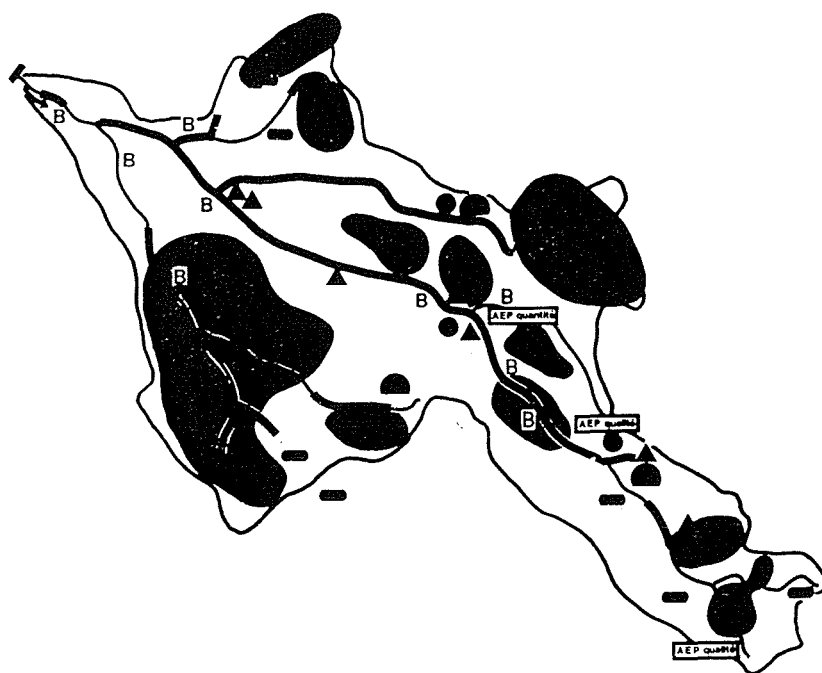


ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
(Ε.Ε.Δ.Υ.Π.)

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

ΠΡΑΚΤΙΚΑ
3ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ
29 – 31 ΜΑΪΟΥ 1997



ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΕΚΔΟΣΗΣ: Α. Ι. ΣΤΑΜΟΥ

ΑΘΗΝΑ 1998

Χαμηλές Ροές και Κλιματική Αλλαγή

ΔΙΟΝΥΣΙΑ ΠΑΝΑΓΟΥΛΙΑ
Λέκτορας Ε.Μ. Πολυτεχνείου

ΓΙΩΡΓΟΣ ΔΗΜΟΥ
Δρ Πολιτικός μηχανικός

Περίληψη

Αναλύονται τα καθεστώτα χαμηλής ροής λεκάνης απορροής στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Δεκαπέντε υποθετικά και δύο μηνιαία σενάρια αύξησης θερμοκρασίας και αλλαγής κατακρημνίσματος που προέκυψαν από το προσομοίωμα γενικής κυκλοφορίας GISS (Goddard Institute for Space Studies) προσομοιώνουν την αλλαγή του κλίματος. Η ημερήσια απορροή της λεκάνης αναπαράγεται από τη σύζευξη των US NWSRFS (US National Weather Service River Forecast System) προσομοιωμάτων συσσώρευσης-τήξης χιονιού και εκτίμησης εδαφικής υγρασίας. Ημέρα επισύμβασης χαμηλής ροής ορίζεται εκείνη κατά την οποία η απορροή δεν υπερβαίνει το τέταρτο της μέσης ημερήσιας τιμής της. Στις περιπτώσεις αυτές εκτιμώνται οι βασικές παράμετροι της χαμηλής ροής (αριθμός ημερών και επεισοδίων, διάρκεια, έλλειμμα και ελάχιστη ροή). Παρά την πολύπλοκη δομή των γεγονότων χαμηλής ροής, κάτω από συνθήκες κλιματικής αλλαγής, και οι δύο προσομοιώσεις κλιματικής αλλαγής (υποθετικά και GISS σενάρια) προβλέπουν πολυαριθμότερα και επιμυκέστερα επεισόδια χαμηλών ροών για μείωση του κατακρημνίσματος. Όλα τα κλίματα παρήγαγαν μεγαλύτερα ελλείμματα χαμηλών ροών και μικρότερες τιμές ελάχιστων απορροών. Η συνδυασμένη δράση των αποτελεσμάτων αυτών είναι δυνατόν να θέσει σε κίνδυνο την ποιότητα του νερού των ποταμών, την αξιοπιστία των ταμιευτήρων και φραγμάτων καθώς και την παροχή νερού από τοπικούς υπόγειους υδροφορείς.

Abstract

The low-flow regimes of Acheloos river at the outfall of the mountainous Mesochora catchment in Central Greece were analyzed under conditions of global climate change. The climate change pattern was simulated through a set of hypothetical and monthly GISS (Goddard Institute for Space Studies) scenarios of temperature increase, coupled

with precipitation changes. The daily flow of the catchment, which is dominated by spring snowmelt runoff, was simulated by the coupling of the snowmelt and soil moisture accounting models of the US National Weather Service River Forecast System. A low-flow day was defined as a day during which the streamflow did not reach the quarter of the long-term mean daily streamflow. In this case the low-flow parameters (occurrences, duration, magnitude, etc.) were determined. Despite the complicated response of low-flow occurrences to climate changes, both hypothetical and monthly GISS representations of climate changes resulted in more and longer low-flow episodes for climates with reduced precipitation. All climates yielded larger low-flow mean deficits and smaller mean values of minimum streamflows. These results could possibly further jeopardize the river water quality, the reliability of the storages and dams, as well as the water supply from local groundwater sources.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση σχετικά με τα καθεστώτα χαμηλών ροών και ξηρασιών (παρατεταμένες περίοδοι χαμηλών ροών) παίζει βασικό ρόλο στο σχεδιασμό των συστημάτων υδατικών πόρων, την κατανομή των διαθέσιμων επιφανειακών απορροών μέσα από μια ποικιλία ανταγωνιστικών χρήσεων καθώς και στη διατήρηση της ποιότητας του νερού σε αποδεκτό επίπεδο ιδιαίτερα στα ποτάμια που δέχονται υγρά απόβλητα

Οι παράγοντες που, σε συνδυασμό, προκαλούν τα υδατικά ελλείμματα σχετίζονται με την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και των ωκεανών καθώς και την επίδραση των ηπειρωτικών περιοχών στις οποίες περιλαμβάνεται όλως ιδιαίτερα η βίοςφαιρα. Μεταβολές στη μέση συμπεριφορά του συστήματος ατμόσφαιρα-ωκεανός-ξηρά είναι δυνατόν να μειώσουν παροδικά τον αριθμό των βροχοπτώσεων και

συνεπώς να προκαλέσουν χαμηλές ροές και ξηρασίες για μικρή ή και επιμηκύτερη περίοδο [10, 20]. Επιπρόσθετα, στη φυσική κλιματική μεταβλητότητα, παροδικά φαινόμενα στο κλίμα όπως το El Nino/ Southern Oscillation- ENSO, οι επιπτώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου (αύξηση στη συγκέντρωση του CO₂ και άλλων ιχναερίων- CH₄, N₂O, CFC-11, κλπ) και οι άμεσες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που συμβάλλουν στην αλλαγή της χρήσης γης (αποψίλωση δασών, γεωργία, αστικοποίηση, κλπ) ευθύνονται για τις επισυμβάσεις των υδατικών ελλείψεων [2,4]. Ωστόσο όμως, κανένα από τα προσομοιώματα γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models-GCMs), που αναπαριστούν το κλιματικό σύστημα και τις αλλαγές του, ή κάποιο επιμεριστικό σχήμα τους, ή και τα ακόμη περισσότερα υποσχόμενα για το σκοπό αυτό προσομοιώματα αλληλεπίδρασης ροών (θεριμότητα, απορροή, κλπ) μεταξύ Επιφάνειας Εδάφους, Βλάστησης και Ατμόσφαιρας (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer models) [2] δεν δύνανται ακόμη να προσομοιώσουν και προβλέψουν με ακρίβεια τις επισυμβάσεις τέτοιων καταστροφικών γεγονότων σε οποιαδήποτε χωροχρονική κλίμακα.

Για την ορθολογική ανάλυση των γεγονότων χαμηλών ροών και ξηρασιών απαιτούνται λεπτομερείς και επιμήκεις χρονοσειρές πεδίων κλιματικής πίεσης και δεδομένων απορροής που προέρχονται από παρατηρήσεις, ή κάποια γεννήτρια καιρού. Ο μέγιστος όγκος της ανάλυσης αυτής ανήκει στο μέλλον και συνδέεται με τα μεγάλα πειράματα πεδίου όπως τα προγράμματα EPOCH (European Program on Climate and Natural Hazards), ECHIVA (European International Project on Climate and Hydrological Interactions between Vegetation, Atmosphere, and Land Surfaces) EFEDA (Field Experiment in Desertification-threatened Area), HAPEX (Hydrologic-Atmosphere Pilot Experiment), κλπ [2], που μόλις πρόσφατα δρομολογήθηκαν.

Έως ότου εντοπισθεί μια έγκυρη σύζευξη μεταξύ προσομοιωμάτων κλίματος, υδρολογίας και οικοσυστήματος σε σχέση με τα καθεστώτα χαμηλών ροών, καταφεύγουμε στον υδρολογικό σχεδιασμό τέτοιων επεισοδίων κάτω από σενάρια κλιματικής αλλαγής. Σύμφωνα με το σκεπτικό αυτό, τα ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται στα υδρολογικά προσομοιώματα ρυθμίζονται για σενάρια κλίματος που προέρχονται από τις προβλέψεις των προσομοιωμάτων γενικής κυκλοφορίας GCMs όπως GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) [11], GISS (Goddard Institute for Space Studies) [9], OSU (Oregon

State University Department of Meteorology) [21] για διπλασιασμό του διοξειδίου του άνθρακα. Ακόμη, άλλα σενάρια λαμβάνονται από τη φιλολογία του κλίματος και θεωρούνται ως εύρος ευλογοφανών τιμών σε αλλαγές μετεωρολογικών τιμών (θερμοκρασία, κατακρήμνιση, κλπ) [5, 10, 12, 24]. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι να αναλύσει τις αποκρίσεις των παραμέτρων [6] που χαρακτηρίζουν τα γεγονότα χαμηλής ροής (αριθμός επεισοδίων, διάρκεια, μέγεθος, κλπ) σε υποθετικά και GISS (Goddard Institute for Space Studies) σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς των επεισοδίων χαμηλής ροής στις κλιματικές διαταράξεις είναι αναγκαία τόσο για την εμβάθυνση αυτού καθεστώτος του φαινομένου όσο και για την επινόηση έγκυρων μεθόδων που απαιτούνται στην ανάλυση συχνότητας χαμηλών ροών κάτω από διαφοροποιημένα κλιματικά καθεστώτα

2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Ανάλυση αποκρίσεων χαμηλών ροών σε σενάρια κλιματικής αλλαγής για καθαρά νησιωτικές και παρακτιες περιοχές στον Ελλαδικό χώρο δεν έχει γίνει μέχρι τώρα. Ωστόσο όμως σε ορισμένες ηπειρωτικές περιοχές, η έντονη επίδραση των θαλασσών και το «μεσογειακό» κλίμα που επικρατεί προσδίδει στην περιοχή χαρακτηριστικές ιδιότητες παράκτιας συμπεριφοράς (υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, εξάτμισης, βροχόπτωσης, κλπ) [26]. Η λεκάνη της Μεσοχώρας που αποχετεύεται από το άνω τμήμα του Αχελώου ποταμού έχει μεσογειακό κλίμα και δέχεται έντονα τις επιδράσεις του Ιονίου πελάγους. Κάτω από τις επισημάνσεις αυτές είναι δυνατόν η λεκάνη να χρησιμοποιηθεί ενδεικτικά στην ανάλυση χαμηλών ροών παράκτιας περιοχής στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Ένας άλλος λόγος είναι η ελλιπής καταγραφή δεδομένων που παρουσιάζεται στα νησιά μας. Το δίκτυο των εγκατεστημένων μετεωρολογικών σταθμών μέσα και γύρω από τη λεκάνη της Μεσοχώρας είναι σχετικά πυκνό, αλλά 3,5% των ημερήσιων τιμών κατακρήμνισματος και 15,5% των ημερήσιων ελάχιστων και μέγιστων τιμών θερμοκρασίας λείπουν για τη δεκαπενταετή περίοδο (1972-86) μελέτης του φαινομένου. Το μικροκλίμα της λεκάνης είναι συνάρτηση της μεταβολής του υψομέτρου της με μέση τιμή τα 1390m. Οι χιονοπτώσεις και η εαρινή τήξη του χιονιού χαρακτηρίζουν το ορεινό τμήμα της λεκάνης η οποία έχει έκταση 633km², μέσο ετήσιο ύψος κατακρήμνισματος 190cm, και ισοδύναμο ύψος απορροής 117cm.

Η μεθοδολογία της εννοιολογικής υδρολογικής προσομοίωσης υιοθετήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη για την αναπαραγωγή της απορροής της λεκάνης. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν δύο υδρολογικά προσομοιώματα: το προσομοίωμα συσσώρευσης και τήξης χιονιού [1], και το προσομοίωμα εκτίμησης εδαφικής υγρασίας [3]. Το προσομοίωμα τήξης του χιονιού περιγράφει την αλλαγή στην αποθήκευση νερού και θερμότητας στη στοιβάδα του χιονιού χρησιμοποιώντας εξώρα δεδομένα κατακρημνίσματος και θερμοκρασίας. Το προσομοίωμα της απορροής υπολογίζει τη ροή της εδαφικής υγρασίας σε πέντε εννοιολογικές ζώνες αποθήκευσης. Την άνω, που περιλαμβάνει την ελεύθερη και τασική υγρασία, και την κάτω που περιλαμβάνει την τασική και την ελεύθερη υγρασία, κύρια και συμπληρωματική. Η ελεύθερη υγρασία μεταφέρεται στις κάτω αποθηκεύσεις που παράγουν τη βασική ροή, ενώ η τασική υγρασία της κάτω ζώνης απομακρύνεται μέσα από την εξατμισοδιαπνοή. Η άμεση απορροή από τις αδιάπερατες και υδάτινες επιφάνειες, η επιφανειακή απορροή, η υποδερμική απορροή από την άνω αποθήκευση, καθώς και η βασική ροή από τις κάτω αποθηκεύσεις παράγουν την παροχή του ποταμού. Το προσομοίωμα της απορροής λειτουργεί με δεδομένα το ημερήσιο νερό βροχής και τήξης που προκύπτει από το προσομοίωμα του χιονιού καθώς και τη μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή που στη συγκεκριμένη μελέτη εκτιμήθηκε με τη μέθοδο Penman [23] και επιμερίσθηκε από το προσομοίωμα σε ημερήσια διαστήματα.

Επειδή η κατακρημνίση και η θερμοκρασία εξαρτώνται έντονα από τη μεταβολή του υψομέτρου, το προσομοίωμα του χιονιού εφαρμόστηκε ανά υψομετρική ζώνη λεκάνης. Έτσι η λεκάνη της Μεσοχώρας χωρίσθηκε σε τρεις υψομετρικές ζώνες, όπου η άνω και μεσαία ζώνη έχουν έκταση ίση με το 30% της ολικής έκτασης και η κάτω ζώνη το υπόλοιπο 40%. Χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από έντεκα σταθμούς μέτρησης κατακρημνίσματος και τρεις σταθμούς μέτρησης θερμοκρασίας. Επειδή όμως οι ημερήσιες καταγραφές των κατακρημνισμάτων περιείχαν ελλιπή δεδομένα το ημερήσιο ύψος κατακρημνίσματος ζώνης υπολογίσθηκε με τη συνδυαστική μέθοδο Thiessen και τη συνθήκη διαθεσιμότητας δεδομένων για τη συγκεκριμένη εκείνη ημέρα [14]. Στη συνέχεια το ύψος κατακρημνίσματος ζώνης διορθώθηκε για υψομετρική μεταβολή [14]. Η ίδια συνδυαστική τεχνική εφαρμόστηκε και για την εκτίμηση της ημερήσιας ελάχιστης και μεγίστης θερμοκρασίας ζώνης [14, 15, 16].

Τα προσομοιώματα ρυθμίσθηκαν ταυτόχρονα για τη δεκαπενταετή περίοδο της μελέτης ακολουθώντας τη διαδικασία δοκιμής-εκτίμησης σφάλματος (trial-and-error approach) [19]. Τα μηνιαία τυπικά σφάλματα προσομοίωσης, δηλαδή οι μηνιαίες διαφορές μεταξύ προσομοιωμένης και μετρημένης απορροής, ήταν της τάξης του 10-15% για όλους τους μήνες εκτός από τον Αύγουστο και Σεπτέμβριο που έφθασαν το 23%. Η ανάλυση σφάλματος της ημερήσιας απορροής καθώς και του όγκου απορροής τριών ημερών έδειξε καλή αναπαραγωγή της μετρημένης ημερήσιας απορροής [16].

Τέλος τα ιστορικά δεδομένα εισόδου ρυθμίσθηκαν για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή η οποία προσομοιώθηκε για:

(α) δεκαπέντε υποθετικά σενάρια κωδικοποιημένα ως HYPO(AT,AP), όπου AT η αύξηση θερμοκρασίας κατά 1,2-4 °C και AP η αλλαγή κατακρημνίσματος κατά 0, ±10, ±20% [18], και

(β) δύο μηνιαία σενάρια που προέκυψαν από το GISS (Goddard Institute for Space Studies) προσομοίωμα γενικής κυκλοφορίας και περιλαμβάνουν αλλαγές κατακρημνίσματος και θερμοκρασίας κωδικοποιημένες ως GISS(I,P) καθώς και θερμοκρασιακές αλλαγές μόνο κωδικοποιημένες ως GISS (I,0) [17].

Θεωρώντας ότι η διαδικασία άφιξης του ημερήσιου κατακρημνίσματος (ακολουθία υγρών και ξηρών ημερών) παραμένει αμετάβλητη, όλες οι ημερήσιες χρονοσειρές εισόδου, πολλαπλασιάσθηκαν, για τις περιπτώσεις HYPO, με ένα ομοιόμορφο συντελεστή και για τις περιπτώσεις GISS, με το μηνιαίο λόγο κατακρημνίσματος (ο λόγος που προέκυψε από το GISS μηνιαίο κατακρημνισμό για 2xCO₂ προς 1xCO₂ και κυμάνθηκε από 0,925 έως 1,487) εφαρμοζόμενο στο κέντρο βάρους της λεκάνης (γεωγραφικό πλάτος 39° 34' και γεωγραφικό μήκος 21° 19'). Οι θερμοκρασιακές αυξήσεις HYPO εφαρμόστηκαν ομοιόμορφα σε όλες τις ημερήσιες σειρές των ιστορικών εισόδων, ενώ οι GISS μηνιαίες διαφορές θερμοκρασίας (κυμαινόμενες από 3,37 έως 4,98°C) μεταξύ των σειρών 2xCO₂ και 1xCO₂ προστέθηκαν στα ιστορικά δεδομένα εισόδου.

Για τις HYPO περιπτώσεις η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) εκτιμήθηκε από την εξίσωση Penman για τις πιο πάνω θερμοκρασίες, που εφαρμόστηκαν ομοιόμορφα στα μηνιαία ιστορικά δεδομένα. Για τις περιπτώσεις GISS, η PET υπολογίσθηκε από την ίδια εξίσωση για μηνιαία δεδομένα θερμοκρασίας των σειρών 1xCO₂ και 2xCO₂.

Υπολογίσθηκαν οι μηνιαίες διαφορές στην *PET* και προστέθηκαν στις ιστορικές τιμές της *PET*. Οι άλλες μεταβλητές στην εξίσωση Penman (ταχύτητα ανέμου, υγρασία, ηλιοφάνεια, κλπ) παρέμειναν σταθερές για αμφότερες τις περιπτώσεις, HYPO και GISS.

3. ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΡΟΩΝ

Ημέρα επισύμβασης χαμηλής ροής ορίζεται εκείνη κατά την οποία η απορροή δεν υπερβαίνει το τέταρτο της μέσης ημερήσιας τιμής της [22]. Για την οριακή αυτή τιμή (κατώφλι), σύμφωνα με τη θεωρία των «αρνητικών δρόμων απόκλισης» (negative runs) [6, 7, 8, 13, 25], προσδιορίσθηκαν οι ακόλουθοι παράμετροι γεγονότων χαμηλής ροής:

- (i) μέσος αριθμός ημερών επισύμβασης χαμηλών ροών στο έτος,
- (ii) αριθμός επεισοδίων χαμηλής ροής κατά την περίοδο της μελέτης (ο αριθμός των ακολουθιών των χαμηλών ροών στην 15-ετη περίοδο),
- (iii) μέση διάρκεια επεισοδίων χαμηλής ροής,
- (iv) μέσο έλλειμμα χαμηλής ροής (μέση αρνητική απόκλιση από το επιλεγμένο κατώφλι) και
- (v) μέση ελάχιστη απορροή

Οι παραπάνω πέντε παράμετροι προσομοιώθηκαν για 15 χρόνια σε 18 εναλλακτικά κλίματα, συμπεριλαμβανομένου και αυτού της βασικής κατάστασης (base case). Οι αποκρίσεις των παραμέτρων αυτών για την οριακή τιμή επισύμβασης χαμηλής ροής 0.082cm (κατώφλι) απεικονίζονται με τη μορφή ιστογραμμάτων στα Σχήματα 1-5 και αναλύονται με συντομία.

3.1. Αριθμός ημερών επισύμβασης χαμηλών ροών

Ο μέσος αριθμός ημερών επισύμβασης χαμηλών ροών στο έτος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Οι 13 από τις 15 περιπτώσεις HYPO καθώς και οι δύο GISS παρήγαγαν πολύ περισσότερες ημέρες χαμηλής ροής από τη βασική κατάσταση. Εξαιρέση από τη συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε στα σενάρια HYPO(1.20) και HYPO(2.20) που έδωσαν λίγο λιγότερες ημέρες χαμηλής ροής. Όλα τα σενάρια μείωσης του κατακρημνίσματος και αύξησης της θερμοκρασίας αύξησαν προοδευτικά τις ημέρες χαμηλής ροής. Μεταξύ των δύο κλιματικών περιπτώσεων GISS, η GISS(1.0) παρήγαγε περισσότερες ημέρες χαμηλής ροής, ενώ μεταξύ των περιπτώσεων HYPO και GISS, οι HYPO(1.-

10), HYPO(2.0) και HYPO(4.10) προσεγγίσθηκαν από την περίπτωση GISS(1.p).

3.2. Αριθμός επεισοδίων χαμηλής ροής

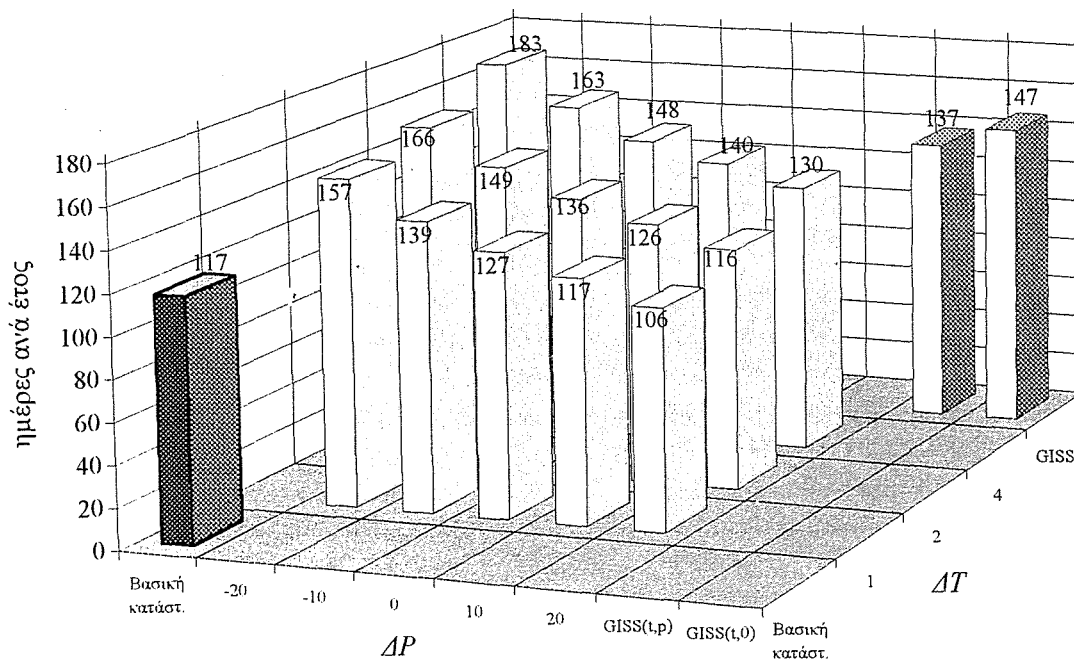
Το Σχήμα 2 παρουσιάζει περισσότερα επεισόδια χαμηλής ροής για μείωση του κατακρημνίσματος, αμετάβλητη συμπεριφορά για μηδενική αλλαγή κατακρημνίσματος, και αύξηση κατακρημνίσματος για όλες τις περιπτώσεις HYPO και GISS(1.0). Η αύξηση της θερμοκρασίας αύξησε μόνο τις επισυμβάσεις των χαμηλών ροών του μειωμένου κατακρημνίσματος, ενώ άφησε ανεπηρέαστες εκείνες του αυξημένου κατακρημνίσματος. Σχετικά με την περίπτωση GISS(1.p), αυτή έδωσε λιγότερες επισυμβάσεις από εκείνες της βασικής κατάστασης, σε αντίθεση με την HYPO(4.-20) που παρήγαγε τα περισσότερα επεισόδια (47% πάνω).

3.3. Μέση διάρκεια επεισοδίων χαμηλής ροής

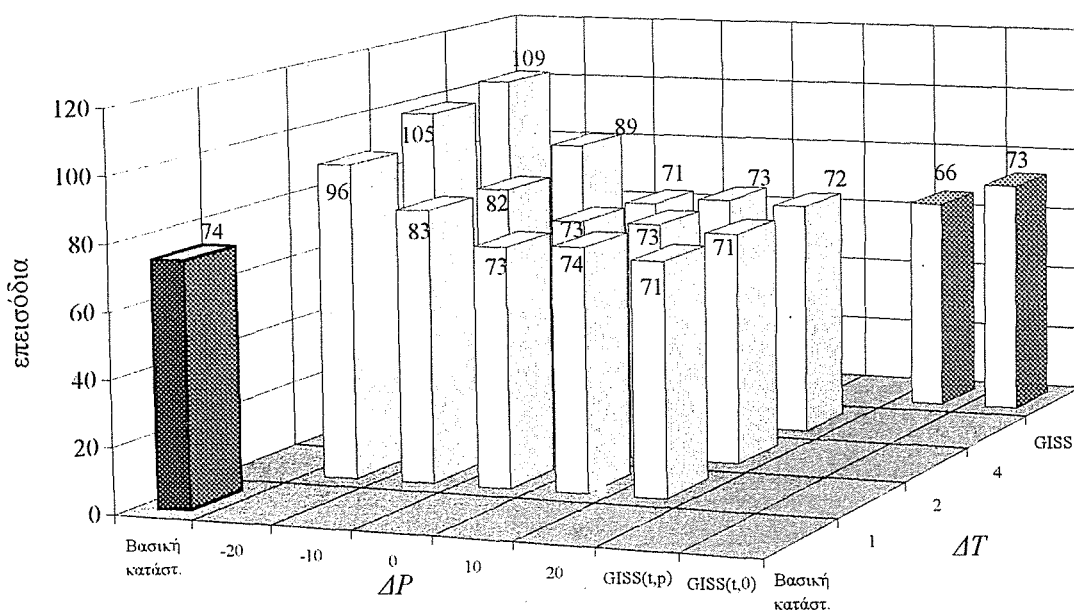
Οι 14 από τις 15 κλιματικές περιπτώσεις HYPO και οι δύο GISS παρήγαγαν επιμηκότερα επεισόδια χαμηλής ροής από εκείνα της βασικής κατάστασης (Σχήμα 3). Μόνο το σενάριο HYPO(1.20) παρέκκλινε από την πιο πάνω συμπεριφορά. Ωστόσο στις περιπτώσεις HYPO παρατηρήθηκε ένα παράδοξο: η διάρκεια αυξήθηκε απροσδόκητα καθώς ελαττώνοντο τα μειωμένα κατακρημνίσματα, ενώ μεγιστοποιήθηκε για μηδενικές αλλαγές κατακρημνίσματος και μειώθηκε κανονικά με την αύξηση του κατακρημνίσματος. Η διάρκεια δεν αυξήθηκε για τις θερμοκρασιακές αυξήσεις HYPO στα κλίματα με μειωμένα κατακρημνίσματα. Αντίθετα, στα κλίματα αυξημένου κατακρημνίσματος η διάρκεια αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ανάμεσα σε όλα τα κλίματα, τα επιμηκότερα επεισόδια παρήχθησαν από το σενάριο HYPO(4.0) που προσεγγίσθηκε από το σενάριο GISS(1.p).

3.4. Μέσο έλλειμμα χαμηλής ροής

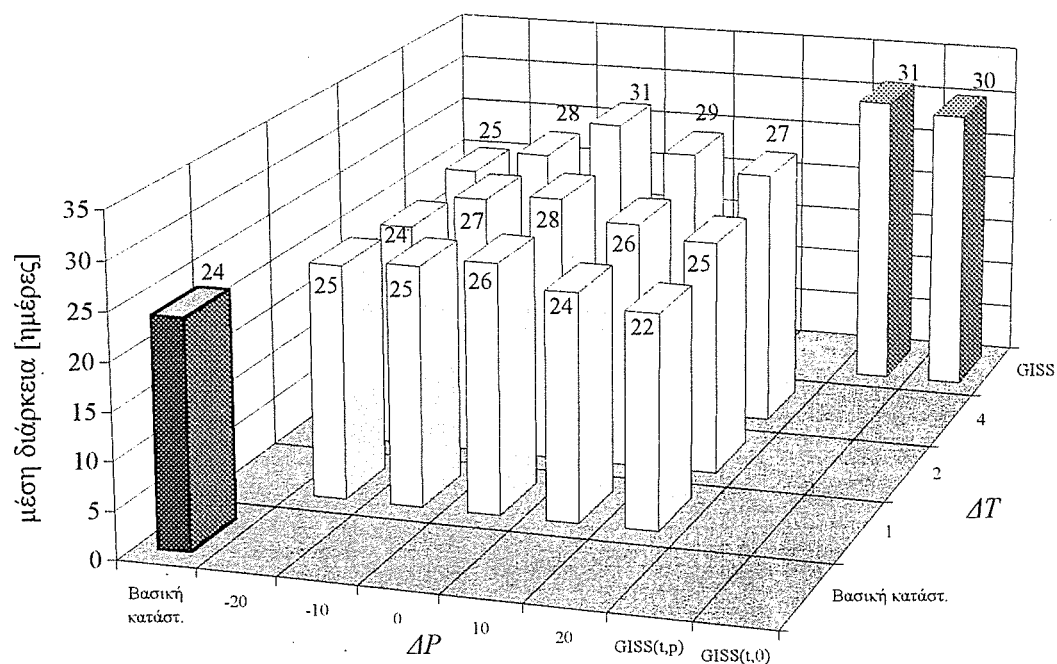
Το μέσο έλλειμμα χαμηλής ροής αυξήθηκε με τη μείωση του κατακρημνίσματος και την αύξηση της θερμοκρασίας για όλες τις κλιματικές περιπτώσεις HYPO και GISS (Σχήμα 4). Οι 14 από τις 15 HYPO περιπτώσεις και οι δύο GISS παρήγαγαν μεγαλύτερα ελλείμματα από τη βασική κατάσταση. Εξαιρέση από τη συμπεριφορά αυτή παρουσίασε το σενάριο HYPO(1.20). Το μέγιστο έλλειμμα παρήχθηκε από το ξηρότερο σενάριο HYPO(4.-20).



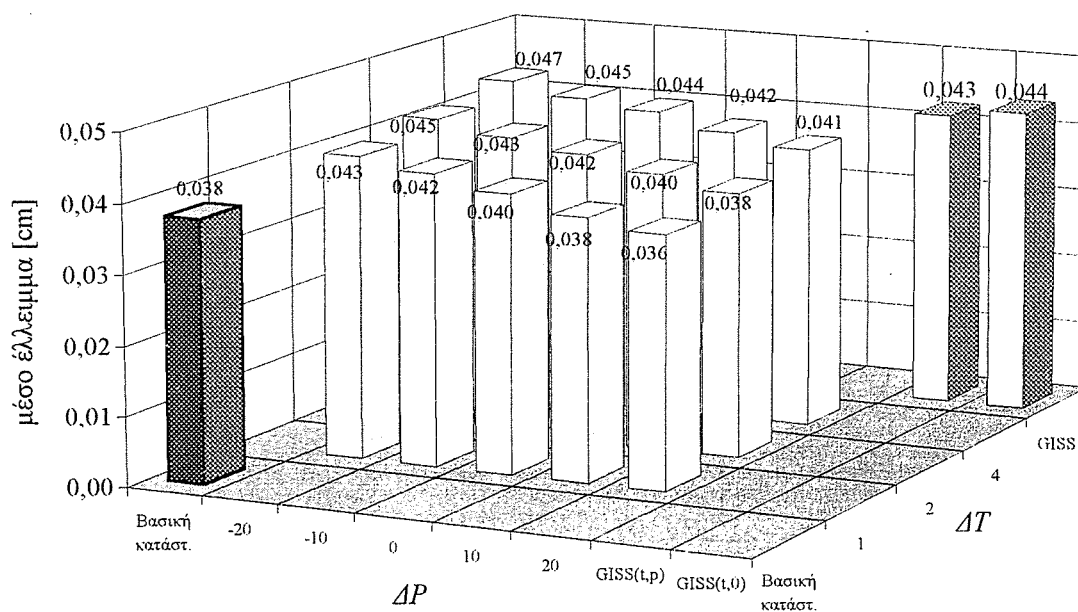
Σχήμα 1: Μέσος αριθμός ημερών επισύμβασης χαμηλών ροών για τη λεκάνη της Μεσοχώρας και για κλιματικά σενάρια HYPO, GISS και τη βασική κατάσταση



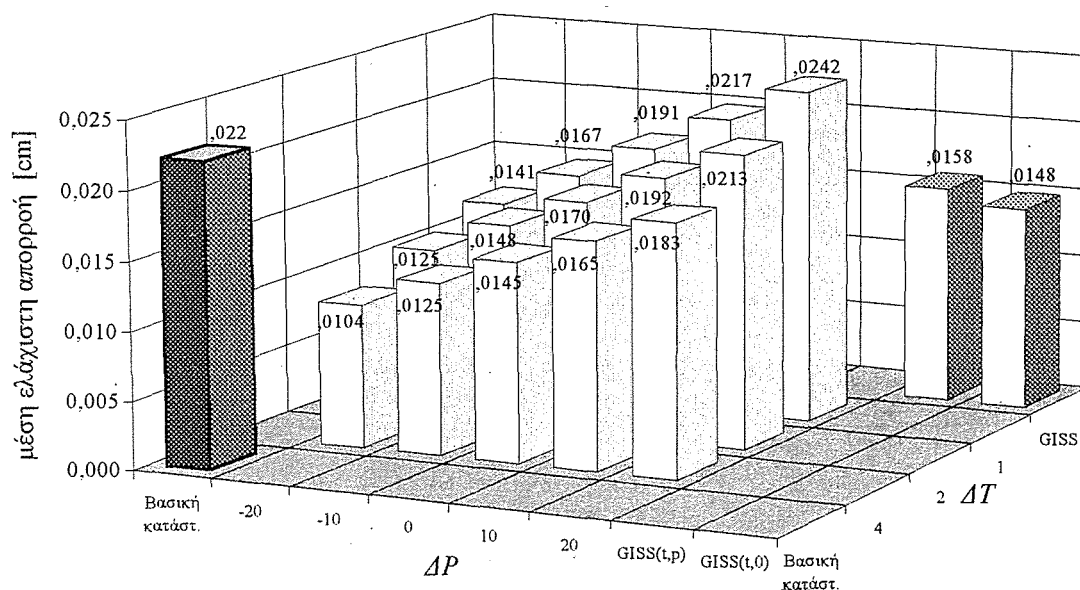
Σχήμα 2: Αριθμός επεισοδίων χαμηλής ροής στην περίοδο μελέτης για τη λεκάνη της Μεσοχώρας και για κλιματικά σενάρια HYPO, GISS και τη βασική κατάσταση.



Σχήμα 3: Μέση διάρκεια επεισοδίων χαμηλής ροής για τη λεκάνη της Μεσοχώρας για κλιματικά σενάρια HYPO, GISS και τη βασική κατάσταση.



Σχήμα 4: Μέσο έλλειμμα χαμηλής ροής για τη λεκάνη της Μεσοχώρας για κλιματικά σενάρια HYPO, GISS και τη βασική κατάσταση.



Σχήμα 5: Μέση ελάχιστη απορροή για τη λεκάνη της Μεσοχώρας για κλιματικά σενάρια HYPO, GISS και τη βασική κατάσταση.

3.5. Μέση ελάχιστη απορροή

Η μέση ελάχιστη ημερήσια απορροή είναι μικρότερη από αυτή της βασικής κατάστασης για τα δύο GISS κλίματα και τα 14 από τα 15 HYPO (Σχήμα 5). Εξαιρέση πάλι παρουσίασε το σενάριο HYPO(1,20). Η ελάχιστη απορροή αυξήθηκε προοδευτικά με την αύξηση του κατακρημνίσματος και μειώθηκε επίσης προοδευτικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Μεταξύ των HYPO και GISS εναλλακτικών περιπτώσεων τη μικρότερη τιμή της ελάχιστης απορροής παρήγαγε το ξηρότερο σενάριο HYPO(4,-20).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση συμπεραίνεται ότι οι αποκρίσεις της χαμηλής ροής στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Τα γεγονότα χαμηλής ροής εξεταζόμενα με όρους συχνότητας, μέσης διάρκειας και μέσου μεγέθους επηρεάζονται πρωτίστως από μειώσεις κατακρημνίσματος και κατά δεύτερο λόγο από θερμοκρασιακές αυξήσεις. Ωστόσο σχετικά με τον αριθμό των επεισοδίων και τη διάρκειά τους εγείρονται κάποιες ερωτήσεις, όπως:

α. την ουδέτερη απόκριση των επεισοδίων στις συζευγμέ-

νες αυξήσεις θερμοκρασίας και κατακρημνίσματος.

β. την αύξηση της διάρκειας με την ελάττωση του μειωμένου κατακρημνίσματος και

γ. την ακατάστατη αύξηση της διάρκειας τους για αύξηση της θερμοκρασίας για τα κλίματα μειωμένου κατακρημνίσματος.

Οι πιο πάνω ασυμβατότητες φαίνεται να συνδέονται με δύο παράγοντες-κλειδιά: τη μειωμένη διαπερατότητα της λεκάνης και την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα με μικρό συντελεστή καμπίς έτσι ώστε να διατηρήσει μεγαλύτερη βασική ροή κατά τις περιόδους χαμηλών ροών και ξηρασιών. Ακόμη, άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με αυτές τις ασυνέπειες είναι η ομοιόμορφη εφαρμογή της κλιματικής αλλαγής και η διαδικασία άφιξης του κατακρημνίσματος που θεωρήθηκε όμοια με αυτή των ιστορικών δεδομένων. Ωστόσο θεωρούμε τη σημαντικότητα της μελέτης αυτής όχι με όρους αριθμητικών αποτελεσμάτων αλλά με όρους διαφώτισης που αυτή παρέχει σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής πάνω στα καθεστώτα χαμηλών ροών και τη διασύνδεσή τους με το κλίμα. Αναγνωρίζοντας τους περιορισμούς που τέθηκαν κάτω από τις διάφορες παραδοχές, καταλήγουμε στα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- Αμφότερα τα κλιματικά καθεστώτα HYPO και GISS παρήγαγαν γεγονότα χαμηλών ροών με την ίδια συμπεριφορά.
- Η πλειοψηφία των σεναρίων έδωσε περισσότερες ημέρες χαμηλής ροής για μείωση του κατακριμνίσματος και αύξηση της θερμοκρασίας. Ο αριθμός των επεισοδίων αυξήθηκε μόνον στα κλίματα με μικρά κατακριμνίσματα. Η αύξηση ήταν μεγαλύτερη για σενάρια αυξημένης θερμοκρασίας.
- Σχεδόν όλα τα σενάρια έδωσαν επιμηκύτερα επεισόδια χαμηλής ροής. Ωστόσο, η αύξηση της διάρκειάς τους για μείωση του κατακριμνίσματος και αύξηση της θερμοκρασίας ήταν ασυμβίβαστη.
- Οι περισσότερες κλιματικές περιπτώσεις παρήγαγαν μεγαλύτερα ελλείμματα χαμηλής ροής και μικρότερες τιμές ελάχιστης απορροής σε προοδευτικό ρυθμό με τη μείωση του κατακριμνίσματος και την αύξηση της θερμοκρασίας.
- Η γενική εικόνα των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με τη μείωση της θερινής και φθινοπωρινής απορροής [15] είναι δυνατό να θέσει σε κίνδυνο την ποιότητα του νερού των ποταμών, την αξιοπιστία των ταμιευτήρων και φραγιμάτων καθώς και την παροχή νερού από τοπικούς υπόγειους υδροφορείς.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anderson E.A., "US National Weather Service river forecast system. Snow accumulation and ablation model", NOAA Technical Memorandum, NWS HYDRO 17, 1973.
2. BAHC Core Project Office, "Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle", Report No 27. Institut für Meteorologie, Freie Universität, Berlin, 1993.
3. Burnash R.J.C., Ferral R.L. & Macquire R.A. "A generalized streamflow simulation system conceptual modelling for digital computers", US National Weather Service, Sacramento, California, USA, 1973.
4. Cordery, I. and Yao, S.L., Non stationarity of phenomena related to drought In: Z.W. Kundzewicz, D. Rosbjerg, S.P. Simonovic and K. Takeuchi, *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*, IAHS Publications, N° 213, Yokomama Japan, 20-23 July, 1993, 87-93.
5. Dickinson R.E., Modelling climate change due to carbon dioxide increases. In: W.C. Clark, ed. *Carbon Dioxide Review*, Oxford University Press, New York, 1982.
6. Dracup J.A., Lee K. S. & Paulson E.G., "On the definition of Droughts". *Water. Resour. Res.*, Vol. 16(2), 1980, pp. 297-302.
7. Dracup J.A., Lee K. S. & Paulson, E.G., "On the Statistical Characteristics of Drought Events", *Water. Resour. Res.*, Vol. 16(2), 1980, pp. 289-296.
8. Gellens D., "Impact of a CO₂-induced Climatic change on river flow variability in three rivers in Belgium", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 16, 1991, pp. 619-625.
9. Hansen J., Russell G., Rind D., Stone P., Laus A., Lebedeff S., Ruedy R. and Travis L., "Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II", *Monthly Weather Review*, Vol. 111(4), 1983, 609-662.
10. MacCracken, M. and Luther, F. (eds), (1986) *Projecting the climatic effects of increasing carbon dioxide*. US Office of Energy Research, Office of Basic Energy Sciences, Carbon Dioxide Research Division, Washington, DC, USA.
11. Manabe S., "Climate and ocean circulation. I. The atmospheric circulation and hydrology of the earth's surface", *Mon. Weather Rev.*, Vol. 97, 1969, 739-774.
12. Manabe S. and Wetherald R., "CO₂ and hydrology", In: *Advances in Geophysics*, Vol. 28(a), 1985, Academic Press, Washington, D.C.
13. Panagoulia D. & Dimou G., "Climatic instability and low-flow regimes", Symposium on: *Water Resources management in the Mediterranean under drought or water shortage conditions*, 1995, Cyprus.
14. Panagoulia D., "Assessment of daily catchment precipitation in mountainous regions for climate change interpretation", *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 40(3), 1995.
15. Panagoulia D., "Catchment hydrological responses to climate changes calculated from incomplete climatological data", *Proc. of Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*, Yokomama Japan, 13-16 July, 1993, IAHS Publications, N° 212, pp. 461-468.
16. Panagoulia D., "Hydrological modelling of a medium-sized mountainous catchment from incomplete meteorological data", *J. Hydrol.*, Vol. 137(1-4), 1992, pp. 279-310.
17. Panagoulia D., "Impacts of GISS-modelled climate changes on catchment hydrology", *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 37(2), 1992, pp. 141-163.
18. Panagoulia, D., "Hydrological response of a medium-sized mountainous catchment to climate changes", *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 36(6), 1991, pp. 525-547.
19. Peck E.L., "Catchment modelling and initial parameter estimation for the NWSRFS NOAA", Technical Memorandum NWS HYDRO 17, 1976, USA.
20. Raudkivi, A.J. (1979) *Hydrology, An Advance Introduction to Hydrological Processes and Modelling* Pergamon Press, Extreme Events, Design Flood and Small Catchment Runoff, pp. 272-275
21. Schlesinger, M.E., "Climate model simulation of CO₂-induced climate change", in *Advances in Geophysics*, Vol. 26, 1984, edited by B. Saltzman, 141-235, Academic, San Diego, Calif.
22. Shaw, E.M., "Droughts", in: *Hydrology in Practice*, 1993, Van Nostrand Reinhold, UK.
23. Veihmeyer, F.J. "Evapotranspiration", Chapter 11 in: *Handbook of Applied Hydrology* (ed. V.T. Chow), 1964, McGraw Hill, New York, USA.
24. U.S. National Academy of Sciences, *Changing climate*, 1983, National Academy of Sciences, National Academy Press, Washington D.C., USA.
25. Yevjevich V.M., "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrological droughts", *Hydrol. Pap.*, Vol. 23, 1967, Colo. State Univ., Ft. Collins, USA.
26. ΥΠΕΧΩΔΕ Εκτροπή Αχλόςου. Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αθήνα 1995.

Διονυσία Παναγούλια,

Λέκτορας Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων-Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων.

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ. Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Ζωγράφου 15780.

Γιώργος Δήμου,

Δρ Πολιτικός μηχανικός, οδός Βουτυρά αρ. 7, Βούλα 16673.