

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Gomboc, J., 2015. Modeliranje transporta kohezivnih sedimentov z modelom PCFLOW3D. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 26 str.

Datum arhiviranja: 01-10-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Gomboc, J., 2015. Modeliranje transporta kohezivnih sedimentov z modelom PCFLOW3D. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 26 pp.

Archiving Date: 01-10-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidat:

JELKO GOMBOC

**MODELIRANJE TRANSPORTA KOHEZIVNIH
SEDIMENTOV Z MODELOM PCFLOW3D**

Diplomska naloga št.: 53/B-VOI

**MODELLING OF COHESIVE SEDIMENT TRANSPORT
WITH THE PCFLOW3D MODEL**

Graduation thesis No.: 53/B-VOI

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 24. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Strani z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Jelko Gomboc izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom
»Modeliranje transporta kohezivnih sedimentov z modelom PCFLOW3D«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.
Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, _____ 2015

(Podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČKI

UDK: 004:532.5(497.4)(043.2)

Avtor: Jelko Gomboc

Mentor: Izr. prof. dr. Dušan Žagar

Naslov: Modeliranje transporta kohezivnih sedimentov z modelom PCFLOW3D

Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij

Obseg in oprema: 26 str., 4 preg., 23 sl., 24 en.

Ključne besede: kohezivni sedimenti, pridnene strižne napetosti, transport sedimentov, model PCFLOW3D.

Izvleček:

Procesi pri transportu kohezivnih in nekohezivnih sedimentov se med seboj pomembno razlikujejo, saj jih pri različnih vrstah sedimenta definirajo različni parametri. Pečovnik (2014) ugotavlja, da model PCFLOW3D ne daje pravih rezultatov pri simulacijah na območjih s kohezivnimi sedimenti. Predlagamo enostavno enačbo, ki je primerna za računanje kohezivnih sedimentov in ne vsebuje parametrov, za katere so potrebne dodatne meritve. Enačbo smo vgradili v model PCFLOW3D in ga preizkusili. Nato smo izračunali kritične strižne napetosti za kohezivne in nekohezivne sedimente in izvedli simulacije s kombinacijami različnih tokovnih slik in parametrov valovanja. Nekohezivni sedimenti se začno privzdigovati pri višini valovanja 0,5 m, kohezivni pa šele pri 0,9 m. Tudi območja in intenziteta privzdigovanja se znatno razlikujeta. Pri danih podatkih izvira večina pridnenih strižnih napetosti iz valovanja, vetrni tokovi prispevalo le zanemarljiv delež. Vetrovi pa vplivajo na smer tokov, ter posledično na smer transporta privzdignjenega materiala. Izvedli smo tudi analizo povprečnih koncentracij privzdignjenega materiala. Rezultati so pričakovani, koncentracije se višajo z naraščanjem višine valov. Območja z večjo koncentracijo privzdignjenega sedimenta se pojavljajo na predelih z večjimi strižnimi napetostmi.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004:532.5(497.4)(043.2)
Author: Jelko Gomboc
Supervisor: Assoc. prof. Dušan Žagar, PhD.
Title: Modelling of cohesive sediment transport with the model
PCFLOW3D
Document Type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 26 p., 4 tab., 23 fig., 41 eq.
Keywords: cohesive sediment, bed-shear stress, PCFLOW3D model, sediment transport

Abstract

The processes in cohesive and non-cohesive sediment transport differ from each other significantly. Different types of sediments are defined by different parameters. Pečovnik (2014) noted that the PCFLOW3D model does not simulate transport of cohesive sediments correctly. We suggest a simple equation which is appropriate for calculating cohesive sediments and does not contain additional measured parameters. We integrated the equation in the PCFLOW3D model and tested the upgraded model. We calculated critical shear stresses for cohesive and non-cohesive sediments and performed simulations with combinations of different circulation patterns and wave parameters. Non-cohesive sediments begin to resuspend at 0.5 m high waves, while cohesive stay at the bottom until waves reach the height 0.9 m. Furthermore, the areas and the intensity of resuspension differ significantly. Using the adopted data, the majority of bed-shear stress is induced by waves, whereas wind-induced currents contribute only an insignificant part. However, the wind direction affects the direction of currents and subsequently the direction in which suspended material is transported. We also depict the depth averaged concentrations of suspended material. The results are close to our expectations; the concentrations are increasing proportionally with wave height. Areas with the highest concentration of suspended sediment occur in places with the largest shear stress.

ZAHVALA

Zahvaljujem se dr. Dušanu Žagarju za izjemno mentorstvo in pomoč pri pisanju diplomske naloge.

Prav tako se zahvaljujem moji družini, prijateljem in sošolcem za podporo v času študija.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2. METODOLOGIJA	3
2.1 Kohezivni sedimenti	3
2.1.2 Lastnosti	3
2.2 Nove enačbe za kohezivne sedimente	4
2.3 Model PCFLOW3D	5
2.3.1 Hidrodinamični modul	5
2.3.2 Transportno disperzijski modul	7
2.3.3 Sedimentacijski modul	7
2.3.4 Biokemični modul	12
2.4 Podatki	13
2.4.1 Podatki modela	13
2.4.2 Vremenske situacije	13
2.4.3 Lastnosti sedimenta	14
4. REZULTATI IN DISKUSIJA	15
4.1 Pridnene strižne napetosti zaradi kombiniranega vpliva tokov in valovanja	15
4.2 Strižne napetosti zaradi valovanja	20
4.3 Globinsko povprečna koncentracija privzdignjenega sedimenta	22
4. ZAKLJUČEK	24
VIRI	25

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1 Hitrost in smer vetra pri posameznih simulacijah cirkulacije	13
Preglednica 2: Privzeta povezava med periodo in višino valovanja	14
Preglednica 3: Podatki o sedimentu	14
Preglednica 4: Maksimalne dejanske strižne napetosti N/m^2 pri posameznih kombinacijah tokov in valov	15

KAZALO SLIK

Slika 1: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri maestralu (6 m/s, smer 260°) in valovih višine 50 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	16
Slika 2: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 50 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	16
Slika 3: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 60 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	17
Slika 4: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 70 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	17
Slika 5: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 80 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	17
Slika 6: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 90 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	18
Slika 7: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 90 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=2,087 \text{ N/m}^2$	18
Slika 8: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 100 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	19
Slika 9: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 80 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=2,087 \text{ N/m}^2$	19
Slika 10: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 90 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	20
Slika 11: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 90 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=2,087 \text{ N/m}^2$	20
Slika 12: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 100 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$	21
Slika 13: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 100 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=2,087 \text{ N/m}^2$	21
Slika 14: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 50 cm, kohezivni sediment.....	22
Slika 15: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 70 cm, kohezivni sediment.....	22
Slika 16: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 80 cm, kohezivni sediment.....	23
Slika 17: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 100 cm, kohezivni sediment.....	23

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

a	referenčna globina ($0.01 \cdot H \leq a \leq 0.1 \cdot H$)
BGK	biogeokemični
c_{gel}	delež materiala na dnu, v obliki gela
$c_{gel,s}$	največji možni delež, ki lahko preide v gel
C	koncentracija lebdečih plavin
C'	Chezyjev koeficient
C_{ae}	ravnotežna referenčna koncentracija
d_{sand}	premer zrna peščenih plavin (62 μm)
D_h	difuzijski koeficient v horizontalni smeri
D_S	reprezentativni premer zrna
D_v	difuzijski koeficient v vertikalni smeri
D_{16}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 16% vseh zrn
D_{50}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 50% vseh zrn
D_{84}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 84% vseh zrn
D_{90}	premer zrna plavin, od katerega je manjših 90% vseh zrn
D_*	parameter zrna plavin
g	težnostni pospešek
h	debelina posameznega sloja
HD	hidrodinamični
p_{clay}	vsebnost gline [%]
R_b	hidravlični radij, ki ga lahko aproksimiramo z H
S_S	relativna gostota delcev plavin, določena kot razmerje med gostotama lebdečih plavin in vode
ST	sedimentacijski
T	transportni parameter
TD	transportno disperzijski

T_w	perioda valov
u, v	horizontalne hitrosti v posameznem sloju
$u_{b,w}$	strižna hitrost zaradi valovanja
u'_*	strižna hitrost ob dnu, ki jo povzročajo tokovi
$u_{*,cr}$	kritična strižna hitrost ob dnu
\bar{u}	povprečna hitrost po vertikali
ν_k	kinematična viskoznost vode
w	vertikalna hitrost
W_h	višina valov
W_s	sedimentacijska hitrost (hitrost usedanja delcev plavin)
W_{S0}	sedimentacijska hitrost brez upoštevanja vpliva koncentracije lebdečih plavin na hitrost usedanja
x, y, z	koordinatne smeri
γ	koeficient, določen z umerjanjem (med 1 in 2)
σ_s	geometrijska standardna deviacija
ζ	kota gladine v določenem času
η	poroznost
θ_c	parameter mobilnosti
μ_B	dinamični koeficient viskoznosti
τ	strižna napetost
$\tau_{b,w}$	strižne napetosti zaradi valovanja
τ_B	Binghamova strižna trdnost
$\tau_{cr,bed}$	kritična pridnena strižna napetost
$\tau_{crit, nekoh}$	kritična strižna napetost nekohezivnih sedimentov
$\tau_{crit, koh}$	kritična strižna napetost kohezivnih sedimentov
τ_y	strižna napetost izražena kot kohezija
ϕ	strižni kot

1 UVOD

Primarno se je potreba po razumevanju transporta sedimentov in plavin pojavila zaradi potreb plovbe, razumevanja erozije in predvsem odlaganja materiala na plovnih poteh, ter za obrambo pred poplavami. Kasnejše ugotovitve kažejo, da so plavine pomembne tudi z ekološkega vidika, saj se lahko na trdne delce vežejo toksične kovine (npr. živo srebro) ali druga onesnažila. V vodno okolje lahko vstopijo tudi delci iz zraka ali delci ki se s padavinami in površinskim odtokom izpirajo s površja in se kasneje z vodnimi tokovi gibljejo po vodnem telesu. Transport plavin se začne, kadar hitrost vode povzroči dovolj velike sile oziroma napetosti ob dnu, da trdne delce spravi v gibanje. Najprej delci drsijo, se kotalijo ali poskakujejo ob dnu; to so rinjene plavine. Če hitrost toka (posledično pa tudi strižne napetosti) ob dnu preseže določeno mejo, vstopijo delci v suspenzijo; te delce imenujemo lebdeče plavine (Žagar in sod., 1997).

V naravi se neprestano menjujejo cikli transporta sedimentov v obliki erozije, prenosa s tokovi, usedanja in odlaganja, konsolidacije ter ponovnega rahljanja in erozije. Gre za zelo kompleksne procese, ki so običajno opisani empirično. Večina raziskav je narejenih v laboratorijih, vendar pa pogosto ne opišejo dejanskega dogajanja v naravi (van Rijn, 1993).

Gibanje vode in plavin so opisali že številni avtorji (Partheniades, 2009; Van Rijn, 1993; Četina, 1992; Žagar, 1999) z različnimi, enostavnimi ali pa tudi zelo kompleksnimi matematičnimi modeli. Večina modelov transporta plavin v morskem okolju kot vsiljevanja upošteva veter, plimovanje, vtoke rek, razliko gostot vode na posameznih lokacijah, gibanje vode pa je tudi glavni vzrok za resuspendiranje (privzdigovanje) sedimentov ob dnu vodnega telesa. Resuspenzija je močno odvisna od lastnosti sedimentov, saj je obnašanje sedimentov odvisno od njihove koherentnosti (vezljivosti), oziroma nekoherentnosti (nevezljivosti). Pri nekoherentnem materialu je resuspenzija odvisna predvsem od velikosti delcev, pri koherentnih materialih pa obstajajo različne definicije. Nekatere se poslužujejo empiričnih koeficientov, druge geomehanskih lastnosti sedimenta. Ena od možnosti je tudi odvisnost kritičnih strižnih napetosti od Atterbergovih meja plastičnosti, s katerimi klasificiramo kohezivne sedimente (Smolar, 2013).

Pri kohezivnih sedimentih se, za razliko od nekohezivnih, poleg strižnega kota, pojavijo dodatne privlačne sile med zrn, imenovane kohezija. Kohezija se izraža kot strižna trdnost pri ničelni normalni napetosti in je značilna za sedimente, ki imajo večji delež gline ali melja. Partheniades (2009) opredeli za kohezivne sedimente tiste, ki imajo premer zrn manjši od 50 μm , medtem ko van Rijn (1993) napiše, da so to sedimenti z deležem zrn premera $<4 \mu\text{m}$ večjim od 10%. Pri kohezivnih sedimentih se posamezna zrna, zaradi privlačnih elektrokemičnih sil, združujejo v skupke (flokule). Te imajo manjšo hitrost usedanja kot posamezna zrna (Smolar, 2013; Pečovnik 2014).

Glavne značilnosti kohezivnih sedimentov so plastičnost, viskoznost in kohezija, zato se pri njihovem privzdigovanju, transportu in usedanju dogajajo drugačni procesi, kot pri nekohezivnih sedimentih. Pri transportu kohezivnih sedimentov moramo upoštevati tako parametre toka, kot tudi konsistenčno stanje zemljine, ki pa je v primeru 100 % zasičenja sedimenta z vodo odvisno še od gostotnega stanja. Zaradi tega so bolj gosti in bolj konsolidirani sedimenti bolj odporni na privzdigovanje. Plastičnost nam pove kako dobro material prenaša deformacije. Pri kohezivnih sedimentih plastičnost pove, kako velike deformacije so sposobni prevzeti skupki zrn, da se še ne pretrgajo (Partheniades, 2009).

Prvo osnovno enačbo za obnašanje kohezivnih sedimentov je po načelu kontinuitete razvil McLaughlin (1961). V enačbah za kohezivne sedimente moramo upoštevati, da njihovega obnašanja ne moremo dovolj natančno opisati s povprečno velikostjo zrna, ampak upoštevamo kohezivne lastnosti sedimentov. Če dodamo v enačbe še parametre toka, dobimo spremenljivke, ki vplivajo na flokulacijo, erozijo, odlaganje in resuspenzijo kohezivnih sedimentov. Pri zapisu enačb ne smemo pozabiti na različne procese, ki vplivajo na spreminjanje velikosti in razpadanje kohezivnih skupkov (Partheniades, 2009)

Za simulacije gibanja vode, sedimentov in tudi obnašanje onesnažil v vodnem okolju je bil Katedri za mehaniko tekočin na UL FGG razvit model PCFLOW3D. Gre za baroklini nelinearni tridimenzionalni matematični model, ki je bil na začetku sestavljen iz hidrodinamičnega in transportno-disperzijskega modula, ki so ju razvili in opisali Četina (1992), Rajar in Četina (1997) in Rajar in sod. (1997). Kasneje je bil model nadgrajen s sedimentacijskim (Žagar 1999) in biogeokemičnim modulom (Žagar in sod., 2007). Model PCFLOW3D omogoča izračune hidrodinamičnih količin zaradi različnih vsiljevanj ob upoštevanju stratifikacije, račun resuspendiranja, transporta in depozicije (usedanja) plavin in nanje vezanih onesnažil (Žagar, 1999). Kljub svoji kompleksnosti pa model vse doslej sedimente obravnava kot nekohezivne, saj v izračunih upošteva samo zrnastostno sestavo (Žagar, 1999; Smolar, 2013).

Kritične strižne napetosti ob dnu se pri kohezivnih in nekohezivnih sedimentih zanesljivo razlikujejo. Model PCFLOW3D upošteva zgolj zrnastostno sestavo sedimentov in je primeren samo za simulacije transporta nekohezivnih sedimentov. Ne upošteva drugih parametrov, ki so osnova za določanje kritičnih strižnih napetosti kohezivnih sedimentov (Smolar, 2013). Pečovnik (2014) piše, da so lahko kritične strižne napetosti z upoštevanjem lastnosti kohezivnih sedimentov tudi petkrat višje. Zato bomo v model vgradili poenostavljene enačbe (Pečovnik 2014 po van Rijn, 1993), ki omogočajo simulacije s kohezivnimi sedimenti in model prilagoditi, da bo uporaben za simulacije kohezivnega in nekohezivnega sedimenta.

Cilj diplomske naloge je torej vgradnja enačb za kohezivne sedimente v model PCFLOW3D in medsebojna primerjava rezultatov simulacij izračunanih po metodi za kohezivne in nekohezivne sedimente na dejanskih podatkih (Koprski zaliv). S pomočjo orodja Surfer bomo grafično prikazali razmerje med dejanskimi in kritičnimi strižnimi napetostmi ob dnu in območja resuspenzije kohezivnih sedimentov v Koprskem zalivu, ob upoštevanju različnih vhodnih podatkov (veter, tokovi in valovi).

2. METODOLOGIJA

2.1 Kohezivni sedimenti

Glavna razlika med grobozrnatimi in kohezivnimi sedimenti je ta, da se pri slednjih pojavljajo močne medzrnske sile, ki nastanejo kot posledica negativnega naboja v glinenih materialih. Medzrnske sile pomembno vplivajo na obnašanje sedimentov med transportom, usedanjem in privzdigovanjem. Obnašanje sedimentov narekujejo tudi medzrnske privlačne sile, ne zgolj gravitacija, kot je značilno za nekohezivne sedimente. Med kohezivnimi in nekohezivnimi materiali ni določena jasna meja, posamezne definicije se med seboj razlikujejo. Običajna klasifikacija označuje material, ki ima znaten delež zrn manjših od 2 μm (gline) kot koheziven, za nekohezivne materiale pa je značilno, da imajo zrna večja od 62 μm . Vmesni material je melj, ki ima velikost zrn 2-62 μm , vendar ga v večini primerov, odvisno od deleža gline, uvrščamo med kohezivne sedimente (Pečovnik, 2014).

2.1.2 Lastnosti

Van Rijn (1993) napiše, da lahko izrazimo odvisnost med strižno napetostjo (τ) in normalno napetostjo (σ), po Coulombovem zakonu:

$$\tau = \tau_y + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

Kjer predstavlja ϕ strižni kot, τ_y pa strižno napetost, ki predstavlja kohezijo sedimenta.

Fizikalno-kemične privlačne sile med dispergiranimi zrnji prevladajo nad gravitacijsko silo, zato nastanejo skupki materiala, imenovani kosmi ali flokule. Kosmi so običajno igličaste oblike in so reda velikosti od nekaj manj kot 1 μm , do nekaj mikrometrov. Lebdeči delci povečajo viskoznost mešanice plavin in kapljevine. Viskoznost predstavlja odziv tekočine na strižno silo (notranje trenje v tekočinah). V mešanici vode in kohezivnih sedimentov se strižna trdnost spremeni. Imenujemo jo skupna strižna trdnost ali Binghamova strižna trdnost (τ_B). Če ima suspendiran kohezivni material višjo strižno trdnost od τ_B , se obnaša kot tekočina, v nasprotnem primeru pa kot trd, plastičen material (Partheniades, 2009).

Plastičnost je lastnost materiala, ki opiše, kakšna je sposobnost materiala, da prenaša različne obremenitve. Pove, kakšno obremenitev je material sposoben prevzeti, ne da bi se »pretrgal« (van Rijn, 1993).

Van Rijn zapiše Binghamovo formulo:

$$\tau - \tau_B = \mu_B \frac{du}{dx} \quad (2)$$

Kjer so:

τ strižne napetosti

τ_B Binghamova strižna trdnost

μ_B dinamični koeficient viskoznosti

$\frac{du}{dx}$ gradient hitrosti

2.2 Nove enačbe za kohezivne sedimente

Poleg številnih enačb za določanje kritičnih strižnih napetosti kohezivnih sedimentov, v katerih se pojavljajo parametri, ki niso na voljo brez obsežnih dodatnih laboratorijskih ali terenskih meritev Pečovnik (2014, po van Rijn, 2013) zapiše tudi poenostavljeni enačbi za kritične pridnene strižne napetosti, kjer nastopata le dva dodatna parametra:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \left(\frac{c_{gel}}{c_{gel,s}} \right) \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} \right)^\gamma \tau_{cr,0} \quad \text{za delce } \leq 62 \mu\text{m (gline)} \quad (3)$$

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \tau_{cr,0} \quad \text{za delce } \geq 62 \mu\text{m (peski)} \quad (4)$$

Kjer je:

p_{clay} vsebnost gline [%]

c_{gel} delež materiala na dnu, v obliki gela

$c_{gel,s}$ največji možni delež, ki lahko preide v gel

d_{sand} premer zrna peščenih plavin (62 μm)

d_{50} premer zrna plavin, od katerega je manjših 50% vseh zrn

γ koeficient, določen z umerjanjem (med 1 in 2)

c_{gel} in $c_{gel,s}$ izračunamo (van Rijn, 2013):

$$c_{gel} = \left(\frac{d_{50}}{d_{sand}} \right) c_{gel} \quad \text{za delce } d_{50} \leq 62 \mu\text{m} \quad (5)$$

$$c_{gel,s} = 1 - \eta \quad (6)$$

Kjer je η poroznost.

Van Rijn (1993) trdi, da na podlagi izvedenega eksperimentalnega dela lahko z vrednostjo $\gamma = 1,5$ dobimo sprejemljive rezultate. Pečovnik (2014) pa je ugotovila, da je enačba (3) zelo občutljiva na parameter γ .

Pečovnik (2014) je združila enačbi (3) in (5) ter zapisala končno poenostavljeno obliko enačbe:

$$\tau_{cr,bed} = (1 + p_{clay})^3 \left(\frac{d_{sand}}{d_{50}} \right)^{(\gamma-1)} \tau_{cr,0} \quad (7)$$

V enačbi ne potrebujemo podatka o poroznosti, ampak samo delež vsebnosti gline (p_{clay}) in srednji premer zrn (d_{50}). Opisana metoda je najbolj primerna za vgraditev v model PCFLOW3D, saj potrebujemo samo parametre, ki jih lahko dobimo iz standardiziranih meritev (Pečovnik, 2014).

Pečovnik (2014) piše, da so pridnene kritične strižne napetosti izračunane po enačbah 3-7 tudi do petkrat večje od izračunanih po metodi za nekohezivne materiale. PCFLOW3D zato na območju s kohezivnimi sedimenti zanesljivo ni dajal pravih rezultatov. Opisano metodo bomo vgradili v model in jo preizkusili na območju Koprškega zaliva.

2.3 Model PCFLOW3D

Model PCFLOW3D je nestacionarni nelinearni baroklini tridimenzionalni matematični model z vgrajeno hidrostatično aproksimacijo. Poleg standardne horizontalne ravnine (smer x - y), ima vgrajene z -koordinate v vertikalni smeri. Sestavljajo ga štiri moduli: hidrodinamični (HD), transportno-disperzijski (TD), sedimentacijski (SD) in biogeokemični (BGK). Podroben opis modulov lahko najdemo v Širca in sod. (1999), Žagar (1999), in Žagar in sod. (2007).

2.3.1 Hidrodinamični modul

Hidrodinamični modul je namenjen določanju polja hitrosti, poteka gladine ter porazdelitve tlaka in gostote. Porazdelitev temperature in slanosti izračunana s TD modulom je upoštevana pri računu gostote. S pomočjo vgrajenih modelov turbulence lahko računamo koeficiente turbulentne viskoznosti in turbulentne difuzije (Kolarič, 2013 po Kovšca, 2007)

Osnovne enačbe modula obsegajo kontinuitetni enačbi za posamezen sloj in kinematični robni pogoj za površinski sloj, dinamične enačbe v x , y in z smereh, advekcijsko-difuzijski enačbi za temperaturo in slanost ter enačbo stanja (Martinčič, 2011).

Izvorno ponorni člen advekcijsko-difuzijske enačbe za temperaturo upošteva izmenjavanje toplote med zrakom in vodo, ter se tudi upošteva pri določanju robnih pogojev. Izvorno ponorni člen enačbe za slanost upošteva vpliv dotoka sladke vode in zmrzovanja vode, ter posledično sproščanja soli (Martinčič, 2011).

Pri baroklinih modelih, kot je PCFLOW3D, je enačba stanja pomembna zaradi vpliva spremenljive gostote na ostale hidrodinamične količine, ki predstavljajo končni rezultat hidrodinamičnega (HD) modula (Četina, 1992)

Nihanje temperature in slanosti v vodnem telesu vpliva na gostoto vode in vpliva na pojav gostotnih tokov. V večjih morjih lahko nihanje temperature, slanosti in posledično gostote privede do premikov večjih vodnih mas (Martinčič, 2011).

Advekcijsko-difuzijski enačbi sta v osnovi del transportno-disperzijskega modula. Zaradi vpliva porazdelitve temperature in slanosti na gostoto, ter posledično na hidrodinamične količine pa ju obravnavamo tudi v hidrodinamičnem (HD) modulu. Celoten sistem enačb v modelu moramo zato reševati sočasno (Žagar, 1999).

2.3.1.1. Modeli turbulence in stratifikacija

Turbulenca vpliva na določanje hitrostnega polja, robnih pogojev, tlakov in višine vode. Nastane zaradi delovanja strižnih sil med tekočino in dnom ter na meji med posameznimi sloji. Z modeli turbulence opišemo njen vpliv, s pomočjo koeficientov turbulentne viskoznosti in difuzije. Koeficienti so odvisni od lastnosti toka (se spreminjajo v času in prostoru), ne pa tudi od lastnosti tekočine. Obravnavani so posebej v horizontalni in vertikalni smeri, ker se lahko koeficienti v vertikalni in horizontalni smeri razlikujejo za več redov velikosti (Žagar, 1999).

Prvotno je bil v model PCFLOW3D vgrajen Koutitasov model turbulence z eno transportno enačbo (samo za koeficiente v vertikalni smeri), v horizontalni pa so bili uporabljeni konstantni koeficienti. Za bolj točne rezultate moramo uporabiti modele z eno ali dvema transportnima enačbama (model Mellor-Yamada in model $k-\varepsilon$).

V modelu PCFLOW3D se zdaj večinoma uporabljata dva modela in sicer (Kolarič, 20113):

- i. Model Mellor- Yamada, 1982 – določanje koeficientov v vertikalni smeri (dve transportni enačbi)
- ii. Model Smagorinsky- horizontalno – določanje koeficientov v horizontalni smeri (Žagar in sod., 1997; Dorić, 2008).

Najnovejši model vgrajen v PCFLOW3D je Smagorinsky-vertikalno. Podroben opis modelov turbulence vgrajenih v model PCFLOW3D lahko najdemo v literaturi (Kovšca, 2007; Dorić, 2008).

2.3.1.2 Metoda reševanja

Za reševanje enačb uporabljamo Eulerjevo metodo kontrolnih volumnov, ki je izpeljana in numerične metode končnih razlik. Definijsko območje v horizontalni smeri razdelimo na mrežo celic dimenzij Δx in Δy . Po globini območje razdelimo na sloje poljubne debeline h , kjer mora biti, z izjemo površinskega sloja debelina h ves čas konstantna za vsak posamezni sloj (Četina, 1992).

Pri reševanju kontinuitetnih in dinamičnih enačb upoštevamo še kinematični robni pogoj za površinski sloj. Na premaknjenih pozicijah potem določimo komponente hitrosti u , v in w , v središčih kontrolnih volumnov pa gostoto in potek gladin. Dobljene hitrosti vstavimo v advekcijsko-difuzijske enačbe, s katerimi določimo porazdelitev temperature, slanosti in koncentracijo onesnažila. Te spremenljivke računamo v središču kontrolnih volumnov, enako kot to velja za gostoto ter gladino vode v površinskem sloju. Pri računu hitrosti v vsaki novi iteraciji upoštevamo spremenjeno gostoto vode, saj porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto vode ter posledično tudi na hitrostno polje (Četina, 1992)

Diferencialne enačbe nato integriramo znotraj kontrolnih volumnov, da dobimo diferenčne enačbe. Za diskretizacijo v posamezni smeri je v model PCFLOW3D vgrajena numerična shema QUICK (drugi red točnosti), ki je zamenjala prvotno vgrajeno hibridno shemo prvega reda točnosti. (Žagar, 1999).

Numerična difuzija je značilen pojav pri metodi končnih volumnov in je posledica napake pri aproksimaciji konvekcijjskih členov. Napaka se z vsako iteracijo večja in lahko pomembno vpliva na rezultate. Da bi te napake zmanjšali zgoščujemo numerično mrežo, z izbiro manjše debeline slojev. Tak ukrep lahko bistveno podaljša čas računanja, vendar z razvojem računalniške opreme ta problem počasi izginja (Četina, 1992; Žagar, 1999).

2.3.2 Transportno disperzijski modul

V HD modulu sta že vgrajeni dve adveksijsko-disperzijski enačbi, ki sta namenjeni računu transporta in disperzije dveh aktivnih konservativnih onesnažil, slanosti in temperature. Enačbi za izračun temperature in slanosti sta v primeru stratificiranega stanja že uporabljeni, zato za račun transporta in disperzije drugih onesnažil potrebujemo dodatne enačbe. Iz tega razloga so bile v TD modul dodatno vgrajene tri adveksijsko-disperzijske enačbe (Žagar, 1999).

Izvorno ponorni člen je odvisen od vrste onesnažila, pri konservativnih onesnažilih ta člen odpade (Žagar, 1999)

Enačbo za aktivna onesnažila rešujemo v okviru HD modula, saj vplivajo na gostoto vode in s tem posledično na hidrodinamične količine. Za pasivna onesnažila pa se uporablja TD modul, kjer imamo na voljo dve metodi reševanja: metodo kontrolnih volumnov (MKV) in metodo sledenja delcev (MSD). V večini primerov za reševanje problemov v hidromehaniki se uporablja MKV, v primeru širjenja onesnažil v vodnem okolju pa lahko MSD daje primernejšo rešitev in boljše fizikalno predstavo (Žagar, 1999).

Metoda kontrolnih volumnov je Eulerjeva metoda, kjer je obravnavan fiksni element prostora, poln gibajoče se tekočine. Pri prehodu z ene k drugim točkam prostora iščemo časovne spremembe izbranih količin. Vektorske in skalarnе količine so podane s vektorskimi in skalarnimi polji (Žagar, 1999)

Metoda sledenja delcev je Lagrangeeva metoda, pri kateri preučujemo delce tekočine z začetnimi lastnostmi, nato pa se z njimi pomikamo po prostoru. Transport zaradi advekcije upoštevamo z deterministično komponento hitrosti (rezultat HD modula). Disperzijo izračunamo po metodi naključnih korakov, kjer dobimo stohastično komponento hitrosti. Pri tej metodi preučujemo časovne spremembe vektorskih in skalarnih količin pri prehodu iz enega delca na drugega (Martinčič, 2011 po Širca, 1992)

Kadar modeliramo nestacionarne in dolgotrajne procese uporabljamo MKV, saj se lahko računski čas z MSD močno podaljša. MKV je tudi bolj primerna pri računanju resuspenzije sedimenta in nastajanju biomase. MSD pa je lahko primernejša rešitev pri širjenju nekaterih onesnažil, npr. nafte (Žagar, 1999)

2.3.3 Sedimentacijski modul

V sedimentacijski modul so bile doslej vgrajene samo enačbe za nekohezivne sedimente, zato pri računanju kohezivnih rezultatov ne daje pravih rezultatov. V model bomo vgradili enačbe za kohezivne sedimente (enačbe 3-7). V nadaljevanju opisujemo prvotni sedimentacijski modul za nekohezivne sedimente.

Transport sedimentov je izrazito tridimenzionalen proces. Obstajajo tudi dvodimenzionalni modeli, kjer s pomočjo dodatnih empiričnih enačb izračunamo koncentracije ob dnu in debelino odloženega materiala, kot rezultat pa dobimo globinsko povprečno koncentracijo lebdečih plavin. Pri tem velja predpostavka, da je razmerje med koncentracijo plavin ob dnu in globinsko povprečno koncentracijo enako razmerju v ravnotežnem stanju. Prav zaradi tega 2D modeli ne dajejo pravih rezultatov, kadar se razmere v toku hitro spreminjajo oziroma je definicijsko območje zelo nepravilne oblike (z empiričnimi enačbami ne moremo dovolj dobro prikazati razporeditve lebdečih plavin po vertikali). V takih primerih je smiselno uporabiti tridimenzionalni model, kjer lahko porazdelitev plavin po globini in debelino odnešenega/nanešenega materiala izračunamo iz koncentracije ob dnu (Žagar, 1999).

S sedimentacijskim modulom modela PCFLOW3D je mogoče računati transport plavin v rekah, jezerih in morju, transport onesnažil (vezanih na delce plavin), pa tudi dolgoročne geomorfološke procese v okolju, zato je vsestransko uporaben v hidrotehnikih. Sedimentacijski modul, poleg osnovnih vplivov v modelu PCFLOW3D (nestacionarnost, možnost upoštevanja dotokov/iztokov, vpliv vetra, plimovanje na odprtem robu, spremenljiva gostota in upoštevanje stratificiranega stanja) upošteva tudi vpliv valovanja na strižne napetosti ob dnu. Prav zaradi kombinacije strižnih napetosti zaradi valovanja in tokov v morskem okolju pogosto pride do resuspenzije materiala z dna (Žagar, 1999).

2.3.3.1 Osnovne predpostavke

Pri računu transporta in koncentracije lebdečih plavin morajo biti izpolnjene sledeče predpostavke:

- sediment ob dnu in lebdeče plavine sta iz enakega materiala,
- resuspenzija je vedno mogoča, saj je na dnu neomejena količina sedimenta (ni trdne podlage),
- dno je iz nekohezivnih materialov (nesprijeti material, neodvisen od kohezivnih sil),
- odnašanje oziroma nanašanje sedimentov ob dnu je dovolj majhno, da ne vpliva na spremembo lastnosti toka,
- koncentracija lebdečih plavin ne vpliva na lastnosti vode (gostota, viskoznost), vpliva pa na hitrost usedanja delcev (Žagar, 1999).

2.3.3.2 Osnovna enačba

Osnovna tridimenzionalna advekcijsko-disperzijska enačba za račun lebdečih plavin v posameznem sloju debelin h :

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) + \frac{\partial}{\partial z}[(w - W_s)hC] = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z}\right) \quad (8)$$

kjer je:

- h debelina posameznega sloja
- D_h difuzijski koeficient v horizontalni smeri
- D_v difuzijski koeficient v vertikalni smeri
- W_s sedimentacijska hitrost (hitrost usedanja delcev plavin)
- C koncentracija lebdečih plavin
- u, v horizontalne hitrosti v posameznem sloju
- w vertikalna hitrost
- x, y, z koordinatne smeri

Enačba se rešuje po istem postopku kot enačbe HD in TD modula, vendar pa za reševanje potrebujemo še sedimentacijsko hitrost W_s in ustrezne robne pogoje, ki so opisani v nadaljevanju (Žagar, 1999).

2.3.3.3 Koeficient turbulentne viskoznosti in difuzije v vertikalni smeri

Kadar imamo obravnavano območje, kjer je razmerje med globino in horizontalnima dimenzijama zanemarljivo majhno (primer jezera ali morja), viskoznost in difuzija v vertikalni smeri močno vplivata na rezultat. V sedimentacijskem modulu lahko upoštevamo vgrajene modele turbulence iz HD modula, ali pa uporabimo dodatni model, ki upošteva parabolično-konstantno porazdelitev koeficientov turbulentne difuzije. Vertikalni koeficient pri tem modelu od dna do polovice vodnega stolpa parabolično narašča, tam doseže maksimalno vrednost, nato pa je do gladine konstanten (Žagar, 1999). Takšno razporeditev vertikalnega koeficienta, po predlogu Lina in Falconerja (1996), opisujeta naslednji enačbi:

$$D_v = 4 \frac{z}{H} \left(1 - \frac{z}{H}\right) (D_v)_{max} \quad \text{za } \frac{z}{H} \leq 0,5 \quad (9)$$

$$D_v = (D_v)_{max} = 0,25 \kappa u_* H \quad \text{za } \frac{z}{H} \geq 0,5 \quad (10)$$

3.3.3.4 Hitrost usedanja delcev

S pomočjo empiričnih enačb lahko sedimentacijsko hitrost W_s izračunamo z naslednjimi podatki:

- struktura zrnivosti plavin D_{16} , D_{50} , D_{84} in D_{90} ,
- gostota vode ρ_v in delcev plavin ρ_s ,
- 3D hitrostno polje in povprečne vertikalne hitrosti (rezultat HD modula),
- kinematična viskoznost vode ν_k , ki je lahko konstanta ali funkcija temperature (Žagar, 1999 povzema po van Rijn, 1984; van Rijn, 1986; van Rijn 1993).

Najprej izračunamo Chezyjev koeficient po naslednji enačbi:

$$C' = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot R_b}{3 \cdot D_{90}} \right) \quad (11)$$

Kjer je:

R_b hidravlični radij, ki ga lahko aproksimiramo z H

D_{90} premer zrna plavin, od katerega je manjših 90% vseh zrn

S pomočjo Chezyevega koeficienta izračunamo strižno hitrost ob dnu, ki jo povzročajo tokovi:

$$u_*' = \left| \frac{\sqrt{g}}{C'} \cdot \bar{u} \right| \quad (12)$$

Kjer je:

g težnostni pospešek

\bar{u} povprečna hitrost po vertikali (dobimo iz HD modula)

Strižne napetosti zaradi valovanja $\tau_{b,w}$ izračunamo po empiričnih enačbah, podanih v literaturi (van Rijn, 1993 in Žagar, 1999) in jih pretvorimo v strižno hitrost zaradi valovanja ob dnu $u_{b,w}$ po enačbi

$$u_{b,w} = \sqrt{\frac{\tau_{b,w}}{\rho}} \quad (13)$$

Podroben opis postopka izračuna dejanskih strižnih napetosti in hitrosti zaradi valovanja je opisan v Žagar (1999). Ti dve količini sta odvisni od višine vala, periode valovanja in od režima toka ob dnu.

V večini primerov je strižna hitrost ob dnu odvisna od kombiniranega vpliva delovanja tokov in valovanja (velik vpliv v jezerih in morju). Pri kombiniranem vplivu velja zakon superpozicije, kar pomeni, da lahko strižni napetosti (oziroma hitrosti) ob dnu zaradi tokov in valovanja vektorsko seštejemo med seboj. Tako dobimo na dnu skupno dejansko strižno napetost (hitrost), ki vpliva na resuspenzijo delcev v vodnem okolju (Žagar, 1999)

Sedimentacijsko hitrost ali hitrost usedanja delcev, je Van Rijn (1993) opredelil z naslednjimi enačbami:

$$W_{S0} = \frac{1}{18} \frac{(S_S - 1) \cdot g \cdot D_S}{v_k} \quad \text{za } D_S \leq 100 \mu\text{m} \quad (14)$$

$$W_{S0} = 10 \frac{v_k}{D_S} \left\{ \left[1 + \frac{0,01 \cdot (S_S - 1) \cdot g \cdot D_S^3}{v_k^2} \right]^{0,5} - 1 \right\} \quad \text{za } 100 \mu\text{m} \leq D_S \leq 1000 \mu\text{m} \quad (15)$$

$$W_{S0} = 1,1 \cdot [(S_S - 1) \cdot g \cdot D_S]^{0,5} \quad \text{za } D_S \geq 1000 \mu\text{m} \quad (16)$$

Kjer je:

W_{S0} sedimentacijska hitrost brez upoštevanja vpliva koncentracije lebdečih plavin na hitrost usedanja

S_S relativna gostota delcev plavin, določena kot razmerje med gostotama lebdečih plavin in vode

D_S reprezentativni premer zrna

v_k kinematična viskoznost vode

Določiti moramo še reprezentativni premer zrna D_S , ki je v večini primerov manjši od srednjega premera zrna D_{50} . Pri tem pa velja relacija:

$$\frac{D_s}{D_{50}} = 1 + 0,011 \cdot (\sigma_s - 1) \cdot (T - 25) \quad (17)$$

Kjer je:

D_{50} srednji premer zrna (premer zrna plavin, od katerega je manjših 50 % zrn)

σ_s geometrijska standardna deviacija

T transportni parameter

Geometrijsko standardno deviacijo iz granulometrične sestave plavin določimo z enačbo:

$$\sigma_s = \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{16}}{D_{50}} \right) \quad (18)$$

Kjer je:

D_{16} premer zrna plavin, od katerega je manjših 16 % zrn

D_{84} premer zrna plavin, od katerega je manjših 84 % zrn

Za končni izračun hitrosti usedanja delcev je uporabljen še popravek enačbe (Oliver, 1961), s katerim dodamo vpliv koncentracije plavin v vodi na hitrost usedanja delcev, saj le ta lahko močno vpliva na kočni rezultat. Že pri enoodstotni koncentraciji plavin se sedimentacijska hitrost zmanjša za okrog 10 % (Žagar, 1999)

$$W_s = (1 - 2,15 \cdot C) \cdot (1 - 0,75 \cdot C^{0,33}) \cdot W_{s0} \quad (19)$$

2.3.3.5 Robni pogoji

Pri reševanju osnovne enačbe za transport plavin, moramo v ST modulu upoštevati štiri vrste robnih pogojev (Žagar, 1999):

- Odprti rob
Če so hitrosti obrnjene navznoter določimo koncentracijo na vtoku s pomočjo meritev ali izračunanih ravnotežnih koncentracij. V nasprotnem primeru hitrosti določamo z enostavno ekstrapolacijo prvega reda.
- Obala
Ker skozi obalo ni pretoka voda in plavin, je odvod koncentracije pravokotno na obalo enak nič.
- Prosta gladina
Ker je na prosti gladini neto pretok v vertikalni smeri enak nič, velja:

$$\left[W_s \cdot C + D_v \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right]_{\zeta} = 0 \quad (20)$$

Indeks ζ pomeni koto gladino v določenem času.

- Dno
Robni pogoj ob dnu predstavlja izvorni/ponorni člen za plavine. Kadar so strižne napetosti ob dnu manjše od kritičnih (oziroma je transportni parameter $T \leq 0$, ponor), pride do usedanja plavin. Če pa so kritične strižne napetosti manjše od dejanskih ($T > 0$, izvor), pa pride do resuspendiranja

usedlih delcev. Količina usedlega ali resuspendiranega materiala je odvisna od koncentracij plavin, sedimentacijske hitrosti in transportne sposobnosti toka ob dnu. Robni pogoj pri resuspenziji delcev predstavlja koncentracija lebdečih plavin na referenčni globini a (Žagar in sod., 2007):

$$C_{ae} = 0,015 \frac{D_{50} T^{1,5}}{a D_*^{0,3}} \quad (21)$$

Kjer je:

C_{ae} ravnotežna referenčna koncentracija
 a referenčna globina ($0.01 \cdot H \leq a \leq 0.1 \cdot H$)
 D_* parameter zrna plavin

Transportni parameter dobimo iz strižnih hitrosti ob dnu (van Rijn, 1993):

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2} \quad (22)$$

Kjer je $u_{*,cr}$ kritična strižna hitrost ob dnu in jo dobimo iz enačbe (van Rijn, 1993):

$$u_{*,cr} = \sqrt{\theta_c \cdot (s_s - 1) \cdot D_{50}} \quad (23)$$

θ_c je parameter mobilnosti (odvisen od parametra zrna D_*)

$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s_s - 1) \cdot g}{v_k^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

2.3.3.6 Račun debeline odnešenega oz. nanešenega materiala

Debelino odnešenega oz. nanešenega materiala na dnu izračunamo s pomočjo masne bilance vtoka in iztoka plavin po prostoru in času (v vsakem kontrolnem volumnu). Račun poteka po stolpcih od zgoraj navzdol, kjer je že upoštevana disperzija in advekcija na vseh stičnih ploščah sosednjih celic ter usedanje iz zgornje v spodnjo celico. Primerjamo količino lebdečih plavin v celici in maso, katero izračunamo iz razlike ravnotežne koncentracije in koncentracije v iste celici, vendar v prejšnjem časovnem koraku. V posamezni celici se vedno poizkuša vzpostaviti ravnotežna koncentracija. Če ravnotežna koncentracija ni dosežena pride do resuspendiranja delcev, v nasprotnem primeru pa do usedanja lebdečih delcev (Žagar, 1999). Podroben opis postopka je opisan v literaturi (Žagar, 1999)

Ponovno poudarjamo, da vsi opisani postopki in enačbe veljajo za nekohezivne sedimente in pri računu za kohezivne sedimente običajno ne dajejo zadovoljivo točnih rezultatov (Pečovnik, 2014).

2.3.4 Biokemični modul

Na podlagi hitrostnih polj, ki jih dobimo iz HD modula, lahko v okviru BGK modula modeliramo transport treh pasivnih onesnažil. Modul je bil razvit za simulacijo treh zvrsti živega srebra (elementarno, nemetilarno in monometil živo srebro), ki jih lahko najdemo v plinasti, raztopljeni ali v partikularni obliki (vezano na delce). Modul na enostaven način upošteva tudi nekatere procese pretvorb (redukcija, oksidacija, metilacija in demetilacija) ter izmenjavo med sedimentom in vodo ter vodo in

zrakom (Žagar in sod., 2007). Podrobnejši opis osnovnega modula lahko najdemo v literaturi (Širca in sod., 2000), nadgradnjo in uporabo pri modeliranju v Sredozemskem morju pa so opisali Žagar in sod. (1997).

2.4 Podatki

Vsi podatki, razen višine valov, so privzeti iz Malačič in sod (2010) in Žagar in sod (2012).

2.4.1 Podatki modela

V modelu PCFLOW3D smo računsko območje razdelili s kvadratno horizontalno mrežo dimenzij približno 40 m, v vertikalni smeri pa na 1 m debele sloje. Na zahodnem odprtem robu smo upoštevali ukleščeni robni pogoj. Za račun hitrostnih polj sta uporabljena modela turbulence Smagorinsky-horizontalno in Mellor-Yamada vertikalno.

2.4.2 Vremenske situacije

Upošteevamo premešano stanje, v vseh simulacijah sta temperatura in slanost vode konstantni: upoštevani sta temperatura vode 10°C in slanost 35 PSU.

2.4.2.1 Veter

V simulacijah smo, enako kot Malačič in sod. (2010) in Žagar in sod. (2012) uporabili štiri vetrove, ki so značilne za Koprski zaliv, dve burji in dva maestrala (B11, B15, M315 in M260, preglednica 1). Maestral je eden najpogostejših vetrov z najdaljšim privetrisčjem, burja pa ima najvišjo hitrost in vetrno energijo in zato povzroča hitrejši tok na gladini in kompenzacijski tok ob dnu (Malačič in sod, 2010).

Preglednica 1 Hitrost in smer vetra pri posameznih simulacijah cirkulacije

	Hitrost vetra $\left[\frac{m}{s}\right]$	Smer vetra $[\circ]$
B11	11	88
B15	15	88
M260	6	260
M315	6	315

2.4.2.1 Višina in perioda vala

Dosedanje raziskave (Malačič in sod., 2010; Žagar in sod., 2012) so z izračunanimi valovi na območju Koprskega zaliva pokazale različno stopnjo privzdigovanja sedimenta z dna z različnimi modeli. S poskusnimi simulacijami smo ugotovili, da opazovane in izmerjene dejanske višine valov, ki nastopajo v Koprskem zalivu in le redko presegajo pol metra v kombinaciji s katerimkoli izbranim tokovanjem ne povzročajo resuspendiranja materiala z dna. Zato smo v nalogi iskali tisto višino valov, ki na danem območju povzroči privzdigovanje. Višine valov smo torej za namene te naloge izbrali ne glede na njihovo realno pojavljanje na tem območju. Modeliranje privzdigovanja sedimenta smo začeli s 0,5 m valovi in jih v vseh simulacijah zviševali za 0,1m, dokler se ne začne privzdigovanje kohezivnega sedimenta. Račune zaključimo pri višini valov 1 m, kjer pričakujemo tudi privzdigovanje kohezivnih sedimentov.

Tudi relacijo med periodo (T_w) in višino valovanja (W_h) smo privzeli; veljala naj bi povezava s periodo 2,5 s pri višini vala 0,5 m višini vala in linearno naraščanje do periode 4,5 s pri višini vala 1 m. Pri tem smo periodo pri večji višini valovanja zelo verjetno nekoliko precenili.

Preglednica 2: Privzeta povezava med periodo in višino valovanja

Wh [m]	Tw [s]
0,5	2,5
0,6	2,9
0,7	3,3
0,8	3,7
0,9	4,1
1	4,5

2.4.3 Lastnosti sedimenta

Podatki o sedimentu so prikazani v preglednici 3. Uporabljeni so podatki iz literature (Malačič in sod., 2010, Žagar in sod., 2012):

Preglednica 3: Podatki o sedimentu

d_{16} [μm]	d_{50} [μm]	d_{84} [μm]	d_{90} [μm]	p_{clay} [%]	d_{sand} [μm]	γ [-]
1,7	7	23	30	18	62	1,5

4. REZULTATI IN DISKUSIJA

Po vgraditvi nove enačbe (7) za kohezivne sedimente smo model PCFLOW3D najprej preverili, če še vedno deluje pravilno za nekohezivne sedimente. Model z novimi enačbami smo pognali s podatkomoma $\gamma = 0$ in $p_{clay} = 0\%$, ter rezultate primerjali z rezultati originalnega modela. Rezultati so bili popolnoma enaki, kar pomeni da model pravilno deluje tudi po vgraditvi nove enačbe (7) za kohezivne sedimente.

4.1 Pridnene strižne napetosti zaradi kombiniranega vpliva tokov in valovanja

Najprej smo po enačbi (7) izračunali kritične strižne napetosti za privzdigovanje kohezivnih in nekohezivnih sedimentov, ter dobili naslednje vrednosti:

- Za nekohezivne: $\tau_{crit, nekoh} = 0,427 \frac{N}{m^2}$ ($\gamma = 0$ in $p_{clay} = 0\%$)
- Za kohezivne: $\tau_{crit, koh} = 2,087 \frac{N}{m^2}$ ($\gamma = 1,5$ in $p_{clay} = 18\%$)

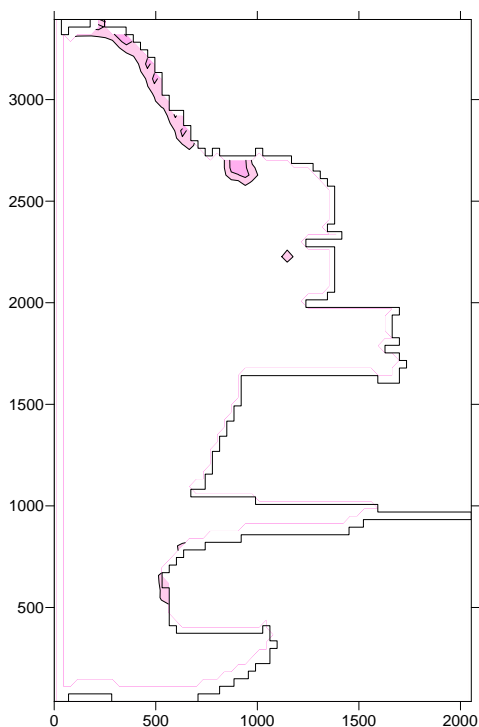
Modelne simulacije smo nato izvedli z vsemi kombinacijami podatkov (cirkulacijskih polj zaradi različnih vetrov in valovanja). Rezultate na območju Koprskega zaliva grafično prikazujemo s slikami, izdelanimi v orodju SURFER 9. Pri vsaki kombinaciji podatkov smo izdelali dve grafiki, na katerih prikazujemo razmerje med dejanskimi in kritičnimi strižnimi napetostmi. Na prvi prikazujemo območje in intenziteto privzdigovanja nekohezivnih sedimentov (spodnja meja predstavlja kritična strižna napetost za nekohezivne sedimente), na drugi pa kohezivnih sedimentov (spodnja meja so kritične strižne napetosti za kohezivne sedimente).

Maksimalne dejanske strižne napetosti pri danih podatkih za vse možne kombinacije ocenaografskih vhodnih podatkov prikazujemo tudi numerično v preglednici 4.

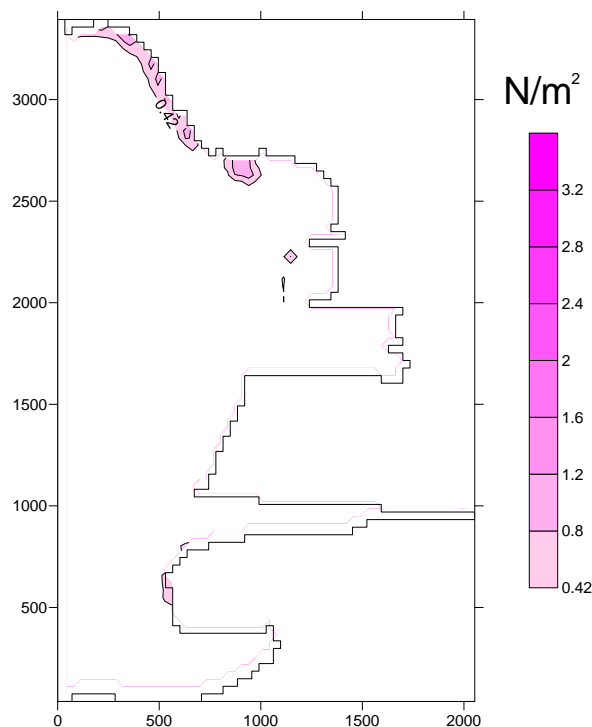
Preglednica 4: Maksimalne dejanske strižne napetosti [N/m^2] pri posameznih kombinacijah tokov in valov

Wh [m]	B11	B15	M315	M260
0,5	0,911	0,948	0,933	0,896
0,6	1,25	1,287	1,272	1,235
0,7	1,602	1,602	1,601	1,602
0,8	2,007	2,044	2,029	1,992
0,9	2,419	2,455	2,441	2,404
1	2,849	2,886	2,871	2,834

Iz preglednice 4 je razvidno, da se rezultati pri konstantni višini vala izrazito ne spreminjajo, največja odstopanja med strižnimi napetostmi pri izbranih vetrovih so reda velikosti 8%, pri višini 0,5 m. Z višino valov pa se delež pridnenih strižnih napetosti zaradi tokov še zmanjšuje. Iz tega sklepamo da pridneni tokovi, ki so posledica izbranih vetrov, ne vplivajo bistveno na strižne napetosti in da je glavni vzrok za resuspendiranje sedimenta oscilatorno gibanje pridnenega sloja vode zaradi valovanja.



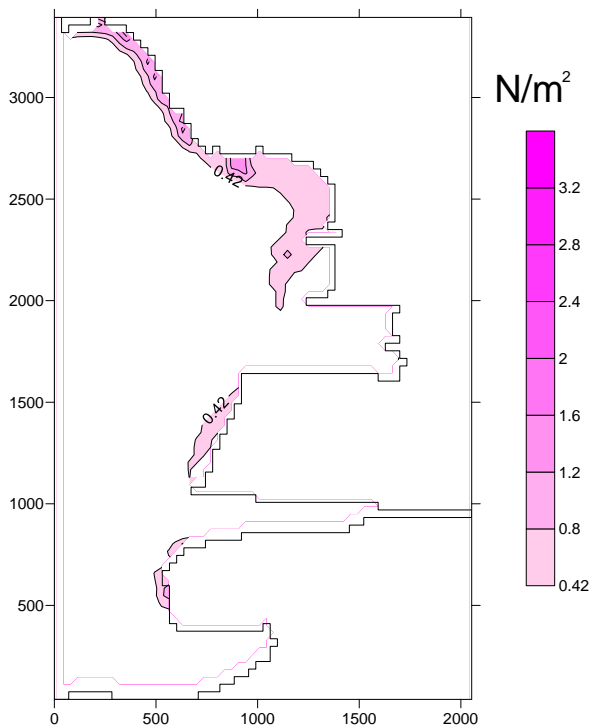
Slika 1: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri maestralu (6 m/s, smer 260°) in valovih višine 50 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$



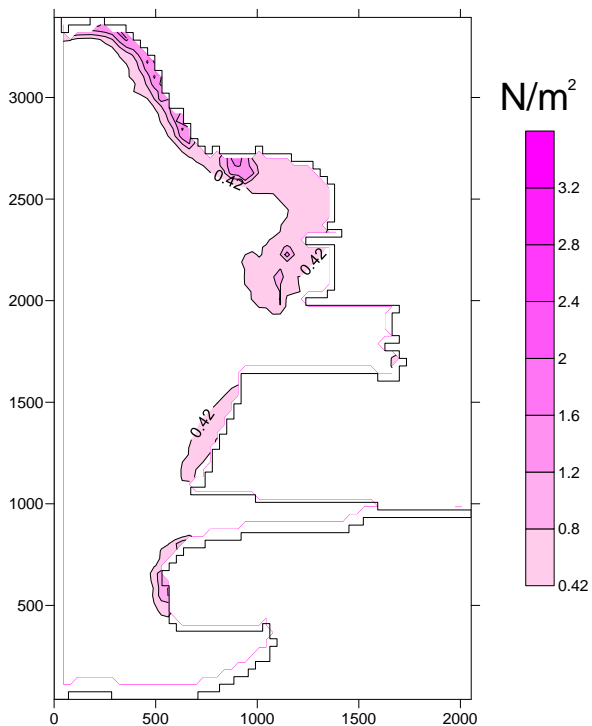
Slika 2: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 50 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$

Tudi iz slik 1 in 2 je razvidno, da cirkulacija pri različnih smereh in jakostih vetra ne vpliva bistveno niti na lokacijo niti na velikost območja privzdigovanja. Ker bistvenih razlik med posameznimi vetrovi ni, v nadaljevanju prikazujemo samo grafike iz simulacij z vetrom B15, pri katerem se zaradi tokov pojavljajo najvišje pridnene strižne napetosti..

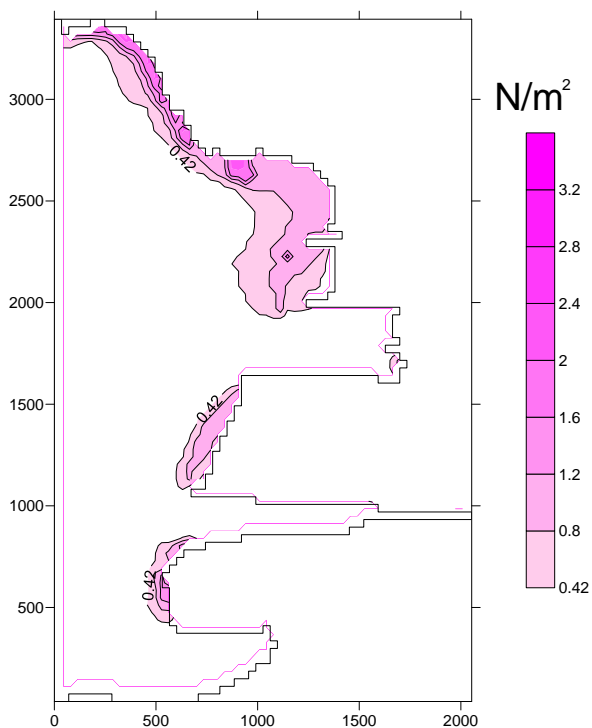
Iz preglednice 4 lahko razberemo tudi, da so pri višina valov 0,8 m dejanske strižne napetosti še pod mejo kritičnih strižnih napetosti za kohezivne sedimente. Ne glede na izbrano smer in jakost vetra se do višine vala nekoliko nad 0,8 m privzdigujejo samo nekohezivni sedimenti. Pri višini vala 0,9 m pa dejanske strižne napetosti presežejo kritične napetosti ob upoštevanju enačb za kohezivne sedimente in se začnejo privzdigovati tudi slednji.



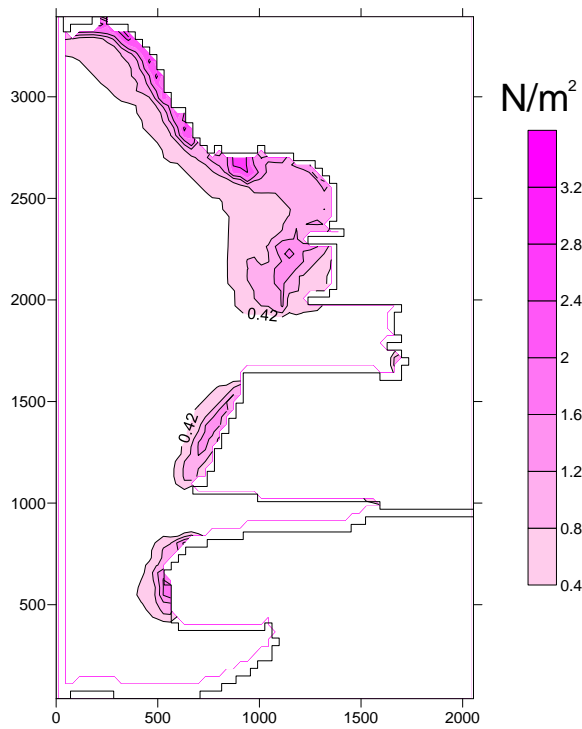
Slika 3: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 60 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$



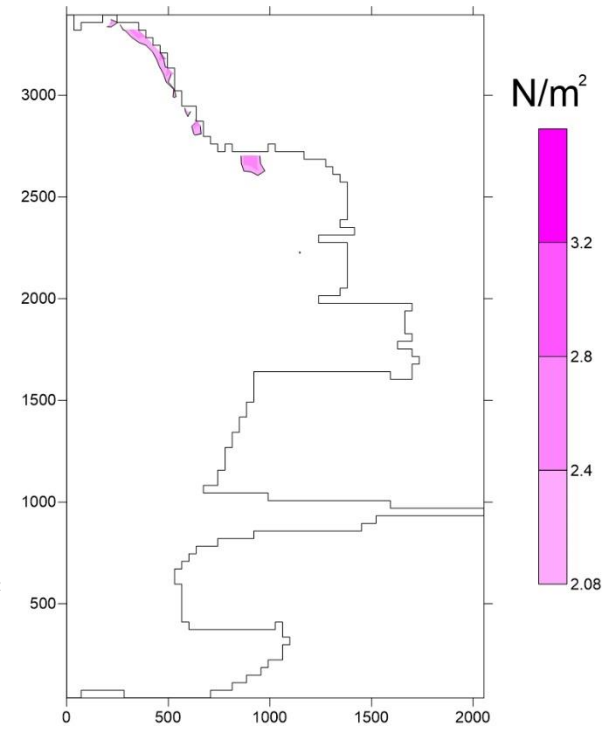
Slika 4: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 70 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$



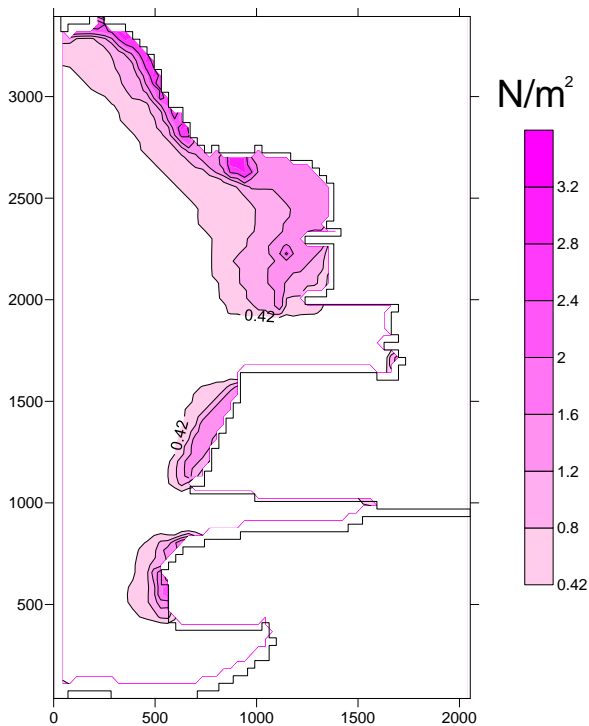
Slika 5: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 80 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$



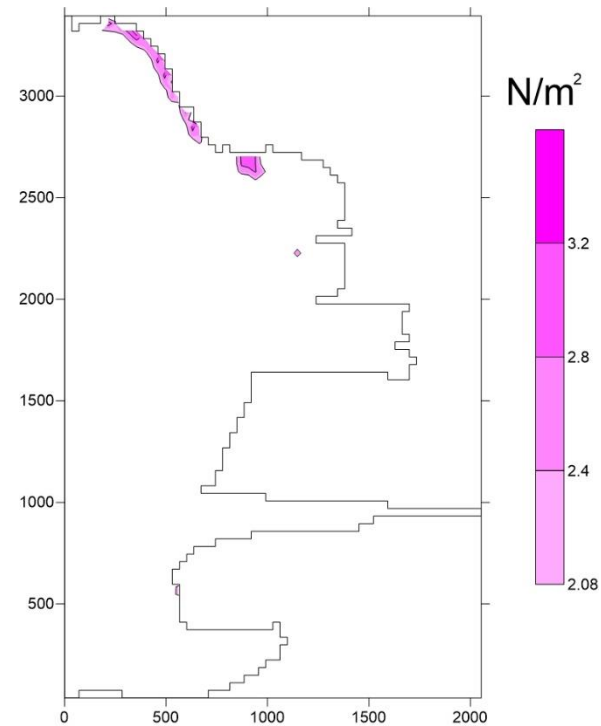
Slika 6: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 90 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)} = 0,427 \text{ N/m}^2$



Slika 7: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 90 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)} = 2,087 \text{ N/m}^2$



Slika 8: Dejanske pridne strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 100 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)} = 0,427 \text{ N/m}^2$

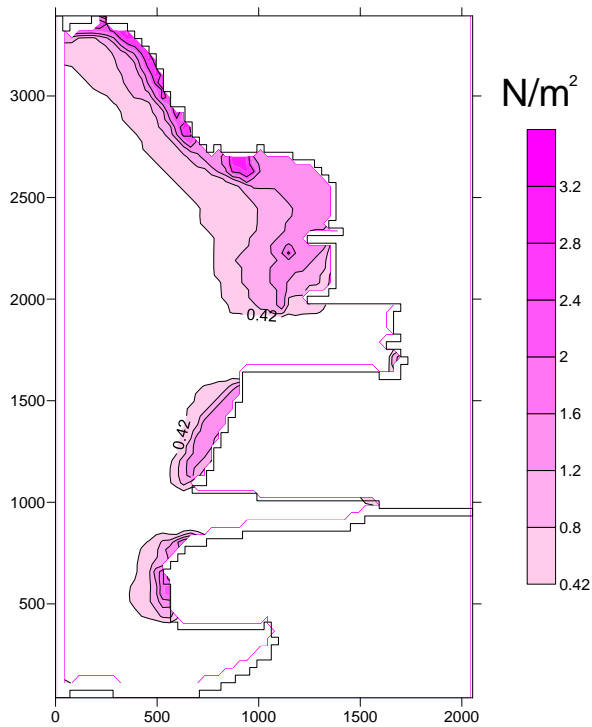


Slika 9: Dejanske pridne strižne napetosti zaradi tokov in valov pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 80 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)} = 2,087 \text{ N/m}^2$

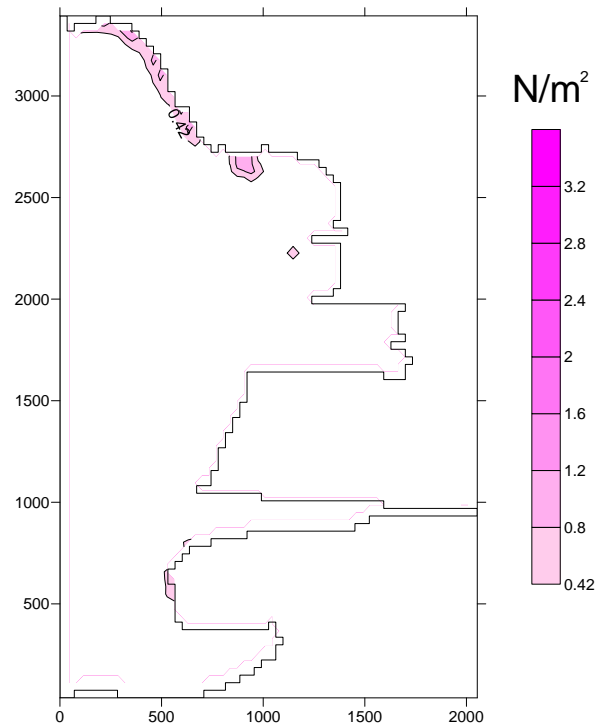
Iz slik 3-9 vidimo, da se z višanjem valovanja bistveno spreminjata območje in tudi intenziteta privzdigovanja materiala z dna. Iz slik 6 in 7 ter 8 in 9 pa je razvidno tudi, da so pomembne razlike med privzdigovanjem kohezivnih in nekohezivnih sedimentov. Medtem ko so kritične strižne napetosti pri nekohezivnih sedimentih presežene na velikem območju v severnem delu Koprskega zaliva in tudi pred južnima pomoloma Luke Koper, so pri kohezivnih sedimentih presežene le na majhnem območju ob obali severnega dela zaliva.

4.2 Strižne napetosti zaradi valovanja

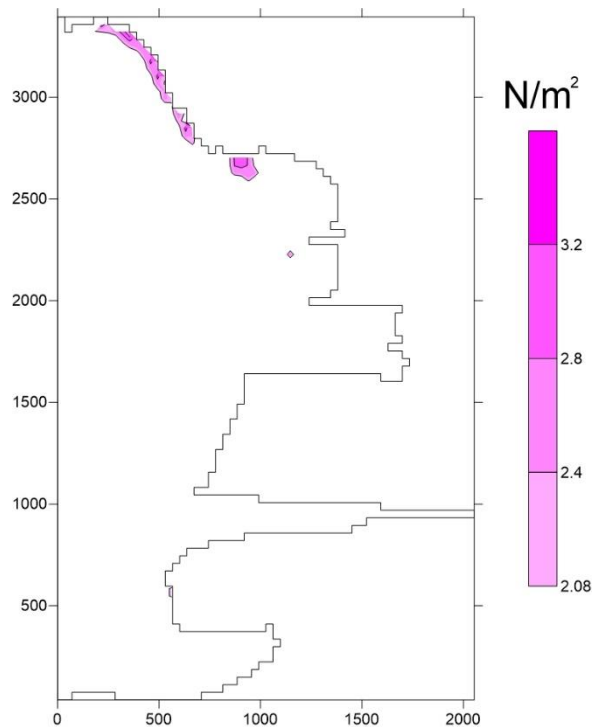
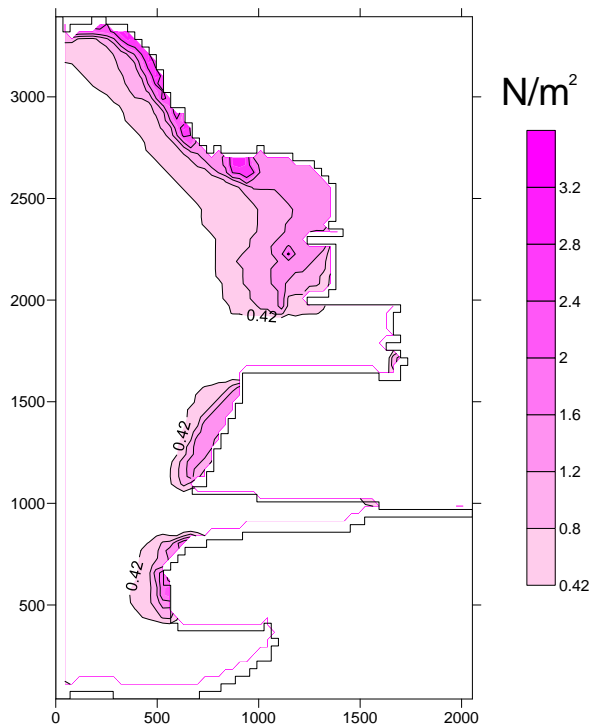
Ker smo že prej ugotovili, da višina vala bistveno vpliva na privzdigovanje, grafično prikazujemo še potek preseženih strižnih napetosti, ki nastanejo izključno kot posledica valovanja, brez vpliva vetrnih tokov.



Slika 10: Dežanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 90 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{cr}=0,427 \text{ N/m}^2$



Slika 11: Dežanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 90 cm, kohezivni sediment, $\tau_{cr}=2,087 \text{ N/m}^2$



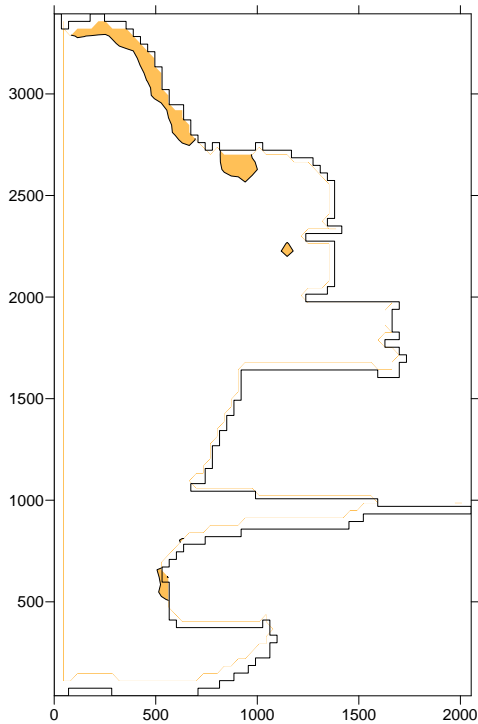
Slika 12: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 100 cm, nekohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=0,427 \text{ N/m}^2$

Slika 13: Dejanske pridnene strižne napetosti zaradi valov pri valovih višine 100 cm, kohezivni sediment, $\tau_{(cr)}=2,087 \text{ N/m}^2$

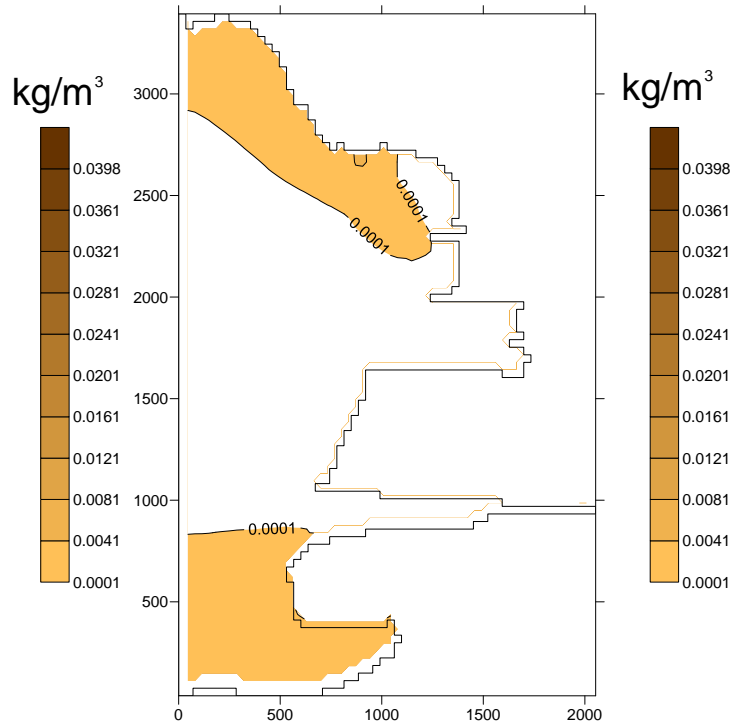
Ko primerjamo slike 6 in 10, 7 in 11 ter 8 in 12 vidimo, da se območja s preseženimi kritičnimi strižnimi napetostmi le malenkostno razlikujejo, kar je še en dokaz, da večino pridnenih strižnih napetosti prispevajo valovi. Numerična določitev prispevka tokov in valov na kritične napetosti ni mogoča, saj se največje vrednosti strižnih napetosti zaradi valov pojavljajo na drugih lokacijah, kot največje strižne napetosti zaradi tokov.

4.3 Globinsko povprečna koncentracija privzdignjenega sedimenta

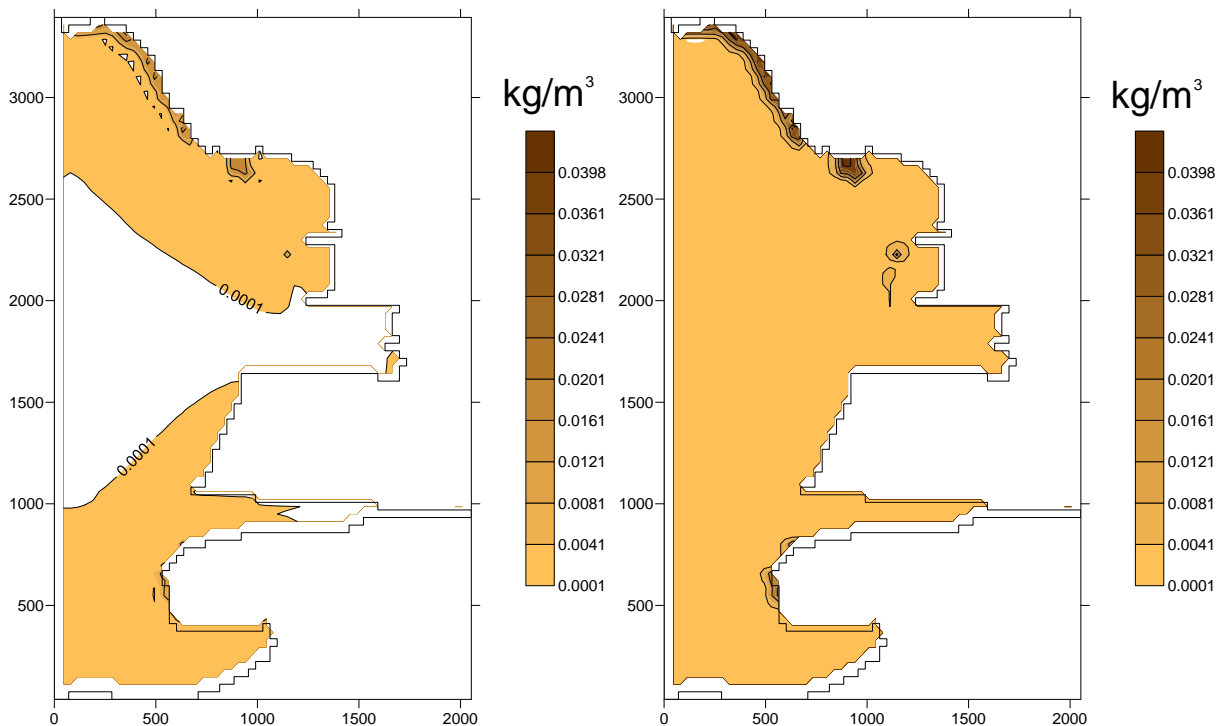
Zanimalo nas je še, kakšne so povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta. Model omogoča izpis koncentracij lebdečega materiala v sloju ob dnu ali povprečnih koncentracij v vodnem stolpcu. Na slikah 14-17 prikazujemo izris povprečnih koncentracij v vodnem stolpcu.



Slika 14: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 50 cm, kohezivni sediment



Slika 15: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 70 cm, kohezivni sediment



Slika 16: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 80 cm, kohezivni sediment

Slika 17: Povprečne koncentracije privzdignjenega sedimenta pri burji (15 m/s, smer 88°) in valovih višine 100 cm, kohezivni sediment

Iz slik 14-17 je razvidno, da so na območjih z večjimi dejanskimi strižnimi napetostmi večje tudi povprečne koncentracije privzdignjenega materiala. Koncentracije lebdečega materiala in velikost območja se veča z višino valov, kar je pričakovan rezultat. Na prostorski potek koncentracij vpliva še transport sedimentov, ki je pa odvisen od tokov.

5. ZAKLJUČEK

Model PCFLOW3D smo nadgradili z enačbami, ki omogočajo upoštevanje (višjih) kritičnih strižnih napetosti pri kohezivnem sedimentu. Potrdili smo hipotezo, da se rezultati simulacij z upoštevanjem parametrov kohezivnega sedimenta pomembno razlikujejo od rezultatov originalnega modela. Ne glede na enostavnost vgrajenih enačb je to pomemben korak v razvoju sedimentacijskega modula modela PCFLOW3D, ki je z vgrajenimi izboljšavami postal bolj vsestransko uporaben. Na območjih, kjer je bilo z modelom izvedenih največ simulacij (Tržaški in Koprski zaliv) se namreč na dnu morja nahaja sediment, ki po zrnavostni sestavi in vsebnosti gline spada pretežno med kohezivne materiale. V model bi bilo mogoče vgraditi tudi druge enačbe za simulacijo kohezivnih sedimentov, ki pa zahtevajo dodatne, večinoma merjene parametre, ki pogosto niso na razpolago.

VIRI

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju (Three-dimensional mathematical baroclinic model for flow computation in lakes and the sea). Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Četina).

Dorić, E. 2008. Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba E. Dorić): 75 str.

Kolarič, M. 2013. Večfrakcijski pristop k modeliranju transporta plavin. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kolarič): 54 str.

Kovšca, J. 2007. Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Kovšca): 135 str.

Lin, B., Falconer, R.A. 1996. Numerical modelling of three-dimensional suspended sediments for estuarine and coastal waters. *Journal of Hydraulic Research* 34, 4: 435-436.

Malačič, V., Čermelj, B., Bajt, O., Ramšak, A., Petelin, B., Vodopivec M. 2010. Cirkulacija in okoljske razmere v Koprskem zalivu in Luki Koper. Interno fazno poročilo 3/113. Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja: 35 str.

Martinčič, U. 2011. Modeliranje izmenjave živega srebra med sedimentom in vodo v Tržaškem zalivu. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Martinčič): 93 str.

Parthenaides, E. 2009. Cohesive Sediments in Open Channels: Properties, transport and applications. United States of America, Elsevier Inc: 346 str.

Pečovnik, U. 2014. Procesi pri transportu kohezivnih sedimentov. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Pečovnik): 52 str.

Rajar, R., Četina, M. 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling: An Experience. *Ecological Modelling* 101: 195-207.

Rajar, R., Četina, M., Širca, A., 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling: Case Studies. *Ecological Modelling* 101: 209–228.

Smolar, J. 2013. Kritična strižna napetost koherentnega morskega sedimenta. Seminarska naloga doktorski študij – Grajeno okolje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 17 str.

Širca, A., Rajar, R., Harris, R., Horvat, M. 1999. Mercury transport and fate in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) – a twodimensional modelling approach. *Environmental Modelling and Software* 14: 645–655.

van Rijn, L. C. 1990. Principles of Fluid Flow and Surface Waves in Rivers, Estuaries, Seas and Oceans. Amsterdam, Aqua Publications: 335 str.

Van Rijn, L. C. 1993. Principles of sediments transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam Aqua publications.

Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v tržaškem zalivu. Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar): 101 str.

Žagar, D., Rajar, R., Četina, M., 1997. Tridimenzionalni model za račun transporta lebdečih plavin v površinskih vodah. Ljubljana. Acta Hydrotechnica 15/17:2.

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G., Četina, M. 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. Marine Chemistry 107: 64–88.

Žagar, D., Ramšak, V., Petelin, B., Malačič, V. 2012. Sediment transport modelling in the Koper bay – Northern Adriatic Slovenia. V: IAHR 2nd European Congress Munich, 27.-29.6.2012. Munich: IAHR, 2012, str. 1-6, ilustr.

Žagar, D., Ramšak, V., Jeromel, M., Perkovič, M., Ličer, M., Malačič, V. 2014. Modelling sediment resuspension caused by navigation, waves and currents (Gulf of Trieste, Northern Adriatic). V: Almedia, A. (ur.). Waterengineering and research: proceedings of University of Porto, Porto, Portugalska, 2014: 1-9 str.