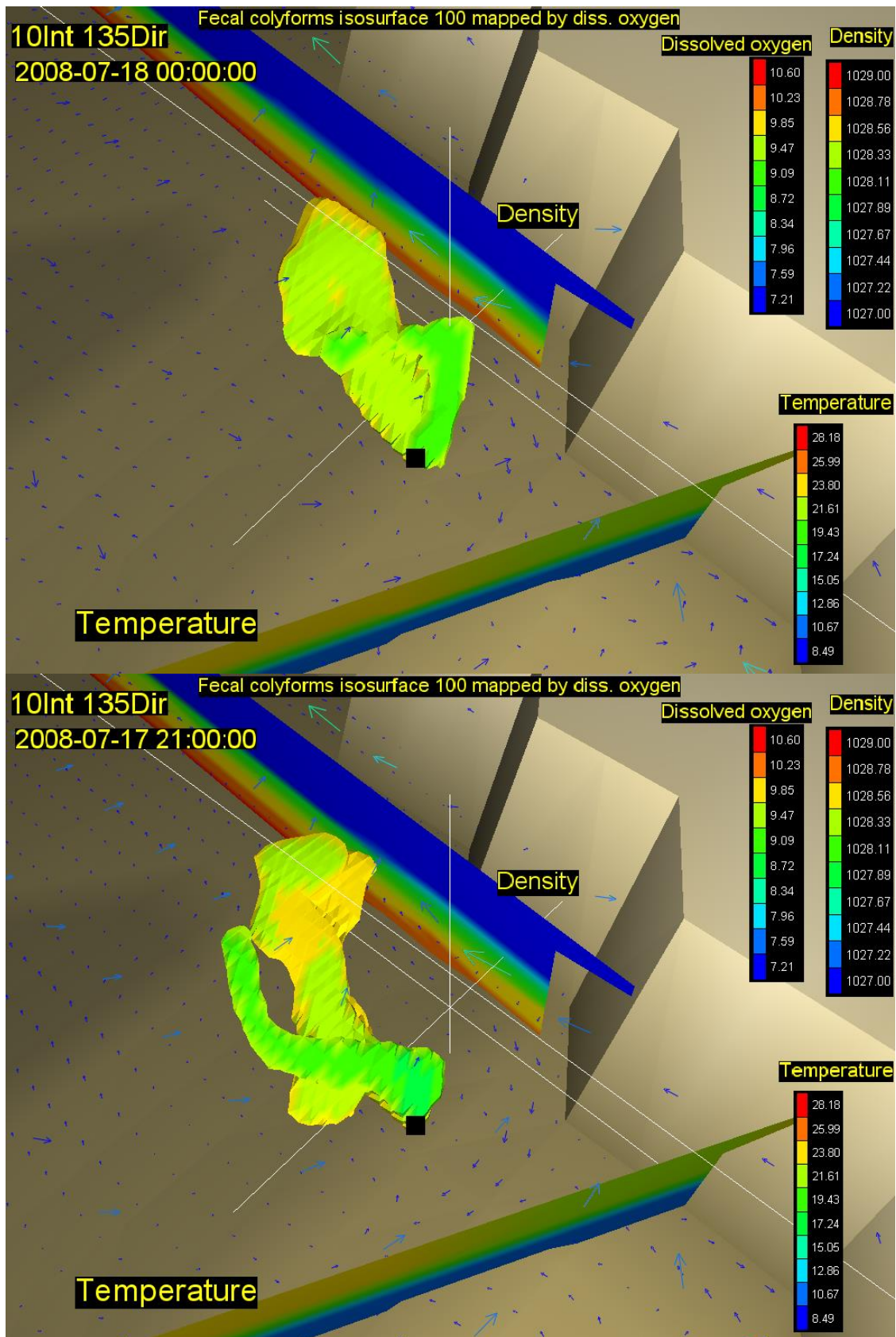




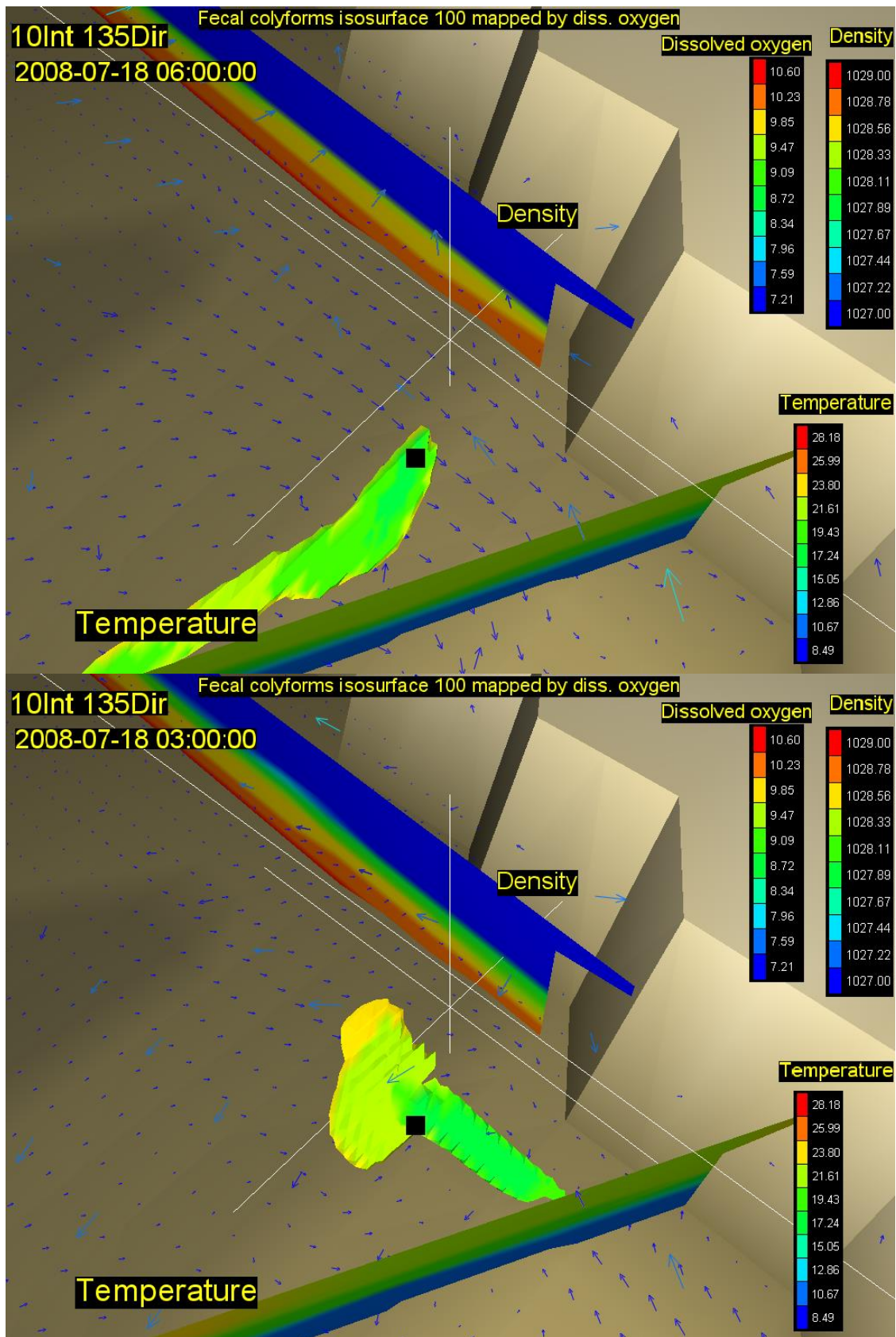
Slika 19. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 12. (gore) i 15. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 135 stupnjeva



Slika 20. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 18. (gore) i 21. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 135 stupnjeva



Slika 21. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 24. (gore) i 27. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 135 stupnjeva



Slika 22. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 30. (gore) i 33. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva

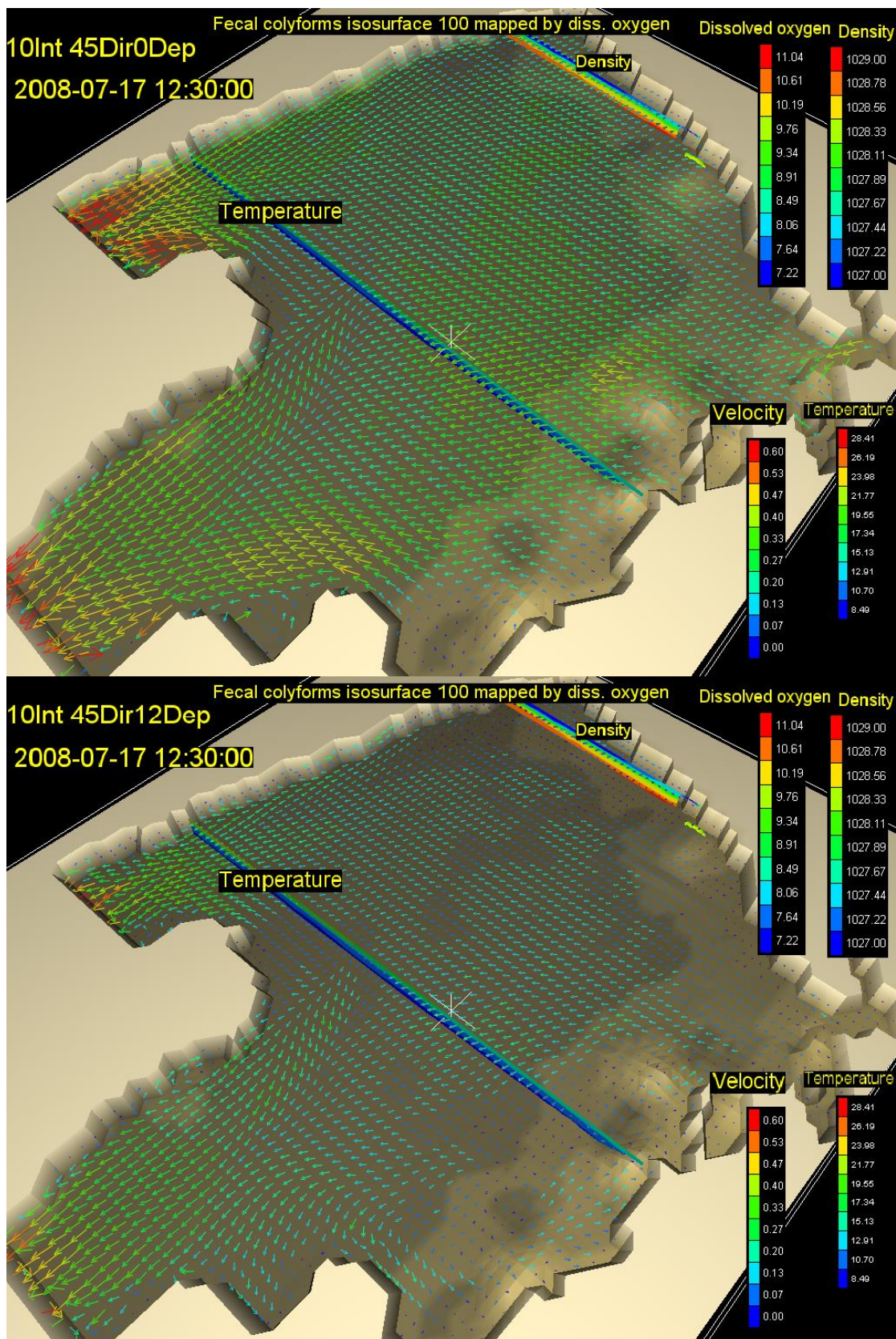
## 9.2. Analiza rezultata za buru (45 stupnjeva)

Na slijedećem nizu slika koje slijede prikazano je strujno polje brzina mora Kvarnerskog zaljeva za forsirajući vjetar umjerenog intenziteta od  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 45 stupnjeva (bura). Prvi niz od šest slika prikazuje vektore brzina na najgrubljoj mreži za cijeli zaljev na različitim dubinama: 0 m, 12 m, 24 m, 36 m, 48 m, i 60 m za jedan trenutak 16,5 sati nakon početka forsiranja. Vidljivo je da je dominantna površinska struja na 0 m i 12 m dubine iz smjera sjeveroistok od sjeverne obale zaljeva prema Malim i Velikim vratima, dakle istjecanje cijelog površinskog sloja voda kvarnerskog zaljeva kroz oba vrata u Kvarner. Brzine donjeg sloja mora zaljeva su suprotne, dakle na dubinama od 24 m, 36 m, 48 m i 60 m vode ulaze iz Kvarnera u Kvarnerski zaljev kroz Mala i Velika vrata. Brzine uz sjevernu obalu zaljeva, uz grad Rijeku i ispust Delta su male na svim dubinama i imaju uglavnom smjer paralelan s obalom dakle istok-zapad ili obratno zapad-istok.

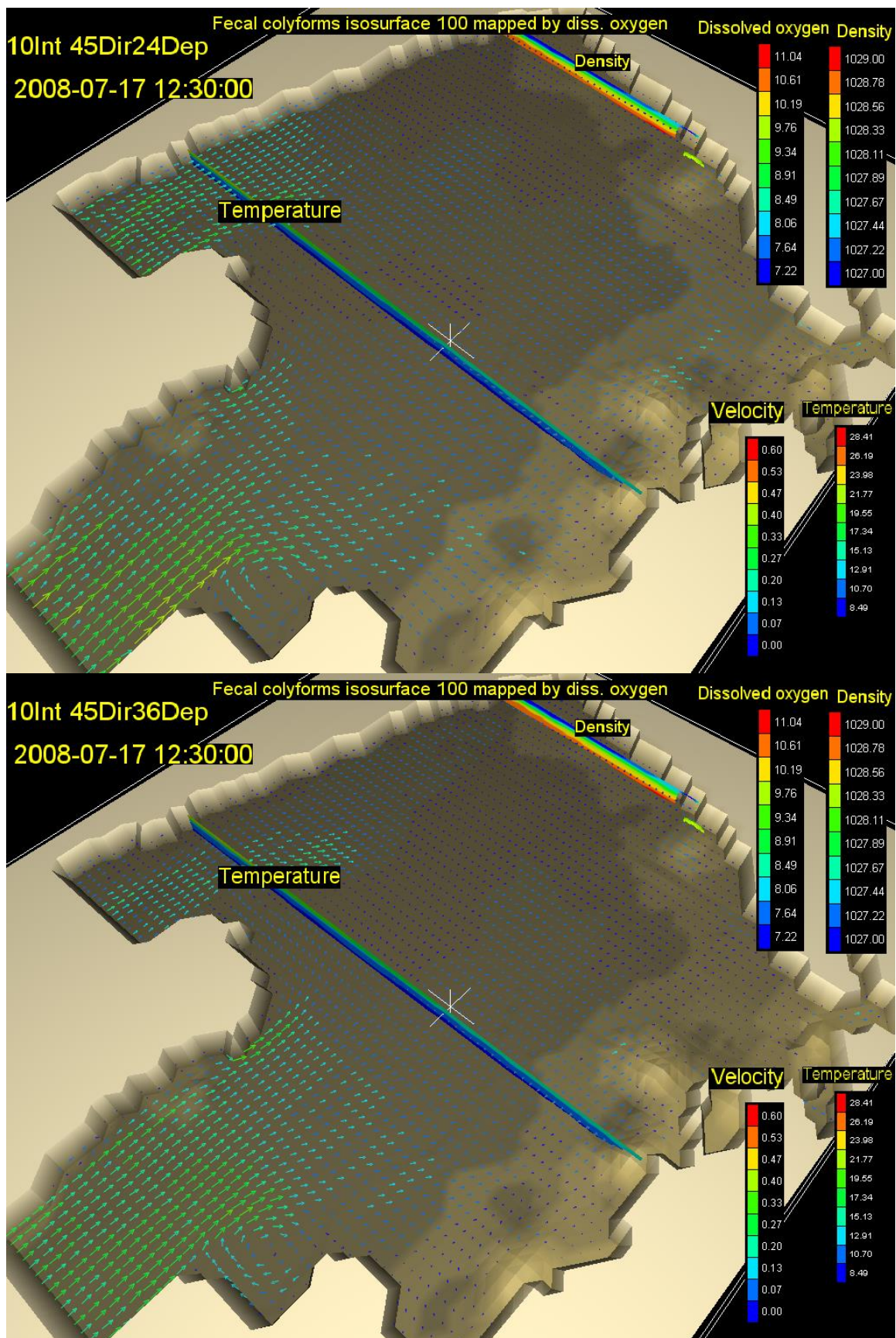
Slijedeći niz od dvanaest slika prikazuje uvećano smo dio strujanja u sjevernom djelu Kvarnerskog zaljeva uz sam grad Rijeku i okolicu ispusta Delta i to na dvije različite mreže: gruboj i finoj. Slike brzina na površini su dane na gruboj mreži, a na dubini od 30 m na finoj mreži. Pored vektora brzina, koji pokazuju trend strujanja u danom trenutku, dan je i vertikalni presjek gustoće kroz ispust Delta u smjeru paralelnom s obalom, te vertikalni presjek temperatura u smjeru sjever jug. Također je prikazan oblak onečišćenja fekalnim koliformima koncentracije 100 bakterija na 100 ml mora koji je obojen koncentracijom otopljenog kisika. Slike su dane za svaka 3 sta od početka forsiranja vjetrom do 36 sati nakon početka.

Prateći vremenski razvoj slika strujanja i gibanje oblaka onečišćenja možemo zaključiti da je za ovaj vjetar, buru, slika lokalnog strujnog polja na površini koji je uglavnom okomit na obalu, ima smjer sjeveroistok jugozapad, dakle smjer gibanja uzrokovan povlačenjem vjetrom, a na dubini ima često smjer zapad istok, dakle paralelno s obalom okomito na smjer površinske struje, ali manjeg intenziteta. Oblak FC koncentracije 100 se proteže paralelno s obalom, jednom u smjeru dubinske struje, te možemo zaključiti da ne dolazi do obale i ne izlazi na površinu već ostaje na dubini oko 20 m.

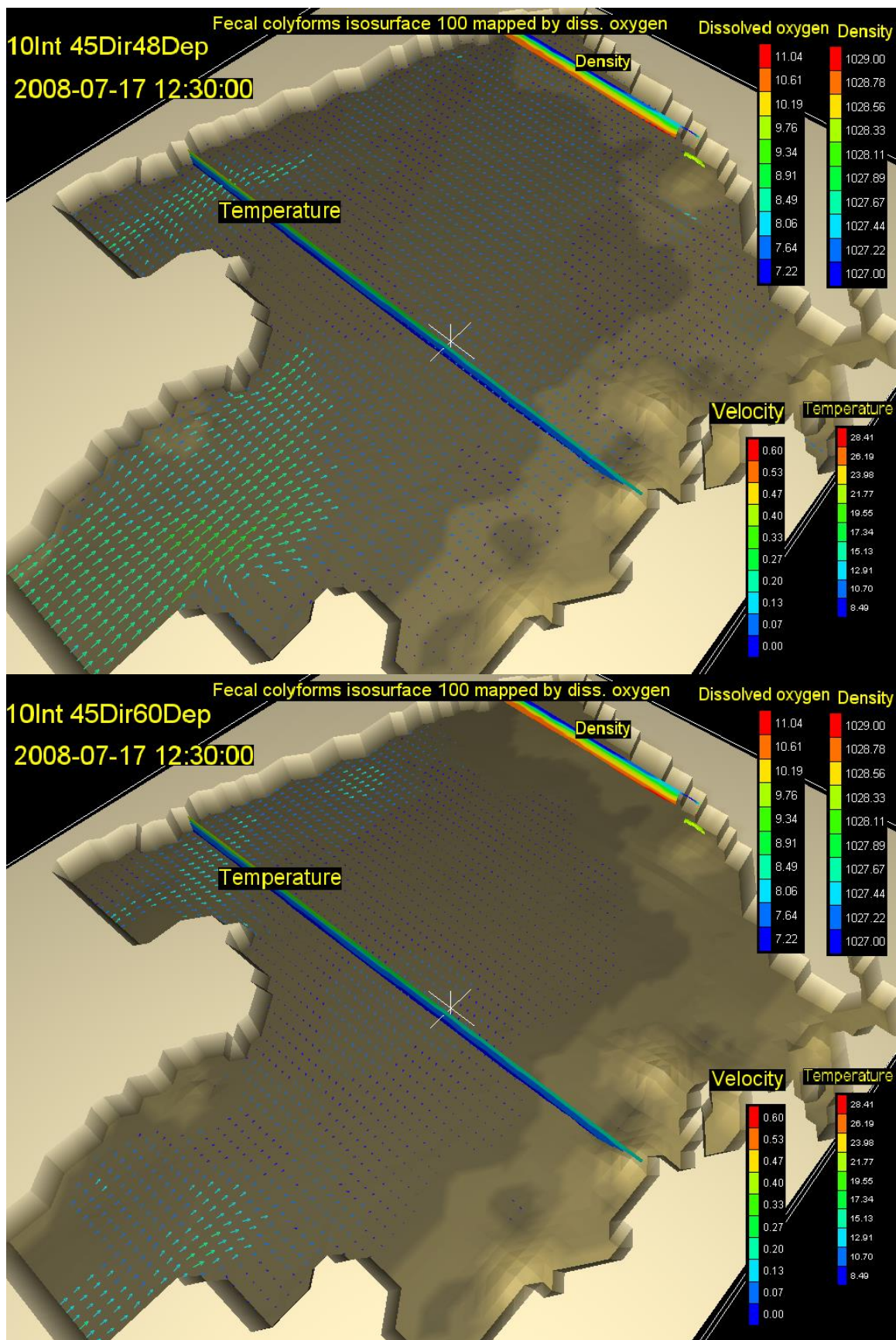
Iz slike vertikalnog presjeka temperatura vidljivo je da se pod utjecajem površinskih struja more izvlači iz zaljeva, a dubinske hladne vode bivaju donesene na površinu i rashlađuju relativno brzo (u prvih šest sati) površinu mora uz sjevernu obalu, ostavljajući dojam kupaćima da je bura rashladila more. Za sve druge analizirane vjetrove: dva intenziteta i osam smjerova, te bez vjetra, rezultati simulacije dani su u slikama u prilogu.



Slika 23. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za  $16,5$ . st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera  $45$  stupnjeva

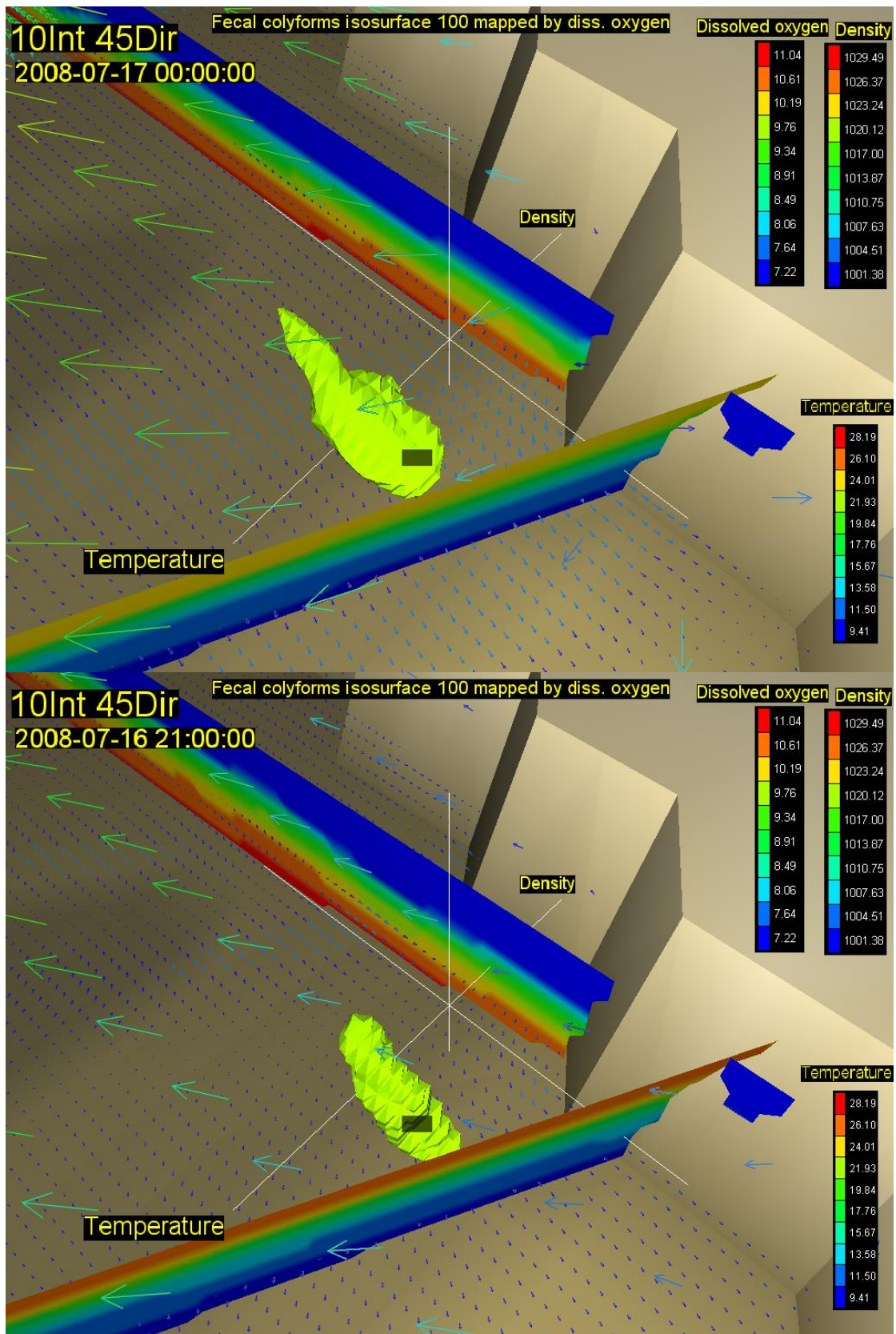


Slika 24. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i na 36 (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. sat za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 45 stupnjeva

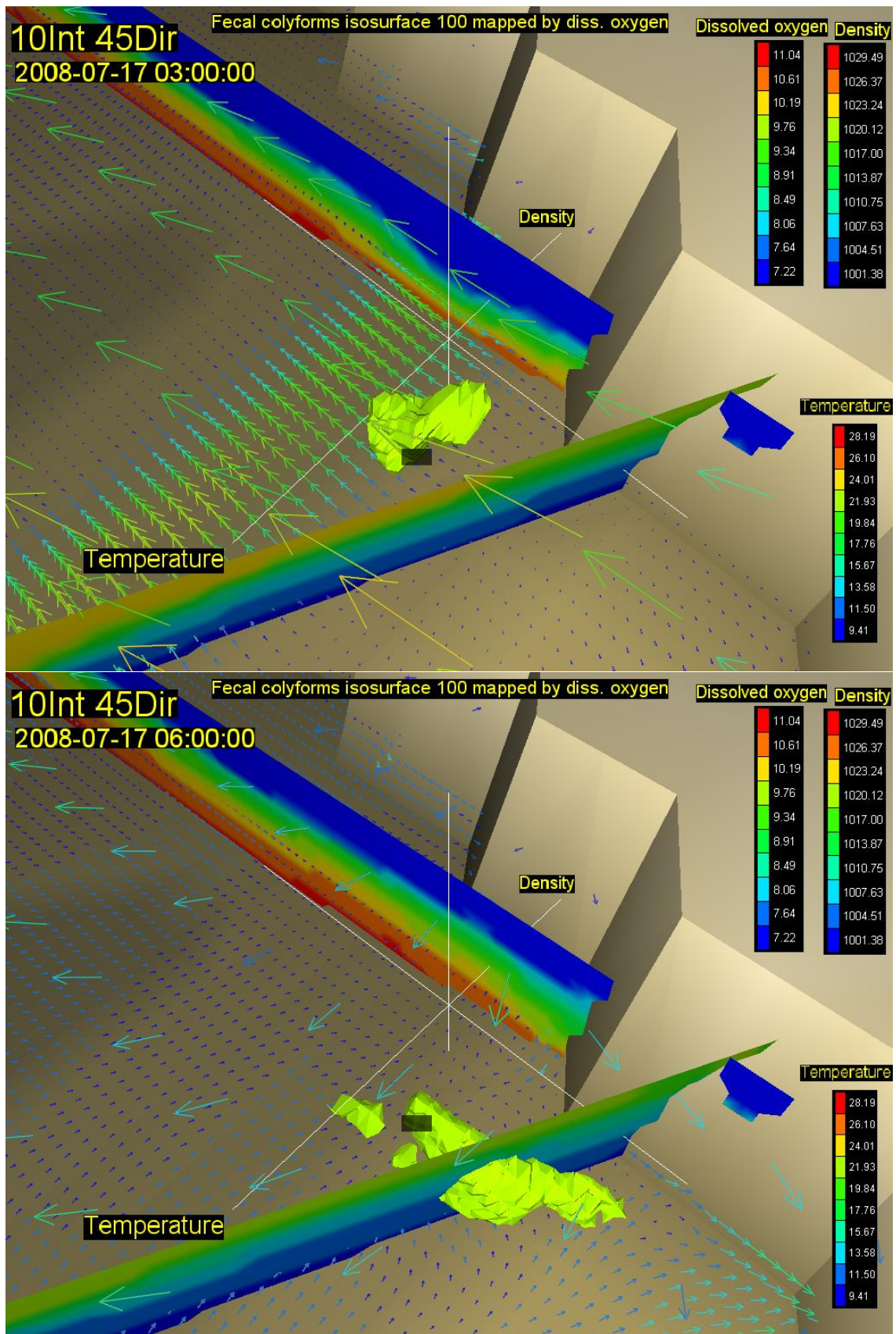


Slika 25. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i na 60 (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. sat za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 45 stupnjeva

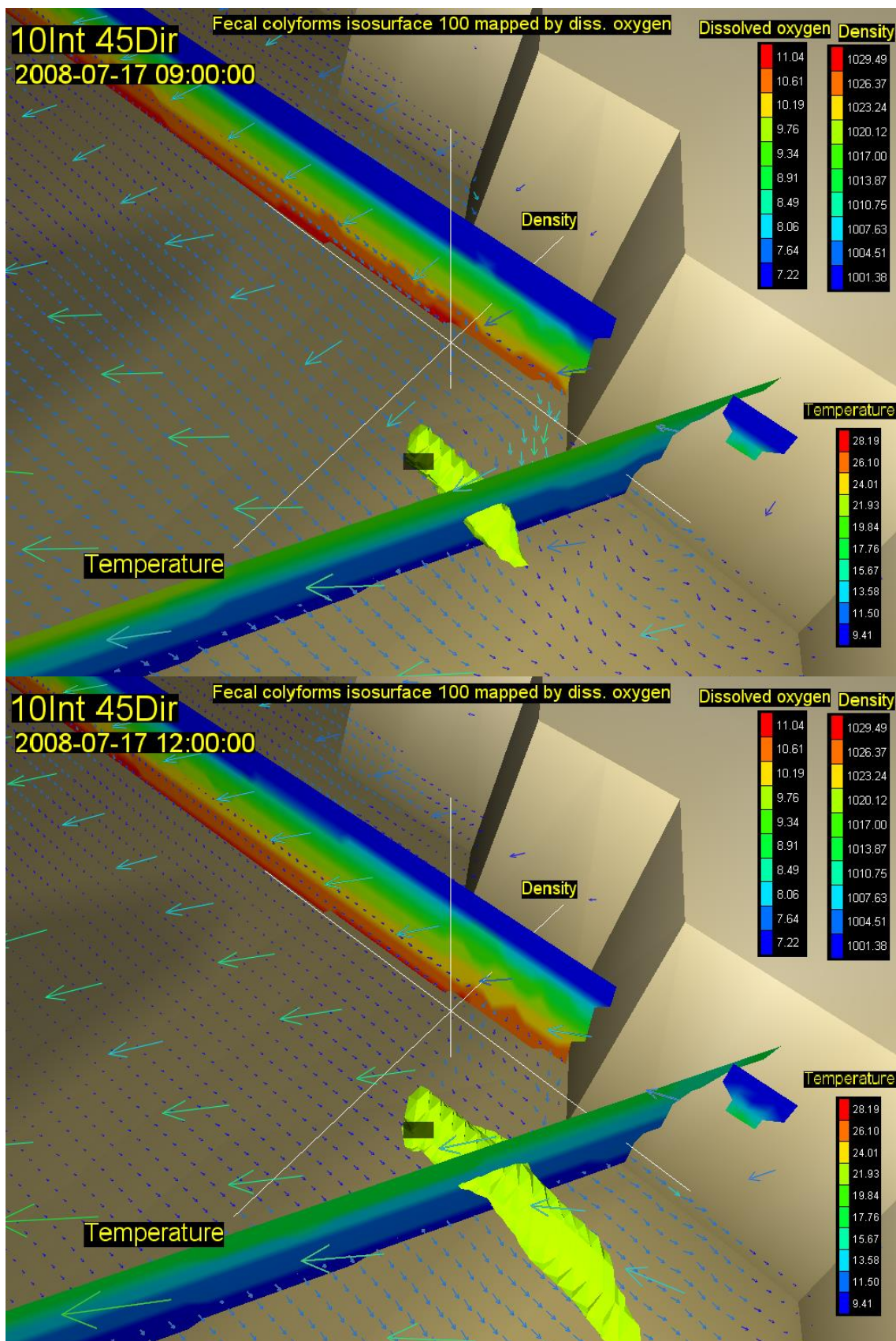




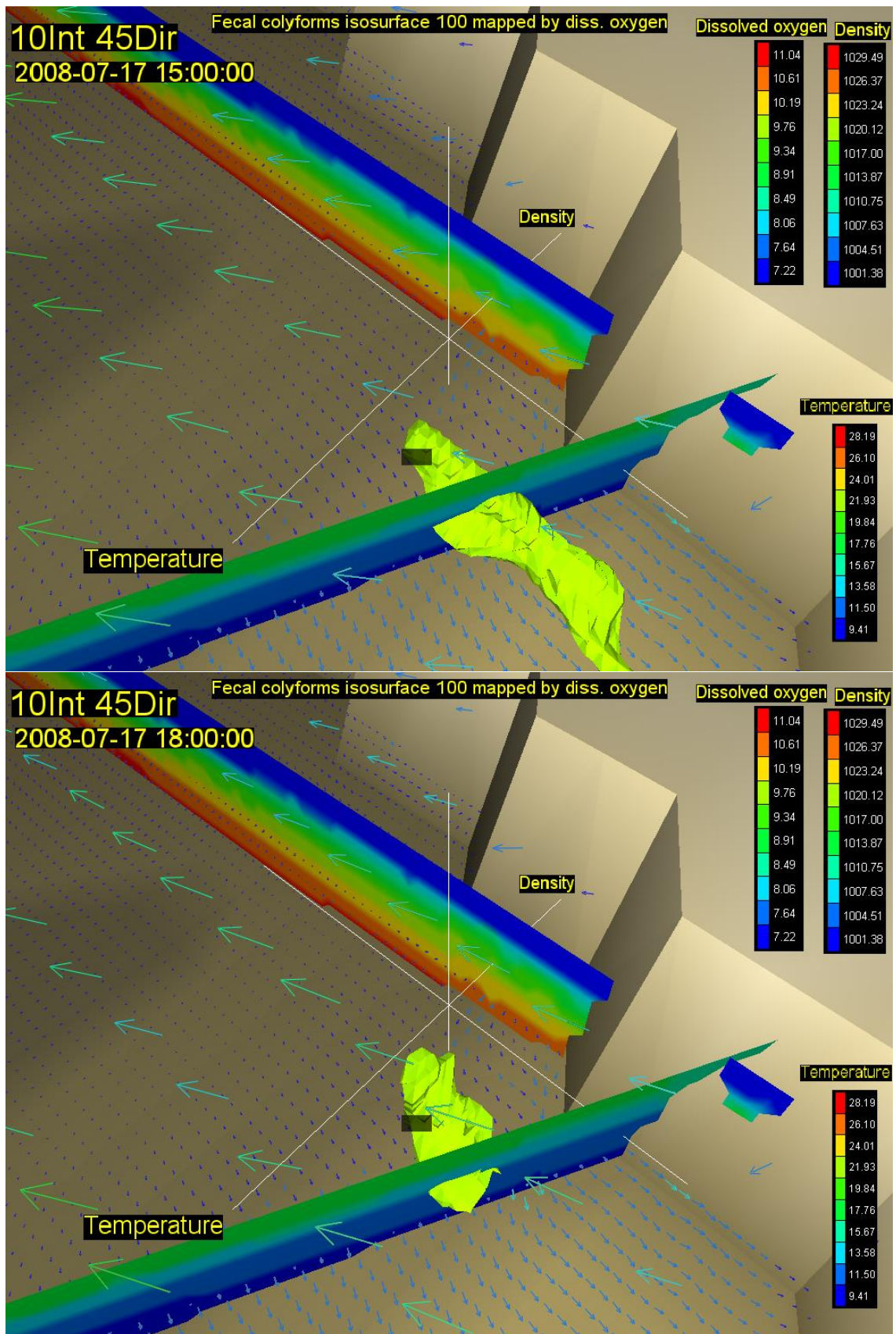
Slika 26. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 03. (gore) i 06. sat (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 45 stupnjeva



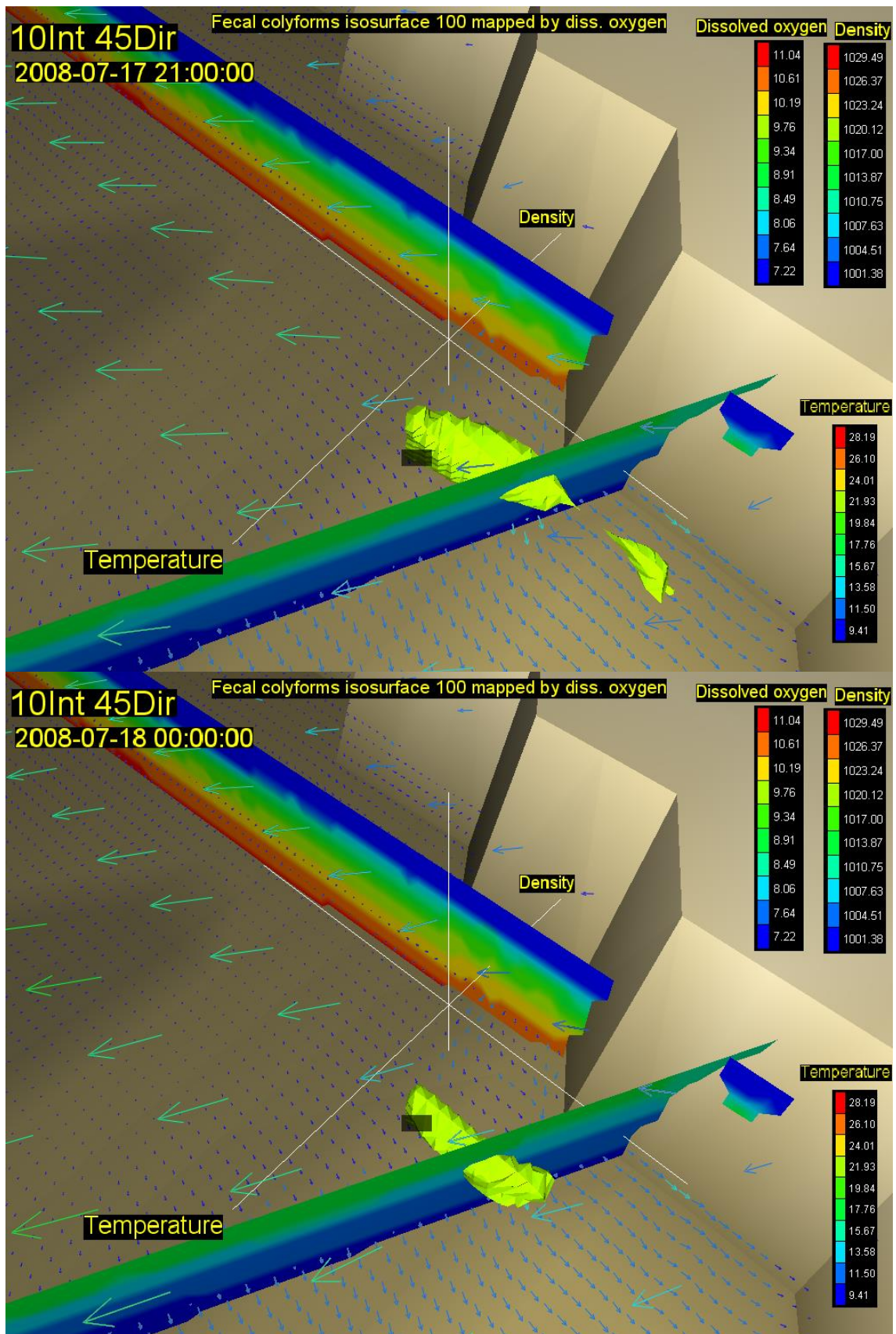
Slika 27. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva



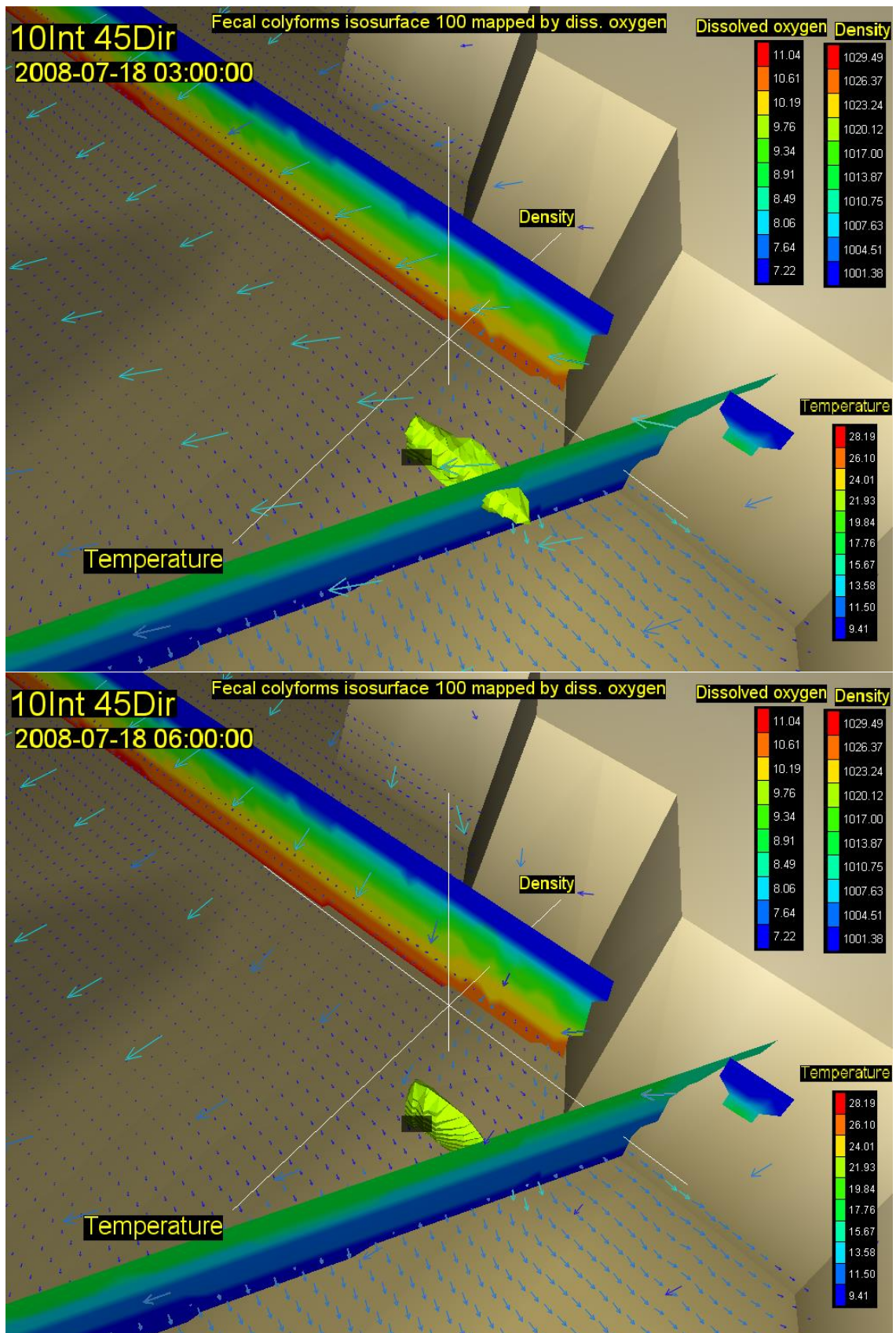
Slika 28. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 15. (gore) i 18. sat (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 45 stupnjeva



Slika 29 . Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva



Slika 30. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva



Slika 31. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva

## 10. ZAKLJUČAK

Numerička simulacija MIKE3 softverom provedena je za period od 36 sta i za različite tipične smjerove vjetrova različitih intenziteta, počevši od 16.07.2008 u 18h a forsirana je odabranim vjetrom, dotocima topline i vlage na površini mora izračunatih na temelju izlaznih polja ALADIN softvera za meteorološko modeliranje atmosferskog strujanja prostorne rezolucije 8 km i vremenske rezolucije 3 h. Na otvorenim granicama modela definirane su morske razine, polja saliniteta i temperature morske vode izračunate pomoću ROMS softvera preuzeti iz rada (PZOV, 2009).

Početna i rubna polja koncentracije otopljenog kisika izračunata su iz mjerenja na najbližim oceanografskim postajama.

Kanalizacijski ispušt Delta karakteriziran je koncentracijama fekalnih koliforma, fekalnih streptokoka na izlazu iz difuzora u iznosima mjerenim na ispustu  $FC = 5 \cdot 10^6$ , izdašnošću ispusta  $Q = 0.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , dubinom pasivnog ispusta i razrjeđenjem, danim omjerom koncentracija na ispustu i koncentracija na početku pasivnog oblaka, koji je izračunat pomoću CORMIX softvera i preuzet iz (Građevinski fakultet, 2009).

Za skup od 8 smjerova vjetra: S ( $0^\circ$ ), SI ( $45^\circ$ ), I ( $90^\circ$ ), JI ( $135^\circ$ ), J ( $180^\circ$ ), JZ ( $225^\circ$ ), Z ( $270^\circ$ ), SZ ( $315^\circ$ ) i dva intenziteta brzine vjetra od 10 i  $30 \text{ ms}^{-1}$  koji odgovaraju umjerenim i orkanskim vjetrovima, te za slučaj bez vjetra, prikazana je slika vektora brzina na površini i na 30 m dubine, kao i izgled kretanja oblaka zagađenog fekalnim koliformima kritične koncentracije od 100 bakterija po 100 ml mora, koja predstavlja graničnu vrijednost za more 2 kategorije, dakle namijenjeno kupaćima, kako bi se procijenio utjecaj kanalizacijskog ispusta na onečišćenje plaža kvarnerskog zaljeva i to za svaka tri sata. Pri tome je za svaki dani smjer i intenzitet vjetra dan i film površinskog strujanja mora cijelog Kvarnera, s prikazom vertikalnog profila gustoće morske vode u predjelu ispusta i 3 vertikalna profila temperature u smjeru SJ i IZ, kako bi se dobila simulacija vremenskog odvijanja u 36 sati konstantnog vjetra.

Drugi skup slika i filmova je uvećani prikaz umanjenog područja oko smog kanalizacijskog ispusta kako bi se mogla procijeniti dinamika gibanja onečišćujućeg oblaka, te kritično približenje obali, tj. plažama.

Na njemu su prikazani vektori brzina površinskog (rijetki raster) i srednjeg sloja (gusti raster na dubini od 32 m). Cijela simulacija rađena je istovremeno na dvije vrste mreža: gruboj ( $165 \text{ m} \times 232 \text{ m}$ ) i finoj ( $55 \text{ m} \times 77 \text{ m}$ ) koja je ugniježđena u gruboj i prekriva smo

sjeverni dio Kvarnerskog zaljeva. Radi dokaza mrežne konvergencije rađena je usporedba rezultata i s trećom, najfinijom mrežom, dimenzija 3 puta manjim u oba horizontalna smjera. Kako nije uočena značajna razlika rezultata na finoj i najfinijoj mreži. Zaključeno je da je postignuta mrežna konvergencija s smo dvije mreže: grubom i finom i dalje su rađene sve simulacije s te dvije mreže.

Zaključuje se da je onečišćenje to veće i bliže obali što je vjetar slabiji. Kod svih vjetrova oblak se kreće uglavnom paralelno s obalom i to ili u smjeru istoka ili zapada, ne izlazi na površinu mora, ostaje negdje na dubini od 10 do 20 m ispod površine. To je rezultat rujnog polja gibanja masa Kvarnerskog zaljeva, koje pri buri ima svojstvo da se topli površinski sloj mora istiskuje iz zaljeva kroz Mala i Vela vrata, dok donji hladni slojevi ulaze u zaljev. Pri tome je prosječna vertikalna komponenta brzine uz obalu oko  $1 \text{ mms}^{-1}$ , dovoljna da nakon 3 sta podigne hladnu vodu uz sjevernu obalu Kvarnerskog zaljeva za 10 m i značajno rashladi površinski sloj mora. Pri jugu je situacija obratna; topli površinski slojevi mora ulaze u zaljev kroz jedna ili oba vrata, a hladni pridneni izlaze iz zaljeva, akumulirajući topliju vodu u zaljevu. Može se zaključiti da je kanalizacijski ispust grada Rijeka projektiran i izveden dovoljno dobro tako da je onečišćenje na obali u zonama predviđenim za kupanje i rekreaciju ispod zakonom određenih vrijednosti. Dapače, rađene su dodatne simulacije s pedeset posto većim intenzitetom zagađenja, bez značajnijih pogoršanja stanja priobalnog mora Kvarnerskog zaljeva.

Simulacije onečišćenja fekalnim streptokokima su također rađene, ali je njihov utjecaj manjeg dosega od fekalnih koliforma.



## LITERATURA

- Akar, P., & Jirka, G. (1994). Buoyant spreading processes in pollutant transport and mixing, Part 1: Lateral spreading with ambient current advection. *Journal of Hydraulic Research*, 32 (6).
- Akar, P., & Jirka, G. (1995). Buoyant spreading processes in pollutant transport and mixing, Part 2: Upstream spreading in weak ambient current. *Journal of Hydraulic Research*, 33 (1).
- Arakawa, A., & Lamb, A. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the ucla general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 174-267.
- Arakawa, A. (1972). *Design of the UCLA general circulation model. Numerical simulation of weather and climate*. Los Angeles: University of California. , Tech. Report No. 7, 116.
- Benque, J., & Nihoul, J. (1982). *Modelling of hydrodynamic mechanisms of pollutant propagation in coastal zones*. IAEA-TECDOC-27.
- Bone, M. (1993). Development of a non-linear levels model and its application to bora-driven circulation on the Adriatic shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 37, 475-496.
- Božikov. (2003). Modeliranje i simulacija. U Kern, *Medicinskoinformatičke metode* (str. 85-108). Zagreb: Medicinska naklada.
- Chorin, A. (1967). A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems. *Journal of Computational Physics*, 2, 12-26.
- Čerić, V. (1993). *Simulacijsko modeliranje*. Zagreb: Školska knjiga.
- Danish Hydraulic Institute. (2003). *DHI, 2003. WATER & ENVIRONMENT*. Dohvaćeno iz WQ templates, scientific description, release 2003:  
[http://tnmckc.org/upload/document/wup/1/1.3/Manuals/MIKE%20ZERO/ECOLab\\_WQ.pdf](http://tnmckc.org/upload/document/wup/1/1.3/Manuals/MIKE%20ZERO/ECOLab_WQ.pdf)
- Danish Hydraulic Institute. (2014). *MIKE3 Flow Model, Hydrodynamic Module, Scientific documentation*. Danish Hydraulic Institute.

- Degobis, D. (1979). *Kemijska hidrografija i hranjive soli. Ekološka studija akvatorija Kvarnerskog zaljeva, II godina(108-134)*. Zagreb: Institute Ruđer Bošković.
- Degobis, D., Ilić, D., Jeftić, L., Nožina, I., Smodlaka, N., & Vučak, N. (1978). Hydrographic and Hydrodynamic Characteristics of Rijeka Bay. *IV Journees Etud. Pollutions CIESMM* (str. 551-554). Antalya: CIESMM.
- European Comission. (1991). *Direktiva o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda 91/271/EEZ*. Bruessel: European Comission.
- Fischer, H., List, E., Imberger, J., & Brooks, N. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. New York: Academic press.
- Gelo, B. (2000). *Opća i prometna meteorologija- II dio*. Zagreb: HINUS.
- Google Earth. (07 2015). *Kvarnerski zaljev-satelitski snimak*. Dohvaćeno iz [HTTPS://WWW.GOOGLE.HR/MAPS/SEARCH/RIJE%C4%8DKI+ZALJEV++SATELITSKI+SNIMAK/@45.2168758,14.3595429,48442M/DATA=!3M1!1E3](https://www.google.hr/maps/search/Rije%C4%8DKI+ZALJEV++SATELITSKI+SNIMAK/@45.2168758,14.3595429,48442M/DATA=!3M1!1E3)
- Građevinski fakultet. (2009). *Projekt zaštite od onečišćenja voda u priobalnom području IBRD 7226/HR, Dio C1: Jačanje sustava za nadzor kakvoće priobalnih voda, Konzultantske usluge za MZOPUG/M-C-1, Program praćenja stanja Jadranskog mora*. Zagreb: Građevinski fakultet.
- Greasley, A. (2004). *Simulation Modelling for Business*. Burlington: Ashgate Publishing Limited.
- Hrvatski hidrografski institut. (15. 09 2015). *Kvarnerski zaljev*. (Hrvatski hidrografski institut, Kvarnerski zaljev, <http://www.hhi.hr/catalogmaps/viewmap/25>, skinuto 15.09.2015.) Preuzeto 15. 09 2015 iz catalogmaps: <http://www.hhi.hr/catalogmaps/viewmap/25>
- Ilić, D., Jeftić, L., Nožina, I., & Smirčić, A. (1978). Driftcard Experiment in Rijeka Bay. *IV Journees Etud. Pollutions CIESMM* (str. 567-572). Antalya: CIESMM.
- Ilić, D., Smirčić, A., & Vučak, Z. (1979). Dinamika vodenih masa. *Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva, II godina(43-92)*. Zagreb: Institut Ruđer Bošković.
- Institut građevinarstva Hrvatske. (1995). *Izješće o izvršenim ispitivanjima na podmorskom difuzorskom ispustu „Delta“ u 1994. godini*. Rijeka: Institut građevinarstva Hrvatske.
- Institut građevinarstva Hrvatske. (1996). *Izješće o izvršenim ispitivanjima na podmorskom difuzorskom ispustu „Delta“ u 1995. godini*. Rijeka: Institut građevinarstva Hrvatske.

- Institut građevinarstva Hrvatske. (1997). *Izješće o izvršenim ispitivanjima na podmorskom difuzorskom ispustu „Delta“ u 1996. godini*. Rijeka: Institut građevinarstva Hrvatske.
- Institut građevinarstva Hrvatske. (1999). *Ispitivanjima učinka podmorskog difuzorskog ispusta „Delta“; Ispitavanje onečišćenja mora pod direktnim utjecajem Rječine. Ispitivanje onečišćenja donjeg toka Rječine*. Rijeka: Institut građevinarstva Hrvatske.
- Janeković, I., Dutour Sikirić, M., Tomažić, I., & Kuzmić, M. (2010). Hindcasting the Adriatic Sea surface temperature and salinity: A recent modeling experience. *Geofizika*, 27, 85-100.
- Janjić, Z. (1979). Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in  $\sigma$  coordinate model. *Contributions to Atmospheric Physics* 52(2), str. 69-84.
- Janjić, Z. (1990). The step-mountain coordinate: Physical package. *Monthly Waether Review* 118, 1429-1442.
- Jeftić, L. (1982). Ekološka istraživanja Riječkog zaljeva . *Pomorski zbornik, Pomorski zbornik*(20), str. 505-520.
- Jeftić, L., Kuzmić , M., Orlić , M., & Policastro, A. (1980). Circulation study of Rijeka Bay. V *Journées Etud. Pollutions CIESMM* (str. 901-910). Cagliari: CIESMM.
- Justić, D., Legović , T., & Rottini Sandrini , L. (1987). Trends in the oxygen content 1911-1984 and occurrence of benthic mortality in the Northern Adriatic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25, str. 435-445.
- Karakašević, B. (1987). *Mikrobiologija i parazitologija*. Beograd-Zagreb: Medicinska knjiga.
- Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA. (29. 09 2015). Dohvaćeno iz Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA D.O.O. za vodoopskrbu i odvodnju Rijeka: <http://www.kd vik-rijeka.hr/default.asp?ru=114>
- Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA. (26. 09 2015). *Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Delta*. Dohvaćeno iz Uređaj Delta: <http://www.kd vik-rijeka.hr/Slike/2004/10/07/8627740.GIF>
- Krstulović, N., & Šolić , M. (1997). Mikrobiološko zagađenje mora (2): Praćenje sanitarne kvalitete mora i morskih organizama. *Hrvatska vodoprivreda* 6 (56), 38-41.

- Legović, T., & Cruzado, A. (1997). A model of phytoplankton growth on multiple nutrients. *Ecological Modelling*, 99, str. 19-31.
- Legović, T., & Sekulić, B. (1979). Izmjena vodene mase Riječkog zaljeva. *Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva, II godina(93-107)*. Zagreb: Institute Ruđer Bošković.
- Legović, T. (1982). Water exchange between a coastal basin and the adjacent sea with an application to the Rijeka Bay. *Deep Sea Research*, 29, 999-1012.
- Legović, T. (1997). Modeling for seawater quality management. *Journal of computing and information technology* 5, 2, (str. 71-85).
- Legović, T. (1997). Toxicity may affect predictability of eutrophication models in coastal sea. *Ecological Modelling*, 99, str. 1-6.
- Legović, T., & Geček, S. (2001). Nutrients and grazing in modelling the deep chlorophyll maximum. *Ecological Modelling*, 138, 143-152.
- Legović, T., & Justić, D. (1997). When is phytoplankton bloom causing the most intensive hypoxia in the northern Adriatic Sea? *Oceanologica Acta*, 20, str. 91-99.
- Lončar, G., Beg Paklar, G., & Janeković, I. (2011). Influence of density stratification on the effluent plume dynamics. *Oceanologia*. 53, 565-585.
- Lončar, G., Beg Paklar, G., & Janeković, I. (2012). Numerical Modelling of Oil Spills in the Area of Kvarner and Rijeka Bay (The Northern Adriatic Sea). *Journal of Applied Mathematics*.
- Mesinger, F. (1976). *Dinamička meteorologija*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Metcalf, & Eddy. (1979). *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. Boston: McGraw Hill-Book company.
- Narodne Novine 130. (2011). Zakon o vodama. *Narodne Novine 130*.
- Narodne Novine 153. (2009). Zakon o vodama. *Narodne Novine 153/09*.
- Narodne novine 27. (2015). Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda. *Narodne novine 27*.
- Narodne novine 33. (1996). Uredba o standardima kakvoće mora na morskim plažama. *Narodne novine 33*.

- Narodne novine 43. (2014). Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda .  
*Narodne novine 43.*
- Narodne Novine 56. (2013). Zakon o vodama. *Narodne Novine 153.*
- Narodne Novine 63. (2011). Zakon o vodama.
- Narodne novine 73. (2008). Uredba o kakvoći mora za kupanje. *Narodne novine 73.*
- Narodne novine 77. (1998). Uredba o klasifikaciji voda. *Narodne novine 77.*
- Narodne novine 77. (2008). Uredba o kakvoći mora za kupanje. *Narodne novine 77.*
- Narodne novine 78. (1998). Uredba o opasnim tvarima u vodama. *Narodne novine 78.*
- Narodne novine 8. (1999). Državni plan za zaštitu voda. *Narodne novine 8.*
- Narodne novine 80. (2013). Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda.  
*Narodne novine 80.*
- Narodne novine 82. (1996). Narodne novine 82/94. *Uredba o standardima kakvoće mora na morskim plažama.*
- Narodne novine 82/94. (1996). Uredba o standardima kakvoće mora na morskim plažama.  
*Narodne novine 82/94.*
- Orlić, M., & Kuzmić, M. (1980). A contribution to the understanding of the Kinematics of Surface Currents in Rijeka Bay. *Thalassia Jugoslavica*, 31-49.
- Perović, Z. (2003). *Koncentracija antropogenih bakterija oko podmorskog ispusta „Delta“ (Riječki zaljev)*. Rijeka: Magistarski rad.
- Pojed, I., & Smodlaka, N. (1979). Primarna produkcija. *Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva, II godina(258-269)*. Zagreb: Institut Ruđer Bošković.
- Primorsko-goranska županija. (2000). Prostorni plan Primorsko-goranske županije. *Službene novine Primorsko-goranske županije 14/2000.*
- (2012). *Projekt Jadran "Početna procjena stanja i opterećenja morskog okoliša hrvatskog dijela Jadrana, lipanj 2012."*. Zagreb.
- (2009). *Projekt zaštite od onečišćenja voda u prioblanom području IBRD 7226/HR, Dio C1; Jačanje sustava za nadzor kakvoće priobalnih voda, Konzultantske usluge za MZOPUG/M-C-1, Program praćenja stanja Jadranskog mora*. Zagreb: Građevinski fakultet.

- Rasmussen, E. (1993). Three Dimensional Hydrodynamic Models. U M. Abbott, & N. Price, *Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*. London: Chapman and Hall.
- Ravlić, N. (1996). *Modellazione numerica dei processi idrodinamici nei bacini costieri di media profondita' dell'effeto baroclinico*. PhD Thesis. Padova: Universita' di Padova.
- RiEKO-LAB. (2006). *Ispitivanje utjecaja podmorskog ispusta kanalizacijskog sustava grada Rijeke na kakvoću mora*. Rijeka: RiEKO-LAB d.o.o.
- RiEKO-LAB. (2008). *Ispitivanje utjecaja podmorskog ispusta kanalizacijskog sustava grada Rijeke na kakvoću mora u 2007. godini*. Rijeka: RiEKO-LAB d.o.o.
- Smolarkiewicz, P. (1983). A simple positive definite advection with small implicit diffusion. *Monthly Weather Review* 3, 479-486.
- Steel, E. (1980). *Water supply and sewerage*. McGraw-Hill Book company, Inc.
- Šolić, M., & Krstulović. (1994). Važnost poznavanja vremena preživljavanja indikatora fekalnog zagađenja za određivanje obilježja podmorskih ispusta. *Hrvatske vode* 2 (6), 407-411.
- Šolić, M., & Krstulović, N. (1992.). Separate and combined effects of solar radiation, temperature, salinity and pH on survival of faecal coliforms in seawater. *Marine Pollution Bulletin* 24(8), 411-416.
- Šolić, M., & Krstulović, N. (1997). Mikrobiološko zagađenje mora (3): Sudbina indikatorskih i patogenih mikroorganizama poslije odlaska u morsku sredinu. *Hrvatska vodoprivreda* 6 (57), 17-22.
- TEH-Projekt. (1988). *Izvedbeno-tehnička dokumentacija centralnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda grada Rijeke na Delti s podmorskim ispustom (novelirana varijanta iz 1984. Rijeka)*. Rijeka: TEH-Projekt).
- UNESCO. (1981). *The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980*. UNESCO Unesco technical papers in marine science, 36.
- Vukić Lušić, D., Peršić, V., Đakovac, T., Traven, L., Horvatić, J., Glad, M., . . . Lušić, D. (2013). Trophic state assessment of NE Adriatic sea coastal waters based on waters based on water quality parameters. *Vukić Lušić, D., Peršić, V., Đakovac, T., Traven,*

L., Horvatić, J., Glad, M., Jurica, K., Lušić, D. Trophic state assessment of NE Adriatic sea coastal waters *Fresenius Environmental Bulletin*, 22, 1021-1030.

Vukić Lušić, D., Peršić, V., Horvatić, J., Viličić, D., Traven, L., Đakovac, T., & Mićović, V. (2008). Assessment of nutrient limitation in Rijeka Bay, NE Adriatic Sea, using miniaturized bioassay. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 358, str. 46-56.

Wilkin, e. a. (2005). A regional ocean modelling system for the long term ecosystem observatory. *Journal of geophysical research* 110, C06S91.

Zavod za javno zdravstvo. (2014). *Kakvoća mora na morskim plažama na području Primorsko-goranske županije u 2014 godini*. Rijeka: Zavod za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije. ZZJZ-PGŽ.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Kvarnerski zaljev - satelitski snimak (Google Earth, 2015) .....	6
Slika 2. Kvarnerski zaljev - kartografski prikaz (Hrvatski hidrografski institut, 2015).....	7
slika 3. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda rijeka (Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015) .....	15
Slika 4. Osnovne vrste matematičkih modela .....	21
Slika 5. Simulacijski proces .....	22
Slika 6. Mreža konačnih razlika u x, y i z prostoru.....	28
Slika 7. Tipične satne varijacije toka otpadne vode iz domaćinstva (Metcalf & Eddy, 1979)	33
Slika 8. Krivulja uginuća mikroorganizama izloženih smrtnom faktoru u konstantnim uvjetima u jedinici vremena (Karaklašević, 1987).....	35
Slika 9. Prikaz tri mreže modela konačnih razlika: grube – bijele linije na tamnosmeđoj podlozi (165m X 232m) (prikazana svaka druga linija), fine – bijelo (55m X 77,33m) i najfinije – roza (18,33m X 25,77m).....	44
Slika 10. Uvećani detalj sve tri mreže (gore) i smo fine i najfinije (dolje) u okolici ispusta Delte .....	45
Slika 11. Vektori brzina i oblak FC koncentracije 100 bakterija po 100 ml mora na tri različite mreže: gruboj (bijeli bridovi), srednjoj (crni bridovi) i finoj (crveni bridovi) za vjetar intenziteta $10 \text{ ms}^{-1}$ i smjer od $135$ stupnjeva .....	46
Slika 12. Vektori brzina i oblak FC koncentracije 100 bakterija po 100 ml mora na tri različite mreže: gruboj (bijeli bridovi), srednjoj (crni bridovi) i finoj (crveni bridovi) za vjetar intenziteta $10 \text{ ms}^{-1}$ i smjer od $0$ stupnjeva .....	47
Slika 13. Satni protoka na ispustu Delta za prosječan dan (Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015) .....	49
Slika 14. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$ za 16,5. st za vjetar intenziteta $10 \text{ ms}^{-1}$ iz smjera $135$ stupnjeva. ....	53
Slika 15. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$ za 16,5. st za vjetar intenziteta $10 \text{ ms}^{-1}$ iz smjera $135$ stupnjeva.....	54
Slika 16. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$ za 16,5. st za vjetar intenziteta $10 \text{ ms}^{-1}$ iz smjera $135$ stupnjeva.....	55



Slika 17. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 00. (gore) i 03. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva .....	56
Slika 18. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 06. (gore) i 09. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva .....	57
Slika 19. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 12. (gore) i 15. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva .....	58
Slika 20. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 18. (gore) i 21. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva .....	59
Slika 21. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 24. (gore) i 27. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva .....	60
Slika 22. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 30. (gore) i 33. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 135 stupnjeva .....	61
Slika 23. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	63
Slika 24. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i na 36 (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. sat za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	64
Slika 25. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i na 60 (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. sat za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	65

Slika 26. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	66
Slika 27. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva.....	67
Slika 28. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	68
Slika 29 . Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	69
Slika 30. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	70
Slika 31. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 30m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. sat (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 45 stupnjeva .....	71
Slika 32. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 00. (gore) i 03. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ...	94
Slika 33. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 06. (gore) i 09. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva .	95
Slika 34. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 12. (gore) i 15. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	96
Slika 35. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 18. (gore) i 21. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	97

Slika 36. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 24. (gore) i 27. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	98
Slika 37. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 30. (gore) i 33. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	99
Slika 38. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	100
Slika 39. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	101
Slika 40. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 0 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	102
Slika 41. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	103
Slika 42. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	104
Slika 43. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	105
Slika 44. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva ..	106
Slika 45. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100	

FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva .....	107
Slika 46. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva .....	108
Slika 47. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva .....	109
Slika 48. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva.....	110
Slika 49. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva.....	111
Slika 50. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	112
Slika 51. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	113
Slika 52. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	114
Slika 53. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	115
Slika 54. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	116

Slika 55. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	117
Slika 56. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva .....	118
Slika 57. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva.....	119
Slika 58. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva.....	120
Slika 59. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva .....	121
Slika 60. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva .....	122
Slika 61. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva .....	123
Slika 62. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva .....	124
Slika 63. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva .....	125
Slika 64. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva .....	126
Slika 65. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva.....	127

Slika 66. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva.....	128
Slika 67. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC/(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	129
Slika 68. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	130
Slika 69. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	131
Slika 70. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	132
Slika 71. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	133
Slika 72. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	134
Slika 73. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva .....	135
Slika 74. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva.....	136
Slika 75. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva.....	137
Slika 76. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	138

Slika 77. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	139
Slika 78. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	140
Slika 79. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	141
Slika 80. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	142
Slika 81. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	143
Slika 82. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva .....	144
Slika 83. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva.....	145
Slika 84. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva.....	146
Slika 85. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	147
Slika 86. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	148
Slika 87. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	149

Slika 88. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	150
Slika 89. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	151
Slika 90. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	152
Slika 91. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva .....	153
Slika 92. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva.....	154
Slika 93. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml) <sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms <sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva.....	155



## **POPIS TABLICA**

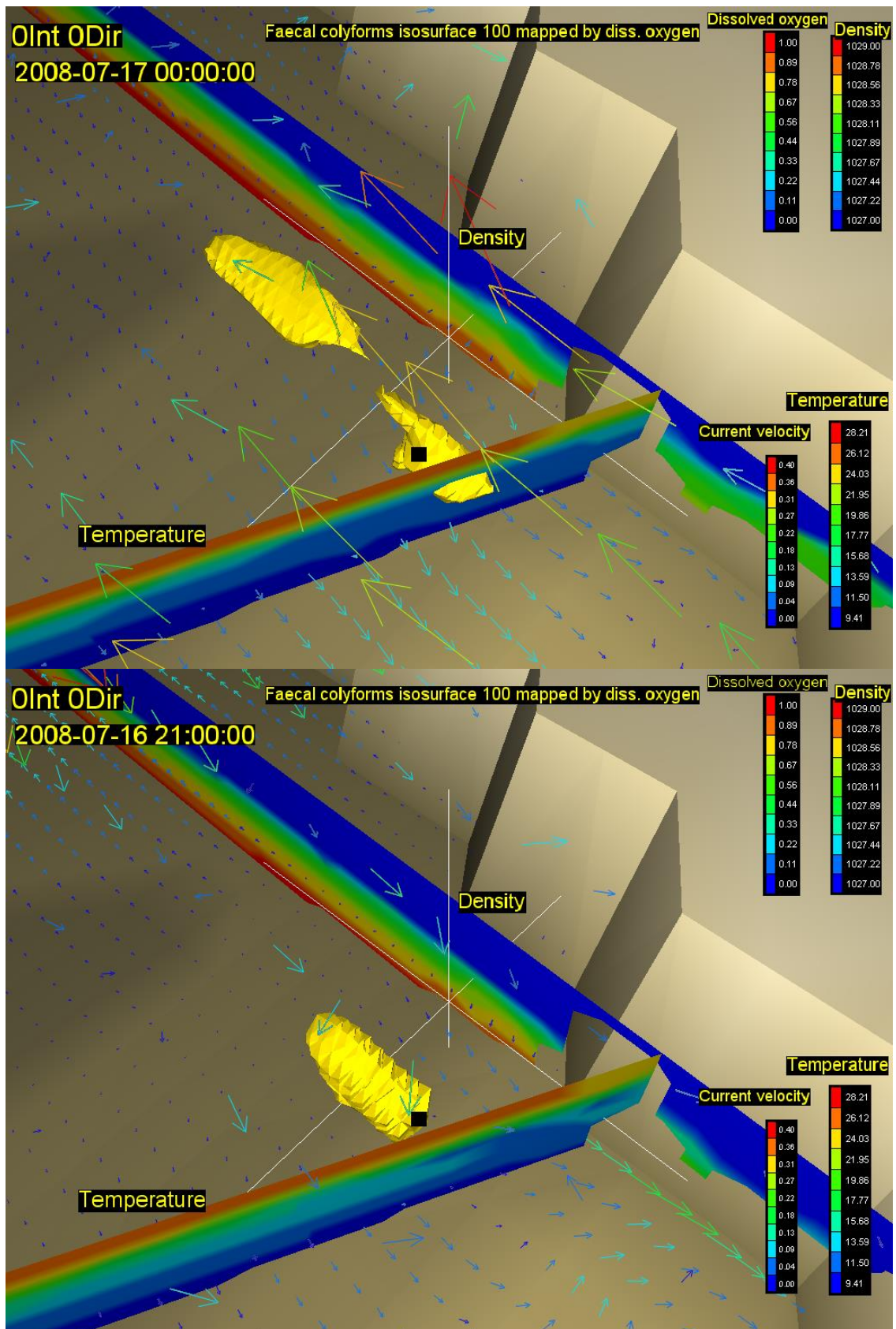
Tabela 1. Standardi za ocjenu kakvoće mora nakon svakog ispitivanja, (Narodne novine 82/94, 1996) .....	37
Tabela 2. Satni protoci na ispustu Delta za prosječan dan (Komunalno društvo VODOVOD I KANALIZACIJA, 2015) .....	49

## POPIS OZNAKA I SIMBOLA

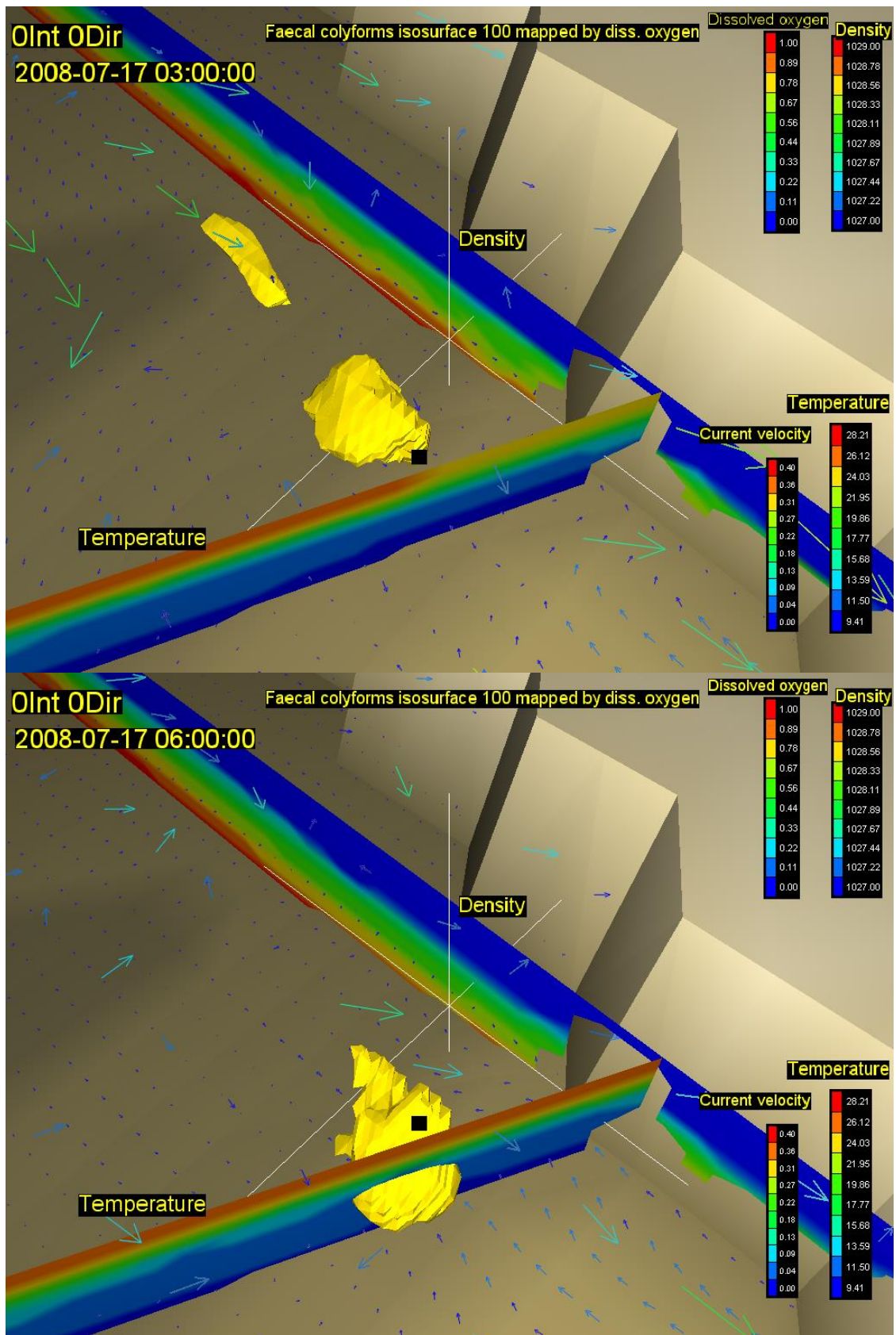
SIMBOL	IME I JEDINICA
3D	trodimenzionalno
AD	advection-dispersion - advektivno disperzivni
ADI	Alternative Direction Implicit - Implicitna metoda alternirajućih smjerova
BOD	biological oxygen demand - biološka potreba za kisikom
CFD	Computational Fluid Dynamics - računarska dinamika fluida
$c_s$	brzina zvuka u morskoj vodi, $m\ s^{-1}$
$C_s$	sturacijska konstanta otopljenog kisika
CTD	Coastal Conductivity Temperature Depth - priobalna dubina provođenja temperature
$C_w$	koeficijent trenja vjetra
$C_\mu$	eksperimentalna konstanta
$D$	dubina mora, m
$DO$	dissolved oxygen - otopljeni kisik, $mg\ O_2\ l^{-1}$
$D_s$	koeficijenti difuzije slanosti
$D_T$	koeficijenti difuzije temperature
$f(T)$	Temperaturna funkcija
FK	Fekalni koliformi, $(100\ ml)^{-1}$
FS	Fekalni streptokoki, $(100\ ml)^{-1}$
$g_i$	i-ta komponenta vektora gravitacijskog ubrzanja, $m\ s^{-2}$
$H$	stvarna dubina vode, m
$HS\_SOD$	koncentracija poluzasićenja kisikom, $mgO_2\ l^{-1}$
$I$	intenzitet svjetla integriran po dubini, $Kwm^{-2}$
$k$	turbulentna kinetička energija, $m^2\ s^{-2}$
$K_2$	reaeracijska konstanta pri 20°C, $dan^{-1}$
$K_d$	brzina odumiranja ukupnih ili fekalnih koliforma, $dan^{-1}$
$K_{do}$	brzina odumiranja pri 20 °C, salinitetu od 0‰ i tami, $dan^{-1}$
$k_s$	hrapavost dna
$l$	Smagorinsky skala duljine, m
N	Dušik
$n$	indeks vremenskog koraka
$\omega$	kutna brzina rotacije Zemlje, $s^{-1}$
P	Fosfor
$p$	tlak fluida, Pa
$P$	stvarna proizvodnja kisika, $gO_2m^{-2}dan^{-1}$
pH	stupanj kiselosti vode
$P_{max}$	maksimalna proizvodnja kisika u podne, $gO_2m^{-2}dan^{-1}$
POM	Princeton Ocean Model
Q	izdašnost ispusta, $m^3s^{-1}$
$R$	stvarna brzina disnja biljaka, bakterija i životinja, $gO_2m^{-2}dan^{-1}$
$R_{20}$	brzina disnja pri 20°C, $gO_2m^{-2}dan^{-1}$
ROMS	Regional Ocean Modeling System

$s$	slanost
$sl$	salinitet
Si	Silicij
SOD	Sediment Oxygen Demand - Potražnja sedimenta za kisikom
SS	član izvora/ponora
SST	Sea Surface Temperature - Temperatura površine mora, °C
$T$	temperatura fluida, °C
$t$	Vrijeme, s
$t_{\text{gore,dolje}}$	vrijeme izlaska i zalaska sunca, s
TRIX	Trofički indeks
$U$	intenzitet brzine struje, $\text{m s}^{-1}$
$u_i$	komponenta brzine u $x_i$ smjeru, $\text{m s}^{-1}$
UK	Ukupni koliformi, $(100 \text{ ml})^{-1}$
$W$	brzina vjetra, $\text{m s}^{-1}$
WQ	water quality - snitetska kvaliteta vode
$wsp$	horizontalna komponenta brzine vjetra, $\text{ms}^{-1}$
$x_i$	i-ta koordinatna os, m
$z_b$	udaljenost od dna, m
$z_m$	udaljenost od dna kod koje se podudaraju profili brzina Smagorinsky i logaritamskog oblika, m
$\alpha$	stvarna relativna duljina dana, s
$\delta$	Kroneckerov delta simbol
$\theta$	temperaturni koeficijent
$\theta_2$	Arrheniusov temperaturni koeficijent (temperaturni koeficijent za disnje heterotrofa)
$\theta_3$	Arrheniusov temperaturni koeficijent
$\theta_l$	koeficijent svjetla za brzinu odumiranja
$\theta_s$	koeficijent saliniteta za brzinu odumiranja
$\theta_T$	koeficijent temperature za brzinu odumiranja
$\lambda$	geografska dužina
$\nu_t$	koeficijent turbulentnog viskoziteta, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\rho$	lokalna gustoća fluida, $\text{kg m}^{-3}$
$\rho_z$	gustoća zraka, $\text{kg m}^{-3}$
$\tau$	stvarna duljina trajanja dana u odnosu na podne, s
$\tau_{xx}$	površinsko naprezanje uzrokovano vjetrom, Pa
$\varphi$	geografska širina
$\kappa$	Karmanova konstanta
$\Omega$	Koriolisov tenzor
$\Omega_{ij}$	i,j-ta komponenta Koriolisovog tenzora

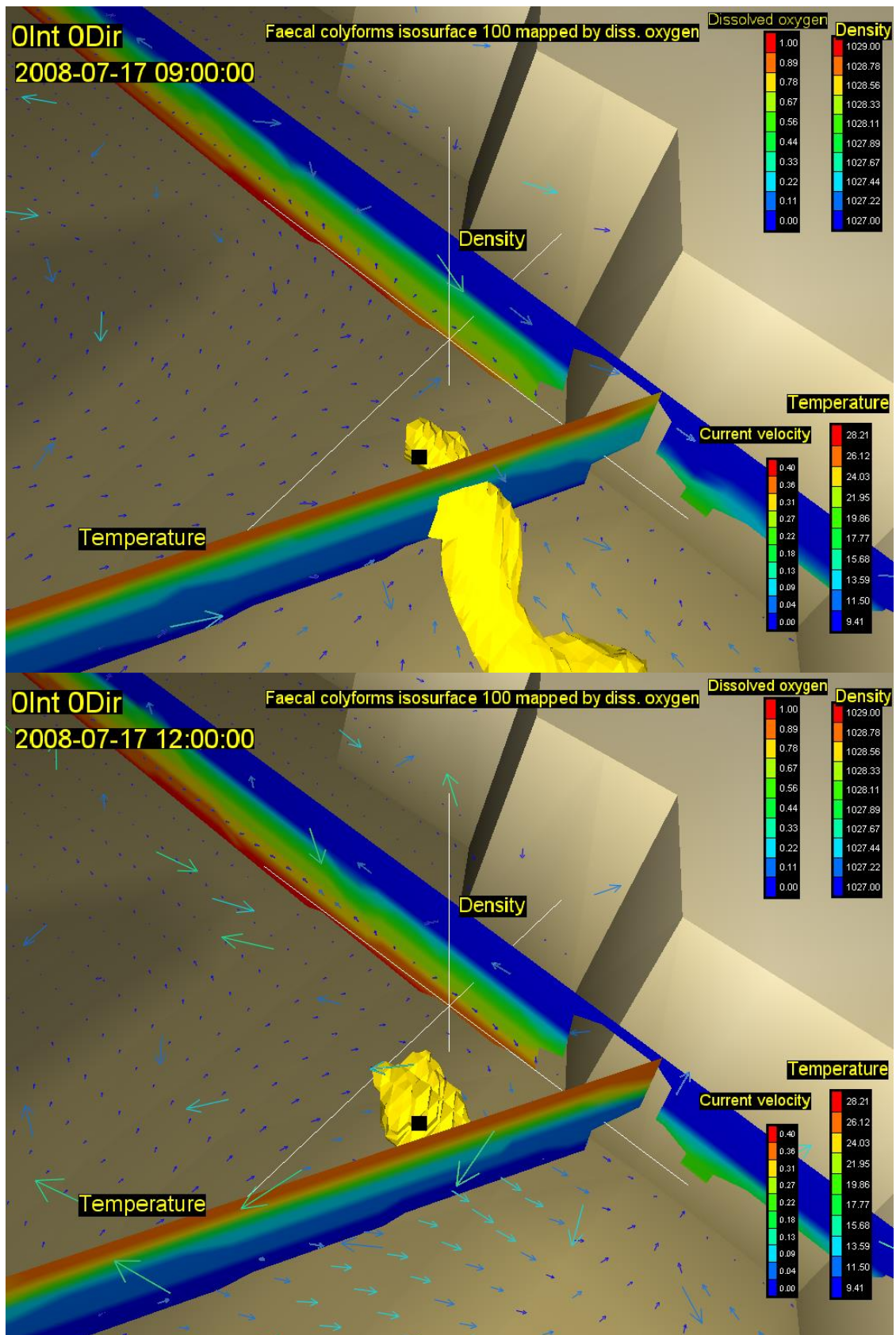
**PRILOG: SLIKE SIMULACIJE STRUJANJA I GIBANJA OBLAKA FEKALNIH  
KOLIFORMA ZA PREOSTALE VJETROVE**



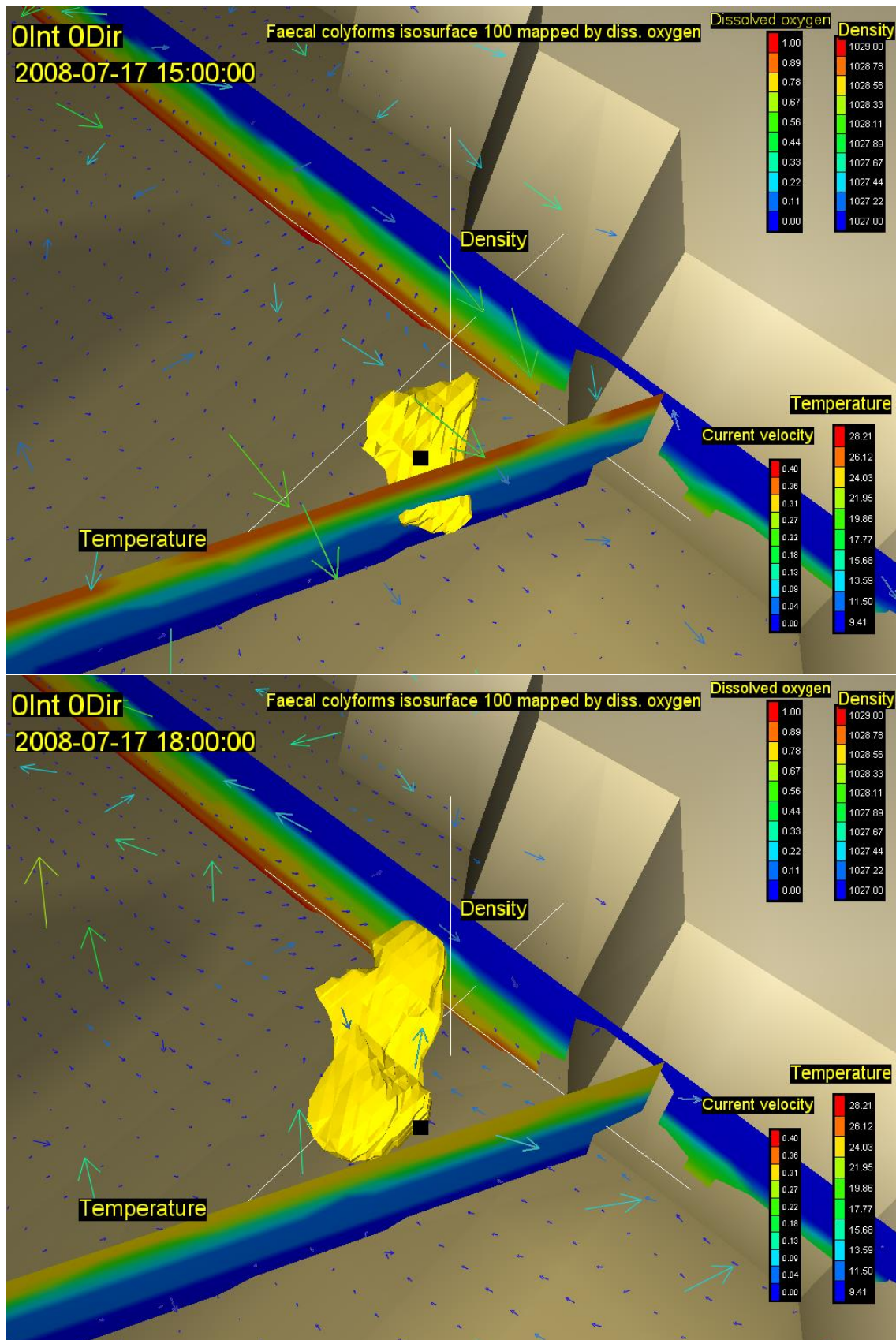
Slika 32. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 00. (gore) i 03. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



Slika 33. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblak onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 06. (gore) i 09. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva

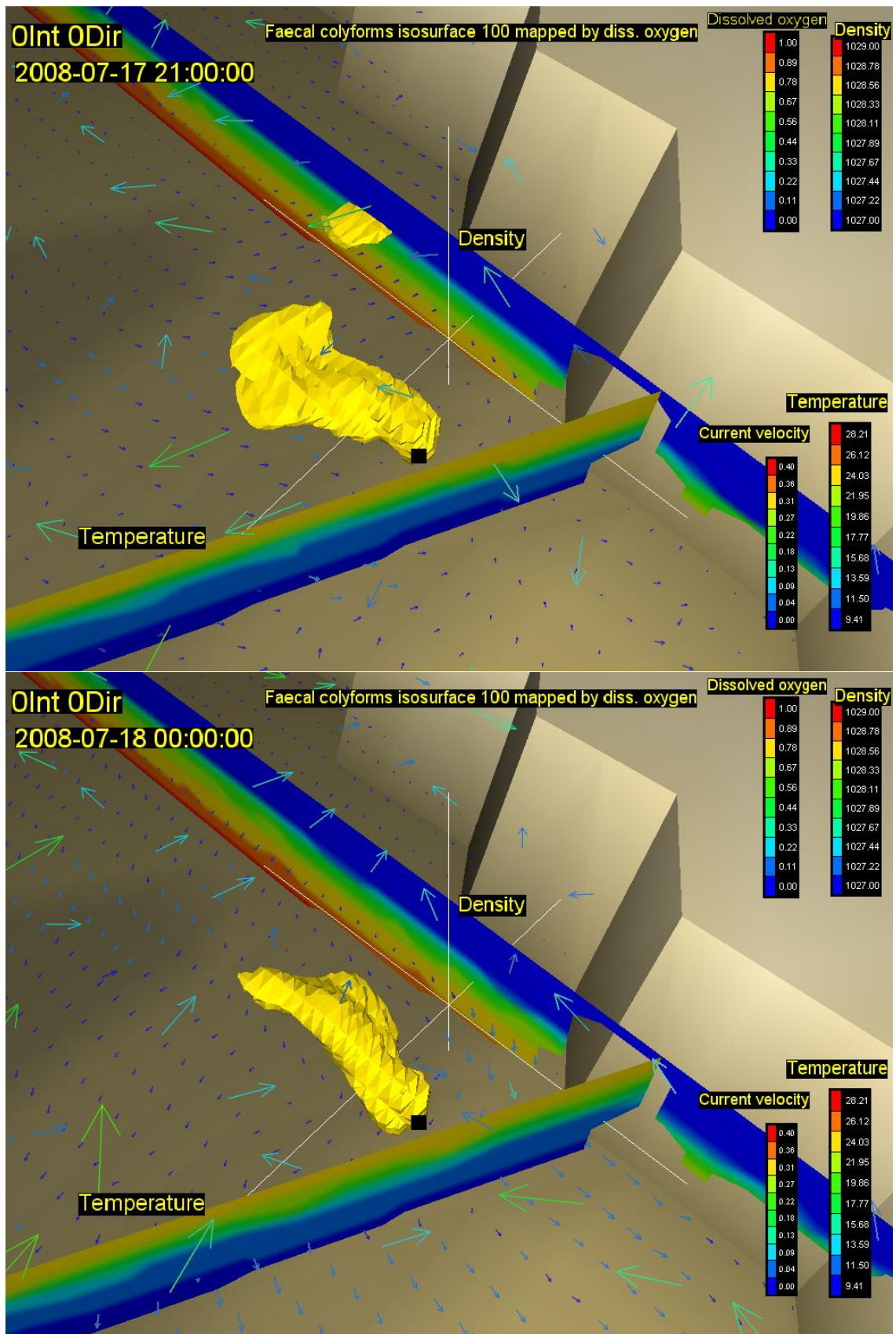


Slika 34. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblak onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 12. (gore) i 15. st (dolje) za vjeter intenziteta  $0 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 0 stupnjeva

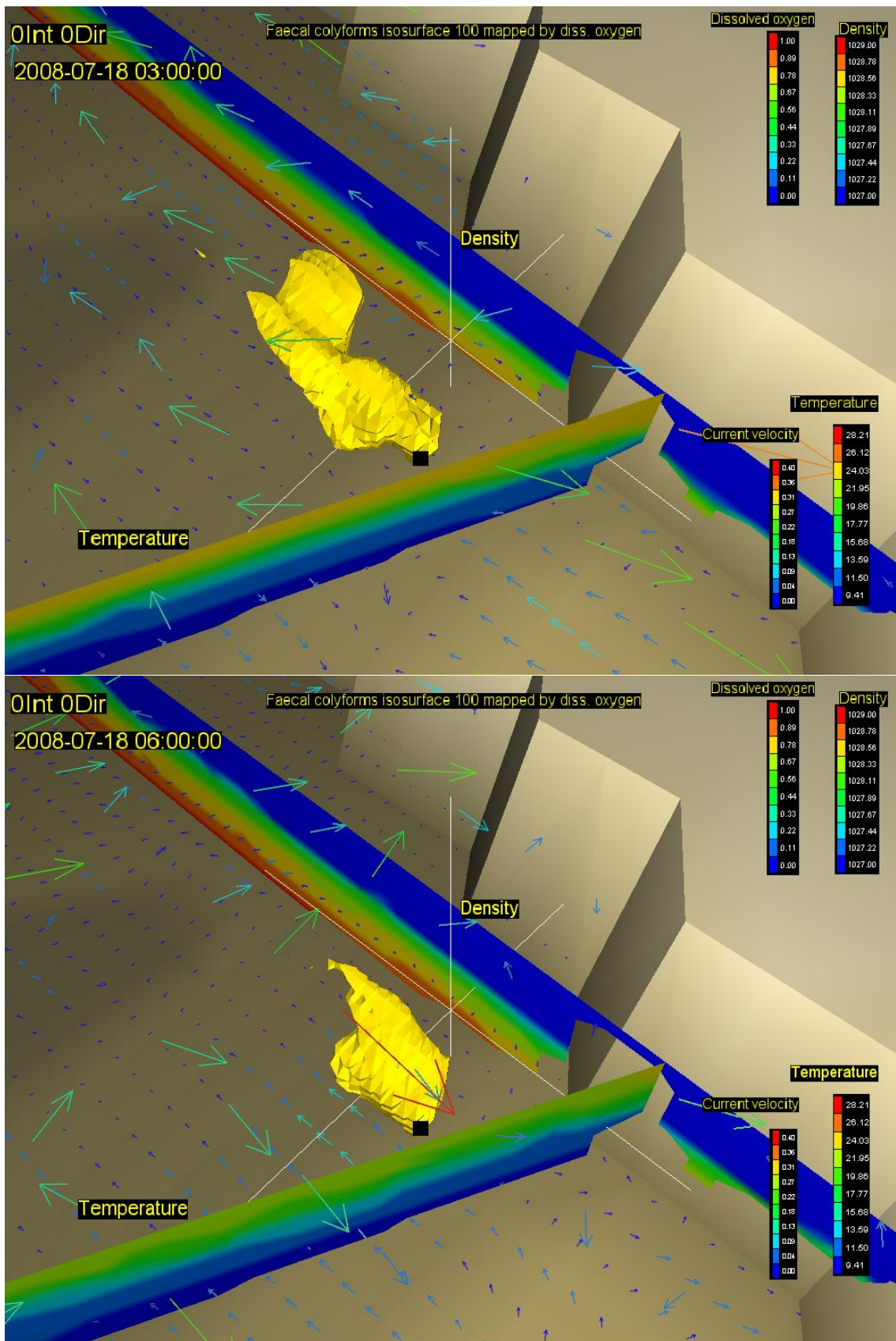


Slika 35. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 18. (gore) i 21. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva

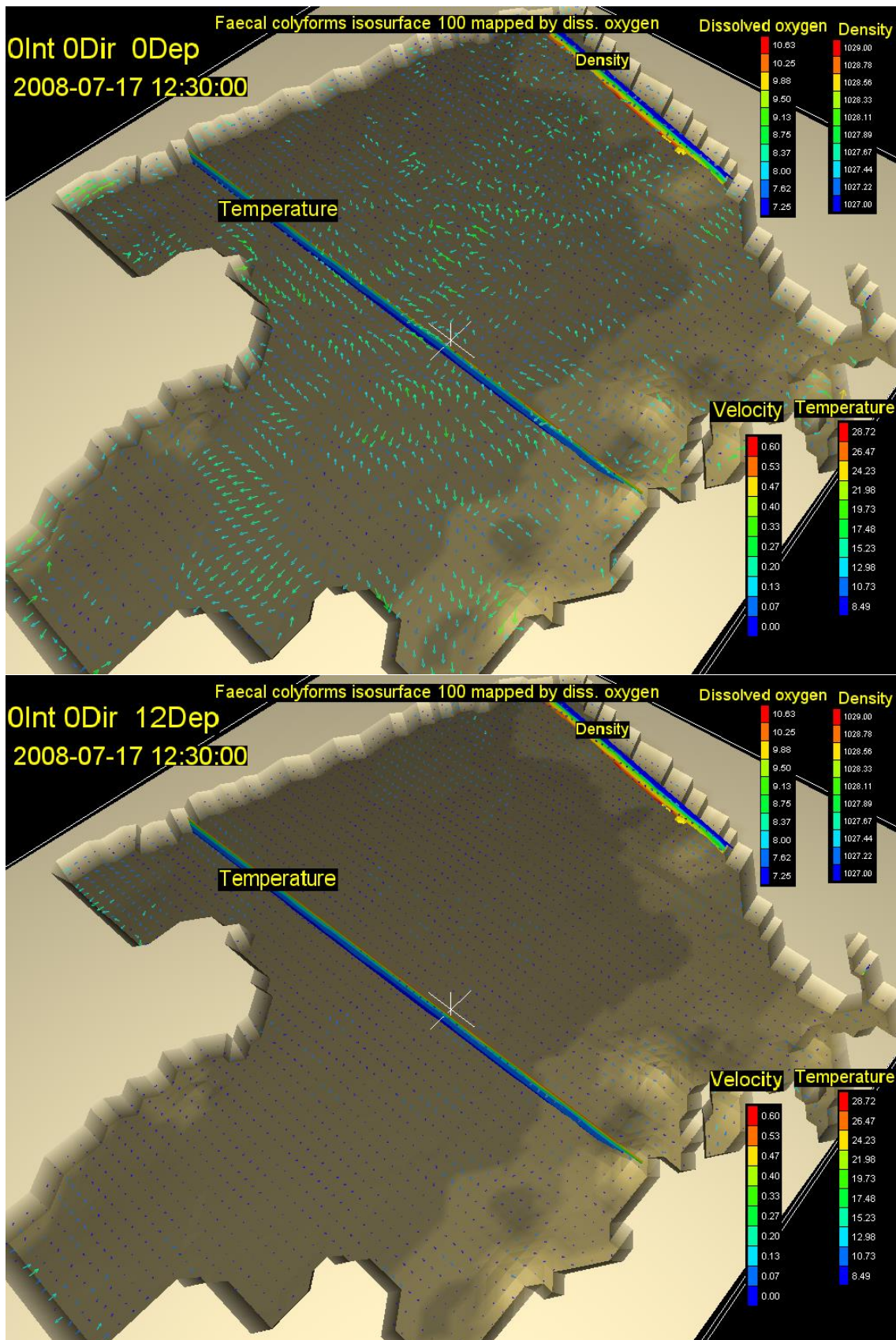




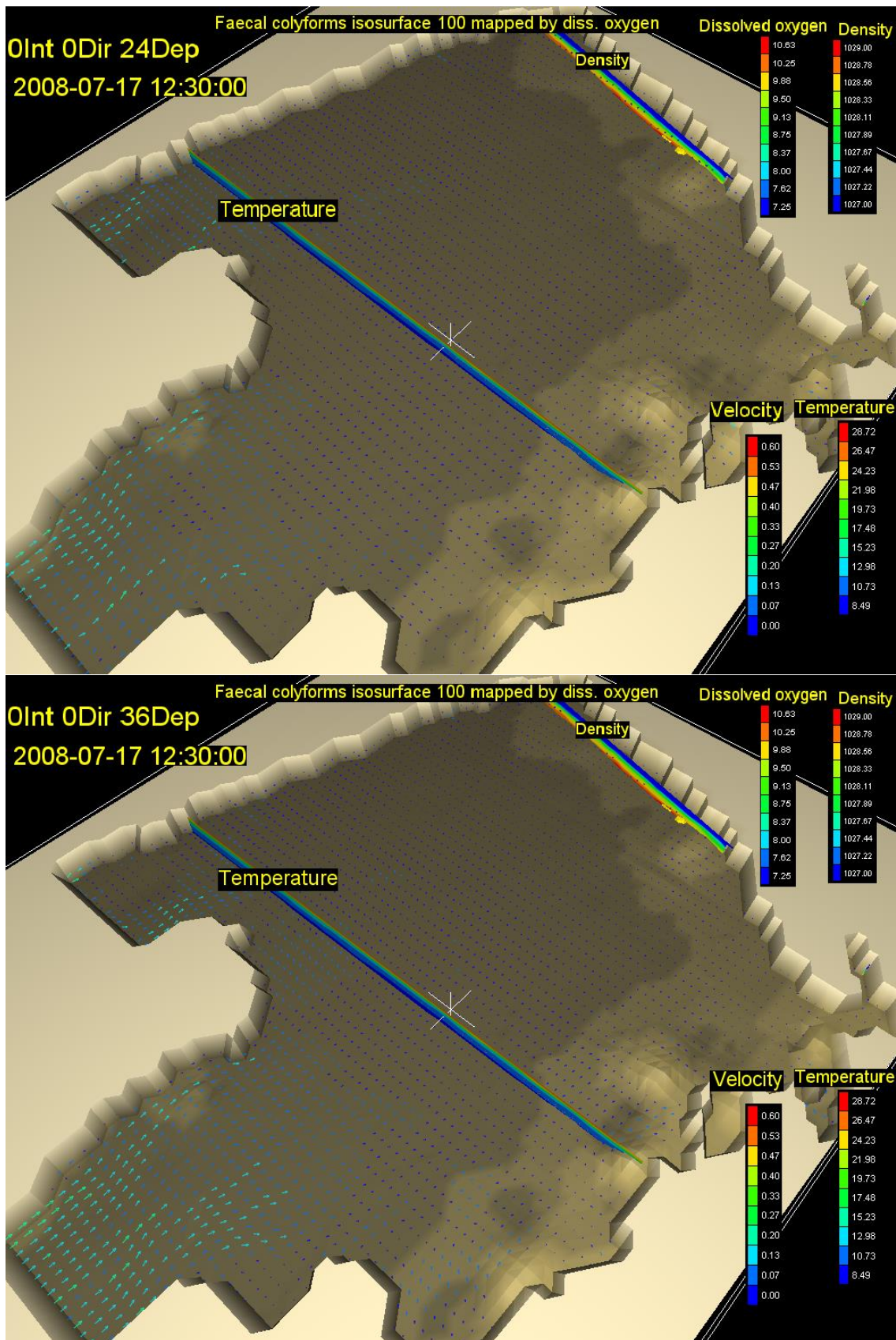
Slika 36. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 24. (gore) i 27. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



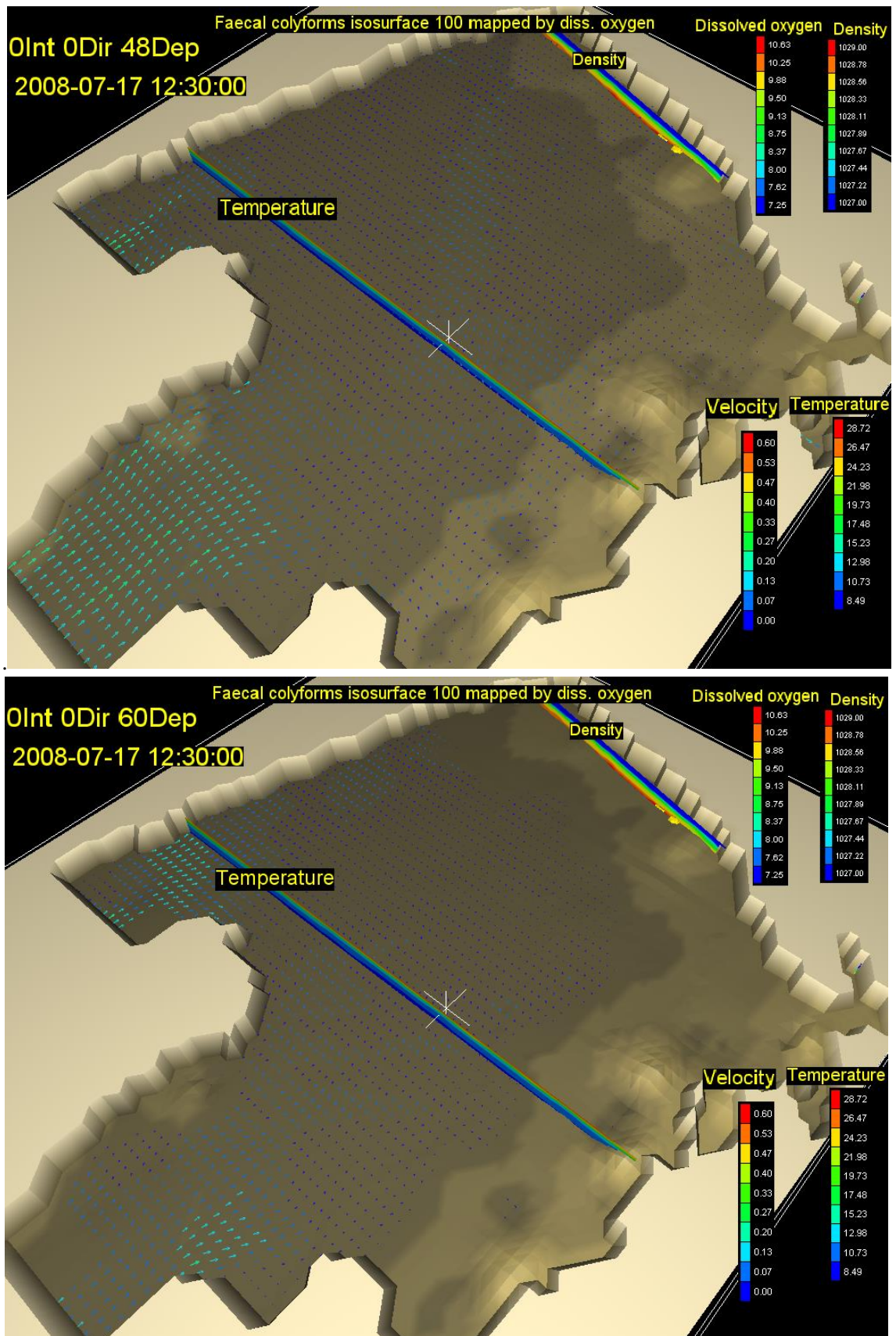
Slika 37. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 30. (gore) i 33. st (dolje) za vjetar intenziteta 0 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



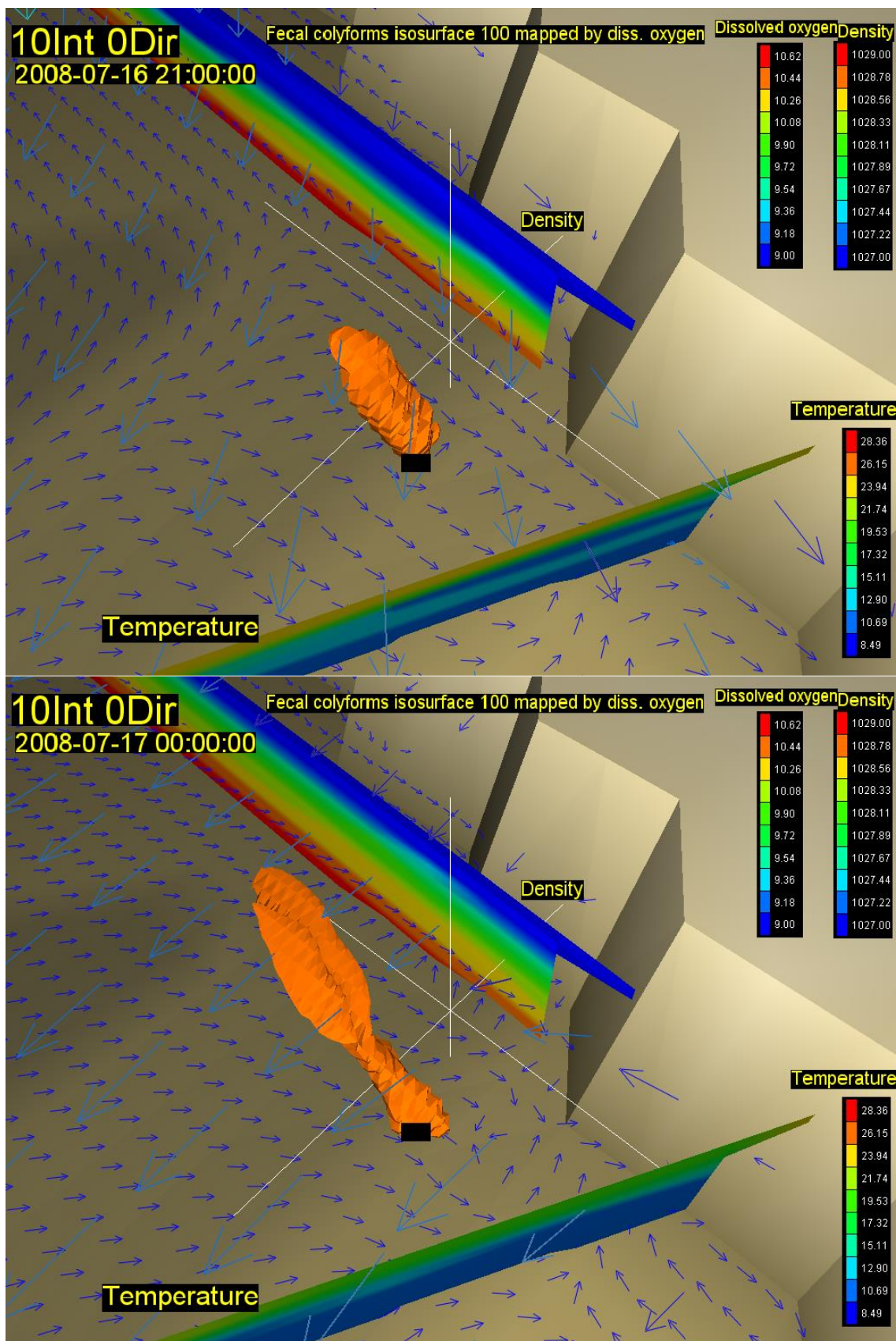
Slika 38. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $0 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera  $0$  stupnjeva



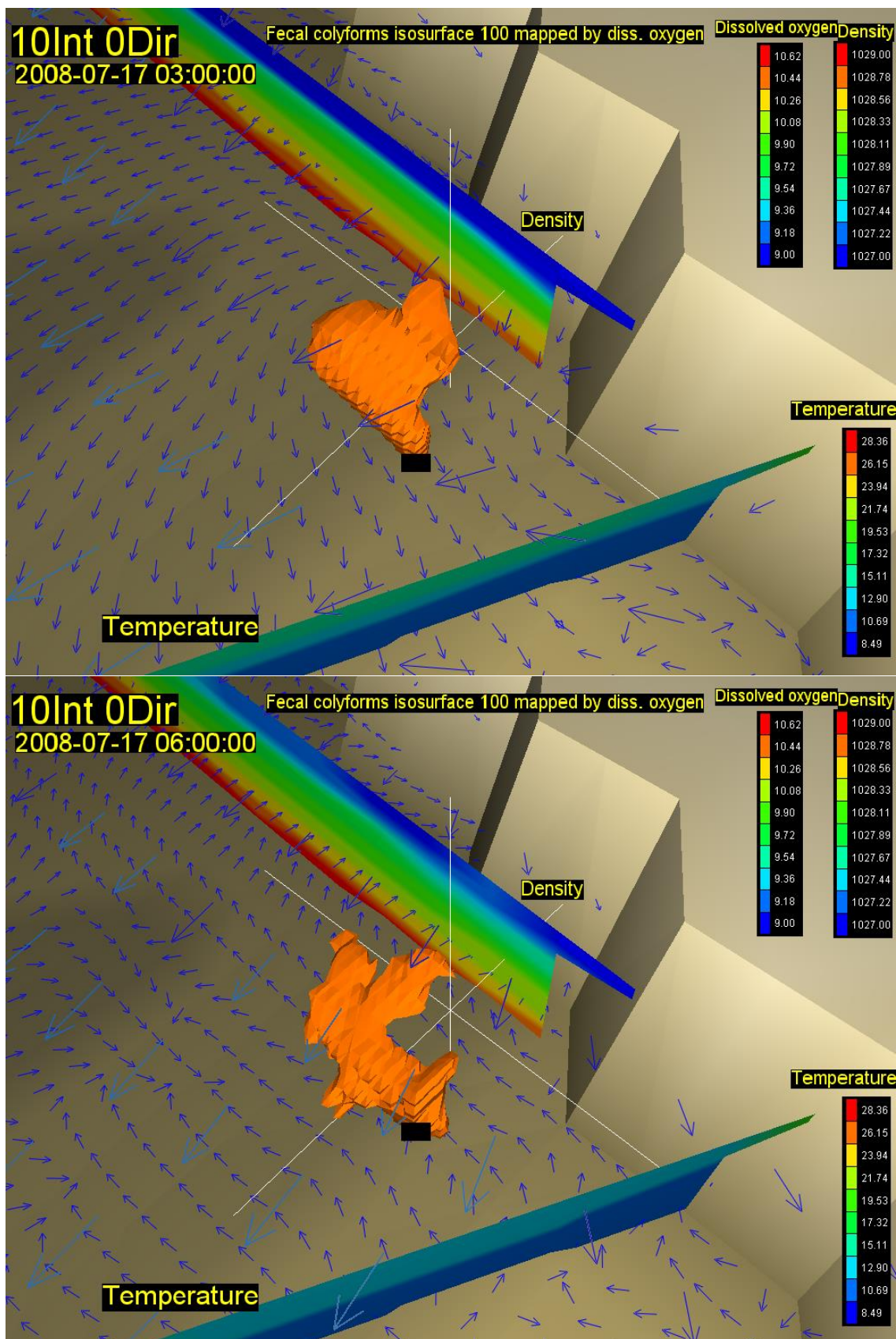
Slika 39. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 12m (dolje) s vertikalnim profilom  
 gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5.  
 st za vjetar intenziteta  $0 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera  $0$  stupnjeva



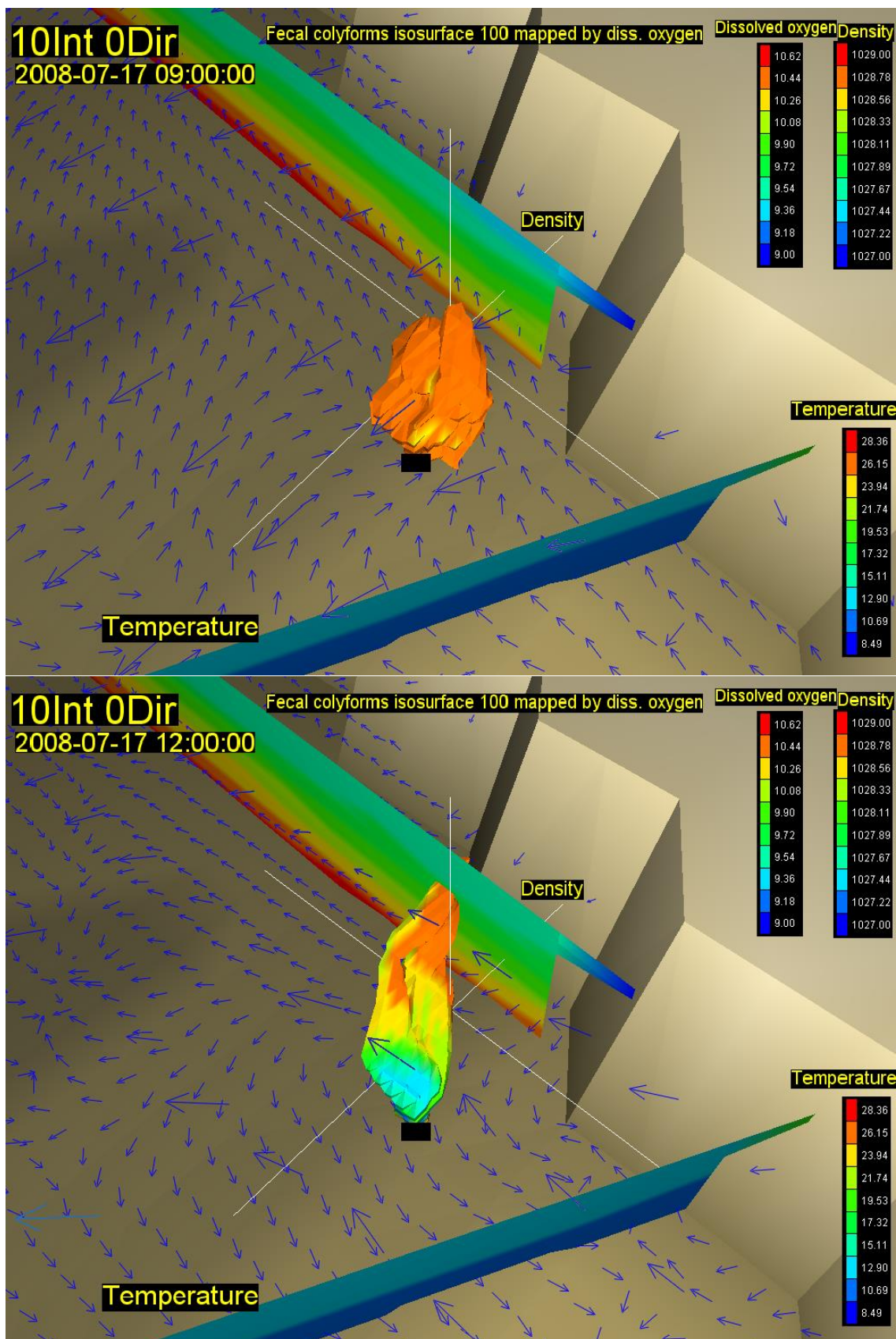
Slika 40. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $0 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 0 stupnjeva



Slika 41. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 0 stupnjeva

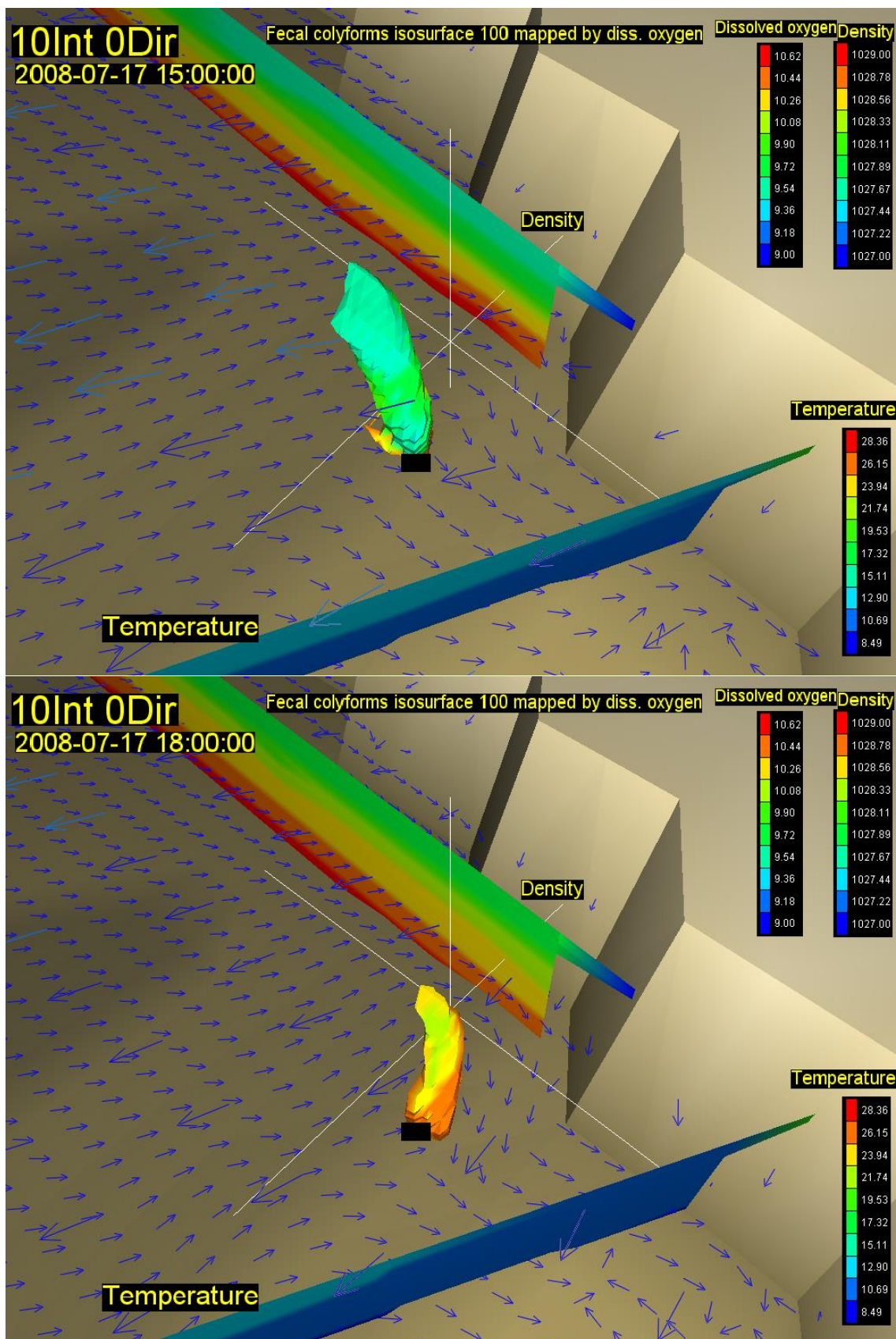


Slika 42. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva

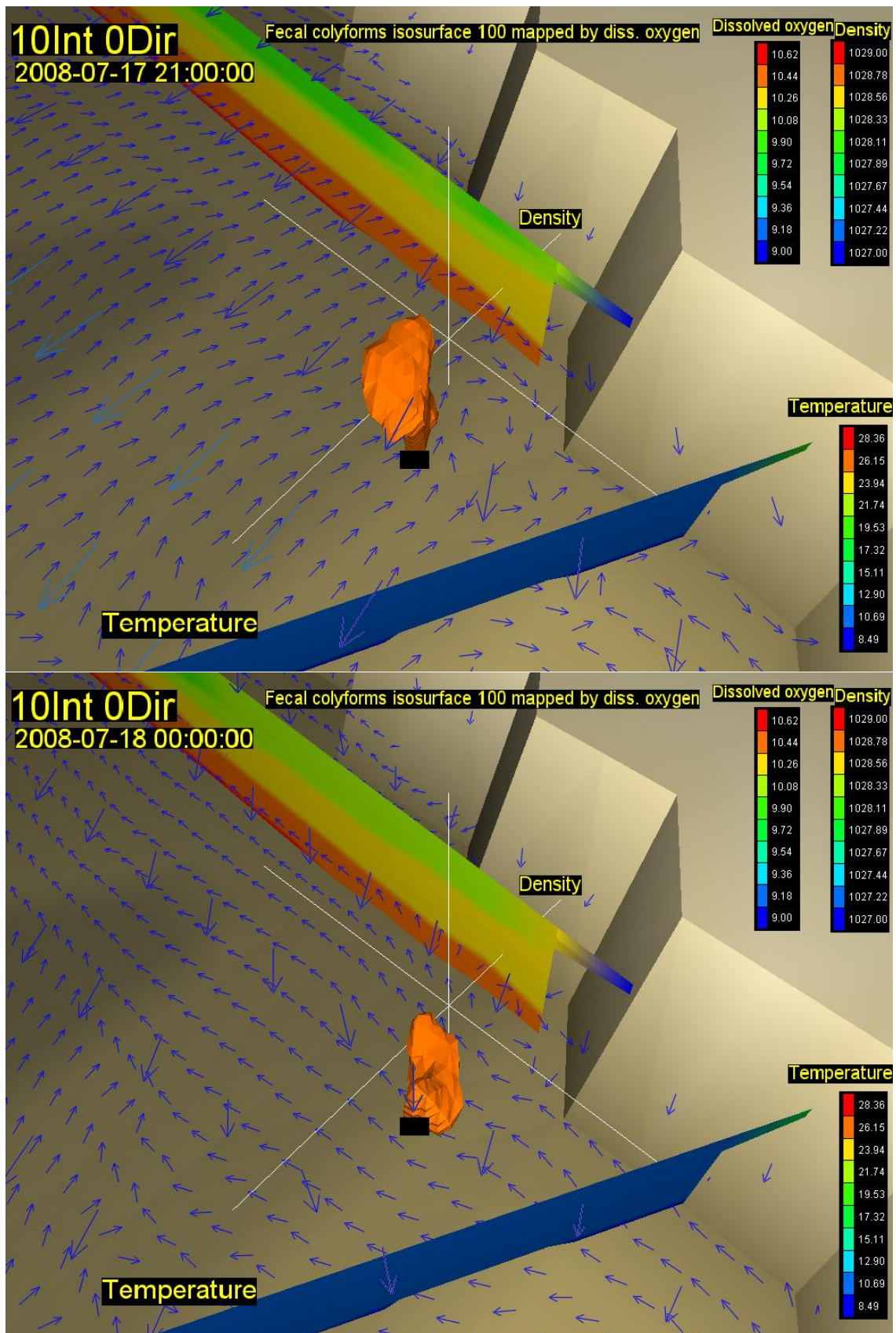


Slika 43. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva

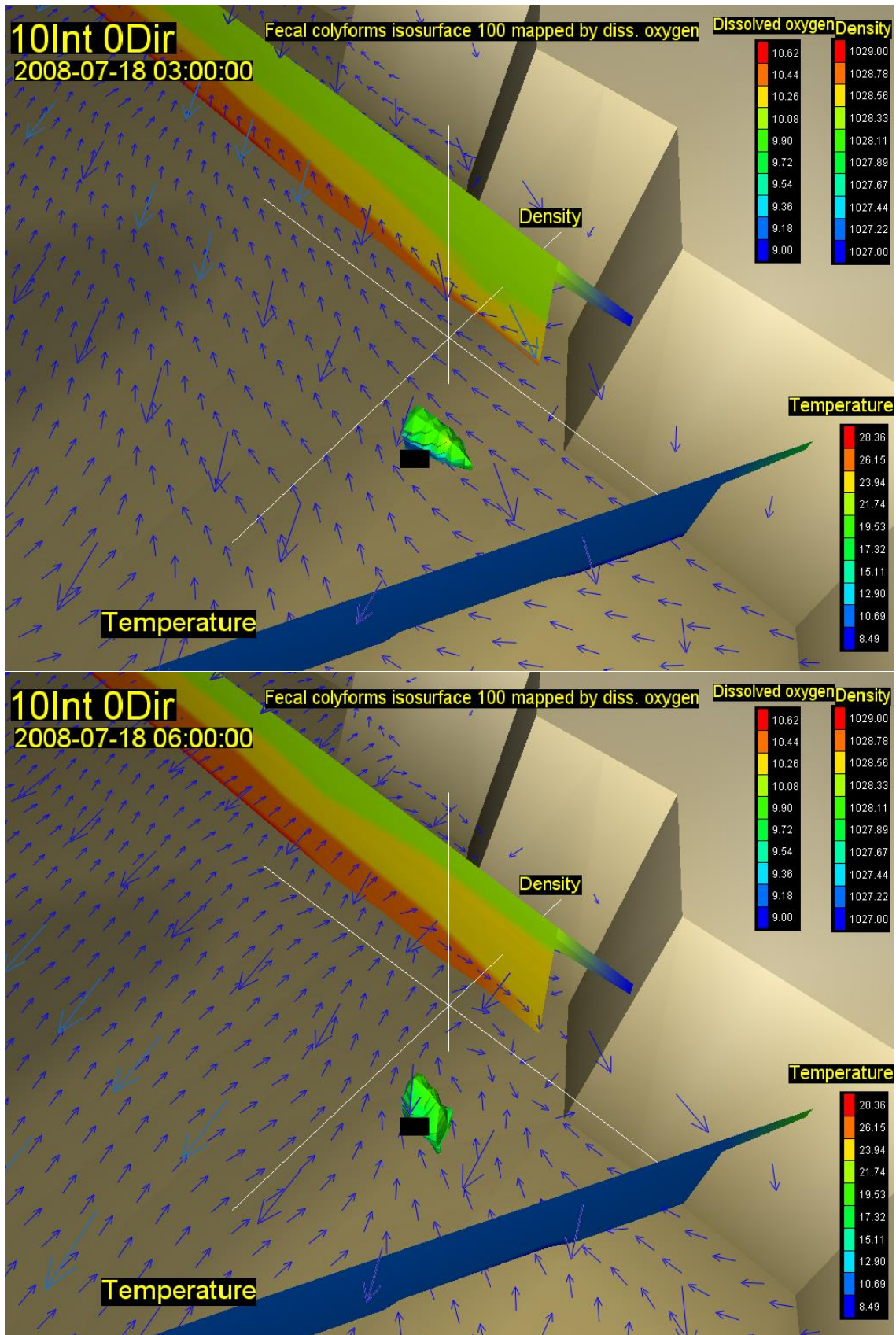




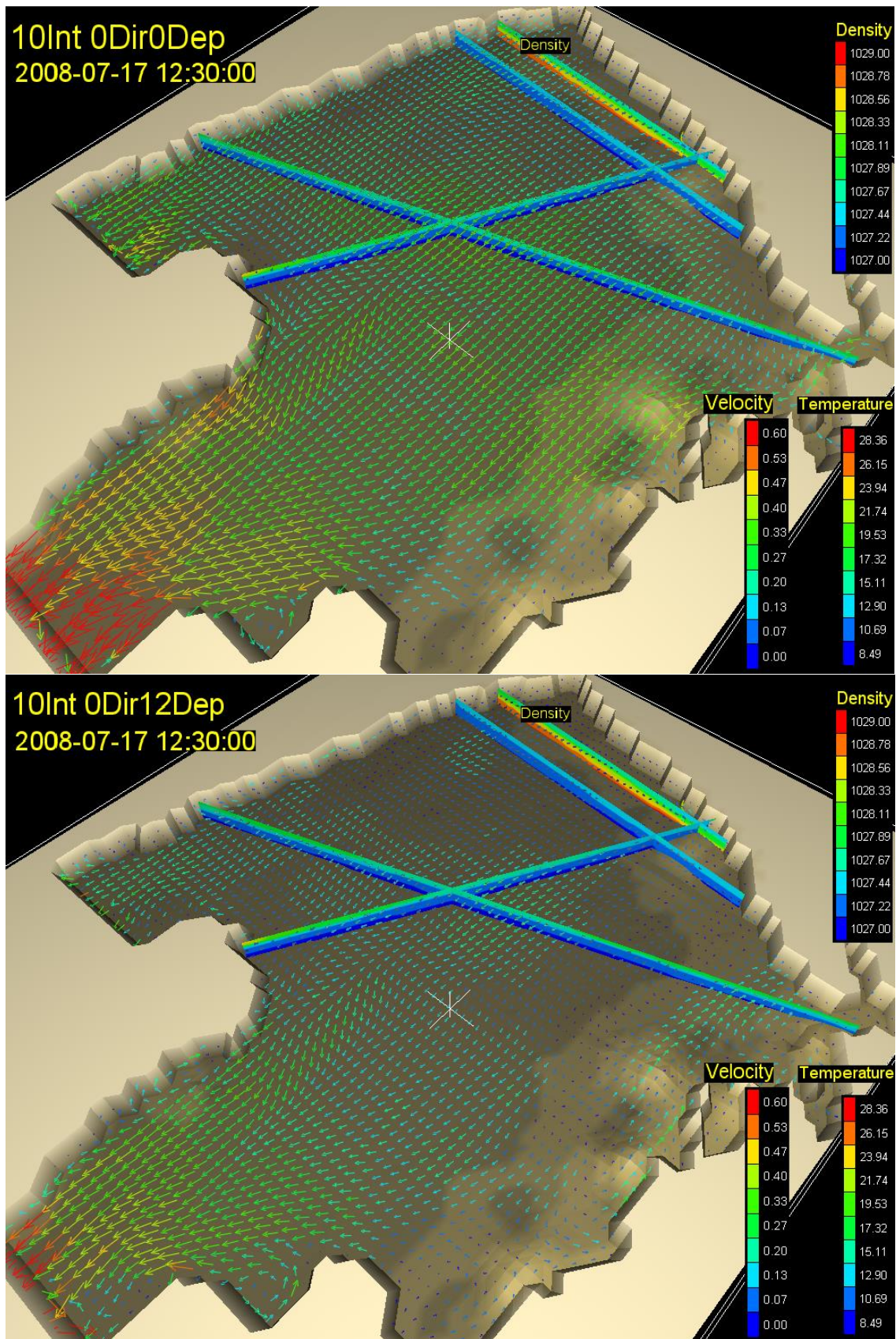
Slika 44. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



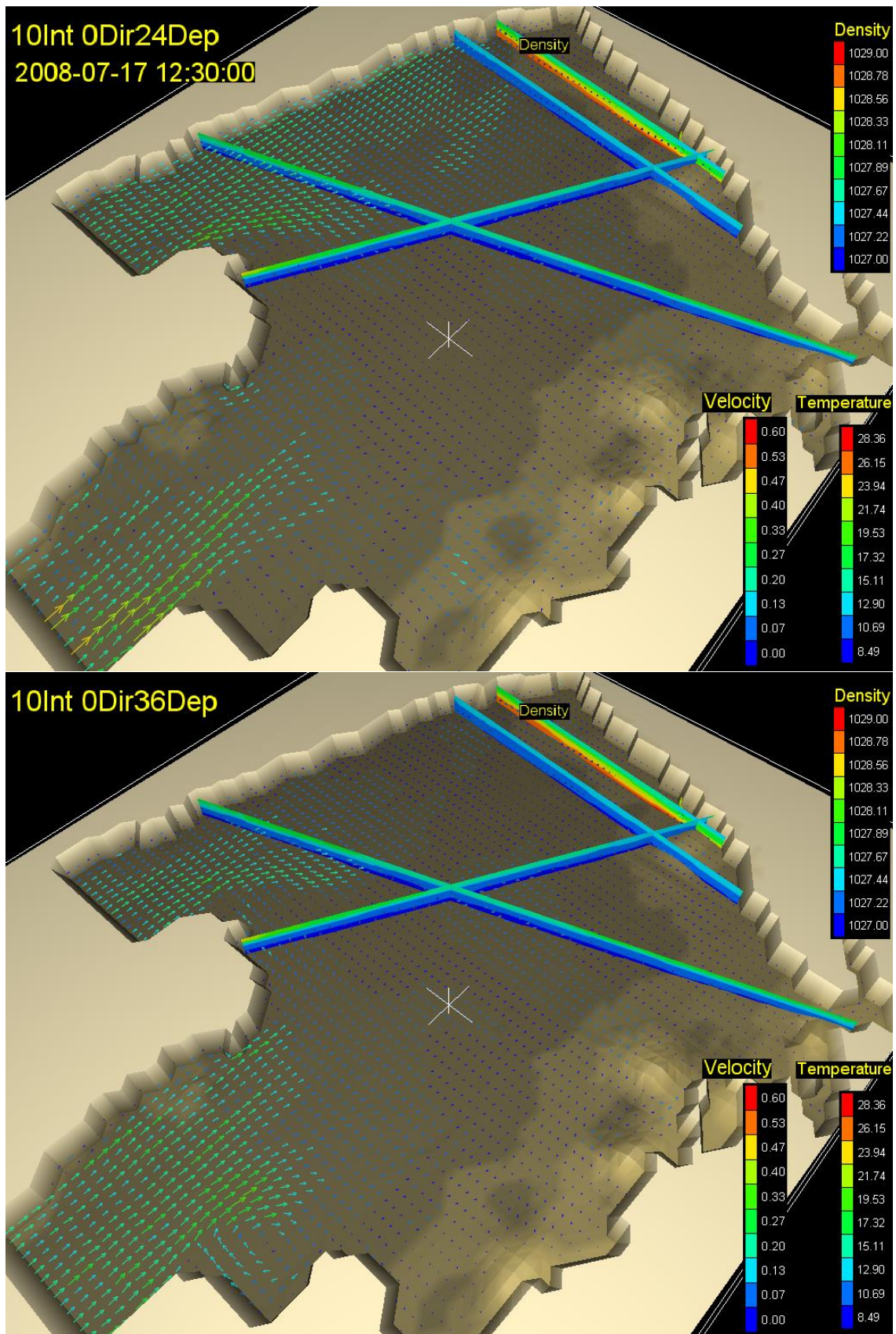
Slika 45. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



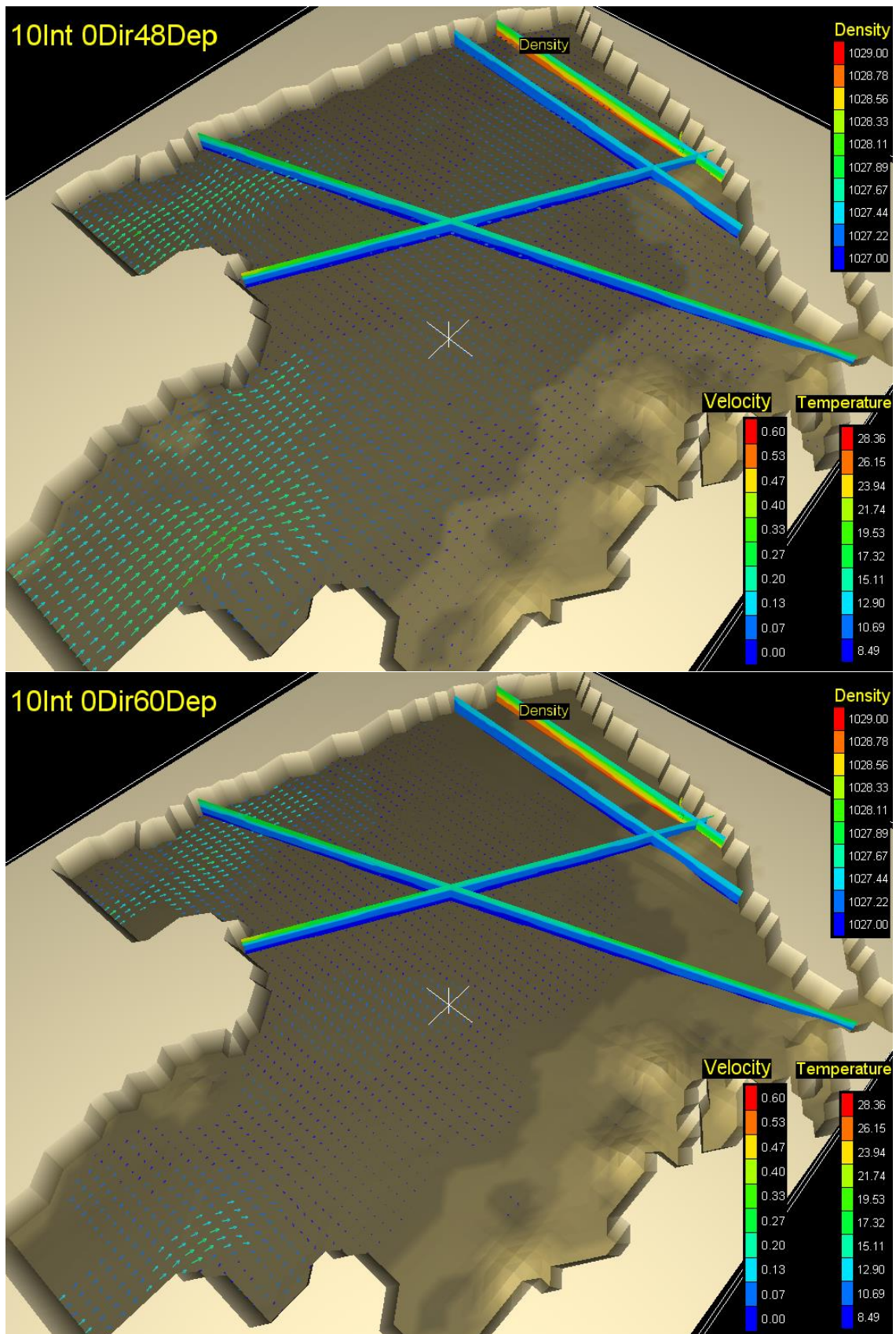
Slika 46. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



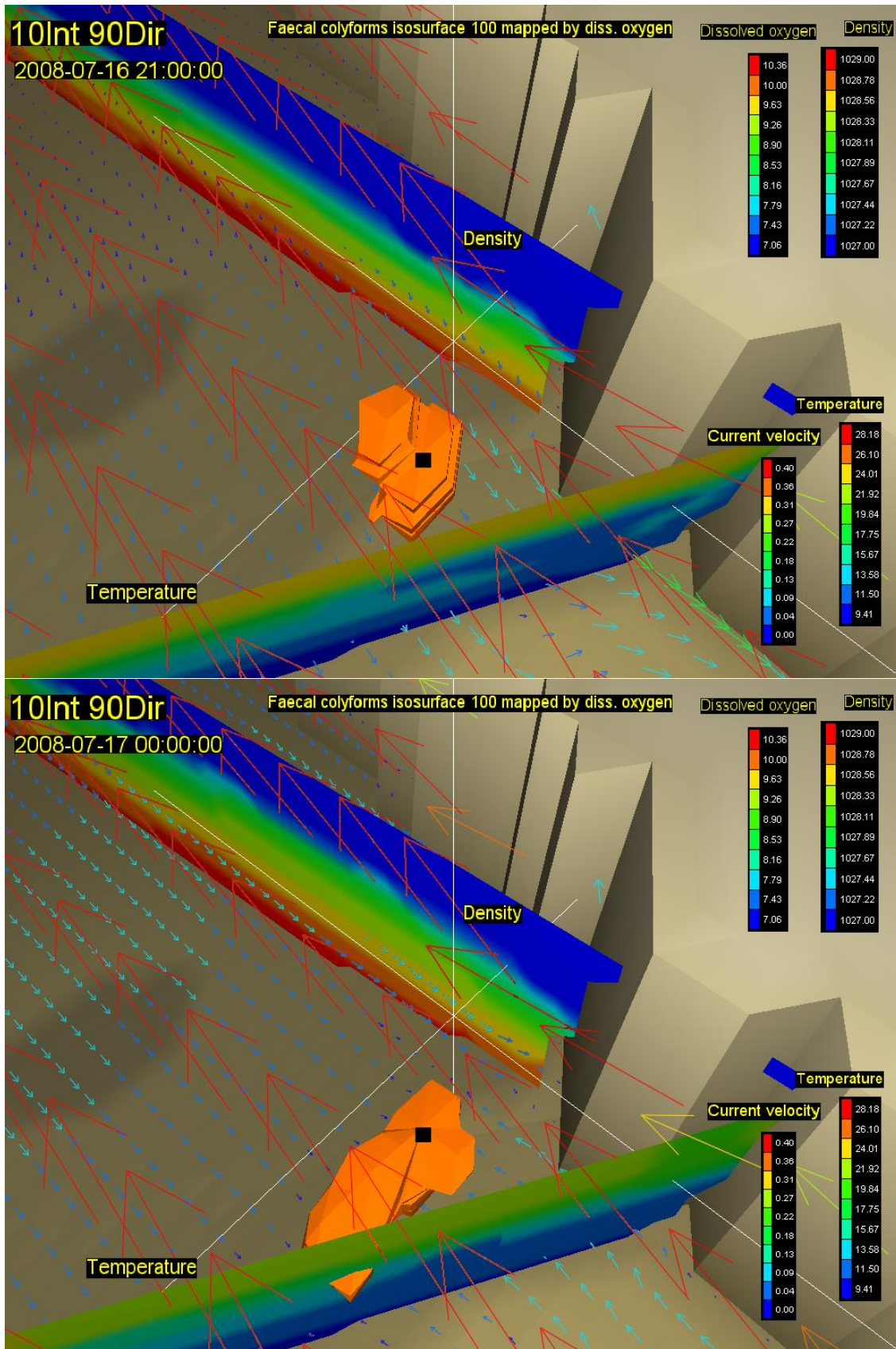
Slika 47. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 0 stupnjeva



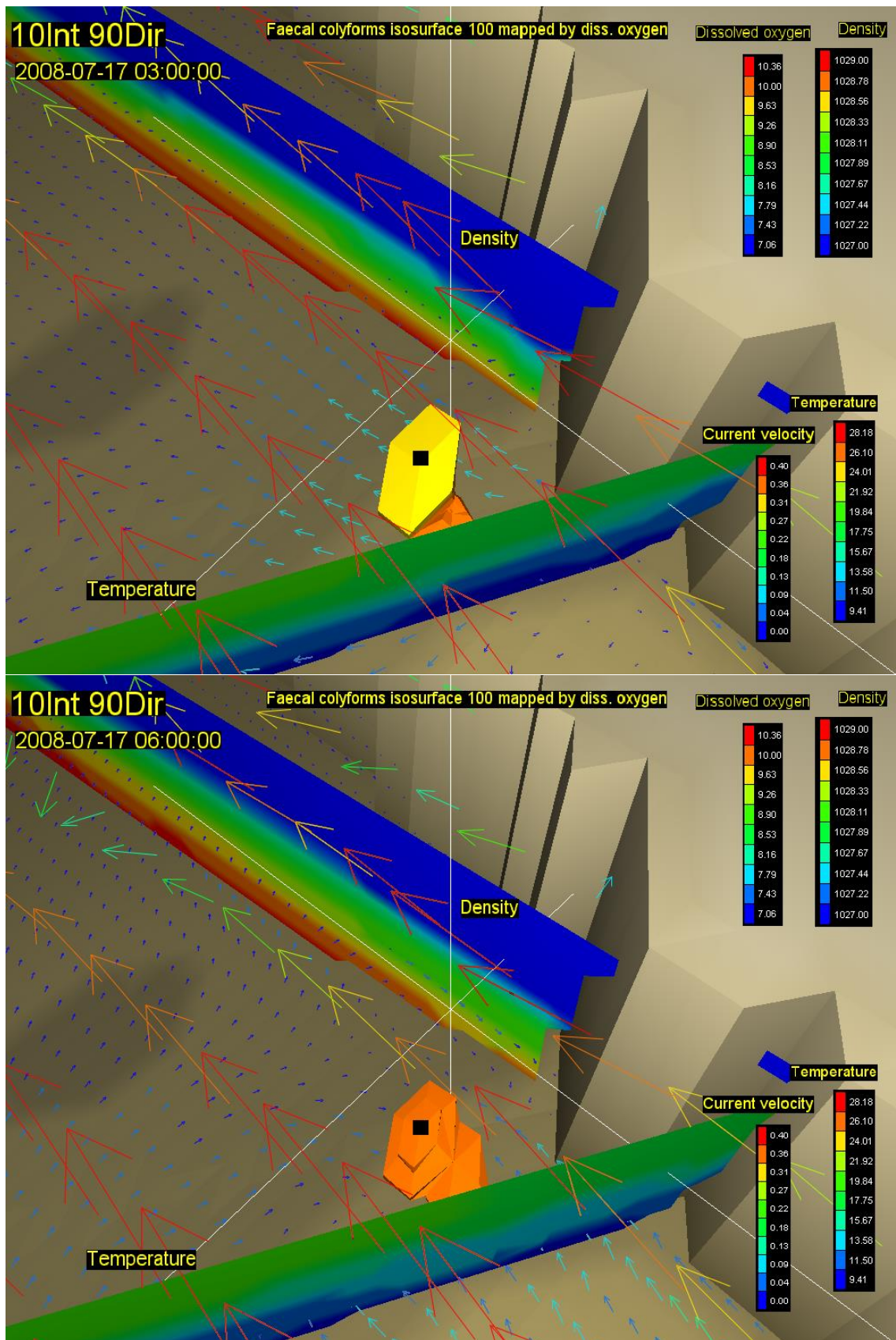
Slika 48. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjeter intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 0 stupnjeva



Slika 49. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 0 stupnjeva

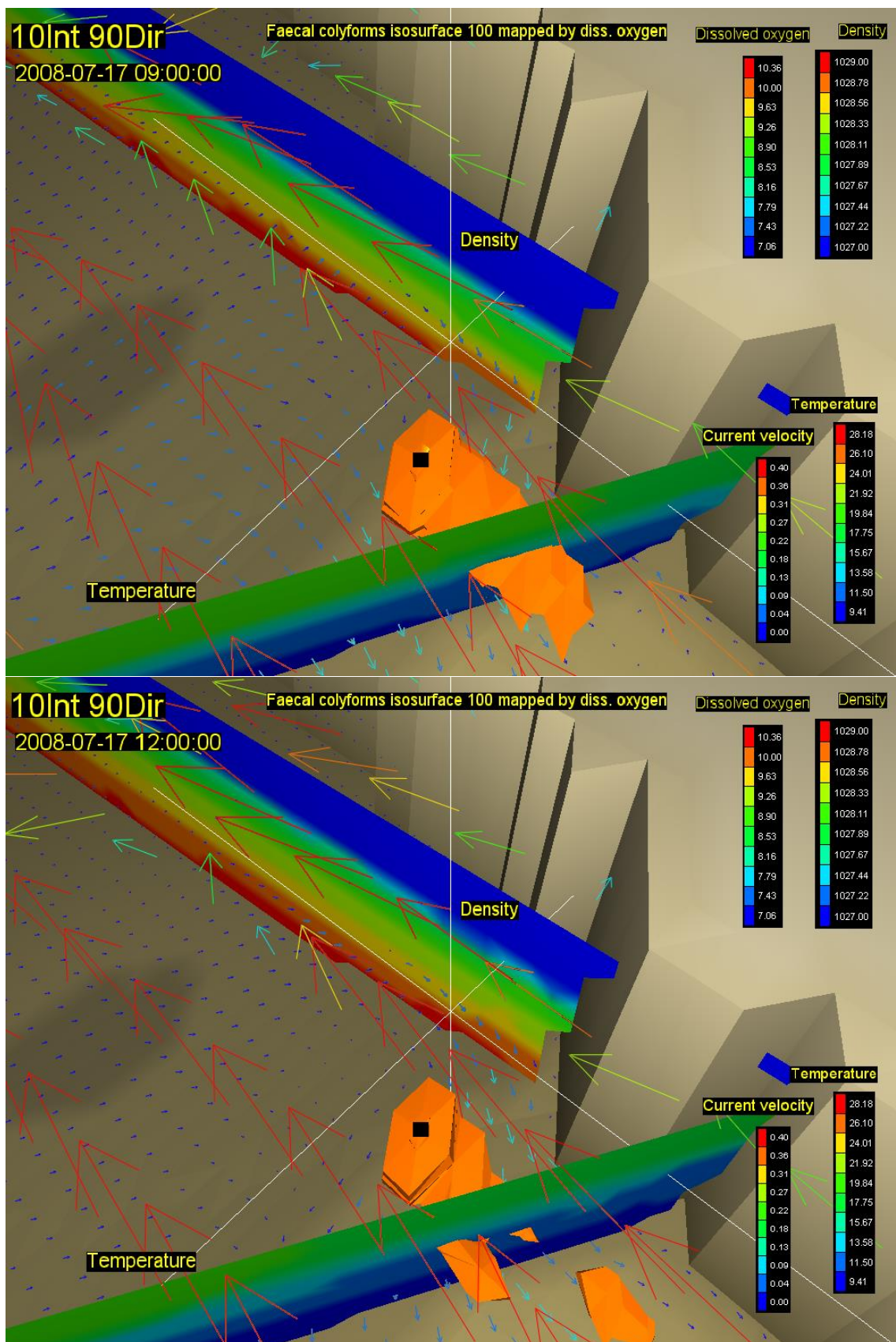


Slika 50. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

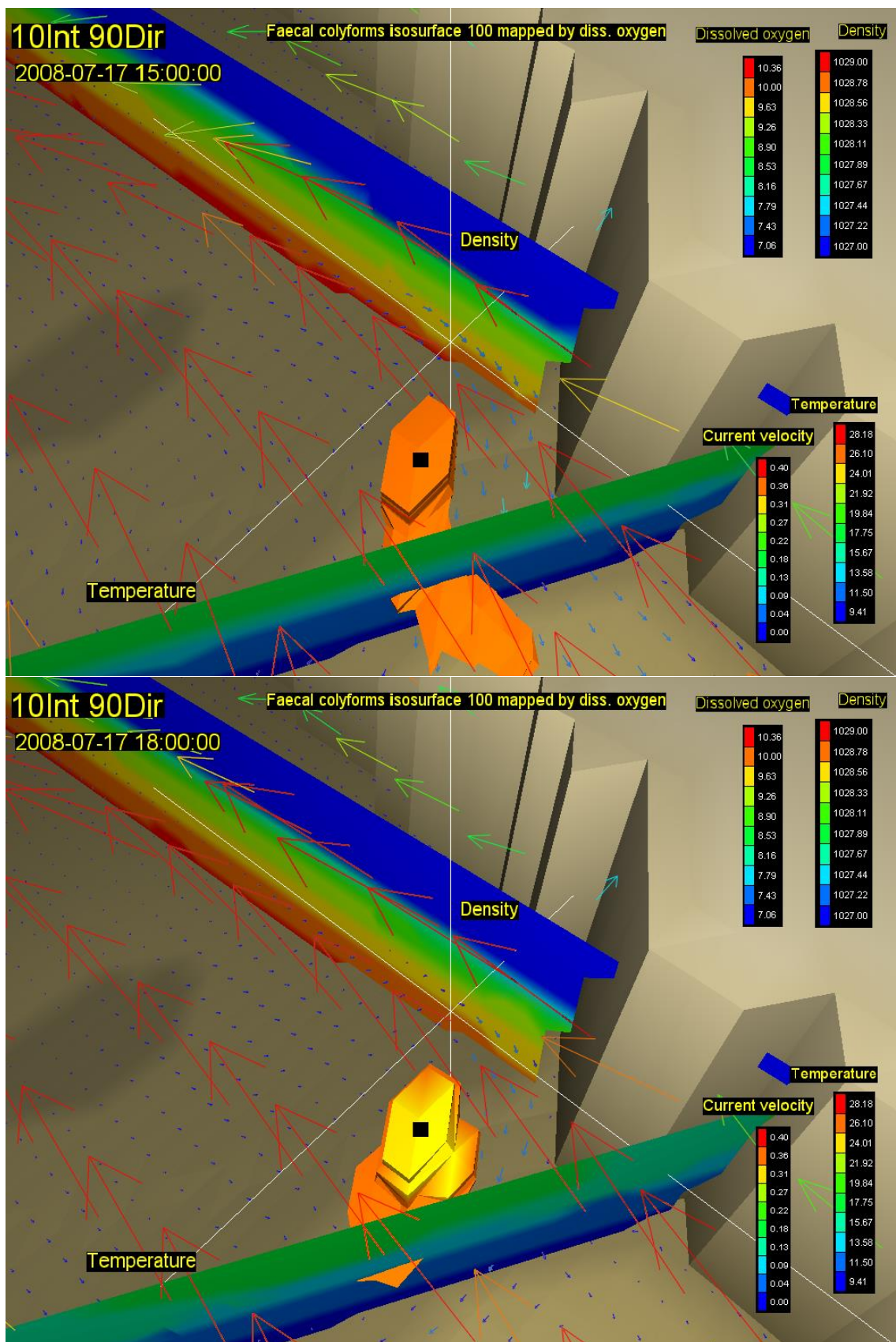


Slika 51. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblak onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

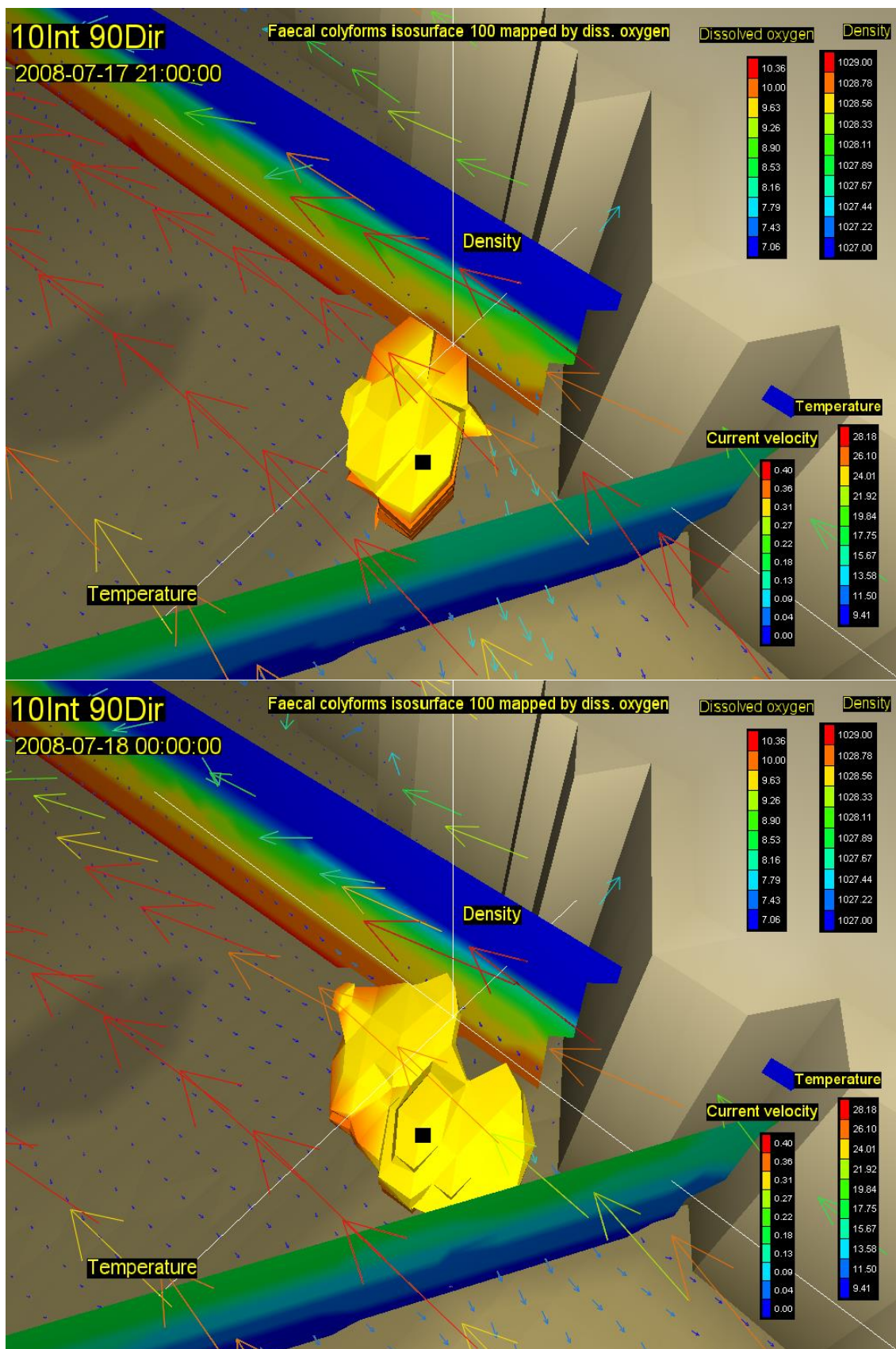




Slika 52. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

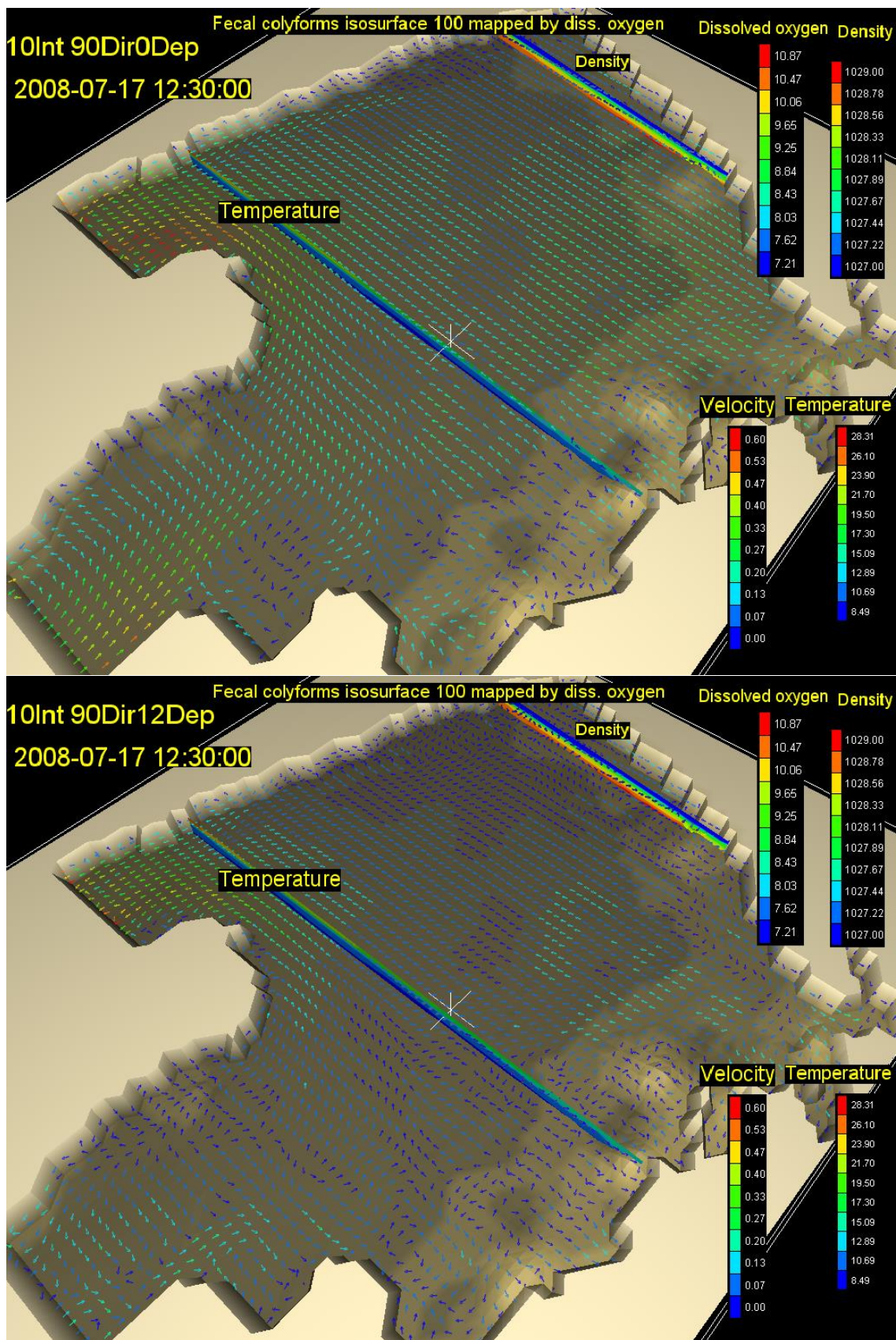


Slika 53. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

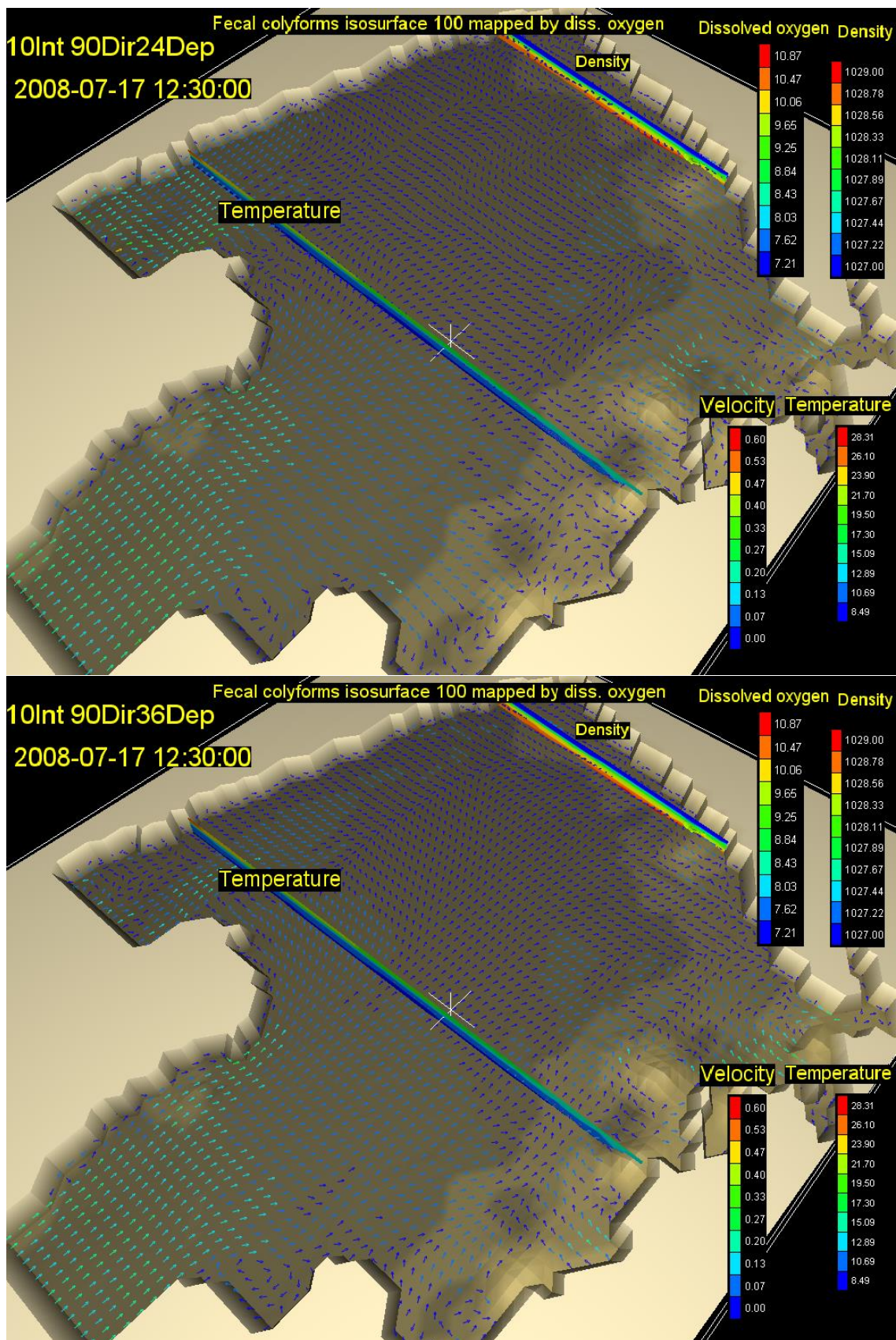


Slika 54. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

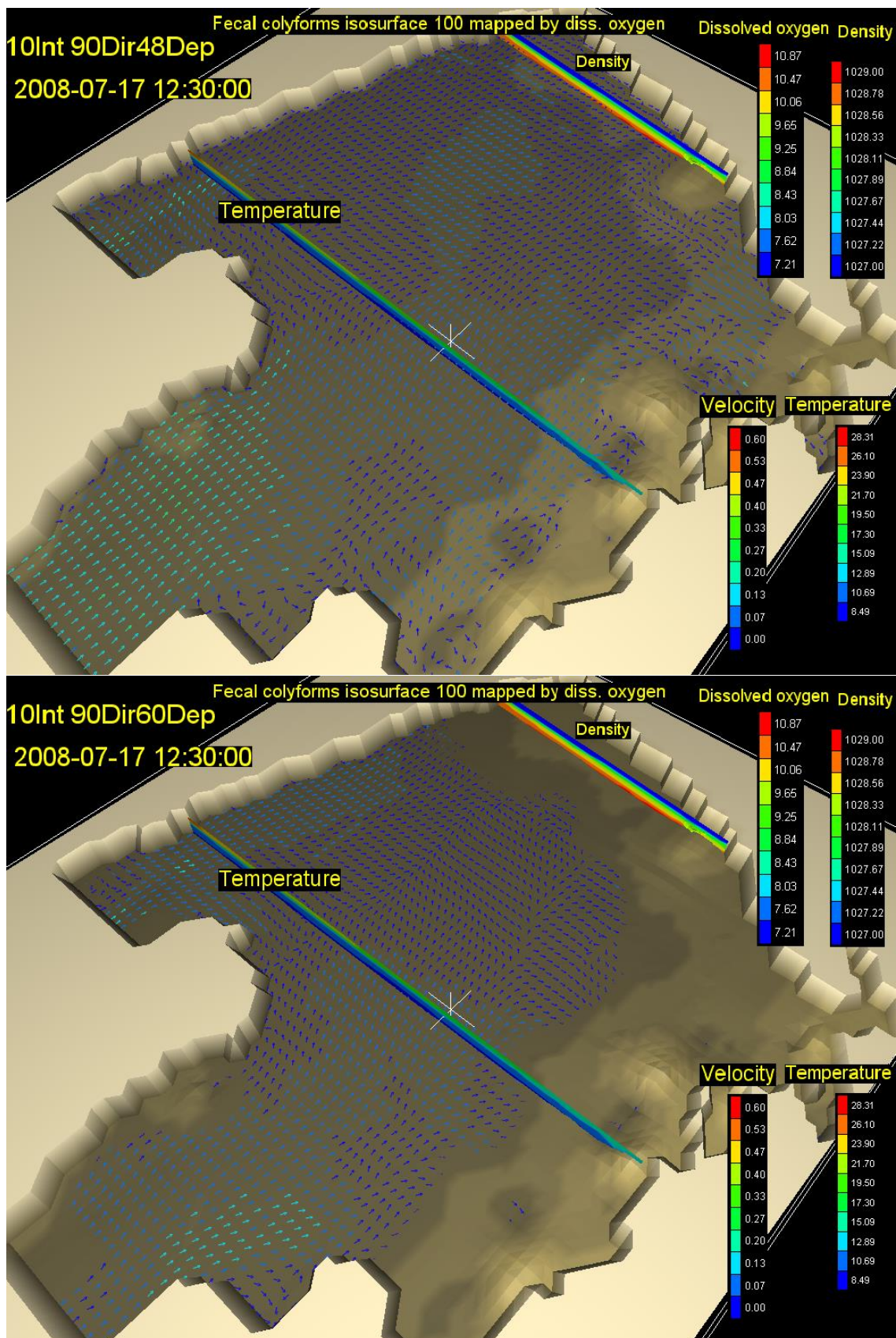




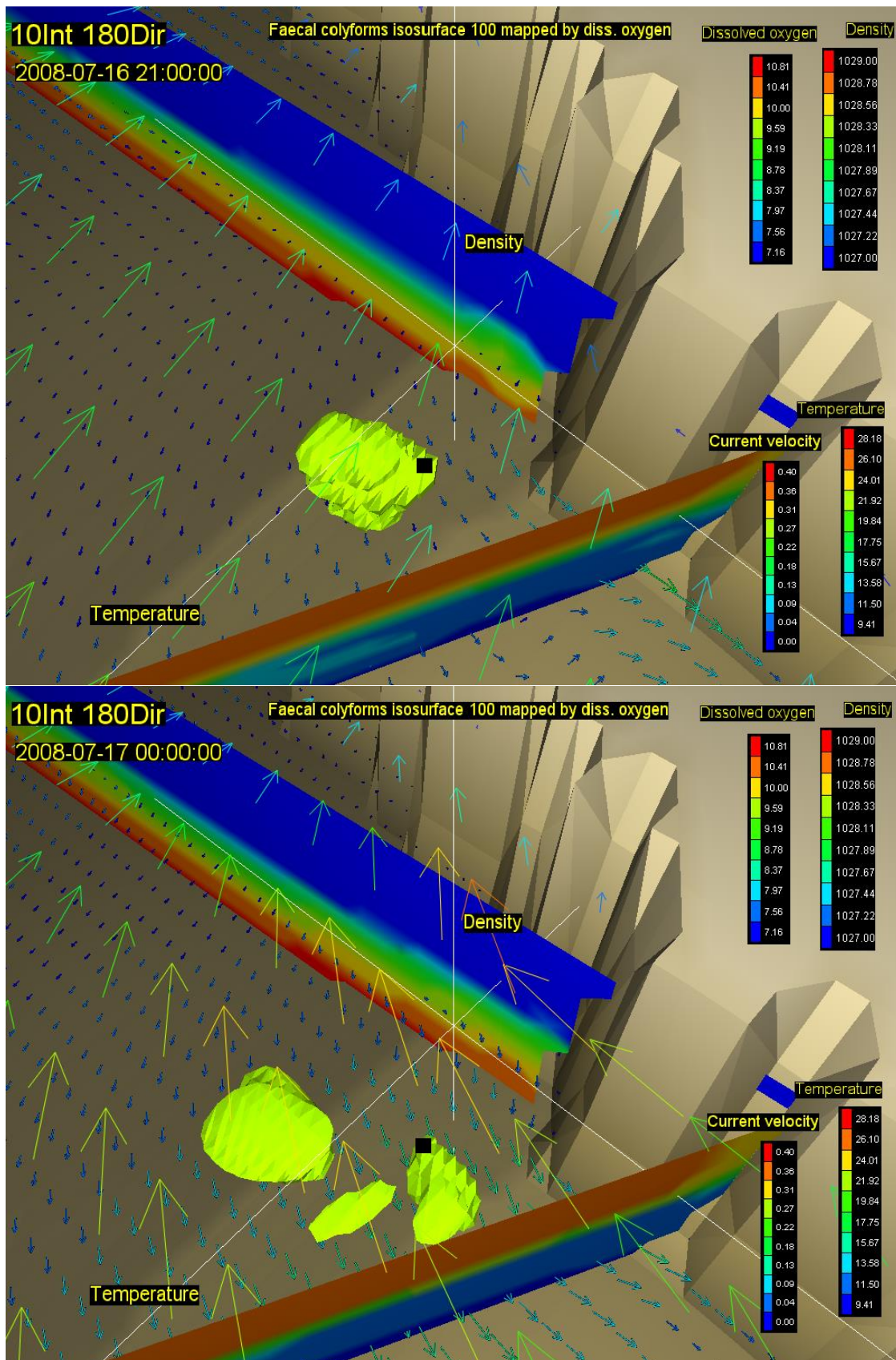
Slika 56. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 90 stupnjeva



Slika 57. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za  $16,5 \text{ s}$  za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

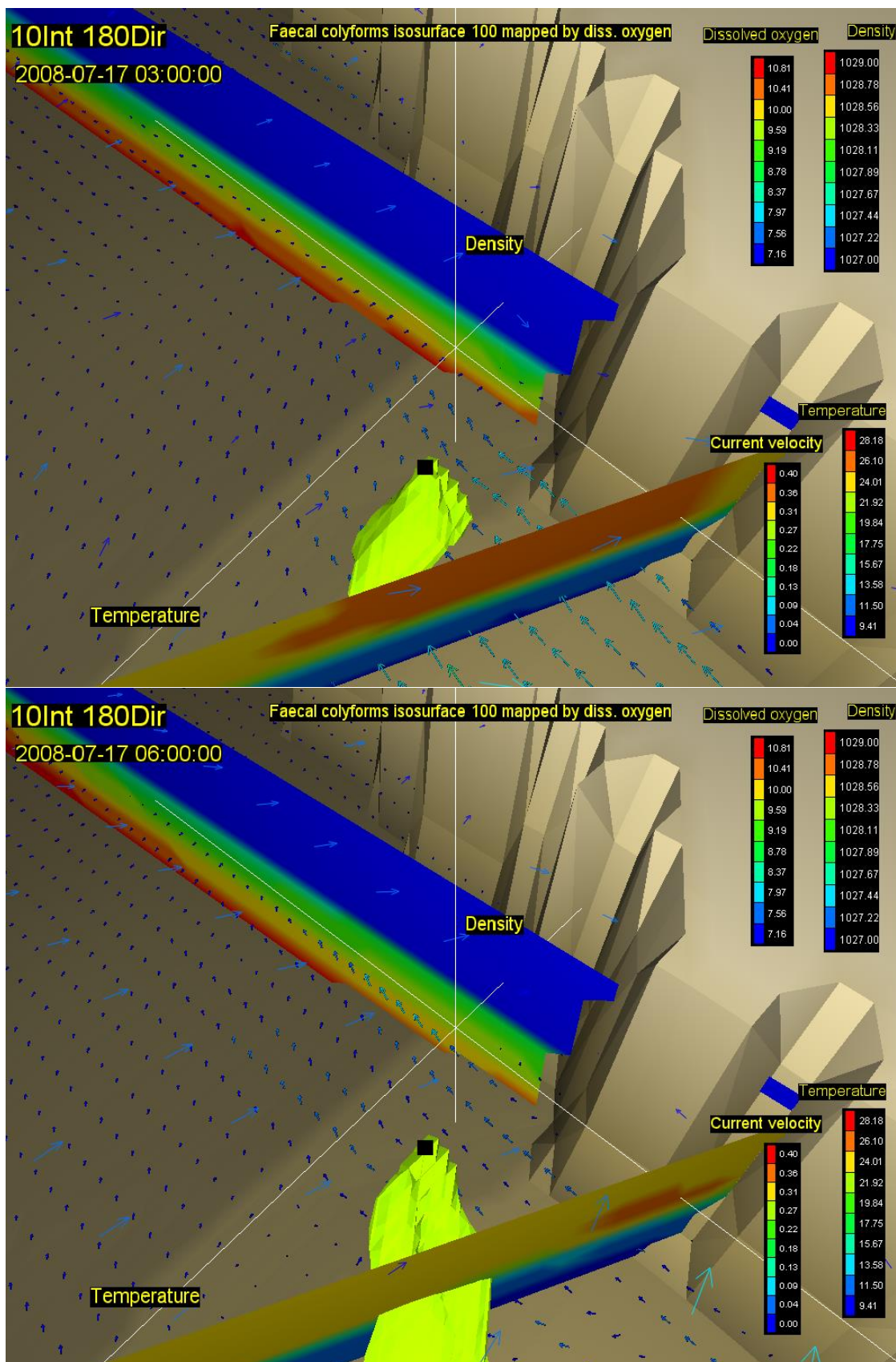


Slika 58. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za  $16,5 \text{ s}$  za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 90 stupnjeva

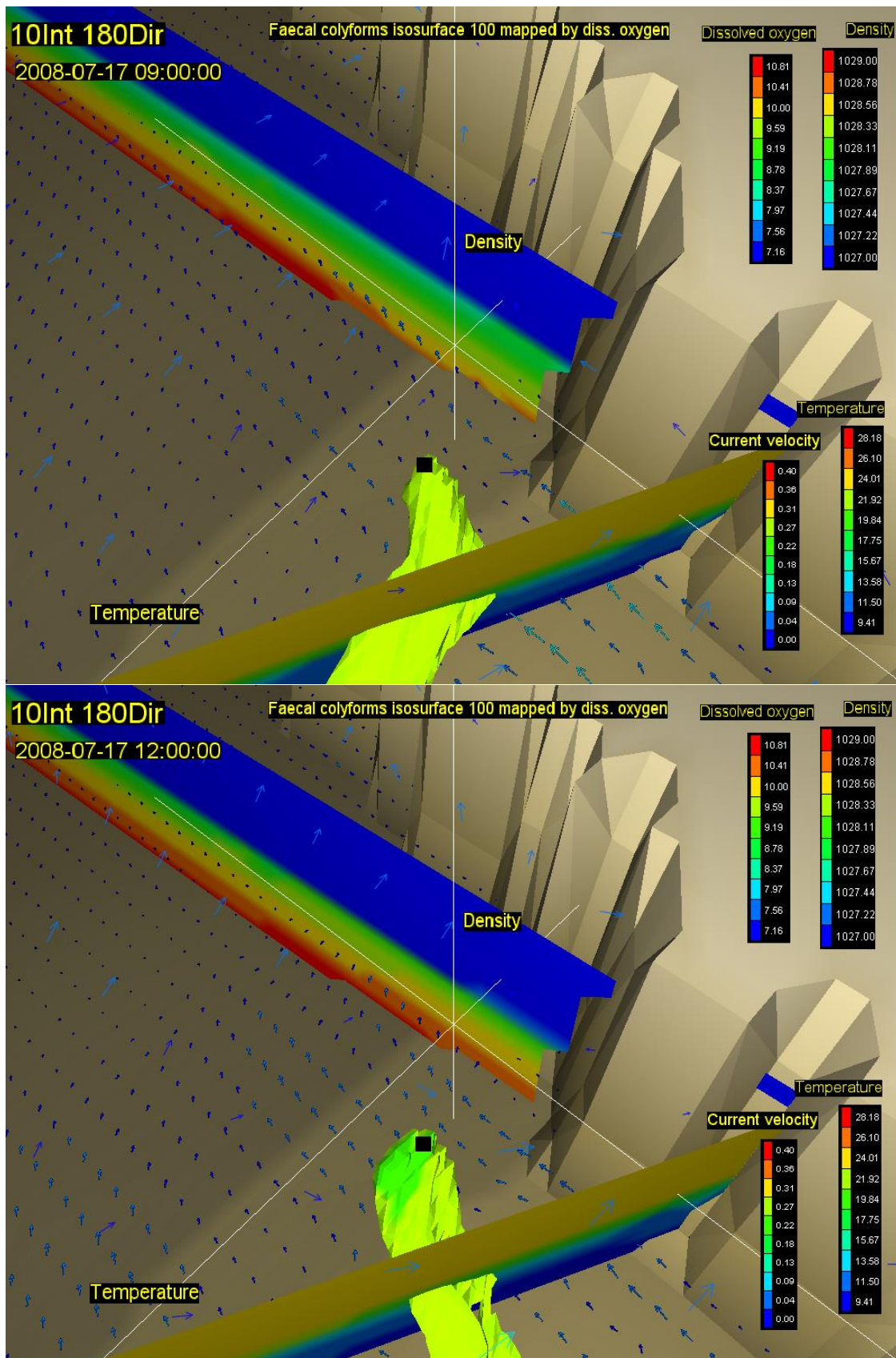


Slika 59. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $FC(100\text{ ml})^{-1}$  za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10\text{ ms}^{-1}$  iz smjera 180 stupnjeva

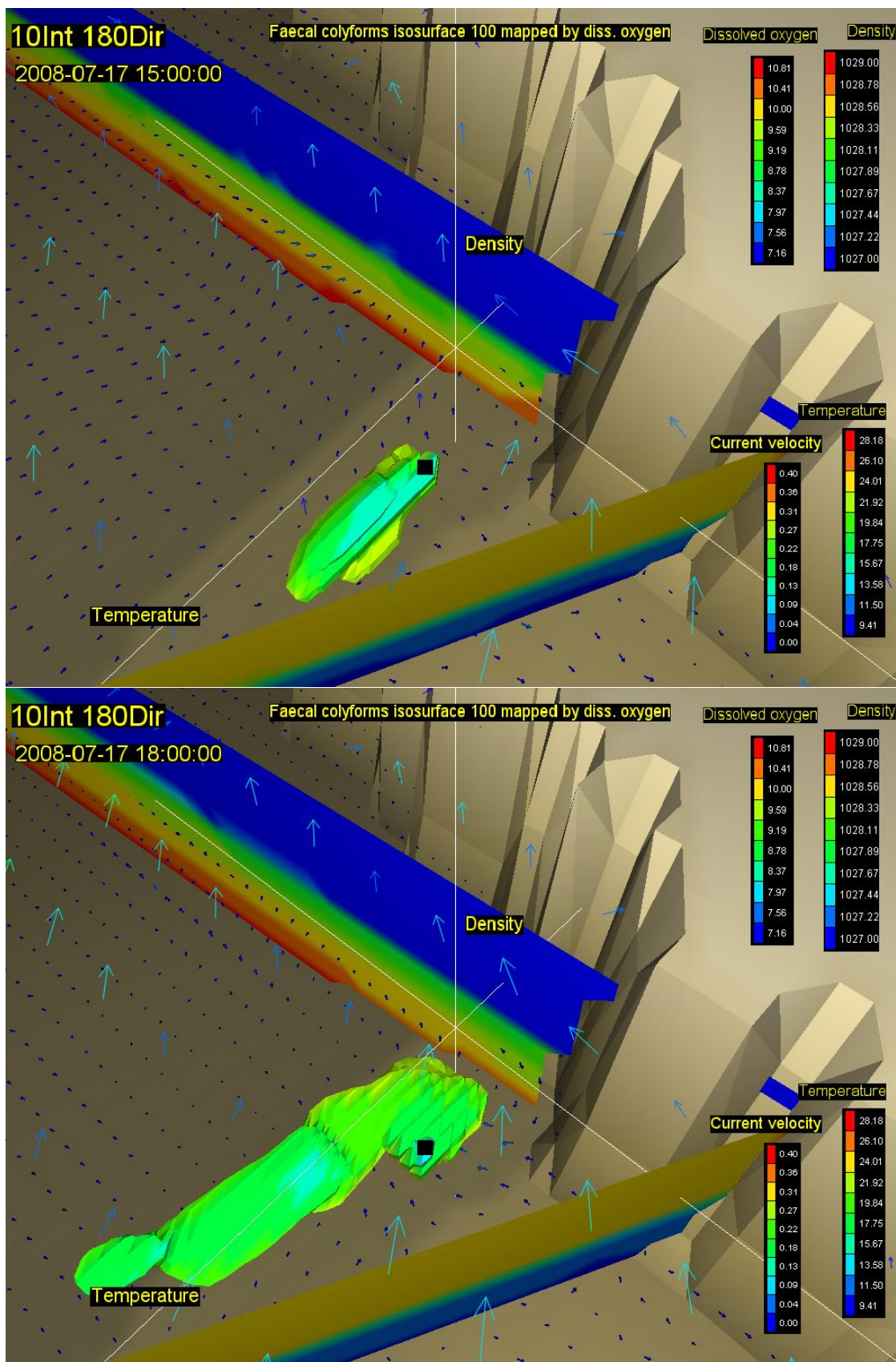




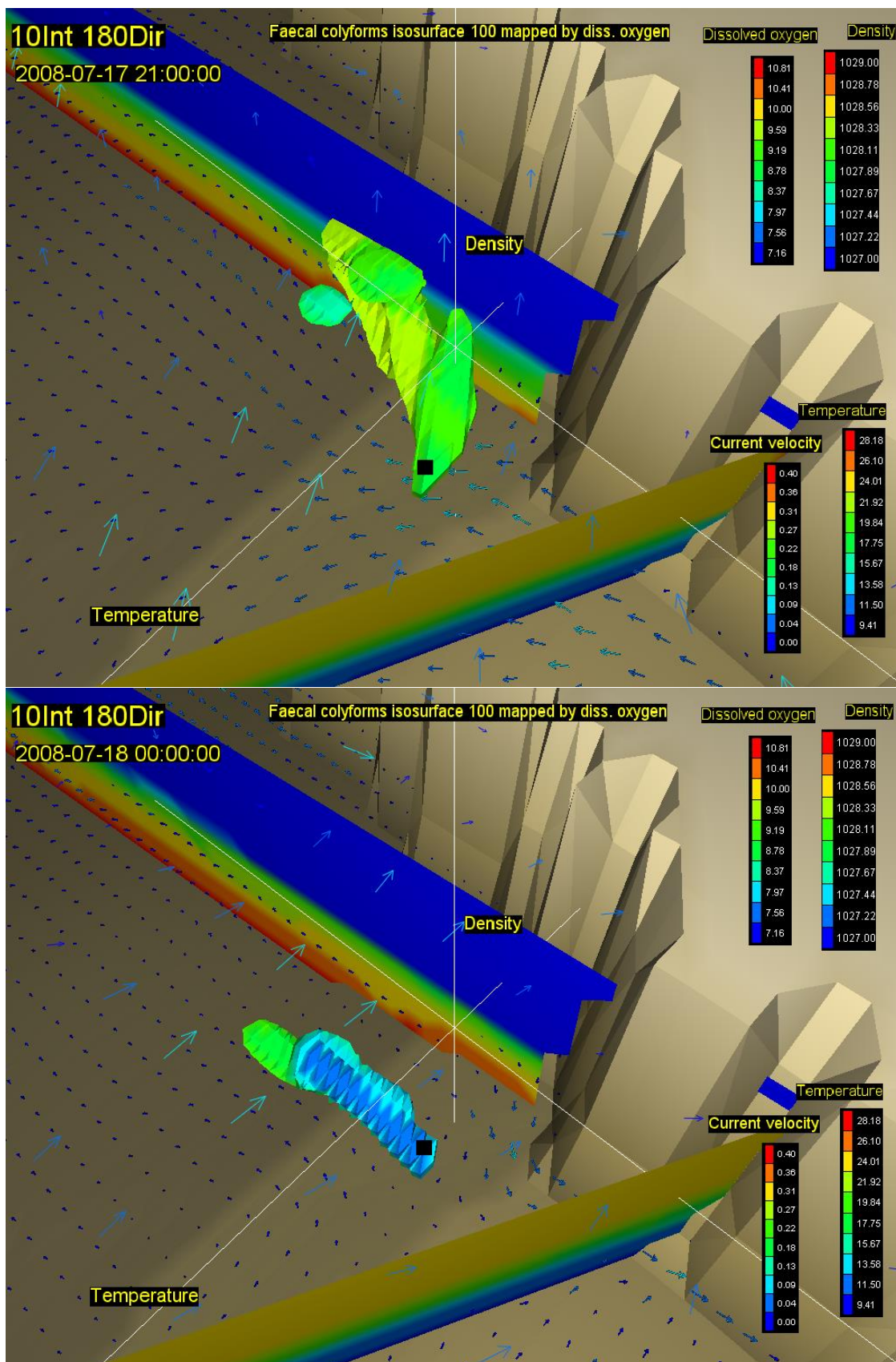
Slika 60. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva



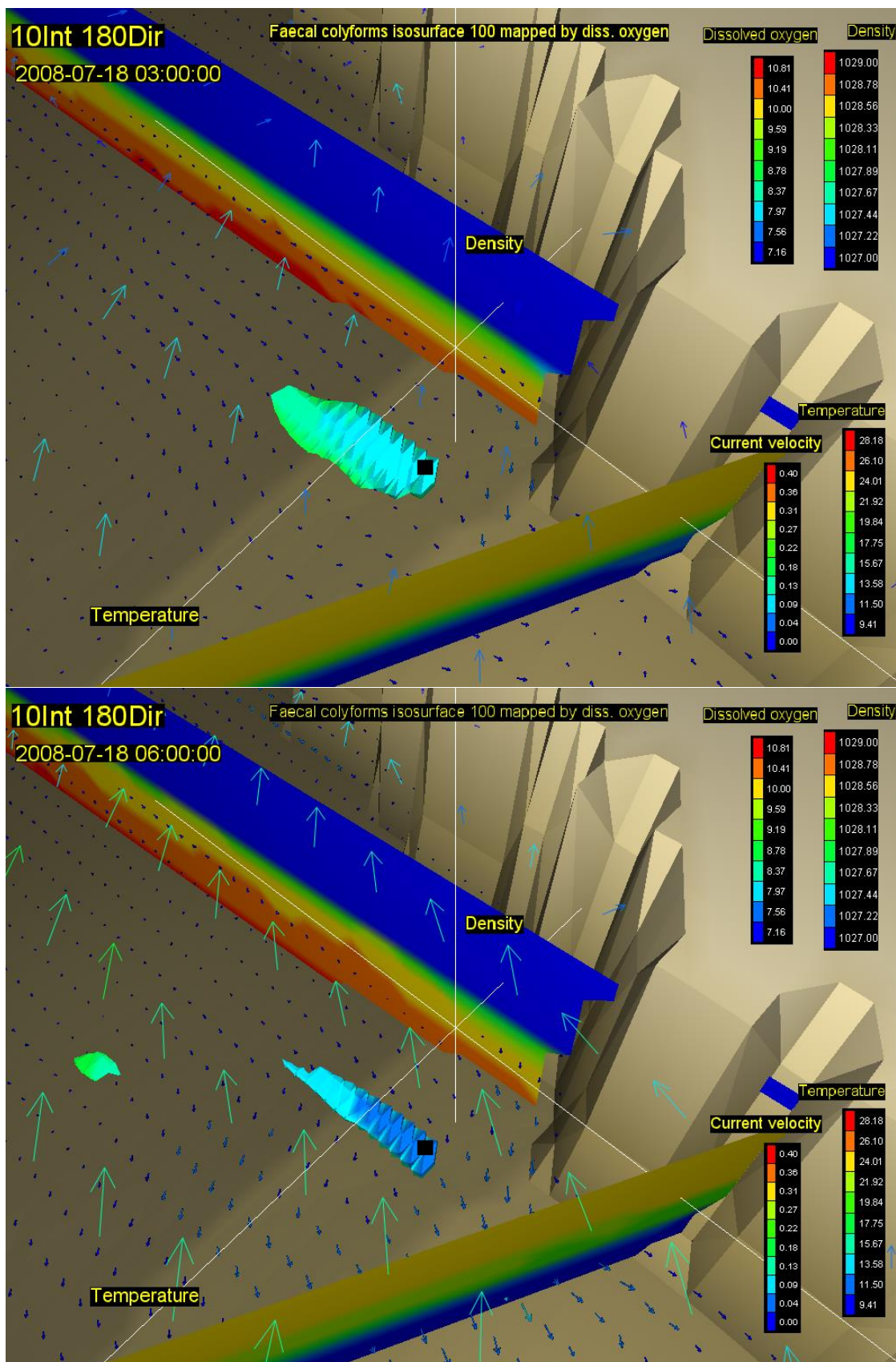
Slika 61. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva



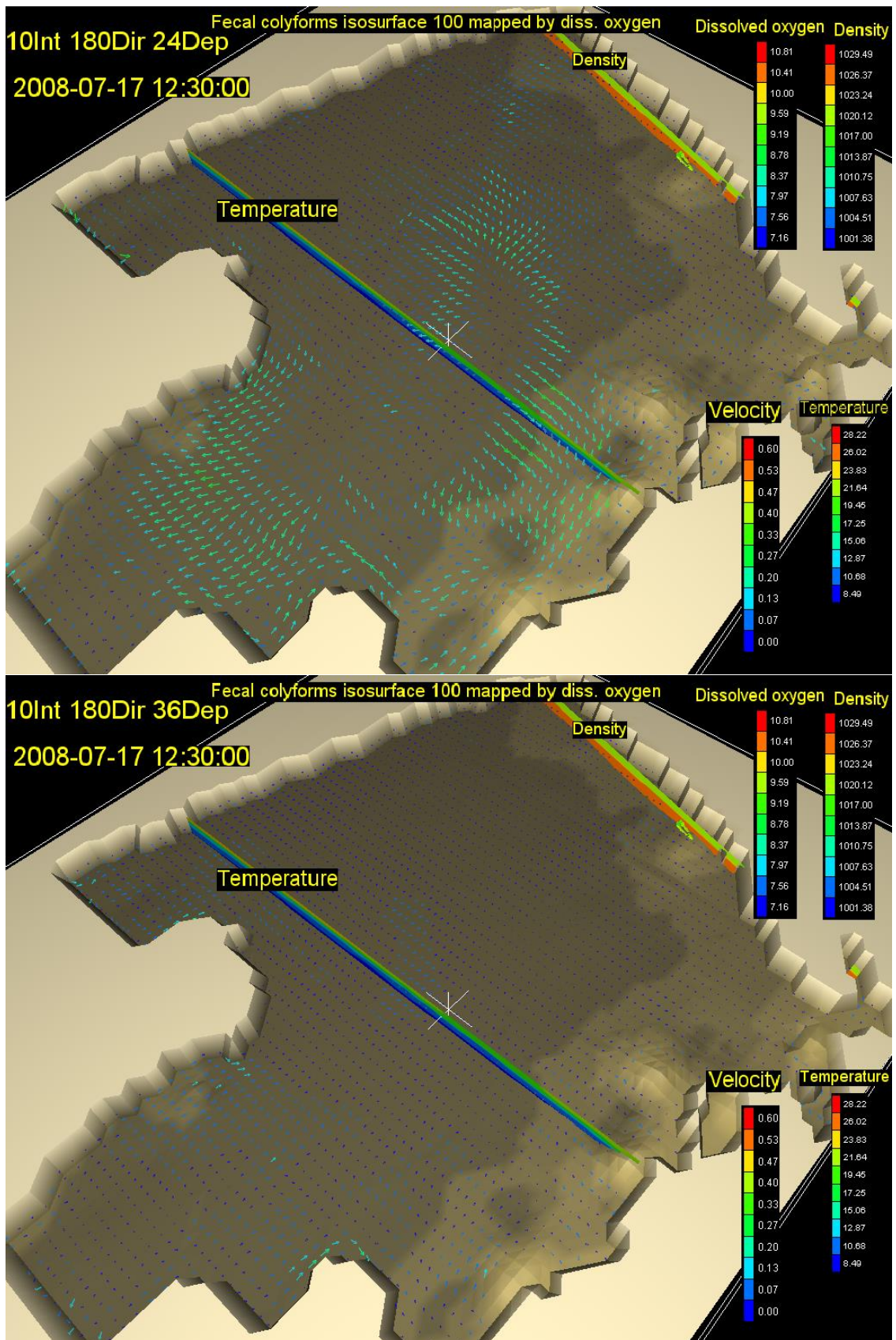
Slika 62. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva



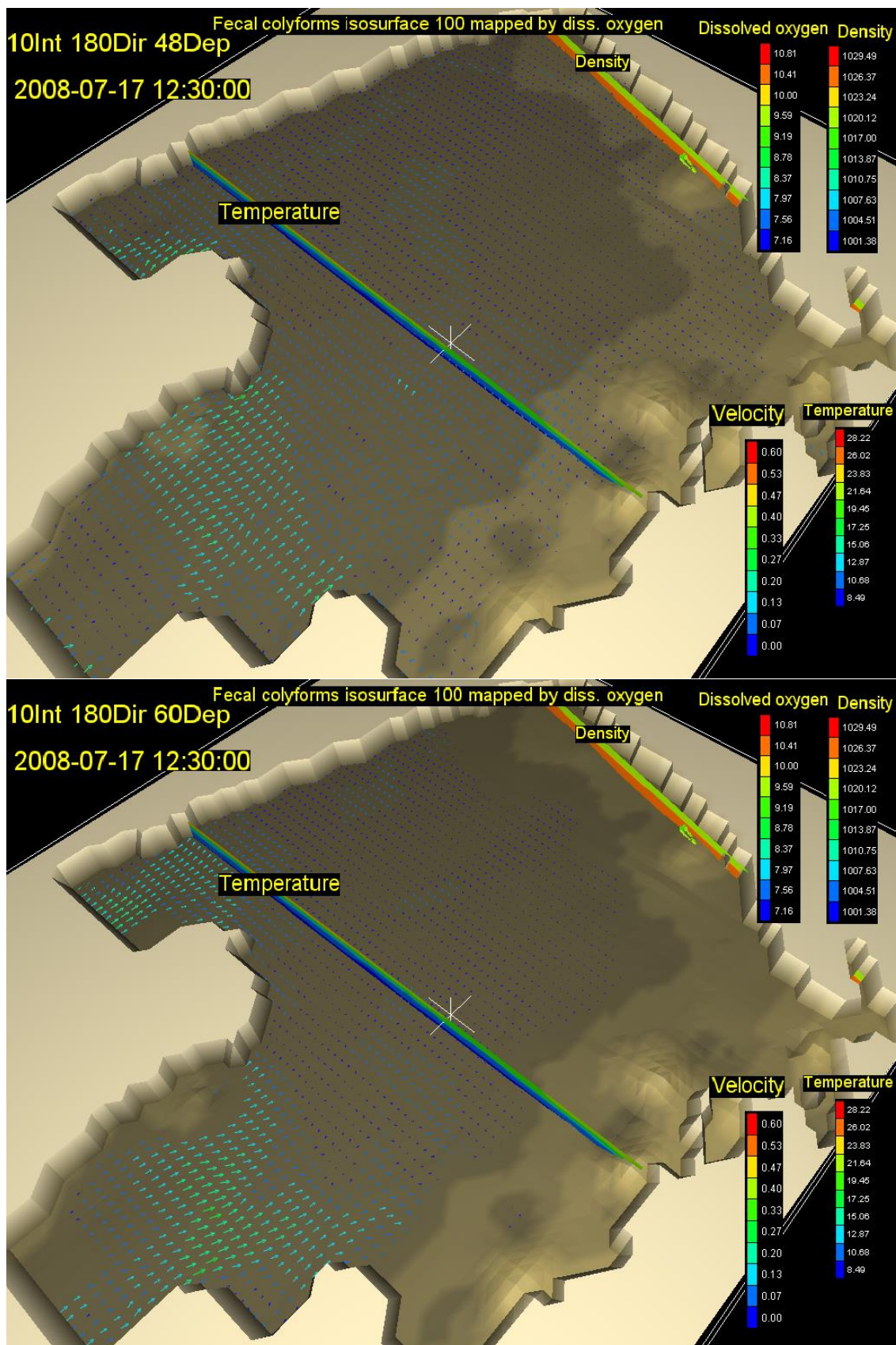
Slika 63. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 180 stupnjeva



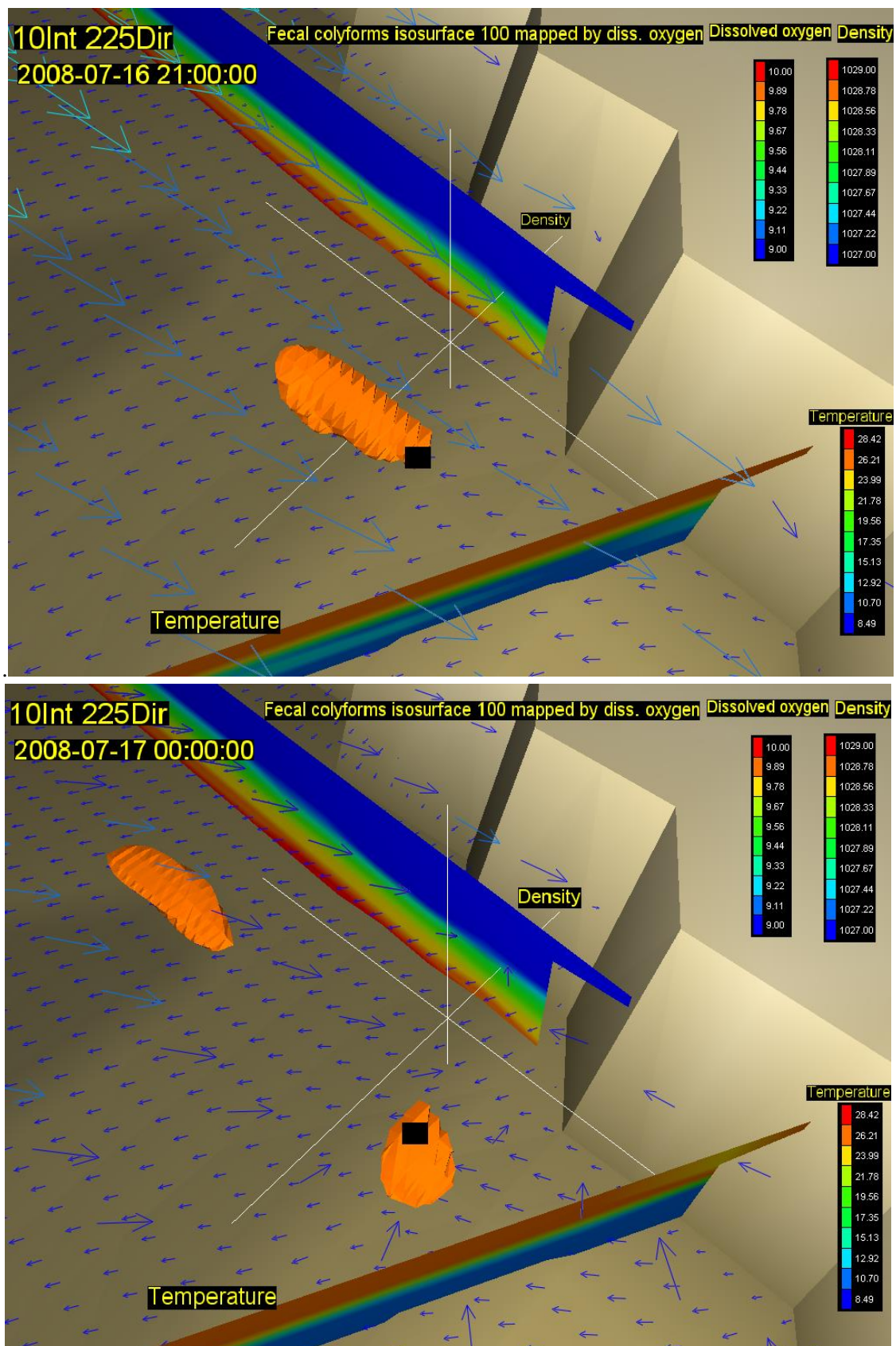
Slika 64. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 180 stupnjeva



Slika 65. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 180 stupnjeva

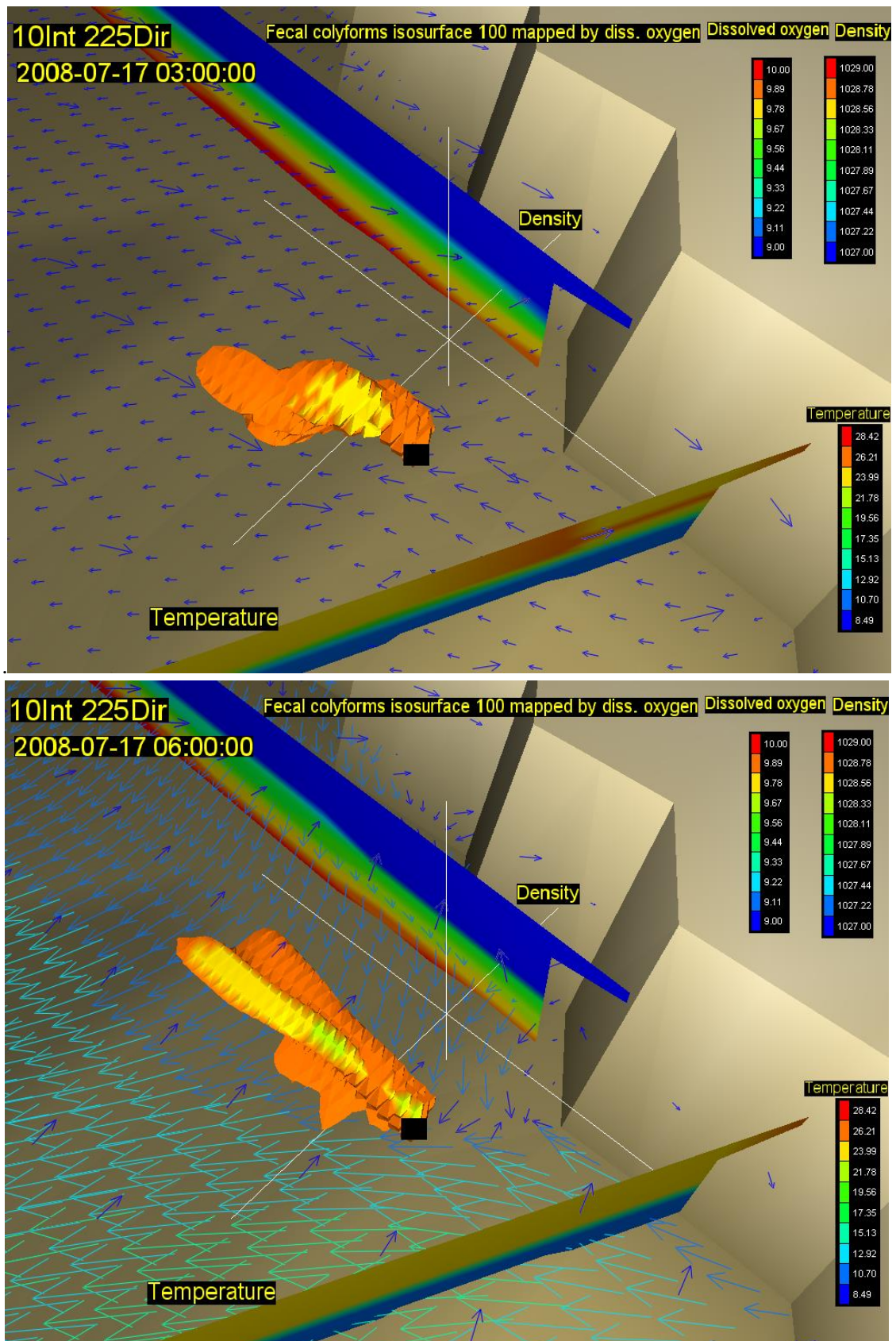


Slika 66. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 180 stupnjeva

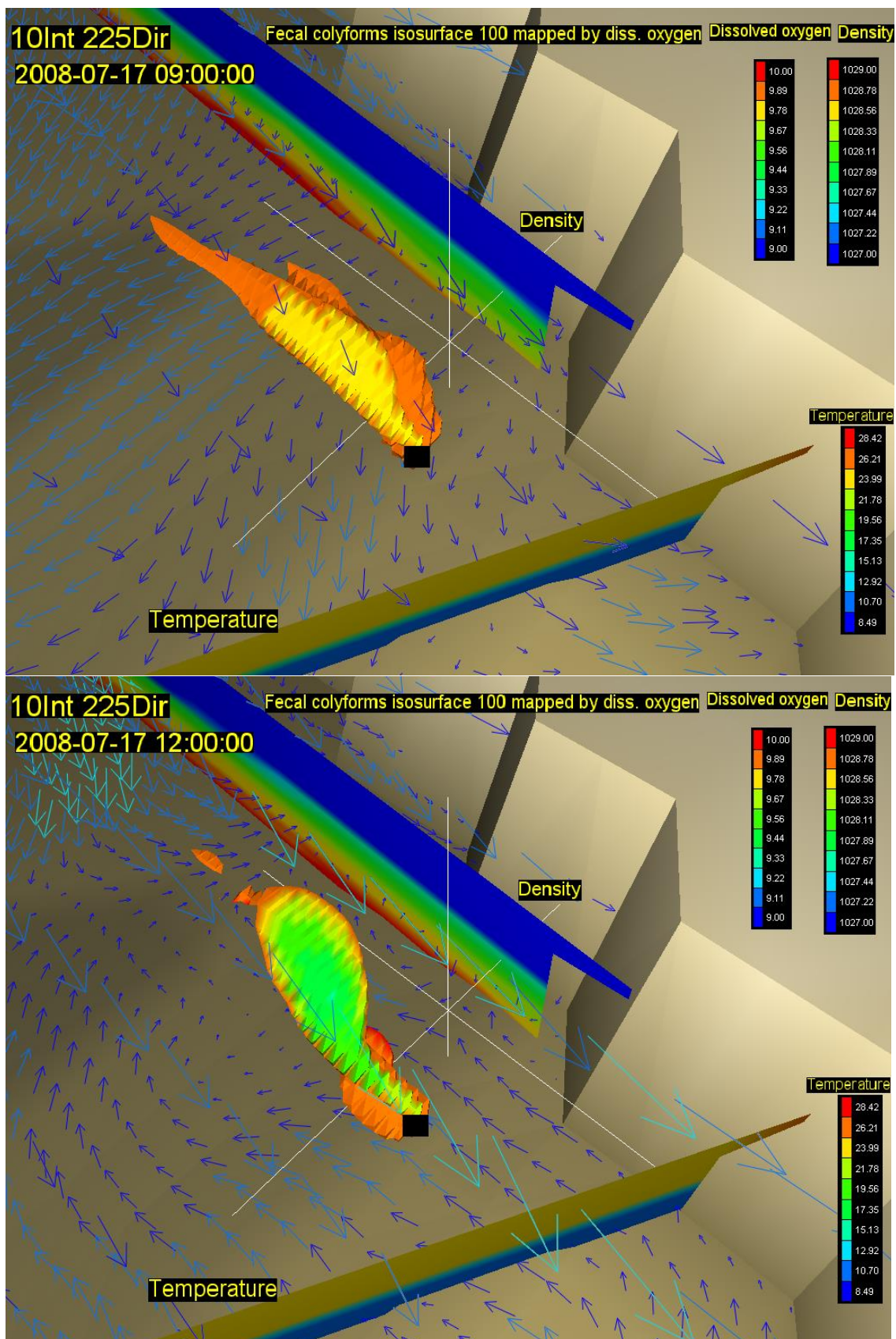


Slika 67. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}/(100 \text{ ml})^{-1}$  za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 225 stupnjeva

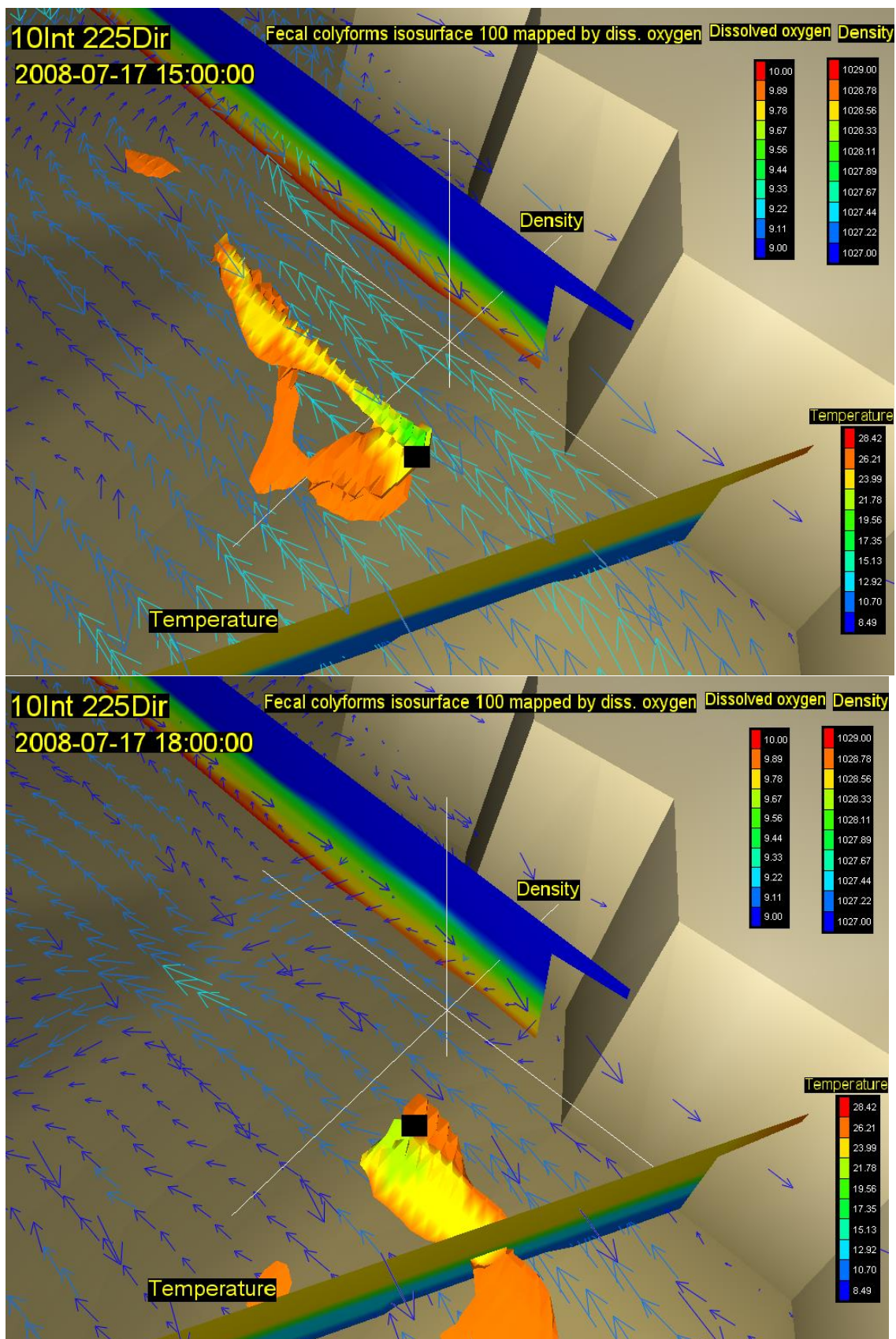




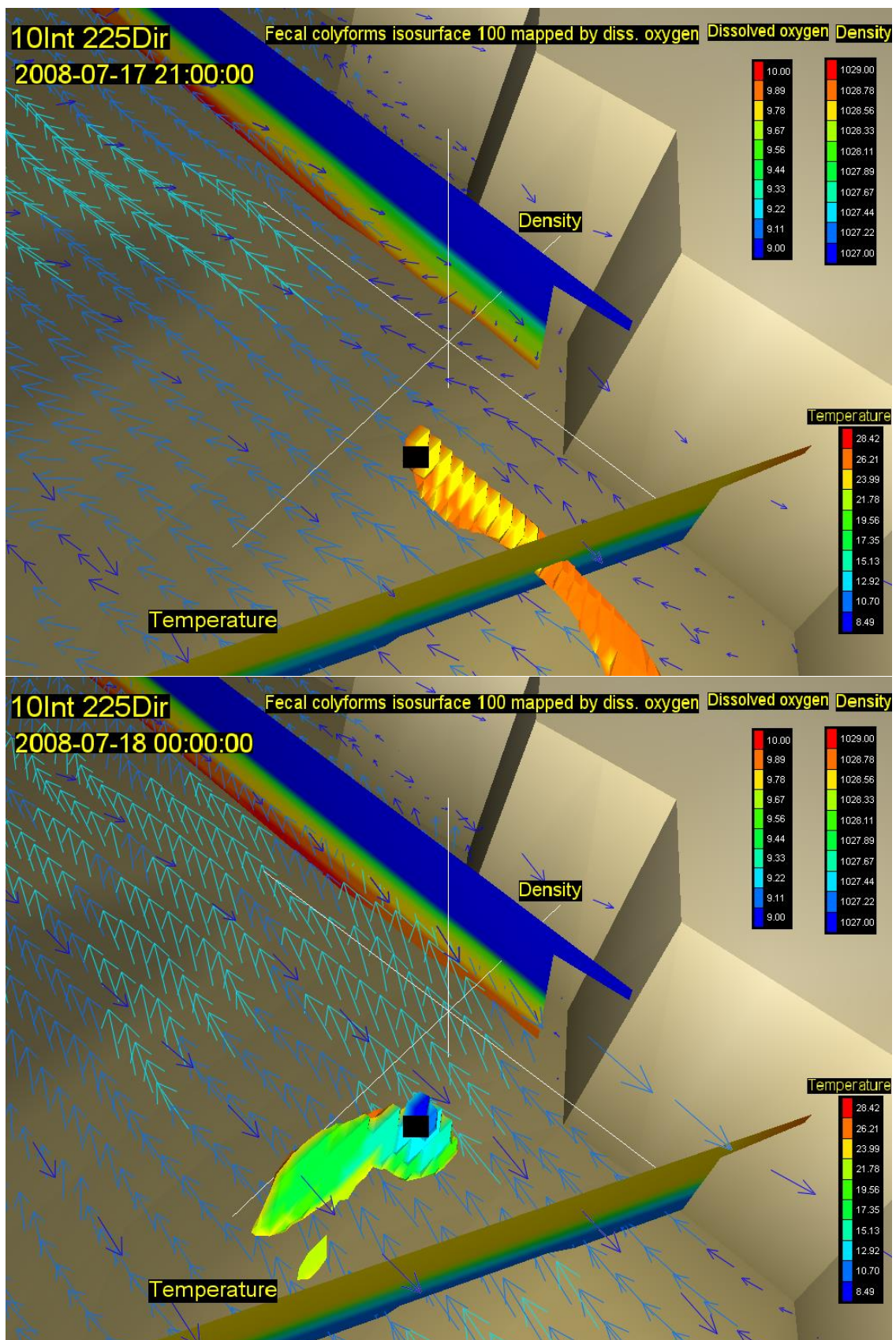
Slika 68. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $FC(100\text{ ml})^{-1}$  za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10\text{ ms}^{-1}$  iz smjera 225 stupnjeva



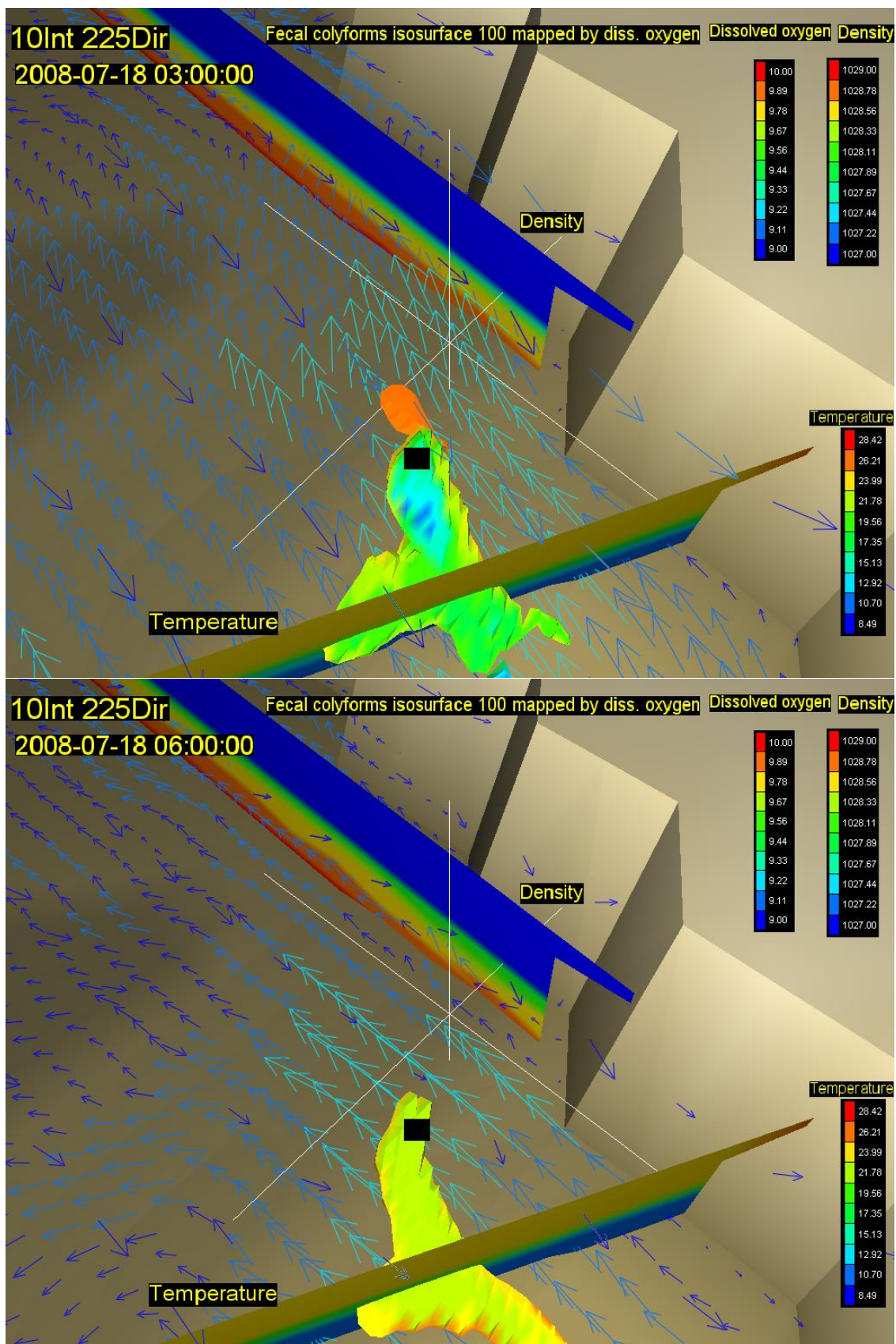
Slika 69. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 225 stupnjeva



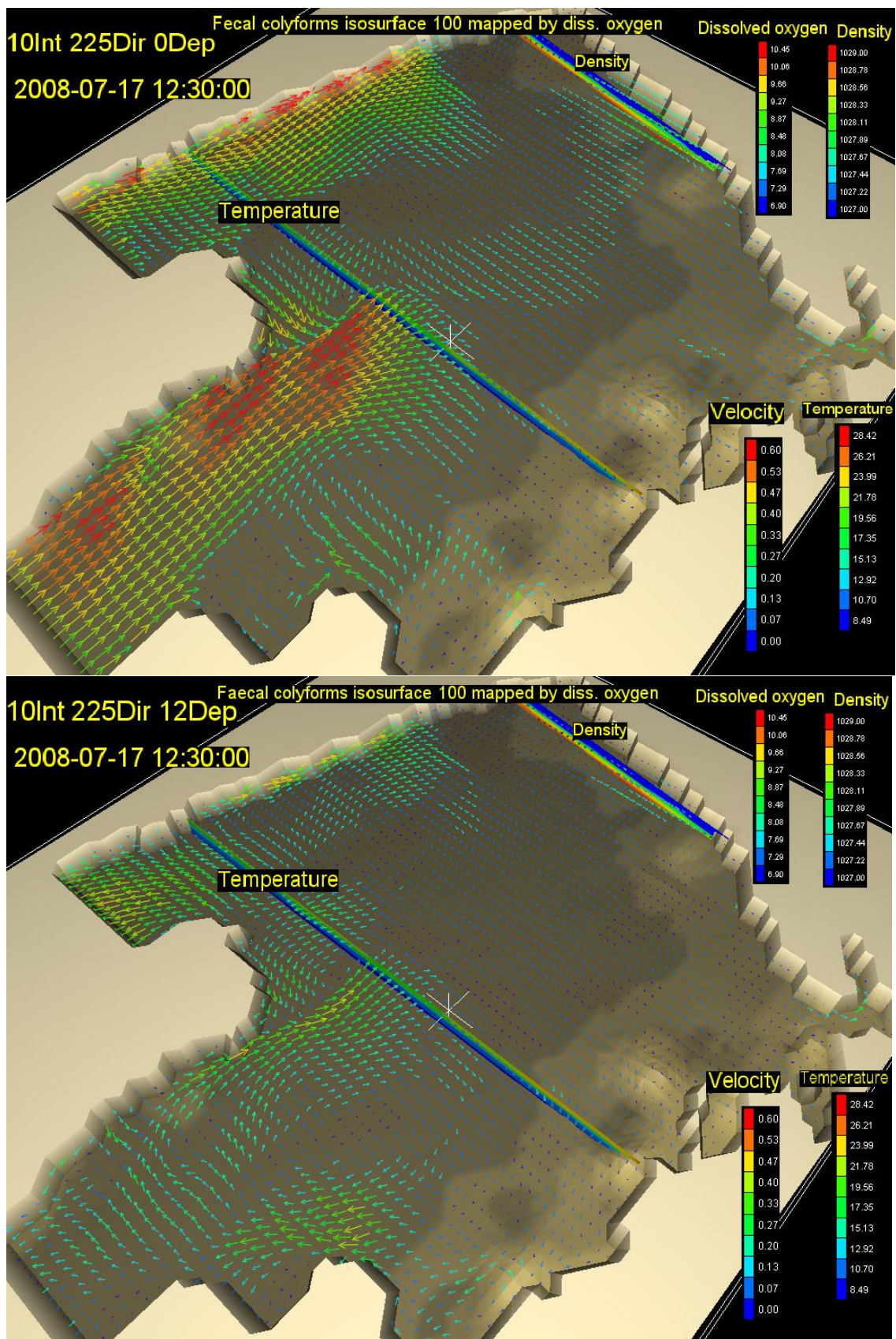
Slika 70. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva



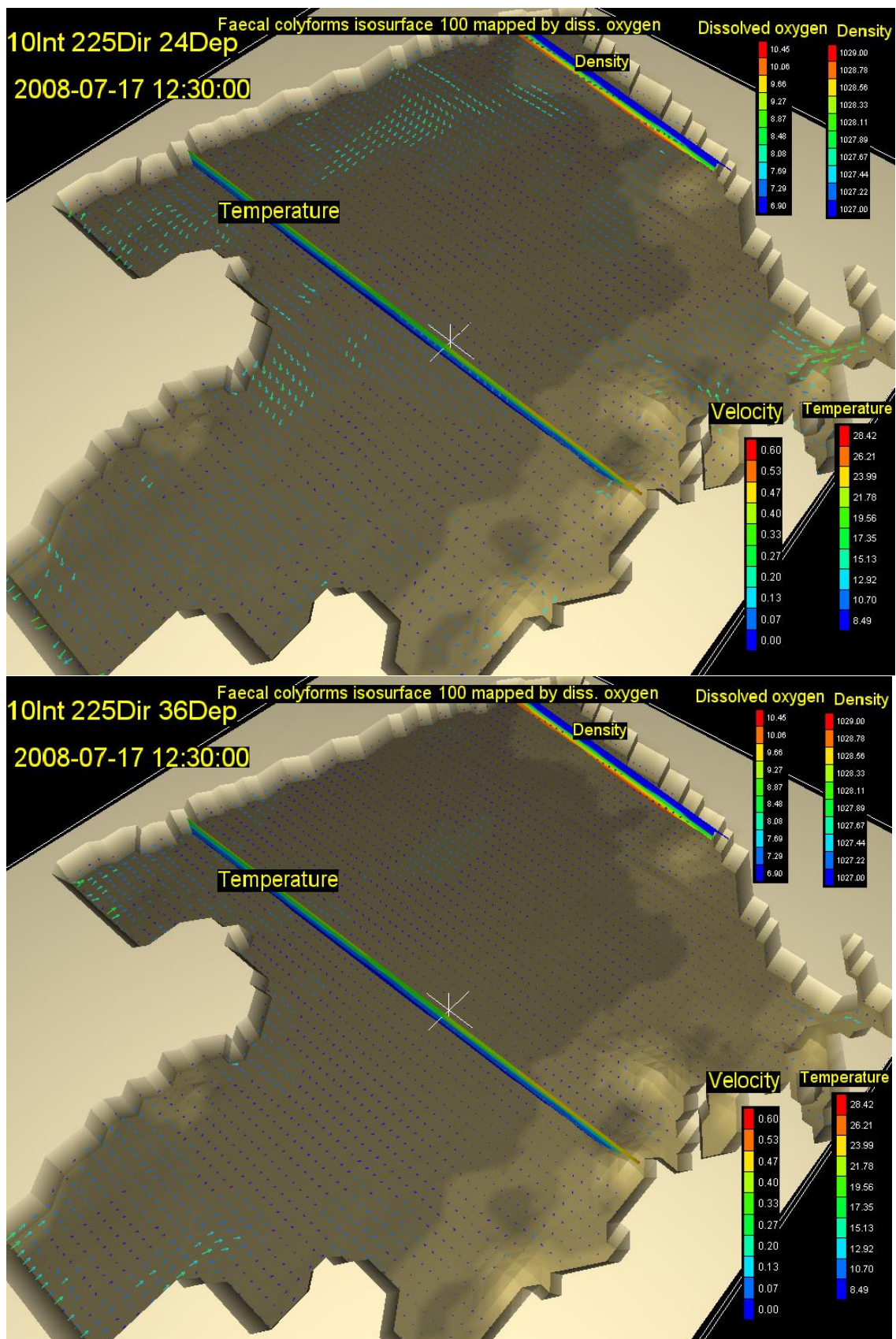
Slika 71. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva



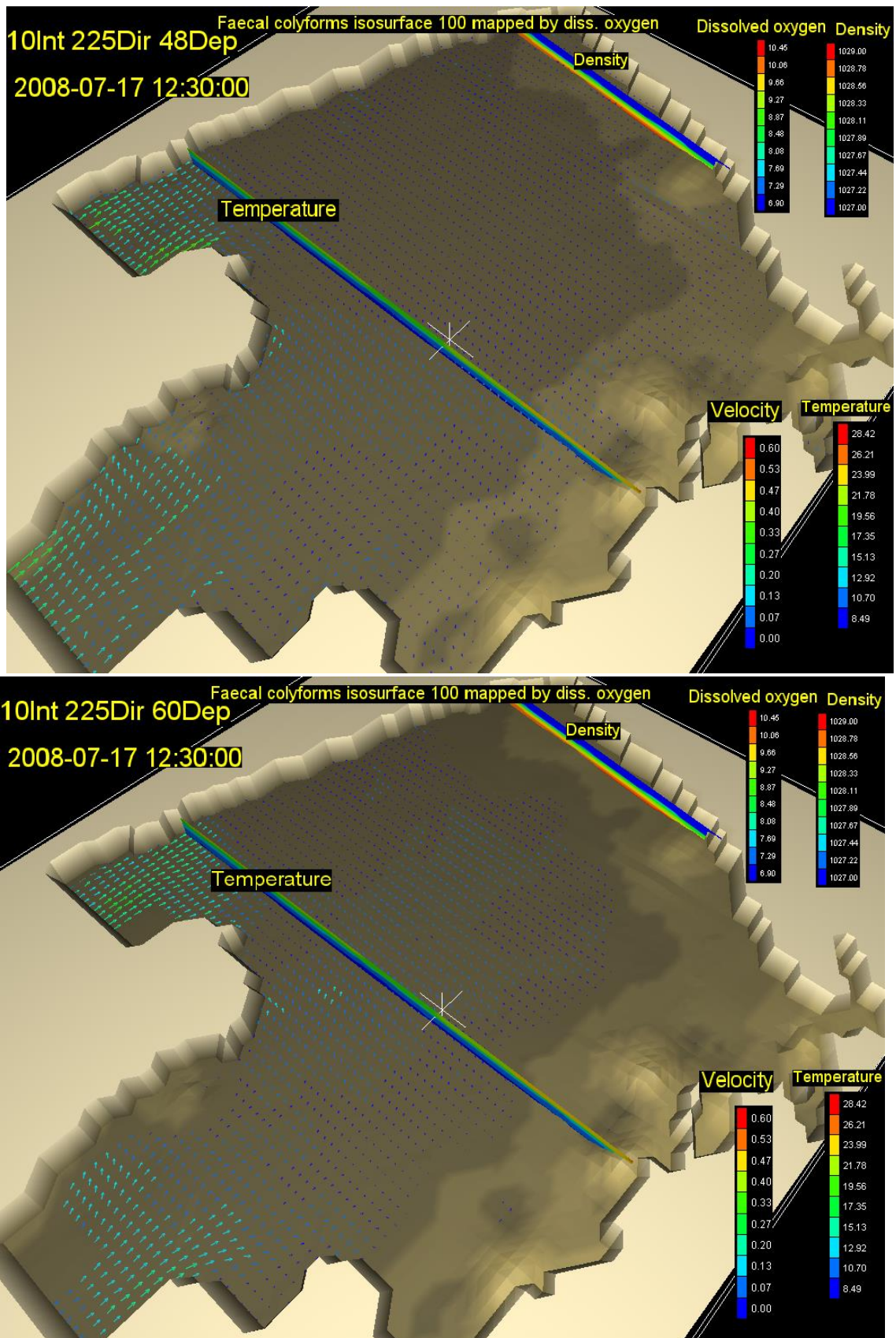
Slika 72. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva



Slika 73. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 225 stupnjeva

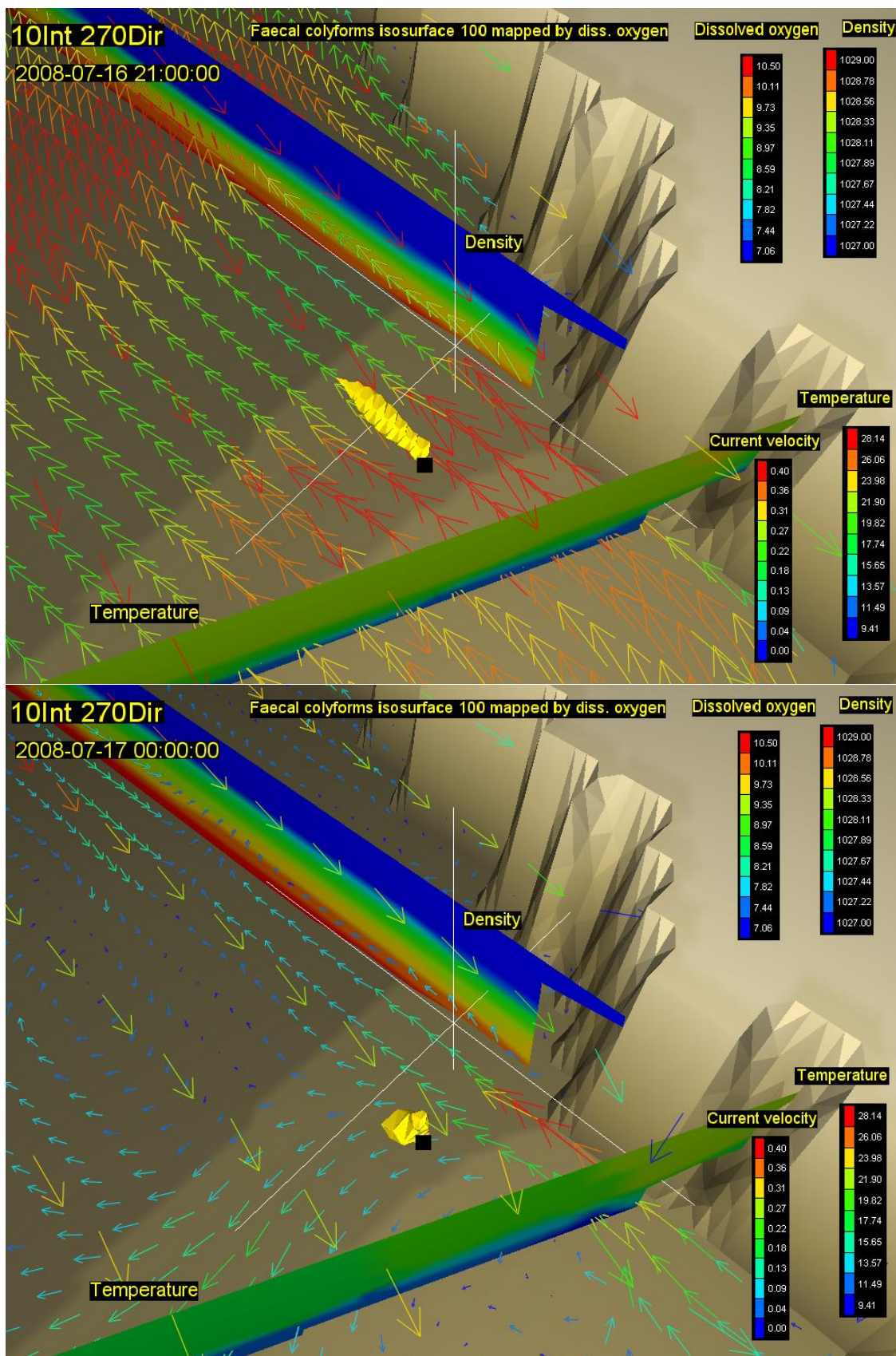


Slika 74. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 225 stupnjeva

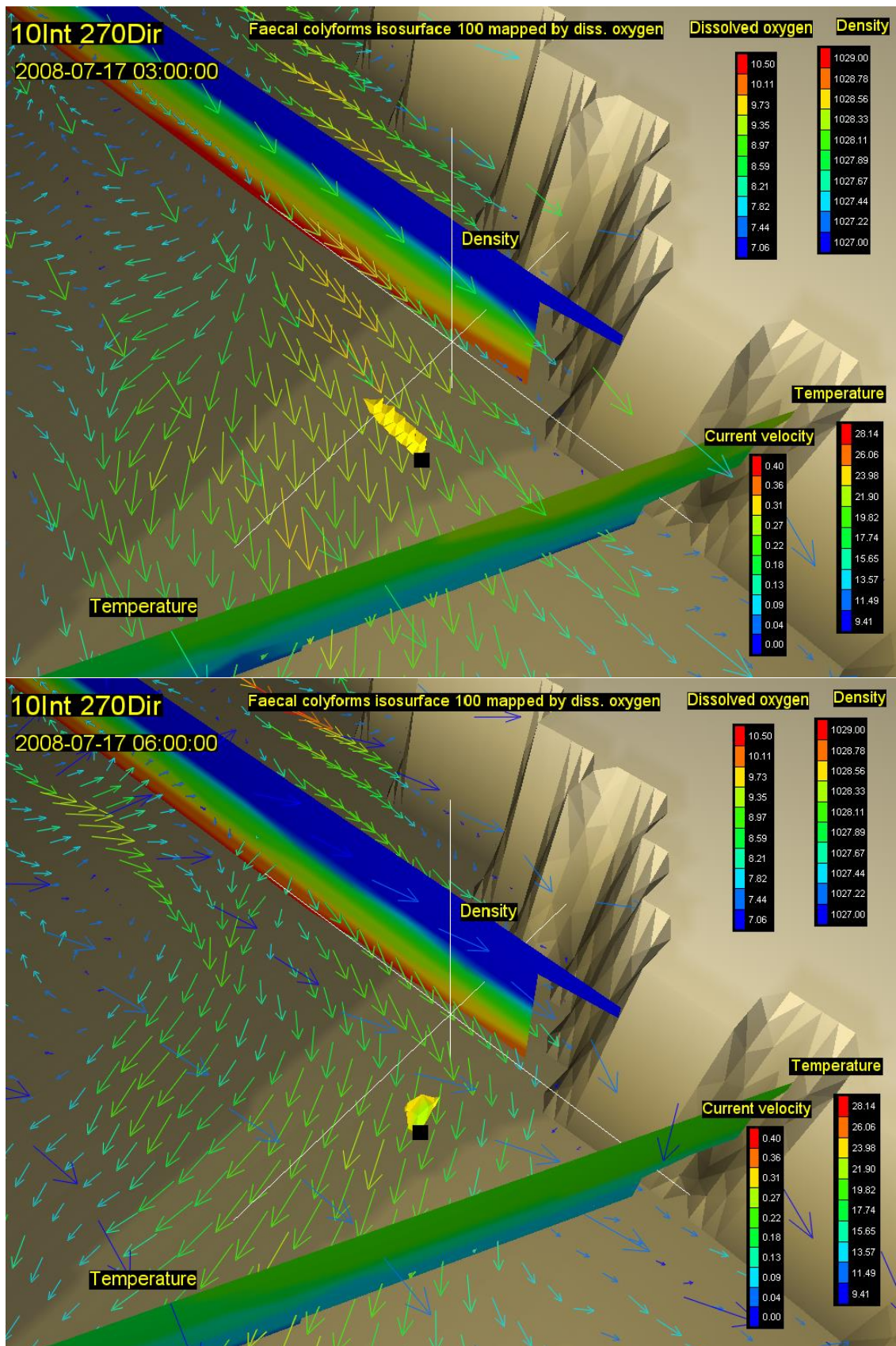


Slika 75. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za  $16,5 \text{ st}$  za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera  $225$  stupnjeva

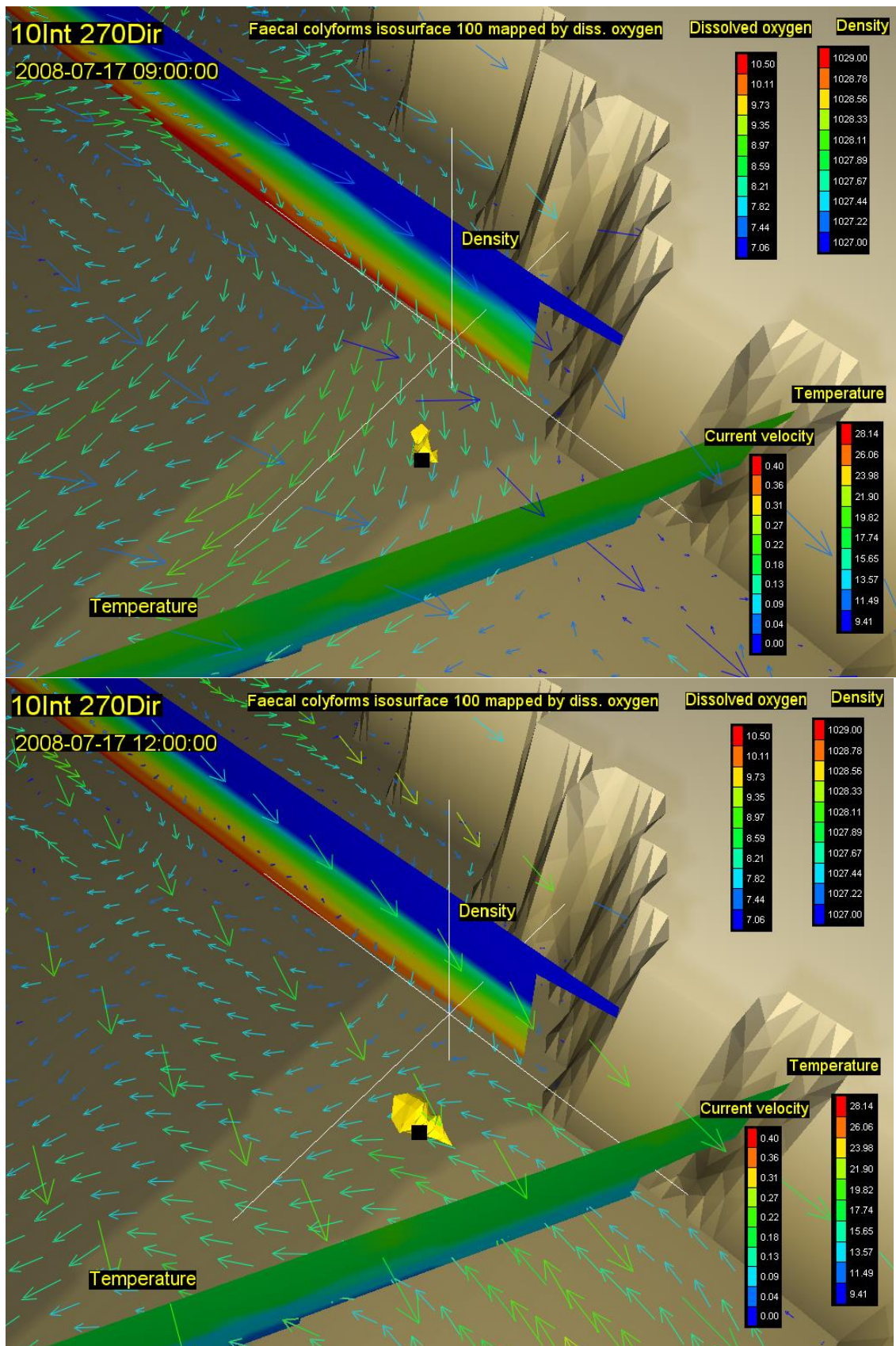




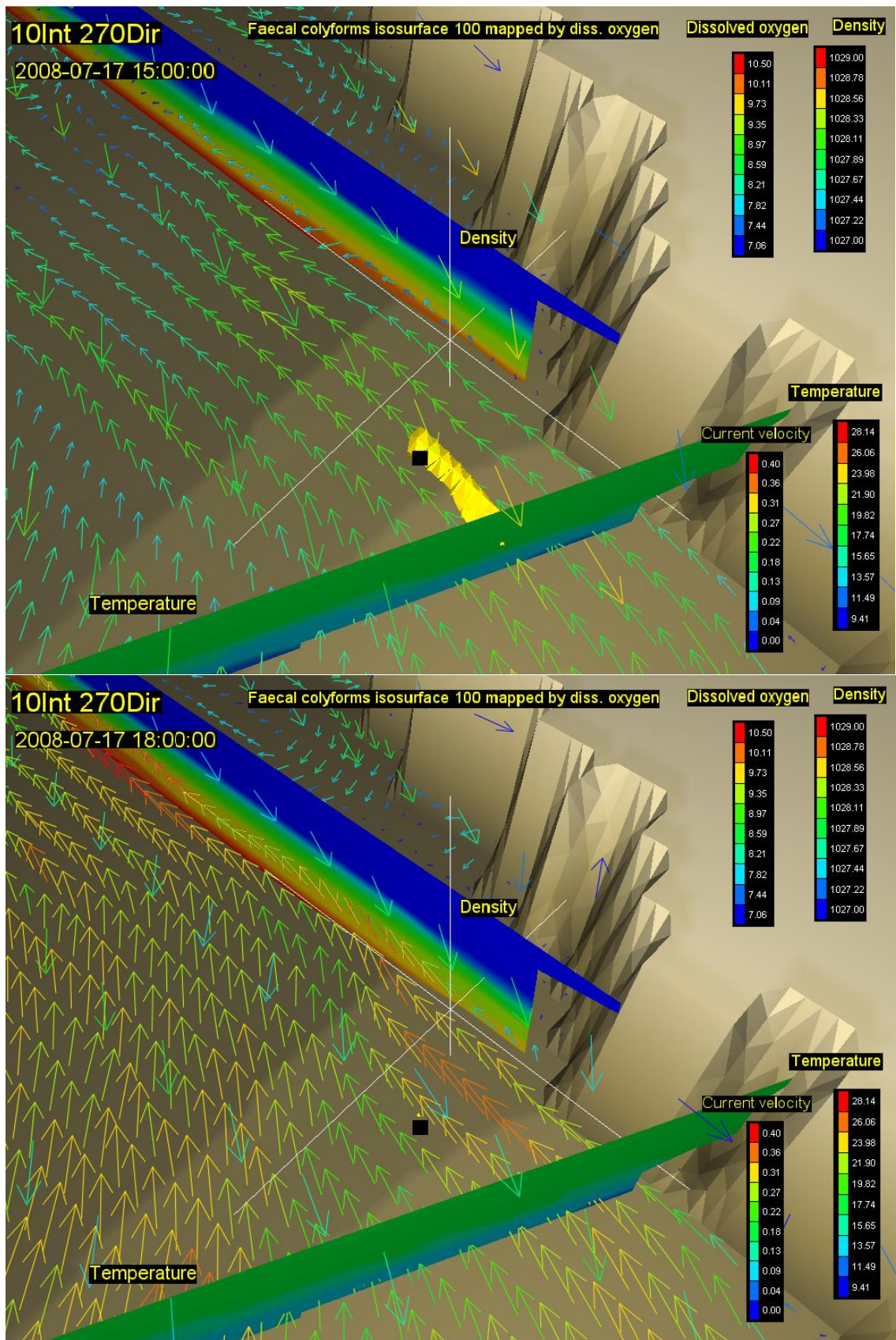
Slika 76. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $FC(100\text{ ml})^{-1}$  za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10\text{ ms}^{-1}$  iz smjera 270 stupnjeva



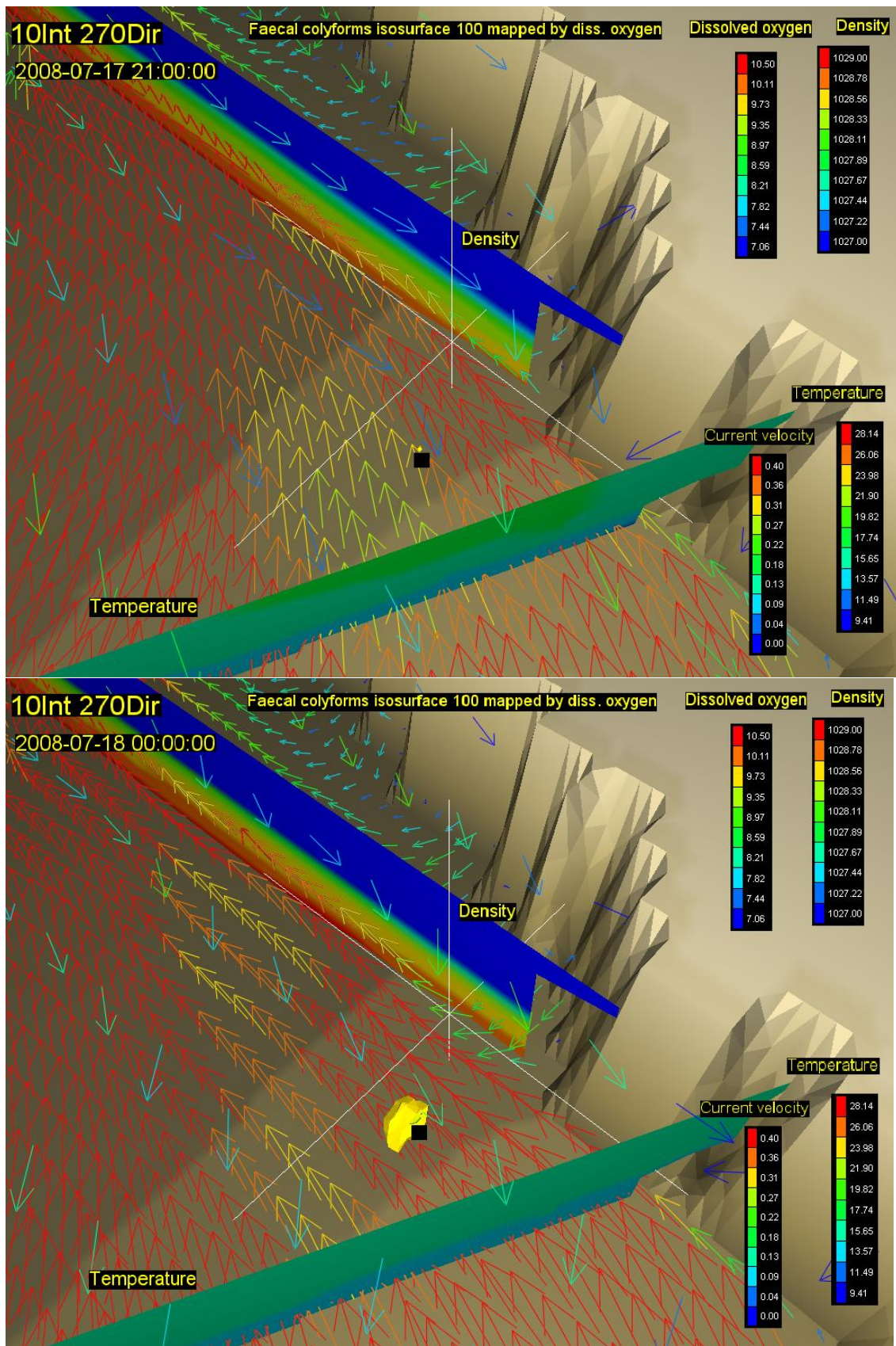
Slika 77. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $FC(100\text{ ml})^{-1}$  za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10\text{ ms}^{-1}$  iz smjera 270 stupnjeva



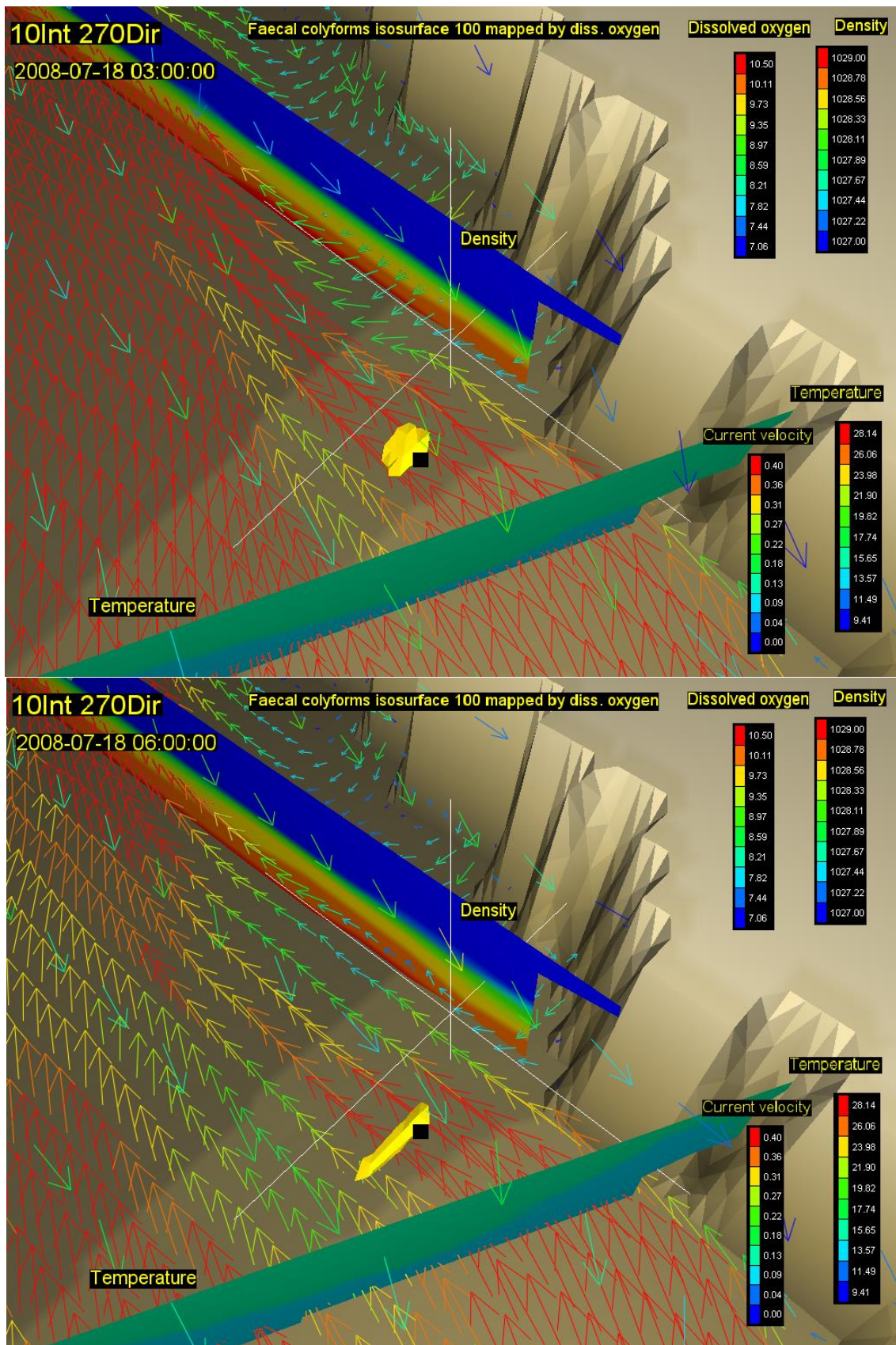
Slika 78. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $FC(100\text{ ml})^{-1}$  za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10\text{ ms}^{-1}$  iz smjera 270 stupnjeva



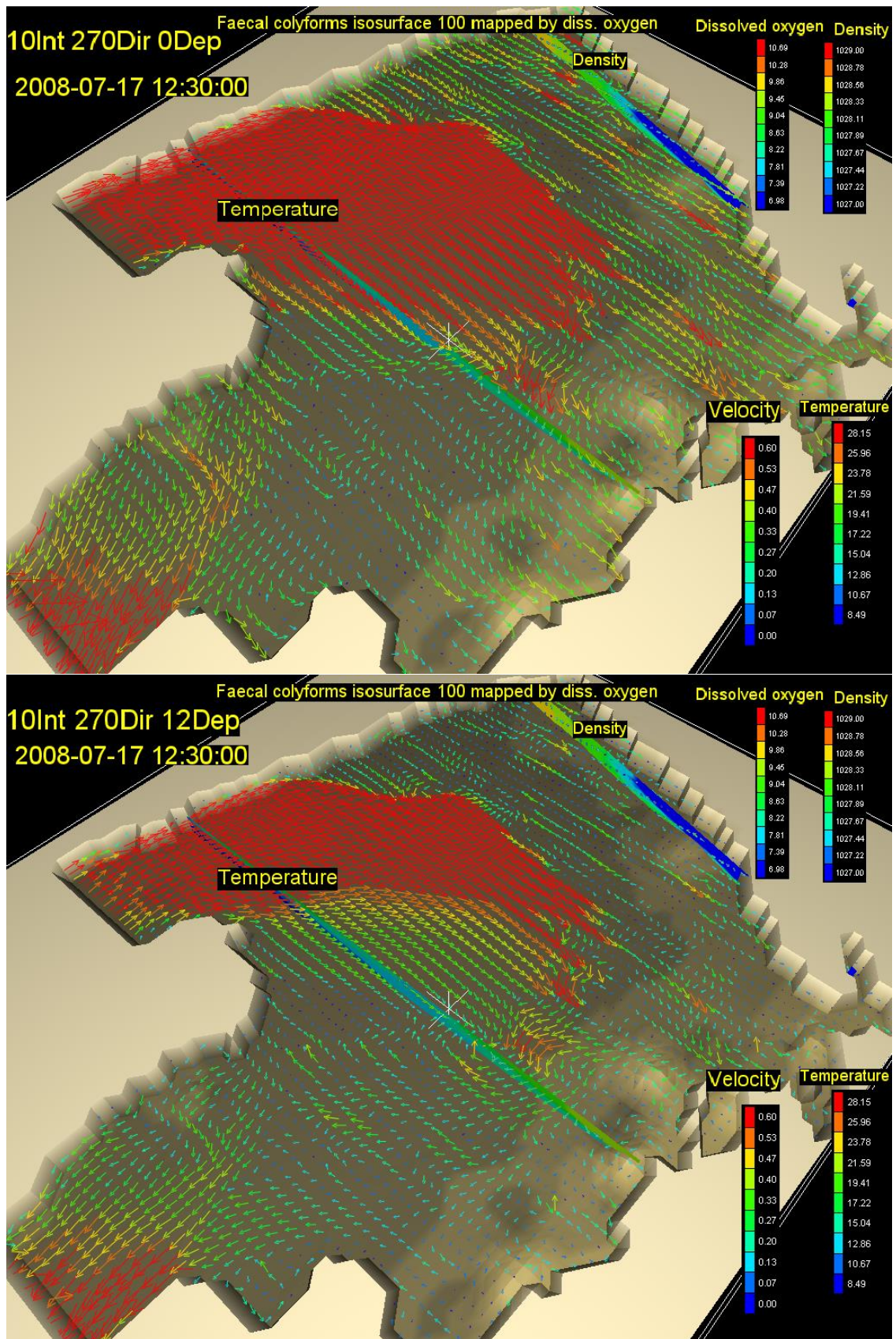
Slika 79. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $\text{FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 270 stupnjeva



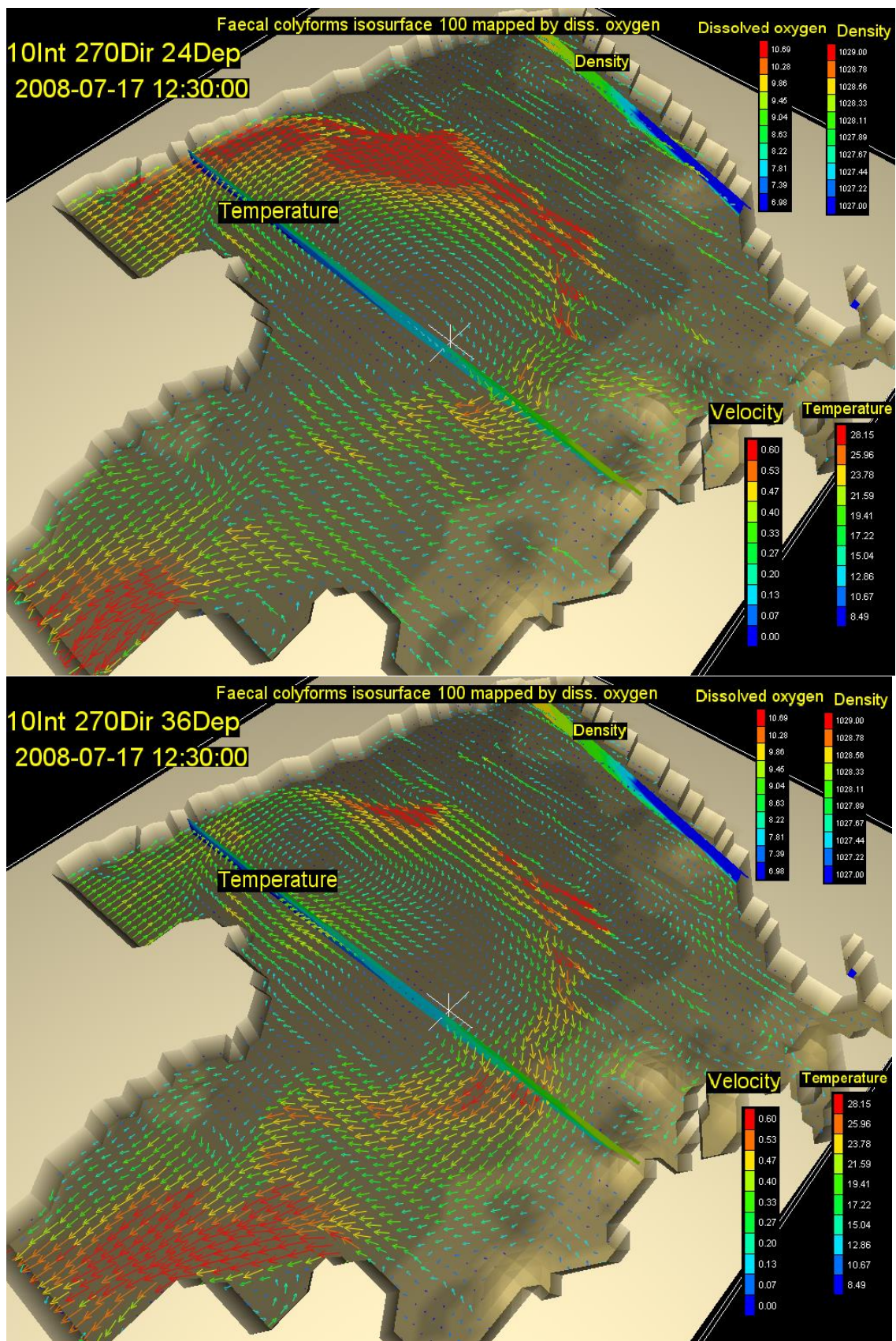
Slika 80. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva



Slika 81. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva

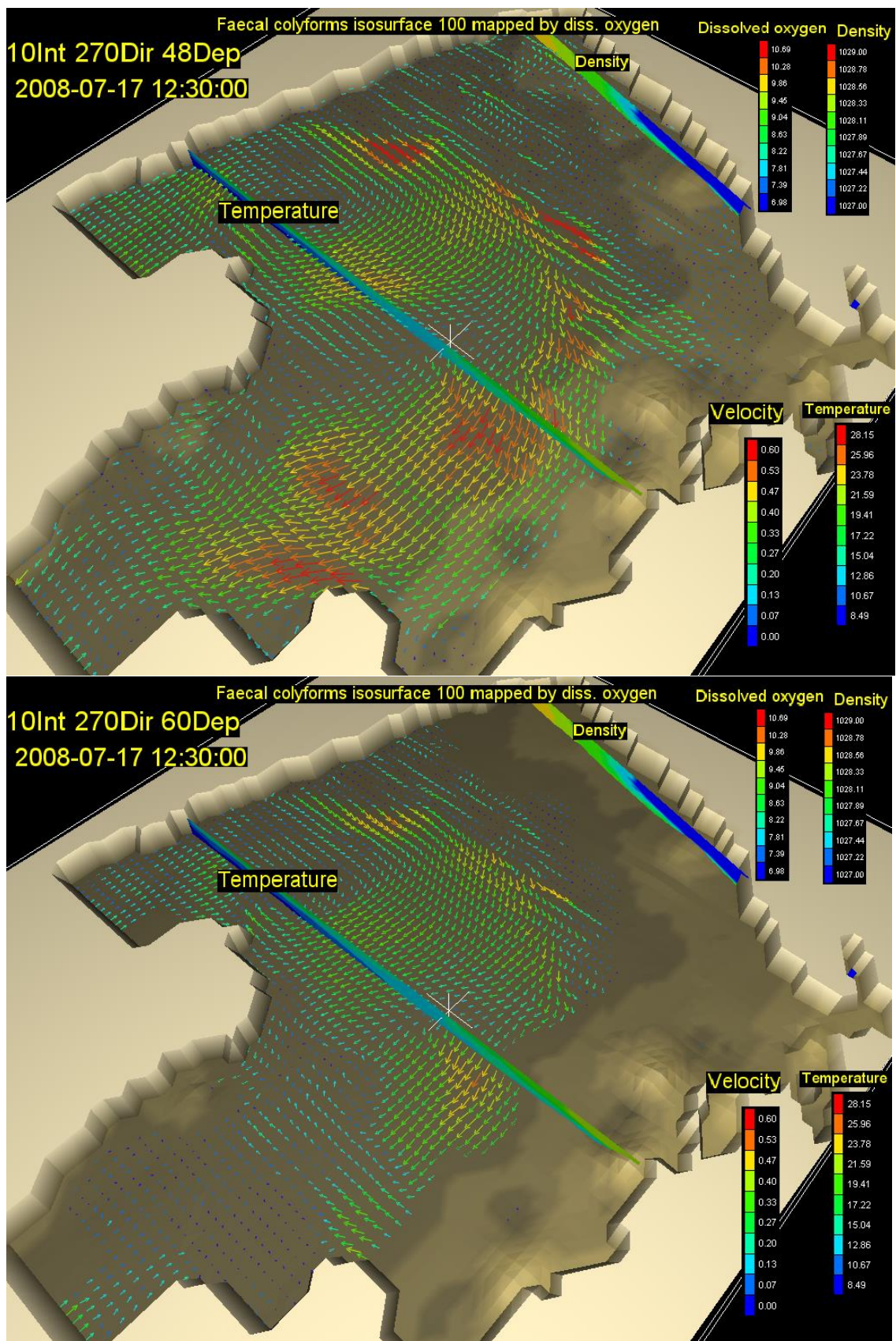


Slika 82. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 270 stupnjeva

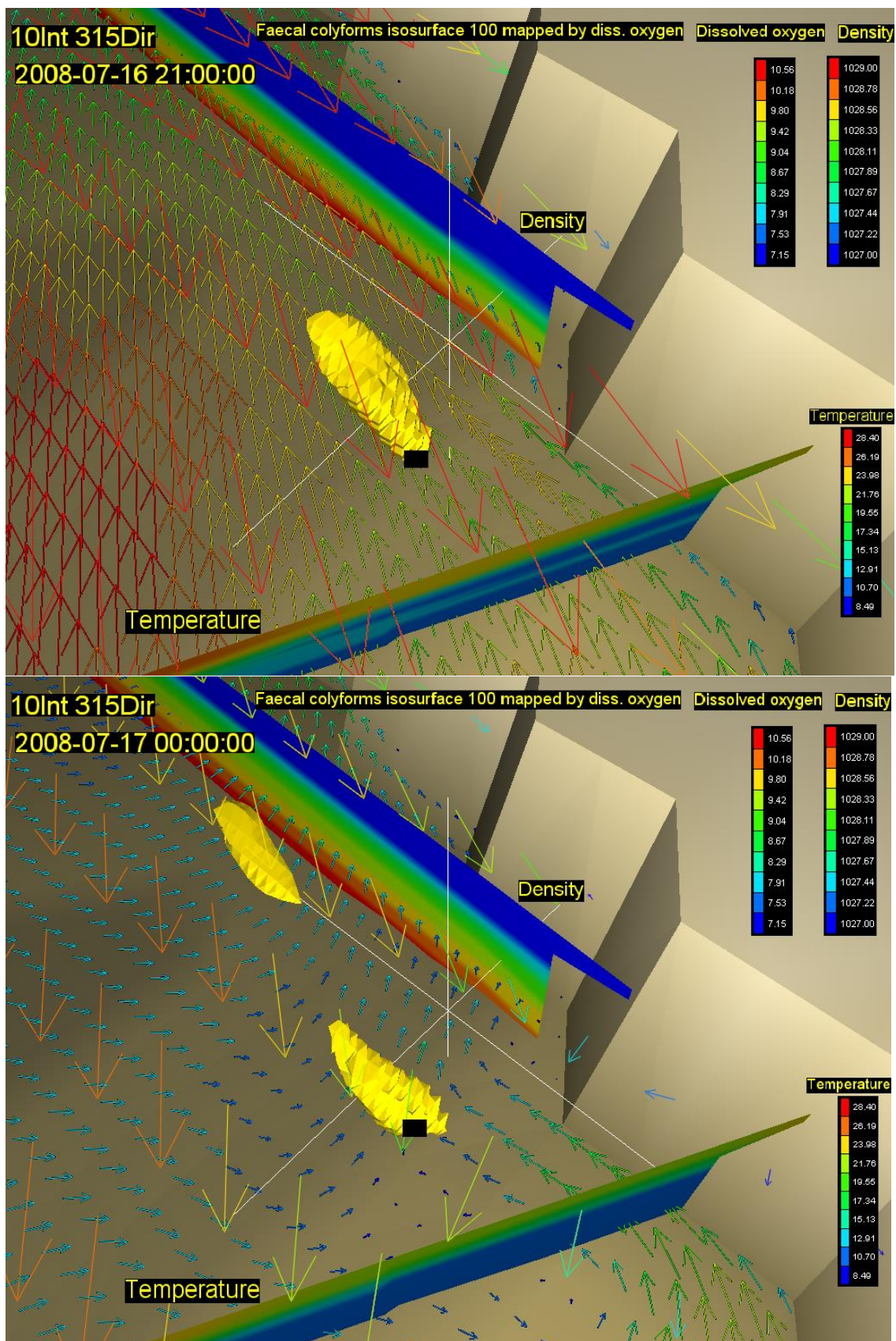


Slika 83. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom  
 gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5.  
 st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 270 stupnjeva

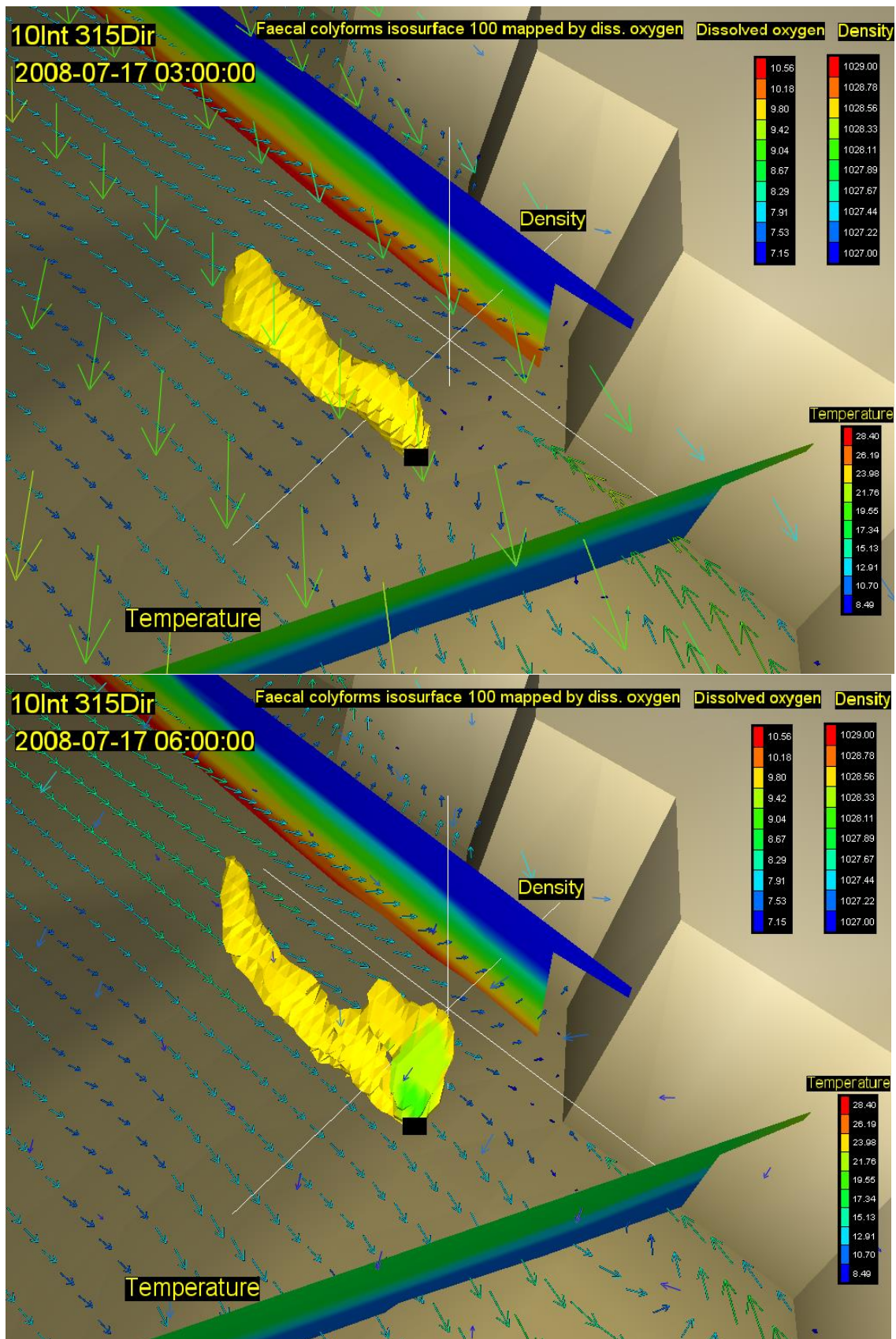




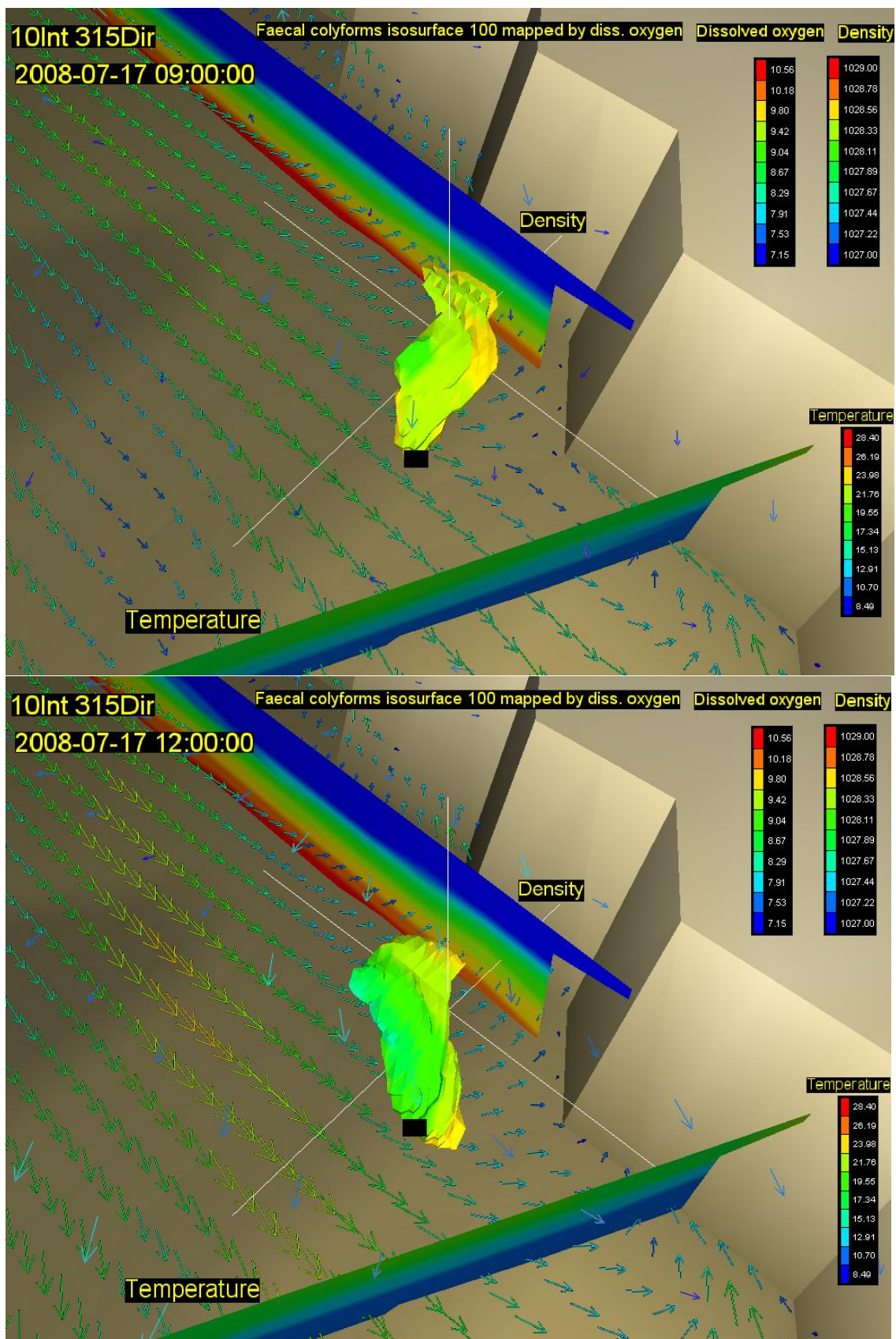
Slika 84. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 270 stupnjeva



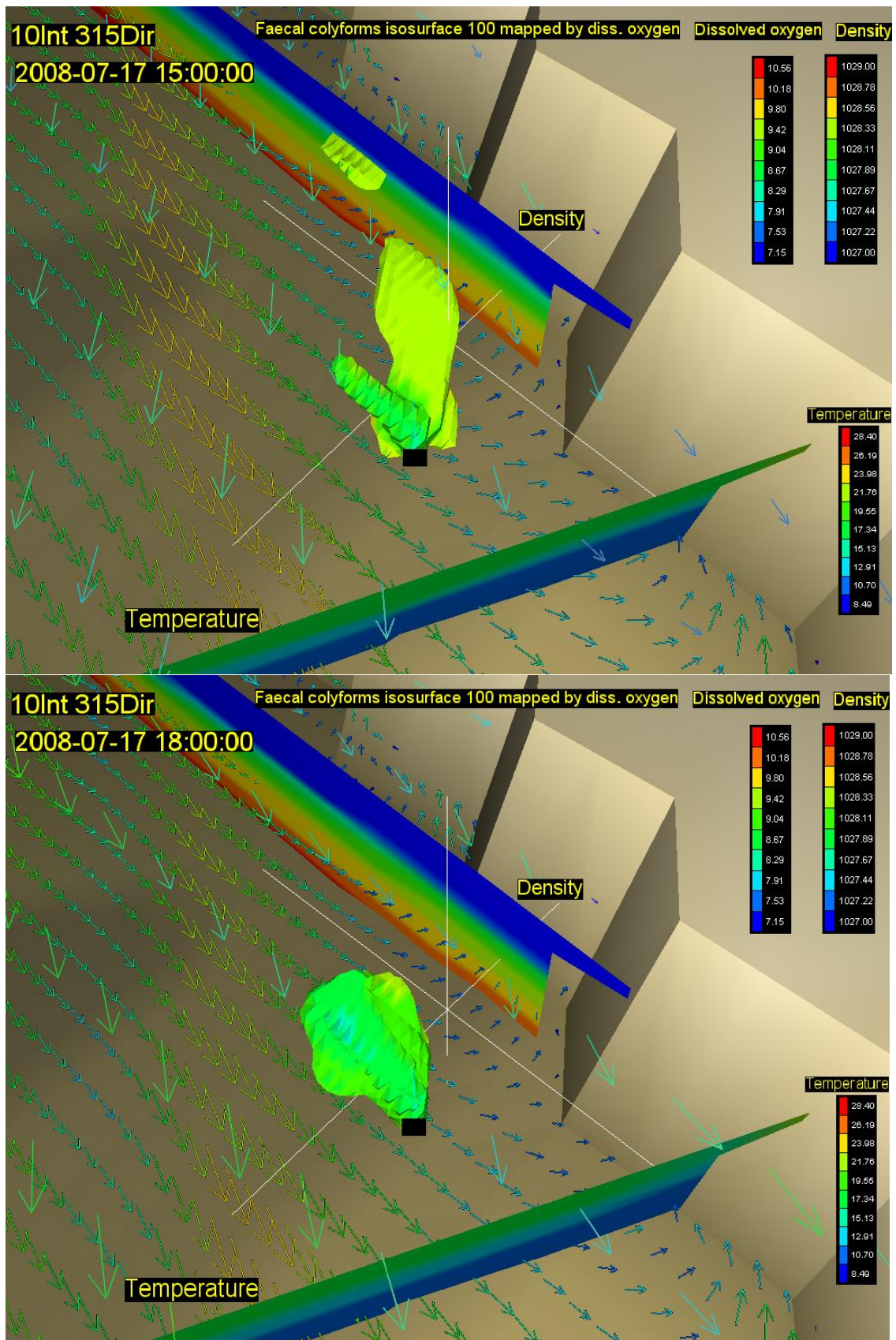
Slika 85. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 03. (gore) i 06. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva



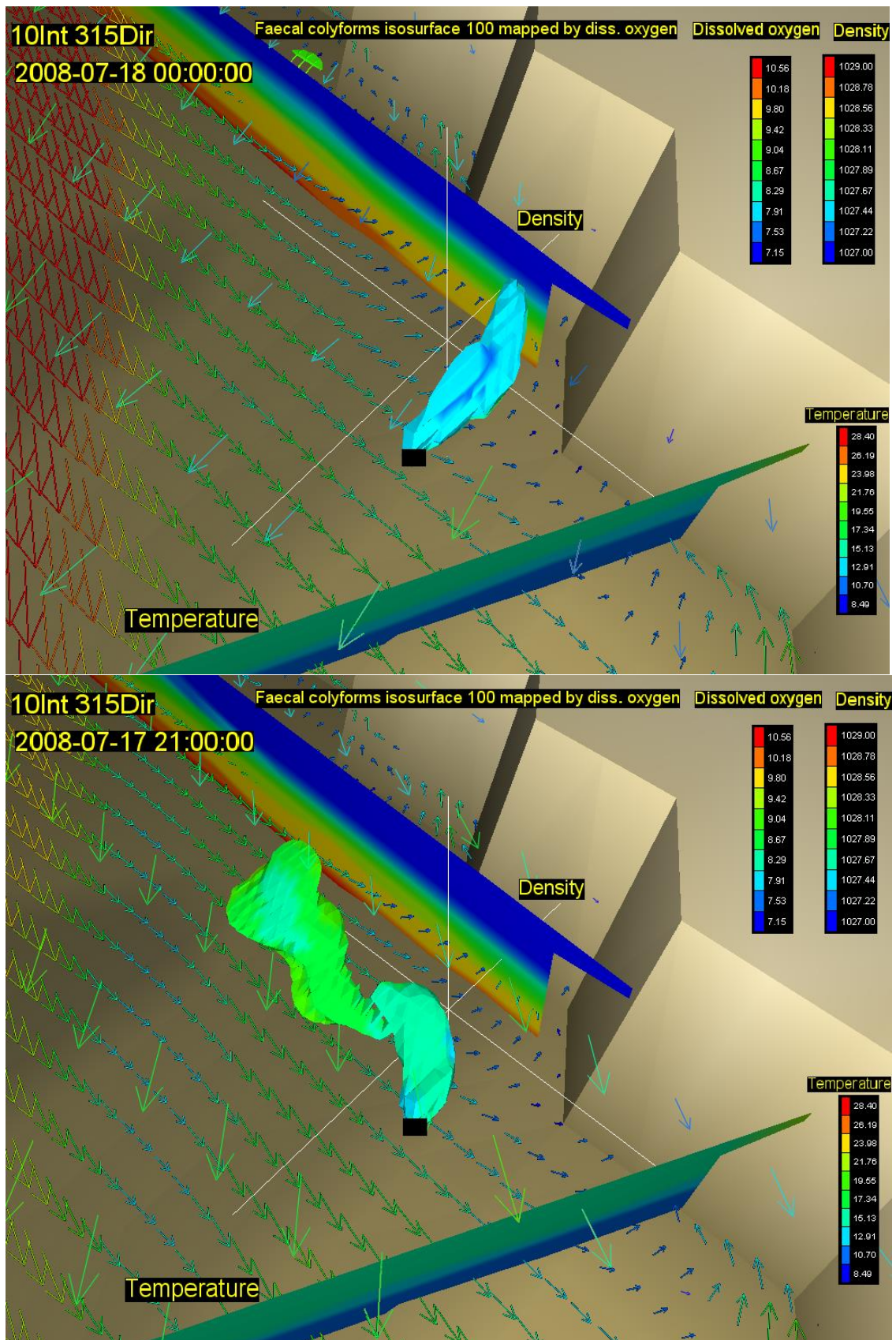
Slika 86. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 09. (gore) i 12. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva



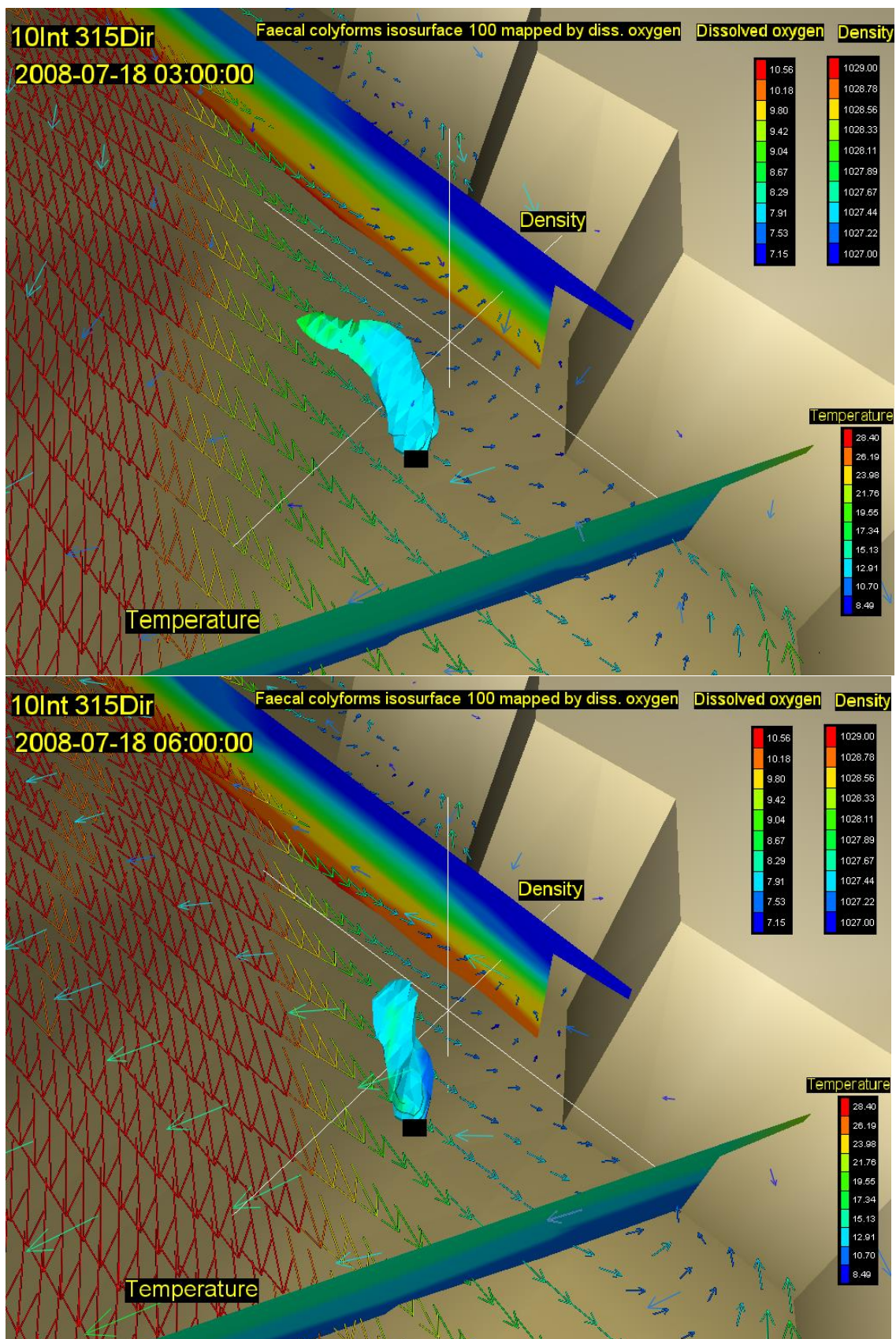
Slika 87. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 15. (gore) i 18. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva



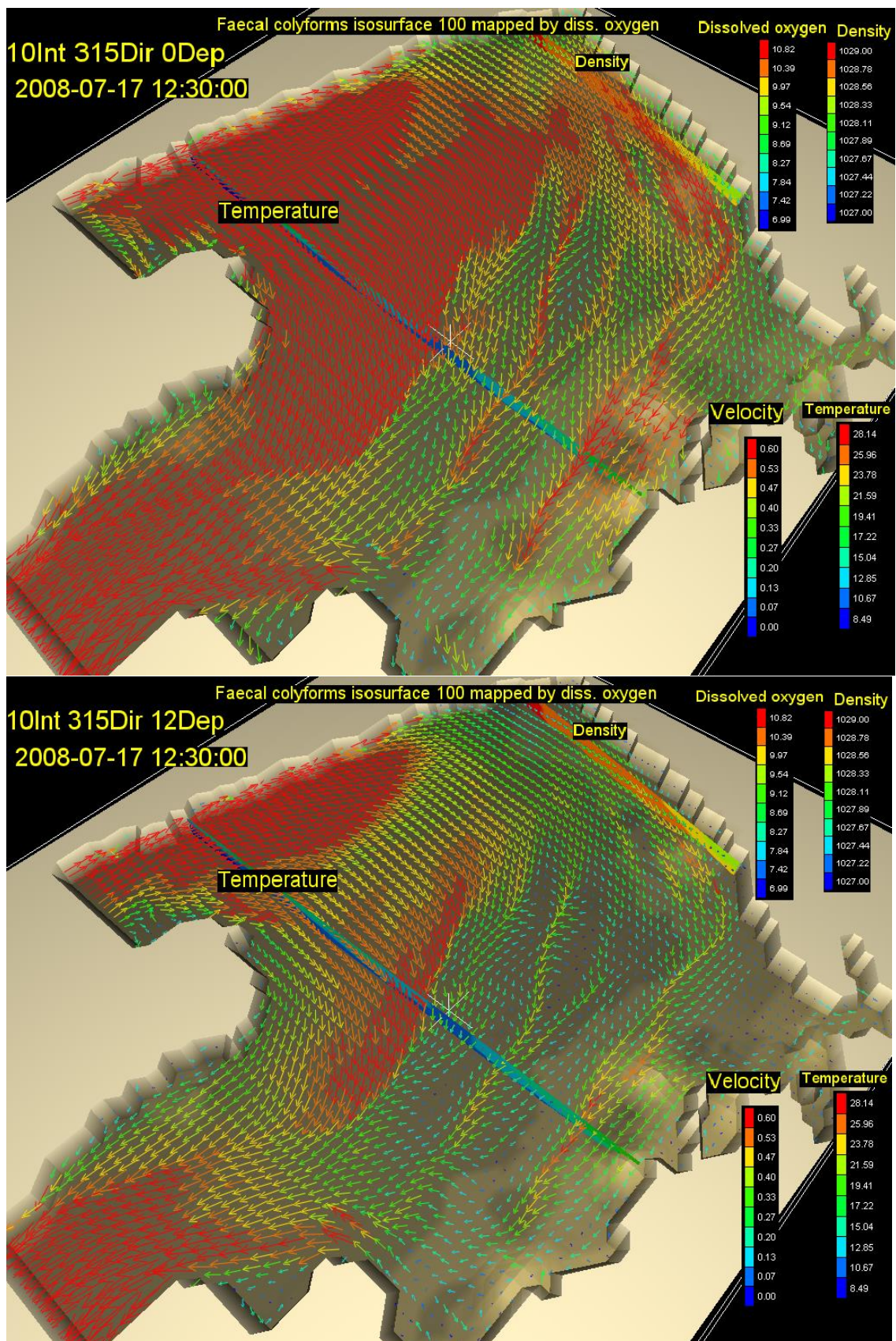
Slika 88. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100  $FC(100\text{ ml})^{-1}$  za 21. (gore) i 24. st (dolje) za vjeter intenziteta  $10\text{ ms}^{-1}$  iz smjera  $315$  stupnjeva



Slika 89. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 27. (gore) i 30. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva

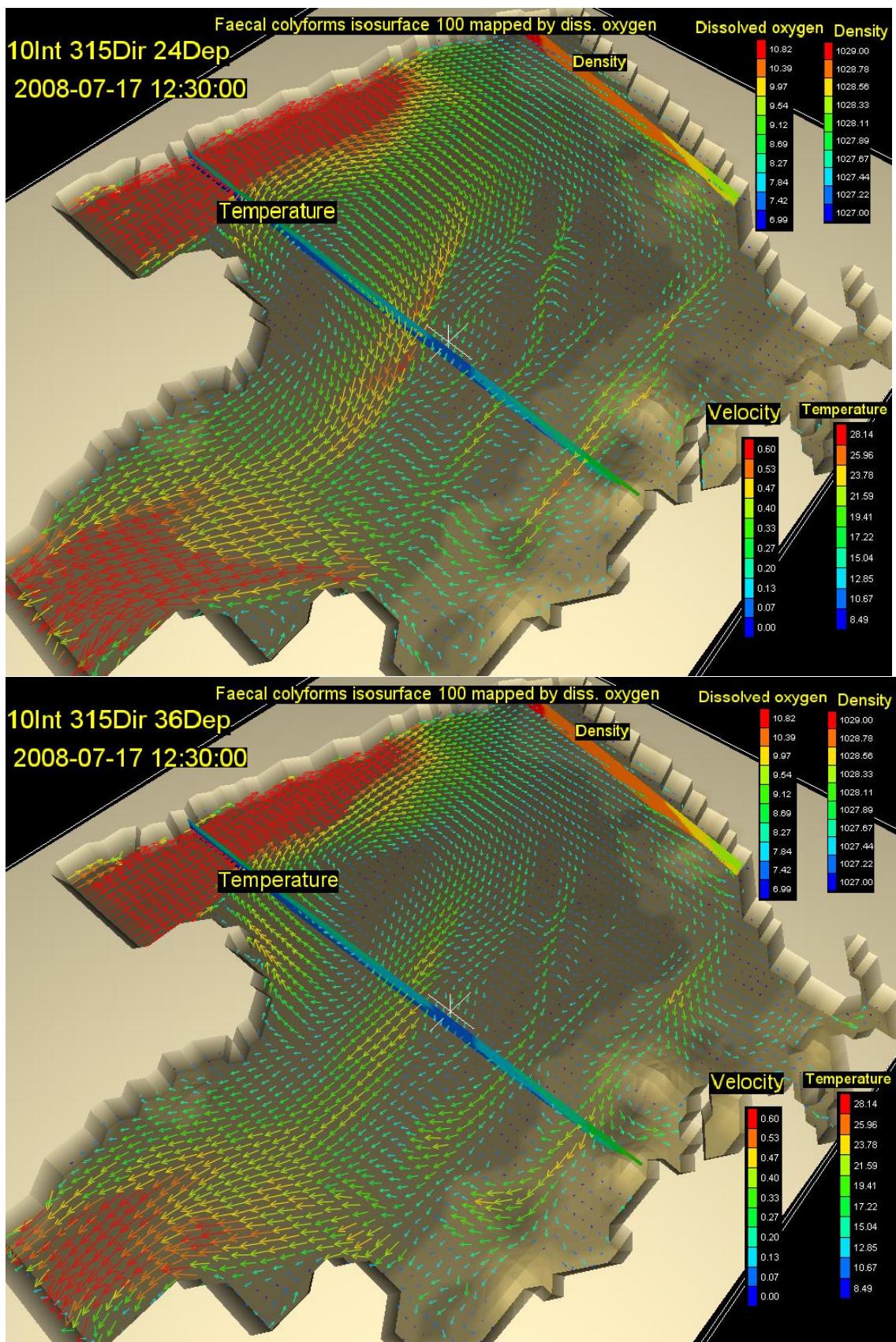


Slika 90. Vektori brzina na površini (rijetki raster) i na dubini od 20m (gusti raster) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 33. (gore) i 36. st (dolje) za vjeter intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva

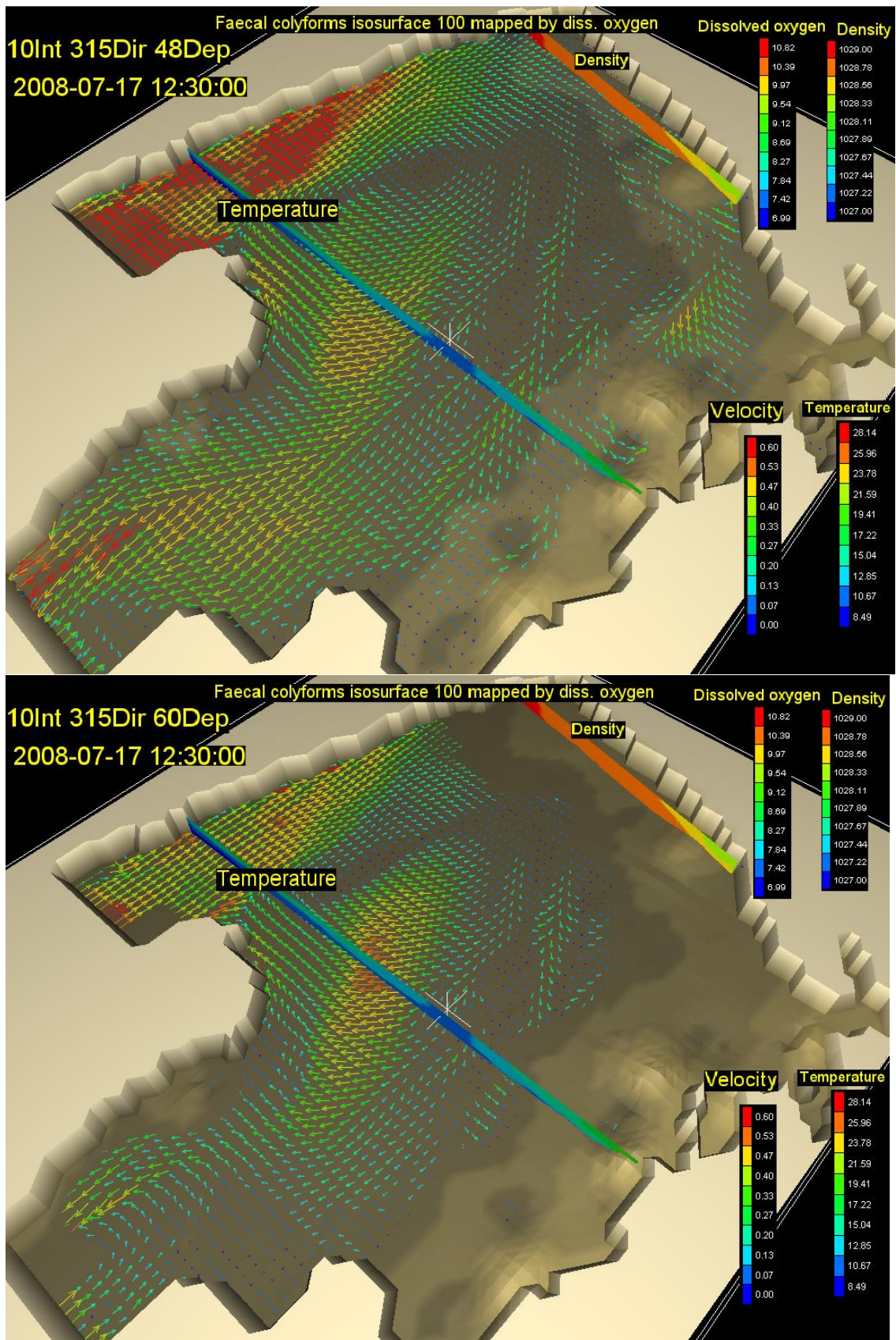


Slika 91. Vektori brzina na površini (gore) i na dubini od 12m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije 100 FC(100 ml)<sup>-1</sup> za 16,5. st za vjetar intenziteta 10 ms<sup>-1</sup> iz smjera 315 stupnjeva





Slika 92. Vektori brzina na dubini od 24m (gore) i 36m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 315 stupnjeva



Slika 93. Vektori brzina na dubini od 48m (gore) i 60m (dolje) s vertikalnim profilom gustoće i temperature, te oblakom onečišćenja koncentracije  $100 \text{ FC}(100 \text{ ml})^{-1}$  za 16,5. st za vjetar intenziteta  $10 \text{ ms}^{-1}$  iz smjera 315 stupnjeva

## ŽIVOTOPIS

Iva Mrša Haber rođena je 15. siječnja 1984. godine u Rijeci. Program opće gimnazije završila je 2002. godine u gimnaziji Andrije Mohorovičića u Rijeci. Te iste godine upisuje diplomski sveučilišni studij matematike i fizike na Filozofskom fakultetu sveučilišta u Rijeci. 2010. godine diplomirala je s diplomskim radom fizika dupina. Iste godine upisuje poslijediplomski doktorski studij na tehničkom fakultetu sveučilišta u Rijeci, modul Ekološko inženjerstvo i zaštita okoliša. Asistent postaje 2011. godine na Fakultetu za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu u opatiji, gdje sudjeluje u nastavi više kolegija na preddiplomskim studijima: *Matematika*, *Održivi razvoj*, *Financijska matematika* i *Aktuarska matematika*. Područje njenog interes u znanstvenom radu je ekološko modeliranje. Autorica je više znanstvenih radova. Udana je i majka troje djece.

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

1. MRŠA HABER IVA, LEGOVIĆ TARZAN, FORGIĆ IRENA. UTJECAJ OTPADNIH VODA RAFINERIJE NAFTE NA KAKVOĆU MORA RIJEČKOGA ZALJEVA. HRVATSKE VODE, 21 (2013): 303-312
2. BOŠNJAKOVIĆ BRANKO, MRŠA HABER IVA. CLIMATE CHANGES AND ADAPTATION POLICIES IN THE BALTIC AND THE ADRIATIC REGIONS, UTMS JOURNAL OF ECONOMICS, 6 (1) (2015): 21-39.
3. KNEŽEVIĆ RADE, MRŠA HABER IVA. POSLJIDICE UTJECAJA PRIRODNOGA HAZARDA NA TURISTIČKI OKOLIŠ. HRVATSKI LIJEČNIČKI ZBOR. HRVATSKA-ZDRAVSTVENI I LIJEČILIŠNI TURIZAM. KNJIGA IZLAGANJA NA ZNANSTVENOM SKUPU. VELI LOŠINJ, 4.-5. RUJNA 2015.
4. MRŠA HABER IVA. BOŠNJAKOVIĆ BRANKO. „INSTITUTIONAL AND TECHNICAL INSTRUMENTS FOR THE PROTECTION OF THE BALTIC AND ADRIATIC MARINE ENVIRONMENT: A COMPARISON OF THEIR IMPLEMENTATION“ ACTA ADRIATICA, 57 (1) (2016).

## PODACI O AUTORU I DOKTORSKOJ DISERTACIJI

### 1. AUTOR

IME I PREZIME	IVA MRŠA HABER, PROF. MAT. I FIZ.
DATUM I MJESTO ROĐENJA	15.SIJEČNJA 1984., RIJEKA
NAZIV FAKULTETA, STUDIJA I GODINA ZAVRŠETKA DIPLOMSKOG STUDIJA	FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI, STUDIJ MATEMATIKE I FIZIKE, 2010
NAZIV FAKULTETA, STUDIJA I GODINA ZAVRŠETKA POSLIJEDIPLOMSKOG STUDIJA	TEHNIČKI FAKULTET U RIJECI, EKOLOŠKO INŽENJERSTVO I ZAŠTITA OKOLIŠA
SDAŠNJE ZAPOSLENJE	ASISTENT, FAKULTET U TURIZMU I UGOSTITELJSTVU, OPATIJA

### 2. DOKTORSKA DISERTACIJA

NASLOV	SIMULIRANJE ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA MORA KVARNERSKOG ZALJEVA IZ PRIOBALNIH ISPUSTA
BROJ STRANICA, SLIKA, TABLICA I BIBLIOGRAFSKIH PODATAKA	
ZNANSTVENO POLJE I GRANA	INTERDISCIPLINARNE TEHNIČKE ZNANOSTI, INŽENJERSTVO OKOLIŠA
VODITELJI RADA	PROF. DR. SC. TARZAN LEGOVIĆ, PROF. DR. SC. JULIJAN DOBRINIĆ
FAKULTET NA KOJEM JE RAD OBRANJEN	TEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI

### 3. OBRANA I OCJENA

DATUM PRIJAVE TEME	3. SRPNJA 2012.
DATUM PREDAJE RADA	
DATUM PRIHVAĆANJA OCJENE RADA	
SSTVA POVJERENSTVA ZA OCJENU	
DATUM OBRANE	
SASTAV POVJERENSTVA ZA OBRANU	
DATUM PROMOCIJE	

Oznaka:

Tek.broj:

UDK:

## SIMULIRANJE ŠIRENJA ONEČIŠĆENJA MORA KVARNERSKOG ZALJEVA IZ PRIOBALNIH ISPUSTA

**Iva Mrša Haber**

Sveučilište u Rijeci  
Tehnički fakultet  
Hrvatska

**Ključne riječi:** onečišćenje priobalnog mora, biološki model, numerički model, simulacija strujanja, Kvarnerski zaljev, kanalizacijski ispust Delta

**Sažetak:** Cilj ovog rada je definiranje biološkog modela sanitarne kakvoće stanja mora u Kvarnerskom zaljevu s posebnim naglaskom na priobalno more grada Rijeke gdje se nalazi komunalni ispust (onečišćivač) i plaže za kupanje i rekreaciju, te računalna simulacija gibanja mora, advekcije i difuzije spregnute s kemijskim reakcijama fekalnih koliforma i fekalnih streptokoka te otopljenog kisika. Za kompjutorsku simulaciju korišten je softver MIKE3 danskog hidrološkog instituta. Period simulacije obuhvaća 36 sati od početka ispusta oblaka onečišćenja, što je dovoljan period za dostatno razrjeđenje koncentracije bakterija. Za spektar vjetrova iz svih osam smjerova tipičnih za Kvarnerski zaljev, te dva različita intenziteta, umjeren i orkanski, forsirano je gibanje morskih masa s realnim rubnim i početnim uvjetima preuzetim iz meteoroloških izvješća i mjernih postaja, uz istovremeno ispuštanje kanalizacijskih voda. Postignuta je mrežna konvergencija, te je zaključeno da treba raditi s dvije mreže: grubom, za područje cijelog zaljeva i finijom za sjeverni dio zaljeva oko ispusta Delta i grada Rijeke.

Kod svih vjetrova oblak kritičnog onečišćenja fekalnih koliforma granične koncentracije od 100 bakterija po 100 ml mora se kreće uglavnom u smjeru paralelnom s obalom i to ili u smjeru istoka ili zapada, ne izlazi na površinu mora, ostaje negdje na dubini od 10 do 20 m ispod površine. To je rezultat strujnog polja gibanja masa Kvarnerskog zaljeva, koje pri buri ima svojstvo da se topli površinski sloj mora istiskuje iz zaljeva kroz Mala i Vela vrata, dok donji hladni slojevi ulaze u zaljev. Pri tome je prosječna vertikalna komponenta brzine uz obalu oko  $1 \text{ mm s}^{-1}$ , dovoljna da nakon 3 sata podigne hladnu vodu uz sjevernu obalu Kvarnerskog zaljeva za 10 m i značajno rashladi površinski priobalni sloj.

Osnovni je zaključak da je gradski kanalizacijski ispust Delta dobro projektiran i izveden, te su sva sanitarna onečišćenja unutar zakonom i pravilnicima ograničenih vrijednosti. Ispust je dovoljno udaljen od obale da zalazi u dijelove zaljeva gdje su lokalne struje uglavnom u smjeru paralelnom s obalom te se oblak onečišćenja ne približava zonama za kupanje i rekreaciju. Čak i ako se poveća protok ispusta za 50% onečišćenja će i dalje biti unutar dozvoljenih granica.

Mentori:

Povjerenstvo za ocjenu:

Povjerenstvo za obranu:

Datum obrane:

Datum promocije:

Rad je pohranjen na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.



Code:

No.:

UDC:

## **SIMULATION OF POLLUTION SPREADING OF THE KVARNER BAY SEA FROM COASTAL SEWAGE**

Iva Mrša Haber

UNIVERSITY OF RIJEKA

FACULTY OF ENGINEERING RIJEKA

CRAOTIA

**Keywords:** coastal sea pollution, biological model, numerical model, flow simulation, Kvarner bay, sewage discharge Delta

### **ABSTRACT**

The goal of this work is the definition of water quality model of Rijeka bay sea, with special emphasis on coastal sea of city of Rijeka where sewage disposal site and recreation and swimming area are situated, as well as computer simulation of the sea motion with advection and diffusion coupled by chemical reactions of fecal coliforms, fecal streptococci and dissolved oxygen. Danish hydrodynamic Institute software MIKE3 is used for computer simulation. The simulation period is 36 hours following the discharge of the pollution plume, which period is sufficient for significant extinction of bacteria. For the wind spectra typical for Rijeka bay, and for two intensities, moderate and high, the forcing of sea flow with real boundary and initial conditions taken from meteorological predictions and measurements and sewage discharge were simulated. Mesh convergence has been obtained, with the conclusion that it is sufficient to work with two mesh sizes: coarse, for the whole bay and fine, for the north part of the bay close to sewage discharge and city of Rijeka.

For all winds, the pollution plume with the concentration more than 100 fecal coliforms and 100 fecal streptococci per 100 ml of water, is conveyed mostly parallel to the coast in direction east or west, it does not rise to surface but stays at 10 to 20 meters below the surface. This is the result of the sea motion of Rijeka bay: bora wind conveys surface water layer out of bay through Small and Big doors while deep cold layers of water enter the bay. Mean vertical velocity component close to coast is about  $1 \text{ mms}^{-1}$  high enough to rise cold water in 3 hours and significantly cools surface coastal sea.

Main conclusion is that the sewage discharge Delta is well designed and constructed and all sanitary pollution are within regulatory given boundaries. The discharge site is far enough from the coast where local streams are mostly parallel to coast and the pollution plume does not come close to swimming and recreational areas. Even if discharge is increased 50% the pollution will be within regulatory given boundaries.

Mentor:

Advisors:

Reviewers:

Presentation:

Degree conferred: