



R 1.61.

MJERENJE MORSKIH STRUJA I VALOVA U ŠIBENSKOM KANALU

Damir Bekić, Dalibor Carević, Gordon Gilja, Neven Kuspilić

SAŽETAK: U radu se prikazuje metodologija mjerenja morskih struja i vjetrovnih površinskih valova, te način obrade sirovih podataka i rezultati obrade za mjerenje ADCP strujomjerom s morskog dna. Morske struje i valovi mjereni su u priobalnom području kraj Šibenika ispred Zablaca na dubini od 15 m. Tijekom mjesec dana dobiveni su sirovi podaci o brzini morskih struja, oscilacijama tlaka na dnu vodenog stupca i oscilacijama visine vodenog stupca. Kao rezultat obrade dobiveni su statistički podaci morskih struja i površinskih vjetrovnih valova na mjernoj poziciji. Kako morske struje izravno sudjeluju u pronosu eventualnih onečišćenja, važno ih je poznavati pri procjeni utjecaja mogućih zahvata u prostoru na ekološko stanje mora. Mjerenjem ADCP strujomjerom prikupljene su vremenske serije morskih struja i valova što omogućuje obuhvatniji pregled i spoznaju o oscilacijama mora u priobalnom području.

KLJUČNE RIJEČI: ADCP, morske struje, tlak na dnu, fizička površina mora, površinski vjetrovni valovi

MEASUREMENTS OF SEA CURRENTS AND WAVES IN ŠIBENIK CHANNEL

SUMMARY: This paper presents methodology of measurement of sea currents and surface waves, processing of „raw“ data and results of ADCP survey from the sea bed. Measurements of sea currents and waves were made in coastal zone of Zablacé near town Šibenik at the 15 m depth. During a month period recordings collected „raw“ data on sea currents, bottom pressure and surface tracks. Data processing resolved specific statistical parameters of sea currents and surface waves at the designated location. As the sea currents are actively involved in the transport of possible pollutions, the knowledge of their behaviour is of great interest in an assessment of the impact of human activities on costal zone environment. Measurements of time series of sea currents and waves by ADCP from sea bottom provide comprehensive overview and knowledge of sea oscillations in costal zone.

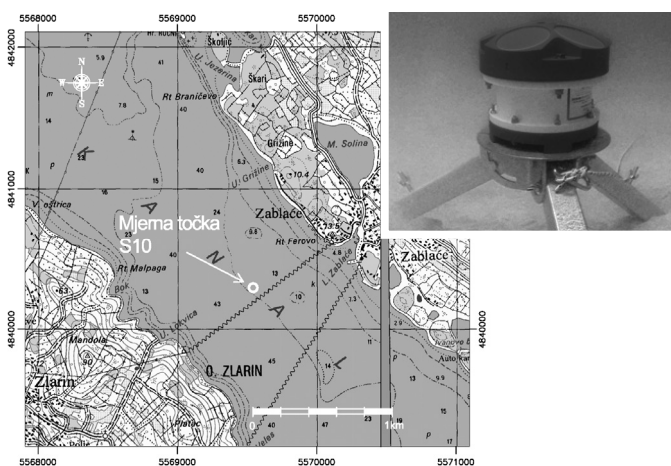
KEYWORDS: ADCP, sea currents, bottom pressure, sea surface, wind-generated waves

1. UVOD

Morske struje predstavljaju usmjereno gibanje vodene mase unutar vodenog stupca mora. U nekom području mora struje općenito nastaju pod utjecajem različitih sila uzročnica, a čine ih gradijentne struje, struje morskih dobi te struje koje nastaju pod utjecajem vjetra na površini mora. U određenom morskom bazenu na struje utječu i veličina bazena te topografija obale i morskog dna. Poznavanje morskih struja i valova u nekom akvatoriju značajno je za veliki broj djelatnosti, a kako su morske struje izravni nositelji eventualnih onečišćenja važno ih je poznavati kako bi se mogao procijeniti utjecaj gospodarskih aktivnosti na ekološko stanje mora.

Kontinuirana mjerenja morskih struja postavljanjem akustičkog Dopplerovog strujomjera (ADCP-Acoustic Doppler Current Profiler) na morsko dno danas je već standardna metoda mjerenja u Jadranskom moru (MZOPU, 2009). Mjerenja morskih struja i valova ADCP strujomjerom također su uspoređena i verificirana s rezultatima matematičkih modela u sjevernom dijelu Jadranskog mora (Janeković i Tudor, 2005, Book i drugi, 2008). Osim mjerenja vremenskih serija u jednoj točki postavljanjem na morsko dno, u sklopu projekta PRISMA1 (Programma di Ricerca e di Sperimentazione per il mare Adriatico) izrađena su i mjerenja prostornih serija u Jadranskom moru postavljanjem ADCP strujomjera na brodicu koja su obrađena u radu (Ursella i Gačić, 2001). Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu izvršio je mjerenje morskih struja i valova u Šibenskom kanalu ispred Zablaca (Slika 1). Cilj ovih mjerenja bila je dobivanje osnovnih karakteristika oscilacija mora u Šibenskom kanalu za kratkoročnu vremensku situaciju, korištenjem suvremene i pouzdane mjerne tehnike (Strong, 2000).

ADCP strujomjerom izvršeno je kontinuirano mjerenje morskih struja, oscilacije tlaka na dnu i visine vodenog stupca u vremenskom periodu od 30 dana na poziciji S10 (Slika 1). „Sirovi“ ADCP podaci iz mjerenja početno su obrađeni korištenjem računalnog programa „WavesMon“, a zatim prikazani korištenjem MathLab programskog paketa. Obradom podataka dobiveni su statistički podaci morskih struja i površinskih vjetrovnih valova na mjernejoj točki S10.



Slika 1. Lokacija mjerne točke S10 u Šibenskom kanalu ($f=43.42^\circ$, $l=15.51^\circ$).

2. METODOLOGIJA

2.1. Program mjerenja

Pri mjerenju je korišten ADCP strujomjer tipa RDI Monitor frekvencije 600 kHz koji je postavljen na morsko dno na mjernejoj točki S10 na dubini od 15 m. Prikupljanje vremenskih serija morskih struja i valova izvršeno je za dva vremenska razdoblja: za Period 1: 16.10.-25.11.2009. te za Period 2: 09.04.-24.04.2010. Tijekom navedenih perioda prikupljene su oscilacije tlaka na dnu vodenog stupca i oscilacije visine vodenog stupa, te brzina i smjer strujanja po visini stupca vode u ćelijama visine 50 cm.

„Sirove“ vrijednosti sa strujomjera pohranjuju se u internoj memoriji dok je uređaj postavljen na dno. Strujomjer je postavljen na postolje koje omogućuje vertikalnu orijentaciju uređaja (Slika 1 desno). Mjerenje profila brzina vršeno je svakih 1 sat tijekom 5 minuta s frekvencijom uzorkovanja od 1 Hz. Mjerenje površinskih vjetrovnih valova izvršeno je u razmacima od 1 h tijekom 10 minuta s frekvencijom uzorkovanja od 2 Hz.

2.2. Obrada podataka

Korištenjem računalnog programa „WavesMon“ izmjereni „sirovi“ podaci o brzini i smjeru struje te oscilacijama tlaka na dnu preračunati su u slijedeće parametre:

- smjer i brzina morske struje po visini vodenog stupca (parametri brzine),
- značajne valne visine, vršni periodi, srednji smjerovi valova (valni parametri),
- dubinu vode.

Oscilacije površine mora dobivaju se direktno iz obrade mjerenja visine vodenog stupca i iz mjerenja tlaka na dnu. Valna visina određuje se na osnovu jedne ili više metoda: iz brzine struje, iz visine stupca vode, te iz tlaka na dnu (Teledyne, 2008). Prethodna iskustva (Birch i drugi, 2004) pokazala su da je točnost mjerenja oscilacija visine stupca vode oko 3.5 puta manja od visine mjerne ćelije. Mjerna ćelija od 50 cm daje približnu točnost mjerenja visine vodenog stupca od 15 cm (prema Birch i drugi, 2004), što nije dostatno za uzorkovanje čitavog spektra oscilacija površine mora, oscilacije površine mora dobiveni su iz mjerenja tlaka na dnu vodenog stupca a valni parametri određeni su iz mjerenja brzine struje. Valni parametri dobiveni su iz orbitalne brzine vodnih čestica ispod površinskih vjetrovnih valova, koje se potom preko linearne (Airyeve) valne teorije pretvaraju u valne parametre (Le Mehaute, 1976).

Svi proračunati parametri su vremenske serije definirane kao osrednjene vrijednosti u

periodu uzorkovanja, odnosno za struje 5 minuta ($\overline{V_{5\text{min.}}}$), za valove 10 minuta ($\overline{H_{s\ 10\text{min.}}}$),

($\overline{T_{p\ 10\text{min.}}}$, $\overline{\theta_{10\text{min.}}}$), i za visinu stupca vode 10 minuta ($\overline{d_{10\text{min.}}}$). To znači da kod morskih struja svakoj vremenskoj jedinici (1h) pripada vertikalni profil vektora brzine diskretizacije 50 cm. Za svaku dubinu može se izdvojiti vremenska serija vektora brzine na toj

dubini, (npr. $\overline{V_{5\text{min.}} = f(t)}$, za dubinu 2 m). Ukoliko se za svaku vremensku jedinicu (1h) izračuna rezultantni vektor po dubini, dobije se vremenska serija rezultantnih vektora po

dubini: $\overline{v_{5\text{min.}}^{\rightarrow \text{depth}_{\text{avg}}} = f(t)}$. Kod valova je svaka vremenska jedinica (1h) okarakterizirana

jednim setom valnih parametara (značajna valna visina, vršni period i srednji smjer). Vremenske serije vektora brzina, valnih parametara i dubina su obrađeni pomoću programa MATLAB, te su načinjeni sljedeći prikazi:

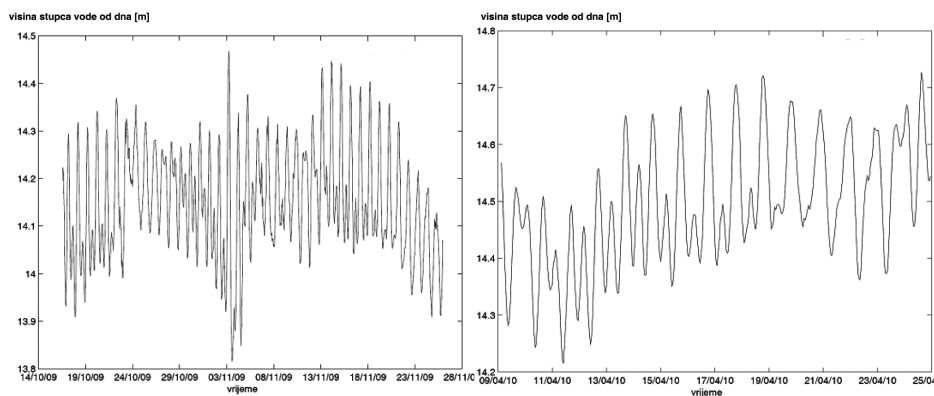
- Oscilacije *površine mora*
- Oscilacije *parametara površinskih vjetrovnih valova* (satni vektori značajne valne visine, satne vrijednosti značajne valne visine, satne vrijednosti vršnog perioda)
- Oscilacije *satnih vektora brzina* (za dubine $d=2, 7, 12$ m i vektori dobiveni osrednjavanjem po dubini)

Za oznake smjera korištena je konvencija da je smjer morske struje onaj smjer u kojem je usmjeren vektor brzine morske struje, a smjer valova je smjer dolaska valova.

3. REZULTATI MJERENJA

3.1. Oscilacije površine mora

Mjerenjem tlaka na dnu dobivene su oscilacije površine mora koje su prikazane posebno za Period 1 i za Period 2 (Slika 2). Tijekom Perioda 1 (Slika 2a) uočavaju se relativno nagle promjene u razini mora za dane 22.-23.10.2009., te za dan 03.11.2009. Tijekom Perioda 2 (Slika 2b) ne mogu se uočiti relativno nagle promjene u oscilacijama površine mora.



a) Period 1: 16.10.-25.11.2009.

(b) Period 2: 09.04.-24.04.2010.

Slika 2. Oscilacije površine mora za mjernu točku S10.

3.2. Vremenske serije parametara površinskih vjetrovnih valova

Proračunati parametri površinskih vjetrovnih valova su 10-minutni srednjaci: značajna

valna visina $\overline{H_{s,10\text{min.}}}$ (m), vršni period $\overline{T_{p,10\text{min.}}}$ (s), te srednji smjer gibanja valova $\overline{\theta_{10\text{min.}}}$ (°). Konfiguracija mjernog uređaja RDI Monitor 600 kHz omogućuje mjerenje perioda većih od 2s, pa su najmanje izmjerene vrijednosti $T_p=2\text{s}$. Vremenske serije značajne valne visine i vršnog perioda prikazane su za svaki sat mjerenja (Slika 3). Također su prikazani vektori čiji je smjer srednji smjer gibanja valova a vrijednost značajna valna visina, a

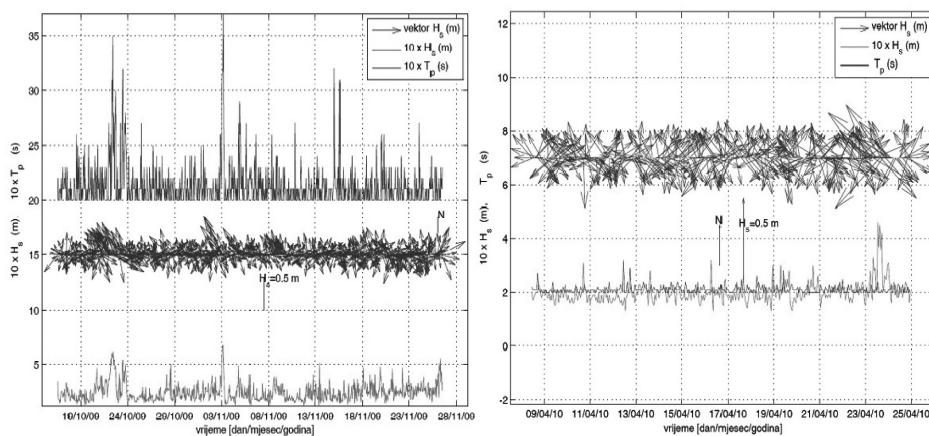
označeni su kao „vektor H_s “ (Slika 3). Radi zornijeg prikaza Period 2 (Slika 3b) prikazan je na drugačijoj skali.

Iz prikazanih valnih parametara mogu se za Period 1 (Slika 3a) izdvojiti slijedeće valne situacije:

- 22.10.2009., $H_s=0.61\text{m}$; $T_p=2.4\text{s}$; smjer SE,
- 23.10.2009., $H_s=0.52\text{m}$; $T_p=2.9\text{s}$; smjer SE,
- 03.11.2009., $H_s=0.68\text{m}$; $T_p=2.9\text{s}$; smjer SE,

te za Period 2 (Slika 3b) slijedeća valna situacija:

23.04.2010., $H_s=0.46\text{m}$; $T_p=2.4\text{s}$; smjer SE.



(a) Period 1: 16.10.-25.11.2009.

(b) Period 2: 09.04.-24.04.2010.

Slika 3. Kartografski prikaz ispitivanja kakvoće mora na području zapadnog dijela Rijeke (Kantrida – istok)

3.3. Satni vektori brzina strujanja

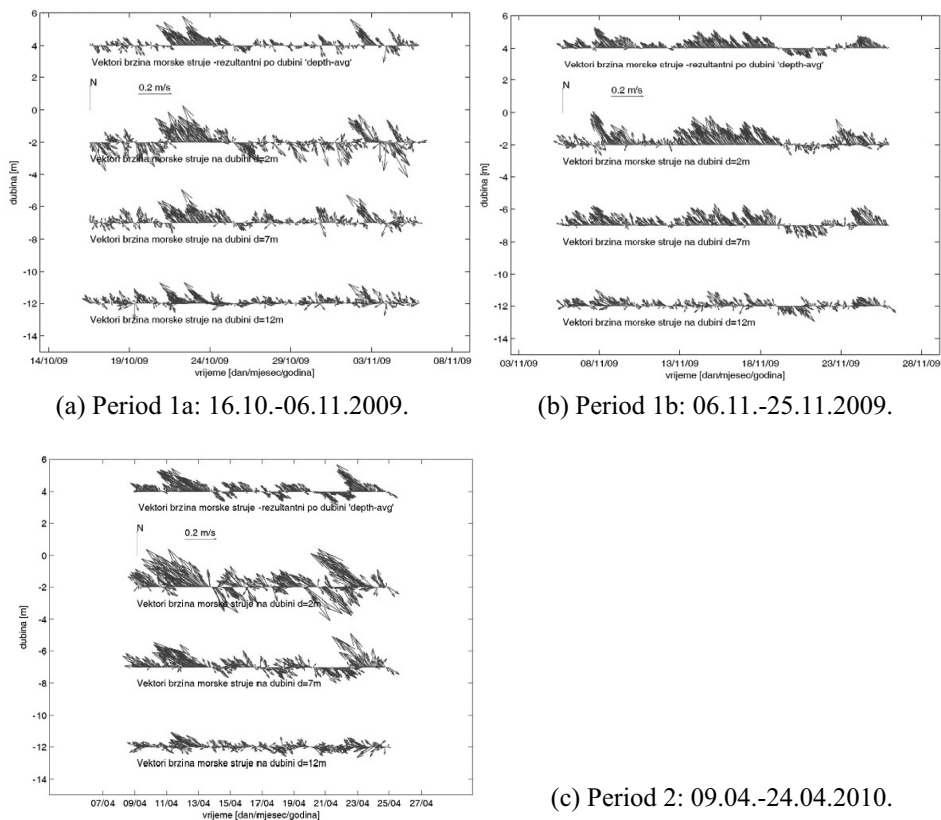
Satni vektori brzina strujanja predstavljaju vremensku seriju vektora osrednjenih u vremenu uzrokovanja od 5 minuta ($V_{5\text{min.}}^{\text{dubina}}$). Satni vektori strujanja prikazani su po dubinama

2, 7 i 12 m, te za rezultatni vektor osrednjen po dubini ($V_{5\text{min.}}^{\text{depth_avg}}$).

Satni vektori za Period 1 prikazani su na dva dijagrama (Slika 4a i Slika 4b), a Period 2 na jednom dijagramu (Slika 4c). Uočava se da je orijentacija vektora brzina u smjeru prostiranja Šibenskog kanala NW-SE za sve dubine $d=2, 7$ i 12 m. Rezultatni vektor osrednjen po dubini ukazuje da je dominantno strujanje u NW smjeru, osim za periode 19.-20.11.2009. te 21.04.2010. kada prevladava strujanje u SE smjeru.

Obzirom na raspored po dubini uočava se da se najjače strujanje javlja u površinskom sloju i da jenjava s dubinom. Najjača strujanja su u NW smjeru za dane 22.-23.10.2009.,

za 03.11.2009., za 11.04.2010., te za 23.04.2010. Uočava se homogen raspored smjera strujanja po dubini pri površinskom strujanju u NW smjeru. Smjer strujanja po dubini je nehomogeno raspoređen pri snažnijem površinskom strujanju u SE smjeru za dane 22.10.2009., 29.-31.10.2009., 03.11.2009., 21.04.2010.



Slika 4. Satni vektori morskih struja za dubine $d=2,7$ i 12m i za vremensku seriju rezultantnih vektora po dubini ('depth-avg') za mjernu točku S10.

Usporedbom oscilacija površine mora dobivenih iz mjerenja tlaka na dnu (Slika 2) te valnih parametara H_s i T_p dobivenih iz mjerenja brzine strujanja (Slika 3) za valne situacije 22.-23.10.2009. i za 03.11.2009. pokazuje se konzistentnost pojave značajnih promjena u oscilacijama razine mora i najvećih značajnih valnih visina. Za navedene valne situacije konzistentnost se pokazuje i preko najvećih satnih vektora brzine strujanja u cijelom promatranom periodu (Slika 4). Za valnu situaciju 23.04.2010. pokazuje se konzistentnost pojave najvećih značajnih valnih visina (Slika 3) i najvećih vektora brzine strujanja (Slika 4).

Pokazuje se da je kroz promatrane periode, Period 1: 16.10.-25.11.2009. te Period 2: 09.04.-24.04.2010., u Šibenskom kanalu dominantno strujanje u NW smjeru. Najjače strujanje je u NW smjeru i javlja se pri valnim situacijama iz SE smjera (22.-23.10.2009.,

03.11.2009., 23.04.2010.) kada su zabilježene značajne valne visine H_s od 0.46 m do 0.68 m. Pokazuje se da je smjer strujanja jednolik do 7.0 m dubine pri površinskom strujanju u NW smjeru, te nejednolik pri snažnijem površinskom strujanju u SE smjeru.

ZAKLJUČAK

Mjerenja morskih struja i valova na lokaciji ispred Zablaća izvršena su korištenjem ADCP strujomjera postavljenim na dno. Tijekom mjesec dana kontinuirano su mjerene morske struje, oscilacije tlaka na dnu vodenog stupca i visina vodenog stupca. „Sirovi“ ADCP podaci iz mjerenja početno su obrađeni korištenjem „WavesMon“ računalnog programa. Obradom podataka dobiveni su podaci mjerenja morskih struja i površinskih vjetrovnih valova na mjernoj točki S10. Oscilacije površine mora dobivene su iz mjerenja tlaka na dnu, a valni parametri određeni su iz mjerenja brzine struje. Cilj ovog rada bilo je dobivanje osnovnih karakteristika oscilacija površine mora u Šibenskom kanalu za relativno kraći vremenski period. Orijentacija vektora morske struje je u smjeru prostiranja Šibenskog kanala. Tijekom oba promatrana perioda u Šibenskom kanalu dominantno je strujanje u NW smjeru po čitavoj dubini. Najjače strujanje javlja se u NW smjeru u površinskom sloju i slabi s dubinom a javlja se pri valnim situacijama iz SE smjera. Pokazuje se relativno nepromjenjiv smjer strujanja po dubini pri površinskom strujanju u NW smjeru, te promjenjiv pri snažnijem površinskom strujanju u SE smjeru. Međusobnom usporedbom oscilacija razine mora, oscilacija valova značajne valne visine i oscilacija satnih vektora brzine strujanja ukazuje se na konzistentnost pojave značajnih promjena u oscilacijama razine mora s pojavama najvećih značajnih valnih visina ($H_s = 0.68$ m) i najvećih vektora brzine strujanja ($v = 25$ cm/s) kada vjetar puše (jugo) u smjeru morskih struja.

LITERATURA

- [1] Birch, R., Fissel, D.B., Borg, K., Lee V., English D. (2004): *The Capabilities of Doppler Current Profilers for Directional Wave Measurements in Coastal and Nearshore Waters*, Proceedings of Oceans 04 MTS/IEEE/Techno-Oceans 04, Kobe, Japan.
- [2] Book, J., Martin, P., Janeković, I., Kuzmić, M. (2007): *Frictional bottom boundary layers for tides: observations, theory, and modeling from the northern Adriatic*, European Geosciences Union 2007, Beč, Austija.
- [3] Janeković, I. i Tudor, M. (2005): *The Adriatic Sea wave response to severe bura wind*, Hrvatski meteorološki časopis, br. 40, pp316-319.
- [4] Le Mehaute, B. (1976): *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*, Springer-Verlag, New York.
- [5] Lončar, G., Andročec, V., Janeković, I. (2009): *Numerička analiza zajedničkog rada podmorskih ispusta na području Istre*, Hrvatske vode br. 17, pp221-228.
- [6] Republika Hrvatska - Ministarstvo zaštite okoliša prostornog uređenja i graditeljstva (2009): *Projekt zaštite od onečišćenja voda u priobalnom području IBRD 7226/HR*, Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet, studeni 2009.
- [7] Strong, B., Bromley, B.H., Terray, E.A., Stone, G. (2000): *The Performance of*

ADCP-derived direction wave spectra and comparisons with other instruments, Proceedings Oceans 2000, IEEE Press.

- [8] Teledyne RD Instruments Inc. (2008): *Waves primer: Wave Measurements and the RDI ADCP Waves Array Technique*.
- [9] Ursella, L. i Gačić, M. (2001): *Use of the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) in the study of the circulation of the Adriatic Sea*, Annales Geophysicae, br. 19, pp1183-1193.

AUTORI

dr.sc. Damir Bekić ^a

dr.sc. Dalibor Carević ^a

Gordon Gilja, dipl.ing. ^a

prof.dr.sc. Neven Kuspilić ^a

^a Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, damir.bekic@grad.hr