

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 10

Εξάτμιση και Διαπνοή

Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0)

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c)

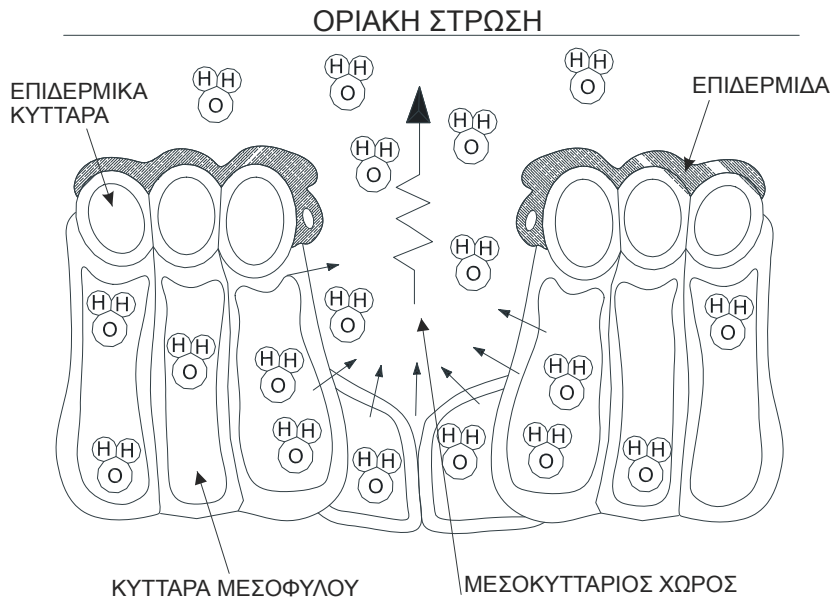
Εισαγωγή

Η φυσική διεργασία της εξάτμισης είναι η ίδια άσχετα με το αν παρατηρείται σε επιφάνειες ελεύθερου νερού, στην επιφάνεια του εδάφους ή σε φυτικές επιφάνειες εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα. Παρά ταύτα η εξάτμιση νερού που παρατηρείται στις φυτικές επιφάνειες και που προϋποθέτει μεταφορά εδαφικού νερού στις επιφάνειες αυτές διαμέσου του φυτού ονομάζεται **διαπνοή** (*transpiration*). Τα φυτά κατά κύριο λόγο χάνουν το νερό δια μέσου των στοματίων (*stomata*) του φυλλώματος. Τα στομάτια είναι μικρά ανοίγματα στην επιφάνεια του φύλλου αποτελούμενα από ένα μεσοκυττάριο χώρο (*intercellular space*), οριοθετούμενο από επιδερμικά κύτταρα (*epidermal cells*) και μεσοφυλλικά κύτταρα (*mesophyll cells*), μέσω των οποίων διέρχονται τα αέρια και οι υδατμοί (Εικόνα 1).

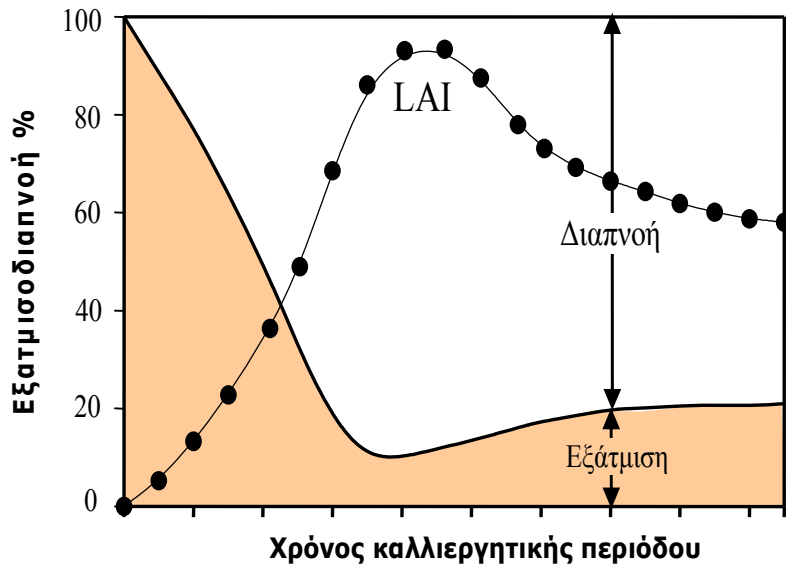
Το νερό μαζί με ορισμένα θρεπτικά στοιχεία προσλαμβάνονται από το έδαφος μέσω του ριζικού συστήματος, και μεταφέρονται δια μέσου των ιστών του φυτού. Η εξάτμιση συμβαίνει μέσα στον μεσοκυττάριο χώρο και ο ρυθμός απώλειας των υδατμών ελέγχεται από το μεταβαλλόμενο άνοιγμα των στοματίων. Σχεδόν όλη η ποσότητα του προσλαμβανόμενου νερού χάνεται μέσω του μηχανισμού της διαπνοής και μόνο ένα μικρό κλάσμα χρησιμοποιείται εσωτερικά στο φυτό. Η διαπνοή σαν άμεση εξάτμιση, εξαρτάται από την διαθέσιμη ενέργεια, την κλίση των υδατμών και τον άνεμο. Συνεπώς η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου θεωρούνται σημαντικοί παράγοντες για το ρυθμό της διαπνοής. Αφ' ετέρου η ποσότητα του εδαφικού νερού, η συγκέντρωση αλάτων καθώς και η εδαφική επαφή με το ριζόστρωμα επιδρούν επίσης στο ρυθμό διαπνοής. Τα χαρακτηριστικά των φυτών, η καλλιεργητική πρακτική, και τα στάδια ανάπτυξης μίας συγκεκριμένης καλλιέργειας είναι επιπρόσθετοι παράγοντες που μπορούν να καθορίσουν διαφορετικούς ρυθμούς διαπνοής.

Εκτός από την διαθεσιμότητα του νερού στην ανώτερη στρώση του εδάφους, η εξάτμιση από ένα καλλιεργούμενο έδαφος κατά ένα μεγάλο μέρος προσδιορίζεται από το κλάσμα της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας που φθάνει στην εδαφική επιφάνεια. Αυτό το κλάσμα ελαττώνεται συνεχώς κατά την διάρκεια της αύξησης του φυτού, από την αυξανόμενη φυλλική επιφάνεια που σκιάζει το έδαφος.

Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας τον κυρίαρχο λόγο στην εξάτμιση κατέχει το έδαφος, αλλά καθώς τα φυτά αναπτύσσονται καλύπτοντας όλο και περισσότερο την επιφάνεια του εδάφους, η διαπνοή γίνεται η κύρια διαδικασία απώλειας νερού.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση απλού στοματίου φύλλου



Εικόνα 2: Γραφική απεικόνιση της συμμετοχής εξάτμισης και διαπνοής σε μια τυπική καλλιεργητική περίοδο.

Στην εικόνα 2 φαίνεται σχηματικά η ποσοστιαία συνεισφορά των δύο διαδικασιών για τα στάδια μίας τυπικής καλλιεργητικής περιόδου. Επειδή ο διαχωρισμός των απωλειών νερού μιας εδαφικής μάζας με απ' ευθείας εξάτμιση στην επιφάνειά της από τις απώλειες διαπνοής είναι συνήθως πολύ δύσκολος, αν και έχει επιχειρηθεί, (Ritchie, 1972, 1974, Εξισώσεις Shuttleworth-Wallace 1985 Ritchie et al., 1989; Ritchie and Johnson 1990) οι συνολικές απώλειες εξάτμισης του εδαφικού νερού θεωρούνται ενιαίο σύνολο και χαρακτηρίζονται με τον όρο **εξατμισοδιαπνοή** (evapotranspiration). Η εξατμισοδιαπνοή θα μπορούσε να οριστεί δηλώνοντας την σημαντικότητα του φαινομένου, ως “η βιοφυσική διεργασία επιβίωσης του φυτικού κόσμου σε ένα φιλικό ή εχθρικό περιβάλλον οριοθετούμενο από το έδαφος και την οριακή στρώση της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας σαν μέσο την υγρή και αέρια φάση του νερού, συμμετέχοντας με αυτόν τον τρόπο δυναμικά στον υδρολογικό κύκλο.”

Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής από μια φυτοκαλυμμένη επιφάνεια αναφοράς, επαρκώς εφοδιασμένη με νερό, ονομάζεται **Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς** και συμβολίζεται με ET_0 . Η επιφάνεια αναφοράς είναι μια υποθετική καλλιέργεια γρασιδιού (grass reference), ή μιας άλλης οριζόμενης καλλιέργειας (π.χ. μηδικής: alfalfa reference) με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η χρήση άλλων ορισμών όπως π.χ. “Δυνητική εξατμισοδιαπνοή” πρέπει να αποφεύγεται για τον λόγο ότι πολλές φορές υπάρχει σύγχυση στον όρο. Ο όρος “Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς” εισήχθη για να μελετήσει τις απαιτήσεις εξάτμισης της ατμόσφαιρας από κάθε τύπο φυτοκάλυψης, καθώς και την διαχείριση και ανάπτυξη καλλιεργητικών πρακτικών.

Καθώς το νερό από την επιφάνεια αναφοράς που εξατμίζει θεωρείται σε πλήρη επάρκεια, οι εδαφικοί παράγοντες δεν επιδρούν επί της ET_0 . Μοναδικοί παράγοντες που επιδρούν συνεπώς, είναι οι κλιματικοί και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας αναφοράς..

Καθώς λοιπόν η ET_0 είναι ουσιαστικά μία κλιματική παράμετρος, και μπορεί να υπολογιστεί από κλιματικά δεδομένα, η ET_0 εκφράζει την εξατμιστική ισχύ της ατμόσφαιρας σε ένα συγκεκριμένο τόπο και χρόνο. Οι εκτιμώμενες τιμές της σε διαφορετικές περιοχές και διαφορετικές εποχιακές περιόδους είναι συγκρίσιμες καθ' όσον αφορούν την ίδια επιφάνεια αναφοράς (καλλιέργεια αναφοράς).

Η έρευνα στον τομέα της εξατμισοδιαπνοής έχει προχωρήσει αρκετά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες και συνεχώς εξελίσσεται. Οι γεωργικοί μηχανικοί έχουν την επιτακτική ανάγκη να προσαρμόσουν σχέσεις πάνω στην εκτίμηση της κατανάλωσης νερού βασιζόμενοι σε αρχές και φυσικούς νόμους που θα είναι πιο ακριβείς απ' ό,τι ήταν στο παρελθόν, καθώς η τιμή του νερού αυξάνει. Πρόσφατα η χρήση σχέσεων που προτάθηκαν από την *ASCE-ET* (American Society of Civil Engineers Evapotranspiration in Irrigation and Hydrology Committee, 1998) που αναφέρονται σε καλλιέργεια αναφοράς χαμηλή (grass, $h=0.12m$) και υψηλή (alfalfa, $h=0.50m$), καθιερώνουν νέα πρότυπα στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c κάτω από τυπικές συνθήκες.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c κάτω από τυπικές συνθήκες είναι η εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας, απαλλαγμένη από ασθένειες, αναπτυσσόμενη σε μεγάλη έκταση με σωστή λίπανση, με βέλτιστες συνθήκες εδαφικής υγρασίας, και που επιτυγχάνει βέλτιστες αποδόσεις κάτω από δεδομένες κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής. Η ποσότητα νερού που απαιτείται για μία καλλιεργούμενη έκταση, για να εξισορροπήσει τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης και διαπνοής, είναι χαρακτηριστική για κάθε καλλιέργεια και αναφέρεται ως ανάγκη καλλιέργειας σε νερό (crop water requirement). Οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό αναφέρονται στην ποσότητα του νερού που απαιτείται

για τον εφοδιασμό κάθε καλλιέργειας, ενώ η ET_c αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Οι υδατικές ανάγκες μιας καλλιέργειας θεμελιωδώς αντιπροσωπεύουν την διαφορά των αναγκών σε νερό και της ενεργής βροχόπτωσης (*effective precipitation*). Επίσης χρήσιμο είναι να τονισθεί ότι στις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετες ποσότητες νερού για την κάλυψη νερού λόγω έκπλυσης αλάτων ή απωλειών νερού λόγω στράγγισης και απορροής.

Η ET_c μπορεί να υπολογισθεί από κλιματικά δεδομένα, εισάγοντας τις αντιστάσεις της φυτοκαλλιέργειας, το *albedo* και τους συντελεστές αντίστασης του αέρα στην μέθοδο *Penman–Monteith*. Καθώς όμως η διαθεσιμότητα των παραπάνω παραμέτρων δεν είναι δυνατή -σχεδόν πάντα- για διάφορους τύπους καλλιεργειών και κάτω από συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες, η χρήση των συντελεστών καλλιέργειας K_c (crop coefficients) σε συνδυασμό με την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_0 θα μπορούσε να οδηγήσει στην εκτίμηση της ET_c από τον λόγο $ET_c/ET_0 = K_c$.

Λόγοι της ET_c προς ET_0 έχουν υπολογισθεί πειραματικά για κάθε στάδιο ανάπτυξης για διάφορες καλλιέργειες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρακτικές εκτιμήσεις.

Προσέγγιση του συντελεστή φυτοκαλλιέργειας (K_c)

Στη προσέγγιση του K_c η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, ET_c , υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_0 με το K_c

$$ET_c = K_c ET_0$$

όπου	ET_c :	εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας	[mm/day]
	K_c :	συντελεστής καλλιέργειας []	
	ET_0 :	εξατμισοδιαπνοή αναφοράς	[mm/day]

Οι περισσότερες επιρροές από τις μετεωρολογικές συνθήκες είναι ενσωματωμένες στην εκτίμηση της ET_0 . Επομένως καθώς η ET_0 αντιπροσωπεύει τον δείκτη επίδρασης των κλιματικών συνθηκών ο K_c διαφοροποιείται με τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε καλλιέργειας, και επηρεάζεται μόνο από περίπτωση ακραίων κλιματικών συνθηκών. Αυτό το γεγονός παρέχει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται το K_c σε διαφορετικές περιοχές και κλίματα. Αυτός είναι ο πρωταρχικός λόγος της εκτεταμένης αποδοχής του και της χρησιμότητας της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας.

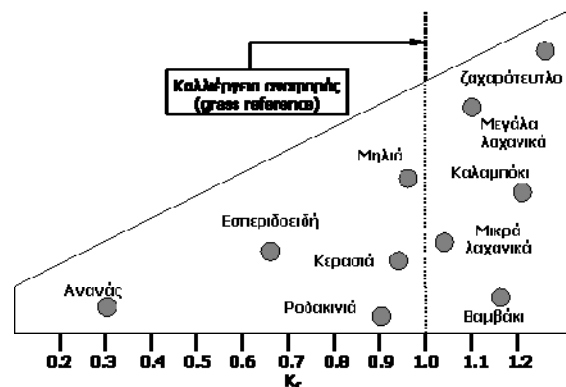
Ο συντελεστής καλλιέργειας συνεπώς αντιπροσωπεύει μια σφαιρική επιρροή τεσσάρων βασικών χαρακτηριστικών που τον διαφοροποιούν από την καλλιέργεια αναφοράς. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- Το ύψος της καλλιέργειας, το οποίο επηρεάζει τον όρο της αεροδυναμικής αντίστασης r_a , (ο οποίος εισάγεται στην εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με την μέθοδο *Penman–Monteith*) και την στροβιλώδη μεταφορά των υδρατμών από την καλλιέργεια στην ατμόσφαιρα.
- Η ανακλαστικότητα α (albedo) της φυτοκόμης και του εδάφους η οποία επηρεάζεται από το βαθμό φυτοκάλυψης και της κατάστασης επιφανειακής υγρασίας του εδάφους. Η ανακλαστικότητα έχει άμεση επιρροή στην ροή της καθαρής ακτινοβολίας R_n η οποία θεωρείται η βασική πηγή ενέργειας στη διαδικασία εξάτμισης (*Alves, 1995; Alves et al., 1998*)
- Η αντίσταση της φυτοκόμης στην μεταφορά των υδρατμών από την καλλιέργεια στο περιβάλλον η οποία επηρεάζεται από την επιφάνεια του φυλλώματος (*αριθμός στοματιών*), την ηλικία των φύλλων και τον έλεγχο και ρυθμό του ανοίγματος των στοματιών.
- Την εξάτμιση από το έδαφος και ειδικότερα στη περίπτωση έκθεσης του εδάφους (*γυμνό έδαφος ανάμεσα στις γραμμές των φυτών, απόσταση φύτευσης κ.λ.π.*)

Η υγρασιακή κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους και το ποσοστό κάλυψης του από την καλλιέργεια επηρεάζει την τιμή της επιφανειακής αντίστασης r_s . Ο συνδυασμός της αντίστασης της φυτοκόμης με εκείνη του εδάφους προσδιορίζει την συνολική αντίσταση της επιφάνειας r_s (*bulk surface resistance*)

Συνεπώς ο συντελεστής καλλιέργειας K_c ενσωματώνει όλα τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν μία τυπική καλλιέργεια από την καλλιέργεια αναφοράς η οποία έχει πάντα σταθερά χαρακτηριστικά και πλήρη εδαφική κάλυψη, και επιπρόσθετα το K_c δεν διαφοροποιείται μόνο από τον τύπο κάθε καλλιέργειας αλλά επηρεάζεται φυσικά και από τα στάδια ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν μπορούν να δώσουν μια συνοπτική εικόνα μερικών από τους παράγοντες που προσδιορίζουν την εκτίμηση του συντελεστή K_c . Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται μια γενική διαφοροποίηση του K_c για δενδρώδεις και χαμηλούς τύπους βλάστησης σε περίοδο πλήρους κάλυψης. Για καλλιέργειες όπως π.χ. ο ανανάς στον οποίο τα στομάτια κατά την διάρκεια της ημέρας παραμένουν κλειστά το K_c είναι πάρα πολύ μικρό. Είδη των οποίων τα



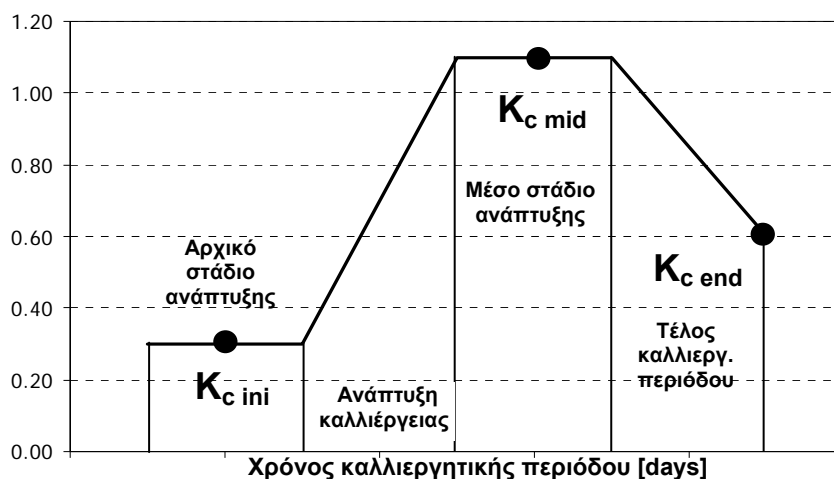
στομάτια των φύλλων βρίσκονται μόνο από την κάτω πλευρά των φύλλων και με μεγάλη φυλλική αντίσταση έχουν σχετικά μικρότερα K_c , όπως είναι η περίπτωση των εσπεριδοειδών και άλλων οπωροφόρων δένδρων. Ο έλεγχος της διαπνοής και το διάστημα της δένδροφύτευσης (κάλυψη περίπου το 70% του εδάφους από το φύλλωμα) και εάν τα δένδρα δεν συγκαλλιεργούνται με άλλα χαμηλότερα φυτά, το K_c έχει μικρότερες τιμές του 1. Πυκνές γραμμές φύτευσης και μεγαλύτερα ύψη φυτών εκτεταμένων καλλιέργειών σε πλήρη ανάπτυξη έχουν K_c μεγαλύτερο από 1.

Ανάλογη επίδραση των κλιματικών συνθηκών πάνω στο K_c για πλήρως αναπτυγμένες καλλιέργειες παρουσιάζεται στην δεύτερη εικόνα. Τα επάνω όρια της περιοχής παρουσιάζουν ακραίες ξηρικές συνθήκες με έντονες ταχύτητες ανέμου, ενώ στις χαμηλότερες περιοχές επικρατούν πολύ υγρές συνθήκες με ήπιους ανέμους. Σχετικά με το εύρος του K_c καθώς οι κλιματικές και οι καιρικές συνθήκες αλλάζουν, παρατηρείται μικρή απόκλιση για τις χαμηλές καλλιέργειες, ενώ για τις υψηλές η διαφοροποίηση στο εύρος του K_c είναι μεγαλύτερη. Κάτω από υγρές συνθήκες και ήπιες ταχύτητες ανέμου υπάρχει μικρότερη εξάρτηση στη διαφορά ανάμεσα στην αεροδυναμική συνιστώσα της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (ET_c) και εκείνης της αναφοράς (ET_0) και οι τιμές του K_c για πλήρη κάλυψη των γεωργικών καλλιέργειών δεν ξεπερνούν τη μονάδα περισσότερο του 5%. Αυτό οφείλεται στο ότι οι γεωργικές καλλιέργειες και η καλλιέργεια αναφοράς (*grass reference*) εξασφαλίζουν την μέγιστη απορρόφηση της μικρού μήκους ακτινοβολίας η οποία θεωρείται η κύρια πηγή ενέργειας για εξάτμιση κάτω από ήπιες και υγρές συνθήκες.

Γενικώς ο συντελεστής ανακλαστικότητας α , είναι περίπου ο ίδιος σε μεγάλο εύρος γεωργικών καλλιέργειών (πλήρους κάλυψης) συμπεριλαμβανομένου και της καλλιέργειας αναφοράς. Επειδή το έλλειμμα κορεσμού VPD (*vapour pressure deficit*: $e_s - e_a$), είναι μικρό κάτω από συνθήκες υψηλής υγρασίας, διαφορές στην εξατμισοδιαπνοή (ανάμεσα στην ET_c και ET_0) μπορούν να οφείλονται στη διαφορά της αεροδυναμικής αντίστασης r_a , που και αυτή μπορεί να είναι μικρή, ειδικότερα κάτω από συνθήκες χαμηλής προς μέτριας ταχύτητας του ανέμου. Ανάλογη επίδραση των κλιματικών συνθηκών πάνω στο K_c για πλήρως αναπτυγμένες καλλιέργειες παρουσιάζεται στην εικόνα 4 (Allen et al., 1998). Τα επάνω όρια της περιοχής παρουσιάζουν ακραίες ξηρικές συνθήκες με έντονες ταχύτητες ανέμου, ενώ στις χαμηλότερες περιοχές επικρατούν πολύ υγρές συνθήκες με ήπιους ανέμους.

Κάτω από ξηρικές συνθήκες η επίδραση της διαφοράς του r_a αντίστοιχα, είναι μεγαλύτερη διότι ο όρος του ελλείμματος κορεσμού είναι σχετικά μεγάλος. Η μεγαλύτερη ένταση του ελλείμματος κορεσμού ενισχύει τις διαφορές στον αεροδυναμικό όρο στον αριθμητή στην εξίσωση εξατμισοδιαπνοής της μεθόδου Penman-Monteith και για τις δύο καλλιέργειες. Οπότε το K_c κάτω από ξηρικές συνθήκες θα είναι αρκετά μεγαλύτερο της μονάδας για γεωργικές καλλιέργειες που ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας και το ύψος των φυτών είναι μεγαλύτερο από εκείνο της καλλιέργειας αναφοράς.

Γενική παρουσίαση της καμπύλης μεταβολής του K_c στα διάφορα στάδια ανάπτυξης απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα



Μέθοδοι προσδιορισμού εξατμισοδιαπνοής αναφοράς

Από δεκάδες μεθόδους που έχουν προταθεί τα τελευταία 60 χρόνια (Συνδιαστικά μοντέλα Penman & εμπειρικές μέθοδοι) περιγράφονται συνοπτικά 4 μέθοδοι υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

1. FAO Penman- Monteith (1998)
2. Penman 1963

3. Priestley- Taylor (1972)
4. Hargreaves –Samani (1985)

1. FAO56 Penman-Monteith

Εκτίμηση Ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) σε mm/day, για γρασιδί ύψους 8-12 cm με πλήρη επάρκεια εδαφικού νερού. χαρακτηριστικά της καλλιέργειας αναφοράς: (Δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI=2.88), albedo ($\alpha = 0.23$), συνολική αντίσταση βλάστησης ($r_s = 70s / m$) και αεροδυναμική αντίσταση ($r_a = 208 / U_2$ s / m))

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot U_2)}$$

ET_o : Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm / d], R_n : Μέση καθαρή πυκνότητα ροής ακτινοβολίας [MJ/m^2d], G : Πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος [MJ/m^2d], U_2 : Ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο των 2 m [m/sec], ($G=0$, για ημερήσιο βήμα εκτίμησης).

Η διαφορά της τάσης κορεσμένων υδρατμών με την πραγματική τάση υδρατμών ($e_s - e_a$) ονομάζεται «Ελλειμμα κορεσμού» (VPD, *Vapor pressure deficit*)

$$e_s : \text{ τάση κορεσμένων υδρατμών [kPa] } e_s = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}\right)$$

$T_{mean} = (T_{max} + T_{min}) / 2$, εάν δίδεται η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία

$$\Delta : \text{ Κλίση καμπύλης τάσης υδρατμών [kPa/°C] (Slope Vapour Pressure Curve) } \Delta = \frac{4098 e_s}{(T_{mean} + 237.3)^2}$$

e_a : πραγματική τάση υδρατμών [kPa]

a) Από την T_{max} , T_{min} , RH_{max} , RH_{min} (συνίσταται για ημερήσιο βήμα τιμής):

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

$$b) \text{ Από την } T_{mean} \text{ και } RH_{mean} \quad e_a = e_s(T_{mean}) \frac{RH_{mean}}{100}$$

Ψυχομετρική σταθερά (γ): $\gamma = 0.00163 \frac{P}{\lambda}$ Όπου P η ατμοσφαιρική πίεση συναρτήσει του υψομέτρου

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

και λ η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσσης (*Latent Heat of Vaporization*) [MJ/kg] $\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) T_{mean}$.

Σε φυσιολογικά επίπεδα θερμοκρασιών η τιμή του λ αλλάζει ελαφρά οπότε μπορεί να λαμβάνεται $\lambda = 2.45$ MJ/kg ($T = 20^\circ C$)

2. Μέθοδος ET_o Penman 1963 (Original Penman 1963) Ημερήσιο βήμα εκτίμησης

$$ET_o = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} w_f (e_s - e_a) \right] \cdot \frac{1}{\lambda}$$

Στην συνάρτηση του ανέμου (wind function) γίνεται χρήση των ακόλουθων συντελεστών όπως πρότεινε αρχικά ο Penman, (1963)

$$w_f = 1 + 0.537 \cdot u_2$$

Όλες οι μονάδες και οι όροι ισχύουν όπως στην περίπτωση (1. FAO56-Penman Monteith)

3. Μέθοδος Priestley- Taylor (1972)

Το προτεινόμενο μοντέλο των *Priestley και Taylor, 1972* είναι μια εμπειρική προσέγγιση της πιο θεωρητικής εξίσωσης του *Penman* όπου απουσιάζει ο αεροδυναμικός όρος και γίνεται χρήση μόνο του ενεργειακού όρου πολλαπλασιαζόμενου με έναν συντελεστή $\alpha = 1.26$.

$$ET = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (R_n - G)$$

Όλες οι μονάδες και οι όροι ισχύουν όπως στην περίπτωση (1. FAO56-Penman Monteith)

Συνεπώς η μέθοδος θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου γενικά επικρατούν υψηλές συνθήκες ατμοσφαιρικής υγρασίας. Η χρήση της παράλληλα με την εξίσωση Penman, σε υγρές περιοχές (low moisture stress), έδωσαν εκτιμήσεις με απόκλιση περίπου 5% η μια από την άλλη, όπως διαπιστώθηκε από τους *Shuttleworth και Calder, 1979*. Η επάρκεια των υποθέσεων που γίνεται στην εξίσωση *Priestley-Taylor* έχει έγκυρη βάση από ανασκόπηση 30 εργασιών που αναφέρονται στο υδατικό ισοζύγιο περιοχών όπου το έλλειμμα κορεσμού παραμένει πολύ μικρό, οπότε διαπιστώθηκε ότι περίπου το 95% της ετήσιας εξατμιστικής απαίτησης προέρχεται από την ακτινοβολία (*Stagnitti et al., 1989*).

Αν και η τιμή του α μπορεί να ποικίλει κατά τη διάρκεια της ημέρας (*Munro, 1979*), υπάρχει γενική συμφωνία ότι μια ημερήσια μέση τιμή $\alpha = 1.26$ ισχύει στα υγρά κλίματα (*De Bruin και Keijman, 1979; Stewart and Rouse, 1976; Shuttleworth and Calder, 1979*). Ο *Morton, 1983* επισημαίνει ότι η τιμή 1,26, που υπολογίστηκε από τους *Priestley και Taylor*, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας στοιχεία από υγρές καλλιεργούμενες επιφάνειες και από υδάτινες επιφάνειες. Ο *Morton* συνιστά ότι η τιμή αυξάνεται ελαφρά ($\alpha = 1.32$) για καλλιεργούμενες εκτάσεις, ως αποτέλεσμα της αύξησης στην τραχύτητα της επιφάνειας (*Morton, 1983; Brutsaert and Stricker, 1979*). Υψηλότερες τιμές του α , μέχρι και 1,74, έχουν προταθεί (*ASCE, 1990*) για χρήση στις ημίξηρες ή ξηρές περιοχές. Ο συντελεστής α μπορεί επίσης να μεταβάλλεται εποχιακά (*De Bruin and Keijman, 1979*), ανάλογα με το κλίμα που διαμορφώνεται.

4. Μέθοδος Hargreaves-Samani (1985)

Η μέθοδος αυτή όπως προτείνεται τελευταία και από την “ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Task Committee. Appendix A”, μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση, συναρτήσει της διαφοράς μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας, της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας R_a : Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιοχές που δεν διατίθενται μετρήσεις ακτινοβολίας.

$$ET_o = 0.0023 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \cdot (T_m + 17.8) \cdot R_a$$

όπου,

ET_o : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm/day]

T_{\max} : μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία [$^{\circ}C$].

T_{\min} : ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία [$^{\circ}C$].

T : μέση ημερήσια θερμοκρασία [$^{\circ}C$].

R_a : προσπίπτουσα ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας [mm/day]

Μονάδες ροής ενέργειας και μετατροπές.

$$1 \text{ Watt} = \frac{J}{\text{sec}} \rightarrow 1 \frac{\text{Watt}}{m^2} = \frac{J}{m^2 \cdot \text{sec}} = \frac{10^{-6} \text{ MJ}}{1 \text{ day}} = \frac{86400}{m^2} \text{ day} = 0.0864 \text{ MJ}/m^2 \text{ day}$$

$$1 \frac{\text{mm}}{\text{day}} = \lambda \cdot \frac{\text{MJ}}{m^2 \text{ day}} = 2.45 \frac{\text{MJ}}{m^2 \text{ day}} (T_{\text{air}} = 20^{\circ} C) \quad \left[\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) T_{\text{air}} \right]$$

$$\text{ή } 1 \text{ MJ}/m^2 \text{ day} = 0.408 \text{ mm/day} \quad (0.408 = 1/2.45, \quad 20^{\circ} C)$$

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J} = 4.1868 \times 10^{-6} \text{ MJ} \rightarrow 1 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ day}} = \frac{4.1868 \times 10^{-2} \text{ MJ}}{m^2 \text{ day}}$$

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Να υπολογισθούν οι ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής για ολόκληρο το έτος, από τα κλιματικά δεδομένα της άσκησης 2 (Αρχείο XLS) με τις 4 προαναφερόμενες μεθόδους.