

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Διδακτικές σημειώσεις

Ιωάννης Γ. Αργυροκαστίτης
Αναπληρωτής Καθηγητής Γ.Π.Α.

2013

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Γενικά

Ο σκοπός του προγραμματισμού της άρδευσης συνίσταται στο να προσδιοριστεί η ακριβής ποσότητα του νερού που θα εφαρμοστεί με την άρδευση στο χωράφι και να καθοριστεί ο ακριβής χρόνος για την εφαρμογή αυτή. Η ποσότητα του νερού που θα εφαρμοστεί προσδιορίζεται με χρήση ενός κριτηρίου που καθορίζει την ανάγκη για άρδευση και με την εφαρμογή κάποιας στρατηγικής που αποσκοπεί στο να προδιαγράψει πόσο νερό θα εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση. Τα πιο κοινά και επιστημονικά στηριζόμενα κριτήρια για εφαρμογή της άρδευσης έχουν σχέση με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και με την αρνητική πίεση στην οποία αντιστοιχεί η περιεκτικότητα αυτή. Οι δύο αυτές υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους σχετίζονται μεταξύ τους με μια καμπύλη γνωστή ως Χαρακτηριστική Καμπύλη Υγρασίας και μαζί με την Υδραυλική Αγωγιμότητα στον κορεσμό αποτελούν τις σημαντικότερες υδραυλικές ιδιότητες που είναι απαραίτητο να προσδιορίζονται προκειμένου να γίνει σωστός προγραμματισμός της άρδευσης και σε συνδυασμό με τη σωστή εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό, να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής και η μεγιστοποίηση του καθαρού κέρδους για τον παραγωγό. Έτσι η σημαντικότητα του σωστού προγραμματισμού στην άρδευση είναι το ότι δίνει τη δυνατότητα στους παραγωγούς να επιτύχουν το στόχο τους. Το γεγονός αυτό, από τη στιγμή που θα επιτευχθεί, αυξάνει την αποτελεσματικότητα της άρδευσης.

Ένα σημείο που έχει ιδιαίτερη σημασία από τη μεριά του παραγωγού είναι να γνωρίζει κάθε φορά τον όγκο του νερού που εφαρμόζεται με την άρδευση (ή το ύψος του νερού που εφαρμόζεται, γνωστό ως δόση άρδευσης). Ο παραγωγός δεν μπορεί να διαχειριστεί το νερό με στόχο τη μέγιστη αποτελεσματικότητα αν δεν γνωρίζει πόσο νερό εφαρμόζεται κάθε φορά με την άρδευση. Επίσης, η ομοιόμορφη κατανομή του νερού σε όλα τα σημεία του χωραφιού είναι σημαντική ώστε να επιτευχθούν οι μέγιστες ωφέλειες με το σωστό προγραμματισμό και τη σωστή διαχείριση του αρδευτικού νερού. Η ακριβής γνώση της ποσότητας του νερού που εφαρμόζεται προστατεύει τον παραγωγό από την άσκοπη σπατάλη ή την ελλειμματική εφαρμογή του νερού άρδευσης. Η άσκοπη σπατάλη νερού συνοδεύεται από σπατάλη ενέργειας και εργασίας, από έπλυση των θρεπτικών συστατικών κάτω από τη ζώνη του ριζοστρώματος των φυτών, ενώ μειώνει τον εδαφικό αερισμό και τελικά καταλήγει

σε μειωμένες αποδόσεις. Η ελλειμματική εφαρμογή του νερού άρδευσης καταπονεί τα φυτά και προκαλεί σημαντική μείωση της παραγωγής.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι, ο προγραμματισμός της άρδευσης έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Δίνει τη δυνατότητα στον παραγωγό να διαχειριστεί σωστά το αρδευτικό νερό στα χωράφια του, να ελαχιστοποιήσει την υδατική καταπόνηση των φυτών και να μεγιστοποιήσει τις αποδόσεις.
- Μειώνει το κόστος νερού και εργασίας για τον παραγωγό λόγω εφαρμογής λιγότερων αρδεύσεων αξιοποιώντας έτσι στο μέγιστο την αποθηκευτικότητα του εδάφους με νερό αξιοποιήσιμο για το φυτό.
- Μειώνει το κόστος λιπασμάτων αφού ελαχιστοποιεί τις απώλειες νερού με επιφανειακή απορροή και τη βαθειά διήθηση αποφεύγοντας έτσι την έκπλυση των χρήσιμων για τα φυτά θρεπτικών στοιχείων.
- Αυξάνει το καθαρό κέρδος, με την αύξηση της απόδοσης και την παραγωγή προϊόντων καλύτερης ποιότητας.
- Μειώνει τα προβλήματα υπερκορεσμού των εδαφών με τη μείωση των απαιτήσεων στράγγισης.
- Βοηθάει στον έλεγχο της αλατότητας στο ριζόστρωμα γιατί με το σωστό προγραμματισμό γίνεται πιο αποτελεσματικός έλεγχος της έκπλυσης των αλάτων από τη ζώνη του ριζοστρώματος.
- Βοηθάει τους παραγωγούς στην απόκτηση επι πλέον εισοδημάτων, από τη χρήση νερού που εξοικονομείται για την άρδευση άλλων καλλιεργειών που σε περιπτώσεις έλλειψης νερού θα έμεναν απότιστες.

Στις ΗΠΑ έχει βρεθεί ότι ο σωστός προγραμματισμός στην άρδευση εξοικονομεί κατά μέσον όρο 35% περισσότερο νερό και ενέργεια.

Το Πρόγραμμα άρδευσης

Η εφαρμογή της άρδευσης απαιτεί την κατάστρωση ειδικών προγραμμάτων για την εφαρμογή του αρδευτικού νερού. Ένα τέτοιο πρόγραμμα περιγράφεται στη μελέτη του FAO (Irrigation and Drainage paper No 56) από τους Allen et al. (1998).

Σύμφωνα με αυτό ισχύουν τα εξής:

- Η ολική διαθέσιμη (και συνεπώς προσλήψιμη απο τα φυτά) ποσότητα εδαφικού νερού TAW [mm] είναι:

$$TAW = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot z_r \quad (1)$$

όπου TAW = Το ολικό διαθέσιμο νερό στο ριζόστρωμα [mm]

θ_{FC} = υγρασία στην υδατοϊκανότητα [$m^3 \cdot m^{-3}$]

θ_{WP} = υγρασία στο σημείο μάρανσης [$m^3 \cdot m^{-3}$]

z_r = Βάθος ριζοστρώματος [m]

Τα θ_{FC} και θ_{WP} είναι χαρακτηριστικά κάθε εδαφικού τύπου και μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν με χρήση συσκευών Richards.

-Υποθέτουμε ότι ένα μέρος μόνο RAW [mm] του TAW είναι άμεσα και ανεμπόδιστα διαθέσιμο (και συνεπώς προσλήψιμο από τα φυτά). Κατά συνέπειαν θα πρέπει:

$$RAW = p \cdot TAW = (\theta_{FC} - \theta_p) \cdot z_r \quad (2)$$

όπου p = ένας αδιάστατος συντελεστής που δίνει το μέσο ποσοστό της TAW που μπορεί να φύγει από το ριζόστρωμα λόγω πρόσληψης νερού από το φυτό χωρίς να υπάρξει υδατικό stress στο φυτό, με τιμές από 0 μέχρι 1.

θ_p = Μια σχετικά μεγάλη υγρασία [$m^3 \cdot m^{-3}$], η οποία επιτρέπει την ανεμπόδιστη μετακίνηση εδαφικού νερού προς τις ρίζες του φυτού, ώστε εύκολα αυτό να προσληφθεί. Ισχύει $\theta_p \leq \theta_{FC}$. Η υγρασία αυτή είναι κρίσιμη για το φυτό, γιατί εάν η εδαφική υγρασία μειωθεί ακόμη περισσότερο πλησιάζοντας περισσότερο την θ_{WP} η διαπνοή του φυτού μειώνεται λόγω έλλειψης νερού. Τυπικές τιμές για το p υπάρχουν σε πίνακα του δημοσιεύματος FAO Irrigation and Drainage paper No 56 (Table 22) για κάθε καλλιέργεια. Το p είναι συνάρτηση της αποξηραντικής ικανότητας της ατμόσφαιρας, ενώ ο ρυθμός πρόσληψης από τα φυτά εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα του ακόρεστου εδάφους.

-Κατόπιν το πρόγραμμα άρδευσης στηρίζεται στην κατάστρωση του υδατικού ισοζυγίου του ριζοστρώματος σε ημερήσια βάση. Έτσι, το ημερήσιο ισοζύγιο νερού, εκφραζόμενο ως ποσότητα του νερού που μειώθηκε στο ριζόστρωμα, λόγω πρόσληψης από τα φυτά είναι:

$$\Delta D_i = D_{i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (3)$$

όπου ΔD_i = Η μείωση του ύψους του νερού του ριζοστρώματος στο τέλος της i ημέρας [mm].

D_{i-1} = Το ύψος του νερού που κρατούσε το ριζόστρωμα την προηγούμενη $i-1$ ημέρα [mm].

P_i = Η βροχόπτωση τη i ημέρα [mm].

RO_i = Η απορροή από την εδαφική επιφάνεια τη i ημέρα [mm].

I_i =Το καθαρό ύψος νερού άρδευσης που εφαρμόζεται και διηθείται στο έδαφος την i ημέρα [mm].

CR_i =Η ανοδική τριχοειδής κίνηση από το υπόγειο νερό τη i ημέρα [mm].

$ET_{c,i}$ =Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας στην ημέρα i [mm].

DP_i =Η καθοδική κίνηση νερού λόγω βαθείας διήθησης που φεύγει από το ριζόστρωμα προς την κορεσμένη ζώνη την i ημέρα [mm].

Ο περιορισμός που μπαίνει για το ΔD_i είναι: $0 \leq \Delta D_i \leq TAW$.

- Για το ξεκίνημα εφαρμογής του ημερησίου ισοζυγίου του ριζοστρώματος χρειάζεται να προσδιοριστεί το ύψος D_{i-1} του νερού που κρατούσε το ριζόστρωμα την προηγούμενη $i-1$ ημέρα [mm]. Αυτό προσδιορίζεται με μέτρηση της περιεκτικότητας σε νερό θ_{i-1} . Έτσι:

$$D_{i-1} = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{i-1}) \cdot z_r \quad (4)$$

όπου θ_{i-1} η μέση περιεκτικότητα σε νερό του ενεργού ριζοστρώματος την ημέρα $i-1$. Μετά από έντονη βροχή ή άρδευση μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ριζόστρωμα ευρίσκεται από πλευράς υγρασίας κοντά στην υδατοϊκανότητα, συνεπώς: $D_{i-1} \approx 0$.

-Υποτίθεται ότι όταν $\theta \rightarrow \theta_{FC}$ τότε $DP_i \rightarrow 0$ (αφού το νερό που χάνεται με βαθεία διήθηση είναι το νερό από την υγρασία κορεσμού μέχρι την υδατοϊκανότητα).

-Η $ET_{c,i}$ υπολογίζεται συνήθως μέσω της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς ET_0 , η οποία προηγούμενα έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο των Penman Monteith (βλ. παρακάτω) και με τη βοήθεια του φυτικού συντελεστή K_c και του δείκτη υδατικής δοκιμασίας φυτού λόγω έλλειψης εδαφικής υγρασίας, K_{st} . Έτσι:

$$ET_{c,i} = K_{st} \cdot K_c \cdot ET_0 \quad (5)$$

όπου $ET_{c,i}$ η Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας όπως αυτή προσδιορίζεται απευθείας μέσω της εξίσωσης (5), K_c ο φυτικός συντελεστής που δίνεται σε πίνακα (βλ. Πίνακας 1) και K_{st} ο συντελεστής δοκιμασίας του φυτού.

Αν θ_p η κρίσιμη για το φυτό υγρασία,

- Ισχύουν τα εξής: Για $\theta > \theta_p$ έχουμε $K_{st}=1$. Όταν όμως $\theta < \theta_p$ τότε το K_{st}

προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$K_{st} = \frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_p - \theta_{WP}} \quad (6)$$

- Η κρίσιμη υγρασία θ_p προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\theta_p = \theta_{FC} - p \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \quad (7)$$

- Η ποσότητα του νερού που εφαρμόζεται με την άρδευση (δόση άρδευσης) I_{appl} [mm] προσδιορίζεται από την εξίσωση:

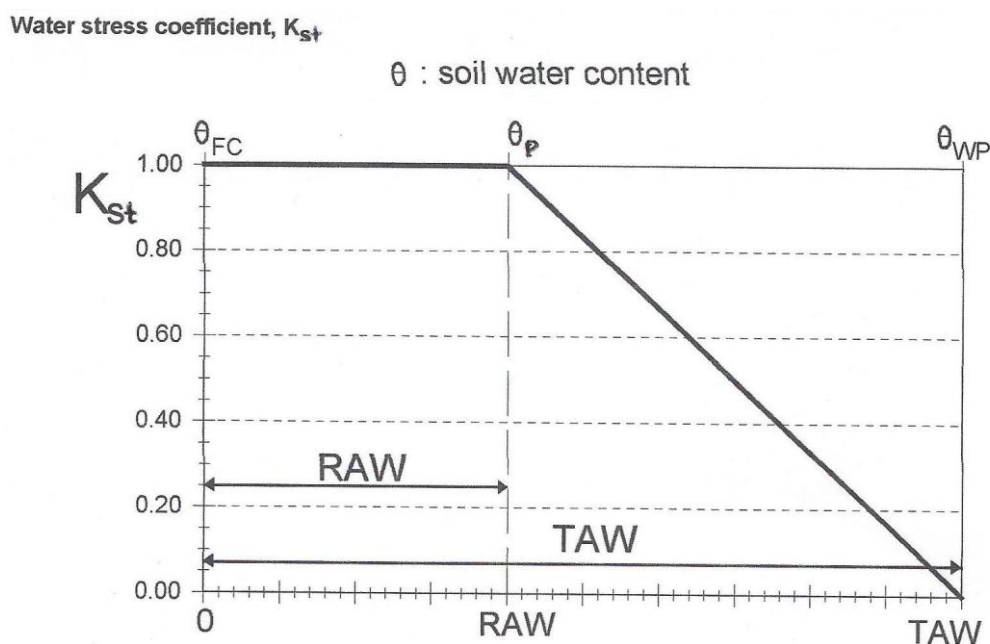
$$I_{appl} = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_p) \cdot z_r + Leach \quad (8)$$

όπου $Leach$ είναι το απαιτούμενο νερό που πρέπει να εφαρμοστεί για έκπλυση των αλάτων [mm], που μπορεί να προσδιοριστεί από το επιθυμητό κλάσμα έκπλυσης και το εκάστοτε εφαρμοζόμενο αρδευτικό σύστημα.

- Το I_{appl} εφαρμόζεται είτε όταν $D_{i-1} \rightarrow D_p$, που αντιστοιχεί στην θ_p και προσδιορίζεται μέσω της εξίσωσης (8), είτε όταν $D_{i-1} \rightarrow D_{WP}$, που αντιστοιχεί στην θ_{WP} και προσδιορίζεται μέσω της εξίσωσης (9).

$$I_{appl} = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \cdot z_r + Leach \quad (9)$$

-Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη σχέση του K_{st} με την περιεκτικότητα σε νερό, καθώς και τα RAW και TAW.



Διάγραμμα 1. Σχέση K_{st} (θ)

Πίνακας 1. Συντελεστές καλλιέργειας K_c (Allen et al., 1998) και μέσο μέγιστο ύψος καλώς αρδευόμενων καλλιεργειών σε ύφυγρα (*subhumid*) κλίματα ($RH_{min} \approx 45\%$), $U_2 \approx 2\text{m/sec}$). Οι συντελεστές του K_{cini} αναφέρονται για τυπική διαχείριση άρδευσης. Η τιμή του K_{cini} μπορεί να φθάσει το 1.0 –1.2 κάτω από υψηλά επίπεδα υγρασίας του εδάφους (υψηλή βροχόπτωση, συχνή άρδευση, πρότυπη καλλιέργεια μηδικής). (βλ. Αλεξανδρή, 2003).

Καλλιέργεια	$K_{c\ ini}$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Μέγιστο μέσο ύψος φυτού (m)
Μικρά λαχανικά	0.7	1.05	0.95	
Καρότο		1.05	0.95	0.30
Κουνουπίδι		1.05	0.95	0.40
Κρεμμύδι ξηρό		1.05	0.75	0.40
Κρεμμύδι φρέσκο		1.00	1.00	0.30
Λάχανο		1.05	0.95	0.40
Μαρούλι		1.00	0.95	0.30
Σέλινο		1.05	1.00	0.60
Σκόρδο		1.00	0.70	0.30
Λαχανικά (<i>solanaceae</i>)	0.60	1.15	0.80	
Ντομάτα		1.15	0.70-0.90	0.60
Πιπεριά		1.05	0.90	0.70
Λαχανικά (<i>Courcubitaceae</i>)	0.50	1.00	0.80	
Αγγούρι	0.60	1.00	0.75	0.30
Αγγούρι (<i>Μηχανική συγκομιδή</i>)	0.50	1.00	0.90	0.30
Καρπούζι	0.40	1.00	0.75	0.40
Πεπόνι	0.50	0.85	0.60	0.30
Σιτηρά	0.30	1.15	0.40	
Βρώμη		1.15	0.25	1.00
Καλαμπόκι		1.20	0.60	2.00
Κριθάρι		1.15	0.25	1.00
Σιτάρι (<i>ανοιζιάτικο</i>)		1.15	0.25-0.40	1.00
Σιτάρι (<i>χειμερινό</i>)	0.70	1.15	0.25-0.40	1.00
Σόργο		1.00-1.10	0.55	1-2
Κτηνοτροφικά				
Bermuda hay (<i>grass</i>)	0.55	1.00	0.85	0.35
Clover hay (<i>τριφύλλι</i>)	0.40	0.90-1.15	0.85-1.10	0.60
Rye Grass hay (<i>σίκαλη</i>)	0.95	1.05	1.00	0.30
Turf Grass –cool season	0.90	0.95	0.95	0.10
Turf Grass –warm season	0.80	0.85	0.85	0.10
Μηδική (<i>alfalfa</i>)	0.40	0.95-1.20	0.90-1.15	0.70
Δενδρώδεις καλλιέργειες				
Ακτινίδιο	0.40	1.05	1.05	3.00
Αμυγδαλιά	0.40	0.90	0.65	5.00
Βερικοκιά, Ροδακινιά	0.45-0.80	0.90-1.15	0.65-0.90	3.00
Ελιά (κάλυψη φυτοκόμης 40-60%)	0.65	0.70	0.70	3.00-5.00
Εσπεριδοειδή (κάλυψη φυτ. 20%)	0.50	0.45	0.55	2.00
Εσπεριδοειδή (κάλυψη φυτ. 50%)	0.65	0.60	0.65	3.00
Εσπεριδοειδή (κάλυψη φυτ. 70%)	0.70	0.65	0.70	4.00
Μηλιά, Αχλαδιά, Κερασιά	0.45-0.80	0.95-1.20	0.75-0.85	4.00

Προσδιορισμός της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς ET_0

Για τον προσδιορισμό της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς ET_0 χρησιμοποιείται η εξίσωση συνδυασμού των Penman-Monteith (κατά FAO 56) για ημερήσια εκτίμηση και καλλιέργεια αναφοράς γρασίδι ύψους 8 cm:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (10)$$

όπου:

T : Μέση ημερήσια θερμοκρασία σε ύψος 2 m [$^{\circ}\text{C}$]

ET_0 : Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς [mm/d]

R_n : Μέση καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$]

G : Πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$]

e_s : Τάση κορεσμένων υδρατμών [kPa]

e_a : Πραγματική τάση υδρατμών [kPa]

Δ : Κλίση καμπύλης τάσης υδρατμών με τη θερμοκρασία [$\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

γ : Ψυχομετρική σταθερά [$\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

u_2 : Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

- Η Πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος στην περίπτωση ημερήσιας εκτίμησης θεωρείται αμελητέα και λαμβάνεται $G \approx 0$
- Η τάση κορεσμένων υδρατμών e_s [kPa] δίνεται από τη σχέση του Tetens (1930) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

$$e_s = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \quad (11)$$

όπου T η μέση ημερήσια θερμοκρασία [$^{\circ}\text{C}$].

- Η πραγματική τάση υδρατμών e_a [kPa] δίνεται από τη σχέση (Smith et al., 1991)

$$e_a = \frac{1}{2} \cdot \left[e_s(T_{\min}) \cdot \frac{RH_{\max}}{100} + e_s(T_{\max}) \cdot \frac{RH_{\min}}{100} \right] \quad (12)$$

όπου

T_{\min} η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία [$^{\circ}\text{C}$]

T_{\max} η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία [$^{\circ}\text{C}$]

RH_{max} η μέγιστη ημερήσια σχετική υγρασία [%]

RH_{min} η ελάχιστη ημερήσια σχετική υγρασία [%]

$e_s(T_{max})$ η τάση κορεσμένων υδρατμών στη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία [kPa]

$e_s(T_{min})$ η τάση κορεσμένων υδρατμών στην ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία [kPa]

- Η κλίση καμπύλης τάσης υδρατμών με τη θερμοκρασία Δ [kPa °C⁻¹] δίνεται από τη σχέση (13) που προκύπτει από παραγωγή της σχέσης (12).

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237.3)^2} \quad (13)$$

- Η Ψυχομετρική σταθερά γ [kPa.°C⁻¹] προσδιορίζεται από τη σχέση (14) (Brunt, 1952)

$$\gamma = 0.00163 \cdot \frac{P}{\lambda} \quad (14)$$

όπου P η ατμοσφαιρική πίεση [kPa] η οποία αν δεν είναι διαθέσιμη μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του υψομέτρου του τόπου z [m] με την εξίσωση (15) (Doorenbos and Pruiitt, 1977)

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26} \quad (15)$$

και λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε [MJ.kg⁻¹] που υπολογίζεται εύκολα με τη βοήθεια της εξίσωσης (16) συναρτήσει της θερμοκρασίας T του αέρα εκφρασμένης σε °C (Harrison, 1963).

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \cdot 10^{-3}) \cdot T \quad (16)$$

- Για τον υπολογισμό της μέσης καθαρής πυκνότητας ροής ακτινοβολίας R_n [MJ m⁻² d⁻¹] χρησιμοποιείται η σχέση (17)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} = R_s \cdot (1 - \alpha) - R_{nl} \quad (17)$$

όπου R_{ns} η καθαρή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία [MJ m⁻² d⁻¹]

R_{nl} η καθαρή μεγάλου μήκους κύματος (θερμική) ακτινοβολία [MJ m⁻² d⁻¹]

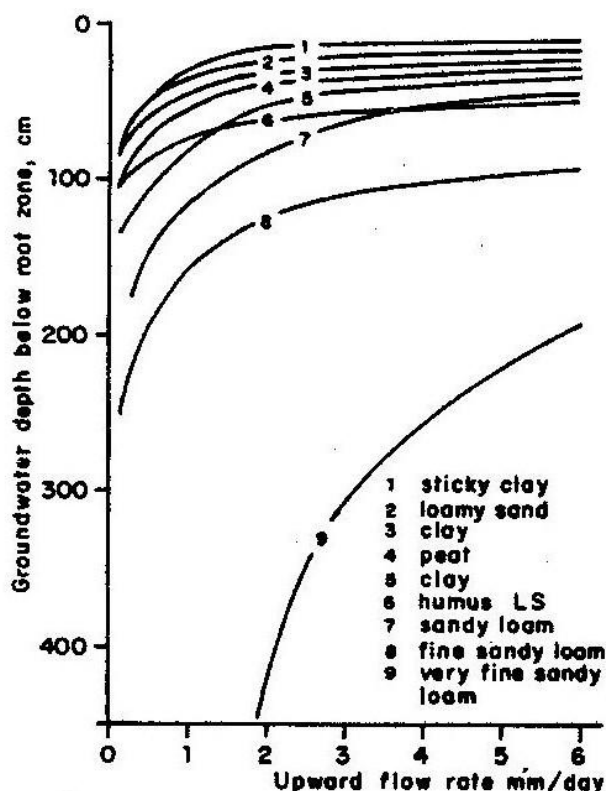
και α ο συντελεστής ανάκλασης της φυτοκόμης (albedo) [], που για γρασίδι - μηδική είναι $\alpha = 0.23$, ενώ R_s είναι η ολική εισερχόμενη (προσπίπτουσα) ακτινοβολία [MJ.m⁻².d⁻¹], η οποία είναι δυνατό να μετρηθεί άμεσα στους περισσότερους αγρομετεωρολογικούς σταθμούς.

Βροχόπτωση (P), απορροή (RO) και άρδευση (I).

Το P_i είναι ισοδύναμο με την ημερήσια βροχόπτωση. Ημερήσια βροχόπτωση σε ποσότητες μικρότερες του $0,2.ET_0$ εξατμίζεται και μπορεί να αγνοηθεί στους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου ειδικά όταν χρησιμοποιείται η προσέγγιση του απλού φυτικού συντελεστή. Η απορροή (RO) από την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να προσεγγιστεί με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων που αναφέρονται σε βιβλία και κείμενα σχετικά με την υδρολογία. Η άρδευση (I) είναι η ποσότητα του εφαρμοζόμενου νερού με άρδευση.

Ανοδική κίνηση νερού με τριγοειδή ανύψωση από την υπόγεια στάθμη (CR).

Εξαρτάται από τον εδαφικό τύπο, το βάθος της υπόγειας στάθμης και την υγρασία που υπάρχει στη ζώνη του ριζοστρώματος. Κανονικά το CR μπορεί να υποτεθεί ότι είναι μηδέν όταν η υπόγεια στάθμη είναι περισσότερο από 1 μέτρο κάτω από το κατώτερο άκρο του ριζοστρώματος. Στη μελέτη του FAO 24 δίδεται το ακόλουθο νομογράφημα που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο.



Διάγραμμα 2. Διάγραμμα για τον υπολογισμό της ανοδικής ροής από την υπόγεια στάθμη.

Σημείωση: Σε περίπτωση σταθερής κατατομής εξατμησης και αν υποτεθεί ότι η σχέση της υδραυλικής αγωγιμότητας K με το φορτίο πίεσης H του εδάφους είναι

της μορφής $K(H)=K_s \cdot \exp(a \cdot H)$ με a =σταθερά και K_s =υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, τότε η max ένταση εξάτμισης που μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη της σταθερής κατατομής για ομοιογενές έδαφος είναι:

$$q_{\max} = \frac{K_s}{\exp(a \cdot \Delta Z) - 1} \quad (18)$$

Όπου ΔZ είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της υπόγειας στάθμης και του κατώτατου άκρου της ζώνης του ριζοστρώματος. Στην περίπτωση αυτή είναι:

$$CR = q_{\max} \cdot \Delta t \quad \text{όπου } \Delta t \text{ το διάστημα για το οποίο λογίζεται το ισοζύγιο.}$$

ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΣΤΟ ΝΕΡΟ (Yield Response to Water)

Η μελέτη του FAO *Yield Response to Water*, Irrigation and Drainage Paper No 33 (Doorenbos et al., 1986) η οποία αναθεωρήθηκε πολύ πρόσφατα (*Crop Yield Response to Water*, Irrigation and Drainage Paper No 66) από τους Steduto et al.(2012), δίνει μια περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αποδόσεων των καλλιεργειών ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης ποσότητας νερού άρδευσης. Η πιο πρακτική και συγχρόνως πιο απλή από τις μεθόδους αυτές θεωρεί ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της μείωσης στις

σχετικής απόδοσης της καλλιέργειας $\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right)$ και του ελλείμματος της σχετικής

εξατμισοδιαπνοής $\left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)$ για κάθε χαρακτηριστικό στάδιο ανάπτυξης (τα στάδια

είναι: εγκατάσταση φυτείας (0), ανάπτυξη βλάστησης (1), άνθηση (2), σχηματισμός παραγωγής (3) και ωρίμανση (4).) Η σταθερά αναλογίας στη γραμμική αυτή σχέση ονομάζεται «Παράγων απόκρισης απόδοσης» (*Yield Response Factor*) και

συμβολίζεται ως k_y . Συνεπώς ισχύει:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = k_y \cdot \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (19)$$

Όπου:

Y_a = Η συγκομιζόμενη πραγματική απόδοση της καλλιέργειας

Y_m = Η συγκομιζόμενη μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας.

ET_a = Η πραγματική Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

ET_m = Η μέγιστη Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας

k_y = Ο Παράγων απόκρισης της απόδοσης.

Οι τιμές του k_y για διάφορες καλλιέργειες έχουν προκύψει από αξιολόγηση πολυάριθμων πειραματικών δεδομένων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ανάπτυξης των συγκεκριμένων καλλιεργειών. Οι τιμές του k_y που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά για τις διάφορες καλλιέργειες και για τα διάφορα στάδια ανάπτυξής τους, δίνεται στον Πίνακα 2 (πηγή FAO, Irrigation and Drainage paper No 66, 2012). Οι τιμές λοιπόν του k_y αλλάζουν από καλλιέργεια σε καλλιέργεια και ποικίλουν για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης της κάθε καλλιέργειας. Έτσι όταν:

$k_y > 1$. Η απόκριση της καλλιέργειας είναι πολύ ευαίσθητη στο έλλειμμα νερού με ανάλογες μεγαλύτερες μειώσεις της απόδοσης όταν μειωθεί η χρήση νερού λόγω υδατικού stress.

$k_y < 1$. Η καλλιέργεια είναι πιο ανθεκτική στο έλλειμμα νερού και ανακάμπτει μερικώς από το stress, εκφράζοντας λιγότερο ανάλογες μειώσεις στην απόδοση με τη μείωση της χρήσης νερού.

$k_y = 1$. Η μείωση της απόδοσης είναι ευθέως ανάλογη στη μείωση της χρήσης νερού.

Αφού οι τιμές του k_y είναι γνωστές από τον πίνακα, η εξίσωση (19) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει τις αποδόσεις των καλλιεργειών για δεδομένα ελλείμματα Εξατμισοδιαπνοής που προκαλούνται από συγκεκριμένα ελλείμματα νερού άρδευσης.

Πίνακας 2. Τιμές του k_y για διάφορες καλλιέργειες (Πηγή: FAO, Irr. Dr. p. 56)

Crop	K_y	Crop	K_y
Alfalfa	1.1	Safflower	0.8
Banana	1.2-1.35	Sorghum	0.9
Beans	1.15	Soybean	0.85
Cabbage	0.95	Spring wheat	1.15
Cotton	0.85	Sugarbeet	1.0
Groundnuts	0.70	Sugarcane	1.2
Maize	1.25	Sunflower	0.95
Onion	1.1	Tomato	1.05
Peas	1,15	Watermelon	1.1
Pepper	1.1	Winter wheat	1.05
Potato	1.1		

Χορήγηση περιορισμένης ποσότητας νερού άρδευσης (ελλειμματική άρδευση)

Το πρόβλημα προκύπτει όταν υπάρχει έλλειψη νερού, οπότε πρέπει να τροποποιηθεί η κυκλική χορήγηση νερού, ώστε η μείωση της παραγωγής να κρατηθεί στο ελάχιστο. Η λύση που υιοθετείται πιο συχνά είναι να μειωθεί η ποσότητα που δίνεται σε κάθε

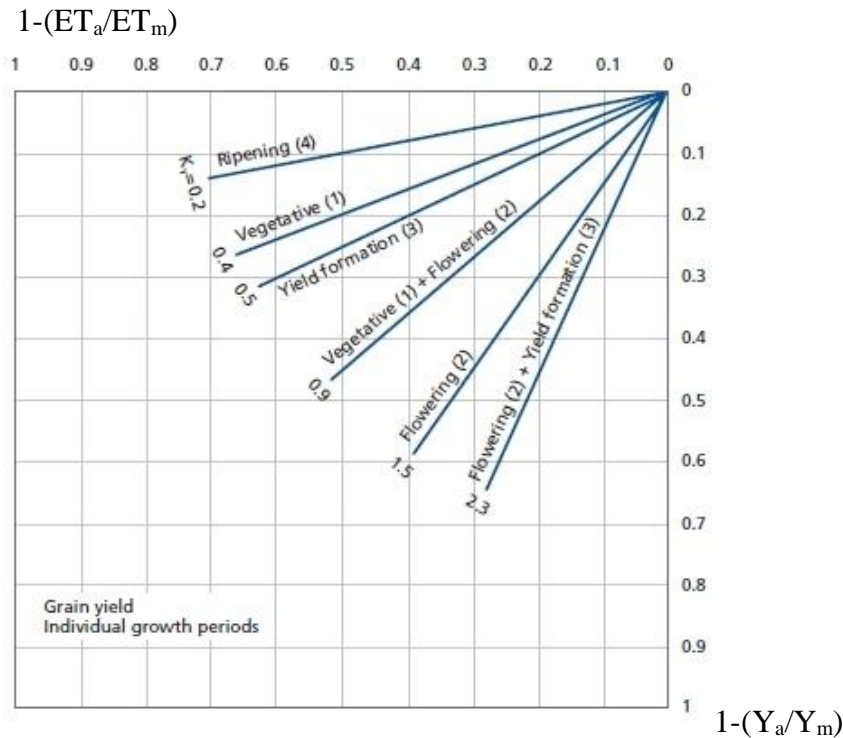
άρδευση κατ' αναλογίαν με τη σχέση: $\frac{\text{Διαθέσιμο νερό}}{\text{Απαιτήσεις καλλιεργειών σε νερό}}$ ή πιο

συχνά να επιμηκύνουν το εύρος άρδευσης κατ' αναλογίαν με τη σχέση:

$\frac{\text{Απαιτήσεις καλλιεργειών σε νερό}}{\text{Διαθέσιμο νερό}}$. Καμιά όμως από αυτές τις πρακτικές δεν

είναι πλήρως ικανοποιητική αφού καμιά τους δεν συμβαδίζει με τη φυσιολογική ανάπτυξη του φυτού. Είναι γνωστό ότι υδατικό stress σε συγκεκριμένες περιόδους ανάπτυξης επιδρά στις αποδόσεις ενώ σε άλλες περιόδους η επίδραση είναι λιγότερο σημαντική. Συνεπώς η εξοικονόμηση νερού θα πρέπει να γίνεται κυρίως σε εκείνες τις περιόδους που το φυτό είναι λιγότερο ευαίσθητο στο υδατικό stress και να περιοριστεί στο ελάχιστο κατά τις ευαίσθητες περιόδους. Οι κρίσιμες περίοδοι είναι διαφορετικές για κάθε καλλιέργεια και ως προς τη διάρκειά τους αφού εξαρτώνται και από τα χαρακτηριστικά του κλίματος.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων από πειράματα ελλειμματικής άρδευσης επέτρεψε για πάρα πολλές καλλιέργειες, την ανάπτυξη συναρτήσεων απόκρισης στο νερό όταν η έλλειψη νερού εφαρμόζεται σε διάφορα στάδια ανάπτυξής τους. Όπως προκύπτει από το ακόλουθο διάγραμμα 3 για το καλαμπόκι στην εικόνα που ακολουθεί, η απόκριση της καλλιέργειας σε απόδοση, διαφέρει κατά πολύ ανάλογα με πιο είναι το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο συμβαίνει το υδατικό stress. Τυπικά τα στάδια της άνθησης και της διαμόρφωσης της παραγωγής είναι ευαίσθητα στο υδατικό stress, ενώ το stress που συμβαίνει κατά τη διάρκεια του σταδίου της ωρίμανσης έχει περιορισμένες επιπτώσεις, όπως συμβαίνει και για τα στάδια ανάπτυξης της βλάστησης, υπό την προϋπόθεση ότι η καλλιέργεια είναι ικανή να ανακάμψει από το stress σε μεταγενέστερα στάδια.



Διάγραμμα 3. Γραμμικές συναρτήσεις παραγωγής για το καλαμπόκι, που προέκυψαν ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης στο οποίο υποβλήθηκε η καλλιέργεια σε υδατικό stress. Στις γραμμές φαίνονται και οι αντίστοιχες τιμές για το k_y .

Η διαδικασία υπολογισμού της πραγματικής απόδοσης Y_a μέσω της εξίσωσης (19) είναι η εξής:

- Προσδιορίζουμε τη μέγιστη απόδοση Y_m της ποικιλίας της καλλιέργειας που εξετάζουμε, όπως αυτή καθορίζεται από τα γενετικά της χαρακτηριστικά και τις κλιματικές συνθήκες ανάπτυξής της, υποθέτοντας ότι οι άλλοι αγρονομικοί παράγοντες (δηλ. νερό, λιπάσματα, ζωικοί εχθροί, ζιζάνια και ασθένειες) δεν είναι περιοριστικοί.
- Υπολογίζουμε τη μέγιστη Εξατμισοδιαπνοή ET_m σύμφωνα με κάποια μεθοδολογία και υποθέτοντας ότι οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό καλύπτονται πλήρως ($ET_m = k_c \cdot ET_0$)
- Υπολογίζουμε την πραγματική Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ET_a κάτω από τις υφιστάμενες ειδικές συνθήκες που επικρατούν, όπως αυτή προσδιορίζεται από το διαθέσιμο νερό που παρέχεται στην καλλιέργεια.
- Υπολογίζουμε την πραγματική απόδοση Y_a με τη βοήθεια της επιλογής της κατάλληλης τιμής του k_y για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο, ή για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας μέσω της εξίσωσης (19).

Αν εφαρμοστεί η εξίσωση (19) για δύο ή περισσότερα στάδια ανάπτυξης π.χ. για τα στάδια 1 και 2:

$$\text{Στάδιο ανάπτυξης 1: } \left(1 - \frac{Y_{a,1}}{Y_m}\right) = k_{y,1} \cdot \left(1 - \frac{ET_{a,1}}{ET_{m,1}}\right) \quad (20)$$

$$\text{Στάδιο ανάπτυξης 2: } \left(1 - \frac{Y_{a,2}}{Y_m}\right) = k_{y,2} \cdot \left(1 - \frac{ET_{a,2}}{ET_{m,2}}\right) \quad (21)$$

Με διαίρεση των (20) και (21) κατά μέλη προκύπτει:

$$\frac{(Y_m - Y_{a,1})}{(Y_m - Y_{a,2})} = \frac{k_{y,1}}{k_{y,2}} \cdot \frac{ET_{m,2}}{ET_{m,1}} \cdot \frac{(ET_{m,1} - ET_{a,1})}{(ET_{m,2} - ET_{a,2})} \quad (23)$$

Υποθέτοντας δε ότι οι ανεκτές για την καλλιέργεια μειώσεις της απόδοσης $(Y_{m,1} - Y_{a,1})$ και $(Y_{m,2} - Y_{a,2})$ είναι ίσα κατανεμημένες μεταξύ των κυρίων σταδίων ανάπτυξης, η σχέση (23) μπορεί να γραφεί ως:

$$1 = \frac{k_{y,1}}{k_{y,2}} \cdot \frac{ET_{m,2}}{ET_{m,1}} \cdot \frac{(ET_{m,1} - ET_{a,1})}{(ET_{m,2} - ET_{a,2})} \quad \text{ή}$$

$$\frac{(ET_{m,2} - ET_{a,2})}{(ET_{m,1} - ET_{a,1})} = \frac{k_{y,1}}{k_{y,2}} \cdot \frac{ET_{m,2}}{ET_{m,1}} \quad (24)$$

Αφού δε η μέγιστη εξατμισοδιαπονή σε κάθε στάδιο ανάπτυξης ($ET_{m,1}$ και $ET_{m,2}$) είναι ανάλογη προς την ποσότητα του παρεχόμενου νερού (V_1 και V_2) που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από τα στάδια αυτά, η εξίσωση (24) μπορεί να γραφεί:

$$\frac{(V_2 - V_{a,2})}{(V_1 - V_{a,1})} = \frac{k_{y,1}}{k_{y,2}} \cdot \frac{V_1}{V_2} \quad (25)$$

Όπου V_1 και V_2 είναι το νερό που υπάρχει διαθέσιμο και εφαρμόζεται για πλήρη κάλυψη των αναγκών στα στάδια ανάπτυξης 1 και 2 αντίστοιχα, ενώ $V_{a,1}$ και $V_{a,2}$ το νερό που εφαρμόζεται σε περιορισμένη ποσότητα για τα στάδια ανάπτυξης 1 και 2 αντίστοιχα. Συνεπώς εάν:

$V_1 - V_{a,1}$ = Έλλειμμα νερού στο στάδιο ανάπτυξης 1 = Νερό που εξοικονομήθηκε στο στάδιο ανάπτυξης 1 = SW_1 και

$V_2 - V_{a,2}$ = Έλλειμμα νερού στο στάδιο ανάπτυξης 2 = Νερό που εξοικονομήθηκε στο στάδιο ανάπτυξης 2 = SW_2 τότε η εξίσωση (25) μπορεί να γραφεί:

$$\frac{SW_2}{SW_1} = \frac{k_{y,1}}{k_{y,2}} \cdot \frac{V_1}{V_2} \quad (26)$$

Πίνακας τιμών *ky* ανά στάδιο ανάπτυξης (Πηγή: FAO – Irrig. Drain. P. No 40)

Crop	Vegetative period (1)			Flowering period	Yield formation	Ripening	Total growing period
	early (1a)	late (1b)	total	(2)	(3)	(4)	
Alfalfa			0.7-1.1				0.7-1.1
Banana							1.2-1.35
Bean			0.2	1.1	0.75	0.2	1.15
Cabbage	0.2				0.45	0.6	0.95
Citrus							0.8-1.1
Cotton			0.2	0.5		0.25	0.85
Grape							0.85
Groundnut			0.2	0.8	0.6	0.2	0.7
Maize			0.4	1.5	0.5	0.2	1.25
Onion			0.45		0.8	0.3	1.1
Pea	0.2			0.9	0.7	0.2	1.15
Pepper							1.1
Potato	0.45	0.8			0.7	0.2	1.1
Safflower		0.3		0.55	0.6		0.8
Sorghum			0.2	0.55	0.45	0.2	0.9
Soybean			0.2	0.8	1.0		0.85
Sugarbeet							
beet							0.6-1.0
sugar							0.7-1.1
Sugarcane			0.75		0.5	0.1	1.2
Sunflower	0.25	0.5		1.0	0.8		0.95
Tobacco	0.2	1.0			0.5		0.9
Tomato			0.4	1.1	0.8	0.4	1.05
Water melon	0.45	0.7		0.8	0.8	0.3	1.1
Wheat							
winter			0.2	0.6	0.5		1.0
spring			0.2	0.65	0.55		1.15

Αποτελεσματικότητα χρήσης νερού (Water Use Efficiency – WUE)

Η αποτελεσματικότητα χρήσης νερού, ορίζεται ως η παραγωγή βιομάζας (στο υπέργειο μέρος) ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα νερού που εξατμισοδιαπνέεται.

Η βιομάζα συνήθως προσδιορίζεται περισσότερο ως ξηρό βάρος παρά ως νωπό

βάρος. Συνεπώς η WUE μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή εξίσωσης ως εξής:

$$(WUE) = \frac{\text{Παραγωγή ξηρού βάρους (DW)}}{\text{Εξατμισοδιαπνοή (ET)}} \quad (27)$$

Η (WUE) μπορεί να εκφραστεί ως προς τη φυτική παραγωγή (φυτική μάζα) ή ως προς την αναπαραγωγική παραγωγή (μάζα παραγόμενου καρπού, σπόρων, κονδύλων, βολβών, κ.λπ), κάτι που πρέπει να δηλώνεται όταν αναφερόμαστε σ' αυτή. Η συνήθης μονάδα έκφρασης της (WUE) είναι (kg ξηρού βάρους) / (kg νερού που διαπνέεται). Η έκφραση με τη μονάδα αυτή είναι παρόμοια με το αντίστροφο των «παλαιότερων» όρων «απαίτηση σε νερό» και «λόγος διαπνοής». Οι σύγχρονοι αναλυτές αερίων που υπάρχουν μας επιτρέπουν να μετράμε το ρυθμό φωτοσύνθεσης και το ρυθμό διαπνοής σε συγκεκριμένα φύλλα ή σε μέρη συγκεκριμένων φύλλων τόσο μικρών σε μέγεθος όσο π.χ. 6 cm². Κατά συνέπεια είναι δυνατό να εκφράσουμε τη (WUE) με τη μορφή της «Αποτελεσματικότητας χρήσης νερού από φύλλα» (*Leaf Water Use Efficiency*) (LWUE). Έτσι:

$$(LWUE) = \frac{\text{Ρυθμός φωτοσύνθεσης}}{\text{Ρυθμός διαπνοής}} \quad (28)$$

Οι μονάδες του ρυθμού φωτοσύνθεσης είναι (micromoles CO₂) ανά m² και ανά sec, και οι μονάδες του ρυθμού διαπνοής είναι (micromoles H₂O) ανά m² και ανά sec.

Έτσι οι μονάδες της (LWUE) είναι (micromoles CO₂) ανά (micromole H₂O).

Η (WUE) μπορεί να βασίζεται είτε στην Εξατμισοδιαπνοή (*αποτελεσματικότητα ET*) είτε στην Διαπνοή (*αποτελεσματικότητα T*). Η διαφορά είναι σημαντική διότι η μείωση της εξάτμισης του εδαφικού νερού και η προστασία από τη διαπνοή των ζιζανίων στο χωράφι, μπορεί να βελτιώσει την *ET- αποτελεσματικότητα*. Δεν χρειάζεται όμως να βελτιωθεί η *T-αποτελεσματικότητα* που αποτελεί και μέτρο επίδοσης της καλλιέργειας. Επίσης, οι δύο αυτές αποτελεσματικότητες χρήσης νερού μπορούν να βασίζονται είτε στην συνολική παραγωγή ξηράς ουσίας είτε στην εμπορεύσιμη απόδοση της καλλιέργειας, πράγμα που πρέπει επίσης να δηλώνεται όταν αναφερόμαστε σ' αυτές.

Στις ξηρές περιοχές όπου το νερό που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα με εξάτμιση μπορεί να είναι 90% ή και περισσότερο, είναι απαραίτητο να επιδιώκουμε την αύξηση της (WUE). Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιδιώκουμε την παραγωγή περισσότερης φυτικής μάζας με χρήση μικρότερης ποσότητας νερού άρδευσης. Έτσι

η αύξηση της (WUE) ίσως να αποτελεί τον καλύτερο τρόπο παροχής επαρκούς ποσότητας νερού για τις καλλιέργειες, ιδιαίτερα σε περιοχές που η εξατμισοδιαπνοή είναι πολύ μεγαλύτερη από τη βροχόπτωση.

Βιβλιογραφία.

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 No 56, Rome.

Αλεξανδρής Σ., 2003. Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων εκτίμησης εξατμισοδιαπνοής κάτω από ελληνικές συνθήκες. Διδακτορική Διατριβή. Γ.Π.Α., Τμήμα Α.Φ.Π.&Γ.Μ.

Brunt D, 1952. Physical and dynamical meteorology, 2nd Ed., Univ. Pres, Cambridge, 428p.

Doorenbos J. and W.O. Pruitt, 1977. Guidelines for predicting Crop Water Requirements (revised ed.). FAO Irrigation and Drainage paper No 24, Rome.

Doorenbos J., A. H. Kassam, C. L. M. Bentvelsen, V. Branscheid, J. M. G. A. Plusje, M. Smith, G. O. Uittenbogaard, and H. K. Van Der Wal. 1986. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper No 33, Rome.

Harrison L. P., 1963. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. In: A. Wexler (ed.), Humidity and moisture. Vol. 3. Reinhold Publishing Company, New York, NY.

Smith, M, Allen, R G, Monteith J L, Perrier A, Pereira L, and Sergen A, 1991. Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italy, 54p.

Sagardoy J. A. , A. Bottrall, and G.O. Uittenbogaard, 1986. Organization, operation and maintenance of irrigation schemes, FAO Irrigation and Drainage paper No 40, Rome.

Steduto P., T. Hsiao, E. Fereres, D. Raes, 2012. Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper No 66, Rome

Tetens O, 1930. Uber einige meteorologische Begriffe. z. Geophys. 6:297-309.