



ANALIZA OSJETLJIVOSTI MODELA ZA PROCJENU SREDNJEG VREMENA BORAVKA MORSKE VODE U JADRANSKOM MORU ZASNOVANOM NA ⁹⁰Sr KAO RADIOAKTIVNOM OBILJEŽIVAČU

Zdenko Franić

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada,
Ksaverska c. 2, 10000 Zagreb
e-mail: franic@imi.hr

UVOD

Cirkulacije vode Jadranskoga mora uvelike je određena specifičnim oblikom i zemljopisnim položajem Jadranskog bazena (dugačak zaljev sa svih strana omeđen velikim planinskim lancima) i njegovom vrlo malom dubinom u sjevernom dijelu. Posljedično, jedna jaka bura izmiješa cjelokupni sadržaj sjevernog Jadrana. Tako nastaje gusta hladna voda koja potom u dubinskoj struji putuje duž talijanske obale i kroz Otrantska vrata napušta Jadran, čineći osnovu tzv. istočno-mediteranske dubinske vode.

Poznavanje vremena potrebnog za izmjenu cjelokupne vode Jadranskog mora (volumen od oko 35000 km³) izuzetno je bitno za svaku procjenu rizika koje sa sobom nose razne gospodarske aktivnosti, turizam i svakojake intervencije u prostoru. Ujedno, taj je podatak važan i za procjenu opterećenja Jadranskog mora otpadom te balastnim i drugim otpadnim vodama. Naime, to je najmanje moguće vrijeme kroz koje bi se Jadran spontanim procesima sam oporavio od nekog globalnog zagađenja.

Izmjena morske vode između Jadranskog i Jonskog mora kroz Otrantska vrata je proteklih dvadesetak godina bila predmetom mnogih oceanografskih istraživanja, kao i matematičkog modeliranja [1,2,3,7]. Iz podataka o transportu vodene mase kroz vertikalni presjek Otrantskih vrata, lako se može izračunati vrijeme potrebno za izmjenu cjelokupnog volumena Jadranske vode tako da se ukupna masa vode koja tijekom godine dana uđe (ili izađe) iz Jadrana podijeli s njegovim volumenom. Ta vrijednost ujedno pretstavlja i vrijeme boravka morske vode u Jadranskom moru.

Literaturni podaci za vrijeme boravka morske vode u Jadranskom moru prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Vrijeme boravka morske vode u Jadranskom moru.

Vrijeme boravka / god.	Način procjene	Ref.	Godina
2,7	mjerenje protoka	[10]	1976
5,0	---	[4]	1979
1,1 – 3,7 2,8 (najbolja procjena)	mjerenje protoka	[5]	1983
4,4	mjerenje protoka	[6]	1992
0,7 – 1,7	mjerenje protoka	[8]	1999
1,0	mjerenje protoka	[1]	2001
2,9	modeliranje konc. akt. ^{37}Cs u Mediteranu	[7]	2002
2,2	modeliranja balansa vode	[9]	2002

Iz Tablice 1 vidljivo je da se procjene kreću od minimalnih 0,7 do maksimalnih 5 godina. Prema novijim istraživanjima, točnije su one vrijednosti koje ukazuju na bržu izmjenu vode. Razlike u vrijednostima uzrokovane su nizom fizikalnih parametara koji prirodno fluktuiraju, ovisno o klimatološkim i oceanografskim prilikama, kao i godišnjem dobu. Valja napomenuti da se radi o ograničenim eksperimentima i trenutnim vrijednostima protoka iz kojih su vršene ekstrapolacije. Do sličnog rezultata može se doći ne samo izravnim mjerenjima masenog transporta vode već i drugim metodama, primjerice proučavanjem promjena aktivnosti ^{90}Sr u morskoj vodi kao izuzetno učinkovitog obilježivača morske vode [2,3].

MATERIJAL I METODE

Poznavajući oceanografske karakteristike Jadranskog mora, konstruiran je matematički model koji opisuje promjenu aktivnosti ^{90}Sr u vodi Jadranskog mora [2] kao i poboljšani model [3]. Analitička funkcija koja predstavlja rješenje modela iz referencije [3] ima oblik:

$$A_{JM}(t) = I_f(0) / (k_M + \lambda - k_f) \{ \exp(-k_f t) - \exp[-(k_M + \lambda)t] \} + V_{JM} [A_{JM_0}(0) + A_{IM_0}(0) k_M t] \exp[-(k_M + \lambda)t] \quad (1)$$

gdje su:

- $A_{JM}(t)$ Vremenski ovisan inventar ^{90}Sr u Jadranskom moru (Bq),
- $I_f(0)$ početni unos ^{90}Sr u Jadransko more radioaktivnim oborinama -*fallout* (Bq),
- V_{JM} volumen Jadranskog mora (35000 km³),
- $A_{JM_0}(0)$ početna opažena koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u Jadranskom moru (Bq m⁻³),
- $A_{IM_0}(0)$ početna opažena koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u Jonskom moru (Bq m⁻³),

- λ konstanta radioaktivnog raspada za ^{90}Sr (0,0238 god⁻¹),
 k_f konstanta koja opisuje godišnje smanjivanje koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u radioaktivnim oborinama (god⁻¹) i
 $1/k_M$ srednje vrijeme boravka ^{90}Sr u Jadranskom moru (god), koje reflektira i srednje vrijeme boravka morske vode u Jadranu.

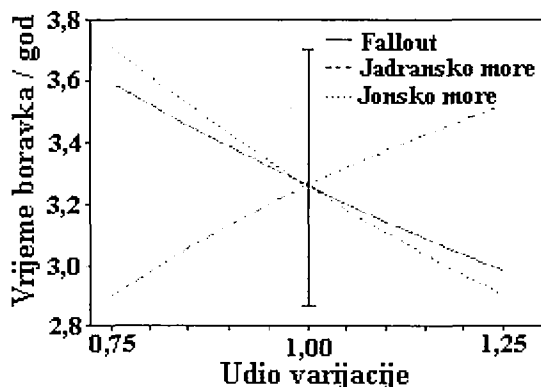
Funkcija (1) je potom prilagođena ekperimentalnim podacima iz četrdesetogodišnje baze podataka o koncentracijama aktivnosti radiostroncija u vodi Jadranskog mora te je nepoznati parametar $1/k_M$, koji reprezentira brzinu izmjene morske vode, procijenjen na 3,3 godine. Ova vrijednost stoga predstavlja i srednje vrijeme boravka morske vode u Jadranu, usrednjeno preko perioda od četrdesetak godina.

REZULTATI

Standardna devijacija srednjeg vremena boravka morske vode u Jadranu određena je Monte Carlo analizom. U proračunu je pretpostavljeno da za aktivnosti ^{90}Sr u morskoj vodi oko mjerenih vrijednosti u pojedinim godinama vrijedi uniforma razdioba. Za svaku je godinu stoga generatorom slučajnih brojeva generirana nasumična vrijednost aktivnosti morske vode unutar intervala $[A - \sigma, A + \sigma]$, gdje je σ standardna devijacija mjerenih vrijednosti te je iz svakog odgovarajućeg niza podataka funkcijskim prilagođavanjem na analitičku funkciju (1) određena vrijednost $1/k_M$. Nakon što je postupak ponovljen 100 puta, izračunate su srednja vrijednost i standardna devijacija. u iznosu $3,3 \pm 0,4$ godine.

Kako bi se odredilo koji parametar iz jednadžbe (1) najviše utječe na procjenu srednjeg vremena boravka vode u Jadranu, tj. na vrijednost $1/k_M$, provedena je analiza osjetljivosti. Ona uključuje perturbaciju svakoga parametra u modelu za određeni iznos, dok se ostali parametri drže na nominalnim, unaprijed zadanim vrijednostima, te se kvantificira relativni učinak na predikciju modela. Obično se pri tome svaki parametar povećava ili smanjuje preko cijelog očekivanog područja, za određeni postotak nominalne vrijednosti. Na slici 1. prikazano je kako za model (1) na konačni rezultat utječu ukupni unos (kombinirani utjecaj radioaktivnih oborina i vode koja se s kopna slijeva u more) ^{90}Sr u morsku vodu, unos ^{90}Sr iz Jonskoga mora i ukupni inventar ^{90}Sr u Jadranskom moru.

Svaki od kritičnih parametara modela, tj. A_{JM} , A_{IM} i I_f , mijenjani su za vrijednost $\pm 25\%$ oko svoje nominalne vrijednosti. Povećavanjem unosa ^{90}Sr falloutom za 25%, jednadžba (1) daje za srednje vrijeme boravka ^{90}Sr u Jadranu vrijednost od 3,0 godine S druge strane, smanjivanje vrijednosti unosa za 25%, povećava srednje vrijeme boravka na 3,6 godina. Koristeći sličnu proceduru za unos ^{90}Sr transportom vodene mase iz Jonskoga mora dobivaju se vrijednosti od 2,9 i 3,7 godina za povećavanje odnosno smanjivanje volumena od 25%. Konačno, povećavanje i smanjivanje ukupne aktivnosti ^{90}Sr u Jadranu vodi vrijednostima od 3,5 i 2,9 godina.



Slika 1. Vrijednost $1/k_M$ kao funkcija promjene kritičnih parametara

Kao što je vidljivo iz Slike 1, neodređenost od $\pm 25\%$ u procjeni ukupnog inventara ^{90}Sr u Jadranskom moru dovodi do približne promjene od -10% i $+10\%$ u srednjem vremenu boravka. Ta neodređenost proizlazi iz činjenice da su za određivanje ukupnog inventara ^{90}Sr u Jadranskom moru korištene vrijednosti sa samo četiri lokacije. Nasuprot tome, veći unos ^{90}Sr radioaktivnim oborinama ili influksom iz Jonskog mora vodi smanjivanju srednjeg vremena boravka ^{90}Sr u Jadranskom moru.

ZAKLJUČAK

Iz dugogodišnje baze podataka o koncentracijama aktivnosti ^{90}Sr na četiri lokacije Jadranskoga mora procijenjena je vrijednost od $3,3 \pm 0,4$ godine za srednje vrijeme boravka ^{90}Sr u morskoj vodi. Neodređenost je određena Monte Carlo metodom. Kako je ^{90}Sr učinkovit obilježivač morske vode, ta vrijednost ujedno reflektira srednje vrijeme boravka vode u Jadranu. Analiza osjetljivosti modela pokazuje da je srednje vrijeme boravka ^{90}Sr u morskoj vodi proporcionalno unosu aktivnosti, a obrnuto proporcionalno postojećem inventaru ^{90}Sr u Jadranu. Iz izravne proporcionalnosti srednjeg vremena boravka ^{90}Sr u vodi i unosa ^{90}Sr može se zaključiti da je $3,3 \pm 0,4$ godine ujedno *gornja granica* za srednje vrijeme boravka vode u Jadranu. Naime, resuspenzija sedimenata može utjecati na koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u morskoj vodi, djelujući kao dodatni unos, posebice u sjevernom, relativno plitkom dijelu Jadranskog bazena.

LITERATURA

- [1] Cushman-Roisin B., Gačić M., Poulain P-M. and Artegiani A. Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Past, Present and Future. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. 2001.

- [2] Franić Z. Proračun brzine izmjene intermedijarne vode Jadranskoga i Jonskog mora koristeći ^{90}Sr kao radioaktivni obilježivač. U: Z. Franić i D. Kubelka (urednici) Zbornik radova drugoga simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, Zagreb 1994.
- [3] Franić Z. Estimation of the Adriatic sea water turnover time using fallout ^{90}Sr as a radioactive tracer. *Journal of Marine Systems*, accepted for publication. (2005)
- [4] Leksikografski institut "Miroslav Krleža" (LIMK), 1979. Članak Jadransko more. *Pomorska enciklopedija*, 3, 135-214. LIMK, Zagreb.
- [5] Mosetti F. A tentative attempt at determining the water flow through the Otranto Strait: The mouth of the Adriatic Sea, Criterion for applying the computation of dynamic height anomalies on the water budget problems. *Boll Oceanol Teor Appl* 1983; I:143-163.
- [6] Orlić M, Gačić M, La Violette PE. The currents and circulation of the Adriatic sea. *Oceanol Acta* 1992;15(2),109-123.
- [7] Sanchez-Cabeza, JA, Ortega M, Merino J, Masqué P. Long-term box modelling of ^{137}Cs in the Mediterranean Sea. *J Marine Syst* 2002;33-34:457-472.
- [8] Vetrano A, Gačić M, Kovačević M. Water fluxes through the Strait of Otranto. The Adriatic Sea. Hopkins T. S. et al., eds., *Ecosystem Research Report No. 32*, EUR18834, European Commission, Bruxelles, 127-140. 1999.
- [9] Vilibić I, Orlić M. Adriatic water masses, their rates of formation and transport through Otranto Strait, *Deep-Sea Res* 2002; 49:1321-1340.
- [10] Zore-Armanda M, Pulcher-Petkovic T. Some dynamic and biological characteristics of the Adriatic and other basins of the Eastern Mediterranean Sea. *Acta Adriat* 1976; 18,17-27.

**SENSITIVITY ANALYSIS OF THE MODEL FOR
ESTIMATION OF THE ADRIATIC SEA TURNOVER TIME
USING FALLOUT ^{90}Sr AS A RADIOACTIVE TRACER**

Zdenko Franić

Institute for Medical Research and Occupational Health, Ksaverska c. 2
HR-10000 Zagreb, Croatia
e-mail: franic@imi.hr

Reliable data on the turnover time of water in the Adriatic Sea (approximately 35000 cubic kilometres) is extremely important for any risk analysis involving various economic activities, tourism, etc. Water exchange through the Strait of Otranto between the Adriatic and the Ionian seas has been the subject of a series of experimental investigations and more recently, of some numerical studies, is extensively presented by Cushman-Roisin et al. [1]. The turnover time of the Adriatic sea water can be easily calculated from the data on water fluxes through the Strait by calculating annual water mass flowing through the Strait and dividing it by the total volume of the Adriatic sea. Literature data on the Adriatic Sea water turnover time range from minimal 0.7 to maximal 5.0 years. Using a model describing the rate of change of ^{90}Sr activity concentrations in the Adriatic Sea water by function minimisation to long-term experimental data, the turnover time for ^{90}Sr in the Adriatic was calculated to be 3.3 ± 0.4 years. The uncertainty was estimated by Monte Carlo analysis. As ^{90}Sr is a reliable radiotracer for seawater, this value also reflects the sea water turnover time. Sensitivity analysis of the model, applied by varying critical parameters over their nominal values, showed that $\pm 25\%$ uncertainty in the estimation of the Adriatic sea water activity results in approximately $\pm 10\%$ change in ^{90}Sr mean residence time. On the other hand, a larger input of ^{90}Sr , either by fallout or water influx from the Ionian Sea may lead to a shorter mean residence time. Direct proportionality between ^{90}Sr input into the Adriatic sea and its mean residence time in the sea water suggests that 3.3 years is the upper limit of the Adriatic sea water turnover time. Namely, re-suspension from sediments could affect ^{90}Sr activity concentrations, acting as additional input, especially in the northern, relatively shallow part of the Adriatic.