

Αξιοποιώντας την Ενέργεια του Ήλιου με τη Βοήθεια Φρούτων και Λαχανικών της Ελληνικής Γης

Ισαβέλλα Παπαδοπούλου, Μυρτώ Παπαδοπούλου, Ευαγγελία Θεοδωράτου, Χρήστος Καραογλάνης, Κωνσταντίνα Μαυρουκάκη-Καραγκούνη, Γεωργία Ξαγοράρη, Κατερίνα Παπαθεοδώρου, Αθανασία Σουσάνη, Νικόλαος Σπύρου, Βαρβάρα Καρυώτη, Ανδριάννα Κατσαμπάνη, Όλγα Κλάδη-Μόρφη και Χριστόδουλος Μακεδόνας*

Πρότυπο Γενικό Λύκειο Ευαγγελικής Σχολής Σμύρνης, Λέσβου 4, 171 23 Νέα Σμύρνη.

*e-mail: cmakedonas@sch.gr

1. Εισαγωγή

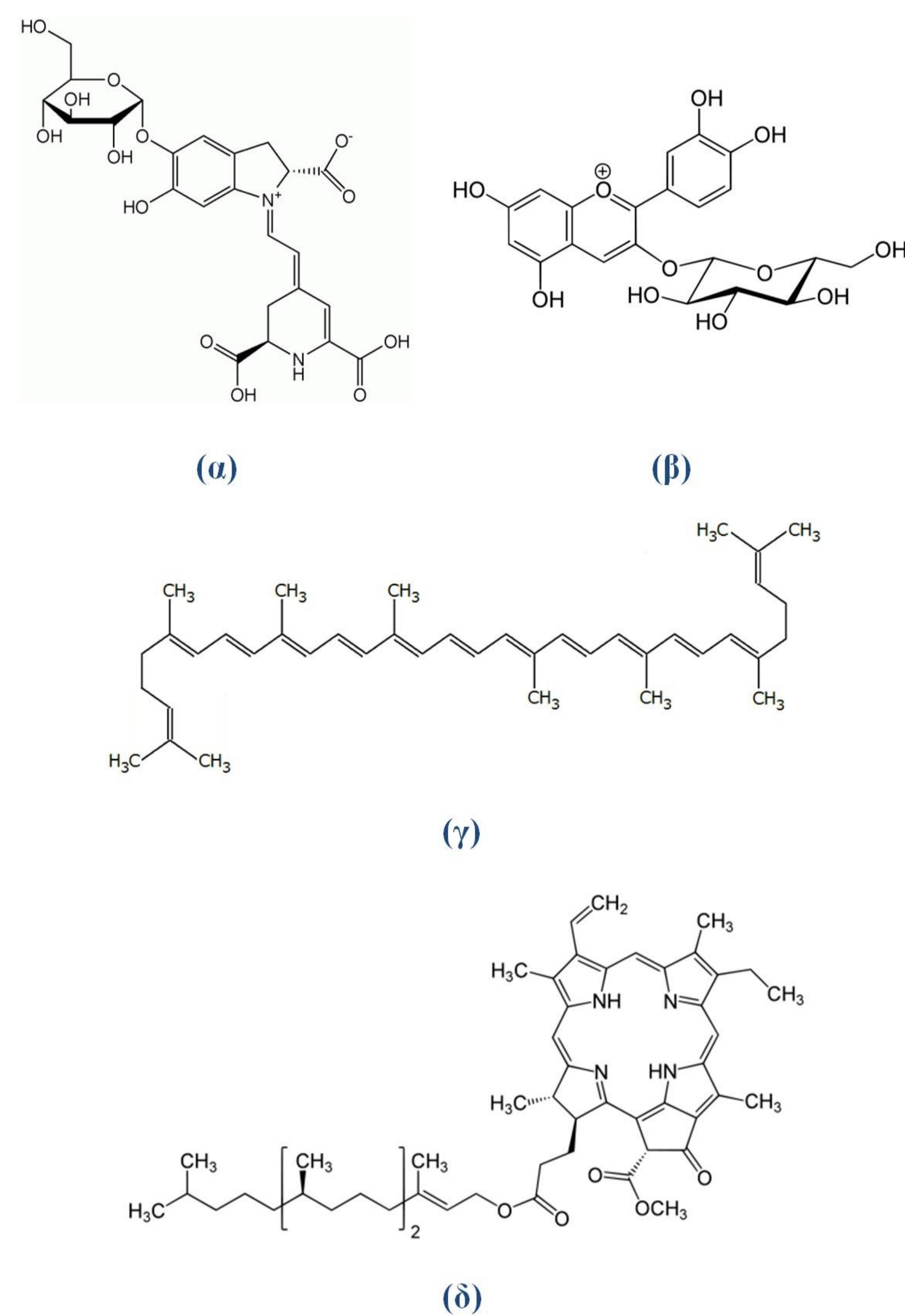
Κάθε ώρα που περνά φθάνουν στη Γη περίπου $4,3 \cdot 10^{20}$ J φωτεινής ενέργειας.¹ Αν μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε στο έπακρο αυτό το ποσό ενέργειας, θα διαπιστώναμε ότι είναι αρκετό για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη μας για ένα χρόνο! Παρόλα αυτά, σήμερα εκμεταλλευόμαστε ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτής της ενέργειας, ενώ η παγκόσμια οικονομία στηρίζεται ακόμα στα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα και το πετρέλαιο σε ποσοστό περίπου 85%. Μεταξύ των λύσεων που έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια είναι και οι ευαίσθητοποιημένες από χρωστική ηλιακές κυψέλες (Dye Sensitized Solar Cells - DSSCs).^{1,2,3} Αυτές οι κυψέλες φθάνουν σε απόδοση το 11,9% (2016), ενώ ήδη πωλούνται στο εμπόριο κάποια πρώτα προϊόντα.⁴ Οι DSSC αν και εμφανίζουν προς το παρόν μικρότερες αποδόσεις σε σχέση με τα κλασικά φωτοβολταϊκά, είναι φθηνότερες, λειτουργούν και με διάχυτο φως και μπορούν να ενσωματωθούν σε κατασκευαστικά υλικά.

2. Η αρχή λειτουργίας των DSSCs

Μια κυψέλη τύπου DSSC μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, μιμούμενη τον τρόπο με τον οποίο τα φυτά φωτοσυνθέτουν. Πρόκειται στην πράξη για ένα κλειστό κύκλωμα, τα κύρια μέρη του οποίου συνήθως είναι τα εξής: (α) Η **φωτοάνοδος**: Πρόκειται για επιστρώση SnO₂ παρουσία προσμειξέων F (FTO) ή In (ITO) επί ενός διαφανούς υλικού (ύαλου). (β) Η **κάθοδος**: Πρόκειται για αγωγή υάλου με επιστρώση γραφίτη. (γ) Ο **ημιαγωγός**: Χρησιμοποιείται το TiO₂, το οποίο είναι λευκό πιγμέντο, εξαιρετικά σταθερό στο φωτισμό. (δ) Ο **φωτοευαίσθητοποιητής** (S): Πρόκειται για τη χρησιμοποιούμενη χρωστική. (ε) Ο **ηλεκτρολύτης**: Ο απαραίτητος οξειδοαναγωγικός μεσολαβητής, ο οποίος θα κλείσει το ηλεκτρικό κύκλωμα που δημιουργείται. Αυτός που απαντά πιο συχνά είναι το ζεύγος I⁻/I₃⁻.

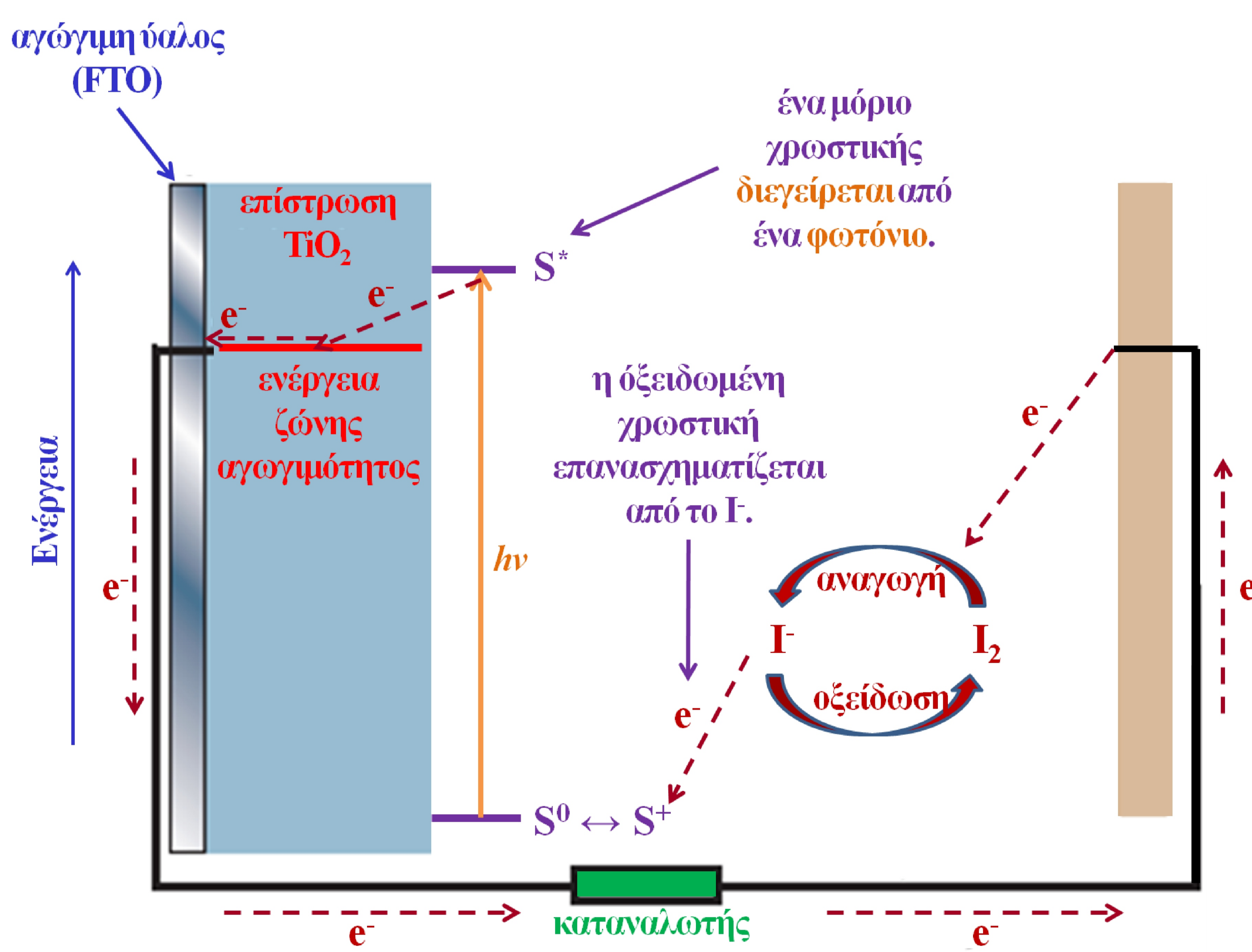
Ο συνολικός μηχανισμός μιας DSSC συνοψίζεται στο Σχήμα 1. Στη διάταξη μας χρησιμοποιούμε ως ημιαγωγό το TiO₂. Γενικά οι ημιαγωγοί από ηλεκτρονιακής πλευράς χαρακτηρίζονται από δυο ενεργειακά επίπεδα. Αυτό με τη χαμηλότερη ενέργεια καλείται ζώνη σθένους, ενώ αυτό που βρίσκεται σε υψηλότερη ενέργεια καλείται ζώνη αγωγιμότητας. Προκειμένου ο ημιαγωγός να μετατραπεί σε αγωγό πρέπει να βρεθεί ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητάς του. Για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας του διοξειδίου του τιτανίου απαιτείται ενέργεια που αντιστοιχεί στο υπεριώδες φως (UV). Πράγματι το TiO₂ είναι λευκό. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα επικαλύπτεται η επιφάνεια του ημιαγωγού με μια έγχρωμη ουσία, μια χρωστική (dye). Έτσι, τα μόρια της χρωστικής (S) απορροφούν το ηλιακό φως και διεγείρονται. Ακολούθως, το υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνιο από τη διεγερμένη κατάσταση της χρωστικής (S*) μεταφέρεται (εγχύεται) στην αγωγή ζώνη του ημιαγωγού, της οποίας η ενέργεια είναι μικρότερη (Σχήμα 1) και από εκεί στην αγωγή υάλου και το εξωτερικό κύκλωμα.

Όταν τα μόρια της χρωστικής φωτοοξειδώνεται λαμβάνονται ιόντα S⁺. Προκειμένου να κλείσει το κύκλωμα, τα ηλεκτρόνια που κινούνται στο εξωτερικό κύκλωμα θα πρέπει να επανασυνδεθούν με τα μόρια της οξειδωμένης χρωστικής. Το ρόλο του συνδέσμου μεταξύ των ηλεκτρονίων που φθάνουν στην επικαλυμμένη με γραφίτη υάλου και στα ιόντα S⁺ παίζει το οξειδοαναγωγικό ζεύγος I⁻/I₃⁻ (Σχήμα 1). Ένα ηλεκτρόνιο του κυκλώματος αρχικά ανάγει το ιώδιο σε ιωδιούχο ανιόν (I⁻) και το παραγόμενο ιόν ανάγει την οξειδωμένη μορφή της χρωστικής (S⁺). Συνολικά επιτυγχάνεται η αναγέννηση της χρωστικής και η διαδικασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας **φωτοκαταλυτικός κύκλος**.



Σχήμα 2:

Μερικές από τις χρωστικές που περιλαμβάνονται στους παρασκευασθέντες πολτούς. (α) Η βετανίνη, (β) μια εκ των ανθοκυανινών που απαντούν συχνά στα τρόφιμα, (γ) το λυκοπένιο και (δ) η φαιοφυτίνη α.



Σχήμα 1:

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης τύπου DSSC. Με S συμβολίζεται η χρησιμοποιούμενη χρωστική και S* είναι η διεγερμένη της κατάσταση. Το I₂ εντός του ηλεκτρολυτικού διαλύματος βρίσκεται υπό τη μορφή I₃⁻. Τα διακεκομμένα βέλη δίνουν την πορεία που ακολουθούν τα ηλεκτρόνια εντός της κυψέλης.

3. Οι χρωστικές

Στη βιβλιογραφία έχουν δοκιμαστεί δεκάδες χρωστικές, οι οποίες περιλαμβάνουν κυρίως σύμπλοκα μετάλλων μετάπτωσης^{3,5} αλλά και αρκετές χρωστικές που λαμβάνονται από φρούτα και άνηθ^{6,7}. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν ως διαλύματα βαφής του ημιαγωγού ζωμός και πολτός παντζαριών καθώς και πολτός μαύρων μούρων, κερασιών, φράουλας, τομάτας και καρπών ελιάς. Οι κύριες χρωστικές που απαντούν σε αυτούς τους καρπούς και είναι υπεύθυνες για το χρώμα τους φαίνονται στο Σχήμα 2.

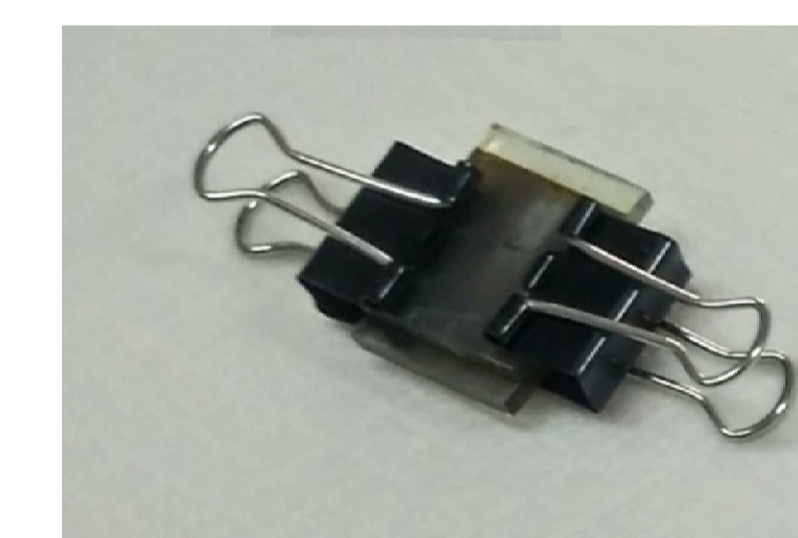
4. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Η τελική μορφή των ηλιακών κυψελών παρουσιάζεται στο Σχήμα 3, ενώ η πειραματική διάταξη των μετρήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Οι ληφθείσες τιμές της διαφοράς δυναμικού ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και της έντασης ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_{sc}) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Από τις μετρήσεις μας, επιβεβαιώσαμε την καλή συμπεριφορά των ανθοκυανινών ως βαφές, ενώ διαπιστώσαμε ότι ο οξινισμένος ζωμός παντζαριού δίνει πολύ καλά αποτελέσματα.

5. Βιβλιογραφία

1. Μακεδόνα X. *et al.* *Χημικά Χρονικά* **2017**, 79 (7), 10-13.
2. O' Regan, B.; Grätzel, M. *Nature* **1991**, 353, 737-740.
3. Urbani, M.; Grätzel, M.; Nazeeruddin, M. K.; Torres, T. *Chem. Rev.* **2014**, 114, 12330-12396.
4. Για παράδειγμα: <https://www.dongjin.com/en/product/product01.php?depth1=17> και <http://gcell.com/>.

5. Hagfeldt, A.; Boschloo, G.; Sun, L.; Kloo, L.; Pettersson, H. *Chem. Rev.* **2010**, 110, 6595-6663.
6. Narayan, M. R. *Renew. and Sust. Energy Rev.* **2012**, 16, 208-215.
7. Shalini, S.; Balasundarprabhu, R.; Prasanna, S.; Mallick, T. K.; Senthilarasu, S. *Renew. and Sust. Energy Rev.* **2015**, 51, 1306-1325.



Σχήμα 3:
Μια από τις ηλιακές κυψέλες που κατασκευάσαμε.



Σχήμα 4:
Η πειραματική μας διάταξη.

Πίνακας 1:

Τα πειραματικά μας αποτελέσματα.

DSSC (N)	Φωτοευαίσθητοποιητής	Διάρκεια Βαφής	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)
1	ζωμός βρασμένου παντζαριού	24 h	0,29	0,05
2	πολτός ωμού παντζαριού	2,5 h	0,31	0,32
3	οξινισμένος πολτός ωμού παντζαριού	2,5 h	0,31	0,94
4	πολτός από μούρα	0,25 h	0,41	2,31
5	πολτός από κεράσια	0,25 h	0,42	1,55
6	πολτός φράουλας	0,25 h	0,40	1,59
7	πολτός τομάτας	24 h	0,26	0,06
8	πολτός από ελιές	24 h	0,41	0,18
9	πολτός από καρύδι	0,25 h	0,38	0,32