

## ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΤΗΣ ΠΕΔΙΑΔΑΣ ΤΟΥ ΝΕΣΤΟΥ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Λιάπης Αλέξανδρος\*, Γεωργίου Πανταζής, Καρπούζος Δημήτριος

Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής,  
Τμήμα Γεωπονίας, Α.Π.Θ.

\*e-mail: aliapisk@civil.auth.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αλόγιστη χρήση των υδατικών αποθεμάτων μιας περιοχής για την άρδευση καλλιεργειών μπορεί να οδηγήσει σε εξάντληση των πόρων της περιοχής και συνεπώς σε αναποτελεσματική άρδευση. Επίσης, η εφαρμογή της καλλιέργειας μπορεί να οδηγήσει και σε υποβάθμιση των υδατικών πόρων, λόγω μεταφοράς συστατικών των λιπασμάτων στα υδατικά σώματα. Η αλληλεξάρτηση αυτή καλλιέργειας και οικοσυστήματος καλλιεργούμενης περιοχής, μπορεί να αποτυπωθεί και ποσοτικοποιηθεί μέσω του Υδατικού Αποτυπώματος της καλλιέργειας, σύμφωνα με τις αρχές της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής. Στην παρούσα εργασία προσδιορίζεται το Υδατικό Αποτύπωμα των καλλιεργειών της πεδιάδας του ποταμού Νέστου. Τα αποτελέσματα της μελέτης στοχεύουν στην αποτελεσματική άρδευση της περιοχής, μέσω της ολοκληρωμένης και βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών της πόρων.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** υδατικό αποτύπωμα, εκτίμηση κύκλου ζωής, αρδευτικές ανάγκες

## WATER FOOTPRINT OF CROPS AT THE NESTOS RIVER PLAIN ACCORDING TO LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODOLOGY

Liapis Alexandros\*, Georgiou Pantazis, Karpouzou Dimitrios

Department of Hydraulics, Soil Science and Agricultural Engineering,  
School of Agriculture, A.U.Th.

\*e-mail: aliapisk@civil.auth.gr

### ABSTRACT

The excessive use of an area's water resources for crops irrigation, may lead to depletion of the resources and thus ineffective irrigation. Moreover, the fertilization of the crops could contribute to degradation of the area's water bodies. This interdependence of crops and local ecosystems can be depicted and quantified through the Water Footprint of the crops, according to the principles of Life Cycle Assessment. In this paper an estimation of the Water Footprint of crops in the Nestos river plain is conducted. The results of the proposed analysis aim to contribute to the efficient irrigation of the area along with the integrated and sustainable management of its water resources.

**KEY WORDS:** water footprint, life cycle assessment, irrigation requirements

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της αναβάθμισης του βιοτικού επιπέδου αλλά παράλληλα και της συνεχούς υποβάθμισης των υφιστάμενων φυσικών πόρων, επιβάλλεται η διαχείρισή τους μέσα από οργανωμένες και συνεπείς πολιτικές, διασφαλίζοντας την επάρκειά τους και την αντιμετώπισή τους ως αγαθό στο οποίο δικαιούνται πρόσβαση όλα τα μέλη της κάθε κοινωνίας. Το Υδατικό Αποτύπωμα (Υ.Α.) είναι ένας δείκτης ο οποίος αναπτύχθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό του νερού που απαιτείται για την παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών. Από τη δημιουργία του (Hoekstra and Hung, 2002) μέχρι και σήμερα έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις ως προς τον υπολογισμό του, έχοντας όλες σαν κοινό παρονομαστή τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων σε κάθε τομέα εφαρμογής.

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος (η οποία προηγείται και χρονικά) αφορά στην προσέγγιση των Hoekstra και Charagain (Hoekstra et al., 2011), οι οποίοι προσδιορίζουν τον δείκτη από την οπτική της Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων, χωρίς να ασχολούνται με τις επιπτώσεις της χρήσης του νερού στα υδατικά διαθέσιμα και γενικότερα στις περιβαλλοντικές ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Η μέθοδος υπολογισμού των Ridoutt και Pfister (Pfister et al., 2009, Ridoutt and Pfister, 2010, Ridoutt and Pfister, 2012), αποτελεί εξέλιξη της βασικής μεθόδου, και αφορά στον συσχετισμό του Υ.Α. με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη χρήση του νερού (ποσοτική και ποιοτική συνιστώσα), από τη σκοπιά της μεθοδολογίας της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (E.K.Z.) (ISO, 2006), μια κατεύθυνση προς την οποία έχει συσταθεί άλλωστε και το πρόσφατο πρότυπο του ISO 14046 (ISO, 2014). Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στον υπολογισμό του Υ.Α. και συνεισφέρουν στην προσπάθεια για ορθολογική χρήση των υδατικών πόρων στο γεωργοκτηνοτροφικό τομέα.

Εφαρμογές του Υ.Α. στον αγροτικό τομέα έχουν αναπτυχθεί και στην Ελλάδα, με την πλειοψηφία αυτών να χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία των Hoekstra και Charagain. Οι Symeonidou και Vagiona (2019) προσδιορίζουν το Υ.Α. των κύριων καλλιεργειών της Ρόδου, ενώ οι Charchousi et al (2015) ασχολούνται με το Υ.Α. της αγροτικής παραγωγής στην πεδιάδα των Χανίων της Κρήτης. Για την ίδια περιοχή μελέτης, αλλά και για την πεδιάδα της Μεσαράς, οι Papadopoulou et al (2016a) προσδιορίζουν το Υ.Α. λαμβάνοντας υπόψιν και τις επιπτώσεις από το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, κάτι το οποίο αξιολογούν και οι Παπαστάμκου κ.ά. (2016) για τις καλλιέργειες της πεδιάδας της Θεσσαλονίκης, συγκρίνοντας το Υ.Α. κατά Hoekstra και Charagain με τη συνιστώσα κατανάλωσης του Υ.Α. κατά Ridoutt και Pfister. Πέρα από τη γεωργία, το Υ.Α. αξιοποιείται και για άλλες αγροτικές χρήσεις. Οι Dota et al. (2016) υπολογίζουν το Υ.Α. για την κτηνοτροφική δραστηριότητα στην περιοχή της Καρδίτσας, ενώ οι Papadopoulou et al. (2016b) το χρησιμοποιούν για τον προσδιορισμό των υδατικών απαιτήσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, για μια σειρά χρήσεων (γεωργία, βοσκότοποι, δάση, κτηνοτροφία, αστικές και βιομηχανικές ανάγκες).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός του Υ.Α. για τις καλλιέργειες της πεδιάδας του ποταμού Νέστου με τη μέθοδο των Ridoutt και Pfister εφαρμόζοντας την Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (E.K.Z.). Αξιοποιώντας αγρομετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης και με τη χρήση του λογισμικού Cropwat υπολογίζονται οι ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό άρδευσης. Στη συνέχεια υπολογίζεται το Υ.Α. σύμφωνα με τη μέθοδο των Hoekstra και Charagain. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνιστώσας κατανάλωσης του Υ.Α. με τη μέθοδο των Ridoutt και Pfister, λαμβάνοντας υπόψη τα υδατικά αποθέματα της περιοχής. Με αυτό τον τρόπο γίνεται αφενός μια σύγκριση των δύο μεθόδων και αφετέρου υποδεικνύεται ότι οι δύο μέθοδοι μπορούν να εφαρμόζονται συνδυαστικά. Η συνιστώσα υποβάθμισης του Υ.Α. με τη μέθοδο των Ridoutt και Pfister (επιβάρυνση των υδατικών πόρων λόγω λίπανσης των καλλιεργειών) υπολογίζεται με τη βοήθεια του λογισμικού SimaPro. Ο υπολογισμός του συνολικού Υ.Α. έχει ως στόχο τη βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

### 2.1 Υπολογισμός υδατικού αποτυπώματος με τη μέθοδο Hoekstra και Chapagain

Σύμφωνα με τους Hoekstra & Chapagain το Υ.Α. αναλύεται αρχικά σε 2 συνιστώσες, την «πράσινη» (η οποία αναφέρεται στη χρήση του νερού των βροχοπτώσεων) και τη «μπλε» (η οποία αναφέρεται στη χρήση του επιφανειακού και υπόγειου νερού). Η πράσινη συνιστώσα του Υ.Α. (ΥΑ<sub>ΠΡΑΣΙΝΟ</sub>, m<sup>3</sup>/ton) υπολογίζεται ως εξής:

$$YA_{\text{ΠΡΑΣΙΝΟ}} = \frac{CWU_g}{Y} \quad (1)$$

όπου: CWU<sub>g</sub> ο όγκος του πράσινου νερού που καταναλώθηκε (m<sup>3</sup>/στρέμμα), δηλαδή η συνεισφορά της βροχοπτώσης στην κάλυψη των υδατικών αναγκών, και Y η απόδοση της καλλιέργειας (ton/στρέμμα). Η τιμή του όρου CWU<sub>g</sub> προκύπτει σαν το άθροισμα της πράσινης υδατικής χρήσης για κάθε ημέρας της βλαστικής περιόδου, το ελάχιστο δηλαδή μεταξύ των απαιτήσεων εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET<sub>c</sub>) και της ωφέλιμης βροχής (P<sub>eff</sub>), (Hoekstra et al., 2009).

Η μπλε συνιστώσα του Υ.Α. (ΥΑ<sub>ΜΠΛΕ</sub>, m<sup>3</sup>/ton) υπολογίζεται ως ο λόγος του όγκου μπλε νερού που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της καλλιέργειας προς την απόδοση αυτής:

$$YA_{\text{ΜΠΛΕ}} = \frac{CWU_b}{Y} \quad (2)$$

όπου: CWU<sub>b</sub> ο όγκος του μπλε νερού που καταναλώθηκε (m<sup>3</sup>/στρέμμα), ουσιαστικά δηλαδή οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό άρδευσης και Y η απόδοση της καλλιέργειας (ton/στρέμμα). Εδώ ο όρος CWU<sub>b</sub> προκύπτει σαν το άθροισμα της μπλε υδατικής χρήσης για κάθε ημέρας της βλαστικής περιόδου, δηλαδή με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (ET<sub>c</sub>) μείον την τιμή της ωφέλιμης βροχής (P<sub>eff</sub>) και η ποσότητα αυτή είναι μηδενική εάν οι ανάγκες της καλλιέργειας καλύπτονται πλήρως από την ωφέλιμη βροχή (Hoekstra et al., 2009)

Αργότερα στην ανάλυση των Hoekstra & Chapagain προστέθηκε και η γκρι συνιστώσα του Υ.Α. (ΥΑ<sub>ΓΚΡΙ</sub>, m<sup>3</sup>/ton), η οποία αναφέρεται στην ποσότητα γλυκού νερού που απαιτείται για την διάλυση ρύπων σε τέτοιο βαθμό ώστε η ποιότητα του νερού να παραμένει πάνω από το επιθυμητό όριο (Chapagain et al., 2006). Ως ρύποι θεωρούνται τα λιπάσματα (άζωτο, φώσφορος κ.λπ.) τα φυτοφάρμακα και τα εντομοκτόνα.

### 2.2 Εκτίμηση Κύκλου Ζωής και Υδατικό Αποτύωμα

Το αποτύωμα που αφήνει η παραγωγή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας στο περιβάλλον μπορεί να εκτιμηθεί και ποσοτικοποιηθεί με διάφορες μεθόδους, τα τελευταία χρόνια όμως, έχει επικρατήσει σχεδόν καθολικά, η εφαρμογή της μεθόδου της E.K.Z. Η μέθοδος χρησιμοποιείται από τα τέλη της δεκαετίας του '60, ουσιαστικά όμως εδραιώθηκε από τη στιγμή που ο Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης (ISO) σαν μέρος της σειράς προτύπων 14000, εξέδωσε την οικογένεια κανονισμών 14040-14044 (ISO, 2006a, ISO, 2006b). Οι κανονισμοί αυτοί θέτουν ένα πλαίσιο για την εφαρμογή της μεθόδου σε οποιοδήποτε προϊόν ή δραστηριότητα, έτσι ώστε τα αποτελέσματά της να είναι συγκρίσιμα και κοινώς αποδεκτά.

Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040-14044 υπάρχουν 4 βασικά στάδια από τα οποία αποτελείται μια E.K.Z.: καθορισμός σκοπού και πεδίου δράσης, απογραφική ανάλυση δεδομένων, εκτίμηση επιπτώσεων και ερμηνεία αποτελεσμάτων. Το περιεχόμενο του πρώτου και τέταρτου σταδίου γίνεται εύκολα αντιληπτό από τις ονομασίες τους. Στο στάδιο της απογραφικής ανάλυσης δεδομένων γίνεται η συλλογή και καταγραφή όλων των εισροών

(πρώτες ύλες, ενέργεια, χρήσεις γης) και εκροών (προϊόντα, παραπροϊόντα, ρύποι, απόβλητα) που περιλαμβάνονται στην παραγωγή του μελετώμενου προϊόντος ή διαδικασίας.

Στο στάδιο της εκτίμησης των επιπτώσεων τα παραπάνω δεδομένα κατηγοριοποιούνται και αθροίζονται με κριτήριο την συμβολή τους σε συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Impact Categories). Για να αναχθούν σε μια ενιαία μονάδα μέτρησης ώστε να μπορούν να αθροιστούν, πολλαπλασιάζονται με τους Συντελεστές Χαρακτηρισμού (Characterization Factors), οι οποίοι εκφράζουν το πόσο συμμετέχουν οι ροές στην υπό μελέτη κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Μετά το στάδιο του Χαρακτηρισμού, μπορεί να γίνει η Κανονικοποίηση (Normalization) όπου τα αποτελέσματα των επιμέρους περιβαλλοντικών φορτίων συγκρίνονται με αντίστοιχες επιπτώσεις «αναφοράς» για ευκολότερη κατανόηση.

Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει, η μέθοδος E.K.Z., έχει βρει ευρεία εφαρμογή στον αγροτικό τομέα (Audsley et al., 1997, Hayashi et al., 2007). Στην Ελλάδα η εφαρμογή της E.K.Z. αφορά κυρίως σε καλλιέργειες αμπελιού και ελαιόδεντρων.

Πέρα από την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από το σύνολο μιας καλλιέργειας, η βιώσιμη και αειφόρος διαχείριση των υδατικών πόρων που απαιτούνται για αυτή, αποτελεί ένα ξεχωριστό ζήτημα. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε νερό, η αυξανόμενη ανεπάρκειά του σε πολλές περιοχές και η υποβάθμιση της ποιότητάς του δημιουργεί την ανάγκη για καλύτερη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με αυτό. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί η μεθοδολογία της Εκτίμησης του Υδατικού Αποτυπώματος (E.Y.A.). Για την E.Y.A. έχουν εκδοθεί σχετικοί κανονισμοί όπως ο ISO 14046 ο οποίος βασίζεται στην E.K.Z. (κατά το ISO 14044). Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14046, η E.Y.A. ασχολείται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση του νερού σε επίπεδο προϊόντος, διαδικασίας ή οργανισμού.

### 2.3 Μέθοδος των Ridoutt και Pfister

Οι Ridoutt και Pfister προτείνουν μια αναθεωρημένη μέθοδο υπολογισμού του Y.A. η οποία βασίζεται στις αρχές της E.K.Z. (Ridoutt and Pfister, 2010) και βρίσκονται σε αντιστοιχία με το πρότυπο ISO 14046. Στη μεθοδό τους λαμβάνουν υπόψιν δυο συνιστώσες για το Y.A. Η πρώτη, η συνιστώσα κατανάλωσης (Consumptive Water Use – CWU), εκφράζει την κατανάλωση αποθεμάτων γλυκού νερού μέσω εξάτμισης, ενσωμάτωσης νερού σε προϊόντα ή απόβλητα, μεταφορά σε άλλες λεκάνες απορροής ή κατάληξης στη θάλασσα έπειτα από χρήση (Pfister et al., 2009) και στην ουσία ταυτίζεται με τη μπλε συνιστώσα του Y.A. των Hoekstra και Chapagain. Η δεύτερη, η συνιστώσα υποβάθμισης (Degradative Water Use – DWU), περιγράφει την αλλαγή στην ποιότητα του νερού έπειτα από τη χρήση του και στη συνέχεια την απελευθέρωσή του πίσω στην ίδια λεκάνη απορροής (Pfister et al., 2009).

Για τον προσδιορισμό της συνιστώσας κατανάλωσης, οι Pfister et al. (2009) αρχικά εισάγουν ένα δείκτη πίεσης νερού (Water Stress Index – WSI), ο οποίος παίρνει τιμές από 0.01 έως 1 και εκφράζει την ανεπάρκεια που μπορεί να παρουσιαστεί στα αποθέματα μιας περιοχής, λαμβάνοντας υπ' όψη τον λόγο του καταναλισκόμενου νερού μιας περιοχής προς τα υδατικά του αποθέματα. Ο υπολογισμός του WSI γίνεται με χρήση του μοντέλου WaterGAP2 (Alcamo et al., 2003), ωστόσο στην παρούσα εργασία οι τιμές λαμβάνονται απευθείας από τον διαδικτυακό χάρτη του Stefan Pfister (<https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ifu/eco-systems-design-dam/documents/downloads/ei99/ifu-esd-EI99-Impact factors Water LCA pfister et al.kmz>), κάτι το οποίο σύμφωνα και με τους Παπαστάμκου κ.ά. (2016) δεν επηρεάζει την ακρίβεια υπολογισμού του Y.A..

Εφόσον προσδιοριστεί ο δείκτης WSI για την περιοχή μελέτης, διενεργείται το στάδιο του Χαρακτηρισμού, όπου οι υδατικές καταναλώσεις (δηλαδή το μπλε Y.A. της μεθόδου Hoekstra-Chapagain) πολλαπλασιάζονται με το δείκτη και εξάγεται το Σταθμισμένο Y.A. (Stress-

Weighted Water Footprint). Ο δείκτης WSI είναι αδιάστατος, επομένως τα αποτελέσματα συνεχίζουν να εκφράζονται στην ίδια μονάδα μέτρησης με τις υδατικές καταναλώσεις.

Επόμενο στάδιο για τον υπολογισμό της συνιστώσας κατανάλωσης είναι η Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων. Σαν μέγεθος αναφοράς προτείνεται αρχικά ο μέσος εθνικός WSI για την χώρα παραγωγής του υπό μελέτη προϊόντος (Ridoutt and Pfister, 2010) και αργότερα ο παγκόσμιος μέσος δείκτης WSI (Ridoutt and Pfister, 2012), με τον οποίο διαιρείται το Σταθμισμένο Υ.Α. για να προκύψει τελικά το Ισοδύναμο Εθνικό ή Παγκόσμιο ΥΑ, αντίστοιχα. Γίνεται αντιληπτό ότι η επιλογή του παγκόσμιου ή εθνικού WSI, ανάλογα με τη μεταξύ τους διαφορά (στην περίπτωση της Ελλάδας  $WSI_{\text{Παγκόσμιος}} > WSI_{\text{Ελλάδας}}$ ) θα οδηγήσει και σε ανάλογη διαφοροποίηση στα αποτελέσματα και την αξιολόγηση αυτών.

Σύμφωνα λοιπόν με την πιο πρόσφατη μεθοδολογία των Ridoutt και Pfister, ο υπολογισμός της συνιστώσας κατανάλωσης (CWU) του Υ.Α. εκφράζεται για το σύνολο των επιμέρους καταναλώσεων, με τη σχέση:

$$CWU(H_2Oe) = \sum_i \frac{CWU_i * WSI_i}{WSI_{\text{global}}} \quad (3)$$

όπου CWU: Καταναλισκόμενο νερό (Consumptive Water Use) - Η ποσοτική συνιστώσα του Υ.Α. κατά Ridoutt και Pfister σε  $m^3$  ισοδύναμου νερού ( $m^3 H_2O$  equivalent) ανά μονάδα έκτασης ή βάρους προϊόντος,  $CWU_i$  : οι ετήσιες ανάγκες σε νερό άρδευσης για την περιοχή μελέτης  $i$  σε μονάδες όγκου νερού ανά έκταση ή ανά βάρος προϊόντος,  $WSI_i$  : ο δείκτης πίεσης νερού (Water Stress Index) για την περιοχή μελέτης και  $WSI_{\text{global}}$  : ο μέσος παγκόσμιος δείκτης πίεσης νερού, ο οποίος σύμφωνα με τους Ridoutt και Pfister (2012) είναι ίσος με 0.602 (αδιάστατος).

Για τον υπολογισμό της συνιστώσας υποβάθμισης (DWU), αρχικά υπολογίζονται οι ρύποι που εκλύονται λόγω εφαρμογής λιπασμάτων στις καλλιέργειες της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, οι ρύποι αυτοί πολλαπλασιάζονται με τους Συντελεστές Χαρακτηρισμού της μεθόδου αποτίμησης των επιπτώσεων ReCiPe (Goedkoop et al., 2013), που αφορούν στην κατηγορία επιπτώσεων του Ευτροφισμού γλυκού νερού (Freshwater eutrophication), δηλαδή του εμπλουτισμού των υδάτων με θρεπτικά συστατικά εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας (μεταφορά ενώσεων P και N από λίπανση καλλιεργειών στα υδατικά σώματα της περιοχής). Η κατηγορία αυτή επιλέχθηκε σαν εκείνη στην οποία έχει μεγαλύτερη συμμετοχή η λίπανση των καλλιεργειών. Ακολουθεί η Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων, σύμφωνα με συντελεστές που προτείνουν οι Goedkoop et al. (2013).

Μετά την παραπάνω διαδικασία, τα αποτελέσματα εκφράζονται σε μονάδες Recipe Points ανά  $m^2$  της εκάστοτε μελετώμενης καλλιέργειας. Για τη μετατροπή των αποτελεσμάτων από ReCiPe points/ $m^2$  σε  $m^3 H_2Oe/m^2$ , αυτά διαιρούνται με τον μέσο όρο των επιπτώσεων από την κατανάλωση  $1 m^3$  νερού, εκφρασμένο σε ReCiPe points/ $m^3 H_2Oe$ . Η τιμή αυτή σύμφωνα με τους Ridoutt και Pfister (2012) ισούται με  $1.86 * 10^{-3}$  ReCiPe points/ $m^3 H_2O$  eq. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και την απόδοση της κάθε καλλιέργειας, η συνιστώσα υποβάθμισης του Υ.Α. (DWU) υπολογίζεται εκφρασμένη σε  $m^3 H_2Oe/ton$  παραγόμενου προϊόντος.

Τελικά οι δύο συνιστώσες, κατανάλωσης και υποβάθμισης, προστίθενται για να δώσουν το συνολικό Υ.Α. εκφρασμένο σε ισοδύναμο  $m^3$  νερού ανά βάρος παραγόμενου προϊόντος ή έκτασης ( $m^3 H_2O e / kg$  προϊόντος ή ha έκτασης). Για τον υπολογισμό των αναγκών σε νερό άρδευσης (για τον υπολογισμό της συνιστώσας κατανάλωσης της μεθόδου) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CROPWAT, το οποίο περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω.

## 2.4 Λογισμικό CROPWAT

Το CROPWAT είναι ένα πρόγραμμα το οποίο μπορεί να υπολογίσει τις υδατικές απαιτήσεις μιας καλλιέργειας όπως επίσης και τις αρδευτικές της απαιτήσεις, λαμβάνοντας υπόψη εδαφικές και κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό περιγράφονται αναλυτικά στις δύο δημοσιεύσεις του F.A.O. (Food and Agriculture Organization), «Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - paper 56» (Allen et al., 1998) και «Yield response to water - paper 33» (Doorenbos and Kassam, 1979).

Στην παρούσα εργασία το CROPWAT χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των καθαρών αναγκών σε νερό άρδευσης ( $IWR_n$ ) για την περιοχή μελέτης (πεδιάδα του ποταμού Νέστου), έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η συνιστώσα κατανάλωσης (CWU) του Υ.Α..

## 2.5 Λογισμικό SimaPro

Το SimaPro (Goedkoop, 2008) είναι ένα λογισμικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή μιας Εκτίμησης Κύκλου Ζωής, πλήρως εναρμονισμένο με τα διεθνή πρότυπα ISO 14040 και 14044. Περιέχει βιβλιοθήκες με δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φάση της Απογραφικής Ανάλυσης, αλλά δίνει και τη δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει τα δικά του δεδομένα. Επίσης περιέχει τις περισσότερες διαδεδομένες Μεθόδους Εκτίμησης των Επιπτώσεων. Το πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή για το στάδιο της Εκτίμησης των Επιπτώσεων (αναγωγή των ρύπων από τη λίπανση των καλλιεργειών, σε συμμετοχή στο φαινόμενο του ευτροφισμού των υδατικών σωμάτων της περιοχής μελέτης) με τον υπολογισμό της συνιστώσας υποβάθμισης του Υ.Α. στη μέθοδο των Ridoutt και Pfister.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ο υπολογισμός του Υ.Α. για τις καλλιέργειες της πεδιάδας του ποταμού Νέστου, ακολουθεί τα στάδια της μεθόδου της Ε.Κ.Ζ., όπως αυτή παρουσιάζεται στα ISO 14040, 14044 και 14046.

### 3.1 Καθορισμός σκοπού και πεδίου δράσης

Η περιοχή μελέτης αφορά στο Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης (GR12), στην Λεκάνη Απορροής του ποταμού Νέστου, η οποία στο σύνολό της έχει έντονα ορεινό χαρακτήρα, περιβάλλεται από ιδιαίτερα μεγάλα υψόμετρα και χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις. Το ελληνικό τμήμα της λεκάνης έχει έκταση 2975.5 km<sup>2</sup> και μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κύρια τμήματα το ορεινό και το πεδινό. Σε αυτό το δεύτερο τμήμα βρίσκεται το υπό μελέτη αρδευτικό δίκτυο, και πιο συγκεκριμένα στην υπολεκάνη του Δέλτα του Νέστου (υψόμετρο από 0-200 m) κατάντη του φράγματος των Τοξωτών. Σχετικά με τα όρια του συστήματος που μελετάται, περιλαμβάνονται μόνο οι καταναλώσεις νερού που αφορούν στην άρδευση των καλλιεργειών και επομένως δεν συμπεριλαμβάνονται οποιεσδήποτε άλλες υδατικές καταναλώσεις (π.χ. παραγωγή σπόρων, παραγωγή άλλων πρώτων υλών, παραγωγή και λειτουργία μηχανημάτων).

Το νερό μεταφέρεται από το φράγμα των Τοξωτών, στο αρδευτικό δίκτυο μέσω 2 κύριων διωρύγων, ένα για τη δυτική και ένα για την ανατολική πεδιάδα του Δέλτα, εξυπηρετώντας τους Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.) Χρυσούπολης, Χρυσοχωρίου και Θαλασσιάς – Κρεμαστής. Στην περιοχή μελέτης καλλιεργούνται 7 διαφορετικές καλλιέργειες: Καλαμπόκι, Ρύζι, Βαμβάκι, Φασόλια, Ζαχαρότευτλα, Κηπευτικά και Ντομάτα. Στον Πίνακα 1 φαίνεται η κατανομή της έκτασης ανά καλλιέργεια, καθώς και η μέγιστη παραγωγή που αντιστοιχεί σε κάθε μία.

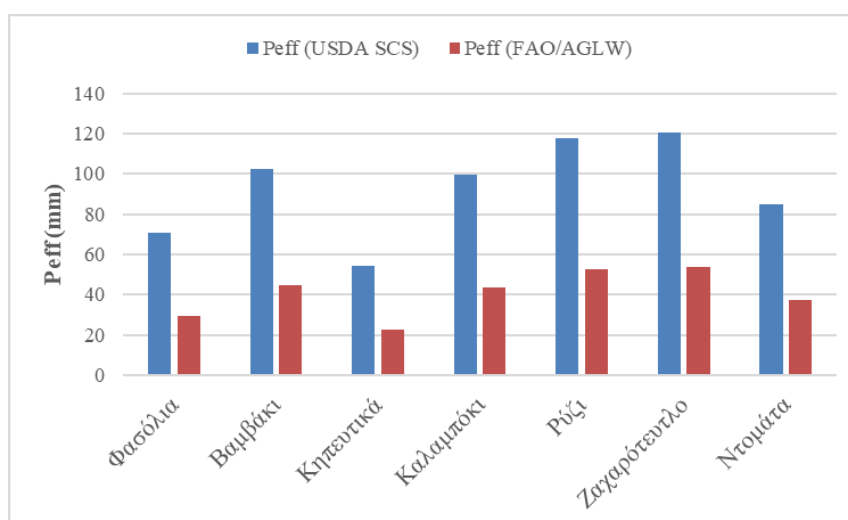
**Πίνακας 1:** Στοιχεία των καλλιεργειών στα αρδευτικά δίκτυα του Νέστου  
(Πηγή: Doulgeris et al., 2015)

	Φασό- λια	Βαμβά- κι	Κηπευ- τικά	Καλα- μπόκι	Ρύζι	Ζαχαρό- τευτλα	Ντο- μάτα	Σύνολο
<b>Έκταση (στρέμματα)</b>	11200	26440	14090	78100	4870	6030	3800	144530
<b>Κατανομή (%)</b>	7.8	18.3	9.7	54.0	3.4	4.2	2.6	
<b>Μέγιστη Παραγωγή (ton/στρέμμα)</b>	0.3	0.36	3.5	1.1	0.85	6.5	5.2	

Τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα ελήφθησαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) και πιο συγκεκριμένα από το σταθμό της Χρυσούπολης. Ο μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 5 μέτρων, με γεωγραφικό πλάτος 40.98 °N και γεωγραφικό μήκος 24.60 °E και είναι ο μοναδικός σταθμός εντός της περιοχής μελέτης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν στη χρονική περίοδο 1980-2001 (22 έτη) και έχουν ημερήσιο χρονικό βήμα. Αποτελούνται από δεδομένα βροχόπτωσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιοφάνειας.

### 3.2 Απογραφική Ανάλυση

Αρχικά γίνεται η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα CROPWAT για την περιοχή μελέτης και τα έτη 1980-2001. Τα δεδομένα αποτελούνται από μέγιστη και ελάχιστη Θερμοκρασία (°C), Σχετική υγρασία (%), Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m (m/s) και Ηλιοφάνεια (hours). Το πρόγραμμα υπολογίζει για κάθε μήνα του έτους και συγκεντρωτικά για κάθε έτος τη μέση εξατμισοδιαπνοή αναφοράς κατά Penman-Monteith (mm/day). Στη συνέχεια γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων βροχόπτωσης στο πρόγραμμα. Σαν μέθοδος υπολογισμού της Ωφέλιμης Βροχόπτωσης επιλέχθηκαν οι μέθοδοι της Soil Conservation Service (USDA SCS) και του FAO (FAO/AGLW) (Λιάπης, 2017). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρούσα ανάλυση δεν λήφθηκε υπόψη η συμβολή της εδαφικής υγρασίας και της τριχοειδούς ανύψωσης στο Υ.Α., εξαιτίας της μη ύπαρξης υπόγειας στάθμης της περιοχής. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η μέση ωφέλιμη βροχόπτωση ( $P_{eff}$ ) της βλαστικής περιόδου για την περίοδο 1980-2001 για τις επτά καλλιεργείες με βάση τις δύο μεθόδους υπολογισμού.



**Σχήμα 1:** Μέση ωφέλιμη βροχόπτωση των καλλιεργειών για όλη τη βλαστική περίοδο της περιόδου 1980-2001, με τις μεθόδους υπολογισμού κατά USDA SCS και κατά FAO/AGLW

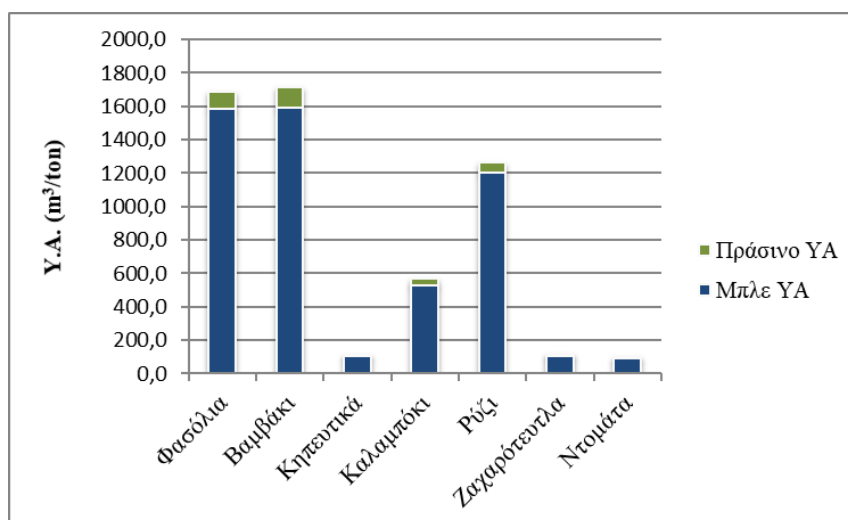
Καθώς κρίνεται αναγκαία η επιλογή μιας μόνο από τις δύο μεθόδους για τη συνέχεια των υπολογισμών, επιλέγεται η μέθοδος κατά FAO/AGLW η οποία είναι δυσμενέστερη και επομένως τοποθετεί τους υπολογισμούς από την πλευρά της ασφάλειας.

Ακολουθεί η εισαγωγή των δεδομένων των καλλιεργειών στο CROPWAT. Για κάθε μία από τις 7 προς μελέτη καλλιέργειες εισάγονται η ημερομηνία σποράς, οι φυτικοί συντελεστές, τα στάδια ανάπτυξης (σε ημέρες), το βάθος ριζοστρώματος, ο συντελεστής ωφελιμότητας, οι συντελεστές ανταπόκρισης παραγωγής, το μέγιστο ύψος καλλιέργειας, καθώς και κάποια επιπλέον δεδομένα που απαιτεί το πρόγραμμα για την καλλιέργεια του ρυζιού. Τελικά γίνεται ο υπολογισμός των καθαρών Αναγκών σε Νερό Άρδευσης ( $IWR_n$ ) και των ολικών αναγκών σε νερό άρδευσης ( $IWR_t$ ), διαιρώντας τις  $IWR_n$  με την αρδευτική αποδοτικότητα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2:** Καθαρές ανάγκες σε νερό άρδευσης (mm) για ολόκληρη τη βλαστική περίοδο, για κάθε καλλιέργεια για τα έτη 1980-2001.

Έτος	Φασόλια	Βαμβάκι	Κηπευτικά	Καλαμπόκι	Ρύζι	Ζαχαρότευτλα	Ντομάτα
$IWR_n$	475.8	572.8	367.0	582.6	1022.7	694.6	477.9
Αποδοτικότητα άρδευσης	0,6	0,6	0,6	0,6	0,9	0,6	0,6
$IWR_t$	792,95	954,60	611,60	971,01	1136,28	1157,67	796,58

Αν διαιρέσουμε τις καθαρές ανάγκες σε νερό άρδευσης με την απόδοση της κάθε καλλιέργειας μπορούμε να υπολογίσουμε το μπλε Υ.Α. σύμφωνα με τη μέθοδο των Hoekstra και Charagain. Επίσης διαιρώντας το ελάχιστο μεταξύ εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας και ωφέλιμης βροχής, με την απόδοση, προκύπτει το πράσινο ΥΑ. Στο Σχήμα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών.



**Σχήμα 2:** Μέσο ετήσιο πράσινο και μπλε Υ.Α. κατά Hoekstra & Charagain ( $m^3/ton$ ) της περιόδου 1980-2001

Σε ό,τι αφορά στην απογραφική ανάλυση για τη συνιστώσα υποβάθμισης, δηλαδή τον υπολογισμό των ρύπων που εκλύονται στα υδατικά συστήματα της περιοχής λόγω εφαρμογής λιπασμάτων, αυτοί συναντώνται κυρίως με τη μορφή νιτρικών ιόντων ( $NO_3$ ) και φωσφορικού άλατος ( $PO_4^{3-}$ ). Οι ποσότητές τους υπολογίζονται σύμφωνα με εξισώσεις που προτείνει η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2002) καθώς και οι Nemecsek και



Kägi (2007). Τα δεδομένα για τους υπολογισμούς αυτούς είναι οι ποσότητες λιπασμάτων που εφαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης και αφορούν μίγματα N-P-K (Άζωτο-Φωσφόρος-Κάλιο) καθώς και ποσότητες πρόσθετων προϊόντων (κατά βάση νιτρικής σύστασης) και ελήφθησαν από την Ένωση Αγροτών Συνεταιρισμένων (Ε.Α.Σ.) Καβάλας (Πίνακας 3)

**Πίνακας 3:** Δεδομένα λίπανσης των καλλιεργειών για την πεδιάδα του Νέστου (Πηγή: Ε.Α.Σ. Καβάλας)

Καλλιέργεια	Είδος Λιπάσματος	Ανάλυση σύνθεσης (σε περίπτωση N-P-K) (%)	Ποσότητα εφαρμογής (kg/στρέμμα)
Φασόλια	N-P-K	12-12-17 +2Mg + Ιχνοστοιχεία	60
	N-P-K	25-0-0	10
Βαμβάκι	N-P-K	21-8-11+0.5 Zn +4 S	50
	N-P-K	12-12-17 +2Mg + Ιχνοστοιχεία	80
Κηπευτικά	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (νιτρικό ασβέστιο)	-	5
	KNO <sub>3</sub> (νιτρικό κάλιο)	-	5
	N-P-K	27-9-0 + 1.5 Zn	50
Καλαμπόκι	NH <sub>3</sub> (νιτρική αμμωνία)	-	50
	N-P-K	20-10-10	40
Ρύζι	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O (ουροθεϊκή αμμωνία)	40-0-0	30
	N-P-K	15-10-10 + 1B	50
Ντομάτα	N-P-K	12-12-17 +2Mg + Ιχνοστοιχεία	80
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (νιτρικό ασβέστιο)	-	20
	KNO <sub>3</sub> (νιτρικό κάλιο)	-	20

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 4, σε μονάδες μάζας ρύπου ανά μονάδα καλλιεργούμενης έκτασης, για την κάθε καλλιέργεια της περιοχής μελέτης.

**Πίνακας 4:** Ποσότητες ρύπων στο υδατικό σύστημα, λόγω εφαρμογής λιπασμάτων για κάθε καλλιέργεια, ανά μονάδα καλλιεργούμενης έκτασης.

Καλλιέργεια	Φασόλια	Βαμβάκι	Κηπευτικά	Καλαμπόκι	Ρύζι	Ζαχαρότευτλα	Ντομάτα
NO <sub>3</sub> (*10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>2</sup> )	2,91	3,15	3,30	19,05	6,00	2,25	4,56
PO <sub>3</sub> <sup>-4</sup> (*10 <sup>-4</sup> kg/m <sup>2</sup> )	12,60	7,00	16,80	7,88	7,00	8,75	16,80

### 3.3 Εκτίμηση των επιπτώσεων

Από τη μπλε συνιστώσα του ΥΑ κατά Hoekstra και Chapagain, θα υπολογιστεί η συνιστώσα κατανάλωσης (CWU<sub>1</sub>) σύμφωνα με τους Ridoutt και Pfister μέσω της Σχέσης (3). Ο Δείκτης πίεσης νερού WSI για την περιοχή της πεδιάδας του Νέστου θα είναι WSI<sub>Νέστου</sub> = 0.0852 [από τους διαδικτυακούς χάρτες των Pfister et al. (2009)] ενώ ο WSI<sub>Παγκόσμιος</sub> = 0.602 (Ridoutt and Pfister, 2012). Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τις καθαρές ανάγκες σε νερό άρδευσης. Για την πιο ακριβή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών, η συνιστώσα κατανάλωσης υπολογίζεται και με τις ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες (CWU<sub>2</sub>). Τα αποτελέσματα της συνιστώσας κατανάλωσης με τους 2 τρόπους υπολογισμού των αναγκών σε νερό άρδευσης, δίνονται στον Πίνακα 5.

**Πίνακας 5:** Συνιστώσα κατανάλωσης του Υ.Α. (CWU) κατά Ridoutt και Pfister, για κάθε καλλιέργεια, με τους 2 τρόπους υπολογισμού των αναγκών σε νερό άρδευσης

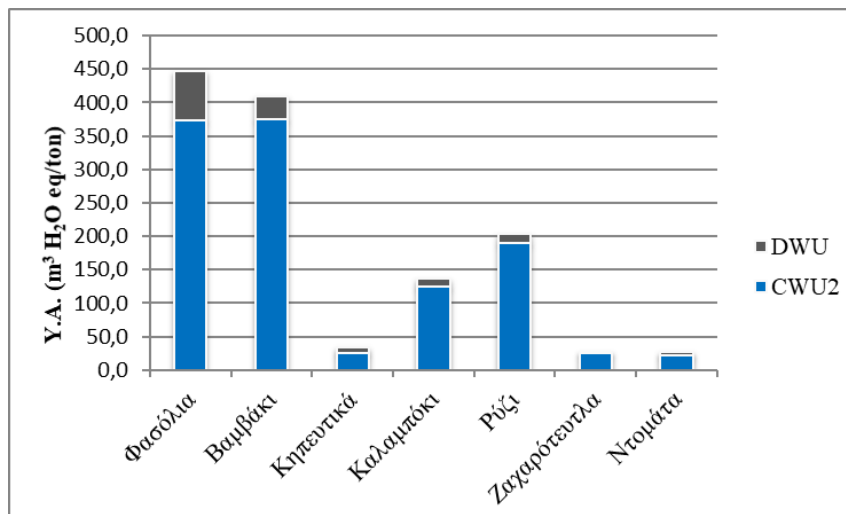
Καλλιέργεια	Φασόλια	Βαμβάκι	Κηπευτικά	Καλαμπόκι	Ρύζι	Ζαχαρότευτλα	Ντομάτα
CWU <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O e/ton)	224,4	225,2	14,8	75,0	170,3	15,1	13,0
CWU <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O e/ton)	374,1	375,3	24,7	124,9	138,8	25,2	21,7

Για τον υπολογισμό της συνιστώσας υποβάθμισης (DWU) ακολουθείται η διαδικασία που περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Εισάγονται στο λογισμικό SimaPro, τα δεδομένα από τον Πίνακα 4 (συγκεκριμένα τα φωσφορικά άλατα, τα οποία συμμετέχουν στην κατηγορία του Ευτροφισμού). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του λογισμικού, γίνονται οι υπολογισμοί με τη χρήση των Συντελεστών Χαρακτηρισμού της μεθόδου ReCiPe. Τα αποτελέσματα της αποτίμησης των επιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.

**Πίνακας 6:** Συνιστώσα υποβάθμισης του Υ.Α. (DWU) (σε m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>O e /ton) κατά Ridoutt και Pfister, για κάθε καλλιέργεια

Καλλιέργεια	Φασόλια	Βαμβάκι	Κηπευτικά	Καλαμπόκι	Ρύζι	Ζαχαρότευτλα	Ντομάτα
DWU (m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O e/ton)	73,48	34,05	8,39	12,51	14,42	2,36	5,65

Στο Σχήμα 3 δίνεται το ολικό Υ.Α., σαν το άθροισμα των δύο συνιστωσών. Η συνιστώσα κατανάλωσης λήφθηκε με βάση τις ολικές ανάγκες σε νερό άρδευσης (CWU<sub>2</sub>), σαν «δυσμενέστερη» περίπτωση.

**Σχήμα 3:** Ολικό Υ.Α. ανά καλλιέργεια (υπολογισμός με ολικές σε νερό άρδευσης ανάγκες) σύμφωνα με τη μέθοδο των Ridoutt και Pfister

### 3.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Από τον υπολογισμό του Υ.Α. κατά Hoekstra και Charagain διαφαίνεται ο κυρίαρχος ρόλος της μπλε συνιστώσας του Υ.Α. σε σχέση με την πράσινη (Σχήμα 2). Το γεγονός αυτό φυσικά εξαρτάται άμεσα όχι μόνο από το ύψος της βροχόπτωσης της περιοχής, αλλά και από τον τύπο των καλλιεργειών, καθώς αν επρόκειτο για καλλιέργεια της οποίας οι ανάγκες καλύπτονται από το νερό της βροχής, δεν θα υπήρχαν απαιτήσεις για νερό άρδευσης (και άρα ούτε συνεισφορά στην κατανάλωση των υδατικών πόρων της περιοχής).

Σχετικά με τα αποτελέσματα της μεθόδου Ridoutt και Pfister, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο Πίνακας 5, στον οποίο φαίνεται η διαφορά που υπεισέρχεται στον υπολογισμό της συνιστώσας κατανάλωσης (CWU) αν ληφθεί υπόψιν η αποδοτικότητα της άρδευσης. Πράγματι, στην περίπτωση που ληφθούν στους υπολογισμούς οι ολικές ανάγκες σε νερό άρδευσης ( $IWR_i$ ) η συνιστώσα κατανάλωσης αυξάνεται, για το σύνολο των καλλιεργειών, κατά 47%, κάτι το οποίο δείχνει ότι είναι μια παράμετρος η οποία επηρεάζει καθοριστικά την πραγματική εικόνα των υδατικών απαιτήσεων. Σημαντική επίσης, είναι και η κατανομή της συνιστώσας μεταξύ των διαφορετικών καλλιεργειών, με τη μεγαλύτερη υδατική απαίτηση να παρουσιάζεται από τη καλλιέργεια βαμβακιού (30.5% και 34.6% αντίστοιχα της συνολικής, για τους δύο τρόπους υπολογισμού) και την ελάχιστη από την καλλιέργεια της ντομάτας (1.8% και 2%). Όπως είναι λογικό, παρόμοια εικόνα αποτελεσμάτων εξάγεται και από τη μέθοδο Hoekstra και Charagain.

Από τα αποτελέσματα επίσης είναι προφανής η συμβολή των Δεικτών Πίεσης Νερού στην αξιολόγηση του υδατικού προφίλ της περιοχής. Σε σύγκριση με τις καθαρές ανάγκες σε νερό άρδευσης και τη μπλε συνιστώσα, η συνιστώσα κατανάλωσης ( $CWU_1$  και  $CWU_2$ ) μειώνεται, πράγμα αναμενόμενο, καθώς η περιοχή παρουσιάζει μεγάλη διαθεσιμότητα σε νερό άρα χαμηλό Δείκτη Πίεσης ( $WSI_{Nέστου}=0,0852$ ). Αυτό φαίνεται άλλωστε και από τη σύγκριση του  $WSI_{Nέστου}$  με τον  $WSI_{Παγκόσμιο}$  ( $= 0.602$ ), που δείχνει το ότι η περιοχή έχει χαμηλό Δείκτη Πίεσης σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο. Γίνεται επίσης αντιληπτό ότι λαμβάνοντας υπόψη τα υδατικά διαθέσιμα της περιοχής και άρα την επίπτωση της άρδευσης στους διαθέσιμους πόρους, τα αποτελέσματα δύνανται να είναι άμεσα συγκρίσιμα με αντίστοιχες τιμές της κάθε καλλιέργειας σε οποιαδήποτε περιοχή.

Τα αποτελέσματα διαφέρουν σε ότι αφορά στη συνιστώσα υποβάθμισης (DWU). Αφενός, παρατηρείται διαφοροποίηση στην τάξη μεγέθους, η οποία για το σύνολο των καλλιεργειών αποτελεί περίπου το 20% της συνιστώσας κατανάλωσης (και το 14% αν ληφθεί υπ' όψη η αποδοτικότητα της άρδευσης). Επίσης, η επιβάρυνση στους υδατικούς πόρους της περιοχής λόγω της λίπανσης κάθε καλλιέργειας, διαφέρει αρκετά από την επιβάρυνση στα υδατικά αποθέματα λόγω άρδευσης με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση να προκαλείται από την καλλιέργεια του φασολιού (48.7%) και την ελάχιστη από την καλλιέργεια του ζαχαρότευτλου (1.6%) επί του συνόλου.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο υπολογισμός του Υδατικού Αποτυπώματος μιας περιοχής όπως η πεδιάδα του ποταμού Νέστου, με τις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού, μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την αποτελεσματικότερη άρδευση των καλλιεργειών της. Σε κάθε περίπτωση, ο υπολογισμός αυτός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες της περιοχής (π.χ. υδατικά αποθέματα), μέσω κάποιας μεθοδολογίας όπως αυτή της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής, έτσι ώστε να συνεκτιμώνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της άρδευσης. Συνεπώς, λόγω της συσχέτισής τους με τα τοπικά υδατικά αποθέματα, τα αποτελέσματα μπορούν να είναι άμεσα συγκρίσιμα και με άλλες περιοχές, διευκολύνοντας την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων σε τοπικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο. Επίσης, η μεθοδολογία της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στους υδατικούς πόρους της περιοχής λόγω της εφαρμογής λιπασμάτων στις καλλιέργειες. Μέσω του προσδιορισμού λοιπόν της ποσοτικής (αποθέματα) και ποιοτικής (ρύπανση υδατικών πόρων) διάστασης του Υδατικού Αποτυπώματος μιας καλλιέργειας, ο μελετητής μπορεί να αποκτήσει μια εμπεριστατωμένη εικόνα σχετικά με τις επιπτώσεις μιας καλλιέργειας στα υδατικά συστήματα μιας περιοχής.

*Μία αρχική εκδοχή αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε στο 14ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), Βόλος, 16-17 Μαΐου 2019.*

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Λιάπης Α., 2017. Εκτίμηση Υδατικού Αποτυπώματος Καλλιεργειών της Πεδιάδας του Νέστου με τη Μεθοδολογία της Αποτίμησης Κύκλου Ζωής. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Ειδίκευση Γεωργικής Μηχανικής και Υδατικών Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 168 σελ.
- Παπαστάμκου Ν., Δ. Παπαμιχαήλ και Π. Γεωργίου, 2016. *Διερεύνηση Μεθόδων και Εκτίμηση του Υδατικού Αποτυπώματος Καλλιεργειών της Πεδιάδας Θεσσαλονίκης*. Υδροτεχνικά, 24: 37-50
- Alcamo, J., P. Doll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rosch and S. Siebert, 2003. *Development and testing of the WaterGAP2 global model of water use and availability*. Hydrol. Sci. J., 48 (3): 317-337.
- Allen, R. G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300(9), D05109
- Audsley. E, et al., 1997. *Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture*. European Commission, DG VI Agriculture, 139 p.
- Chapagain, A.K., A.Y. Hoekstra and H.H.G. Savenije, 2006a. *Water saving through international trade of agricultural products*. Hydrology and Earth System Sciences, 10 (3): 455-468.
- Charchousi D., V.K. Tsoukala and M.P. Papadopoulou, 2015. How Evapotranspiration Process May Affect the Estimation of Water Footprint Indicator in Agriculture?, *Desalination and Water Treatment*. 53 (12): 3234-3243.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam, 1979. *Yield response to water*. Irrigation and drainage paper, 33: 257.
- Dota A., N. Theodosiou and V. Dotas, 2016. *Pressures on water resources for sheep and goats breeding in the Regional Unit of Karditsa employing the water footprint approach*. European Water. 55: 21-30.
- Doulgeris, C., P. Georgiou, D. Papadimos and D. Papamichail 2015. *Water allocation under deficit irrigation using MIKE BASIN model for the mitigation of climate change*. Irrigation Science, 33 (6): 469-482.
- Goedkoop, M., M. Oele, A. de Schryver and M. Vieira, 2008. *SimaPro Database - Manual Methods library*. PRe Consultants. the Netherlands, 51 p.
- Goedkoop M.J., R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs and R. Van Zelm, 2013. *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. First edition (version 1.08), Report I: Characterisation; May 2013
- Hayashi. K, G. Gaillard, and T. Nemecek, 2007. *Life Cycle Assessment of Agricultural Production Systems: Current Issues and Future Perspectives*. National Agricultural Research Center, Tsukuba
- Hoekstra, A.Y. and P.Q. Hung, , 2002. *Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*. In: Value of Water Research Report Series No.11. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya and M.M. Mekonnen, 2011. *The Water Footprint Assessment Manual-Setting the Global Standard*. Earthscan, London, Water Footprint Network, pp. 203.
- Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya and M.M. Mekonnen, 2009. *Water footprint manual*. Water footprint network.
- IPCC, 2002. *Background papers: IPCC expert meetings on good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel

- on Climate Change - IPCC National Greenhouse Cost Inventories programme, Technical Support Unit, Kanagawa, Japan
- ISO 14040, 2006a. *Environmental management – life cycle assessment – principles and framework*. CEN (European Committee for Standardisation), Brussels.
- ISO 14044, 2006b. *Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines*. CEN (European Committee for Standardisation), Brussels.
- ISO 14046, 2014. *International Standard. Environmental Management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines*. CEN (European Committee for Standardisation), Brussels.
- Nemecek T. and T. Kägi, 2007, *Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems*. Final report ecoinvent V2.0 No. 15a. Agroscope Reckenholz Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, CH, retrieved from: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- Papadopoulou M.P., D. Charchousi, V.K. Tsoukala, Ch. Giannakopoulos and M. Petrakis, 2016a. *Water footprint assessment considering climate change effects on future agricultural production in Mediterranean region*. *Desalination and Water Treatment*, 57 (5): 2232-2242.
- Papadopoulou, M.P., E. Marini and V.K. Tsoukala, 2016b. *Is Water Footprint Assessment reliable in River Basin Scale?*. *European Water*. 56: 21–32.
- Pfister, S., A. Koehler and S. Hellweg, 2009. *Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA*. *Environmental Science and Technology*, 43 (11): 4098-4104.
- Ridout, B.G. and S. Pfister, 2010. *A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity*. *Global Environmental Change*, 20: 113-120.
- Ridoutt, B.G. and S. Pfister, 2012. *A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator*. *Int. J. Life Cycle Assess*, 18: 204–207.
- Symeonidou, S. and D. Vagiona, 2019. *Water Footprint of Crops on Rhodes Island*. *Water*, 11 (5): 1084.