

ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ

Σ.Ε. Πούλος¹ και Π. Γ. Δρακόπουλος²

¹ Εθνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, Άγιος Κοσμάς, Ελληνικό 166 04, Αθήνα

² Ινστιτούτο Θαλάσσιας Βιολογίας Κρήτης, Τ.Θ. 2214, Ηράκλειο 71003, Κρήτη

ABSTRACT

S.E. Poulos and P.G. Drakopoulos: "Heat budget and water balance of the Aegean Sea"

The Aegean Sea constitutes the northeasterly part of the eastern Mediterranean Sea, covering an area of approximately $1.8 \times 10^{11} \text{ m}^2$ and contains a water volume of some $7.4 \times 10^{13} \text{ m}^3$. Recent studies have shown that Aegean waters have replaced about 20% of the deep and bottom waters of the eastern Mediterranean basin changing the large-scale freshwater balance. The climate of the Aegean Sea of Mediterranean type characterised by annual air temperatures of $16-19.5^\circ \text{C}$, precipitation of about 500 mm yr^{-1} and evaporation of some 4 mm d^{-1} . The Aegean has a negative heat budget (approximately -25 W m^{-2}) and a positive water balance ($+1.0 \text{ m yr}^{-1}$) when inflow from the Black Sea is considered. The fluxes via the Cretan straits can not be incorporated to the above calculations as they are 2-3 order of magnitude greater.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Αιγαίο Πέλαγος αποτελεί το βορειοανατολικό τμήμα της Μεσογείου Θάλασσας καλύπτοντας γύρω στα $1.8 \cdot 10^{11} \text{ m}^2$ και έχοντας όγκο περίπου ίσο με $7.4 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$ (Hopkins, 1978). ΒΑ επικοινωνεί με την Μαύρη Θάλασσα μέσω των στενών των Δαρδανελίων. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι νερά προερχόμενα από το Αιγαίο έχουν αντικαταστήσει προηγούμενες κοντά στο πυθμένα θαλάσσιες μάζες της λεκάνης της ανατολικής Μεσογείου σε ποσοστό γύρω στο 20% (Roether et al. 1995). Η εκροή αυτή έχει προκαλέσει αλλαγές στα χαρακτηριστικά των θαλάσσιων μαζών και πιστεύεται ότι έχει άμεση σχέση με μια γενικότερη κλιματική μεταβολή στον ευρύτερο χώρο της ανατολικής Μεσογείου. Στα πλαίσια της καλύτερης κατανόησης μιας τέτοιας πιθανής κλιματικής μεταβολής, η παρούσα εργασία εξετάζει το μέχρι τώρα κλιματολογικά αποδεκτό γενικότερο θερμικό και υδρολογικό ισοζύγιο του Αιγαίου, δηλαδή τις διάφορες ροές θερμότητας μεταξύ ατμόσφαιρας και θαλάσσιας επιφάνειας, την ετήσια βροχόπτωση, εξάτμιση, τις παροχές των ποταμών που εκβάλουν κατά μήκος της ακτογραμμής του Αιγαίου και την εισροή/εκροή θαλάσσιων μαζών από και προς τη λεκάνη του Αιγαίου διαμέσου των στενών των Δαρδανελίων (Μαύρη Θάλασσα).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ολική ροή θερμότητας δίνεται από το άθροισμα: $Q_t = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h$, όπου, Q_s : η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, Q_b : η ανακλώμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, Q_e : η εξάτμιση, και Q_h : η αισθητή θερμότητα. Για τον υπολογισμό των συνιστωσών με εμπειρικές σχέσεις απαιτούνται η θερμοκρασία αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση, η υγρασία κορεσμού, η ειδική υγρασία, η ταχύτητα ανέμου, η νεφοκάλυψη και η επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας. Σε αυτή την εργασία τα δεδομένα αντλήθηκαν από τη βάση COADS, (Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set), και καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1946-1990. Για τον υπολογισμό της ολικής επιφανειακής θερμικής ροής (Q_t) έχει ακολουθηθεί μεθοδολογία παρόμοια με αυτή των Garrett et al. (1993) με εξαίρεση για τον υπολογισμό του Q_b χρησιμοποιήθηκε η σχέση των Bignami et al. (1991). Δεδομένα που αφορούν τις διάφορες συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου όπως βροχόπτωση, εξάτμιση, απορροές ποταμών, την εισροή των νερών της Μαύρης Θάλασσας προέρχονται από μετρήσεις της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης για το θερμικό ισοζύγιο μαζί με αντίστοιχες αναφορές από τη βιβλιογραφία δίνονται στον Πίνακα 1. Οι διαφορές που βλέπουμε οφείλονται τόσο στη χρήση διαφορετικών δεδομένων, που καλύπτουν διαφορετικά χρονικά διαστήματα όσο και στην επιλογή διαφορετικών εμπειρικών σχέσεων. Γενικά πάντως το θερμικό ισοζύγιο είναι αρνητικό για την περιοχή του Αιγαίου και οι υπολογισμοί μας δίνουν τη μέση ετήσια τιμή των -26 W m^{-2} . Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η λεκάνη του Αιγαίου χάνει θερμότητα από την επιφάνειά της που πρέπει να αντισταθμίζεται από μια εισροή θερμότητας από τα στενά της Κρήτης, με επικρατέστερα τα ανατολικά περάσματα, από όπου τα θερμότερα Λεβαντινά νερά εισρέουν επιφανειακά. Η συνεισφορά της εισροής των νερών προερχόμενα από τη Μαύρη Θάλασσα έχει υπολογισθεί από τον Tolmazin (1985) ότι δεν ξεπερνά επιφανειακά το 1 W m^{-2} .

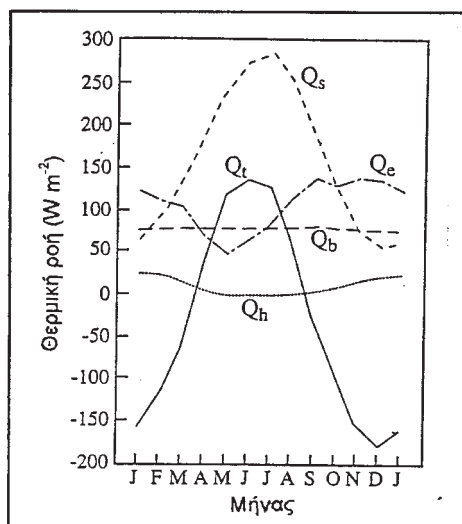
Πίνακας 1. Συνιστώσες θερμικών ροών στο Αιγαίο Πέλαγος σε $W m^{-2}$

	Q_s	Q_b	Q_e	Q_h	Q_t
Bunker (1971)			-147		
May (1983)	192	-69	-131	-18	-26
Jakovides et al. (1989)			-130		
Bethoux and Gentili (1994)			-147		-38
Theodorou & Barsakis (1995)	157-177	72-75	73-119	2-12	
Παρούσα εργασία	166	-78	-105	-9	-26

Όσον αφορά τον εποχικό κύκλο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1 η συνολική ροή θερμότητας φθάνει τη μέγιστη τιμή της τον μήνα Ιούνιο συμπίπτοντας με το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ψύξη λόγω εξάτμισης αποκτάει την μεγαλύτερη τιμή της το φθινόπωρο-αρχές του χειμώνα σαν αποτέλεσμα των ψυχρών και ισχυρών ανέμων που πνέουν την περίοδο αυτή. Επίσης, η μεγαλύτερη απώλεια λόγω της αισθητής θερμότητας λαμβάνει χώρα κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ η ακτινοβολία μεγάλου μήκους παραμένει σχεδόν σταθερή από μήνα σε μήνα κατά τη διάρκεια όλου του έτους.

Το υδρολογικό ισοζύγιο (Ω) του Αιγαίου Πελάγους εξαρτάται από τις συνιστώσες: Βροχοπτώση (B), Εξάτμιση (E), Ποτάμιες Εκροές (Π), την διαφορά εισροής-εκροής της Μαύρης Θάλασσας (ΜΘ) στα στενά των Δαρδανελίων, και του όγκου των θαλάσσιων μαζών που εισέρχονται και εξέρχονται από τα στενά της Κρήτης (K). Δηλαδή:

$$\Omega = B - E + \Pi \pm M\Theta \pm K$$



Σχήμα 1. Μηνιαία κύμανση των συνιστωσών του θερμικού Ισοζυγίου του Αιγαίου Πελάγους. (Q_s =προσιπτόντα ηλιακή ακτινοβολία, Q_b =ανακλώμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, Q_e = εξάτμιση και Q_h =η αισθητή θερμότητα.

Στον πίνακα 2 δίνονται οι ετήσιες τιμές βροχοπτώσης για μια τη χρονική περίοδο 1975-1990 σειρά από παρακάτιους σταθμούς, απ' όπου προκύπτει μια μέση τιμή γύρω στα 500 χιλιοστά (mm) το χρόνο. Το ποσό της εξάτμισης έχει υπολογισθεί να είναι 3,6 mm ανά ημέρα. Οι Jakovides et al. (1989) έχουν υπολογίσει μια τιμή 4,2 mm ημερησίως ενώ ο Bunker et al. (1982) έχουν βρεί τη τιμή 3,9 mm αλλά για μια περιοχή που εκτείνεται και νότια της Κρήτης. Οι ποτάμιες απορροές κατά μήκος της Ελληνικής και Τουρκικής ακτογραμμής δίνονται στον πίνακα 3. Συνολικά οι εισροές γλυκού νερού ανέρχονται σε $24.235 \cdot 10^6 m^3$. Σε αυτά πρέπει ακόμη να προστεθούν οι απορροές των χειμάρρων αλλά και των αστικών λυμάτων όπως αυτά του λεκανοπεδίου της Αττικής (ο αγωγός της Ψυτάλλειας έχει παραγωγή 219

$10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$, (Theodorou, 1992). Όσον αφορά τα στενά των Δαρδανελίων από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι υπάρχει μια τελική ετήσια εισροή νερών από τη Μαύρη Θάλασσα που είναι γύρω στα 300 km^3 (Unluata et al., 1990).

Πίνακας 2. Μέση ετήσια βροχοπτώση σε mm την περίοδο 1975-1990 (Μετεωρολογική Υπηρεσία).

ΣΤΑΘΜΟΙ	(mm)
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	493.5
ΠΕΙΡΑΙΑΣ	371.6
ΧΙΟΣ	517.0
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	491.3
ΚΑΒΑΛΑ	546.5
ΛΗΜΝΟΣ	449.5
ΜΗΛΟΣ	399.4
ΡΟΔΟΣ	671.9
ΣΚΥΡΟΣ	406.4
ΣΟΥΔΑ	633.0
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	436.4
Μέση ετήσια	492.4

Πίνακας 3. Ποτάμια απορροές στο Αιγαίο ((Θεριανός (1974) και Collins M. pers. comm.).

ΠΟΤΑΜΟΣ	Μέση ετήσια απορροή (10^6 m^3)
Έβρος	3250
Νέστος	1819
Στρυμών	3440
Αξιός	5031
Αλιάκμων	2292
Πηνειός	2529
Σπερχειός	743
Karamenderes	404
Bakircay	498
Gediz Nehri	1648
Kizukmenderes	404
Bujuk Menderes	2177
ΣΥΝΟΛΟ	24235

Στον Πίνακα 4 δίνεται συνοπτικά το ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο του Αιγαίου και οι τιμές των συνιστωσών του. Όπως προκύπτει το ποσό της εξάτμισης υπερβαίνει το σύνολο βροχοπτώσης + ποτάμιας εκροής για να γίνει πλεονασματικό (+0.7 μ.) όταν συνυπολογιστεί η εισροή των νερών της Μαύρης Θάλασσας ($B - E + \Pi + M\Theta > 0$). Τα παραπάνω ποσά όγκων νερού είναι μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερες από τον όγκο των θαλάσσιων μαζών που κινούνται διαμέσου των στενών της Κρήτης. Ο Bethoux (1980) υπολόγισε ότι περί τα $15,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ το χρόνο εισέρχονται από τα στενά μεταξύ Ρόδου και Κρήτης ενώ εξέρχονται του γύρω στα $9,84 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ μεταξύ Κρήτης και Πελοποννήσου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το Αιγαίο Πέλαγος χαρακτηρίζεται από αρνητικό θερμικό ισοζύγιο της τάξης των 25 W m^{-2} που σημαίνει ότι θερμότητα χάνεται από την επιφάνεια της θάλασσας προς την ατμόσφαιρα. Το έλλειμμα αυτό αντισταθμίζεται από την εισροή θαλάσσιων μαζών, κύρια από τα στενά της Κρήτης. Στο Αιγαίο εισέρχονται γύρω στα $3 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ νερό που προέρχονται από τη Μαύρη Θάλασσα ενώ δέχεται και περί τα $2 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ από ποτάμια και χειμαρρους. Το υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης του Αιγαίου είναι θετικό ($1.0 - 1.4 \text{ m yr}^{-1}$), χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εναλλαγή των θαλάσσιων

μαζών στα στενά της Κρήτης η οποία υπολογίζεται να είναι 2-3 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη.

Πίνακας 4. Το μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο του Αιγαίου σε mm yr⁻¹.

	Παρούσα εργασία ^a (mm yr ⁻¹)	Δημοσιευμένες τιμές (mm yr ⁻¹)
Βροχόπτωση (B)	500	
Εξάτμιση (E)	1280	1830 ^c
Απορροή Ποταμών (Π)	110	
Νερά Μαύρης Θάλασσας (ΜΘ)	1670 ^b	
Ισοζύγιο νερού (Ω) ^d :	1000	1450 ^c

Σημείωση: (a) η επιφάνεια του Αιγαίου ίση με $1.8 \cdot 10^{11} \text{ m}^2$.

(b)&(d) Bethoux and Gentili (1994); και, (c) Ergin et al. (1991)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BETHOUX, J.-P.(1980): Mean water fluxes across sections in the Mediterranean Sea, evaluated on the basis of water and salt budgets and of observed salinities. *Oceanologica Acta*, 3(1), 79-88.
- BETHOUX, J.P. & GENTILI, B.(1994): The mediterranean Sea, a test area for marine and climatic interactions. (In) P. Malanotte-Rizzoli and A.R. Robinson (eds), *Ocean Processes in Climate Dynamics: Global and Mediterranean Examples*, Nato ASI Series, Serie C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 419, Kluwer Academic Publishers, 239-254.
- BIGNAMI, F., SANTOLERI, R., SCHIANO, M., & MARULLO, S. (1991): *Net longwave radiation in the Western Mediterranean Sea, Poster session at the 20th general Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, IAPSO, Vienna, August 1991.*
- BUNKER, A.F., CHARNOCK, H., & GOLDSMITH, R.A. (1982.): A note on the heat balance of the Mediterranean and Red Seas, *J. Mar. Res.*, 40, suppl., 73-84..
- GARRETT, C., OUTERBRIDGE, R., & THOMSON, K. (1993): Interannual variability in Mediterranean heat and buoyancy fluxes, *Journal Climatology*, 6, 900-910.
- ERGIN, M., BODOUR, M.N. & EDIGER, V.(1991): Distribution of surficial shelf sediments in the northeastern and southwestern parts of the Sea of Marmara: Strait and canyon regimes of the Dardanelles and Bosphorous. *Marine Geology*, 96, 313-340.
- HOPKINS, T.S. (1978): Physical processes in the Mediterranean Basins. In: Kjerfve,, B.(editor), *Estuarine Transport Processes*, University of South Carolina Press, Columbia, USA, pp. 269-306.
- THEODOROU, A.J.(1992): Physical Oceanographic Studies for the design of the Athens Sea outfall (Saronikos Gulf, Greece) *Water Science and technology*, 25(9), 31-40.
- THEODOROU, A.J. & BARSAKIS, S. (1995): An estimate of the climatological heat fluxes over the Aegean Sea. *EGS XX Gen Ass. Annal Geoph. Hamp. Germany 3-7 April, 1995*, C250
- ΘΕΡΙΑΝΟΣ Α.Δ. (1974)1 Η γεωγραφική κατανομή της παροχής των Ελληνικών ποταμών. *Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.*, XI: 28-58.
- JAKOVIDES, C., PAPAIOANNOU, G. & MICHALOPOULOU, H.(1989): Evaporation over the Aegean Sea using large-scale Parameters. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 41, 255-260.
- MAY, P.W.(1983): Climatological flux estimates in the Mediterranean Sea, 2, Air sea fluxes, *NORDA Report No 58*, Nav. Ocean Res. and Dev. Activ., NSTL Station, Miss., 65 pp.
- ROETHER, W., MANCA, B., KLEIN, B., BREGANT, D., GEORGOPOULOS, D., BEITZEL, V., KOVACEVIC, V., & LUCHETTA, A.(1995): Recent changes in eastern Mediterranean deep waters. *Science*, 271, 333-335.
- TOLMAZIN, D.(1985): Changing coastal oceanography of the Black Sea. II: Mediterranean effluent. *Prog. Oceanogr.*, 15, 277-316.
- UNLUATA, U., OGUZ, T., LATIF, M.A. & OZSOY, E. (1990): On the physical oceanography of the Turkish Straits. In: L.J. Pratt (ed), *The Physical Oceanography of Sea Straits*, Kluwer Academic Publishers, 25-60.