

FACTUAL DROUGHT INDEX- FDI. ΈΝΑΣ ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ.

Βασιλεία Π. Φασούλη*, Δημήτριος Τσεσμελής, Σταύρος Αλεξανδρής, Χρίστος Καραβίτης
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και γεωργική Μηχανική, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο
Αθηνών, 11855 Αθήνα, Ελλάδα

*Επικοινωνία: E-mail: vafas@aau.gr

Περίληψη

Η ξηρασία είναι μία κατάσταση ανεπάρκειας ύδατος που οφείλεται κυρίως στην έλλειψη βροχοπτώσεων για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου απαιτείται όμως η μελέτη και άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με τη ζήτηση ύδατος. Η εξατμοδιαπνοή είναι μία από αυτές τις παραμέτρους και τα τελευταία χρόνια γίνεται μία προσπάθεια ενσωμάτωσής της στους δείκτες ξηρασίας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας νέος δείκτης ξηρασίας (Factual Drought Index – FDI), που προκύπτει από δεδομένα βροχόπτωσης και εξατμοδιαπνοής. Ο FDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση, αξιολόγηση και κατηγοριοποίηση του φαινομένου, αλλά και την πρόβλεψή μίας μελλοντικής ξηρασίας ή μίας ιδιαίτερα υγρής περιόδου, αποτελώντας σημαντικό βοήθημα στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων.

Η Ελλάδα πλήττεται συχνά από έντονες ξηρασίες και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης. Έτσι, ο δείκτης FDI εφαρμόστηκε για το έτος 1990, διότι το έτος αυτό σημειώθηκε στη χώρα ξηρασία με περίοδο επαναφοράς περίπου 1000 ετών. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή του δείκτη έγινε με χρονική αναφορά 6 και 12 μηνών, για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο (πριν και μετά το καλοκαίρι) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα του SPI. Οι δείκτες υπολογίστηκαν από χρονοσειρές δεδομένων από το 1951 έως και το 2013, που συγκεντρώθηκαν από 17 μετεωρολογικούς σταθμούς.

Ο δείκτης FDI, μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τους λήπτες των αποφάσεων και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην Διαχείριση της Ξηρασίας. Ως εκ τούτου, μπορεί να είναι ιδιαίτερος ωφέλιμος στον Προληπτικό Σχεδιασμό με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας της κοινωνίας σε σχετικές φυσικές καταστροφές.

Λέξεις - κλειδιά: Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Προληπτικός Σχεδιασμός, Ξηρασία, Διαχείριση Ξηρασίας, Σύνθετοι Δείκτες, Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων.

Εισαγωγή

Η συνολική ποσότητα ύδατος της γης είναι σταθερή, όμως κατανέμεται ή μεταφέρεται διαφορετικά στο χώρο στις διάφορες χρονικές περιόδους, μέσω διήθησης, εξατμοδιαπνοής, απορροής και άλλων υδρο-μετεωρολογικών διαδικασιών. Αυτή η μεταφορά μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα ξηρασίας ή πλημμυρών, τα οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να αντιμετωπιστούν από την κοινωνία. Η ξηρασία είναι ένα πολύπλοκο φυσικό φαινόμενο που επηρεάζει τις ανθρώπινες δραστηριότητες περισσότερο από κάθε άλλο φυσικό κίνδυνο με τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις παγκοσμίως (Bruce, 1994; Ding et al., 2010;). Ταυτόχρονα είναι ένα συχνό φαινόμενο που συμβαίνει ανεξάρτητα από τις κλιματικές συνθήκες (Yevjevich et al., 1983; Grigg, 1996; Karavitis, 1999; Bordi et al., 2006; Eriyagama et al., 2009; Karavitis et al., 2012a, b) και προκαλεί προβλήματα στην παροχή ύδατος, στην άρδευση και στα περιβαλλοντικά συστήματα με σημαντικές κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Yevjevich et al., 1983; Karavitis, 1992; Rossi et al., 1992; Wilhite et al., 2000; Sheffield et al., 2012).

Με άλλα λόγια ξηρασία είναι «η κατάσταση των δυσμενών και διαδεδομένων υδρολογικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων που οφείλονται σε ποσότητες νερού μικρότερες από τις αναμενόμενες. Αυτές οι ελλείψεις νερού μπορεί να προέρχονται από μειωμένες βροχοπτώσεις, από φυσικές και / ή λειτουργικές ανεπάρκειες στην παροχή νερού και τα συστήματα διανομής καθώς και από ανεπάρκειες στη διαχείριση των υδάτων» (Karavitis, 1992; Karavitis, 1999). Δυστυχώς η συνήθης αντίληψη των πολιτών και ακόμα χειρότερα η προσέγγιση των πολιτικών και των ληπτών αποφάσεων είναι ότι η ξηρασία είναι ένα προσωρινό φαινόμενο που απαιτεί την κινητοποίηση των αρμόδιων αρχών μόνο κατά τη διάρκεια της κρίσης (Grigg, N.S. and Vlachos, E.C., 1990; Karavitis, 1999). Στην πραγματικότητα η ξηρασία είναι ένα αναπόφευκτο και μόνιμο στοιχείο του παγκόσμιου κλίματος και η ιστορία έχει αποδείξει ότι η προληπτική προσέγγιση της είναι πολύ πιο αποτελεσματική στο μετριασμό των συνεπειών της από την εφαρμογή μίας διαχείρισης κρίσεων ή μίας προσέγγισης αντίδρασης.

Ξηρασία και Δείκτες

Οι περισσότερες προσεγγίσεις, εργαλεία, μέθοδοι και τεχνικές που χρησιμοποιούνται κατά τη λήψη των αποφάσεων, βασίζονται κυρίως στους δείκτες. Ως “Δείκτες” ορίζονται απλές ή σύνθετες μεταβλητές οι οποίες παρέχουν πληροφορίες για ένα φαινόμενο ή περιγράφουν μία κατάσταση (Segnestam, 2002; Dahl, 2012) και χρησιμοποιούνται για να απλοποιήσουν, να ποσοτικοποιήσουν και να εκφράσουν πληροφορίες που αφορούν σύνθετα και πολύπλοκα φαινόμενα, συμβάλλοντας έτσι στη λήψη αποφάσεων και στην κατανόηση ενός φαινομένου (EEA, 1999; 2005; Kosmas et al, 2003; Kosmas et al, 2014; Kairis et al, 2014). Η φύση του κάθε δείκτη, οι τοπικές συνθήκες, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων είναι παράμετροι που καθορίζουν ποιος δείκτης είναι καταλληλότερος για κάθε περίπτωση (Skondras et al. 2011).

Για την αναγνώριση της ξηρασίας έχουν αναπτυχθεί αρκετοί δείκτες. Κάποιοι από αυτούς είναι ο Standardized Precipitation Index - SPI (Mc Kee, 1993), ο Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010), ο Reconnaissance Drought Index - RDI (Tsakiris et al., 2007) κ.α. Όλοι οι δείκτες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, ο SPI, υπολογίζεται μόνο από δεδομένα βροχόπτωσης και δεν μπορεί να αποδώσει τις συνέπειες των αλλαγών της θερμοκρασίας, οι οποίες μέσω της εξατμοδιαπνοής επηρεάζουν τα αποθέματα νερού. Ο SPEI στην εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής χρησιμοποιεί την μέθοδο Thornwaite (1948) που έχει πολύ μεγάλες αποκλίσεις από την FAO 56 (Penman- Monteith, 1998) σε σχέση με άλλες μεθόδους. Ο RDI δεν υπολογίζεται όταν $ET=0$ (Vicente-Serrano et al., 2010), που είναι πολύ σύνθητες σε πολλές περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Όλες οι παραπάνω ελλείψεις στάθηκαν η αιτία για την ανάπτυξη ενός νέου δείκτη, του Factual drought Index - FDI, ο οποίος βασίζεται στη γενική μορφή της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου.

Υλικά και μέθοδοι

Εννοιολογικό πλαίσιο

Ο FDI βασίζεται στη συνολική μηνιαία βροχόπτωση (P), που είναι τυχαίο γεγονός και την συνολική μηνιαία εξατμοδιαπνοή (ET), η οποία παρουσιάζει εποχική συμπεριφορά και οι τιμές της εκτιμώνται με διάφορες μεθόδους. Η εξατμοδιαπνοή εκτιμάται σύμφωνα με τη μέθοδο Hargreaves & Samani, (1985). Ως προς την ξηρασία, η εξατμοδιαπνοή, έχει ιδιαίτερη σημασία όταν παρουσιάζει απόκλιση από τη μέση τιμή της, για δεδομένη εποχή του έτους. Δηλαδή, αν η

εξατμοδιαπνοή για το μήνα j , του έτους i (ET_{ij}) αποκλίνει από τη μέση εξατμοδιαπνοή $\overline{ET_j}$ που προκύπτει από όλους τους μήνες j της διαθέσιμης χρονοσειράς, τότε έχει μεγάλη επιρροή στην αύξηση ή μείωση των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων στο έδαφος για το έτος αυτό.

Πιο συγκεκριμένα, όταν $ET_{ij} - \overline{ET_j} > 0$ τότε τα διαθέσιμα αποθέματα ύδατος είναι λιγότερα από το αναμενόμενο/σύνηθες, γεγονός που θα μπορούσε να κάνει πιο έντονο ένα επεισόδιο ξηρασίας και αντίστροφα. Με άλλα λόγια, αυτό που μπορεί να κάνει ένα φαινόμενο ξηρασίας πιο έντονο, είναι η μεγάλη απόκλιση της εξατμοδιαπνοής από τη μέση τιμή της για συγκεκριμένη εποχή και όχι οι τιμές της εξατμοδιαπνοής που ακολουθούν μία φυσιολογική εποχική συμπεριφορά.

Υπολογισμός του FDI

Η αναγνώριση και εκτίμηση της έντασης της ξηρασίας μπορεί να γίνει μέσω του υπολογισμού του δείκτη Factual Drought Index –FDI. Ο FDI εκφράζεται από την τυποποιημένη (standardized) μορφή του, FDI_{st} . Η αρχική του μορφή, εξίσωση G , για το έτος i σε χρονική βάση k (m μήνες), δίνεται αθροιστικά και χρησιμοποιεί μηνιαίο χρονικό βήμα, ενώ υπολογίζεται από μηνιαία, 2-μηνιαία, 3-μηνιαία, ..., 12-μηνιαία κλπ βάση. Επομένως η G για το έτος i και με χρονική βάση k (μήνες) υπολογίζεται ως εξής:

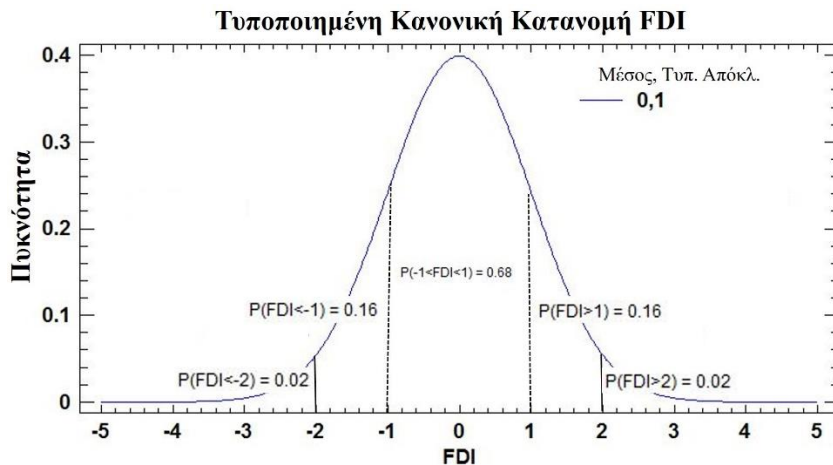
$$G = \sum_{m=1}^k P_{ij} - \left(\sum_{m=1}^k ET_{ij} - \sum_{m=1}^k \overline{ET_j} \right), i = 1 \text{ έως } N \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου P_{ij} και ET_{ij} είναι η ποσότητα των κατακρημνισμάτων (mm) και η δυνητική εξατμοδιαπνοή (mm) για το μήνα j του έτους i αντίστοιχα, $\overline{ET_j}$ είναι η μέση δυνητική εξατμοδιαπνοή (mm) που προκύπτει από όλους τους μήνες j της χρονοσειράς (N) και N είναι ο συνολικός αριθμός των ετών της διαθέσιμης χρονοσειράς.

Εάν είναι διαθέσιμη μία χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης και εξατμοδιαπνοής για μία περιοχή, μπορεί να υπολογιστεί η G για οποιοδήποτε μήνα της χρονοσειράς, αλλά και για οποιοδήποτε χρονική βάση, από τους προηγούμενους i μήνες, όπου $i=1, 2, 3, \dots, 12, \dots, 24, \dots, 48, \dots$ ανάλογα με την επιθυμητή χρονική κλίμακα. Έτσι η G μπορεί να υπολογιστεί για το σύνολο της 6-μηνιαίας βροχόπτωσης και εξατμοδιαπνοής, όπως επίσης και το σύνολο της 48-μηνιαίας βροχόπτωσης και εξατμοδιαπνοής.

Οι τιμές της G ελέγχθηκαν με τα *Kolmogorov-Smirnov tests* για το αν ακολουθούν κανονική κατανομή με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Προέκυψε ότι στα μεγαλύτερα χρονικά βήματα (6, 9, 12 κλπ), οι τιμές ακολουθούν πολύ ικανοποιητικά την κανονική κατανομή, οπότε και έγινε δεκτή, διότι σε περιοχές που συναντάται ξηρασία (όπως πχ η Ελλάδα), τα χρονικά βήματα που αποτυπώνουν καλύτερα το φαινόμενο είναι τα 6, 9 και 12, αφού στα βήματα 1, 2, 3 κλπ η παράμετρος της βροχόπτωσης είναι συνήθως μηδενική τους καλοκαιρινούς μήνες, με αποτέλεσμα οι δείκτες να δίνουν κάθε καλοκαίρι ξηρασία. Επομένως, η τυποποιημένη μορφή της G , προκύπτει από τον ορισμό της Τυποποιημένης Κατανομής, δηλαδή η τυχαία μεταβλητή G που έχει μέσο \bar{G} και διακύμανση σ_G^2 , έχει ως τυποποιημένη μορφή την: $Z = \frac{G - \bar{G}}{\sigma_G} = FDI_{st} = FDI$ (Εξίσωση 2)

Με μέσο ίσο με μηδέν (0) και τυπική απόκλιση ίση με τη μονάδα (1).



FDI	Αθροιστική Πιθανότητα
-3	0.0013
-2.5	0.00620966
-2	0.02275
-1.5	0.066807
-1	0.158655
-0.5	0.308536
0	0.5
0.5	0.691464
1	0.841345
1.5	0.933193
2	0.97725
2.5	0.99379
3	0.99865

Εικόνα 1. Τυποποιημένη κανονική κατανομή για τον FDI με μέσο=0 και τυπική απόκλιση=1

Πίνακας 1. Τιμές FDI και Αθροιστική Πιθανότητα

Η Εικόνα 1 παρουσιάζει την Τυποποιημένη κανονική κατανομή για τον FDI, ενώ στον Πίνακα 1 φαίνονται οι τιμές του FDI και η αντίστοιχη αθροιστική πιθανότητα εμφάνισής τους. Από τον Πίνακα 1 προκύπτει και η κατηγοριοποίηση των τιμών του FDI σε κλάσεις (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Κατηγοριοποίηση FDI

ΤΙΜΗ FDI	ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΞΗΡΑΣΙΑΣ
2.00 ή περισσότερο	Εξαιρετικά υγρή περίοδος
1.50 έως 1.99	Πολύ υγρή περίοδος
1.0 έως 1.49	Μετρίως υγρή περίοδος
0.50 έως 0.99	Ελαφρώς υγρή περίοδος
-0.50 έως 0.49	Κανονική
-1.0 έως -0.49	Ελαφρώς ξηρή περίοδος
-1.5 έως -0.99	Μέτρια ξηρασία
-1.99 έως -1.49	Έντονη ξηρασία
-2 ή λιγότερο	Εξαιρετικά έντονη ξηρασία

Θετικές τιμές του FDI_{st} δείχνουν υγρές περιόδους, ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν ξηρές περιόδους σε σύγκριση με τις κανονικές συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής (όπως και ο SPI). Γενικότερα ο FDI_{st} συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο όπως και ο SPI με αποτέλεσμα να έχουν και παρόμοια ερμηνεία αποτελεσμάτων και όμοια κατηγοριοποίηση. Επομένως οι τιμές του FDI_{st} μπορούν να συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές του SPI.

Περιοχή μελέτης

Η έκταση της Ελλάδας είναι 131,957 km² με ακτογραμμή 13,676 km και 10,815,197 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (Census, 2011). Ανήκει στη μεσογειακή περιοχή με ψυχρούς και βροχερούς χειμώνες και ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και το νερό χρησιμοποιείται κυρίως με μη βιώσιμο τρόπο (Karavitis & Kerkides, 2002; Vicente-Serrano et al., 2010; Karavitis et al, 2014). Οι κύριες οικονομικές δραστηριότητες είναι ο τουρισμός και η γεωργία, δραστηριότητες άμεσα συνυφασμένες με τη διαθεσιμότητα ύδατος.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η Έλλαδα χαρακτηρίζεται ως επιρρεπής στην ξηρασία, με δεδομένο ότι έχουν παρατηρηθεί επανειλημμένα ελλείψεις νερού π.χ. 1989–90, 1993, 2000, 2003 και 2007 (Karavitis, 1998; Tsakiris & Vangelis, 2004; Livada & Assimakopoulos, 2007; Loukas et al., 2007; Vasiliades et al., 2009; Karavitis et al, 2014). Η χώρα έχει άμεση εξάρτηση από την ετήσια βροχόπτωση και τα πρότυπα θερμοκρασίας λόγω υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων αποθεμάτων και έλλειψης υποδομών (Karavitis, 2008), με αποτέλεσμα οποιαδήποτε μείωση της βροχόπτωσης ή μη αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας να προκαλεί έντονες αρνητικές συνέπειες στις ανθρώπινες δραστηριότητες και το περιβάλλον.

Το 1990 η Ελλάδα αντιμετώπισε πολύ έντονη έλλειψη νερού, λόγω μειωμένης βροχόπτωσης, υψηλότερων θερμοκρασιών από τις αναμενόμενες, αλλά και λόγω έλλειψης ενός τοπικού ή εθνικού προληπτικού σχεδιασμού για τη διαχείριση της ξηρασίας. Έτσι, επιλέχθηκε το έτος αυτό για την εφαρμογή του δείκτη. Συνεπώς, συλλέχθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από 17 σταθμούς, οι θέσεις των οποίων απεικονίζονται στην Εικόνα 2, ενώ οι συντεταγμένες, οι χρονοσειρές των δεδομένων και η μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία για τον κάθε σταθμό φαίνονται στον Πίνακα 3.



Εικόνα 2. Θέσεις Μετεωρολογικών Σταθμών

Πίνακας 3. Λίστα των μετεωρολογικών σταθμών, συντεταγμένες (σε Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 ή ΕΓΣΑ'87), χρονοσειρές και μετεωρολογικά δεδομένα (EMY, NOOA).

A/A	Σταθμός	X	Y	Χρονοσειρά	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	Ετήσια βροχόπτωση 1990 (mm)	Μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα (°C)	Ετήσια θερμοκρασία αέρα 1990 (°C)
1	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	658700	4524207	1951-2004	538.45	436.9	15.03	15.51
2	ΑΛΙΑΡΤΟΣ	421241	4248074	1967-2001	535.69	464.2	16.8	17.43
3	ΙΩΑΝΝΙΝΑ	228653	4396541	1956-2004	1058.59	794	14.29	14.74
4	ΚΟΖΑΝΗ	312819	4462979	1955-2004	478.74	375.6	13.05	13.83
5	ΜΗΛΟΣ	539428	4060036	1955-2004	411.99	345.6	17.64	17.9
6	ΜΙΚΡΑ	416538	4488871	1959-2004	445.28	329	15.82	16.42
7	ΦΛΩΡΙΝΑ	250640	4484901	1961-2004	649.42	389.9	12.18	12.51
8	ΝΑΞΟΣ	621994	4106486	1955-2004	362.59	205.8	18.24	22.54
9	ΠΑΤΡΑ	300753	4216836	1955-1996	659.96	212.8	17.91	18.68
10	ΣΕΡΡΕΣ	444376	4543121	1972-2004	457.3	459.5	15.27	15.96
11	ΣΑΜΟΣ	738574	4185160	1979-2011	687.02	520	18.68	18.9
12	ΧΑΝΙΑ	503826	3929952	1961-2000	603.74	283.4	18.32	18.34
13	ΚΕΡΚΥΡΑ	149236	4392784	1955-2001	1089.96	774.7	16.84	17.25
14	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	476176	4193322	1955-2011	357.13	204.5	18.29	18.58
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	605476	3909707	1955-2013	469.36	194.2	18.42	18.64
16	ΛΑΡΙΣΑ	363919	4387859	1955-2001	422.59	390.1	15.09	15.59
17	ΜΕΘΩΝΗ	294734	4078194	1956-2012	659.9	742.3	17.65	17.76

Εφαρμογή

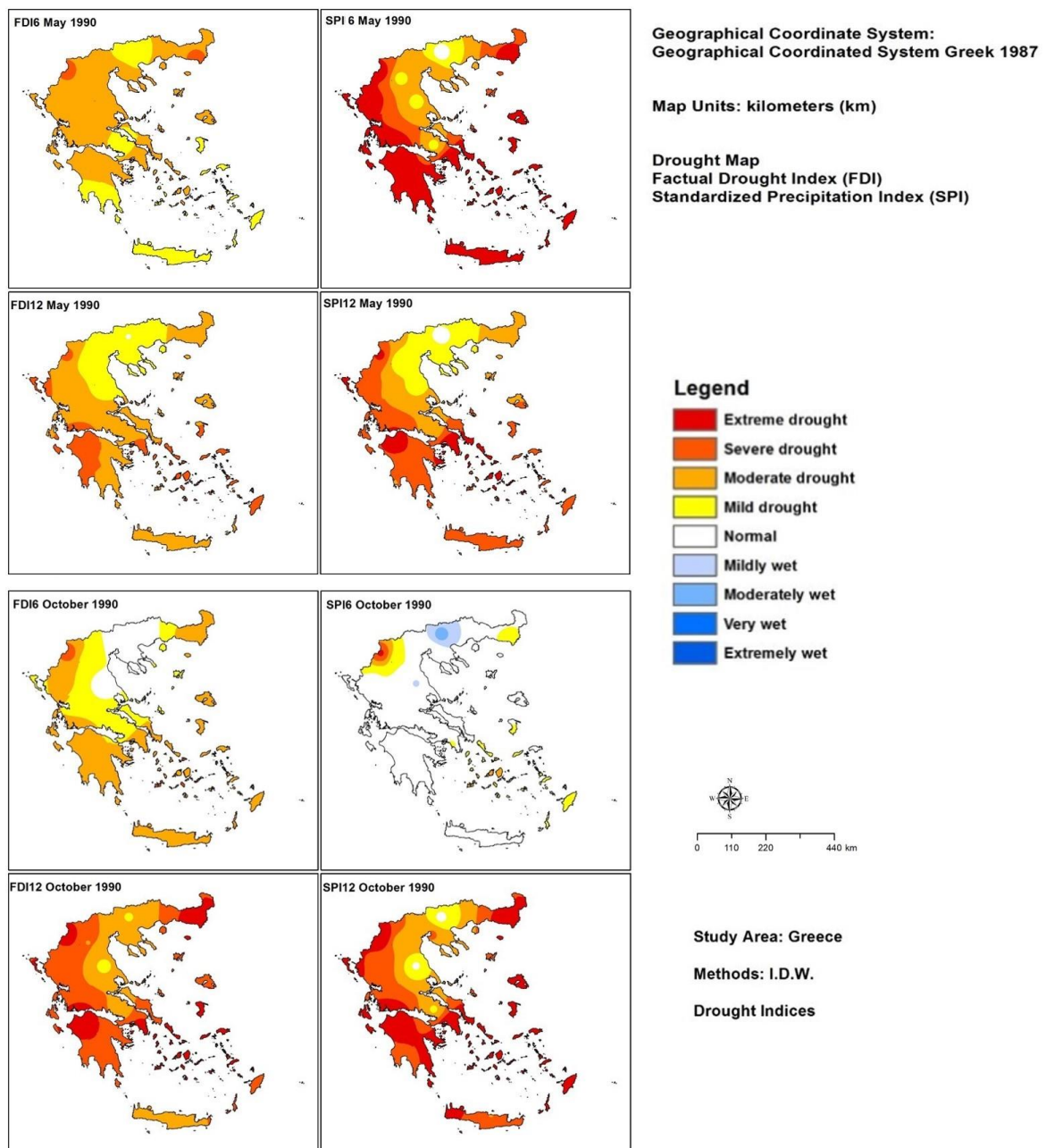
Ο δείκτης εφαρμόστηκε στον Ελλαδικό χώρο με παράλληλη εφαρμογή και του δείκτη SPI, έτσι ώστε να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των δύο δεικτών με τις πραγματικές συνθήκες της εποχής. Οι τιμές του FDI και SPI (6 and 12) για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο του 1990 υπολογίστηκαν για όλους τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς, με δεδομένα βροχόπτωσης και εξατμοδιαπνοής από την Εθνική Μετεωρολογική υπηρεσία (EMY) και το National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA).

Όλοι οι σταθμοί που επιλέχθηκαν, παρουσιάζουν καλή ποιότητα δεδομένων και ελάχιστα κενά στις χρονοσειρές. Επιπλέον, οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν είναι μεγαλύτερες των 30 ετών, προκειμένου να αποδώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα και οι δύο δείκτες, (McKee et al., 1993). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές του FDI και του SPI, για τον κάθε σταθμό και για τις

επιλεγμένες περιόδους. Ακολούθως, οι τιμές που προέκυψαν κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τις κλάσεις που δίνονται στον Πίνακα 2 (όμοια κατηγοριοποίηση με τον SPI).

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα από τις τιμές των FDI και SPI (6 και 12) για τον Μάιο και τον Οκτώβριο του 1990 παρουσιάζονται σε χάρτες (Εικόνα 3). Επιλέχθηκαν αυτοί οι δύο μήνες για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των δεικτών στο συγκεκριμένο επεισόδιο ξηρασίας πριν και μετά το καλοκαίρι. Οι χάρτες δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον GIS με τη μέθοδο παρεμβολής Inverse Distance Weighted (IDW).



Εικόνα 3. Χάρτες ξηρασίας FDI και SPI (χρονική αναφορά 6 και 12 μηνών) για το Μάιο και τον Οκτώβριο του 1990.

Από τους χάρτες προκύπτει ότι για το Μάιο του 1990, ο FDI 6 παρουσιάζει μία μέτρια ξηρασία για την κεντρική και βόρεια Ελλάδα και ελαφρώς ξηρή περίοδο για τη νότια Ελλάδα (Κρήτη, Νότια Πελοπόννησο, νότια Δωδεκάνησα). Ταυτόχρονα ο SPI 6 δίνει εξαιρετικά έντονη ξηρασία για τη δυτική, νότια και ανατολική Ελλάδα και μόνο μία μικρή περιοχή στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα φαίνεται να αντιμετωπίζει μέτρια και ελαφρώς ξηρή περίοδο.

Ιστορικά αρχεία (Karavitis, 1992), δείχνουν ότι η Ελλάδα αντιμετώπισε έντονα προβλήματα έλλειψης νερού ειδικά μετά τους καλοκαιρινούς μήνες, όμως ακόμα από και τους πρώτους μήνες του έτους (χειμώνα και άνοιξη), σημειώθηκαν αρκετά προβλήματα λόγω της έλλειψης βροχόπτωσης, αλλά και λόγω της έλλειψης προληπτικού σχεδιασμού και εκτίμησης επικινδυνότητας. Οι πολιτικές που ακολουθήθηκαν ήταν οι παραδοσιακές πολιτικές διαχείρισης κρίσεων και για το λόγο αυτό οι επιπτώσεις ήταν ιδιαίτερα έντονες. Και οι δύο δείκτες, FDI και SPI, υπολογίζονται από κλιματικές παραμέτρους και όταν η τιμή της ET είναι μικρότερη από τη μέση τιμή της, όπως συνέβη σε πολλές περιοχές το χειμώνα και την άνοιξη του 1990, τότε ο δείκτης FDI δείχνει πιο ήπια ξηρασία από τον SPI (ο οποίος δε λαμβάνει υπόψη την ET). Φαίνεται λοιπόν, ότι για το Μάιο του 1990 τα αποτελέσματα του FDI 6 είναι πιο κοντά στις πραγματικές κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα ο FDI 6 στα Χανιά Κρήτης, για το Μάιο του 1990 (χρονοσειρά 1961-2000, δεδομένα NOOA), εμφανίζει μία ελαφρώς ξηρή περίοδο, ενώ ο SPI εμφανίζει εξαιρετικά έντονη ξηρασία. Ισχύει ότι η βροχόπτωση στα Χανιά το 1990 μειώθηκε κατά 52.1% (283.40mm όταν η μέση ετήσια βροχόπτωση για τη διαθέσιμη χρονοσειρά είναι 591.68mm) όμως η ET για την ίδια χρονιά ήταν 104.51mm, μικρότερη δηλαδή από τη μέση τιμή της, που όπως προκύπτει από τη διαθέσιμη χρονοσειρά είναι $\overline{ET}=108.32$ mm. Όπως είναι αναμενόμενο αυτή η μείωση της ET δείχνει το φαινόμενο λιγότερο έντονο.

Αντίστοιχα για τον Μάιο του 1990, με χρονικό βήμα 12 μηνών, και οι δύο δείκτες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, με μικρή απόκλιση στην Αττική, τις Κυκλάδες και τη Δυτική Πελοπόννησο, όπου ο SPI δίνει εξαιρετικά έντονη ξηρασία ενώ ο FDI δείχνει έντονη ξηρασία. Στην περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολο να διαπιστωθεί ποιος από τους δύο δείκτες αποδίδει καλύτερα το φαινόμενο, αφού και οι δύο δείχνουν ότι επικρατεί μία πολύ δύσκολη κατάσταση.

Είναι αξιοσημείωτο ότι οι τιμές των δύο δεικτών έχουν καλύτερη συσχέτιση όσο το χρονικό βήμα αυξάνει. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό βήμα, τόσο μικρότερη γίνεται η διαφορά $(\sum_{j=1}^k ET_{ij} - \sum_{j=1}^k \overline{ET}_j)$ (βλ. Εξίσωση 1), δηλαδή η βροχόπτωση γίνεται ουσιαστικά η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τις τιμές του δείκτη, παρουσιάζοντας έτσι μεγάλη συσχέτιση με τον SPI (ο οποίος υπολογίζεται από δεδομένα βροχόπτωσης μόνο). Για παράδειγμα, το Μάιο του 1990, και ο FDI 12 αλλά και ο SPI 12, δίνουν έντονη ξηρασία στη Δυτική Ελλάδα, τις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα και κανονικές συνθήκες στη Βόρεια Ελλάδα. Για παράδειγμα στην Κοζάνη (χρονοσειρά 1955-2004, δεδομένα EMY) οι

δείκτες δίνουν παρόμοια αποτελέσματα διότι η ET από τον Ιούνιο του 1989 έως το Μάιο του 1990 ισούται σχεδόν με τη \overline{ET} αυτής της περιόδου. Έτσι τα αποτελέσματα και των δύο δεικτών βασίζονται κυρίως στην κατά 21.54% μειωμένη βροχόπτωση (375.6mm με μέση βροχόπτωση για την περίοδο αυτή τα 478.74mm).

Τα αποτελέσματα του FDI 6 για τον Οκτώβρη 1990, δείχνουν ελαφρώς ξηρή περίοδο και μέτρια ξηρασία για το μεγαλύτερο μέρος της χώρας, σε αντίθεση με τον SPI 6 που εμφανίζει κανονικές συνθήκες. Ο Οκτώβριος επιλέχθηκε, γιατί το καλοκαίρι του 1990 οι θερμοκρασίες ήταν υψηλότερες από το μέσο όρο (δεδομένα θερμοκρασίας από EMY και NOOA), με αποτέλεσμα και οι τιμές της ET να είναι μεγαλύτερες από το μέσο όρο για την εποχή. Είναι αξιοσημείωτο ότι το μήνα Οκτώβριο το διαθέσιμο νερό για την κάλυψη των αναγκών της Αττικής έφτανε μόνο για 56 μέρες (Karavitis, 1999; Grigg, 1996). Επομένως, ο FDI 6 απεικονίζει καλύτερα τις κλιματικές συνθήκες από τον SPI 6 για την περίοδο αυτή.

Πιο αναλυτικά, στην Κεντρική Μακεδονία ο FDI 6 για τον Οκτώβριο εμφανίζει κανονικές συνθήκες, ενώ στην κεντρική Ελλάδα και την ανατολική και δυτική Μακεδονία η κατάσταση είναι πιο δύσκολη με ελαφρά ξηρή περίοδο. Στην Ήπειρο, την Πελοπόννησο, τα νησιά του Αιγαίου και τη Θράκη φαίνεται να υπάρχει μέτρια ξηρασία. Στην Πάτρα πχ (χρονοσειρά 1955-1996, δεδομένα EMY) ο FDI 6 έχει τιμή -1.19 ενώ ο SPI 6 ισούται με -0.03. Η διαφορά αυτή εξηγείται από το ότι ο FDI πέρα από τη μείωση της βροχόπτωσης κατά 67.76% (212.8mm, με μέση βροχόπτωση για την αντίστοιχη περίοδο 660mm) συνυπολογίζει και την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0.77°C που σημειώθηκε (18.68°C με μέση θερμοκρασία αέρα για την αντίστοιχη περίοδο ίση με 17.91°C). Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας προκάλεσε αντίστοιχα και την αύξηση της ET κατά 6.72mm σε σχέση με τη μέση τιμή για την εποχή αυτή (126.72mm, με αντίστοιχη μέση τιμή ίση με 120.80mm).

Για το χρονικό βήμα 12 μηνών, όπως και για τον Μάιο, έτσι και για τον Οκτώβρη του 1990, οι δύο δείκτες (FDI 12 και SPI 12) παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα, με πολύ μικρές διαφορές στην Κρήτη και τη Ρόδο. Στην περίπτωση αυτή είναι ξεκάθαρο και από τους δύο δείκτες ότι τον Οκτώβριο η Ελλάδα ήρθε αντιμέτωπη με ένα πολύ έντονο γεγονός ξηρασίας. Οι συνθήκες βελτιώθηκαν μετά το Νοέμβρη, όπου σημειώθηκαν οι πρώτες βροχοπτώσεις και μειώθηκε η θερμοκρασία στις φυσιολογικές τιμές για την εποχή (Karavitis, 1999).

Τονίζεται ότι για τον Οκτώβριο του 1990, τα αποτελέσματα του SPI 6 είναι πολύ διαφορετικά από αυτά του SPI 12, με τα πρώτα να δείχνουν κανονικές συνθήκες και τα τελευταία

έντονη και εξαιρετικά έντονη ξηρασία. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα του SPI και καθιστά τον δείκτη λιγότερο αξιόπιστο. Είναι ευνόητο ότι στην περίπτωση αυτή για τους λήπτες των αποφάσεων δεν είναι κατανοητό ποιο χρονικό βήμα είναι πιο αντιπροσωπευτικό με αποτέλεσμα να μην είναι ξεκάθαρο αν θα έπρεπε να λάβουν μέτρα. Αντίθετα τα αποτελέσματα του FDI δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους (FDI 6 με FDI 12) και μάλιστα εφόσον και τα δύο χρονικά βήματα εμφανίζουν ξηρασία, είναι ευνόητο για τους λήπτες των αποφάσεων ότι θα έπρεπε να πάρουν μέτρα προληπτικά και μέτρα αντιμετώπισης για το μετριασμό των επιπτώσεων του φαινομένου.

Συμπεράσματα

Προκειμένου να υπερασπιστεί η κοινωνία ενάντια στον κίνδυνο της ξηρασίας, οι πολιτικοί και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων θα πρέπει να είναι σε θέση να τον προβλέψουν, να τον προσδιορίσουν και να τον αντιμετωπίσουν με εργαλεία ενσωματωμένα στα σχέδια διαχείρισης της ξηρασίας σε εθνικό και τοπικό επίπεδο. Έτσι ο FDI μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων στη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων για θέματα ξηρασίας. Χρησιμοποιεί παραμέτρους που είναι εύκολο να μετρηθούν και είναι εύκολα προσβάσιμοι αφού μπορούν να βρεθούν στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς. Ο FDI μπορεί να υπολογιστεί για διάφορα χρονικά βήματα (προτείνεται να υπολογίζεται για χρονικά βήματα μεγαλύτερα ή ίσα των 6 μηνών) και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βραχυπρόθεσμος ή μακροπρόθεσμος δείκτης ξηρασίας.

FACTUAL DROUGHT INDEX- FDI. A COMPOSITE DROUGHT INDEX BASED ON WATER BALANCE

Vassilia P. Fassouli*, Demetrios E. Tsesmelis, Stavros G. Alexandris, Christos A. Karavitis

Department of Natural Resources Development & Agricultural Engineering, Agricultural University of Athens, 11855 Athens, Greece

*E-mail: vafas@aua.gr

Abstract

Drought is a condition of insufficient water caused mostly by the lack of precipitation for a specific time period. A better understanding of the phenomenon requires the study, not only of the precipitation, but of more parameters that are related to water demand. Evapotranspiration is one of these parameters, thus lately there is an attempt to incorporate it in the various drought indices for its contribution to drought.

This paper introduces a new composite index, the “Factual Drought Index- FDI”, which is based on water balance. FDI can detect, identify, evaluate and classify drought and it could be further used to predict a future drought or a future abnormal wet event, constituting an important tool in Integrated Water Resources Management.

Greece is an area which faces droughts events often, therefore it is used as a case study. Therefore, FDI (reference periods 6 and 12 months) was tested for 1990, when the greater drought event of the latest years occurred in the country (Karavitis, 1999). The results for August and October 1990 are compared to those of Standardized Precipitation Index- SPI and both of them to the recorded drought conditions. Both indices were calculated using timeseries data from 1951-2013, gathered from 17 meteorological stations, distributed throughout the country.

FDI may constitute a useful tool for the decision makers in order to cope with drought in various regions. Hence, FDI may benefit drought contingency planning to amplify the resilience to pertinent natural hazards.

Keywords: Integrated Water Resources Management, Contingency Planning, Drought, Drought Management, Composite Indices, Decision Support System.

Βιβλιογραφία

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998 (FAO No. 56). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper no. 56. FAO, Rome
- Barraque, B., Karavitis, C. & Katsiardi, P. 2008). The range of existing circumstances in the Water Strategy Management (WSM) case studies. In: Koundouri, P. (ed.) Coping with Water Deficiency: From Research to Policymaking. Environment and Policy 48, Springer, Heidelberg, pp. 45–112.
- Bordi, I., Fraedrich, K., Petitta, M., Sutera, A., 2006. Large Scale Assessment of Drought Variability Based on NCEP/NCAR and ERA- 40 Re- Analyses, Water Resources Management, Vol. 20, pp. 889- 915.
- Bruce, J.P., 1994. A perspective on reducing losses from natural hazards. Bull Am Meteorol Soc 75:1237–1240.
- Census, 2011. Press Release: Notes on demographic and social characteristics of the resident population of the country according to census 2011. Available online in Greek: http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/nws_SAM01_GR.PDF
- Dahl, A.L., 2012. Achievements and gaps in indicators for sustainability. Ecological Indicators 17: 14 – 19.
- Ding, Y., Hayes M. J., Widhalm M., 2010. Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. Papers in Natural Resources.
- EEA- European Environment Agency, 1999. Environmental Indicators: Typology and Overview, Technical report No.25. European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA- European Environment Agency, 2005. EEA core set of indicators. EEA Technical Report No 1/2005. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., Gamage, N. 2009. Mapping drought patterns and impacts: a global perspective. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 31p. (IWMI Research Report 133).
- Grigg, N. S. & Vlachos, E. C. (eds) (1990). Drought Water Management. International School for Water Resources, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 48 pp.
- Grigg, N.S., 1996. Water Resources Management. Principles, Regulations and Cases. McGraw-Hill Professional.
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Paper No. 85-2517. American society of agricultural engineers. Chicago, IL.
- Kairis O., Kosmas C., Karavitis C, Ritsema C., Salvati L., Acikalin S, Alcalá M., Alfama P., Athlough J., Barrera J., Belgacem A., Sole Benet A., Brito J., Chaker M., Chanda R., Coelho C., Darkoh M., Diamantis I., Ermolaeva O., Fassouli V., Fei W., Feng J., Fernandez F., Ferreira A., Gokceoglu C., Gonzalez D., Gungor H., Hessel R., Juying J., Khatteli H., Khitrov N., Kounalaki A., Laouina A., Lollino P., Lopes M., Magole L., Medina L., Mendoza M., Morais P., Mulale K., Ocakoglu F., Ouessar M., Ovalle C., Perez C., Perkins J., Pliakas F., Polemio M., Pozo A., Prat C., Qinke Y., Ramos A., Ramos J., Riquelme J., Romanenkov V., Rui L., Santaloia F., Sebeogo R., Sghaier M., Silva N., Sizemskaya M., Soares J., Sonmez H., Taamallah H., Tezcan L., Torri D., Ungaro F., Valente S., de Vente J., Zagal E., Zeiliger A., Zhonging W., Ziogas A. (2014) Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and

- Desertification Monitoring: Types of Degradation, Causes, and Implications for Management. *Environmental Management*. 54:971-982, doi 10.1007/s00267-013-0110-0
- Karavitis, C. A. (2008). Technical Report on Contract No. 10889/11/07 /2007 with the Water Resources Management Sector, Agricultural University of Athens (AUA), Technical Support to the Central Water Agency of Greece for the Development of a Drought Master Plan for Greece and an Immediate Drought Mitigation Plan. Ministry of Planning, Public Works and the Environment, Athens, Greece (in Greek).
- Karavitis, C. A., 1992. Drought management strategies for urban water supplies: the case of metropolitan Athens. PhD thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Karavitis, C. A., Kerkides, P., 2002. Estimation of the Water Resources Potential in the Island System of the Aegean Archipelago, Greece, *Water International*, 27(21): 243-254
- Karavitis, C. A., Skondras, N. A., Tsesmelis, D. E., Stamatakos, C. G., Alexandris, S. G. & Fassouli, V. P., 2012b. Drought impacts archive and drought vulnerability index. In: Drought Management Centre for South-East Europe – DMCSEE. Summary of the result of the project, co-financed by the South East Europe Transnational Cooperation Programme (contract no. SEE /A/091/2.2/X). Gregorič, G. (ed.). Slovenian Environmental Agency, Ljubljana, Slovenia. Available at: http://www.met.hu/doc/DMCSEE/DMCSEE_final_publication.pdf (accessed 28 October 2013).
- Karavitis, C., A., 1998. Drought and Urban Water Supplies: the Case of Metropolitan Athens, *Water Policy*, Vol. 1, Iss. 5, pp. 505- 524, Elsevier Science.
- Karavitis, C., A., 1999. Decision Support Systems for Drought Management Strategies in Metropolitan Athens, *Water International*, Vol. 24, No. 1, pp. 10- 21.
- Karavitis, C.A., Chortaria, C., Alexandris, S., Vasilakou, C.G., and Tsesmelis, D.E., 2012a. Development of the standardised precipitation index for Greece, *Urban Water Journal*, 9 (6): 401-417
- Karavitis, C.A., Tsesmelis, D.E., Skondras, N.A., Stamatakos, D., Alexandris, S., Fassouli, V., Vasilakou C.G., Oikonomou, P.D., Gregorič, G., Grigg, N.S., and Vlachos, E.C., 2014. Linking drought characteristics to impacts on a spatial and temporal scale. *Water Policy* 16 (2014) 1172–1197
- Kosmas C., Kairis O., Karavitis C., Ritsema C., Salvati L., Acikalin S., Alcalá M., Alfama P., Athlough J., Barrera J., Belgacem A., Sole Benet A., Brito J., Chaker M., Chanda R., Coelho C., Darkoh M., Diamantis I., Ermolaeva O., Fassouli V., Fei W., Feng J., Fernandez F., Ferreira A., Gokceoglu C., Gonzalez D., Gungor H., Hessel R., Juying J., Khatteli H., Khitrov N., Kounalaki A., Laouina A., Lollino P., Lopes M., Magole L., Medina L., Mendoza M., Morais P., Mulale K., Ocakoglu F., Ouessar M., Ovalle C., Perez C., Perkins J., Pliakas F., Polemio M., Pozo A., Prat C., Qinke Y., Ramos A., Ramos J., Riquelme J., Romanenkov V., Rui L., Santaloia F., Sebego R., Sghaier M., Silva N., Sizemskaya M., Soares J., Sonmez H., Taamallah H., Tezcan L., Torri D., Ungaro F., Valente S., de Vente J., Zagal E., Zeiliger A., Zhonging W., Ziogas A. (2014) Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach. *Environmental Management*. *Environmental Management*; 54:951-970., doi: 10.1007/s00267-013-0109-6
- Kosmas, C., Tsara, M., Moustakas, N., Karavitis, C., 2003. Identification of indicators for desertification. *Annals of arid zone* 42(3):393-416 · September 2003.

- Livada, I. & Assimakopoulos, V. D. (2007). Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the standardized precipitation index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology* 89, 143–153.
- Loukas, A., Vasiliades, L. & Tzabiras, J. (2007). Evaluation of climate change on drought impulses in Thessaly, Greece. *European Water* 17/18, 17–28.
- McKee, T.B.; N.J. Doesken; and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, pp. 179–184. January 17–22, Anaheim, California.
- Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G. & Giakoumakis, S. (1992). On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management* 6, 249–277.
- Segnestam, L., 2002. Indicators of Environment and Sustainable Development: Theories and Practical Experience. The International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank
- Sheffield, J., Wood, E. F. & Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature International Weekly Journal of Science* 491(7424), 435–438. <http://www.nature.com/nature/journal/v491/n7424/full/nature11575.html>, 8 April 2013.
- Skondras, N.A., Karavitis, C.A., Gkotsis, I.I., Scott, P.J.B., Kaly, U.L., Alexandris, S.G., 2011. Application and assessment of the Environmental Vulnerability Index in Greece. *Ecological Indicators*, 11: 1699–1706.
- Thorntwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55–94.
- Tsakiris G., Pangalou D. and Vangelis H., 2007. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5): 821-833.
- Tsakiris, G. & Vangelis, H. (2004). Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resources Management* 18, 1–12.
- Vasiliades, L., Loukas, A. & Patsonas, G. (2009). Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 879–894.
- Vicente Serrano M.S., Begueria S., Lopez-Moreno J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of climate*, volume 23: 1696-1718
- Wilhite, D. A., Hayes, M. J. & Svoboda, M. D. (2000). Drought monitoring and assessment: status and trends in the United States. In: *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Vogt, J. V. & Somma, F. (eds). Kluwer Academic Publishers, Springer, Netherlands, pp. 149–160
- Yevjevich, V., da Cunha, L., and Vlachos, E.C, 1983. *Coping with Droughts*, editors, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.