

Proceedings of the 6th Symposium of the Croatian Radiation Protection Association, Stubičke Toplice, April 2005, pp 364-377.

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 cesta 2
pp 291, HR-10000 Zagreb, Hrvatska
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 iziđe) 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 / 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 ⁹⁰Sr 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 ⁹⁰Sr u vodi Jadranskog mora [2] kao i poboljšani model [3]. Analitička funkcija koja predstavlja rješenje modela iz referencije [3] ima oblik:

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

gdje su:

- $A_{JM}(t)$ Vremenski ovisan inventar ⁹⁰Sr u Jadranskom moru (Bq),
- $I_f(0)$ početni unos ⁹⁰Sr u Jadransko more radioaktivnim oborinama - *fallout* (Bq),
- V_{JM} volumen Jadranskog mora (35000 km³),

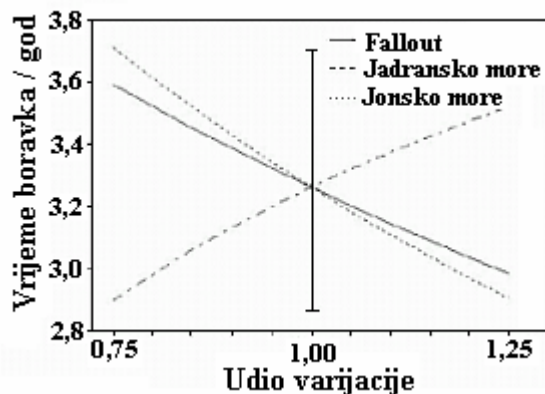
- $A_{JM_0}(0)$ početna opažena koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u Jadranskom moru (Bq m^{-3}),
- $A_{IM_0}(0)$ početna opažena koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u Jonskom moru (Bq m^{-3}),
- λ konstanta radioaktivnog raspada za ^{90}Sr ($0,0238 \text{ god}^{-1}$),
- k_f konstanta koja opisuje godišnje 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.



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

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 Jadranskom moru 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 Jadranskom moru vodi vrijednostima od 3,5 i 2,9 godina.

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 Jadranskom moru. 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 Jadranskom moru. 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. 2001. Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Past, Present and Future. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London.
- [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., 1983. 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., I, 143-163.
- [6] Orlić M., Gačić M. and La Violette, P.E., 1992. The currents and circulation of the Adriatic sea. Oceanologica Acta. 15(2), 109-123.
- [7] Sanchez-Cabeza, J.A., Ortega M., Merino J. and Masqué P., 2002. Long-term box modelling of ^{137}Cs in the Mediterranean Sea. Journal of Marine Systems, 33-34, 457-472.
- [8] Vetrano A., Gačić M. and Kovačević M., 1999. 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.
- [9] Vilibić I. i Orlić M. 2002. Adriatic water masses, their rates of formation and transport through Otranto Strait, Deep-Sea Research, 49, 1321-1340.
- [10] Zore-Armanda M. and Pulcher-Petković T., 1976. Some dynamic and biological characteristics of the Adriatic and other basins of the Eastern Mediterranean Sea. Acta Adriatica, 18, 17-27.

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

Zdenko Franić

Institute for Medical Research and Occupational Health, Ksaverska cesta 2
PO Box 291, HR-10000 Zagreb, Croatia
E-mail: franic@imi.hr

Reliable data on the turnover time of the water in the Adriatic Sea (approximately 35000 km³) is extremely important for any risk analysis involving various economic activities, tourism etc. The 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 also of some numerical studies, which is extensively presented by Cushman-Roisin et al. [1]. From the data on water fluxes through the Strait can be easily calculated the turnover time of the Adriatic sea water by calculating the annual water mass flowing through the Strait and dividing it by the total volume of the Adriatic sea. The literature data on the Adriatic Sea water turnover time range from minimal 0.7 to maximal 5.0 years.

Using the model describing the rate of change of ^{90}Sr activity concentrations in the Adriatic Sea water [3] 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 reliable radiotracer for seawater, this value also reflects the sea water turnover time as well. Applying sensitivity analysis for the model by varying critical parameters over their nominal values was found that $\pm 25\%$ uncertainty in estimation of the Adriatic sea water activity causes approximately -10% and +10% change in ^{90}Sr mean residence time. On the other hand, the larger input of ^{90}Sr , either by fallout or by water influx from the Ionian Sea, leads to smaller value for mean residence time.

As a consequence of direct proportionality between ^{90}Sr input into the Adriatic sea and its mean residence time in the sea water, it can be argued that 3.3 is the upper limit of the Adriatic sea water turnover time. Namely, resuspension from the sediments could affect ^{90}Sr activity concentrations, acting as additional input, especially in the northern, relatively shallow part of the Adriatic.