

Ανόργανη διατροφή φυτών στις υδροπονικές καλλιέργειες



Χρήση θρεπτικών διαλυμάτων σε εκτός εδάφους καλλιέργειες

Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος σε ανόργανα θρεπτικά στοιχεία είναι το βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης της θρέψης των φυτών στις καλλιέργειες εκτός εδάφους

Σε ένα σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους διακρίνουμε τα εξής θρεπτικά διαλύματα:

- **Θρεπτικό διάλυμα τροφοδοσίας**
- **Θρεπτικό διάλυμα που υπάρχει στο περιβάλλον των ριζών**
- **Θρεπτικό διάλυμα απορροής**

Ορισμοί συγκεντρώσεων

C_{it} : Συγκέντρωση στο διάλυμα τροφοδοσίας

C_{ir} : Συγκέντρωση στο διάλυμα ριζοστρώματος

C_{id} : Συγκέντρωση στο διάλυμα απορροής

C_{im} : Συγκέντρωση στο μίγμα νερού - διαλύματος απορροής

C_{iu} : Συγκέντρωση απορρόφησης

C_{if} : Συγκέντρωση οφειλόμενη στην προσθήκη λιπασμάτων

a : Κλάσμα απορροής (0 - 1)

$$C_{it} = C_{iu} + a(C_{id} - C_{iu})$$

$$C_{ir} = (C_{it} + C_{id}) / 2$$

Τυπική σύνθεση θρεπτικού διαλύματος για αγγούρι

Επιθυμητά χαρακτηριστικά	Διαβροχή υποστρώματος	Βλαστικό στάδιο			Στάδιο καρποφορίας		
		Δ.Τ.	Σ.Α.	Δ.Ρ.	Δ.Τ.	Σ.Α.	Δ.Ρ.
EC	2,30	2,20	1,80	2,50	2,10	1,70	2,70
pH	5,60	5,60	-	5,60 – 6,60	5,60	-	6,00 - 6,70
[K ⁺]	5,70	5,40	5,30	6,00	5,80	6,00	5,50
[Ca ²⁺]	5,30	4,65	3,15	6,50	4,50	2,70	7,25
[Mg ²⁺]	1,65	1,60	1,10	2,00	1,40	1,00	2,00
[NH ₄ ⁺]	0,50	1,20	1,40	<0,60	0,60	0,80	<0,40
[SO ₄ ²⁻]	2,00	1,85	1,00	2,70	1,75	1,00	3,10
[NO ₃ ⁻]	14,40	13,70	11,60	15,60	13,00	10,60	16,00
[H ₂ PO ₄ ⁻]	1,20	1,20	1,10	1,20	1,20	1,10	1,10
[Fe]	20,0	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
[Mn]	12,00	10,00	10,00	6,00	10,00	10,00	5,00
[Zn]	6,00	5,00	4,00	7,00	5,00	4,00	8,00
[Cu]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70	0,80
[B]	45,00	30,00	30,00	80,00	30,00	25,00	80,00
[Mo]	0,50	0,50	0,50	-	0,50	0,50	-
		C _t	C _u	C _r	C _t	C _u	C _r

Παράδειγμα

C_{Cat} : ; (4,50 mmol L⁻¹ από βιβλιογραφία)

C_{Car} : 7,25 mmol L⁻¹ (τιμή - στόχος)

C_{Cad} : 9 mmol L⁻¹ (μέτρηση)

C_{Cam} : -

C_{Cau} : 2,70 mmol L⁻¹ (από βιβλιογραφία)

a : 0,35 (35%)

$$C_{it} = C_{iu} + a(C_{id} - C_{iu})$$

$$C_{Cat} = 2,70 + 0,35(9 - 2,70) = 4,90 \text{ mmol L}^{-1}$$

$$C_{ir} = (C_{it} + C_{id}) / 2 \Rightarrow C_{car} = (4,9 + 9) / 2 = 6,95 \text{ mmol L}^{-1}$$

Αριθμητικό παράδειγμα απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων. Ι. Κάλιο

Ημερήσια κατανάλωση νερού: 3 L

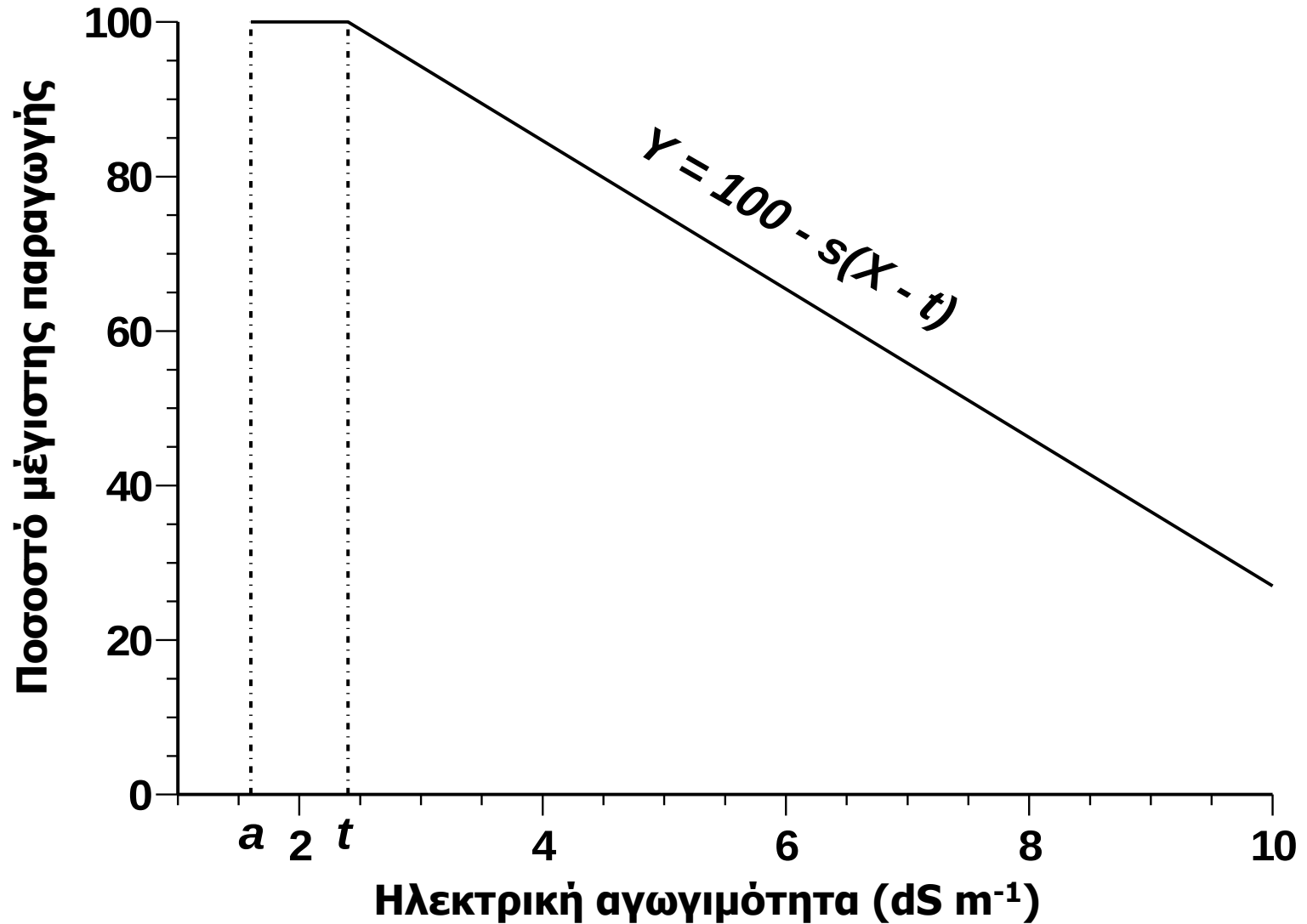
Ημερήσια πρόσληψη K: $3 \times 200 = 600$ mg

200 mg/L	200 mg/L	200 mg/L
-------------	-------------	-------------

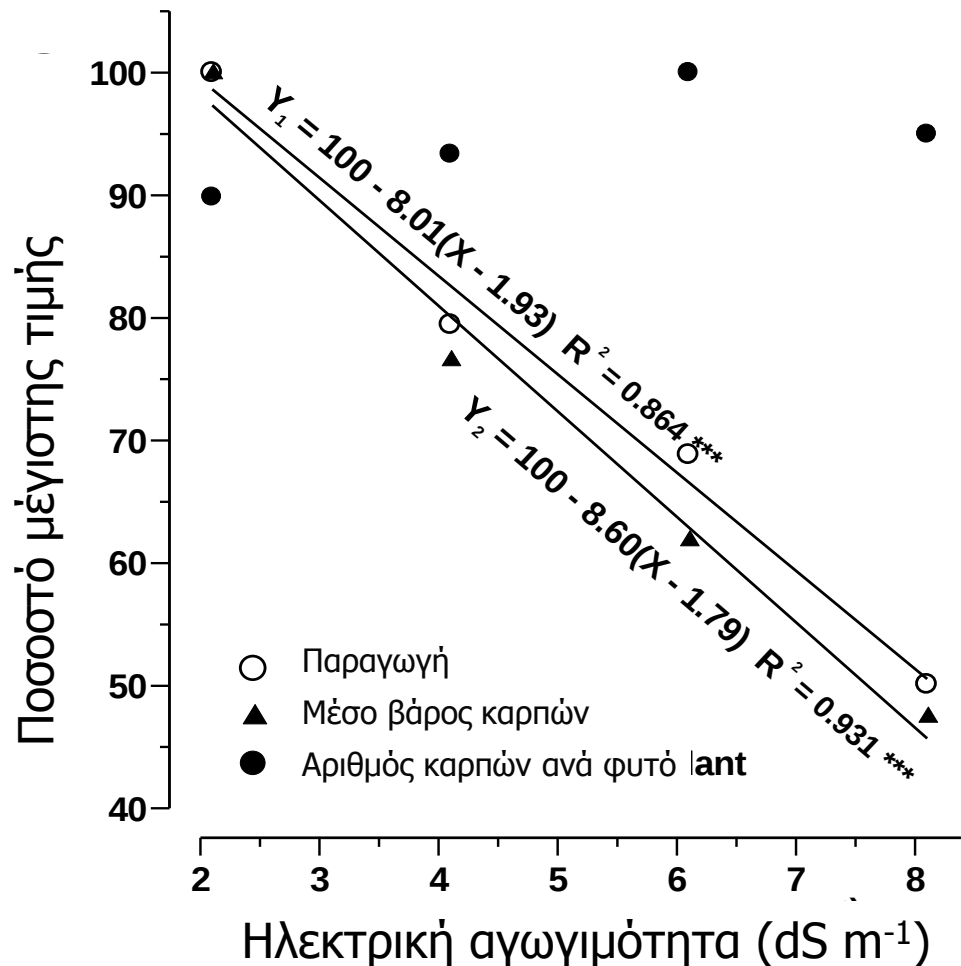


**Συνολική ιοντική
συγκέντρωση
(αλατότητα
θρεπτικού διαλύματος)**

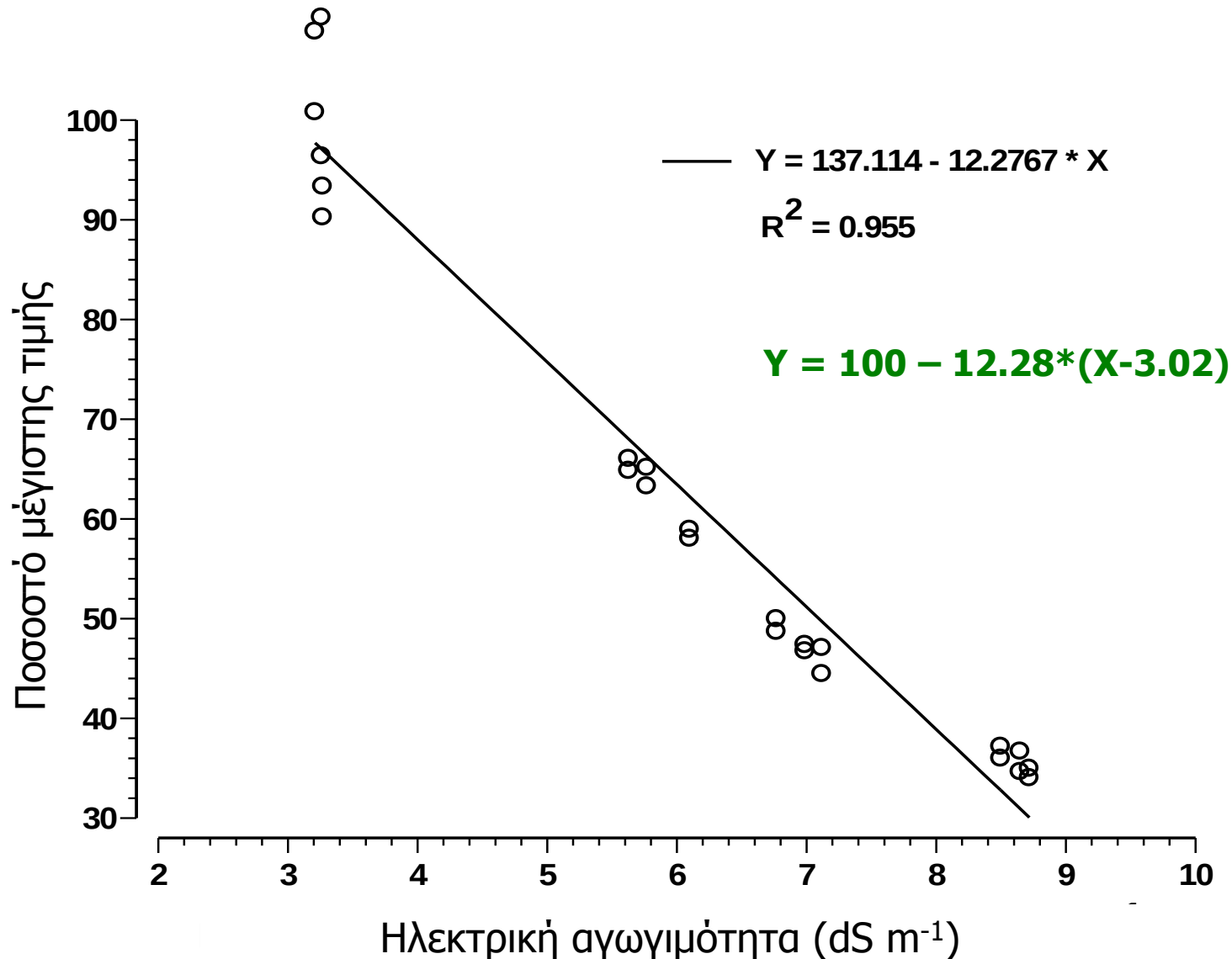
Σχέση μεταξύ ύψους παραγωγής και συνολικής συγκέντρωσης ιόντων (αλάτων) στο περιβάλλον των ριζών



Σχέση μεταξύ ύψους παραγωγής και συνολικής συγκέντρωσης ιόντων (αλάτων) σε υδροπονική καλλιέργεια μελιτζάνας



Σχέση μεταξύ παραγωγής και συνολικής συγκέντρωσης αλάτων στο ριζόστρωμα σε καλλιέργεια αγγουριού



Σύγκριση επίδρασης ίσων επιπέδων αλατότητας με διαφορετικά άλατα (NaCl ή CaCl₂) στην παραγωγή νωπής και ξηρής φυτικής μάζας αγγουριού

Μεταχείριση	Νωπό βάρος βλαστού (g ανά φυτό)	Νωπό βάρος φύλλων (g ανά φυτό)	Νωπό βάρος ρίζας (g ανά φυτό)
Μάρτυρας	421.7 a	158.6 ab	4.15 b
Χαμηλή αλατότητα NaCl	417.3 a	170.4 a	5.68 b
Χαμηλή αλατότητα: CaCl ₂	436.0 a	173.8 a	5.63 b
Υψηλή αλατότητα: NaCl ₂	241.5 c	94.7 b	6.20 b
Υψηλή αλατότητα: CaCl ₂	356.1 b	112.7 ab	12.33 a

Πηγή: Trajkova, Papadantonakis & Savvas, 2006: HortScience 41: 437-441

Μέσες τιμές EC σε μία υδροπονική καλλιέργεια τομάτας σε πετροβάμβακα (Sonneveld 1981, Acta Hort. 126)

EC θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας (dS m ⁻¹)	EC στο περιβάλλον των ριζών (dS m ⁻¹)
1,4	1,6
1,8	2,2
2,1	3,1
2,6	4,0

Έλεγχος EC στο περιβάλλον της ρίζας

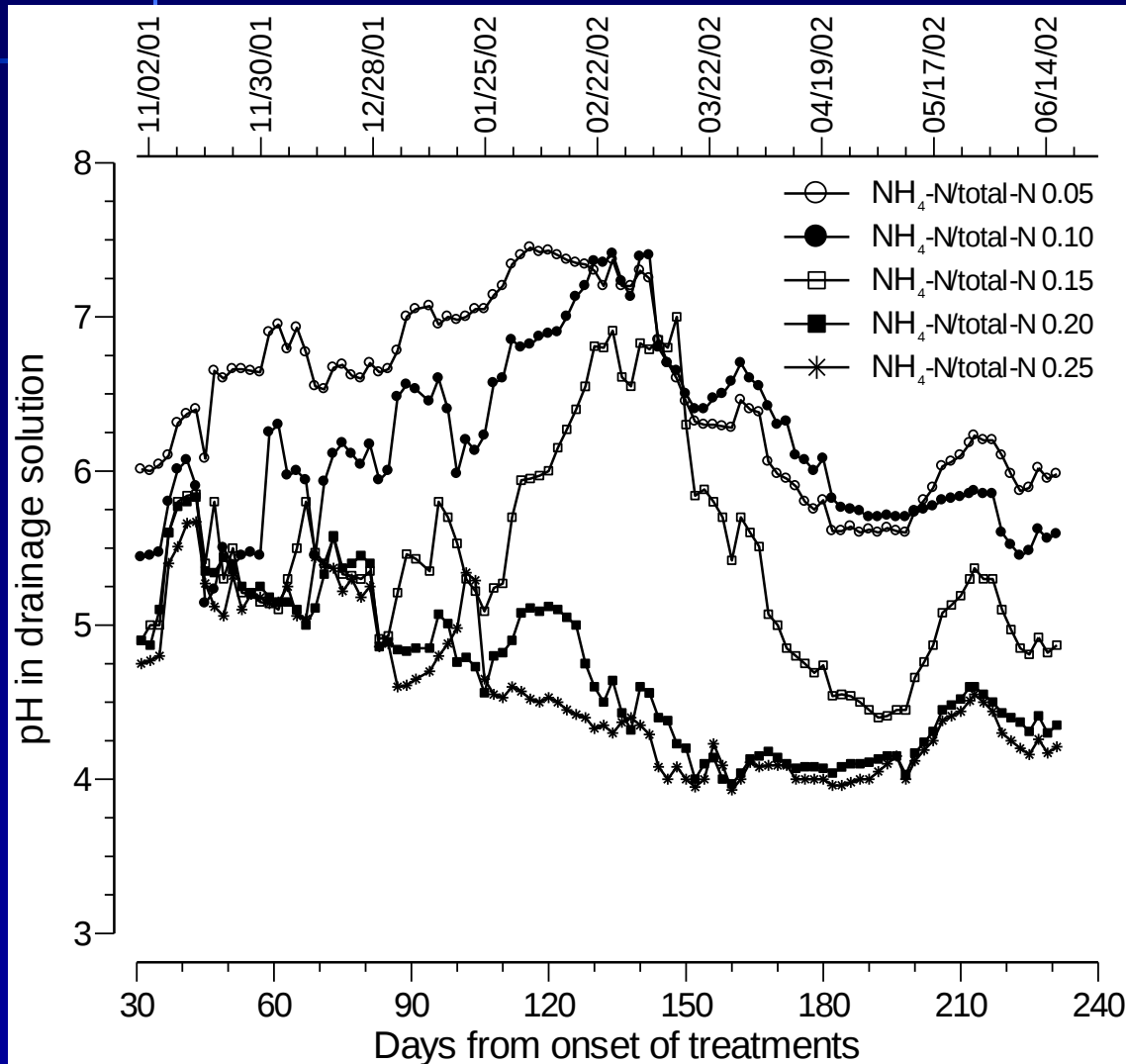
- **Νερό καλής ποιότητας (όχι NaCl)**
- **Κατάλληλες αναλογίες K:Ca:Mg στο Θ.Δ.**
- **Χαμηλή συγκέντρωση SO_4^{2-} στο Θ.Δ.**
- **Αύξηση συχνότητας ποτισμάτων**
- **Συσχέτιση άρδευσης με ηλιακή ενέργεια**
- **Έκπλυση υποστρώματος με Θ.Δ. χαμηλής EC (όχι με νερό, εκτός αν είναι βρόχινο).**

Ρύθμιση pH θρεπτικού διαλύματος

Μέτρα ρύθμισης του pH στο περιβάλλον των ριζών

- **Επιθυμητές τιμές pH στον χώρο των ριζών: 5,5-6,5**
- **Οριακές τιμές pH στον χώρο των ριζών: 5-5,5 & 6,5-7.**
- **Τρόποι διατήρησης pH στα παραπάνω επίπεδα στον χώρο των ριζών:**
 - **Χορήγηση θρεπτικού διαλύματος με pH μεταξύ 5,5 και 5,7**
 - **Χορήγηση μέρους του αζώτου σε αμμωνιακή μορφή ($N_r = 0,06-0,15$)**

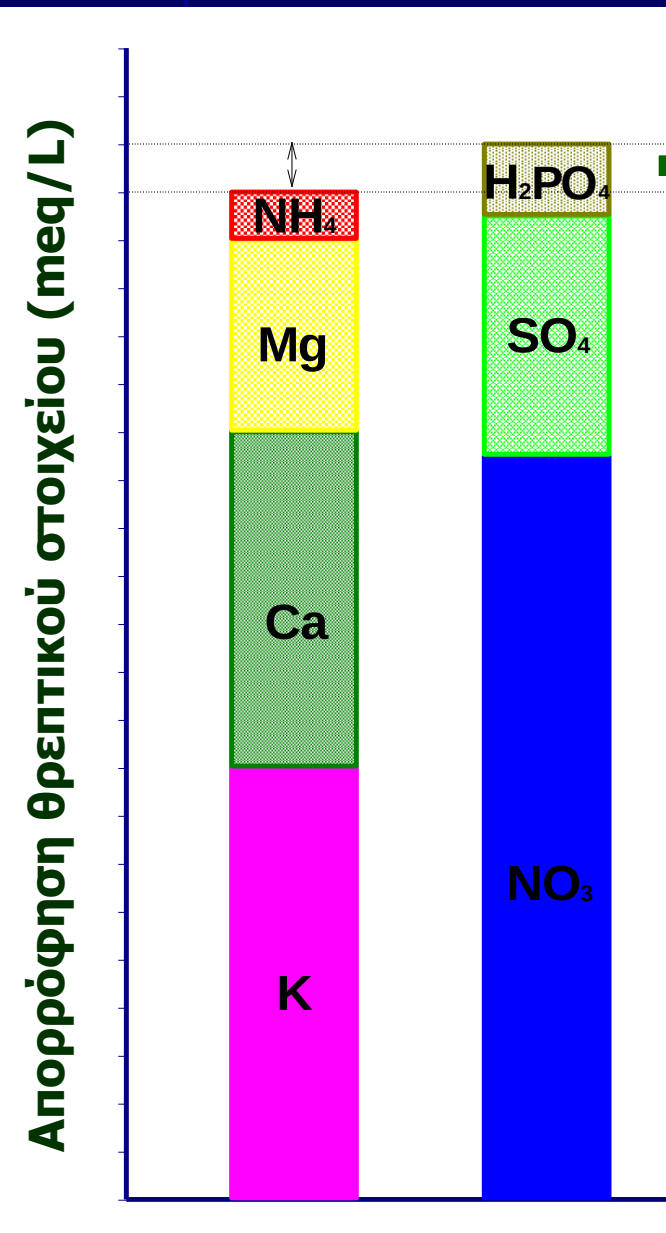
Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4\text{-N}$ /ολικό-N στο παρεχόμενο θρεπτικό διάλυμα επί του pH στο περιβάλλον των ριζών σε μία υδροπονική καλλιέργεια τομάτας



(Akl et al. 2003, Europ. J. Hort. Sci.)



Αύξηση του pH λόγω ανισορροπίας στο ισοζύγιο απορρόφησης κατιόντων και ανιόντων



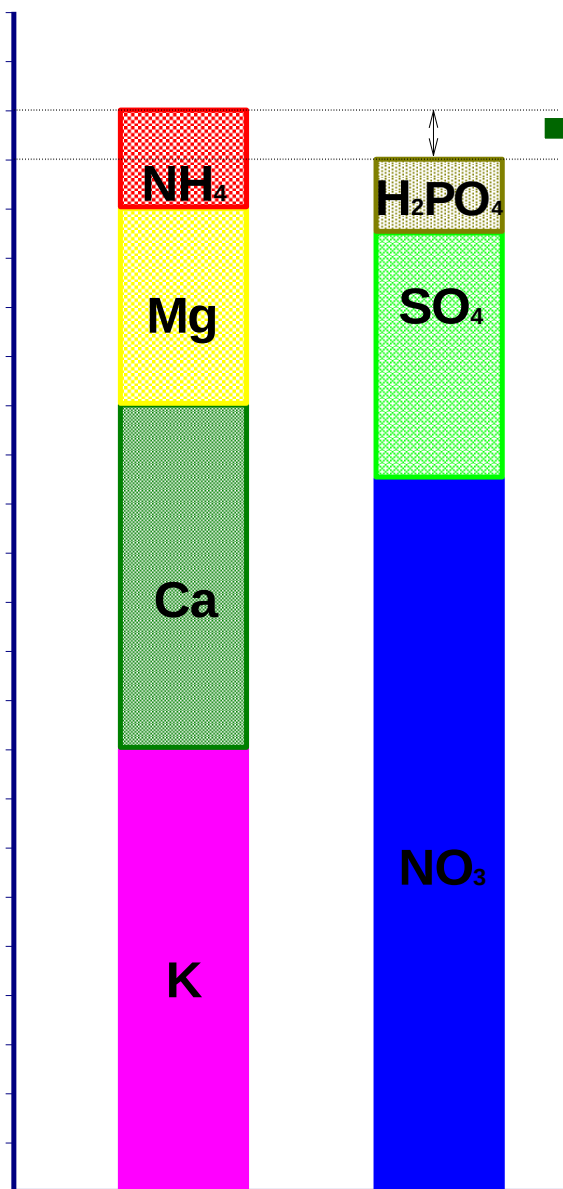
Η απορρόφηση του ανιόντος ξεπερνά την αντίστοιχη του κατιόντος

Η διαφορά ηλεκτρικού φορτίου στο κυτόπλασμα εξισορροπείται ηλεκτροχημικά μέσω απέκκρισης HCO_3^- και/ή OH^-

Το pH ανυψώνεται στο εξωτερικό διάλυμα

Μείωση του pH λόγω ανισορροπίας στο ισοζύγιο απορρόφησης κατιόντων και ανιόντων

Απορρόφηση θρεπτικού στοιχείου (meq/L)



Η απορρόφηση του κατιόντος ξεπερνά την αντίστοιχη του ανιόντος



Η διαφορά ηλεκτρικού φορτίου στο κυτόπλασμα εξισορροπείται ηλεκτροχημικά μέσω απέκκρισης H⁺



Το pH ελατώνεται στο εξωτερικό διάλυμα

Μεταβολή του pH στο περιβάλλον των ριζών: Επίδραση νιτροποίησης

Νιτροποίηση αμμωνιακού N

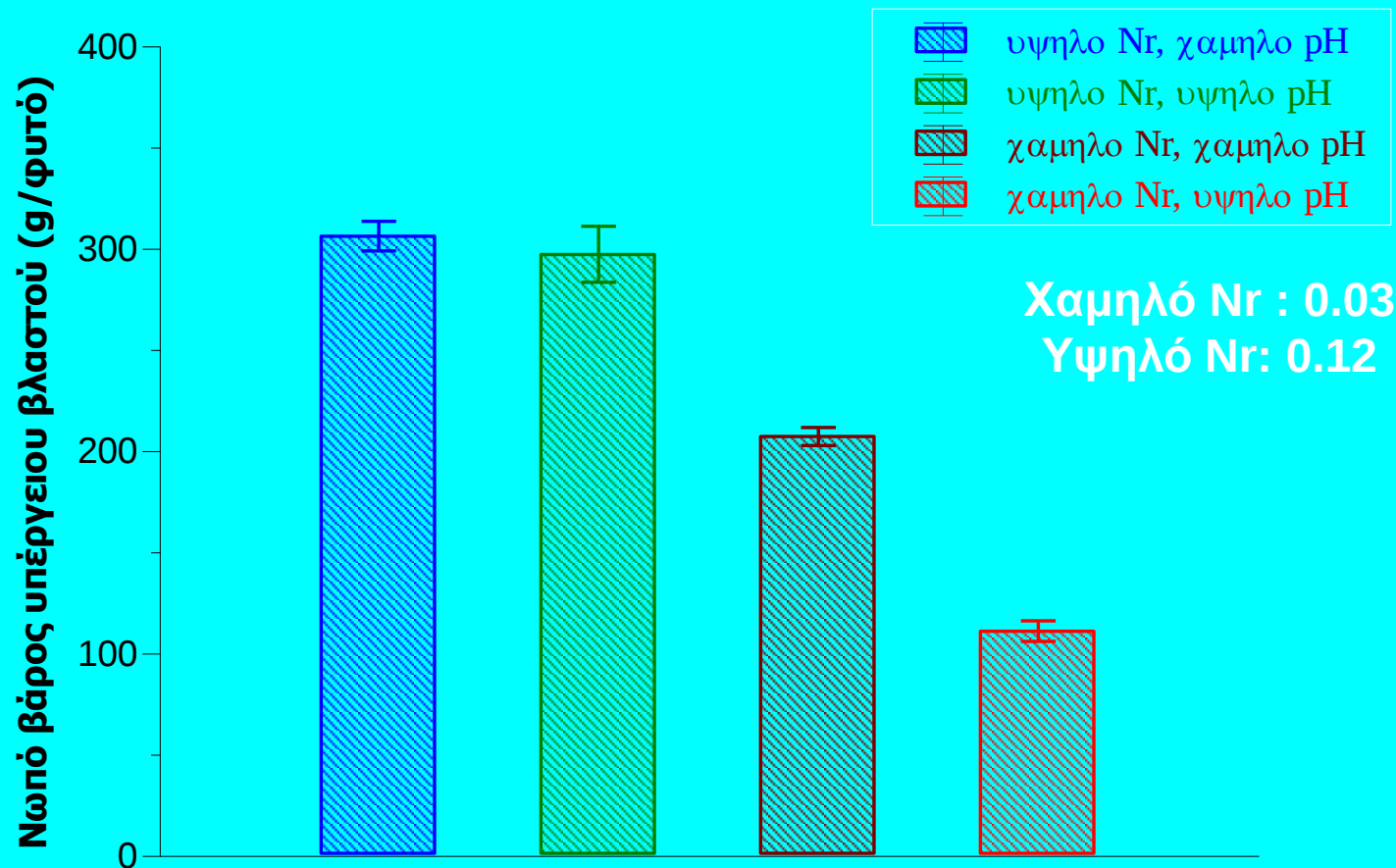
Nitrosomonas sp.:



Nitrobacter sp.:

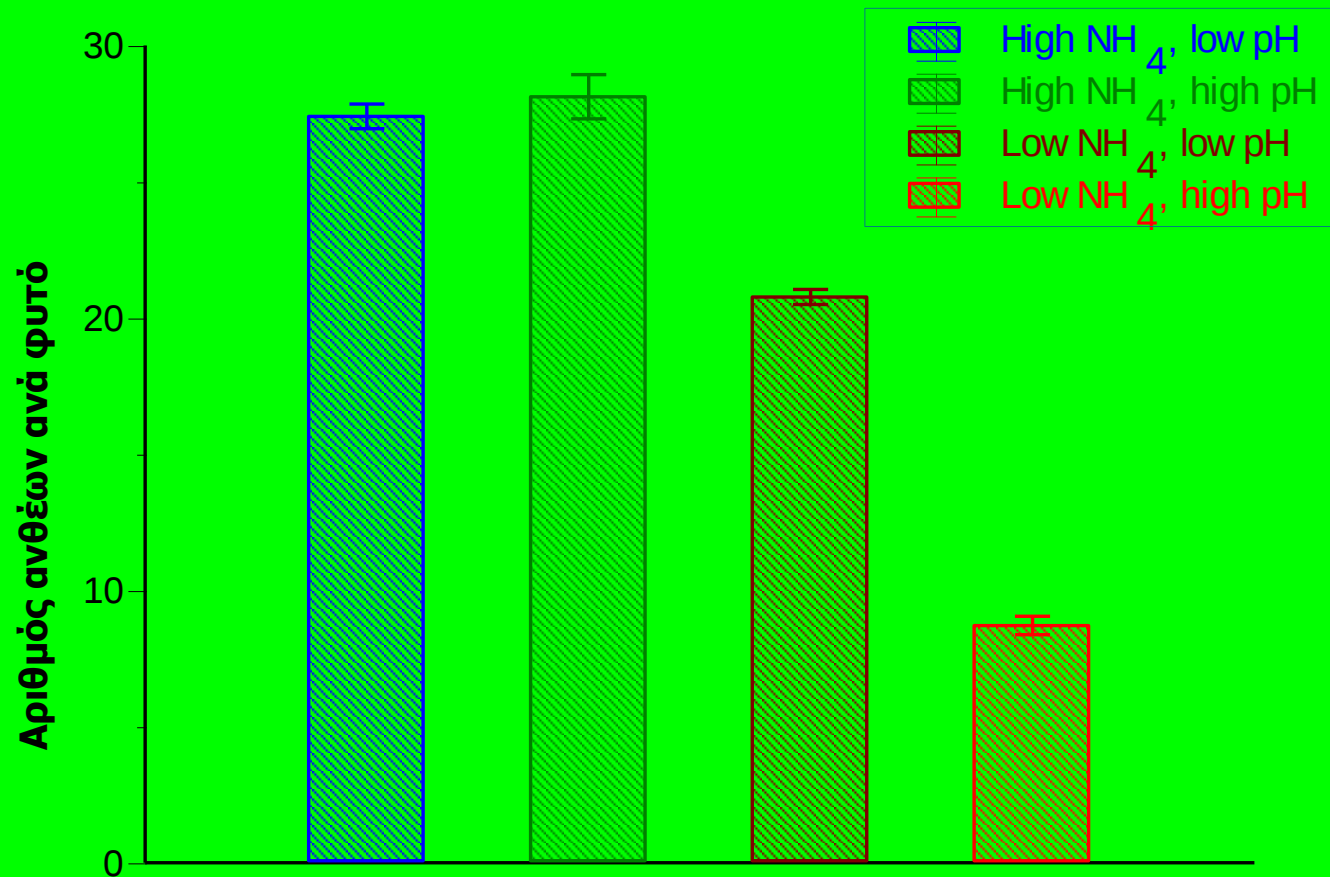


Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ (N_r) στο νωπό βάρος ζέρμπερας σε υδροπονική καλλιέργεια



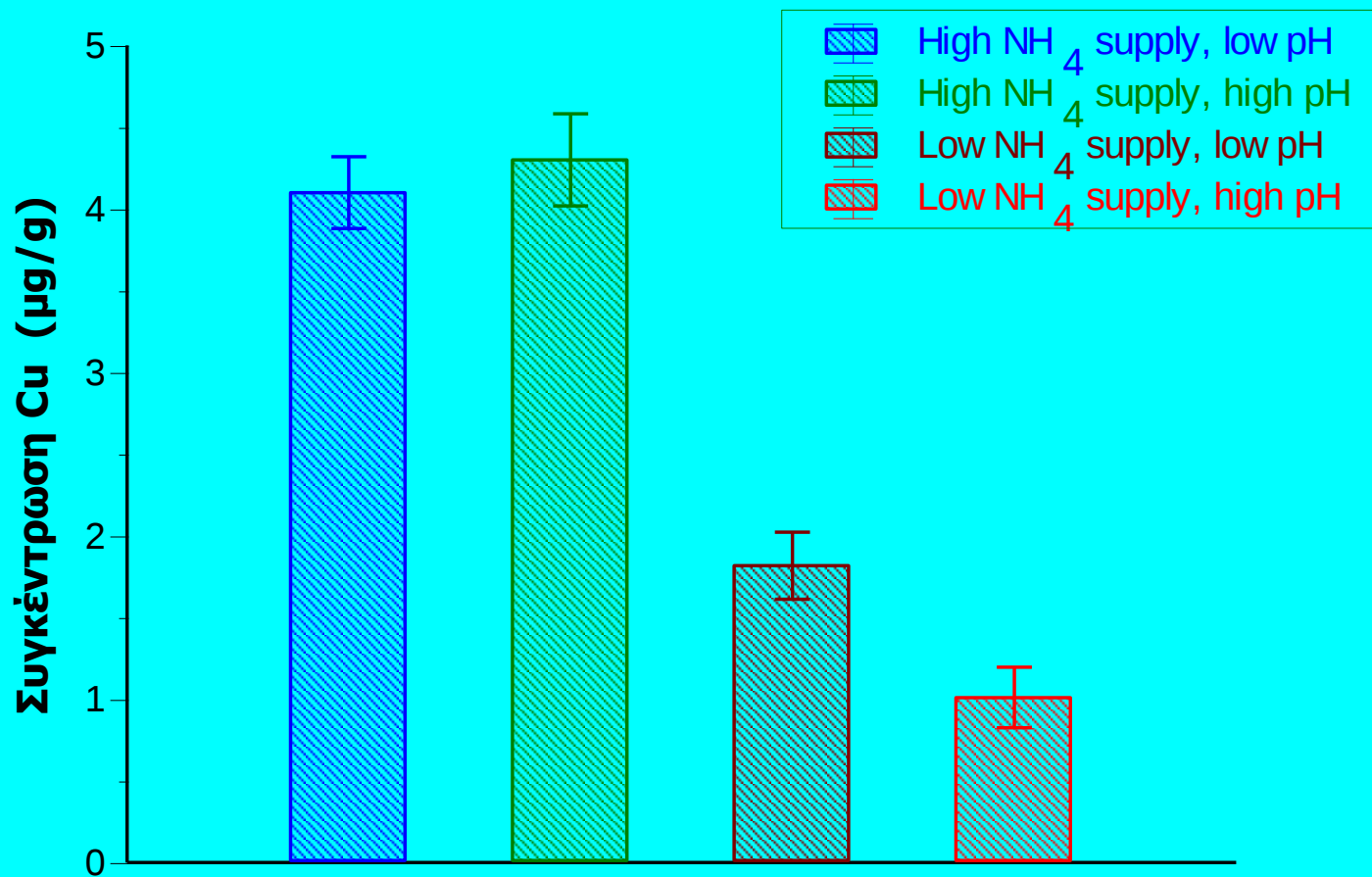
(Savvas et al. 2002, Plant & Soil, 254: 393-402).

Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ (N_r) στον αριθμό των ανθέων ζέρμπερας ανά φυτό σε υδροπονική καλλιέργεια



(Savvas et al., 2002, Plant & Soil, 254: 393-402).

Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ (N_r) στην περιεκτικότητα των φύλλων σε χαλκό σε υδροπονική καλλιέργεια



(Savvas et al., 2002, Plant & Soil, 254: 393-402).

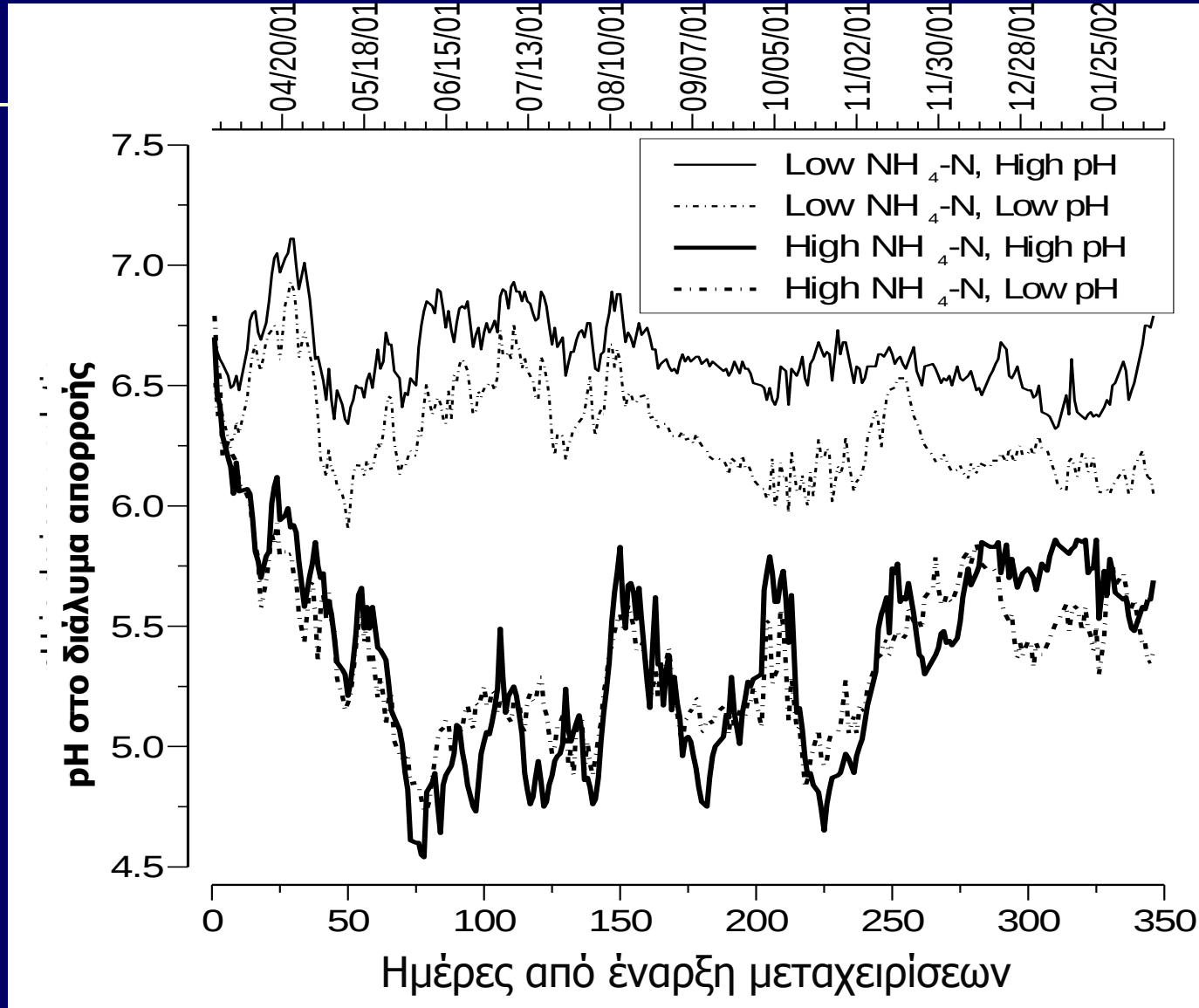
Μπροστά: Φυτά με τροφοπενία Cu (NH_4 : 2% του N)

Πίσω: Υγιή φυτά (NH_4 : 13% του N)



Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ (N_r) στο pH του θρεπτικού διαλύματος απορροής

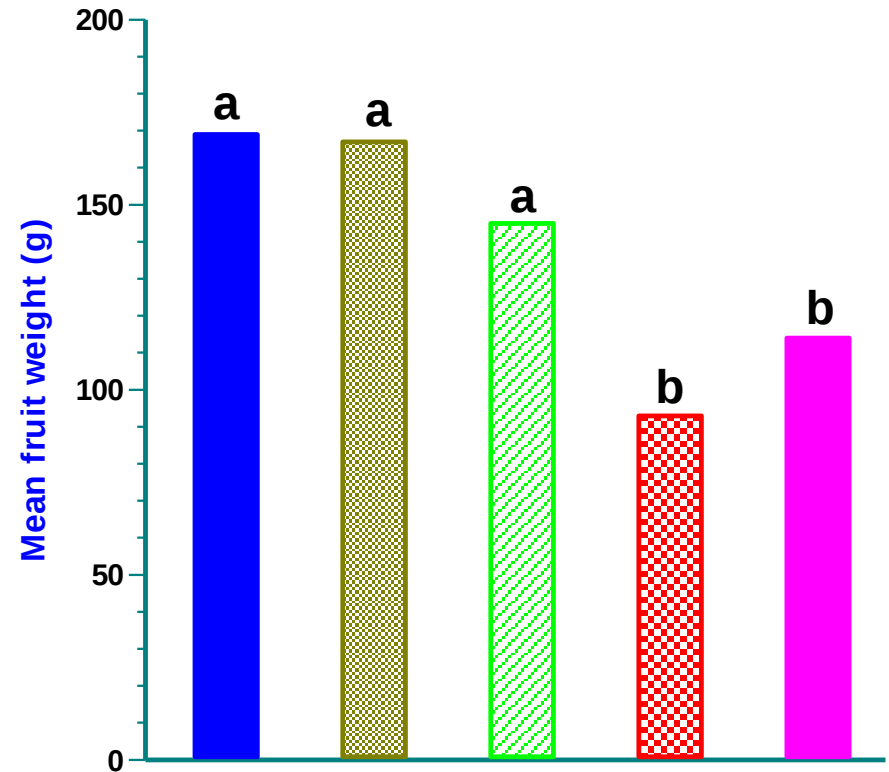
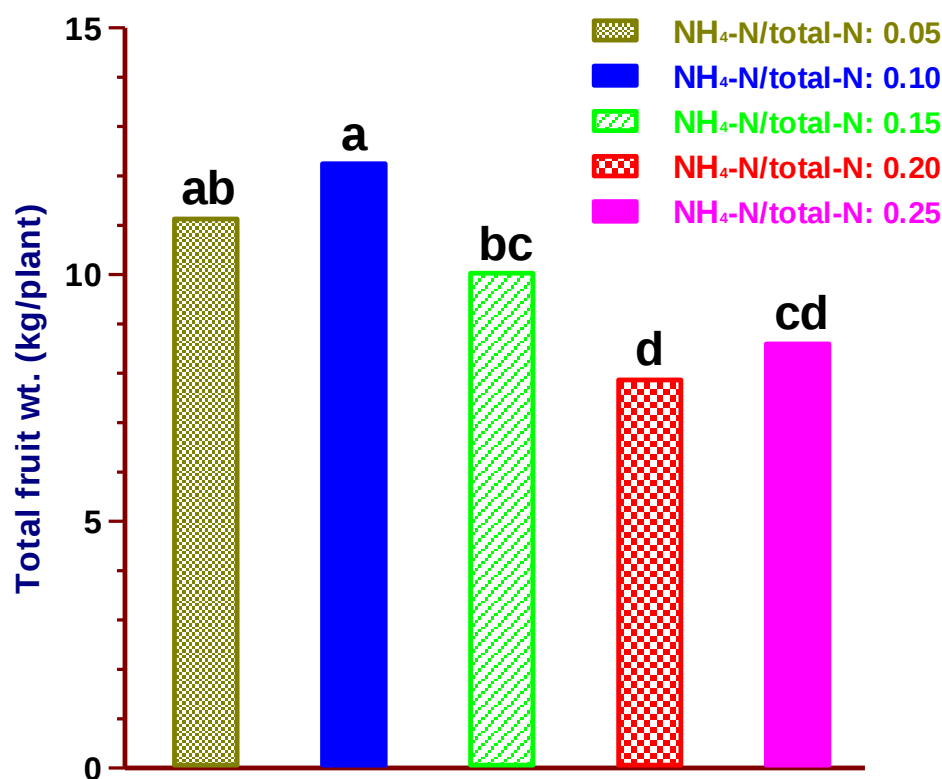
(Savvas et al., 2002, Plant & Soil, 254: 393-402)



Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ (N_r) στην εμφάνιση χλωρώσεων σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριού και τομάτας

Αγγούρι			Τομάτα		
N_r	Δείκτης χλώρωσης	Παραγωγή (Kg/m ²)	N_r	Δείκτης χλώρωσης	Παραγωγή (Kg/m ²)
0	1,7	13,1	0	2,3	17,7
0,08	0,6	14,2	0,06	1,4	17,3
0,15	0,4	16,5	0,12	1,1	18,5

Επίδραση αναλογίας $\text{NH}_4/(\text{NH}_4+\text{NO}_3)$ στο παρεχόμενο θρεπτικό διάλυμα στην παραγωγή υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας



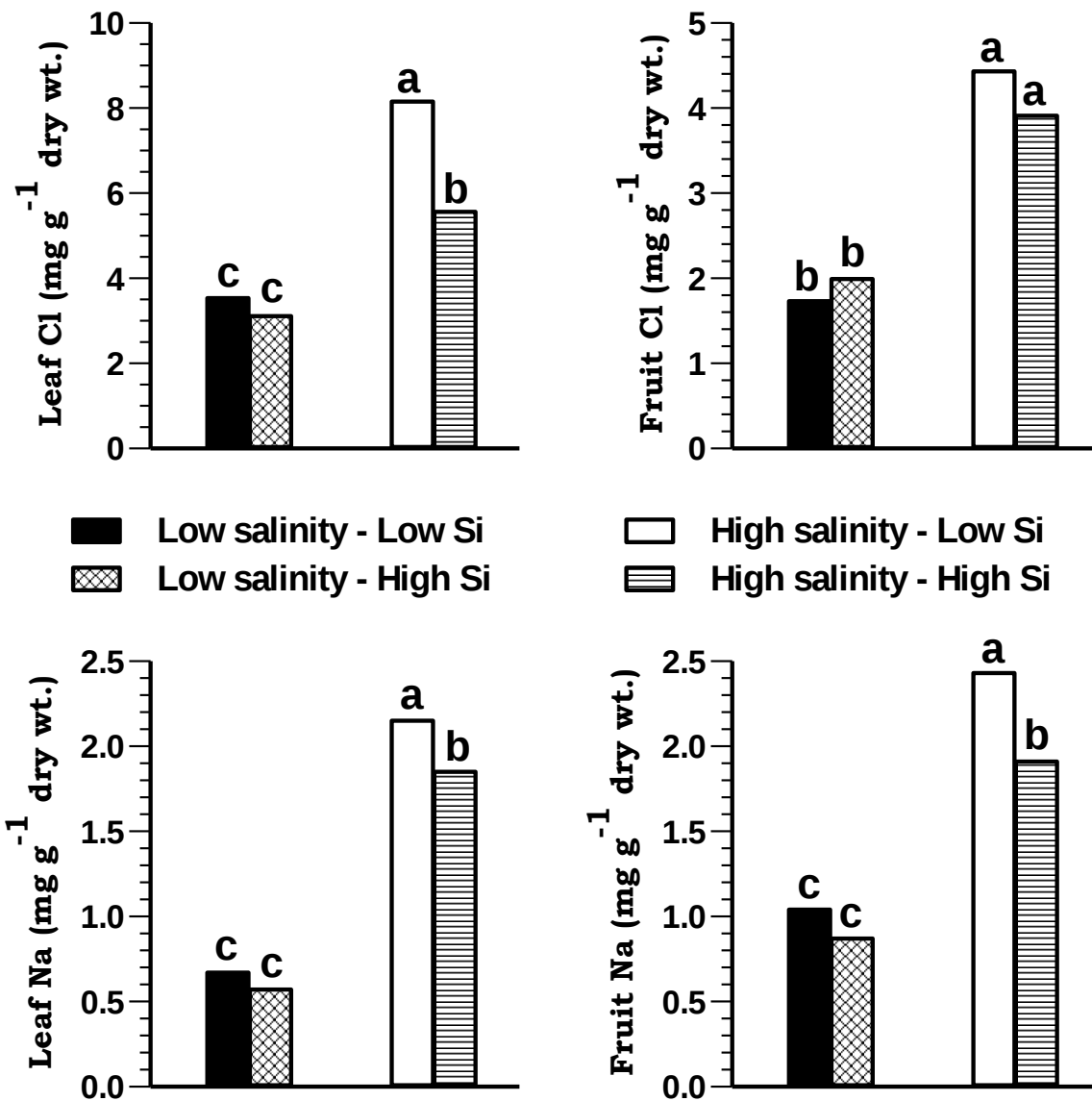
(Akl et al. 2003, Europ. J. Hort. Sci.)

Soilless culture and silicon

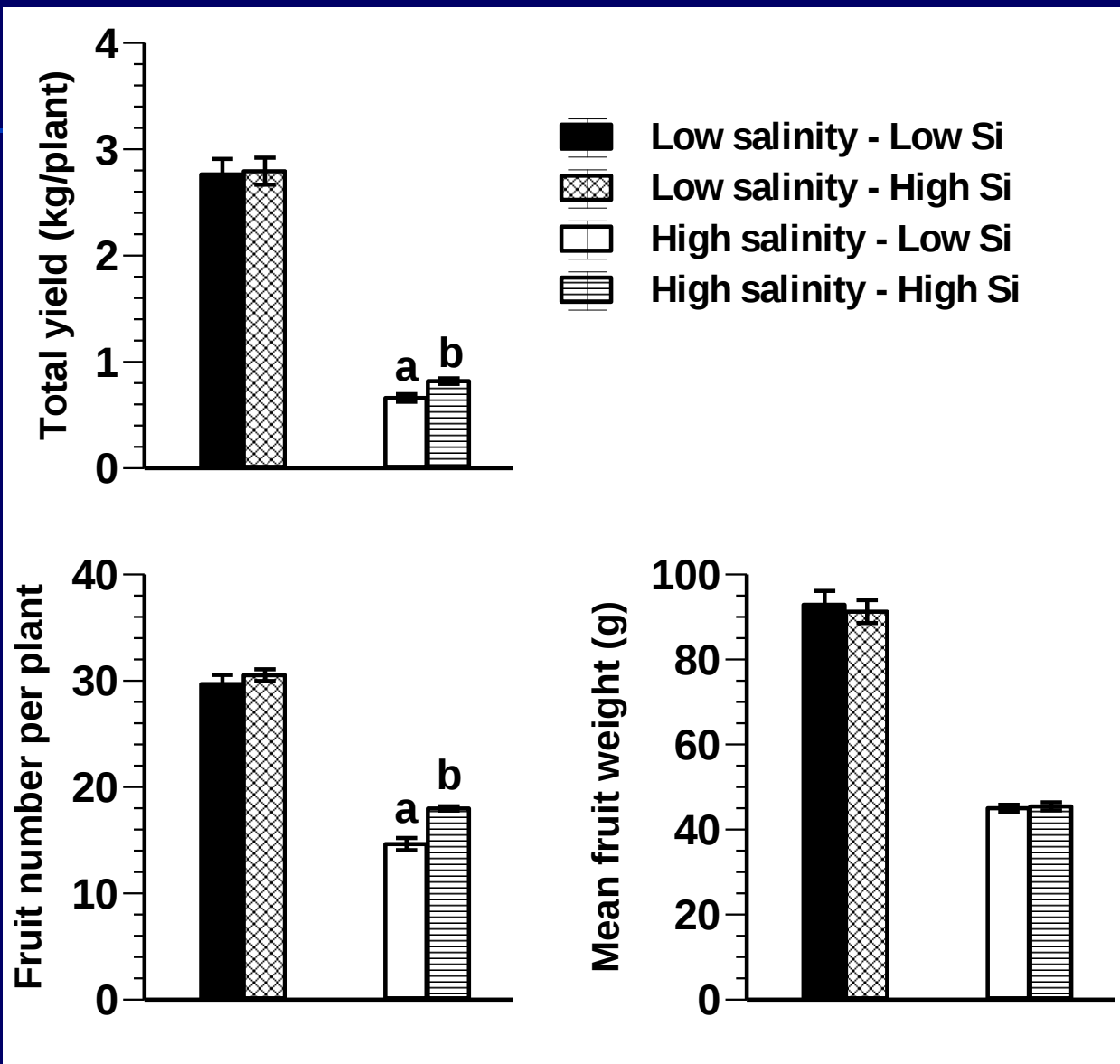
- Previous research has indicated that silicon (Si) may be beneficial to various cultivated plants, especially in hydroponics.
- ✿ Possible beneficial effects of Si on plants include:
 - ✿ Reinforcement of the cell walls due to deposition of Si in form of $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$,
 - ✿ Protection of antioxidative enzymes
 - ✿ Enhancement of photosynthesis
 - ✿ Mitigation of salinity stress

Impact of Si inclusion in the nutrient solution (2.25 mM) on the concentrations of Na and Cl in leaves of tomato plants exposed to low (0.45 mM NaCl) or high (22.50 mM NaCl) salinity.

Based on data of
Stamatakis et al.,
2003



Influence of Si and NaCl-salinity on fruit yield of zucchini squash grown in soilless culture (Savvas et al. 2008, Environ. Exp. Bot.)



Πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων

**Μέσες αναλογίες απορρόφησης θρεπτικού στοιχείου
προς νερό (mg l^{-1}) για μακροστοιχεία σε καλλιέργειες σε
πετροβάμβακα (Voogt & Sonneveld, 1997)**

Nutrient	Tomato	Sweet pepper	Rose
N	134	144	74
P	34	25	12
S	38	22	13
K	238	180	78
Ca	88	88	36
Mg	22	19	7

Επίδραση έντασης φωτισμού και ηλικίας φυτού σε :

(a) πρόσληψη νερού & θρεπτικών στοιχείων (ml or mg per plant per day),

(b) μέσες συγκεντρώσεις απορρόφησης (mg l⁻¹),

σε καλλιέργεια τομάτας σε NFT από Φεβρουάριο έως Απρίλη (Adams, 1993).

Ταξιανθία σε άνθηση	Ηλιακή ακτινοβολία (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Νερό	N	P	K	K/N
(a)						
1	1.5	240	49	8	57	1.16
4	4.3	468	89	24	144	1.62
7	5.9	727	130	30	317	2.44
(b)						
1	1.5		204	33	238	1.16
4	4.3		190	51	308	1.62
7	5.9		179	41	436	2.44

Συντελεστές συσχέτισης μεταξύ:

α) νερού και απορρόφησης θρεπτικών στοιχείων από φυτά και

β) συνθήκες περιβάλλοντος,

σε καλλιέργεια τομάτας τον Φεβρουάριο στην Αγγλία (Adams, 1993).

	Νερό	N	K	P
Ηλιακή ακτινοβολία	0.91	0.91	0.90	0.48
Θερμοκρασία αέρα	0.95	0.97	0.96	0.58
Θερμοκρασία ρίζας	0.88	0.81	0.85	0.89

Effects of different root temperatures for 10 weeks on leaf area and total uptake of water and nutrients by tomato (Adams, 1989)

Temperature (°C)	Leaf area (cm²)	Water (L)	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)
14	420	46	7.50	2.0	13.3	4.40	0.81
18	535	53	8.69	2.5	14.4	5.52	0.87
22	563	57	8.60	3.0	14.6	5.92	1.00
26	670	65	9.30	3.3	16.1	6.40	0.99

Effect of aeration on the growth of tomato plants after 66 days, and on the daily uptake of water and nutrients after 43 days (Xu and Adams, 1994)

	Aerated	With rice interplants	Un-aerated
Stem cross-section (mm²)	170	104	66
Area of lamina (cm²)	980	716	534
Dry weight of upper leaves	27.0	15.5	10.3
Total plant dry weight (g)	285	173	161
Water uptake (ml)	1128	727	640
P uptake (mg)	47	23	15
K uptake (mg)	358	185	179
Ca uptake (mg)	137	85	69

**Αναπροσαρμογή
σχήματος θρέψης για
ανοιχτό σύστημα μετά
από ανάλυση του
διαλύματος απορροής**

Υπολογισμοί αναπροσαρμογής Θ.Δ. για ανοιχτά συστήματα

Εξίσωση (1)

$$C_{it} = C_{iu} + a(C_{id} - C_{iu})$$



Εξίσωση (2)

$$C_{iu} = \frac{C_{it} - aC_{id}}{1 - a}$$

Αρχικά εφαρμόζω την (2) για να υπολογίσω την πραγματική C_{iu} αντικαθιστώντας ως εξής:
 C_{it} : η συγκέντρωση του i στοιχείου στο Θ.Δ. που παρεχόταν στην καλλιέργεια μέχρι την ημέρα της ανάλυσης (C_{its})
 C_{id} : η συγκέντρωση του i στοιχείου στο διάλυμα απορροής που μετρήθηκε στο εργαστήριο (C_{idm} , αποτέλεσμα ανάλυσης Δ.Α.)
 a : το μέσο κλάσμα απορροής που εφαρμοζόταν στην καλλιέργεια

Στη συνέχεια εφαρμόζω την (1) για να υπολογίσω τις νέες τιμές C_{it} (C_{itn}), δηλ. αυτές που θα εφαρμόσω εφεξής στην καλλιέργεια μέσω νέας συνταγής, αντικαθιστώντας ως εξής:
 C_{iu} : η συγκέντρωση απορρόφησης του i στοιχείου, όπως προέκυψε από το 1^ο βήμα των υπολογισμών (από την Εξίσωση 2)
 C_{id} : η πρότυπη συγκέντρωση του i στοιχείου στο διάλυμα απορροής (C_{ids}), η οποία λαμβάνεται από την βιβλιογραφία)
 a : το μέσο κλάσμα απορροής που θέλουμε να εφαρμόζουμε εφεξής στην καλλιέργεια

Ισχύει ο περιορισμός: $0,8C_{its} \leq C_{itn} \leq 1,2C_{its}$