

“Engage and Inspire the European Youth
in the Space Exploration through a
Scientific Contest”

Coordination and Support Action FP7- 284442



Φύλλο Εργασίας Έργου

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη;

Κατηγορία συναγωνισμού:

- i. Ηλιακό Σύστημα ☐
- ii. Διαστημόπλοια Διεθνής συνεργασία ☐
- iii. Εξέλιξη της ζωής ☒

Όνομα Ομάδας: Exoplants

Ονόματα μελών ομάδας: Ευστάθιος Μπιρίτης, Ελένη Χρυσικοπούλου,
Αντιγόνη Γεωργιοπούλου, Κακαλής Ιωάννης, Δήμητρα Κούφη.

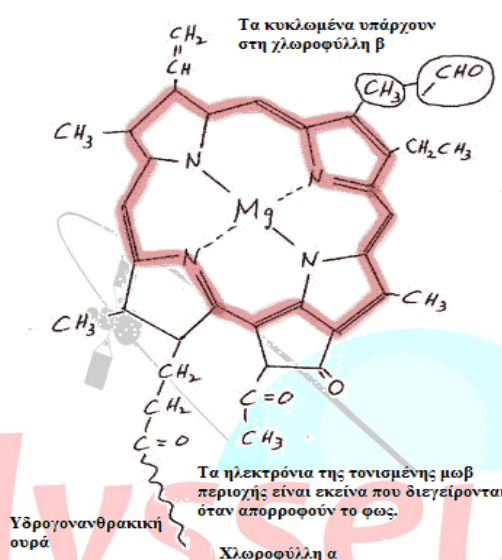
Όνομα δασκάλου/εκπαιδευτή: Χιωτέλης Ιωάννης

Περίληψη

Στο, όχι και μακρινό, μέλλον ο άνθρωπος θα επιδιώξει να δημιουργήσει αποικίες σε πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος ή άλλων αστρικών συστημάτων. Μόλις ο άνθρωπος εγκατασταθεί σε άλλο πλανήτη θα αναγκαστεί να εξασφαλίσει τα απαραίτητα προς διαβίωση: οξυγόνο, νερό και τροφή, άρα θα καλλιεργήσει φυτά. Τα φυτά ως παραγωγοί είναι οργανισμοί που φωτοσυνθέτουν, δηλαδή δεσμεύουν την φωτεινή ενέργεια και παράγουν γλυκόζη και υδατάνθρακες. Η χλωροφύλλη είναι το μακρομόριο – κλειδί της φωτοσύνθεσης. Τι θα συμβεί όμως σε έναν πλανήτη χωρίς αρκετό φως; Τι θα συμβεί σε έναν πλανήτη που περιστρέφεται γύρω από ένα άστρο που ακτινοβολεί στο ερυθρό ή στο μπλε; Γιατί τα φύλλα των φυτών, όπου γίνεται η φωτοσύνθεση, είναι πράσινα; Θα είναι πράσινα και σε οποιονδήποτε άλλο πλανήτη. Για να απαντήσουμε σε όλα αυτά τα ερωτήματα μελετήσαμε την χλωροφύλλη. Με το φασματοσκόπιο είδαμε ότι απορροφάει στο κόκκινο και στο μπλε, ενώ ανακλά στο πράσινο. Με ένα έξυπνο πείραμα – παιχνίδι δείξαμε γιατί ο ουρανός στη γη είναι μπλε και το συσχετίσαμε με τη συμπεριφορά της χλωροφύλλης. Μελετήσαμε τους ρυθμούς ανάπτυξης φυτών κάτω από ακτινοβολίες διαφόρων μηκών κύματος, όπως και σε συνθήκες περιορισμένου ή ελλιπούς φωτισμού. Τέλος μελετήσαμε τα χρώματα «εξωγήινων» φυτών στα βάθη των ωκεανών.

Εισαγωγή – Περιγραφή του προβλήματος (όριο 200 λέξεις)

Η δέσμευση της φωτεινής ενέργειας κατά τη φωτοσύνθεση γίνεται από τη χλωροφύλλη και τις άλλες φωτοσυνθετικές χρωστικές¹. Το μόριο της χλωροφύλλης, αποτελείται από μια υδρογονανθρακική «ουρά», η οποία συνδέεται με τον δακτύλιο της πορφυρίνης, που περιέχει στο κέντρο της ένα άτομο μαγνησίου (Εικόνα 1)^{2,3 4,5,6,7,8}.



Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση του μορίου της χλωροφύλλης. Φαίνεται ο δακτύλιος πορφυρίνης και η υδρογονανθρακική αλυσίδα.

¹ Campbell NA, Williamson B, Heyden RJ (2006). *Biology Exploring Life*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-250882-6. http://www.phschool.com/el_marketing.html.

² Jabr, Ferris *A New Form of Chlorophyll?*. Scientific American. August 19, 2010. Retrieved on 2012-04-15.

³ *Infrared chlorophyll could boost solar cells*. New Scientist. August 19, 2010. Retrieved on 2012-04-15.

⁴ Motilva, Maria-José (2008), "Chlorophylls – from functionality in food to health relevance" (Print), *5th Pigments in Food congress- for quality and health*, University of Helsinki, ISBN 978-952-10-4846-3

⁵ Woodward, R. B.; Ayer, W. A.; Beaton, J. M. (July 1960). "The total synthesis of chlorophyll". *Journal of the American Chemical Society* **82** (14): 3800–3802. doi:10.1021/ja01499a093. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01499a093>.

⁶ Fleming, Ian (14 October 1967). "Absolute Configuration and the Structure of Chlorophyll". *Nature* **216** (5111): 151–152. Bibcode 1967Natur.216..151F. doi:10.1038/216151a0. <http://www.nature.com/nature/journal/v216/n5111/abs/216151a0.html>.

⁷ Woodward, R. B.; Ayer, William A.; Beaton, John M. et al. (1990). "The total synthesis of chlorophyll a" (PDF). *Tetrahedron* **46** (22): 7599–7659. doi:10.1016/0040-4020(90)80003-Z. <http://media.iupac.org/publications/pac/1961/pdf/0203x0383.pdf>.

⁸ Chen, Min; Schliep, Martin; Willows, Robert D. et al. (September 2010). "A Red-Shifted Chlorophyll". *Science* **329** (5997): 1318–1319. Bibcode 2010Sci...329.1318C. doi:10.1126/science.1191127. PMID 20724585.

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ³

Η χλωροφύλλη δηλαδή έχει την ικανότητα να απορροφά φωτεινή ακτινοβολία και να διεγείρεται. Στη συνέχεια ιονίζεται δηλαδή χάνει ηλεκτρόνια, τα οποία δεσμεύονται από άλλα μόρια^{9,10}. Οι χλωροφύλλες απορροφούν κυρίως την μπλε και την ερυθρή ακτινοβολία και ανακλούν την πράσινη, δίνοντας στα φυτά το χαρακτηριστικό πράσινο χρώμα¹¹. Τα καροτενοειδή, χρωστικές επίσης των φυτών, απορροφούν κυρίως την μπλε ακτινοβολία¹². Η μεγάλη ποικιλία φωτοσυνθετικών χρωστικών βοηθά τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς να αξιοποιούν όσο γίνεται περισσότερες ακτινοβολίες του ορατού φωτός.

Το ερώτημα που τίθεται είναι γιατί η χλωροφύλλη απορροφά την μπλε και την κόκκινη ακτινοβολία και όχι την πράσινη; Γιατί τα φύλλα των φυτών δεν έχουν μαύρο χρώμα, που απορροφάει μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας; Μήπως η χλωροφύλλη προσαρμόστηκε στις γήινες ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπου επικρατεί το μπλε χρώμα και το ερυθρό χρώμα; Αν ναι, πως θα συμπεριφερθεί η χλωροφύλλη σε ένα άλλο πλανήτη χωρίς ατμόσφαιρα; Πως θα συμπεριφερθεί σε συνθήκες ελλιπούς φωτισμού ή γύρω από ένα αστέρι που εκπέμπει κυρίως στο μπλε ή στο ερυθρό;

Υπόθεση – Αρχικές Ιδέες (όριο 200 λέξεις)

Αντικείμενο μελέτης μας θα είναι το χρώμα των τμημάτων των φυτών που φωτοσυνθέτουν. Γνωρίζουμε ότι το πράσινο χρώμα των φυτών οφείλεται στις χρωστικές που απορροφούν το μπλε και το ερυθρό, οπότε ανακλούν το

⁹ Raven PH, Evert RF, Eichhorn SE (2005). *Biology of Plants*, (7th ed.). New York: W.H. Freeman and Company Publishers. pp. 124–127. [ISBN 0-7167-1007-2](#).

¹⁰ Pushkar Y, Yano J, Sauer K, Boussac A, Yachandra VK (February 2008). "[Structural changes in the Mn4Ca cluster and the mechanism of photosynthetic water splitting](#)". *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105** (6): 1879–84. [Bibcode 2008PNAS..105.1879P](#). [doi:10.1073/pnas.0707092105](#). [PMC 2542863](#). [PMID 18250316](#). [//www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2542863/](#).

¹¹ Larkum, edited by Anthony W. D. Larkum, Susan E. Douglas & John A. Raven (2003). *Photosynthesis in algae*. London: Kluwer. [ISBN 0-7923-6333-7](#).

¹² Armstrong GA, Hearst JE (1996). "[Carotenoids 2: Genetics and molecular biology of carotenoid pigment biosynthesis](#)". *FASEB J.* **10** (2): 228–37. [PMID 8641556](#). [http://www.fasebj.org/cgi/pmidlookup?view=long&pmid=8641556](#).

πράσινο. Όμως, γνωρίζουμε ότι οι χρωστικές αυτές ενεργοποιούνται λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών^{13,14}, όπως το χρώμα του ουρανού. Η περισσότερο σκεδαζόμενη ακτινοβολία είναι στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο μπλε χρώμα, ενώ το ξημέρωμα και το σούρουπο στο κόκκινο¹⁵. Η σκέδαση του φωτός οφείλεται στα συστατικά της ατμόσφαιρας και εικάζουμε ότι η χλωροφύλλη έχει «προσαρμοστεί» στα κυρίαρχα μήκη κύματος. Τι θα συμβεί όμως σε έναν πλανήτη χωρίς ατμόσφαιρα; Τα φυτά θα είναι λευκά ή μήπως μαύρα (Εικόνα 2);



Εικόνα 2: Μήπως τα φυτά θα είναι μαύρα σε έναν άλλο πλανήτη;

Αρχικά, θα προσομοιάσουμε το μηχανισμό σκέδασης για να αποδείξουμε ότι οφείλεται στα συστατικά της ατμόσφαιρας. Επίσης, θα επαληθεύσουμε ότι το σκεδαζόμενο φως είναι γραμμικά πολωμένο με τη βοήθεια πολωτών. Στη συνέχεια θα δείξουμε φασματοσκοπικά και χρωματογραφικά ότι η χλωροφύλλη απορροφάει κυρίως στο μπλε και στο κόκκινο, ενώ θα μελετήσουμε την ανάπτυξη φυτών κάτω από συνθήκες ελλιπούς φωτισμού και κάτω από συνθήκες σχεδόν μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Τέλος, θα αναζητήσουμε στη Γη φυτά που αναπτύσσονται σε ακραία περιβάλλοντα, όπως βάθη ωκεανών, ώστε να παρατηρήσουμε τον φαινότυπό τους.

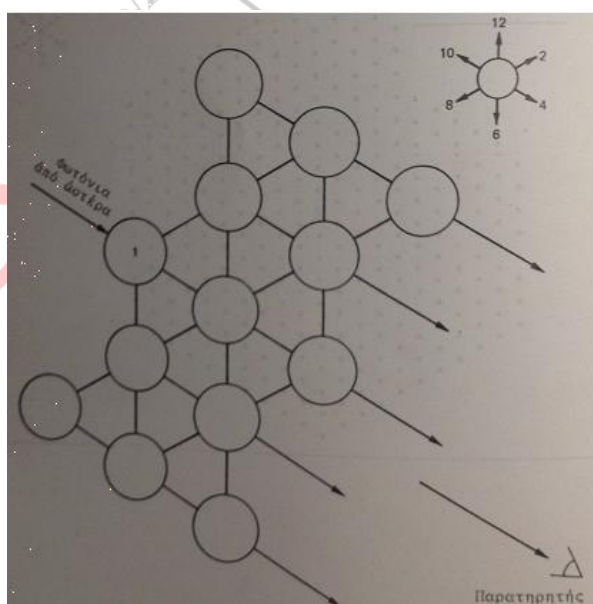
¹³ LEWIS TICKI, *Beginnings of life, second edition*, Wm. C. Brown Publisher.

¹⁴ POSTLETHWAIT J. & HOPSON J., *The Nature of Life, second edition*

¹⁵ HUGH D. YOUNG, *University Physics*, Carnegie-Mellon University, pg 963-964.

Μεθοδολογία του Έργου (όριο 450 λέξεις)

Για να μπορέσουμε να απαντήσουμε στο ερώτημα σχετικά με το χρώμα των φυτών σε έναν άλλο πλανήτη θα έπρεπε να βρούμε τις κύριες διαφορές. Ας υποθέσουμε ότι αποικούμε τον Άρη και αρχίζουμε τη καλλιέργεια φυτών μέσα σε ένα γυάλινο θόλο – θερμοκήπιο. Ας υποθέσουμε επίσης ότι έχουμε εξασφαλίσει νερό και τα αέρια της φωτοσύνθεσης. Μας λείπει μόνο η ηλιακή ενέργεια. Στον Άρη δεν υπάρχει ατμόσφαιρα, άρα δεν υπάρχουν μόρια αέρα που θα λειτουργήσουν ως σκεδαστές. Στο σημείο αυτό έπρεπε να κατανοήσουμε το ρόλο των σκεδαστών, γι' αυτό επινοήσαμε ένα «παιχνίδι με φωτόνια». Στην Εικόνα 3 παρατηρούμε μια προσομοίωση της ατμόσφαιρας. Ένα φωτόνιο κινείται με τη βοήθεια ενός κύβου (ζάρι) και σύμφωνα με τον οδηγό πάνω δεξιά στο σχήμα.



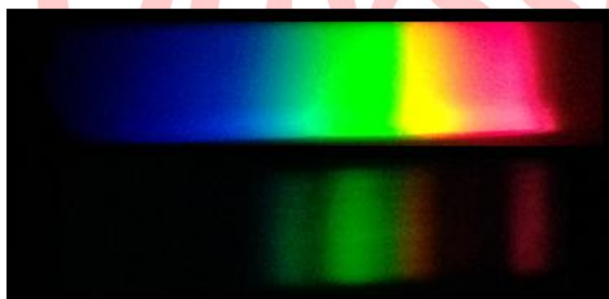
Εικόνα 3: Η σκέδαση των φωτονίων - παιχνίδι προσομοίωσης

Μετά από 300 μετακινήσεις φωτονίων βρήκαμε ότι μόλις το 10% ακολουθεί την αρχική πορεία, τα υπόλοιπα σκεδάζονται. Ουσιαστικά με την προσομοίωση αποδεικνύουμε ότι η ένταση της αρχικής δέσμης φωτός μειώνεται. Αυτό είναι σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρία σκέδασης^{15,16,17,18,19}, ενώ πλήρης ανάλυση

¹⁶ John Tyndall (December 1868). "On the Blue Colour of the Sky, the Polarization of Skylight, and on the Polarization of Light by Cloudy Matter Generally". *Proceedings of the Royal Society of London* **17**: pp. 223–233. doi:10.1098/rspl.1868.0033. JSTOR 112380.

της φυσικής διαδικασίας αποδεικνύει ότι η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την Τετάρτη δύναμη του μήκους κύματος. Για τα δύο άκρα του ορατού φωτός έχουμε $(700\text{nm}/400\text{nm})^4=9,4$ δηλαδή 9,4 φορές περισσότερο κυανό απ' ότι ερυθρό στον ουρανό. Για να ισχύουν τα παραπάνω θα πρέπει η ακτινοβολία να είναι γραμμικά πολωμένη. Αυτό το επαληθεύσαμε πειραματικά κοιτάζοντας κατακόρυφα προς τα πάνω με ένα πολωτή και βλέποντας σκοτάδι.

Στη συνέχεια απομονώσαμε χλωροφύλλη από σπανάκι. Εμβαπτίσαμε βρασμένο σπανάκι σε αιθανόλη και αναδεύσαμε με τη βοήθεια το μαγνητικού αναδευτήρα. Διηθήσαμε το πράσινο αιώρημα σε δοκιμαστικό σωλήνα και προσθέσαμε βενζίνη. Μετά από ανάδευση αναδύθηκε στην επιφάνεια η χλωροφύλλη. Λάβαμε το φάσμα απορρόφησης της χλωροφύλλης με τη βοήθεια του εργαστηριακού φασματοσκοπίου και μετά παρατηρήσαμε την ολική απορρόφηση δέσμης λέιζερ από αυτήν. Επίσης, παρατηρήσαμε τον φθορισμό στο κόκκινο μετά από έκθεση σε λευκό τεχνητό φώς²⁰.



ΣΥΝΕΧΕΣ ΦΑΣΜΑ

**ΦΑΣΜΑ
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ
ΧΛΩΡΟΦΥΛΛΗΣ**

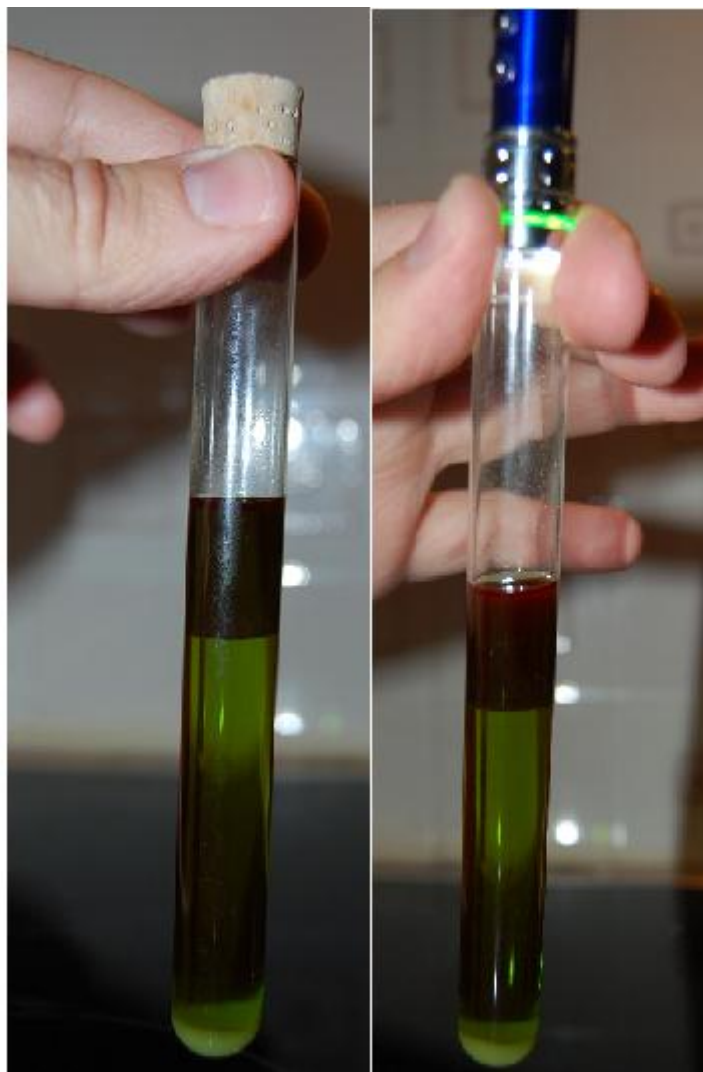
Εικόνα 4: Συνεχές φάσμα και φάσμα απορρόφησης χλωροφύλλης. Παρατηρούμε ισχυρή απορρόφηση στο κυανό και στο κόκκινο.

¹⁷ Lord Rayleigh (June 1871). "On the scattering of light by small particles". *Philosophical Magazine* **41**, **275**: pp. 447–451.

¹⁸ J.G. Watson (June 2002). "[Visibility: Science and Regulation](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=cache:auiPiqN6uTUJ:www.awma.org/journals/pdfs/2002/6/Crit_Review.pdf)". *J. Air & Waste Manage. Assoc* **52**: pp. 628–713. http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=cache:auiPiqN6uTUJ:www.awma.org/journals/pdfs/2002/6/Crit_Review.pdf. Retrieved 2007-04-19.

¹⁹ Gibbs, Philip (May 1997). "[Why is the sky Blue?](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/BlueSky/blue_sky.html)". *Usenet Physics FAQ*. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/BlueSky/blue_sky.html. Retrieved 11 December 2012.

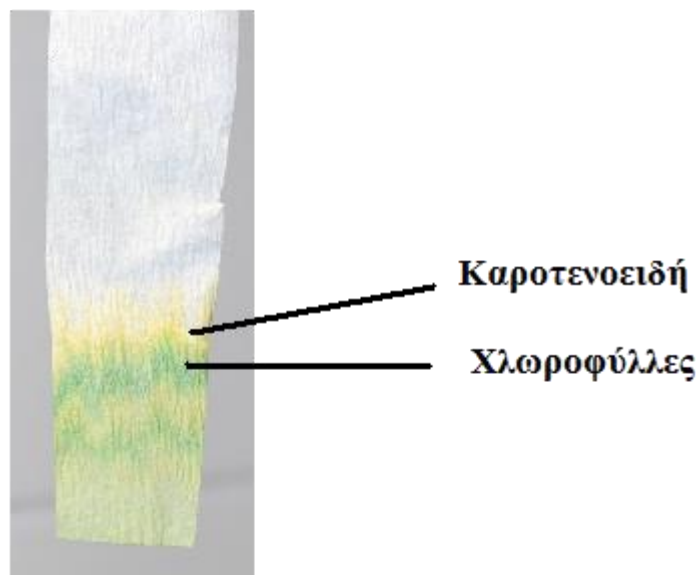
²⁰ ΜΗΤΡΑΚΟΣ Α.Κ., ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΥ Κ.Α., *Εργαστηριακές μέθοδοι και ασκήσεις Βοτανικής*, τεύχος β', 1970.



Εικόνα 5: Φθορισμός στο ερυθρό της χλωροφύλλης, μετά από έκθεση σε λευκό τεχνητό φώς.

Στη συνέχεια πολτοποιήσαμε φύλλα σπανακιού σε ακετόνη και προχωρήσαμε σε χρωματογραφία χάρτου για να παρατηρήσουμε τις διάφορες χρωστικές (ανθοκυάνες, χλωροφύλλες) οι οποίες διέρχονται μέσα από το πορώδες υλικό του διηθητικού χαρτιού²¹.

²¹ ΤΣΕΚΟΣ Ι., ΚΟΥΚΟΛΗ Ε., *Εργαστηριακές ασκήσεις Βοτανικής, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη 1993.*



Εικόνα 6: Χρωματογραφία χλωροφύλλης. Διακρίνονται δύο περιοχές διαφορετικού χρώματος, πράσινου και κίτρινου που αντιστοιχούν στις χλωροφύλλες και στα καροτενοειδή.

Ο στόχος των παραπάνω πειραμάτων ήταν να καταδείξουμε την άμεση συσχέτιση των χρωστικών με τα χρώματα της ατμόσφαιρας. Τι γίνεται όμως σε έναν πλανήτη χωρίς ατμόσφαιρα; Η χλωροφύλλη θα προσαρμοστεί στα νέα δεδομένα; Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της χλωροφύλλης φυτεύουμε φακές σε ποτισμένο βαμβάκι και τις αφήνουμε να φυτρώσουν σε ελεγχόμενες συνθήκες. Έχουμε φακές που καλλιεργούνται σε ελλιπή φωτισμό (απόλυτο σκοτάδι), φακές που αναπτύσσονται σε συνθήκες γυάλινου θερμοκηπίου και φακές κάτω από φίλτρα χρώματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε).



Εικόνα 7: Καλλιέργεια σε ειδικές συνθήκες φωτισμού και σε γυάλινο θερμοκήπιο.

Επιλέξαμε τις φακές λόγω του εύκολου και ταχύ ρυθμού ανάπτυξής τους. Με τα φίλτρα χρώματος θα μελετήσουμε την επίδραση συγκεκριμένων μηκών κύματος στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, ενώ προσομοιάζουν συνθήκες άστρων που εκπέμπουν σε ερυθρό ή μπλε.

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹⁰

Διενέργεια της Έρευνας (όριο 450 λέξεις)

Για να μπορέσουμε να απαντήσουμε στο ερώτημα της εργασίας μας, έπρεπε να μελετήσουμε τη χημική ένωση που προσδίδει το πράσινο χρώμα στα φυτά. Αρχικά επιλέξαμε την τεχνική της χρωματογραφίας, ώστε να αποκαλύψουμε τις περιεχόμενες χρωστικές στα φύλλα των φυτών. Πολτοποιήσαμε πράσινα φύλλα από σπανάκι σε ακετόνη.



Εικόνα 8: Πολτοποιημένα φύλλα από σπανάκι σε ακετόνη

Μαρκάρουμε διηθητικό χαρτί με δείγμα από την πολτοποιημένη μάζα που περιείχε χλωροφύλλη και βυθίσαμε το διηθητικό χαρτί σε δοκιμαστικό σωλήνα που έφερε ποσότητα ακετόνης.

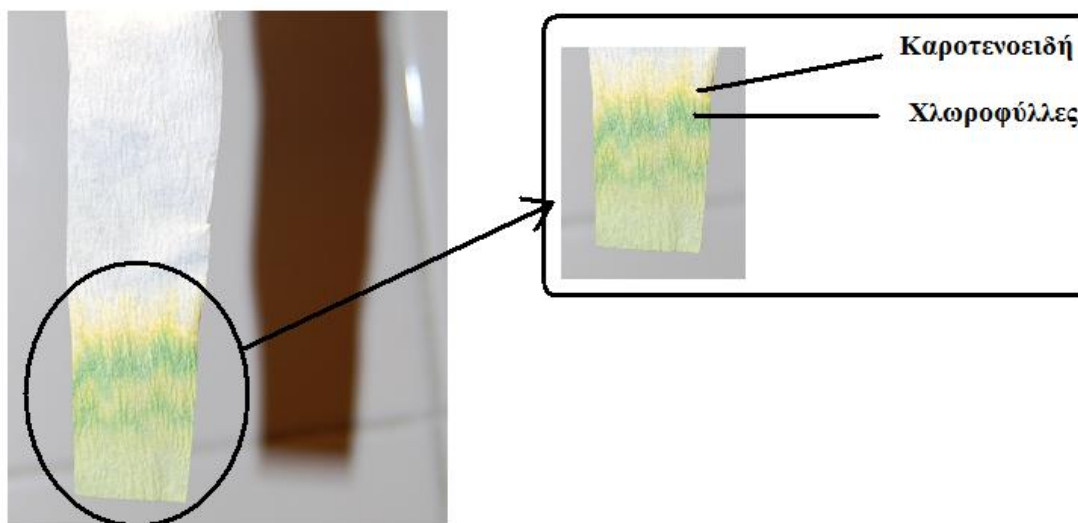


Εικόνα 9: Τρία βήματα της χρωματογραφίας. Ακετόνη σε δοκιμαστικό σωλήνα, πολτοποίηση φυτικών δειγμάτων σε ακετόνη, μαρκάρισμα διηθητικού χαρτιού.

Είδαμε να σχηματίζεται μια πράσινη περιοχή και μια κίτρινη. Αποδώσαμε τις

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹¹

δύο περιοχές στις αντίστοιχες χρωστικές, χλωροφύλλη και καροτενοειδή^{20,21}.



Εικόνα 10: Δείγμα χρωματογραφίας, όπου φαίνονται οι περιοχές με πράσινο και κίτρινο χρώμα που αντιστοιχούν στην χλωροφύλλη και στα καροτενοειδή.

Στη συνέχεια έπρεπε να μελετήσουμε το φάσμα της ακτινοβολίας που οι δύο αυτές χρωστικές απορροφούν. Για το λόγο αυτό βράσαμε φύλλα από σπανάκι, τα εμβαπτίσαμε σε αιθυλική αλκοόλη και αναδεύσαμε με μαγνητικό αναδευτήρα μέχρι που λάβαμε πράσινο διάλυμα. Διοχετεύσαμε το διάλυμα σε δοκιμαστικό σωλήνα και προσθέσαμε βενζίνη έτσι ώστε η αναλογία αιθυλικής αλκοόλης-βενζίνης να είναι 1:3. Παρατηρήσαμε να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του μίγματος η χλωροφύλλη^{20,21}.



Εικόνα 11: Στάδια εξαγωγής χλωροφύλλης. Βρασμός, ανάδευση σε αιθυλική αλκοόλη, διήθηση διαλύματος χλωροφύλλης, προσθήκη βενζίνης, επίπλευση μίγματος χλωροφύλλης.

Με τη βοήθεια του σχολικού φασματοσκοπίου λάβαμε το συνεχές φάσμα λευκού φωτός από λάμπα πυρακτώσεως. Φωτογραφίσαμε το συνεχές φάσμα και στη συνέχεια παρεμβάλλαμε μεταξύ της λάμπας πυρακτώσεως και του

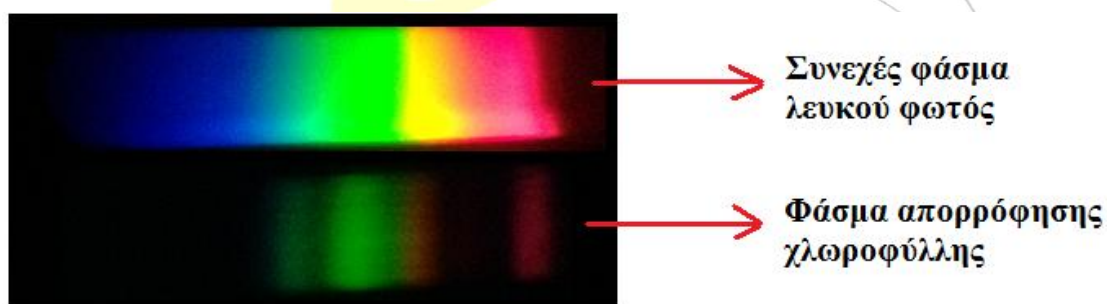
Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹²

κατευθυντήριου του φασματοσκοπίου το διάλυμα χλωροφύλλης.



Εικόνα 12: Παρεμβολή του μίγματος χλωροφύλλης μεταξύ φωτεινής πηγής λευκού φωτός και του κατευθυντήριου φακού του φασματοσκοπίου.

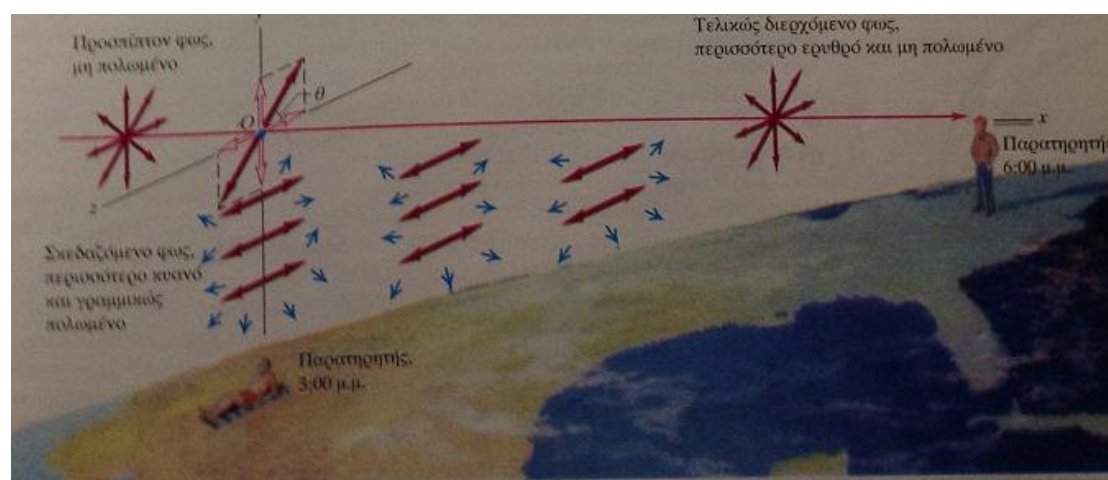
Παρατηρήσαμε το φάσμα απορρόφησης της χλωροφύλλης στο κυανό και στο ερυθρό. Φωτογραφίσαμε το φάσμα απορρόφησης και συγκρίναμε τα δύο φάσματα.



Εικόνα 13: Φάσμα εκπομπής λάμπας πυρακτώσεως και φάσμα απορρόφησης χλωροφύλλης. Προσπαθήσαμε να εξηγήσουμε γιατί η χλωροφύλλη προτιμάει να απορροφάει

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹³

έντονα σε αυτές τις δύο περιοχές του ορατού φάσματος, ενώ δεν απορροφάει σχεδόν καθόλου στο πράσινο^{11,22,23}. Σκεφτήκαμε ότι θα πρέπει να σχετίζεται με περιβαλλοντικούς παράγοντες και κυρίως με τα χρώματα που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Γνωρίζουμε ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας επικρατεί το γαλάζιο χρώμα στον ουρανό, ενώ κατά την αυγή και το σούρουπο το ερυθρό¹⁵. Προβληματιστήκαμε γιατί συμβαίνει αυτό και γιατί σε άλλους πλανήτες δε συμβαίνει κάτι αντίστοιχο. Επινόησαμε ένα παιχνίδι – πείραμα για να δείξουμε το φαινόμενο της σκέδασης στην ατμόσφαιρα στην οποία οφείλεται το γαλάζιο χρώμα²⁴.



Εικόνα 14: Το σκεδαζόμενο φως περιέχει σε υπερισχύουσα αναλογία κυανό φως. Το αρχικώς λευκό φως υφίσταται την απώλεια του κυανού φωτός και το τελικώς διερχόμενο φως έχει χρώμα ερυθρό. HUGH D. YOUNG, University Physics, Carnegie-Mellon University, pg 963-964.

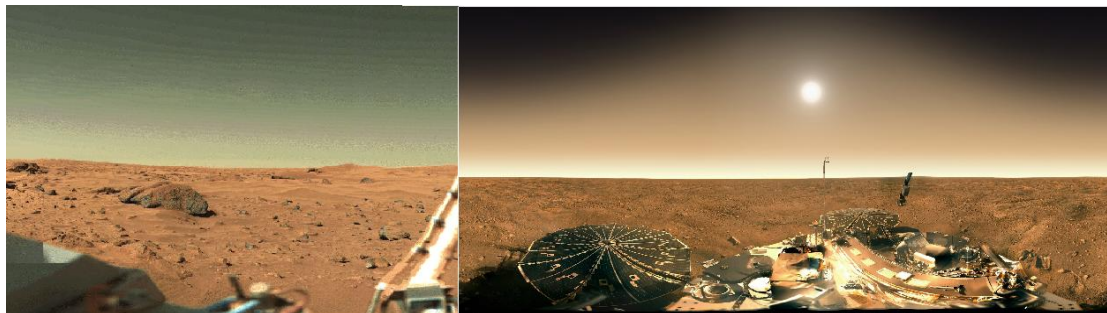
Επίσης, δείξαμε με τη χρήση πολωτικού φίλτρου ότι το φως είναι γραμμικά πολωμένο γεγονός που εξηγεί το γαλάζιο χρώμα του ουρανού και το ερυθρό κατά την αυγή και το σούρουπο. Τι θα γινόταν όμως σε έναν άλλο πλανήτη χωρίς ατμόσφαιρα, χωρίς σκέδαση ακτινοβολίας; Προφανώς, ο ουρανός θα ήταν σκοτεινός, μαύρος.

²² Cate, Thomas (September 2003). "Joseph Pelletier and Joseph Caventou". *Journal of Tree Physiology* **23** (15): 1077–1079. doi:[10.1093/treephys/23.15.1077](https://doi.org/10.1093/treephys/23.15.1077)

²³ Gitelson, Anatoly A; Buschmann, Claus; Lichtenthaler, Hartmut K (1999). "The Chlorophyll Fluorescence Ratio F735/F700 as an Accurate Measure of the Chlorophyll Content in Plants". *Remote Sensing of Environment* **69** (3): 296. doi:[10.1016/S0034-4257\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00023-1)

²⁴ Χρίστος Δ. Γούδης, Εργαστηριακή Αστροφυσική, 1989, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών σελ.43-49.

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹⁴



Εικόνα 15: Φωτογραφίες από την επιφάνεια του Άρη. Ο ουρανός φαίνεται μαύρος ακόμη και κατά τη διάρκεια της ημέρας. http://www.nasa.gov/mission_pages/mars/images/image-collection_archive_1.html

Τα φυτά πως θα αντιδρούσαν; Η χλωροφύλλη θα προσαρμοζόταν στα νέα δεδομένα εξελισσόμενη σε ένα νέο είδος;. Προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα με δύο τρόπους. Αρχικά αναζητήσαμε φωτοσυνθετικούς οργανισμούς στη Γη, σε αφιλόξενα περιβάλλοντα (όπως τα βάθη των ωκεανών) για να δούμε το χρώμα του φαινότυπού τους.



Εικόνα 16: Ο φαινότυπος φυτών που φύονται και αναπτύσσονται σε μεγάλα βάθη των ωκεανών. Παρατηρούμε ότι έχουν αποχρώσεις του λευκού σε αντίθεση με τα φυτά στην επιφάνεια της Γης που είναι πράσινα. <http://educationally.narod.ru/bentos2photoalbum.html>

Παράλληλα, φυτέψαμε φακές και τις αφήσαμε να φυτρώσουν κάτω από χρωματικά φίλτρα και σε συνθήκες γυάλινου θερμοκηπίου, μελετώντας τους ρυθμούς ανάπτυξης και των φαινότυπό τους²⁵.

²⁵ <http://www.saps.org.uk/secondary/teaching-resources/130-the-effect-of-light-colour-and-intensity-on-the-rate-of-photosynthesis>

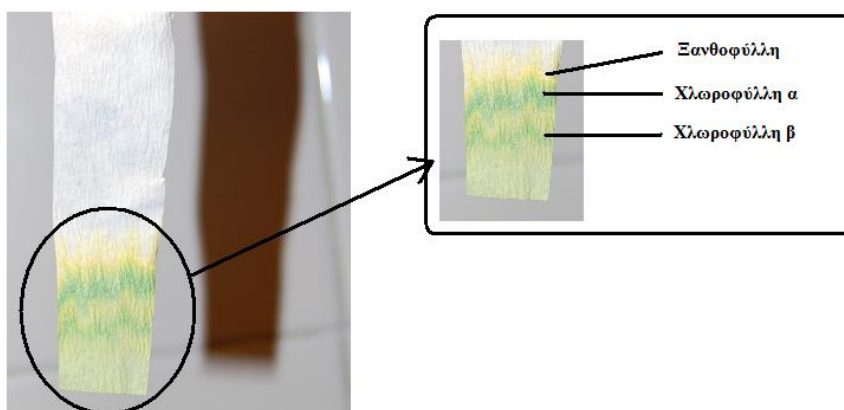


Εικόνα 17: Καλλιέργεια φυτών κάτω από ειδικές συνθήκες με σκοπό τη μελέτη των ρυθμών φωτοσύνθεσης

Όλα τα πειράματα έχουν επαναληφθεί πολλαπλά και γίνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Ανάλυση των Δεδομένων (όριο 500 λέξεις)

Στο πρώτο στάδιο της έρευνάς μας για τη συμπεριφορά της χλωροφύλλης πραγματοποιήσαμε πείραμα χρωματογραφίας. Σε διηθητικό χαρτί αποτυπώθηκε η ανάλυση διαλύματος χρωστικών από πράσινα μέρη φυτών (σπανάκι) σε ακετόνη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της χρωματογραφίας και οι χρωστικές:



Εικόνα 18: Χρωματογραφία χλωροφύλλης. Φαίνονται τα δύο είδη χλωροφύλλης και η ξανθοφύλλη.

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹⁶

Παρατηρούμε τις δύο διαφορετικές μορφές χλωροφύλλης α και β, ενώ διακρίνεται και η ξανθοφύλλη. Τα αποτελέσματα μας συμπίπτουν και επαληθεύουν αποτελέσματα άλλων ερευνητών^{26,27,28,29}. Ενδεικτικά παραθέτουμε χρωματογραφία χλωροφύλλης από το Πανεπιστήμιο Henderson (Henderson State University, Arkadelphia, Arkansas, U.S.A.)²⁶:



Εικόνα 19: Χρωματογραφία χλωροφύλλης από το Πανεπιστήμιο Hederson Arkansas. <http://www.hsu.edu/pictures.aspx?id=1653>

Με τη βοήθεια της τεχνικής της χρωματογραφίας ανακαλύψαμε τις χρωστικές που είναι υπεύθυνες για το χρώμα των φυτών. Στη συνέχεια μελετήσαμε το φάσμα

²⁶ <http://www.hsu.edu/pictures.aspx?id=1653>

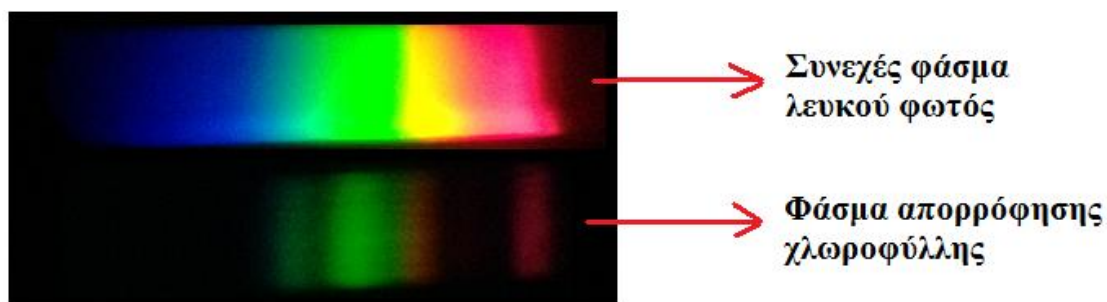
²⁷ Marker, A. F. H. (1972). "The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin". *Freshwater Biology* **2** (4): 361. [doi:10.1111/j.1365-2427.1972.tb00377.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1972.tb00377.x)

²⁸ Jeffrey, S. W.; Shibata, Kazuo (February 1969). "Some Spectral Characteristics of Chlorophyll c from *Tridacna crocea* Zooxanthellae". *Biological Bulletin (Marine Biological Laboratory)* **136** (1): 54–62. [doi:10.2307/1539668](https://doi.org/10.2307/1539668). JSTOR 1539668

²⁹ Gilpin, Linda (21 March 2001). "Methods for analysis of benthic photosynthetic pigment". School of Life Sciences, [Napier University](http://www.lifesciences.napier.ac.uk/teaching/MB/benchl01.html). <http://www.lifesciences.napier.ac.uk/teaching/MB/benchl01.html>. Retrieved 2010-07-17.

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ¹⁷

απορρόφησης της χλωροφύλλης. Σε διάλυμα χλωροφύλλης σε οινόπνευμα προσθέσαμε βενζίνη με αποτέλεσμα να επιπλεύσει μίγμα χρωστικών. Με τη βοήθεια φασματοσκοπίου πήραμε φάσμα εκπομπής λάμπας πυρακτώσεως, δηλαδή συνεχούς φάσματος στο ορατό. Το συνεχές φάσμα λευκού φωτός θα αποτελέσει φάσμα αναφοράς για τις μετρήσεις μας. Στη συνέχεια παρεμβάλλαμε το μίγμα χλωροφύλλης (χρωστικές) μεταξύ λάμπας πυρακτώσεως και πρίσματος φασματοσκοπίου και λάβαμε το φάσμα απορρόφησης των χρωστικών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το συνεχές φάσμα του λευκού φωτός και το φάσμα απορρόφησης.



Εικόνα 20: Φάσμα εκπομπής λάμπας πυρακτώσεως και φάσμα απορρόφησης χλωροφύλλης. Οι μετρήσεις μας αποκαλύπτουν ισχυρή απορρόφηση στο κυανό τμήμα του ορατού φάσματος και στο ερυθρό. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε πλήρη συμφωνία με τη βιβλιογραφία^{11,22,30}. Στις παρακάτω Εικόνες 21 και 22 φαίνονται φάσματα απορρόφησης της χλωροφύλλης α και χλωροφύλλης β^{31,32}.

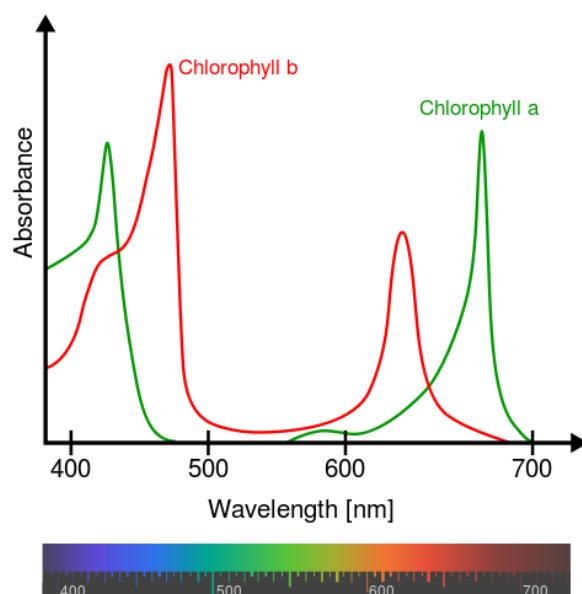


Εικόνα 21: Φάσμα απορρόφησης χλωροφύλλης. Παρατίθεται και το συνεχές φάσμα για σύγκριση. Από <http://www4.uwsp.edu/biology/courses/botlab/Lab11a.htm>

³⁰ Gross, 1991

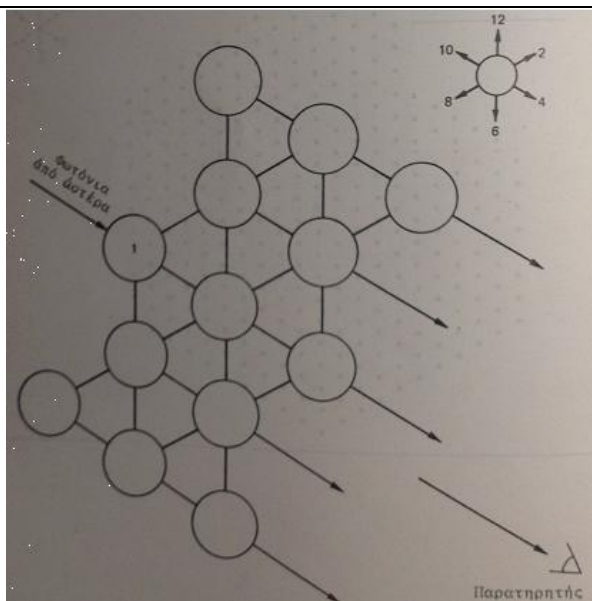
³¹ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chlorophyll_ab_spectra-en.svg

³² Lester L. Shipman , Therese M. Cotton , James R. Norris , Joseph J. Katz, An analysis of the visible absorption spectrum of chlorophyll a monomer, dimer, and oligomers in solution, J. Am. Chem. Soc., 1976, 98 (25), pp 8222–8230 DOI: 10.1021/ja00441a056, December 1976



Εικόνα 22: Φάσμα απορρόφησης χλωροφύλλης. Από http://en.wikipedia.org/wiki/File:Chlorophyll_ab_spectrum-en.svg

Οι περιοχές του ορατού φάσματος όπου παρουσιάζεται η ισχυρότερη απορρόφηση από την χλωροφύλλη, εικάζουμε ότι οφείλονται στα αντίστοιχα επικρατούντα χρώματα του ουρανού. Πρέπει να δείξουμε γιατί επικρατούν το γαλάζιο και το κόκκινο στον ουρανό της Γης και γιατί κάτι τέτοιο δε θα ισχύει σε άλλους πλανήτες. Τα χρώματα της γήινης ατμόσφαιρας οφείλονται στους σκεδαστές, άτομα και μόρια αερίων και αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Για να δείξουμε το ρόλο των σκεδαστών διεξήγαμε πείραμα – παιχνίδι με κινούμενα φωτόνια που διέρχονται μέσα από την ατμόσφαιρα. Προσεγγίσαμε την ατμόσφαιρα με το παρακάτω σχήμα²⁴:



Εικόνα 23: Η σκέδαση των φωτονίων - παιχνίδι προσομοίωσης

Τα προερχόμενα από τον Ήλιο φωτόνια εισέρχονται στην ατμόσφαιρα κατά την κατεύθυνση 4. Στη συνέχεια σκεδάζονται και ακολουθούν τις εναλλακτικές πορείες 2,4,6,8,10,12. Υπολογίσαμε τις πορείες 300 φωτονίων και καταλήξαμε στον αριθμό φωτονίων που δεν εκτρέπονται της αρχικής τους πορείας. Η μελέτη αυτή είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό της απώλειας έντασης φωτός που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Αντίστοιχη απώλεια δε θα έχουμε σε έναν άλλο πλανήτη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται παρακάτω:

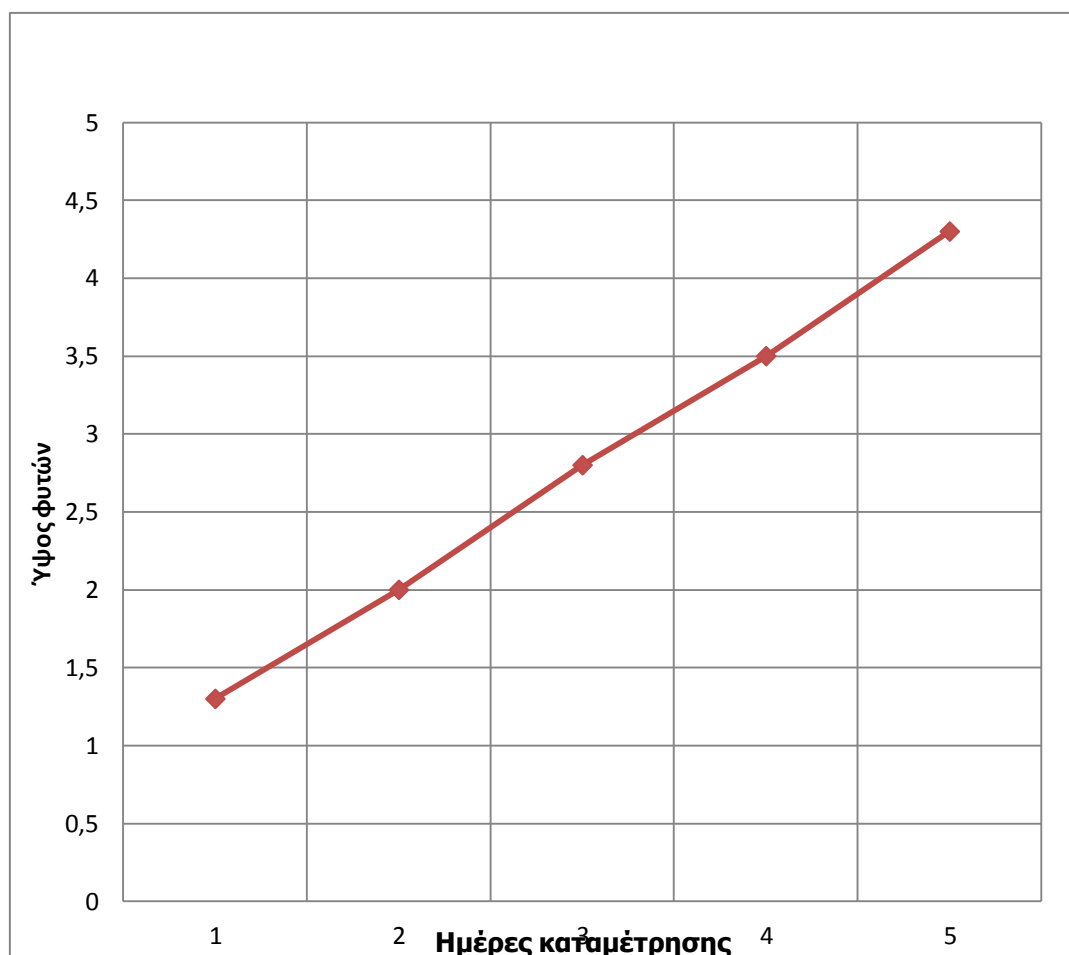
Αριθμός εισερχομένων φωτονίων	Αριθμός φωτονίων που παρεκκλίνουν της αρχικής τους πορείας	Αριθμός φωτονίων που δεν παρεκκλίνουν της αρχικής τους πορείας
300	274	26
Ποσοστό	91,3 %	8,7 %

Πίνακας 1: Απόλυτα νούμερα και ποσοστά σκεδαζόμενων φωτονίων που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης που εφαρμόσαμε.

Ας δούμε τώρα τα αποτελέσματα από τους ρυθμούς ανάπτυξης των φυτών μας. Στους παρακάτω πίνακες και στα γραφήματα φαίνονται τα μήκη των φυτών σε σχέση με τις ημέρες παρατήρησης.

Φυτά κάτω από κόκκινο φίλτρο χρώματος	
Ημέρες παρατήρησης	Μήκος φυτού (cm)
1η	1,3
2 ^η	2,0
3 ^η	2,8
4 ^η	3,5
5η	4,3

Πίνακας 2: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών κάτω από κόκκινο φίλτρο χρώματος

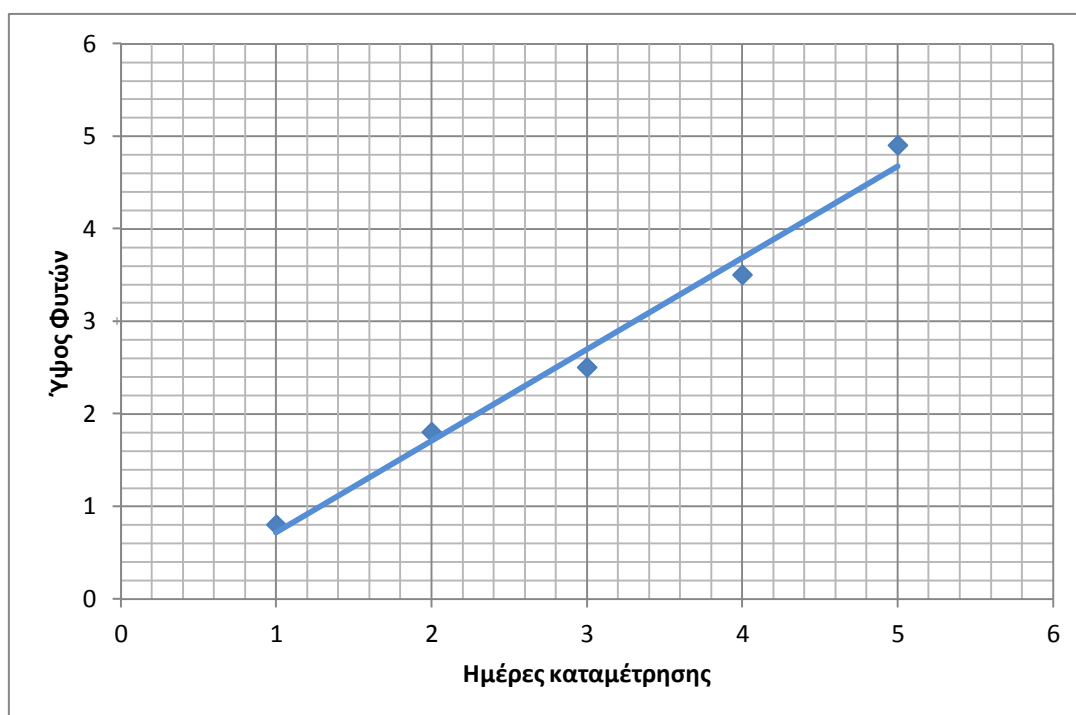


Πίνακας 3: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών κάτω από κόκκινο φίλτρο χρώματος

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ²¹

Φυτά κάτω από κυανό φίλτρο χρώματος	
Ημέρες παρατήρησης	Μήκος φυτού (cm)
1 ^η	0,8
2 ^η	1,8
3 ^η	2,5
4 ^η	3,5
5 ^η	4,9

Πίνακας 4: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών κάτω από κυανό φίλτρο χρώματος

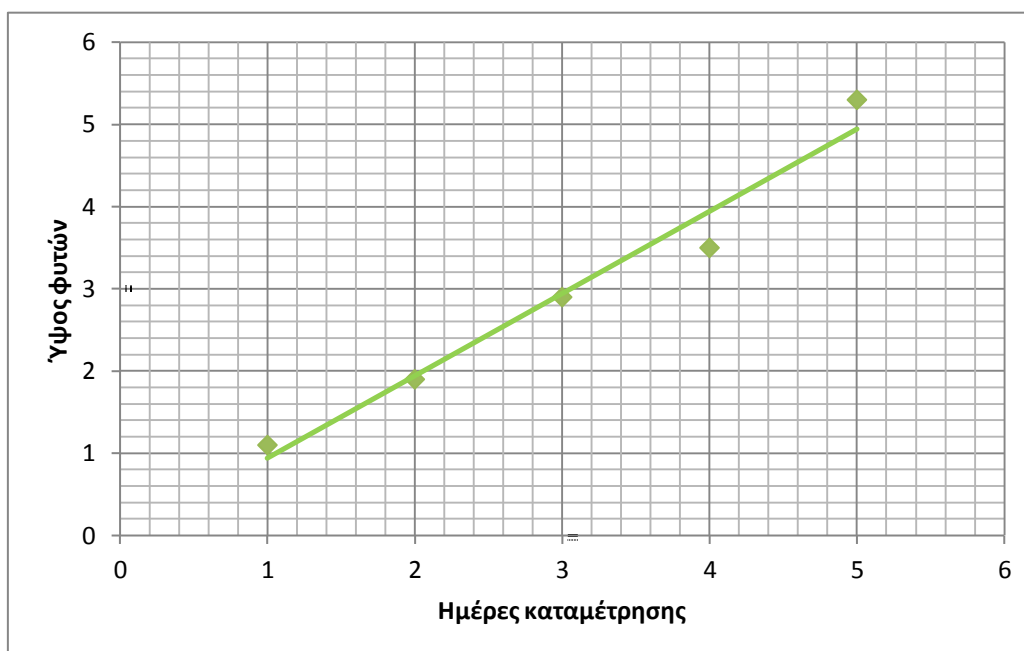


Πίνακας 5: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών κάτω από κυανό φίλτρο χρώματος

Φυτά κάτω από πράσινο φίλτρο χρώματος	
Ημέρες παρατήρησης	Μήκος φυτού (cm)
1 ^η	1,1
2 ^η	1,9
3 ^η	2,9
4 ^η	3,5
5 ^η	5,3

Πίνακας 6 Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών κάτω από πράσινο φίλτρο χρώματος

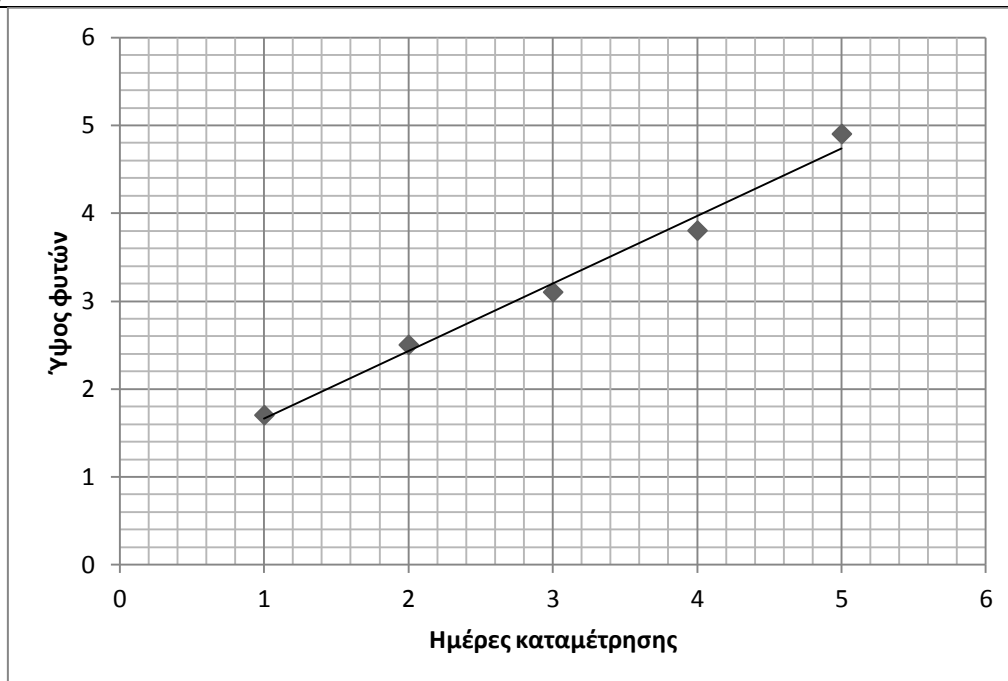
Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ²²



Πίνακας 7: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών κάτω από πράσινο φίλτρο χρώματος.

Φυτά μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο (φακές)	
Ημέρες παρατήρησης	Μήκος φυτού (cm)
1η	1,7
2 ^η	2,5
3 ^η	3,1
4 ^η	3,8
5η	4,9

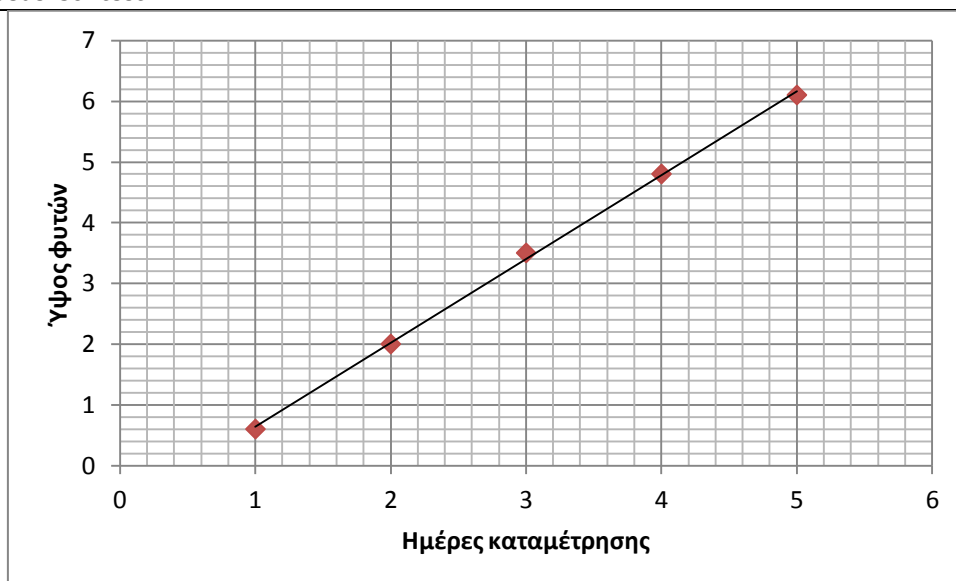
Πίνακας 8: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο.



Πίνακας 9: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών (φακές) μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο.

Φυτά μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο (σιτάρι)	
Ημέρες παρατήρησης	Μήκος φυτού (cm)
1η	0,6
2 ^η	2,0
3 ^η	3,5
4 ^η	4,8
5η	6,1

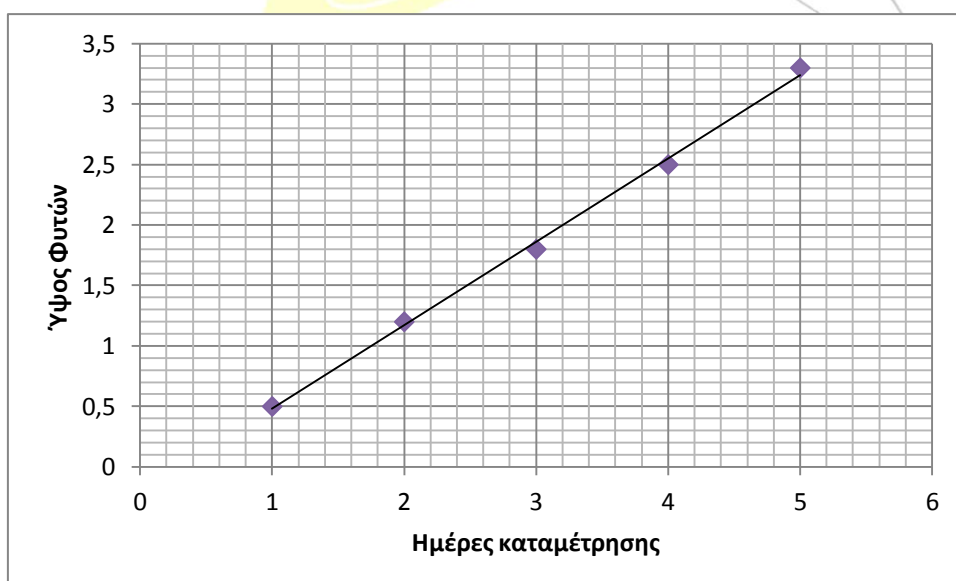
Πίνακας 10: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών (σιτάρι) μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο



Πίνακας 11: Ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών (σιτάρι) μέσα σε γυάλινο θερμοκήπιο

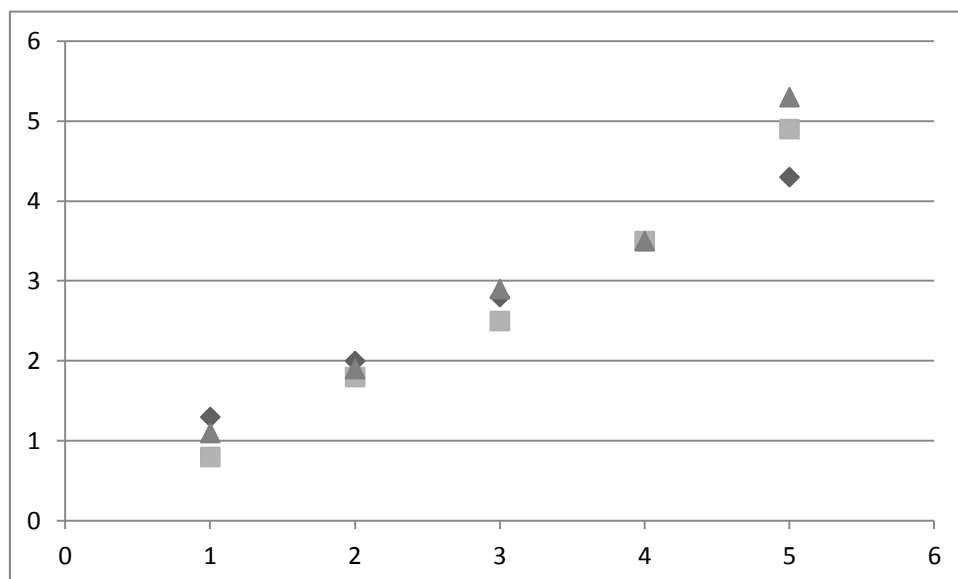
Σιτάρι εκτός θερμοκηπίου	
Ημέρες παρατήρησης	Μήκος φυτού (cm)
1η	0,5
2 ^η	1,2
3 ^η	1,8
4 ^η	2,5
5η	3,3

Πίνακας 12: Ο ρυθμός ανάπτυξης σιταριού εκτός θερμοκηπίου.



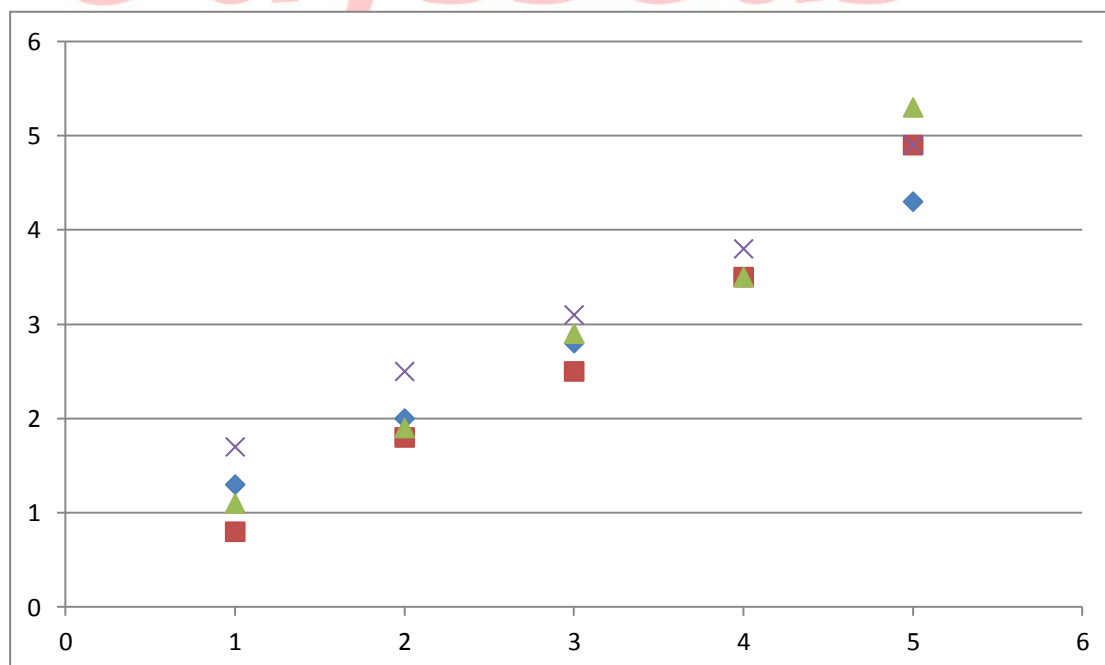
Πίνακας 13: Ο ρυθμός ανάπτυξης σιταριού εκτός θερμοκηπίου.

Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές των ρυθμών αύξησης στα φυτά κάτω από τα φίλτρα χρώματος. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Πίνακας 14: Οι ρυθμοί αύξησης των φυτών για τα τρία διαφορετικά φίλτρα χρώματος (κόκκινο φίλτρο: ρόμβοι, μπλε φίλτρο: τετράγωνα και πράσινο φίλτρο: τρίγωνα)

Αυτό που μπορούμε να επισημάνουμε είναι ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών στο γυάλινο θερμοκήπιο. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα είναι αισθητά υψηλότερος:

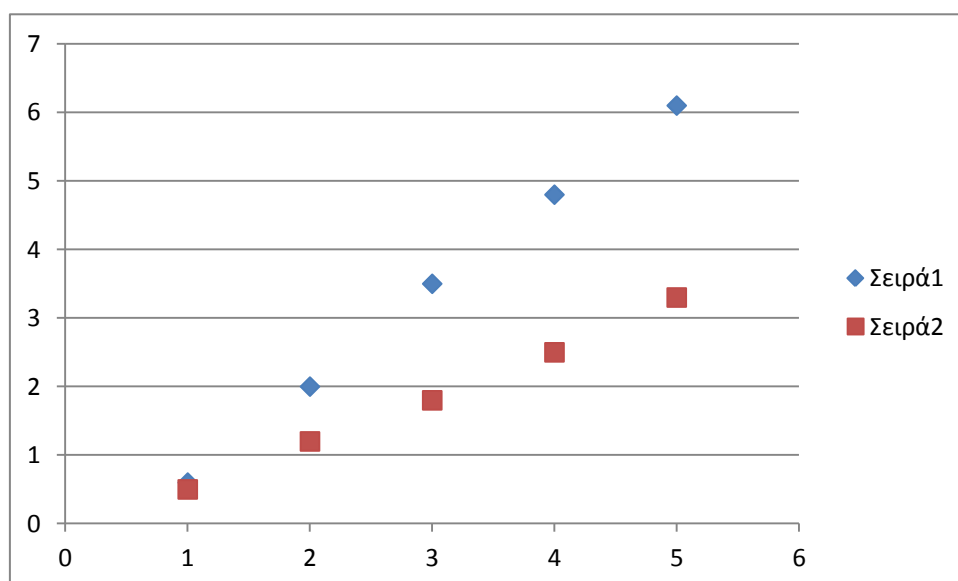


Πίνακας 15: Οι ρυθμοί αύξησης των φυτών για τα τρία διαφορετικά φίλτρα χρώματος (κόκκινο φίλτρο: ρόμβοι, μπλε φίλτρο: τετράγωνα, πράσινο φίλτρο: τρίγωνα και θερμοκήπιο με τα x)

Τέλος ας συγκρίνουμε την ανάπτυξη του σιταριού σε γυάλινο θερμοκήπιο

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ²⁶

(άρα υψηλότερη θερμοκρασία και περιεκτικότητα σε CO_2) και εκτεθειμένο στο περιβάλλον:



Πίνακας 16: Σύγκριση της ανάπτυξης του σιταριού σε γυάλινο θερμοκήπιο (μπλέ ρόμβοι), άρα υψηλότερη θερμοκρασία και περιεκτικότητα σε CO_2 σε σχέση με σιτάρι εκτεθειμένο στο περιβάλλον (μωβ τετράγωνα). Χειμερινή περίοδο χαμηλής ηλιοφάνειας με μέση θερμοκρασία 10°C .

Τέλος, το ποιο ενδιαφέρον εύρημά μας είναι το χρώμα φυτών σε απόλυτο σκοτάδι. Τα φυτά μας που αναπτύχθηκαν σε απόλυτο σκοτάδι εμφάνισαν λευκό μίσχο σε αντίθεση με τα φωτιζόμενα που παρουσίασαν πράσινο:



Εικόνα 24: Σύγκριση των φυτών που αναπτύχθηκαν σε απόλυτο σκοτάδι και φυτών σε φως. Παρατηρούμε τον έντονα λευκό μίσχο και τα κιτρινωπά φύλλα των φυτών που αναπτύχθηκαν σε απόλυτο σκοτάδι.

Το εύρημά μας αυτό επαληθεύεται και από παρατηρήσεις λευκών φυτών στα βάθη ωκεανών και επιβεβαιώνει τις αρχικές μας υποθέσεις για λευκά φυτά σε άλλους πλανήτες.

Συζήτηση των ευρημάτων (όριο 300 λέξεις)

Για να μπορέσουμε να απαντήσουμε στο πρωταρχικό μας ερώτημα σχετικά με το χρώμα των φυτών σε έναν άλλο πλανήτη, έπρεπε αρχικά να μελετήσουμε τις χρωστικές της χλωροφύλλης και να αναζητήσουμε τις περιοχές του ορατού φάσματος που η χλωροφύλλη απορροφάει. Χρησιμοποιήσαμε χρωματογραφία και επαληθεύσαμε πλήρως την ύπαρξη των χρωστικών: χλωροφύλλη α και β και ξανθοφύλλη^{26,27,28,29}. Στη συνέχεια παρασκευάσαμε δείγμα χλωροφύλλης που μελετήσαμε με φασματοσκοπία. Παρατηρήσαμε και επαληθεύσαμε πλήρως ότι η χλωροφύλλη απορροφάει έντονα στο κυανό και στο ερυθρό τμήμα του ορατού φάσματος^{11,22,30,31,32}. Συσχετίσαμε την απορρόφηση της χλωροφύλλης σε αυτά τα δύο τμήματα του ορατού φάσματος με τα επικρατούντα χρώματα της ατμόσφαιρας²⁴. Δείξαμε ότι η σκέδαση που υφίσταται το ηλιακό φως στην ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα το γαλάζιο και ερυθρό χρώμα του ουρανού κατά τη διάρκεια της ημέρας^{13,14,15,16,17,18, 19}. Στη συνέχεια σκεφτήκαμε να μελετήσουμε το ρυθμό ανάπτυξης φυτών κάτω από φίλτρα χρώματος και συγκεκριμένα κυανό φίλτρο, πράσινο φίλτρο και κόκκινο. Δεν παρατηρήσαμε μεγάλες διαφορές στο ρυθμό ανάπτυξης των φυτών, δηλαδή στο ρυθμό φωτοσύνθεσης. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι τα φίλτρα χρώματος δεν είναι απόλυτα μονοχρωματικά φίλτρα, αλλά επιτρέπουν μέρος άλλων χρωμάτων να διέρχονται. Περισσότερο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι τα φυτά σε συνθήκες θερμοκηπίου αναπτύχθηκαν με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας και περιεκτικότητας CO₂. Άρα γυάλινα θερμοκήπια σε έναν άλλο πλανήτη θα προσφέρουν κατάλληλες συνθήκες για ανάπτυξη φυτών ανεξάρτητα από τα μήκη κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Τελικά, όπως επιβεβαιώνουν τα πειραματικά μας δεδομένα σε συνθήκες ελλιπούς φωτισμού (σκοτάδι) τα φυτά θα είναι λευκά, καθώς θα προσπαθούν να εκμεταλλευτούν όλα τα μήκη κύματος του ορατού και δε θα προτιμούν το κυανό και το ερυθρό. Μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο πράσινο χρώμα θα απορροφούνται και δε θα ανακλώνται προσδίδοντας πράσινο χρώμα στα φυτά. Αυτό επιβεβαιώνεται και από φυτά σε μεγάλα βάθη στους ωκεανούς, αλλά και από φυτά και αρθρώποδα σε βάθη σπηλαίων.

Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε άλλο πλανήτη; ²⁸

Συμπεράσματα (όριο 200 λέξεις)

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της ζωής θα είναι η ζωή σε άλλους πλανήτες. Τα φυτά στην επιφάνεια της γης φωτοσυνθέτουν και αναπτύσσονται ως αυτότροφοι οργανισμοί. Απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία στο κυανό και στο ερυθρό και ανακλούν στο πράσινο. Απορροφούν κυρίως τις ακτινοβολίες που επικρατούν στη γήινη ατμόσφαιρα. Τι θα γίνει όμως σε έναν άλλο πλανήτη χωρίς σκεδαστές; Τι χρώμα θα έχουν τα φυτά σε έναν πλανήτη με μαύρο ουρανό; Μελετήσαμε τους ρυθμούς ανάπτυξης φυτών κάτω από φίλτρα χρώματος (κόκκινο, πράσινο, μπλε), σε γυάλινα θερμοκήπια, κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες και περιεκτικότητες σε CO₂ και στο απόλυτο σκοτάδι. Μελετήσαμε το χρώμα φυτών που αναπτύχθηκαν σε απόλυτο σκοτάδι. Το χρώμα του μίσχου τους είναι λευκό και όχι πράσινο. Τα φυτά μας προσαρμόστηκαν στις νέες συνθήκες και ενεργοποίησαν μηχανισμούς απορρόφησης όλων των μηκών κύματος, αναπτυσσόμενα με ικανοποιητικούς ρυθμούς. Σε συνθήκες γυάλινου θερμοκηπίου τα φυτά αναπτύχθηκαν ταχύτερα (λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης CO₂). Ο άνθρωπος θα μπορέσει να καλλιεργήσει τα φυτά σου σε γυάλινα διαστημικά θερμοκήπια, ακόμα και με περιορισμένο φωτισμό. Η ζωή θα συνεχίσει να εξελίσσεται και σε άλλους πλανήτες, αλλά θα προσαρμοστεί στα νέα δεδομένα, όπως προσαρμόστηκε στις μορφές ζωής στα βάθη των ωκεανών και τον σπηλαιών.

Παραπομπές

Campbell NA, Williamson B, Heyden RJ (2006). *Biology Exploring Life*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. [ISBN 0-13-250882-6](#).

http://www.phschool.com/el_marketing.html.

Motilva, Maria-José (2008), "Chlorophylls – from functionality in food to health relevance" (Print), *5th Pigments in Food congress- for quality and health*, University of Helsinki, [ISBN 978-952-10-4846-3](#)

Woodward, R. B.; Ayer, W. A.; Beaton, J. M. (July 1960). ["The total synthesis of chlorophyll"](#). *Journal of the American Chemical Society* **82** (14): 3800–3802. [doi:10.1021/ja01499a093](#).

<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01499a093>.

Fleming, Ian (14 October 1967). "Absolute Configuration and the Structure of Chlorophyll". *Nature* **216** (5111): 151–152. [Bibcode 1967Natur.216..151F](#). [doi:10.1038/216151a0](https://doi.org/10.1038/216151a0).
<http://www.nature.com/nature/journal/v216/n5111/abs/216151a0.html>.

Woodward, R. B.; Ayer, William A.; Beaton, John M. et al. (1990). "The total synthesis of chlorophyll a" (PDF). *Tetrahedron* **46** (22): 7599–7659. [doi:10.1016/0040-4020\(90\)80003-Z](https://doi.org/10.1016/0040-4020(90)80003-Z).
<http://media.iupac.org/publications/pac/1961/pdf/0203x0383.pdf>.

Jabr, Ferris [A New Form of Chlorophyll?](#). Scientific American. August 19, 2010. Retrieved on 2012-04-15.

[Infrared chlorophyll could boost solar cells](#). New Scientist. August 19, 2010. Retrieved on 2012-04-15.

Chen, Min; Schliep, Martin; Willows, Robert D. et al. (September 2010). "A Red-Shifted Chlorophyll". *Science* **329** (5997): 1318–1319. [Bibcode 2010Sci...329.1318C](#). [doi:10.1126/science.1191127](https://doi.org/10.1126/science.1191127). [PMID 20724585](#).

Raven PH, Evert RF, Eichhorn SE (2005). *Biology of Plants*, (7th ed.). New York: W.H. Freeman and Company Publishers. pp. 124–127. [ISBN 0-7167-1007-2](#).

Pushkar Y, Yano J, Sauer K, Boussac A, Yachandra VK (February 2008). "Structural changes in the Mn₄Ca cluster and the mechanism of photosynthetic water splitting". *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105** (6): 1879–84. [Bibcode 2008PNAS..105.1879P](#). [doi:10.1073/pnas.0707092105](https://doi.org/10.1073/pnas.0707092105). [PMC 2542863](#). [PMID 18250316](#).
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2542863/>.

Larkum, edited by Anthony W. D. Larkum, Susan E. Douglas & John A. Raven (2003). *Photosynthesis in algae*. London: Kluwer. [ISBN 0-7923-6333-7](#).

Armstrong GA, Hearst JE (1996). "Carotenoids 2: Genetics and molecular biology of carotenoid pigment biosynthesis". *FASEB J.* **10** (2): 228–37. [PMID 8641556](#).
<http://www.fasebj.org/cgi/pmidlookup?view=long&pmid=8641556>

LEWIS TICKI, *Beginnings of life, second edition*, Wm. C. Brown Publisher.

- POSTLETHWAIT J. & HOPSON J., *The Nature of Life, second edition*
- HUGH D. YOUNG, University Physics, Carnegie-Mellon University, pg 963-964.
- John Tyndall (December 1868). "On the Blue Colour of the Sky, the Polarization of Skylight, and on the Polarization of Light by Cloudy Matter Generally". *Proceedings of the Royal Society of London* **17**: pp. 223–233. doi:[10.1098/rspl.1868.0033](https://doi.org/10.1098/rspl.1868.0033). JSTOR [112380](https://www.jstor.org/stable/112380).
- Lord Rayleigh (June 1871). "On the scattering of light by small particles". *Philosophical Magazine* **41**, **275**: pp. 447–451.
- J.G. Watson (June 2002). "[Visibility: Science and Regulation](#)". *J. Air & Waste Manage. Assoc* **52**: pp. 628–713. http://scholar.google.com/scholar?hl=en&lr=&q=cache:aulPiqN6uTUJ:www.aqma.org/journal/pdfs/2002/6/Crit_Review.pdf+. Retrieved 2007-04-19.
- Gibbs, Philip (May 1997). "[Why is the sky Blue?](#)". *Usenet Physics FAQ*. http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/BlueSky/blue_sky.html. Retrieved 11 December 2012.
- ΜΗΤΡΑΚΟΣ Α.Κ., ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΥ Κ.Α., *Εργαστηριακές μέθοδοι και ασκήσεις Βοτανικής, τεύχος β', 1970*.
- ΤΣΕΚΟΣ Ι., ΚΟΥΚΟΛΗ Ε., *Εργαστηριακές ασκήσεις Βοτανικής, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη 1993*.
- Cate, Thomas (September 2003). "Joseph Pelletier and Joseph Caventou". *Journal of Tree Physiology* **23** (15): 1077–1079. doi:[10.1093/treephys/23.15.1077](https://doi.org/10.1093/treephys/23.15.1077)
- Gitelson, Anatoly A; Buschmann, Claus; Lichtenthaler, Hartmut K (1999). "The Chlorophyll Fluorescence Ratio F735/F700 as an Accurate Measure of the Chlorophyll Content in Plants". *Remote Sensing of Environment* **69** (3): 296. doi:[10.1016/S0034-4257\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00023-1)
- Χρίστος Δ. Γούδης, Εργαστηριακή Αστροφυσική, 1989, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών σελ.43-49. <http://www.saps.org.uk/secondary/teaching-resources/130-the-effect-of-light-colour-and-intensity-on-the-rate-of-photosynthesis>