

# ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

## 10<sup>ο</sup> ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

*στη μνήμη του Νίκου Κυριάκη*

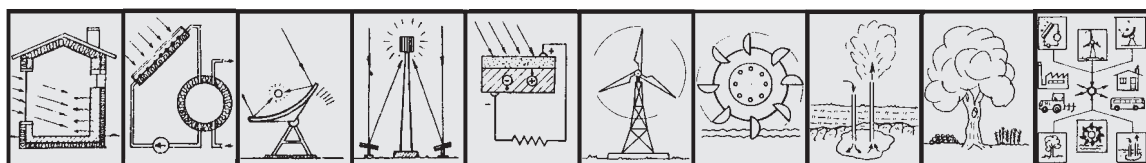
26 - 28 Νοεμβρίου 2014, Θεσσαλονίκη  
Συνεδριακό Κέντρο ΚΕ.Δ.Ε.Α. ΑΠΘ



### ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΤΟΜΟΣ Β΄

Διοργάνωση  
Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ

Υπό την αιγίδα της  
Πολυτεχνικής Σχολής ΑΠΘ





**IHT**



# ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

## 10<sup>ο</sup> ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ *στη μνήμη του Νίκου Κυριάκη*

26 - 28 Νοεμβρίου 2014, Θεσσαλονίκη  
Συνεδριακό Κέντρο ΚΕ.Δ.Ε.Α. ΑΠΘ

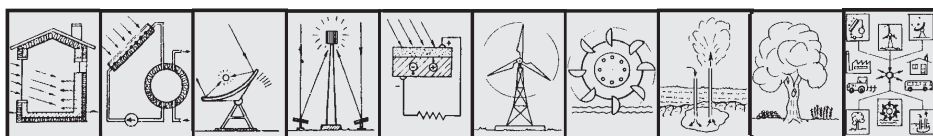


## ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

### ΤΟΜΟΣ Β΄

Διοργάνωση  
Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ

Υπό την αιγίδα της  
Πολυτεχνικής Σχολής ΑΠΘ



**10<sup>ο</sup> ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΤΟΥ Ι.Η.Τ. ΓΙΑ ΤΙΣ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ISSN 1108 - 3603**

**Επιμέλεια έκδοσης:**

Γ. Τσιλιγκιρίδης, Φρ. Τσιαμούρη

**Έκδοση:**

Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής

Τ.Θ. 487, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

541 24 Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310 996081, 2310 996084 - Fax: 2310 996087

<http://www.eng.auth.gr/IHT/>, e-mail: [IHT@eng.auth.gr](mailto:IHT@eng.auth.gr)

Σελιδοποίηση - Επιμέλεια εξωφύλλου:

**Δημήτρης Ε. Κατέρης**

**Εκτύπωση - Βιβλιοδεσία:**

Εκδόσεις Παχούδη



Κ. Μελενίκου 15, τ.κ. 546 35, Θεσσαλονίκη

Τηλ.: 2310 216 779, 2310 245 333

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ</b> .....	v
----------------------------	---

### ΤΟΜΟΣ Α΄

#### **ΧΑΙΡΕΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΕΔΡΟΥ ΤΟΥ Ι.Η.Τ. ΣΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ 10<sup>ου</sup> ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ**

<i>Γ. Τσιλιγκιρίδης</i> .....	1
-------------------------------	---

#### **ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ**

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ <i>Σ. Καλογήρου</i> .....	5
--	---

Η ΣΧΕΣΗ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Water – Energy Nexus). ΑΠΕ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ <i>Δ. Ασημακόπουλος</i> .....	25
---	----

ΗΛΙΟ-ΘΕΡΜΟ-ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Α. Κωνσταντόπουλος</i> .....	51
---	----

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ <i>Π. Χαβιαρόπουλος</i> .....	67
---	----

#### **ΑΙΟΛΙΚΑ**

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΚΗΠΟΣ. ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΣΥΝΥΠΑΡΞΗ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ <i>Δ. Κανελλόπουλος, Ε. Παλαιολούγκα</i> .....	85
---	----

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΑ ΕΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑ 14 ΕΤΩΝ <i>Κ. Γκαράκης, Κ. Λουκίδης, Ν. Τσαγκρίδης</i> .....	95
---	----

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ <i>Ι. Κρητικός, Κ. Γκαράκης, Κ. Λουκίδης, Ν. Τσαγκρίδης</i> .....	105
--	-----

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φείδαρος, Π. Τσίντζος, Χ. Σχοινάς</i> .....	113
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ <i>Ι. Ανδριανόπουλος, Β. Καλογερόπουλος, Κ. Βαφειάδης, Α. Τουρλιδάκης</i> .....	125
ΣΙΦΩΝΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ <i>Κ. Γκαράκης, Μ. Σιούτας</i> .....	135
ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ <i>Ν. Καρακάσης, Α. Μεσεμανώλης, Χ. Μαδεμλής, Ι. Κιοσκερίδης</i> .....	145
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΣΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ <i>Κ. Γκαράκης</i> .....	155
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ REANALYSIS ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ ΜΕ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Δ. Φουσέκης, Κ. Γκαράκης</i> .....	165
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ ΤΥΠΟΥ NASA 0012 ΚΑΙ S809 ΣΕ ΧΑΜΗΛΟ ΑΡΙΘΜΟ REYNOLDS ΚΑΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΗΣ, ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ <i>Ε. Δουβή, Δ. Μάργαρης</i> .....	175
ΝΑΡΚΟΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ ΔΥΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ & ΗΠΕΙΡΟΥ <i>Κ. Γκαράκης, Κ. Λουκίδης, Ζ. Σπένδος</i> .....	187
<b>ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ <i>Ε. Τζέν</i> .....	199
ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ: ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ <i>Π. Μπούτικος, Ε. Mohamed, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης</i> .....	209
ΑΜΕΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (ΧΩΡΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ) ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ <i>Χ.Σ. Καραβάς, Ε. Δημητρίου, Γ. Κυριακαράκος, Ε. Sh. Mohamed,</i> <i>Δ. Πυρομάλης, Α. Ντούνης, Κ. Αρβανίτης, Γ. Παπαδάκης</i> .....	219



ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ <i>Ι. Αναγνωστόπουλος, Δ. Παπαντώνης</i> .....	225
ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΕΝΘΥΛΑΚΩΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ <i>Κ. Αρβανίτης, Η. Παπανικολάου, Β. Μπελεσιώτης, Μ. Ασσαέλ</i> .....	237
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (ΥΑΦ) <i>Μ. Σταματιάδου, Δ. Κατσουρίνης, Γ. Κλουσάκου, Ι. Μανδηλαράς, Γ. Ζαννής, Μ. Φούντη</i> .....	247
<b>ΒΙΟΜΑΖΑ</b>	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΗΣ ΠΛΑΤΥΦΥΛΛΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΕΙΔΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ <i>Ι. Μπαρμπούτης, Χ. Λυκίδης</i> .....	263
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ <i>Ι. Φιλίππου</i> .....	273
ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΥΛΟΤΟΜΙΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Β. Φιλίππου, Ι. Φιλίππου</i> .....	287
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΑΛΓΗ <i>Π. Καματερού, Α. Ζαμπανιώτου</i> .....	299
ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ 2ης ΓΕΝΙΑΣ ΜΕΣΩ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΓΑΝΕΛΑΙΩΝ <i>Σ. Μπεξεργιάννη, Α. Δημητριάδης, Λ.Π. Χρυσικού</i> .....	305
ΒΙΩΣΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΘΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟΥ <i>Π. Μανάρα, Δ. Ρόβας, Α. Ζαμπανιώτου</i> .....	315
ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΓΙΑ ΣΚΟΠΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ <i>Ν. Χριστοδούλου, Π. Πολυκάρπου, Χ. Αντωνίου, Μ. Κατζουράκης, Ε. Μπαρμποπούλου, Ε. Στεφανουδάκη, Η. Χριστοφόρου, Α. Κυλίλη, Π. Φωκαΐδης</i> .....	325
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Α. Παλαιοχωρινός, Α. Κονδύλη, Χ. Παπαποστόλου, Ι. Καλδέλλης</i> .....	333

ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΑΕΡΙΟ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ <i>Σ. Τσιακμάκης, Δ. Μερτζής, Α. Δημαράτος, Ζ. Τουμασάτος, Ζ. Σαμαράς</i> .....	343
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ 1ης ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟΥ 2ης ΓΕΝΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΑ <i>Η. Σάλας, Σ. Γκειβανίδης, Ζ. Σαμαράς</i> .....	353
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΗΠΙΑΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ (ΦΡΥΞΗΣ) ΣΤΕΡΕΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ <i>Η. Χριστοφόρου, Π. Φωκαϊδής</i> .....	363

## ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ <i>Μ. Παπαχρήστου, Ε. Νικολαΐδου, Μ. Φυτίκας, Ν. Ανδρίτσος, Ν. Κολιός</i> .....	377
ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ-ΨΥΞΗΣ <i>Φ. Γαϊτάνης, Κ. Κατσιφάρακης, Δ. Μπίκας</i> .....	385
ΤΗΡΜΟΜΑΡ - ΕΝΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΕΡΓΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥ ΡΗΧΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ <i>Α. Αρβανίτης, Δ. Κανάρης, Π. Κρασάκης, Μ. Στεφούλη</i> .....	395
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΩΙΜΗΣΗ ΦΥΤΕΙΩΝ ΥΠΟ ΧΑΜΗΛΗ ΚΑΛΥΨΗ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΠΑΡΑΓΓΙΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΡΥΣΟΥΠΟΛΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ <i>Π. Δαλαμπάκης, Α. Ηλίας, Α. Λαδάς</i> .....	409
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ. ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ <i>Π. Δαλαμπάκης, Α. Ηλίας, Ν. Ανδρίτσος, Σ. Ξανθόπουλος, Α. Χριστοφορίδης</i> .....	419
ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΑΝΑΨΥΚΤΗΡΙΟΥ ΣΤΗ ΝΕΑ ΠΑΡΑΛΙΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ <i>Δ. Μπόζης, Κ. Ντένη</i> .....	429
ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΡΕΥΣΤΑ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Α. Σταμάτης, Ν. Ανδρίτσος</i> .....	437
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΤΟΥ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ <i>Α. Μιχόπουλος, Β. Βούλγαρη, Α. Τσικαλουδάκη, Θ. Ζαχαριάδης</i> .....	447

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ**

ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1983-2012 ΣΕ ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΟΛΕΙΣ <i>Θ. Σλίνη, Κ. Παπακώστας</i> .....	461
ΟΙ ΒΑΘΜΟΗΜΕΡΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ ΩΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1983-2012 ΓΙΑ ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ <i>Π. Ζαγανά-Παπαβασιλείου, Κ. Παπακώστας</i> .....	471
ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ <i>Κ. Μουστρής, Κ. Καββαδίας, Δ. Ζαφειράκης, Ι. Καλδέλλης, Α. Παλιατσός</i> .....	481
ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ, ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ <i>Α. Καζαντζίδης, Α. Ζάγουρας, Α. Μπάης, Ε. Νικητίδου, Β. Σαλαμαλίκης, Μ. Κόττη</i> .....	491
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΑΘΗ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 1999-2012 <i>Ι. Τσιμούρα, Γ. Παπαδόπουλος, Γ. Τσιλιγκιρίδης</i> .....	499
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΤΟΣ ΑΣΤΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ <i>Δ. Φειδαρος, Α. Μπαξεβάνου, Α. Τσαγκρασούλης, Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας</i> .....	509

**ΗΛΙΑΚΑ ΘΕΡΜΙΚΑ**

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΥΧΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ <i>Π. Μπότσαρης, Ε. Νταντής, Χ. Τοπάλης</i> .....	521
ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΤΜΟΥ <i>Π. Τσεκούρας, Ρ. Χριστοδουλάκη, Ε. Κορωνάκη, Γ. Τσεκούρας, Β. Λαμάρης, Π. Λαμάρης</i> .....	533
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΩΣ ΕΝΑ ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΤΑ ΚΤΙΡΙΑ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ <i>Φ. Αναστασίου, Γ. Μαρτινόπουλος</i> .....	543
ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΜΕ ΚΑΥΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Σ. Αλεξόπουλος</i> .....	551

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥΣ RANKINE <i>Π. Μαύρου, Α. Ι. Παπαδόπουλος, Μ. Stijerovic, Π. Σεφερλής, Ρ. Linke, Σ. Βουτετάκης</i> .....	559
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ <i>Δ. Γεωργίου, Κ. Μηλιδώνης</i> .....	569
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΩΝ ΧΩΡΩΝ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΖΕΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ <i>Ε. Κυριάκη, Ε. Γιαμά, Α.Μ. Παπαδόπουλος</i> .....	579
ΞΗΡΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Θ. Διαμαντόπουλος, Γ. Πανάρας, Β. Μπελεσιώτης, Γ. Κάραλης</i> .....	587
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ <i>Κ. Λυμπερόπουλος, Π. Μπότσαρης</i> .....	597
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΥΛΛΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ <i>Κ. Κίττας, Ο. Μερκούρης, Θ. Μπαρτζάνας, Ν. Κατσούλας</i> .....	607

## ΤΟΜΟΣ Β΄

### ΥΔΡΟΓΟΝΟ - ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

ΠΡΑΣΙΝΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΑΠΟ ΑΤΜΟΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΙΟΕΛΛΑΙΟΥ: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ <i>Ε. Ηρακλέους</i> .....	617
ΠΑΡΑΓΩΓΗ $H_2$ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ $H_2S$ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ $H_2O$ ΣΕ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ $Co/CeO_2$ <i>Τ. Κράια, Μ. Κονσολάκης, Μ. Ουζουνίδου, Β. Σταθόπουλος, Γ. Μαρνέλλος</i> .....	627
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ <i>Χ. Ζιώγου, Σ. Παπαδοπούλου, Σ. Βουτετάκης</i> .....	635
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΑΓΩΓΙΜΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ <i>Γ. Καστρινάκη, Ε. Δάσκαλος, Χ. Παγκούρα, Ν. Βλάχος, Γ. Σκεύης, Α. Κωνσταντόπουλος</i> .....	643

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ <i>Ν. Κακλίδης, Μ. Νεοφύτου, Γ. Μαρνέλλος, Μ. Κονσολάκης</i> .....	653
---	-----

## ΥΔΡΟΪΣΧΥΣ - ΚΥΜΑΤΑ

ΑΞΙΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ <i>Χ. Πανναράκη, Φ. Ξανθάκη, Δ. Ζαφειράκης, Ι. Καλδέλλης</i> .....	665
ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ <i>Α. Ιωάννου, Α. Κάλφας, Θ. Καραμπάς</i> .....	675

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΧΡΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ <i>Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, Π. Ζαφειράκης, Γ. Τρυπαναγνωστόπουλος, Ι. Καούρης</i> .....	689
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΜΗ-ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ <i>Ι. Τσαβλίδης, Π. Παναγιώτου, Ν. Μπόσινας, Κ. Υάκινθος</i> .....	699
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ/ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ <i>Ι. Καραθανάσης, Η. Παπανικολάου, Β. Μπελεσιώτης, Γ. Μπεργελές</i> .....	711
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΑΝΗΓΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ - ΙΣΟΤΙΜΙΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ <i>Γ. Παπαθανασίου, Θ. Τσούτσος, Α. Γιγαντίδου</i> .....	721
ΗΛΙΑΚΟ ΤΡΙΤΡΟΧΟ ΟΧΗΜΑ <i>Φ. Κουτελιέρης</i> .....	731
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΚΥΨΕΛΙΔΑ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ <i>Γ. Παγκράτης, Χ. Χρυσίνας, Ν. Στεφανάκης, Α. Μπουντουβής</i> .....	741
ΔΙΑΦΑΝΕΙΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΙΔΕΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Δ. Συγκρίδου, Α. Ραφομανίκης, Η. Σταθάτος, Ε. Βιτωράτος</i> .....	751
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 97 kW <sub>p</sub> <i>Κ. Γκαράκης, Π. Αξαόπουλος</i> .....	761

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΝΕΩΝ ΤΥΠΩΝ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ <i>Δ. Χαλκιάς, Γ. Παπανικολάου</i> .....	771
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΩΝ <i>Κ. Δερμεντζής, Ε. Αποστολίδου, Α. Μουμτζάκης</i> .....	781
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΙΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ <i>Γ. Γιοβρή-Σκόδρα, Α. Χασιακός, Θ. Γέμπος</i> .....	789

## ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ <i>Α. Γιγαντίδου</i> .....	801
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ΤΙΜΟΛΟΓΙΑΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ <i>Χ. Τζιώγας, Π. Γεωργιάδης</i> .....	807
Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ. Η ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΧΡΟΝΙΑ <i>Δ. Κατσαπρακάκης, Δ. Χρηστάκης</i> .....	817
Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΕ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΑ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ <i>Δ. Κατσαπρακάκης, Δ. Χρηστάκης</i> .....	827
ΤΟ ΕΡΓΟ «ΠΡΑΣΙΝΟ ΝΗΣΙ - ΑΪ - ΣΤΡΑΤΗΣ». ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΨΥΞΗ ΚΤΙΡΙΟΥ <i>Θ. Οικονόμου, Α. Μπένου, Ι. Χαλδέζος, Ο. Πολύζου, Ι. Χωροπανίτης, Κ. Καρύτσας, Β. Δρόσου</i> .....	839
ΕΜΠΟΔΙΑ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ <i>Σ. Καρύτσας, Ι. Χαλδέζος</i> .....	849
ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΡΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ <i>Σ. Μποέμη, Ε. Ζέρβας</i> .....	861
ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, ΕΝΑΣ ΕΘΝΙΚΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΟΣ ΔΡΟΜΟΣ <i>Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος</i> .....	869

**ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ**

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΤΑΞΗ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΦΕΙΣ ΚΑΙ ΔΩΜΑΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΩΝ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ <i>Φ. Μπουγιαπιώτη, Α. Μιχαήλ</i> .....	881
ΤΟΥΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΕΙΦΟΡΙΑ: Ο ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΛΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΑΝΗΣ <i>Κ. Παρπαίρη</i> .....	891
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ <i>Π. Χασιτάς, Δ. Μπίκας</i> .....	901
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΙΟΤΕΧΝΙΚΩΝ/ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ "ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΒΙΩΣΗΣ" <i>Μ. Ντάσιου, Ε. Ανδρέου</i> .....	911
ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΥΤΕΜΕΝΩΝ ΔΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ ΣΧΟΛΕΙΩΝ <i>Α. Ανδρουτσόπουλος, Γ. Κοτσίρης, Ε. Πολυχρόνη, Π. Νεκτάριος</i> .....	921
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ <i>Ε. Παμά, Ε. Κυριάκη, Π. Αντωνιάδου, Α.Μ. Παπαδόπουλος</i> .....	931
ΤΟΠΙΚΕΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΡΑΣΙΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΕΣ. Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΠΡΩΤΟΒΟΥΛΙΑ GREEN PARTNERSHIPS <i>Σ. Τουρνάκη, Α. Φωτίου, Θ. Τσούτσος</i> .....	941
ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ <i>Π. Κοσμόπουλος, Δ. Καμενή</i> .....	951
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΧΩΡΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΕΙΑΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΟΥΣ <i>Π. Κοσμόπουλος, Κ. Κουρτίδης, Α. Μουμτζάκης</i> .....	961
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΑΣΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΔΡΩΝ <i>Ε. Ανδρέου, Κ. Αζαρή</i> .....	971
ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΩΡΟΥ ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΗΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΠΟΤΑΜΙΑΣ ΕΚΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΔΗΜΟ ΞΑΝΘΗΣ <i>Κ. Στεφανόπουλος, Σ. Ζώρας</i> .....	981

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ**

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (ΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ) ΣΕ ΤΡΙΑ ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ <i>Π. Κοσμόπουλος, Ε. Αλεξοπούλου</i> .....	993
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΣΤΟΝ ΟΙΚΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ <i>Έ. Δασκαλάκη, Κ. Δρούτσα, Κ. Μπαλαράς, Σ. Κοντογιαννίδης</i> .....	1003
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΜΟΓΗΣ ΚΟΥΦΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <i>Π. Κοσμόπουλος, Α. Μουμτζάκης</i> .....	1015

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΙΡΙΩΝ**

ΒΑΣΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ <i>Κ. Μπαλαράς, Ε. Δασκαλάκη, Μ. Βιτάλη</i> .....	1025
NRG4CAST: ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ – ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΓΙΑ ΚΤΙΡΙΑΚΑ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑΤΑ <i>Α. Ανδρουτσόπουλος, Γ. Μαρκογιαννάκης, Ε. Κορωνάκη, Ρ. Χριστοδουλάκη, Κ. Καλαμπούκας, Γ. Χαμόδρακας</i> .....	1037
ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ <i>Κ. Δρούτσα, Σ. Κοντογιαννίδης, Έ. Δασκαλάκη, Κ. Μπαλαράς</i> .....	1047
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΕ ΣΧΟΛΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ <i>Ε. Τσαλικίδου, Α. Δημούδη, Π. Κοσμόπουλος, Σ. Ζώρας</i> .....	1057
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥΣ <i>Α. Κωνσταντινίδου</i> .....	1067
ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΕΝΑΚ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ <i>Α. Γαγλία, Α. Τσικαλουδάκη, Κ. Λάσκος, Β. Διαλυνάς</i> .....	1075
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΟ ΠΟΛΥΩΡΟΦΟ ΚΤΗΡΙΟ <i>Α. Μπαξεβάνου, Δ. Φείδαρος, Α. Τσαγκρασούλης</i> .....	1085
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΜΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΧΩΡΕΣ ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΟ ΚΛΙΜΑ <i>Ν. Παπαμανώλης, Μ. Δαβάκη, Μ. Σανουδάκη</i> .....	1095



**ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ**

ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΨΥΧΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

*Π. Αντωνιάδου, Κ. Λεωνιδάκη, Δ. Αναστασέλος, Θ. Καρλέση, Σ. Χαδιαράκου, Ε. Αλεξόπουλος, Μ. Κοντός, Μ. Σανταμούρης, Α.Μ. Παπαδόπουλος*..... 1103

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΦΟΙΤΗΤΙΚΩΝ ΕΣΤΙΩΝ ΚΟΜΟΤΗΝΗΣ –ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ ELIH-MED

*Π. Μπότσαρης, Κ. Λυμπερόπουλος, Σ. Τσάγκος, Δ. Παπαστεφανάκης, Μ. Δαμασιώτης, Ε. Χατζηγεωργίου, Χ. Νύχτης* ..... 1113

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΥΠΑΙΘΡΙΩΝ ΧΩΡΩΝ

*Π. Κοσμόπουλος, Α. Μουμτζάκης, Δ. Γρηγοριάδης*..... 1125

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΑΠΟΔΕΚΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ Κ.ΕΝ.Α.Κ.

*Δ. Αραβαντινός, Θ. Θεοδοσίου, Χρ. Καλογήρου* ..... 1137

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

*Κ. Αξαρλή, Β. Βασιλειάδης* ..... 1147

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΚΕΛΥΦΟΣ

*Κ. Τσικαλουδάκη, Θ. Θεοδοσίου, Δ. Αραβαντινός*..... 1157

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΓΕΦΥΡΩΝ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

*Δ. Αραβαντινός, Κ. Τσικαλουδάκη, Δ. Μπίκας*..... 1167

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΣΤΟΡΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΤΕΕ-KENAK ΚΑΙ RETSCREEN 4.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ  
*Φ. Γαϊτάνης, Δ. Μπίκας, Κ. Κατσιφαράκης* ..... 1179

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΑΠΕ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ**

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

*Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος, Μ. Σιγάλας, Ε. Καρανταγλη* ..... 1191

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩ-ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΑ, ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ, ΔΡΟΣΙΣΜΟ ΚΑΙ ΖΝΧ

*Α. Μερέση* ..... 1201

ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ ΜΕ ΑΔΙΑΦΑΝΗ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΑΕΡΙΖΟΜΕΝΗ ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΟΨΗ <i>Κ. Ορδουμποζάνης, Θ. Θεοδοσίου, Δ. Μπούρης</i> .....	1211
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΤΛΙΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ ΧΡΗΣΗΣ <i>Γ. Πανάρας, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης</i> .....	1221
ΚΤΗΡΙΑ ΙΣΟΣΚΕΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΑΠΕ, ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΞΕ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ <i>Α. Κυρίσης, Ε. Μαθάς, Ε. Τσελεπής</i> .....	1231
ΠΡΟΣΦΑΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΙΚΙΣΜΟΥ ZED-KIM <i>Π. Κοσμόπουλος, Δ. Γρηγοριάδης</i> .....	1241

**ΥΔΡΟΓΟΝΟ - ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

---



## ΠΡΑΣΙΝΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΑΠΟ ΑΤΜΟΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Ε. Ηρακλέους<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας, Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος

<sup>2</sup> Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ  
e-mail: [e.heracleous@ihu.edu.gr](mailto:e.heracleous@ihu.edu.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου και οι σοβαρές επιπτώσεις του στην ποιότητα ζωής και το περιβάλλον έχουν αναδείξει το υδρογόνο ως έναν από τους σημαντικότερους ενεργειακούς φορείς του μέλλοντος. Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου ή μηχανές εσωτερικής καύσης έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μόνο νερού, αφού δεν περιέχει άνθρακα στη δομή του. Καθώς όμως το υδρογόνο είναι ενεργειακός φορέας ο οποίος εξάγεται από κατεργασία πρωτογενών πηγών ενέργειας, το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα εξαρτάται τόσο από την τροφοδοσία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του (ορυκτή ή ανανεώσιμη) όσο και τη διεργασία που εφαρμόζεται. Είναι λοιπόν απαραίτητο οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου να αξιολογούνται περιβαλλοντικά με Ανάλυση Κύκλου Ζωής, μια μέθοδο που λαμβάνει υπόψη όλα τα βήματα στον κύκλο ζωής του καυσίμου.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται και αξιολογούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής υδρογόνου από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα μέσω πυρόλυσης και ακόλουθης ατμοαναμόρφωσης του παραγόμενου βιοελαίου, σε σχέση με τη συμβατική παραγωγή υδρογόνου από ατμοαναμόρφωση μεθανίου. Στο πλαίσιο της ανάλυσης, έγινε η υπόθεση ότι το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο κίνησης σε μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ μελετήθηκαν δύο τύποι βιομάζας ως τροφοδοσία: υπολείμματα ξυλείας (δασικά, βιομηχανικά κλπ) και ξυλώδης ενεργειακή καλλιέργεια μικρού περιτρώπου χρόνου (πιτά).

Τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής έδειξαν ότι η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα έχει σαν αποτέλεσμα την κατανάλωση λιγότερης ορυκτής ενέργειας, εξαιτίας κυρίως της ανανεώσιμης φύσης του καυσίμου η οποία οδηγεί σε μηδενική κατανάλωση ενέργειας κατά το στάδιο της καύσης. Παρόλα αυτά, οι συνολικές απαιτήσεις σε ενέργεια (ορυκτή και ανανεώσιμη) είναι υψηλότερες σε σχέση με το ορυκτό υδρογόνο, λόγω των υψηλότερων ενεργειακών αναγκών της διεργασίας παραγωγής πράσινου υδρογόνου και της μεθανόλης που χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση του βιοελαίου. Βελτιώσεις θα μπορούσαν να προκύψουν από την κάλυψη των παραπάνω από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το συνολικό όφελος από τη χρήση ανανεώσιμης πηγής ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου είναι παρόλα αυτά αδιαμφισβήτητο. Όσον αφορά το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα μέσω πυρόλυσης και αναμόρφωσης οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της τάξης του 40-50%, ανάλογα με τον τύπο βιομάζας που χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία. Η χρήση ενεργειακής καλλιέργειας επιβαρύνει τις εκπομπές θερμοκηπιακών αερίων, εξαιτίας κυρίως των εκπομπών N<sub>2</sub>O κατά το στάδιο της καλλιέργειας.

Λέξεις Κλειδιά: υδρογόνο, πυρόλυση βιομάζας, ατμοαναμόρφωση βιοελαίου, φυσικό αέριο, ανάλυση κύκλου ζωής

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο έχει αναδειχθεί ως ένα από τα σημαντικότερα καύσιμα του μέλλοντος καθώς μπορεί να συνεισφέρει θετικά στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο αποτελεί μια σοβαρή περιβαλλοντική πρόκληση με ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες. Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου ή μηχανές εσωτερικής καύσης έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή μόνο νερού, αφού δεν περιέχει άνθρακα στη δομή του. Καθώς όμως το υδρογόνο είναι ενεργειακός φορέας ο οποίος εξάγεται από κατεργασία πρωτογενών πηγών ενέργειας, το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα εξαρτάται τόσο από την τροφοδοσία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του (ορυκτή ή ανανεώσιμη) όσο και τη διεργασία που εφαρμόζεται. Είναι λοιπόν απαραίτητο οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου να αξιολογούνται περιβαλλοντικά με Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), μια μέθοδο που λαμβάνει υπόψη όλα τα βήματα στον κύκλο ζωής του καυσίμου.

Σήμερα, περίπου το 95% του συνολικά παραγόμενου υδρογόνου προέρχεται από κατεργασία ορυκτών καυσίμων, όπως φυσικό αέριο, νάφθα, αερίελλαιο και άνθρακα μέσω των διεργασιών της ατμοπυρόλυσης και μερικής οξειδωσης. Η βιομάζα έχει προταθεί ως εναλλακτική τροφοδοσία καθώς αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με κλειστό κύκλο άνθρακα. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από βιομάζα κυρίως μέσω δύο θερμοχημικών διεργασιών: αεριοποίηση και ταχεία πυρόλυση ακολουθούμενη από ατμοαναμόρφωση του παραγόμενου πυρολυτικού ελαίου. Το πυρολυτικό έλαιο, γνωστό και ως βιοέλλαιο, αποτελείται από ένα πολύπλοκο μίγμα οξέων, αλκοολών, αλδευδών, εστέρων, κετόνων, σακχάρων, φαινολών, φουρανίων και άλλων οξυγονούχων ενώσεων. Το πολύπλοκο αυτό μίγμα μπορεί να διαχωριστεί σε μια υδατική φάση, η οποία περιέχει κυρίως τις ενώσεις που προέρχονται από τους υδατάνθρακες της βιομάζας, και μια ελαιώδη φάση που περιέχει κυρίως ολιγομερή προερχόμενα από διάσπαση της λιγνίνης. Έως και σήμερα, οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν κυρίως επικεντρωθεί στην αναμόρφωση της υδατικής φάσης του βιοελαίου [1-5]. Πιο πρόσφατες μελέτες έχουν σαν στόχο την αναμόρφωση ολόκληρου του βιοελαίου, συμπεριλαμβανομένων και των ολιγομερικών ενώσεων από διάσπαση λιγνίνης [6,7].

Το υδρογόνο αποτελεί υποσχόμενο καύσιμο, όχι μόνο γιατί μπορεί να παραχθεί από μια σειρά διαφορετικών τροφοδοσιών και διεργασιών, αλλά και γιατί υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας από υδρογόνο (μηχανές εσωτερικής καύσης, αεροστρόβιλοι, κελιά καυσίμου κλπ) με μηδενικές εκπομπές και δυναμικά υψηλές αποδόσεις. Παρόλο που η μαζική χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο κίνησης προϋποθέτει την υπέρβαση αρκετών ακόμα προβλημάτων (χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, αποθήκευση καυσίμου στο όχημα, υποδομή κλπ), τα πλεονεκτήματα είναι πολλαπλά και καθιστούν ενδιαφέρουσα την έρευνα για παραγωγή και χρήση του. Η χρήση του υδρογόνου σε οχήματα εφοδιασμένα με κελιά καυσίμου αποτελεί μια από τις πλέον υποσχόμενες εφαρμογές, καθώς έχει υψηλή απόδοση και μηδενικές εκπομπές. Η απόδοση των οχημάτων με κελιά καυσίμου σε πραγματικές οδικές συνθήκες μπορεί να φτάσει και το 60%, σημαντικά υψηλότερη από την απόδοση της τάξης του 45% που επιτυγχάνεται όταν το υδρογόνο χρησιμοποιείται σε μηχανές εσωτερικής καύσης ( $H_2$ -ICE) [8]. Παρόλα αυτά, τα οχήματα με κελιά καυσίμου βρίσκονται ακόμα σε αρχικά στάδια ανάπτυξης, ενώ τα οχήματα  $H_2$ -ICE αποτελούν μια πιο ρεαλιστική μεσοπρόσθεση λύση. Σύμφωνα με τους Davis et al. [8], τα οχήματα  $H_2$ -ICE θα είναι διαθέσιμα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα με πολύ χαμηλότερο κόστος από τα αντίστοιχα οχήματα υδρογόνου με κελιά καυσίμου.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες ΑΚΖ που εξετάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υδρογόνου, παραγόμενο από διάφορες τροφοδοσίες και διεργασίες (π.χ. από φυσικό αέριο μέσω ατμοαναμόρφωσης, από ηλεκτρόλυση, από βιομάζα μέσω αεριοποίησης) και με χρήση ως καύσιμο σε διάφορες εφαρμογές (συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης, σε κελιά καυσίμου, σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα κλπ). Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει, στην ανοιχτή τουλάχιστον βιβλιογραφία, ανάλυση κύκλου ζωής που να εξετάζει την παραγωγή υδρογόνου από ατμοαναμόρφωση βιοελαίου παραγόμενο από πυρόλυση βιομάζας για χρήση σε όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης ( $H_2$ -ICE). Η ανασκόπηση της

βιβλιογραφίας οδήγησε στην εύρεση κάποιων εργασιών που εξετάζουν τεχνο-οικονομικές παραμέτρους και λειτουργικές συνθήκες για τη διεργασία της ατμοπυρόλυσης βιοελαίου με χρήση του λογισμικού Aspen [9-12].

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται και ποσοτικοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής υδρογόνου από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα μέσω πυρόλυσης και ακόλουθης ατμοαναμόρφωσης του βιοελαίου για χρήση σε οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης (H<sub>2</sub>-ICE). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής συγκρίνονται με τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συμβατικής παραγωγής υδρογόνου από ατμοαναμόρφωση φυσικού αερίου, η οποία θεωρείται ως το σύστημα αναφοράς καθώς αποτελεί σήμερα την κυριότερη διεργασία παραγωγής υδρογόνου.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργασία στοχεύει στην αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα σε σύγκριση με την παραγωγή του από ορυκτά καύσιμα (φυσικό αέριο) για χρήση ως καύσιμο μεταφοράς σε οχήματα με μηχανή εσωτερικής καύσης (H<sub>2</sub>-ICE). Τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικά δεδομένα για την ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα. Η γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος για την παρούσα μελέτη είναι η Ευρώπη. Έτσι, δεδομένα, παραδοχές και εκτιμήσεις λαμβάνονται υπόψη για την Ευρωπαϊκή Ένωση των 27, με χρονική περίοδο την παρούσα.

Ως λειτουργική μονάδα του συστήματος ορίζεται η κάλυψη απόστασης 100km από ένα όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης με καύσιμο υδρογόνο με βάση το Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης (NEDC). Τα δεδομένα απογραφικής ανάλυσης που συλλέχθηκαν περιλαμβάνουν την κατανάλωση ενέργειας (ορυκτής και ανανεώσιμης) και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O) για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής που εξετάστηκε. Άλλες αέριες εκπομπές, όπως NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, αιωρούμενα σωματίδια κλπ, δεν συμπεριλήφθηκαν εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για κάποια από τα στάδια ζωής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η απογραφική ανάλυση της παρούσας εργασίας δεν περιλαμβάνει περιβαλλοντικές εκροές που προκύπτουν από την παραγωγή του απαραίτητου εξοπλισμού και υποδομών για την εφαρμογή των σεναρίων που εξετάζονται.

Η αξιολόγηση των σεναρίων που εξετάστηκαν βασίστηκε στην ταξινόμηση των εισροών/εκροών σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

**Κατανάλωση ορυκτής ενέργειας (Abiotic depletion - ADP):** Αφορά τη χρήση ορυκτών πηγών ενέργειας και η μονάδα αναφοράς είναι MJeq.

**Κατανάλωση ενέργειας (Cumulative energy demand - CED):** Η κατηγορία αυτή αφορά την χρήση όλων των ενεργειακών πηγών, ανανεώσιμων ή μη. Στην περίπτωση βιομάζας, η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει και το ενεργειακό περιεχόμενο της βιομάζας. Η μονάδα αναφοράς είναι MJeq.

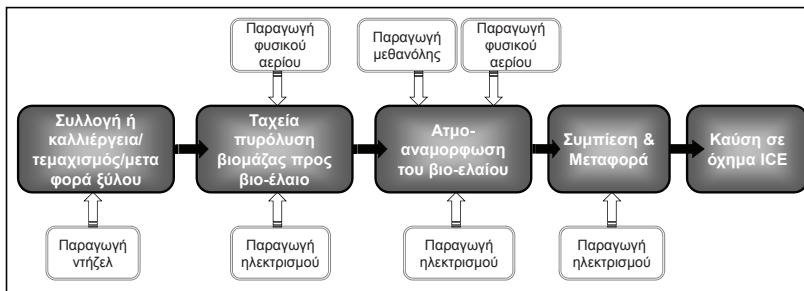
**Φαινόμενο θερμοκηπίου (Global warming - GWP):** Αφορά την επιβάρυνση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο αποτιμάται με το δυναμικό υπερθέρμανσης. Η μονάδα αναφοράς είναι το CO<sub>2</sub>-eq. Τα δυναμικά υπερθέρμανσης που χρησιμοποιήθηκαν για το CH<sub>4</sub> και το N<sub>2</sub>O είναι 21 και 310 αντίστοιχα.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι τα ακόλουθα:

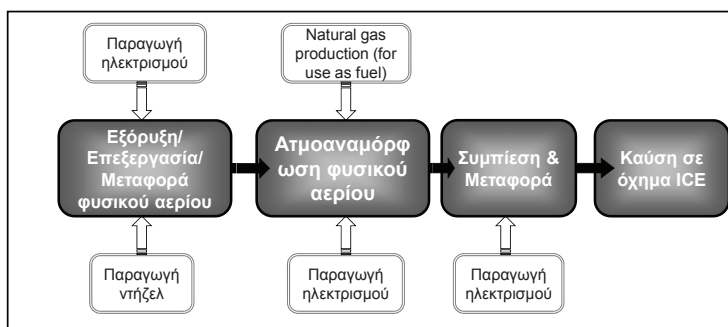
**Σενάριο A:** Ταχεία πυρόλυση λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας για την παραγωγή βιοελαίου και ακόλουθη ατμοαναμόρφωση του βιοελαίου σε υδρογόνο. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τροδοφοσίες: **A1.** υπολειμματικές μορφές ξύλου, οι οποίες αποτελούνται γενικά από υπολείμματα δασικής ξυλείας, παραπροϊόντα της βιομηχανίας χαρτιού και πολτού, παραπροϊόντα της βιομηχανίας ξύλου (πριονίδι κλπ) και άλλα, και **A2.** ξυλώδης ενεργειακή καλλιέργεια ιτιάς

### Σενάριο Β: Ατμοαναμόρφωση φυσικού αερίου προς υδρογόνο – σενάριο αναφοράς

Τα όρια και τα στάδια του κύκλου ζωής (κύρια και βοηθητικά) που συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη για τα σενάρια αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 1 και 2 αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Όρια συστήματος και στάδια ζωής στον κύκλο ζωής του υδρογόνου από πυρόλυση βιομάζας και ατμοαναμόρφωση βιοελαίου για χρήση ως καύσιμο σε οχήματα ICE από υπολείμματα ξυλείας ή ενεργειακή καλλιέργεια ιπιάς.



Εικόνα 2: Όρια συστήματος και στάδια ζωής στον κύκλο ζωής του υδρογόνου παραγόμενο από ατμοαναμόρφωση φυσικού αερίου για χρήση ως καύσιμο σε οχήματα ICE.

## 3. ΑΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 3.1. ΣΕΝΑΡΙΟ Α: ΤΑΧΕΙΑ ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΛΟΥΘΗ ΑΤΜΟΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ ΣΕ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Στάδιο τροφοδοσίας βιομάζας: Όπως προαναφέρθηκε εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι βιομάζας για χρήση ως τροφοδοσία: υπολειμματικές μορφές ξύλου και ενεργειακή καλλιέργεια ιπιάς. Και στις δύο περιπτώσεις το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη συλλογή ή καλλιέργεια/συγκομιδή της βιομάζας και τον τεμαχισμό και μεταφορά της στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου. Οι ενεργειακές απαιτήσεις και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίων για την περίπτωση της χρήσης υπολειμμάτων ξυλείας λήφθηκαν από την βάση δεδομένων GEMIS [13] για μια μέση απόσταση μεταφοράς 50km. Στην περίπτωση της ενεργειακής καλλιέργειας ιπιάς, λήφθηκαν δεδομένα που αφορούν μέσες ευρωπαϊκές τιμές για δασικές καλλιέργειες και περιλαμβάνουν τη χρήση λιπάσματος και την κατανάλωση ντήζελ για λειτουργία των αγροτικών μηχανημάτων, καθώς και την ενέργεια και εκπομπές για την



παραγωγή αυτών [13]. Όπως και στην περίπτωση των υπολειμμάτων, υποτέθηκε μια μέση απόσταση μεταφοράς προς τη μονάδα παραγωγής ίση με 50 km.

Ταχεία πυρόλυση βιομάζας προς βιοέλαιο: Κατά τη διεργασία αυτή, η βιομάζα θερμαίνεται με ταχείς ρυθμούς σε υψηλές θερμοκρασίες απουσία αέρα. Το κύριο προϊόν, το βιοέλαιο, λαμβάνεται με απόδοση έως και 80%κβ, μαζί με αέρια και στερεά παραπροϊόντα τα οποία χρησιμοποιούνται για την μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της διεργασίας. Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών κατά το στάδιο αυτό έγινε μοντελοποίηση της διεργασίας ταχείας πυρόλυσης BioTherm της Dynamotive [14], με βάση δεδομένα τεχνο-οικονομικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγησή της [15]. Η δυναμικότητα της μονάδας λήφθηκε ίση με 400 τόνους/μέρα (υγρή βιομάζα). Η διεργασία ταχείας πυρόλυσης βιομάζας περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: την προκατεργασία της βιομάζας (τεμαχισμός, ξήρανση), την αντίδραση πυρόλυσης και τη συλλογή των προϊόντων. Θεωρήθηκε ότι η βιομάζα λαμβάνεται με υγρασία 45% η οποία μετά την ξήρανση φτάνει το 10%. Η απαιτούμενη ενέργεια για την ξήρανση λαμβάνεται από καύση του στερεού παραπροϊόντος της διεργασίας. Υπολογισμοί έχουν δείξει ότι με απόδοση σε στερεό της τάξης του 21%κβ., υπάρχει ικανή ποσότητα καυσίμου για κάλυψη των θερμικών αναγκών της ξήρανσης [15]. Ο τεμαχισμός της βιομάζας απαιτεί ηλεκτρισμό. Για τους υπολογισμούς στην περίπτωση αυτή, αλλά και όπου αλλού γίνεται κατανάλωση ηλεκτρισμού στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την μέση παραγωγή ηλεκτρισμού στην ΕΕ-27 από την βάση δεδομένων ELCD II [16]. Η τεμαχισμένη βιομάζα τροφοδοτείται στη συνέχεια σε αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης στους 450°C όπου μετατρέπεται σε στερεό υπόλειμμα (char), συμπτυκνώσιμα και μη-συμπυκνώσιμα αέρια με μέση απόδοση 21, 66 και 13% κ.β. αντίστοιχα [15]. Σύμφωνα με δεδομένα της Dynamotive [14], η πυρόλυση βιομάζας απαιτεί 2.5 MJ ενέργειας ανά κιλό παραγόμενου βιοελαίου. Το 60% των απαιτήσεων αυτών καλύπτονται από τα μη-συμπυκνώσιμα αέρια που παράγονται ως παραπροϊόν, ενώ το υπόλοιπο καλύπτεται από φυσικό αέριο. Για το φυσικό αέριο, λήφθηκαν δεδομένα από τη βάση ELCD II για μέσο μίγμα φυσικού αερίου στην ΕΕ-27 [17]. Οι εκπομπές από την καύση του φυσικού αερίου λήφθηκαν από το GREET [18], για καύση μεθανίου σε βιομηχανικούς καυστήρες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι καθώς θεωρήθηκε ότι όλα τα παραπροϊόντα της διεργασίας καταναλώνονται εσωτερικά για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων της μονάδας, το βιοέλαιο αποτελεί το μοναδικό προϊόν της ταχείας πυρόλυσης και όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποδόθηκαν σε αυτό.

Ατμοαναμόρφωση βιοελαίου προς υδρογόνο: Για την παραγωγή υδρογόνου, θεωρήθηκε ότι ολόκληρο το κλάσμα του βιοελαίου αντιδρά προς υδρογόνο σε μονάδα ατμοαναμόρφωσης με αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης παρουσία εμπορικού καταλύτη νικελίου. Τα δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας στη διεργασία λήφθηκαν από τους Evans et al. [12]. Πριν την αντίδραση, το βιοέλαιο αναμιγνύεται με μεθανόλη σε ποσοστό 10%κ.β. για μείωση της πυκνότητας και του ιξώδους του και για σταθεροποίηση καθώς η μεθανόλη αποτρέπει το διαχωρισμό του σε υδατική και ελαιώδη φάση [19]. Δεδομένα για παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο με χρήση φυσικού αερίου ΕΕ-27 λήφθηκαν από την βάση δεδομένων GEMIS [13] και περιλαμβάνουν την εξόρυξη, μετατροπή και μεταφορά και διανομή της μεθανόλης. Το μίγμα βιοελαίου/μεθανόλης εισάγεται στον αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης, ο οποίος λειτουργεί στους 650°C αυτοθερμικά με λόγο οξυγόνου/άνθρακα ίσο με 0.7 και λόγο ατμού/άνθρακα 2.5. Τα προϊόντα της αντίδρασης (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και CH<sub>4</sub>) ψύχονται, συμπιέζονται και εισάγονται σε ένα δεύτερο αντιδραστήρα μετάθεσης νερού (water gas shift) όπου το CO αντιδρά με H<sub>2</sub>O προς επιπλέον παραγωγή H<sub>2</sub>. Τέλος το υδρογόνο διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα προϊόντα με μονάδα PSA (pressure swing adsorption). Η απόδοση σε υδρογόνο θεωρήθηκε ίση με 11.9%κ.β. [12]. Η θερμότητα που ανακτάται από τα απαέρια της μονάδας PSA και τα αέρια προϊόντα της ατμοαναμόρφωσης αξιοποιείται για την παραγωγή του ατμού για τη διεργασία. Η λειτουργία των αντλιών, συμπιεστών και η μονάδα διαχωρισμού του αέρα καταναλώνει ηλεκτρισμό που λαμβάνεται από το συμβατικό δίκτυο και υπολογίστηκε με βάση των παραγωγή ηλεκτρισμού στην ΕΕ-27 [16].

Συμπίεση & μεταφορά υδρογόνου: Μετά την παραγωγή του, το υδρογόνο μεταφέρεται με αγωγούς στο πρατήριο ανεφοδιασμού σε απόσταση 50 km. Η πίεση του υδρογόνου κατά την παραγωγή του είναι αρκετά υψηλή για την μεταφορά του και δεν απαιτείται επιπλέον συμπύεση, ενώ φτάνει τελικά στο σταθμό με πίεση 1.5 MPa. Για τον ανεφοδιασμό οχήματος με καύσιμο υδρογόνο απαιτείται πίεση 45 MPa, άρα το υδρογόνο συμπιέζεται από τα 1.5 στα 45 MPa με κατανάλωση ηλεκτρισμού ίση με 0.018 kWh/MJ H<sub>2</sub> και απώλεια σε υδρογόνο της τάξης του 2% [13].

Καύση υδρογόνου σε όχημα ICE: Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την καύση του υδρογόνου σε συμβατικό όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης και την κάλυψη 100 km με βάση τον Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης (NEDC). Τα δεδομένα λήφθηκαν από την AKZ της CONCAWE-JRC-Eucar [20], όπου η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης σε κατάλληλο λογισμικό για κοινό ευρωπαϊκό 5-θέσιο όχημα τύπου VW Golf. Με βάση τα παραπάνω, η κατανάλωση ενέργειας για κάλυψη 100 km υπολογίστηκε ίση με 167.5 MJ H<sub>2</sub>/100 km. Η χρήση του υδρογόνου στο όχημα δεν οδηγεί σε εκπομπές αέριων ρύπων.

### 3.2. ΣΕΝΑΡΙΟ Β: ΑΤΜΟΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΠΡΟΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Εξόρυξη/επεξεργασία/μεταφορά φυσικού αερίου: Καθώς η γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος για την παρούσα μελέτη είναι η Ευρώπη, θεωρήθηκε ότι το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία για την παραγωγή υδρογόνου είναι το μέσο μίγμα φυσικού αερίου στην ΕΕ-27. Το μίγμα αποτελείται από την ευρωπαϊκή παραγωγή φυσικού αερίου, καθώς και από εισαγωγές από χώρες εκτός ΕΕ. Το ευρωπαϊκό φυσικό αέριο προέρχεται κυρίως από πετρελαιοπηγές στην Αγγλία, Νορβηγία και Ολλανδία, όπου λαμβάνεται μαζί με το αργό πετρέλαιο, και συμπληρώνεται από εισαγωγές κυρίως από Ρωσία και Αλγερία [20]. Δεδομένα για το μέσο Ευρωπαϊκό μίγμα λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων ELCD II [17]. Τα δεδομένα αφορούν όλη την εφοδιαστική αλυσίδα του φυσικού αερίου, δηλ. εξόρυξη, παραγωγή, επεξεργασία (αποθείωση) και στην περίπτωση της εισαγωγής LNG, υγροποίηση/αεριοποίηση του LNG, μεταφορά στην Ευρώπη και διανομή στους τελικούς καταναλωτές. Περιλαμβάνονται επίσης οι απώλειες που προκύπτουν κατά την μεταφορά είτε με αγωγούς είτε με πλοία.

Ατμοαναμόρφωση φυσικού αερίου προς υδρογόνο: Η ατμοαναμόρφωση του φυσικού αερίου προς υδρογόνο αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία και αποτελεί σήμερα την κύρια διεργασία για παραγωγή υδρογόνου. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής θεωρήθηκε ότι η μονάδα ατμοαναμόρφωσης έχει δυναμικότητα 1.5 εκατομμύρια Nm<sup>3</sup>/μέρα (τυπική δυναμικότητα μονάδων ατμοαναμόρφωσης) [21]. Δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές λήφθηκαν από τεchnο-οικονομική μελέτη του NREL [21].

Κατά τη διεργασία, το φυσικό αέριο προ-επεξεργάζεται για την απομάκρυνση των θειούχων ενώσεων και την μετατροπή τους σε H<sub>2</sub>S. Στη συνέχεια, αναμιγνύεται με ατμό και τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα. Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης εισέρχεται στη συνέχεια σε αντιδραστήρα μετάθεσης νερού υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας για περαιτέρω αντίδραση του CO προς H<sub>2</sub>. Το υδρογόνο διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα αέρια σε μονάδα PSA. Η μονάδα PSA παράγει ένα αέριο παραπροϊόν που περιέχει CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO και N<sub>2</sub> το οποίο χρησιμοποιείται για να καλύψει τις θερμικές ανάγκες του αναμορφωτή. Απαιτείται επιπλέον ένα μικρό ποσοστό φυσικού αερίου (4.4% της συνολικά απαιτούμενης θερμότητας στον αναμορφωτή) για την συνολική κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων [21]. Οι εκπομπές από την καύση του φυσικού αερίου λήφθηκαν από το GREET [18], για καύση μεθανίου σε βιομηχανικούς καυστήρες. Η λειτουργία των αντλιών, συμπιεστών και η μονάδα διαχωρισμού του αέρα καταναλώνει ηλεκτρισμό που λαμβάνεται από το συμβατικό δίκτυο και υπολογίστηκε με βάση την παραγωγή ηλεκτρισμού στην ΕΕ-27 [16]. Συνοψίζοντας, η κατανάλωση ενέργειας στη διεργασία της ατμοαναμόρφωσης περιλαμβάνει το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται για καύση στον ατμοαναμορφωτή, ηλεκτρισμό για την λειτουργία των αντλιών και τις απώλειες του συστήματος.

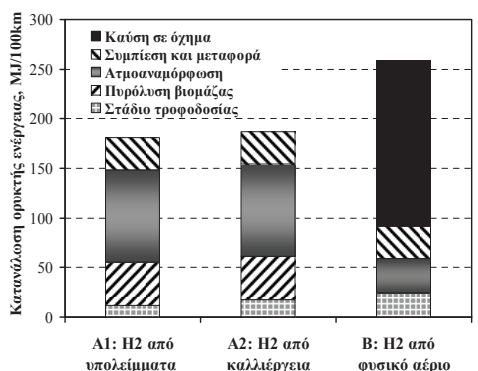
Τα στάδια συμπύεσης και μεταφοράς υδρογόνου μετά την παραγωγή του από φυσικό αέριο, καθώς και το στάδιο χρήσης του σε όχημα ICE είναι τα ίδια με αυτά που έχουν ήδη αναφερθεί στο Σενάριο Α και δεν επαναλαμβάνονται για λόγους συντομίας.

#### 4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

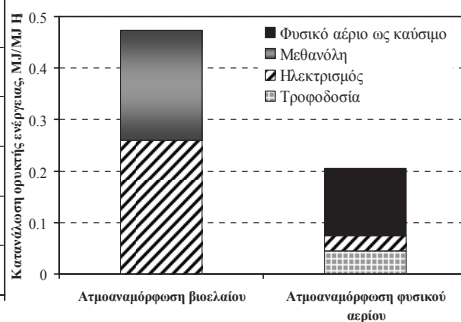
##### 4.1. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΟΡΥΚΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ADP)

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η επίπτωση του κάθε σεναρίου που εξετάστηκε στην κατανάλωση ορυκτών πηγών ενέργειας, καθώς και η συνεισφορά του κάθε μεμονωμένου σταδίου του κύκλου ζωής του υδρογόνου. Το διάγραμμα δείχνει ξεκάθαρα ότι το υδρογόνο παραγόμενο από βιομάζα (είτε υπολειμματική είτε από καλλιέργεια) οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση ορυκτής ενέργειας σε σχέση με το υδρογόνο από φυσικό αέριο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το τελικό καύσιμο υδρογόνο είναι ανανεώσιμο και δεν υπάρχει κατανάλωση ορυκτής ενέργειας κατά το στάδιο της καύσης. Πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι η χρήση ορυκτής ενέργειας στα στάδια που προηγούνται της καύσης (στάδιο τροφοδοσίας και παραγωγής) είναι πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση χρήσης βιομάζας σε σχέση με το φυσικό αέριο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί εν μέρει στο γεγονός ότι κατά τη χρήση βιομάζας προηγείται αρχικά η πυρόλυσή της και μετά η ατμοαναμόρφωση, υπάρχει δηλαδή ένα επιπλέον στάδιο που δεν υπάρχει στην περίπτωση του φυσικού αερίου. Ακόμα όμως και το στάδιο της ατμοαναμόρφωσης είναι πολύ πιο ενεργοβόρο στην περίπτωση της βιομάζας. Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται οι πηγές κατανάλωσης ορυκτής ενέργειας στην ατμοαναμόρφωση βιοελαίου και φυσικού αερίου. Φαίνεται πολύ καθαρά ότι η σημαντικά μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στην περίπτωση του βιοελαίου οφείλεται στη χρήση μεθανόλης, που χρησιμοποιείται για σταθεροποίηση του βιοελαίου και την αποφυγή σχηματισμού κωκ στον καταλύτη. Η χρήση βιομεθανόλης θα βελτίωνε σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα του υδρογόνου από βιομάζα. Παρόλα αυτά, η κατανάλωση ηλεκτρισμού είναι επίσης κατά πολύ μεγαλύτερη στην ατμοαναμόρφωση βιοελαίου. Στα πλαίσια της εργασίας υποτέθηκε ότι η διεργασία της ατμοαναμόρφωσης λειτουργεί αυτοθερμικά, δηλ. παρουσία οξυγόνου που παρέχει τη θερμότητα που απαιτείται για την αντίδραση. Το οξυγόνο λαμβάνεται από μονάδες διαχωρισμού αέρα που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρισμού. Η χρήση ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επίσης θα βελτίωνε σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα του υδρογόνου από βιομάζα.

Όσον αφορά τη χρήση υπολειμματικής βιομάζας ή ενεργειακής καλλιέργειας, φαίνεται ότι η καλλιέργεια της ιπτάς επιβαρύνει το ισοζύγιο κατανάλωσης ορυκτής ενέργειας κατά 5% σε σχέση με τη χρήση υπολειμμάτων ξυλείας.



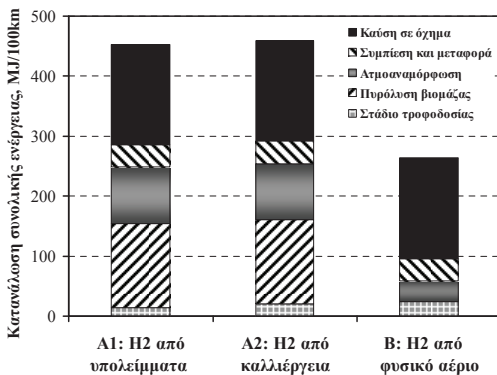
Εικόνα 3: Επίπτωση των σεναρίων παραγωγής υδρογόνου στην κατανάλωση ορυκτής ενέργειας.



Εικόνα 4: Ανάλυση της κατανάλωσης ορυκτής ενέργειας στην διεργασία ατμοαναμόρφωσης.

## 4.2. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (CED)

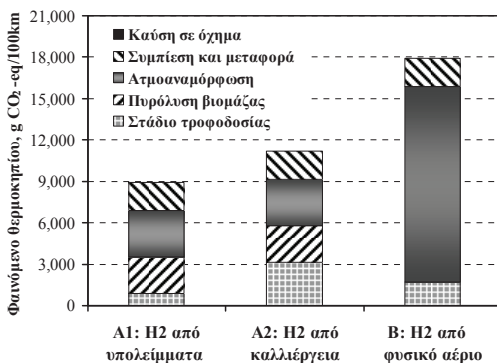
Η συνολική κατανάλωση ενέργειας (ανανεώσιμης και ορυκτής) στα διάφορα σενάρια παρουσιάζεται στην εικόνα 5. Στην περίπτωση αυτή, το ενεργειακό ισοζύγιο ευνοεί το σενάριο παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο σε σχέση με τη βιομάζα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτής της περιβαλλοντικής επίπτωσης, η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα επιβαρύνεται με την ανανεώσιμη ενέργεια που περιέχεται στην βιομάζα και το βιοέλαιο που χρησιμοποιούνται ως τροφοδοσία. Η μεγάλη αύξηση στην



Εικόνα 5: Επίπτωση των σεναρίων παραγωγής υδρογόνου στην κατανάλωση συνολικής ενέργειας.

κατανάλωση ενέργειας είναι ένδειξη για τη χαμηλή απόδοση στη μετατροπή του βιοελαίου σε υδρογόνο σε σχέση με τη μετατροπή του φυσικού αερίου και καταδεικνύει τις σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο τροφοδοσιών. Υπενθυμίζεται ότι το βιοέλαιο έχει ένα λόγο H/C ίσο με περίπου 1.3 [12], ενώ αντίθετα ο λόγος αυτός στο φυσικό αέριο είναι ίσος με 4. Η διαφορά αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη αν λάβουμε υπόψη τον αρχικό λόγο H/C στη βιομάζα. Είναι λοιπόν αναμενόμενο ότι μεγαλύτερη ποσότητα βιομάζας χρειάζεται να καταναλωθεί σε σχέση με φυσικό αέριο για να λάβουμε την ίδια ποσότητα υδρογόνου.

## 4.3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ (GWP)



Εικόνα 6: Επίπτωση των σεναρίων παραγωγής υδρογόνου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

χρησιμοποιείται προέρχεται από υπολείμματα ξυλείας, το ποσοστό αυτό ανεβαίνει στο 50%. Η ανάλυση της συνεισφοράς του κάθε επιμέρους σταδίου του κύκλου ζωής στη συνολική επίπτωση που επίσης παρουσιάζεται στην εικόνα 6 δείχνει ότι οι αυξημένες εκπομπές κατά τη χρήση φυσικού αερίου προέρχονται από τη διεργασία της ατμοαναμόρφωσης. Η παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του άνθρακα από το μόριο του μεθανίου, το οποίο εκπέμπεται στα απαέρια ως CO<sub>2</sub>. Φυσικά, το ίδιο συμβαίνει και κατά την ατμοαναμόρφωση του βιοελαίου, αλλά στην περίπτωση αυτή το CO<sub>2</sub> που παράγεται προέρχεται από βιομάζα και δεν προσμετράτε στις εκπομπές θερμοκηπιακών αερίων.

Τέλος, η επίδραση των διαφόρων σεναρίων παραγωγής υδρογόνου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου εξαιτίας των εκπομπών CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O παρουσιάζεται στην εικόνα 6. Πρέπει να σημειωθεί ότι λήφθηκαν υπόψη μόνο οι εκπομπές CO<sub>2</sub> προερχόμενου από ορυκτές πηγές ενέργειας. Το διάγραμμα καταδεικνύει ότι και τα δύο σενάρια παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα έχουν θετική επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η παραγωγή υδρογόνου από ενεργειακή καλλιέργεια ιπίας οδηγεί σε μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 37% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, ενώ όταν η βιομάζα που

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι η μόνη περιβαλλοντική επίπτωση στην οποία καταδεικνύονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο τύπων βιομάζας που μελετήθηκαν. Η χρήση βιομάζας προερχόμενης από ενεργειακές καλλιέργειες επιβαρύνει τις εκπομπές κατά ~20%. Αυτή η μεγάλη αύξηση οφείλεται στις εκπομπές N<sub>2</sub>O, ενός αερίου με πολύ μεγάλο δυναμικό υπερθέρμανσης, που εκπέμπεται λόγω της χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων κατά το στάδιο της καλλιέργειας, αλλά και κατά το στάδιο παραγωγής αυτών.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση κύκλου ζωής της παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα μέσω πυρόλυσης και ακόλουθης ατμοαναμόρφωσης του παραγόμενου βιοελαίου σε σύγκριση με την παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο για χρήση σε οχήματα με μηχανή εσωτερικής καύσης έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Η σύγκριση των δύο παραπάνω σεναρίων όσον αφορά την κατανάλωση ορυκτής ενέργειας κατέδειξε ότι η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα, είτε αυτή προέρχεται από υπολείμματα ξυλείας ή ξυλώδη ενεργειακή καλλιέργεια, οδηγεί σε σημαντική βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος του υδρογόνου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανανεώσιμο χαρακτήρα της βιομάζας που χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία, και κατ' επέκταση τον ανανεώσιμο χαρακτήρα του καυσίμου αυτού κάθε αυτού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μηδενική κατανάλωση ορυκτής ενέργειας κατά το στάδιο της καύσης στο όχημα. Παρόλα αυτά, τα στάδια που προηγούνται της καύσης είναι περισσότερο ενεργοβόρα στην περίπτωση της παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα. Η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας εντοπίζεται στη διεργασία αναμόρφωσης βιοελαίου, εξαιτίας κυρίως της ορυκτής μεθανόλης που χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση του βιοελαίου και τη μείωση της παραγωγής κωκ στη διεργασία αλλά και της αυξημένης κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Περαιτέρω βελτίωση στο ενεργειακό αποτύπωμα του βιο-υδρογόνου μπορεί να προέλθει με χρήση μεθανόλης και ηλεκτρισμού παραγόμενων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παρόλο που η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα απαιτεί μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από την ατμοαναμόρφωση φυσικού αερίου, το γενικότερο όφελος που προκύπτει από τη χρήση μιας τροφοδοσίας με κλειστό κύκλο άνθρακα για παραγωγή υδρογόνου ως καύσιμο μεταφορών είναι αδιαμφισβήτητο. Ο κύκλος ζωής του υδρογόνου από βιομάζα παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, η παραγωγή υδρογόνου από ενεργειακή καλλιέργεια ιτίας προκαλεί μείωση της τάξης του 37% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με το υδρογόνο από φυσικό αέριο. Η μείωση αυτή αυξάνεται στο 50% όταν το υδρογόνο παράγεται από υπολείμματα ξυλείας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zabaniotou, A., Ioannidou, O., Antonakou, E., Lappas, A. A., 2008, "Experimental study of pyrolysis for potential energy, hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass," *Int J Hydrogen Energy*, 33(10), pp. 2433-44.
- [2] Wang, D., Czernik, S., Montane, D., Mann, M., Chomet, E., 1997, "Biomass to hydrogen via fast pyrolysis and catalytic steam reforming of the pyrolysis oil or its Fractions," *Ind Eng Chem Res*, 36, pp. 1507-18.
- [3] Vagia, Ech., Lemonidou, A. A., 2008, "Hydrogen production via steam reforming of bio-oil components over calcium aluminate supported nickel and noble metal catalysts," *Appl Catal A*, 351, pp.111-21.
- [4] Huber, G. W. and Dumesic, J. A., 2006, "An overview of aqueous-phase catalytic processes for production of hydrogen and alkanes in a biorefinery," *Catal Today*, 111(1-2), pp. 119-32.
- [5] Kechagiopoulos, P. N., Voutetakis, S. S., Lemonidou, A. A., Vasalos I. A., 2006, "Hydrogen production via steam reforming of the aqueous phase of bio-oil in a fixed bed reactor," *Energy Fuels*, 20(5), pp. 2155-63.

- [6] Czernik, S., Evans, R., French, R., 2007, "Hydrogen from biomass production by steam reforming of biomass pyrolysis oil," *Catal Today*, 129, pp. 265-8.
- [7] Chernik, S., Wang, D., Montane, D., Chornet, E., 1996, In: Bridgwater AV, Boocock DGB, editors. *Developments in thermochemical biomass conversion*. Blackie Academic & Professional, London, pp. 672-86.
- [8] Rioche, C., Kulkarni, S., Meunier, F., Breen, J., Burch, R., 2005, "Steam reforming of model compounds and fast pyrolysis bio-oil on supported noble metal catalysts," *Appl Catal B*, 61, pp. 130-9.
- [9] Sarkar, S. and Kumar, A., 2010, "Large-scale biohydrogen production from bio-oil," *Bioresour Technol*, 101, pp. 7350-61.
- [10] Cicconardi, S. P., Perna, A., Spazzafumo, G., Tunzio, F., 2006, "CPH systems for cogeneration of power and hydrogen," *Int J Hydrogen Energy*, 31(6), pp. 693-700.
- [11] Vagia, ECh., Lemonidou, A. A., 2008, "Thermodynamic analysis of hydrogen production via autothermal steam reforming of selected components of aqueous bio-oil fraction," *Int J Hydrogen Energy*, 33, pp. 2489-500.
- [12] Evans, R. J. and Steward, D. M., 2007, "Distributed reforming of biomass pyrolysis oils", Presentation at DOE bio-derived liquids to hydrogen distributed reforming working group meeting, November 6 and 7.
- [13] GM, 2002, "Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems: a European study", vol. 27. LBST.
- [14] Thamburaj, R., 2000, "Fast pyrolysis of biomass for green power generation. Dynamotive energy systems Corp", Proc. 1<sup>st</sup> World conference and exhibition on biomass for energy and industry, Seville.
- [15] Farag, I. H., LaClair, C. E., Barrett, C. J., 2002, "Technical, environmental and economic feasibility of bio-oil in New Hampshire's North Country", Final Report prepared for New Hampshire Industrial Research Centre.
- [16] PE INTERNATIONAL. Electricity Mix; AC; consumption mix, at consumer; 1kVe60kV. ELCD database 2.0, Data set version 0a1b40db-5645-4db8-a887-eb09300b7b74.
- [17] PE INTERNATIONAL. Natural Gas; from onshore and offshore production incl. pipeline and LNG transport; consumption mix, at consumer; desulphurised. ELCD database 2.0, Data set version 3d602e55-aaa2-44e3-adb9-40f49eb1a915.
- [18] GREET Version 1.5: Greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation, free software developed by the centre for transportation research, Argonne National Laboratory.
- [19] Bridgwater, A. V., 2003, "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass," *Chem Eng J*, 91(2), pp. 87-102.
- [20] Concawe, Eucar, and JRC, 2004, "Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context".
- [21] Spath, P. L., Mann, M. K., 2001, "Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming", National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report, February, NREL/TP-570e27637.

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ H<sub>2</sub> ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ H<sub>2</sub>S ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ H<sub>2</sub>O ΣΕ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Co/CeO<sub>2</sub>

Τ. Κράια<sup>1,2</sup>, Μ. Κονσολάκης<sup>3</sup>, Μ. Ουζουνίδου<sup>2</sup>, Β. Σταθόπουλος<sup>4</sup>,  
Γ.Ε. Μαρνέλλος<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

<sup>2</sup> Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων, ΕΚΕΤΑ

<sup>3</sup> Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

<sup>4</sup> Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Στερεάς Ελλάδας

\* Συγγραφέας Αλληλογραφίας: [gmarnellos@uowm.gr](mailto:gmarnellos@uowm.gr)/[marnel@cperi.certh.gr](mailto:marnel@cperi.certh.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

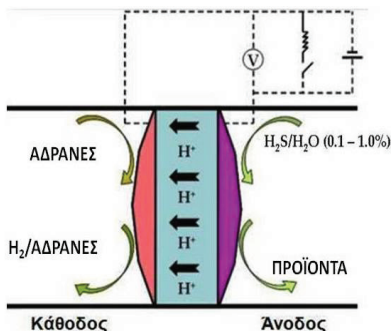
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η καταλυτική διάσπαση του υδρόθειου (H<sub>2</sub>S) προς παραγωγή H<sub>2</sub>, παρουσία περίσσειας H<sub>2</sub>O (90% κ.ο.), σε καταλύτες Co/CeO<sub>2</sub> με διαφορετική φόρτιση σε Co (0-100% κ.β.). Ο απώτερος στόχος της μελέτης αφορά στην επιλογή των βέλτιστων καταλυτικών υλικών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα ως ανοδικά ηλεκτρόδια, σε ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα μεμβράνης στερεού ηλεκτρολύτη αγωγού πρωτονίων (H<sup>+</sup>). Σε αυτό το πλαίσιο, και πριν από τις ηλεκτροχημικές δοκιμές, μια σειρά καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub>, παρασκευάσθηκε με τη χρήση της μεθόδου του υγρού εμποτισμού και εξετάστηκε η απόδοσή τους ως προς την δραστικότητα/σταθερότητά τους κατά την αντίδραση διάσπασης του H<sub>2</sub>S. Τα φυσικοχημικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά των καταλυτικών συστημάτων προσδιορίστηκαν μέσω των μεθόδων BET, XRD και SEM. Οι καταλύτες 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub> βρέθηκε να επιδεικνύουν τη βέλτιστη συμπεριφορά. Η ανωτερότητά τους αποδίδεται στον επί τόπου σχηματισμό θειούχων ενώσεων Co και CeO<sub>2</sub>, οι οποίες εμφανίζονται εξαιρετικά δραστικές και σταθερές κατά τη καταλυτική διάσπαση του H<sub>2</sub>S παρουσία H<sub>2</sub>O, προς παραγωγή H<sub>2</sub>.

Λέξεις Κλειδιά: Διάσπαση H<sub>2</sub>S, Μαύρη Θάλασσα, Περίσσεια H<sub>2</sub>O, Co, CeO<sub>2</sub>, Ηλεκτροχημική διεργασία

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μείωση στα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την παγκόσμια αύξηση των απαιτήσεων σε ενέργεια έχουν οδηγήσει σήμερα στην αναζήτηση και αξιοποίηση νέων εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Προς αυτή την κατεύθυνση το  $H_2$  ως καύσιμο έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει σημαντικό ενεργειακό φορέα στο μέλλον [1]. Σημαντική πηγή  $H_2$  δύναται να αποτελέσει το  $H_2S$ , το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στα ύδατα του Εύξεινου Πόντου [1,2]. Τα χαρακτηριστικά της Μαύρης Θάλασσας είναι ιδιαίτερα, καθώς το 90% των υδάτων της βρίσκονται υπό αναερόβιες συνθήκες, ενώ ταυτόχρονα περιέχουν σημαντικές ποσότητες  $H_2S$  [1]. Η περιεκτικότητα σε  $H_2S$  αυξάνεται σταθερά με το βάθος φτάνοντας τα 0.36 mmol/l στα 1000 m, τα 0.38 mmol/l στα 2000 m και προσεγγίζει ακόμη και τα 0.60 mmol/l στον πυθμένα της Μαύρης Θάλασσας. Οι επιβλαβείς επιπτώσεις του  $H_2S$  στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον οικοσύστημα, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης διεργασιών απομάκρυνσης του από την Μαύρη Θάλασσα και μετέπειτα αξιοποίησης του προς παραγωγή υδρογόνου. Από θεωρητικές μελέτες, έχει διαπιστωθεί πως είναι δυνατή η παραγωγή 270 εκατ. τόνων  $H_2$  που ισοδυναμούν ενεργειακά με 808 εκατ. τόνους βενζίνης ή 766 εκατ. τόνους φυσικού αερίου [1,2]. Προς τη κατεύθυνση αυτή, η παραγωγή  $H_2$  από το  $H_2S$  της Μαύρης Θάλασσας είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω των ακόλουθων σταδίων: α) άντληση του θαλασσινού νερού από βάθος 1000 m, β) παραγωγή συμπυκνωμένων μιγμάτων  $H_2S/H_2O$ , και γ) διάσπαση του  $H_2S$  σε  $H_2$  και S.

Διαφορετικές διεργασίες δύναται να χρησιμοποιηθούν για τη διάσπαση του  $H_2S$ , με σημαντικότερες τις ακόλουθες: θερμικές, θερμοχημικές, ηλεκτροχημικές, φωτοχημικές και πλασμο-χημικές. Οι απαιτήσεις των θερμικών και θερμοχημικών διεργασιών για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες και το πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και η μικρή κλίμακα εφαρμογής των φωτοχημικών και πλασμο-χημικών διεργασιών, καθιστούν την επιλογή τους ως μη ιδανική [2]. Αντίθετα, η ηλεκτροχημική διεργασία θεωρείται ως η πλέον υποσχόμενη προσέγγιση προς τη ζητούμενη κατεύθυνση. Ειδικότερα, οι ηλεκτροχημικοί αντιδραστήρες μεμβράνης στερεού ηλεκτρολύτη αγωγού πρωτονίων μπορούν να αποτελέσουν μια πολύ αποτελεσματική και ταυτόχρονα οικονομική λύση για την παραγωγή  $H_2$  από  $H_2S$  [3].



Εικόνα 1: Ηλεκτροχημική διάταξη διάσπασης του  $H_2S$

Η συμβατική καταλυτική διάσπαση του  $H_2S$ , πραγματοποιείται συνήθως σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να επιτευχθούν μετατροπές που υπερβαίνουν το 80%. Ως εναλλακτική προσέγγιση, προτείνεται μία νέα ιδέα βασισμένη σε έναν ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα μεμβράνης στερεού ηλεκτρολύτη αγωγού πρωτονίων (Εικόνα 1), η οποία χαρακτηρίζεται από: α) τη δυνατότητα μετατόπισης της ισορροπίας της αντίδρασης προς επιπλέον παραγωγή  $H_2$ , που οφείλεται στην ταυτόχρονη παραγωγή και διαχωρισμό του  $H_2$  στην ίδια διάταξη και β) την ευέλικτη λειτουργία είτε ως ηλεκτροχημικός αντιδραστήρας για καθαρή παραγωγή  $H_2$ , είτε ως κυψέλη καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη καινοτόμων ηλεκτροχημικών αντιδραστήρων μεμβράνης στερεού ηλεκτρολύτη αγωγού πρωτονίων μπορεί να συμβάλει στην παραγωγή  $H_2$  από το



H<sub>2</sub>S σε μία αποτελεσματική και συνάμα οικονομική διεργασία απλού σταδίου. Σε τέτοιου είδους αντιδραστήρες, σημαντική παράμετρο αποτελεί η σύνθεση νέων καταλυτικών υλικών, τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανοδικά ηλεκτρόδια. Η επιλογή του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως άνοδος στον ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα μεμβράνης στερεού ηλεκτρολύτη αγωγού πρωτονίων, είναι καθοριστική για την επιτυχή έκβαση της προτεινόμενης μεθόδου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το ανοδικό ηλεκτρόδιο θα πρέπει να επιδεικνύει α) υψηλή καταλυτική ενεργότητα για τη διάσπαση του H<sub>2</sub>S παρουσία περιπτώσεων H<sub>2</sub>O, β) υψηλή ηλεκτρονιακή αγωγιμότητα, γ) καλή ικανότητα πρόσφυσης στον στερεό ηλεκτρολύτη, και δ) ανθεκτικότητα στην παρουσία του H<sub>2</sub>S και άλλων θειούχων ενώσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, και πριν από τις ηλεκτροχημικές δοκιμές, στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η διάσπαση του H<sub>2</sub>S σε καταλύτες Co/CeO<sub>2</sub> μεταβαλλόμενης φόρτισης σε Co (0-100% κ.β.) παρουσία περιπτώσεων H<sub>2</sub>O (90%). Διάφορες παράμετροι που αφορούν στην επίδραση της φόρτισης του μετάλλου, της θερμοκρασίας, του χρόνου αντίδρασης και της σύστασης των αντιδρώντων μελετήθηκαν διεξοδικά.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1. ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΥΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η σύνθεση καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub>, με τη χρήση της μεθόδου του υγρού εμπότισμού. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η σύνθεση του υποστρώματος και στη συνέχεια ο εμπότισμός του κοβαλτίου στο υπόστρωμα. Η περιεκτικότητα των καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub> σε Co κυμαίνονταν από 0 έως 100% κ.β. Στοιχειομετρικές ποσότητες των πρόδρομων νιτρικών ενώσεων (Sigma Aldrich) αναμιγνύονται σε 30 ml δις-απεσταγμένου ύδατος και θερμαίνονται στους 150 °C υπό ανάδευση μέχρι ο όγκος του υγρού να εξατμιστεί πλήρως. Ακολουθεί ξήρανση για 16 h στους 100 °C και στη συνέχεια πύρωση στους 600 °C για 2 ώρες, υπό ατμοσφαιρικό αέρα. Η ειδική επιφάνεια των καταλυτών μετρήθηκε με προσρόφηση N<sub>2</sub> στους -196 °C, με τη χρήση της μεθόδου των πολλαπλών σημείων-BET (VacPrep 061 Micromeritics). Τα κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά καθορίστηκαν με τη χρήση της τεχνικής περίθλασης ακτίνων-X (Siemens D 500), με ακτινοβολία Cu-Kα (λ=1.5406) και ρυθμό σάρωσης 0.04 ανά 2 s. Στον Πίνακα 1, αποτυπώνονται τα χαρακτηριστικά υφής και δομής των καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub> με διαφορετικά ποσοστά φόρτισης Co. Επιπλέον, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά τόσο των φρέσκων (μετά το στάδιο της παρασκευής) όσο και των γηρασμένων (μετά από πειράματα σταθερότητας) προσδιορίστηκαν με την τεχνική SEM/EDS, ενώ το ποσοστό του εναποτιθέμενου Θείου προσδιορίστηκε με στοιχειακή ανάλυση (LECO 800 Elemental Analyzer).

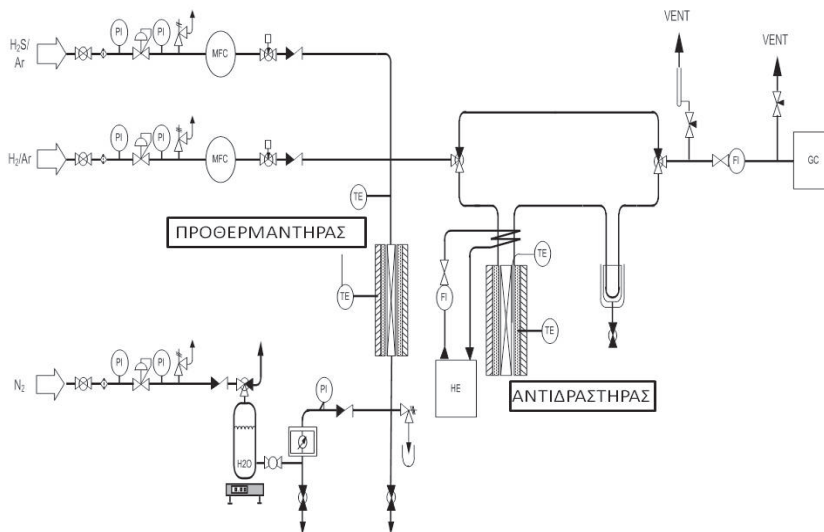
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά υφής/δομής των καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub>

Δείγμα	Ειδική Επιφάνεια (m <sup>2</sup> /gr)	Φάση	Μέγεθος Κρυσταλλίτη (nm)
15% κ.β. Co/CeO <sub>2</sub>	64.2	CeO <sub>2</sub>	11.50
		Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	30.81
20% κ.β. Co/CeO <sub>2</sub>	33.4	CeO <sub>2</sub>	10.21
		Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	37.66
30% κ.β. Co/CeO <sub>2</sub>	44.9	CeO <sub>2</sub>	10.37
		Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	37.67
40% κ.β. Co/CeO <sub>2</sub>	28.38	CeO <sub>2</sub>	11.24
		Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	42.61

60% κ.β. Co/CeO <sub>2</sub>	15.08	CeO <sub>2</sub>	11.67
		CoCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	39.47
CeO <sub>2</sub>	71.54	CeO <sub>2</sub>	10.85
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2.93	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	22.11
		CoO	42.01

## 2.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής της διεργασίας που χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του H<sub>2</sub>S προς παραγωγή H<sub>2</sub>. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ροής το οποίο αποτελείται από ένα σύστημα ροών που καταλήγουν στον αντιδραστήρα και από το σύστημα ανάλυσης των αερίων αντιδρώντων και προϊόντων.



Εικόνα 2: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής της διάταξης που χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του H<sub>2</sub>S προς παραγωγή H<sub>2</sub>

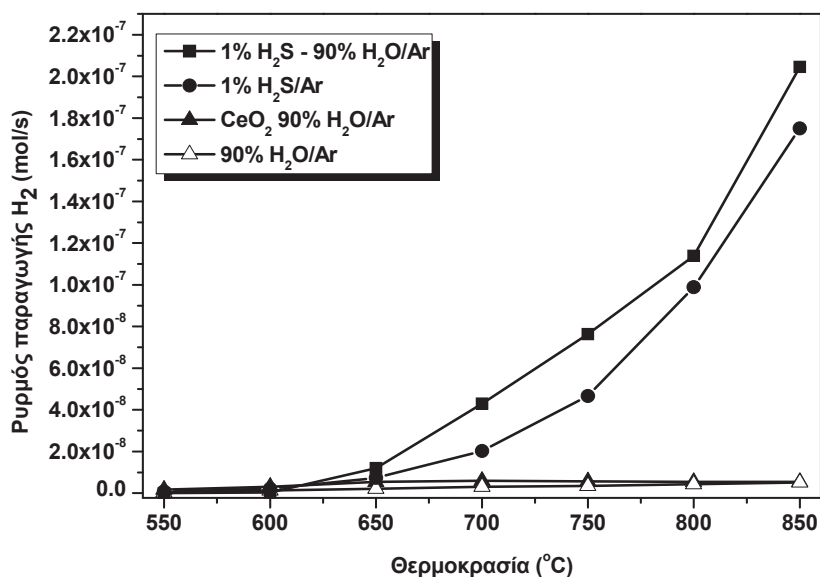
Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα, όλες οι ροές αερίων είναι εξοπλισμένες με μετρητές ροής μάζας, οι οποίοι ελέγχονται μέσω του διαθέσιμου λογισμικού. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε αντιδραστήρα χαλαζία, τύπου "U", που εσωκλείεται σε φούρνο υψηλών θερμοκρασιών. Για την ανάλυση της ποσότητας του παραγόμενου H<sub>2</sub> χρησιμοποιείται αέριος χρωματογράφος (GC, Shimadzu 14B), που βρίσκεται σε σειριακή σύνδεση με τη μονάδα. Το ρευστό που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα εισάγεται σε έναν συμπυκνωτή και κατόπιν σε μια παγίδα H<sub>2</sub>S, προκειμένου να προστατευθεί η σήλη διαχωρισμού του αερίου χρωματογράφου από ίχνη H<sub>2</sub>S. Ο συνολικός ρυθμός της ογκομετρικής ροής τροφοδοσίας ήταν ίδιος σε όλα τα πειράματα, και ίσος με 100 ml/min. Η ποσότητα καταλύτη που χρησιμοποιείται σε κάθε πείραμα είναι 250 mg τα οποία αραιώνονται με ίση ποσότητα quartz, κοκκομετρίας ίσης με την αντίστοιχη των καταλυτικών σωματιδίων.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκείμενο να εξεταστεί η ενεργότητα και σταθερότητα των καταλυτικών συστημάτων σε συνθήκες που προσομοιάζουν την προτεινόμενη διεργασία επεξεργασίας του θαλασσινού νερού από την Μαύρη Θάλασσα, πραγματοποιήθηκε μελέτη της καταλυτικής διάσπασης  $H_2S$  παρουσία  $H_2O$ , με απώτερο στόχο την επιλογή των βέλτιστων καταλυτικών συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν ως ανοδικά ηλεκτρόδια στον ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα μεμβράνης στερεού ηλεκτρολύτη αγωγού πρωτονίων.

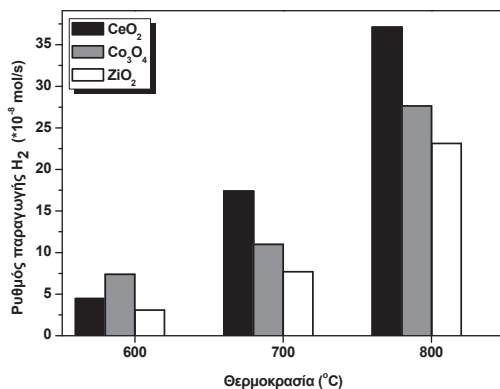
#### 3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ

Σε πρώτο στάδιο, διεξήχθησαν πειράματα ενεργότητας ως προς την θερμοκρασία λειτουργίας, όπου μετρήθηκε ο ρυθμός σχηματισμού του  $H_2$  σε μίγματα τροφοδοσίας 90%  $H_2O/10\% Ar$  και 1%  $H_2S/90\% H_2O/9\% Ar$  (Εικόνα 3). Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με μίγμα τροφοδοσίας 90%  $H_2O/10\% Ar$  (απουσία  $H_2S$ ), παρατηρήθηκε ξεκάθαρα ότι σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες, η μετατροπή του  $H_2O$  είναι αμελητέα, τόσο απουσία όσο και παρουσία καταλύτη ( $CeO_2$ ). Βρέθηκε ωστόσο, πως η παρουσία του  $H_2O$  σε μίγμα τροφοδοσίας που περιλαμβάνει 1%  $H_2S$  ενισχύει σημαντικά τη μετατροπή του  $H_2S$ , σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αντίστοιχη θερμοδυναμική ανάλυση.



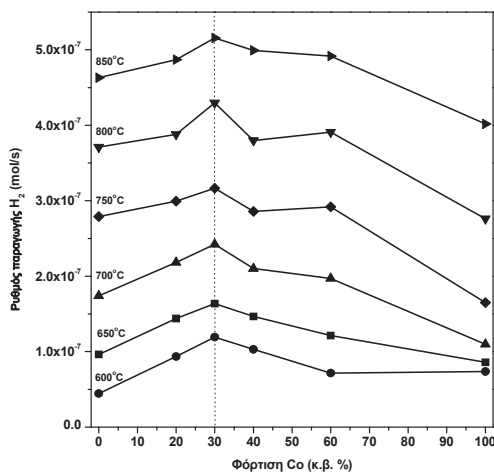
Εικόνα 3: Ρυθμός σχηματισμού  $H_2$  σε μίγματα τροφοδοσίας 1%  $H_2S/90\% H_2O/9\% Ar$  και 90%  $H_2O/10\% Ar$ . Καταλύτης: 250 mg, Παροχή: 100  $cm^3/min$

Σε επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκε η μελέτη της επίδρασης των καθαρών οξειδίων (Εικόνα 4). Όπως και στα πειράματα απουσία  $H_2O$ , το καθαρό οξείδιο της  $CeO_2$ , παρουσίασε εξαιρετική συμπεριφορά στις θερμοκρασίες ενδιαφέροντος (700-850 °C).



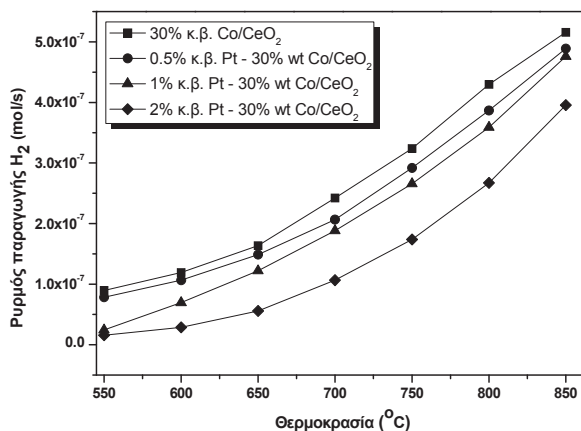
Εικόνα 4: Επίδραση των καθαρών οξειδίων  
Τροφοδοσία: 1% H<sub>2</sub>S-90% H<sub>2</sub>O/Ar. Καταλύτης: 250 mg, Παροχή: 100 cm<sup>3</sup>/min

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας καθώς και της φόρτισης σε Co καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub>, στον ρυθμό παραγωγής του H<sub>2</sub> (mol/s). Είναι εμφανές ότι για όλες τις θερμοκρασίες που μελετήθηκαν, ένα ποσοστό φόρτισης σε Co, 30% κ.β., οδηγεί σε μεγιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής του H<sub>2</sub>.



Εικόνα 5: Επίδραση των μικτών οξειδίων Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CeO<sub>2</sub> στον ρυθμό παραγωγής H<sub>2</sub>.  
Τροφοδοσία: 1% H<sub>2</sub>S/90% H<sub>2</sub>O/Ar, Καταλύτης: 250 mg, Παροχή: 100 cm<sup>3</sup>/min

Στη συνέχεια, προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης του καταλυτικού συστήματος επιλέχθηκε να ενισχυθεί η ενεργός φάση του Co, προσθέτοντας ακόμη ένα μέταλλο, την Pt. Όπως διαπιστώθηκε από τα πειράματα ενεργότητας, η προσθήκη Pt στο σύστημα υποβάθμισε την απόδοση του συστήματος. Συνεπώς, το βέλτιστο καταλυτικό σύστημα ήταν για ακόμη μία φορά το 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub> (Εικόνα 6).



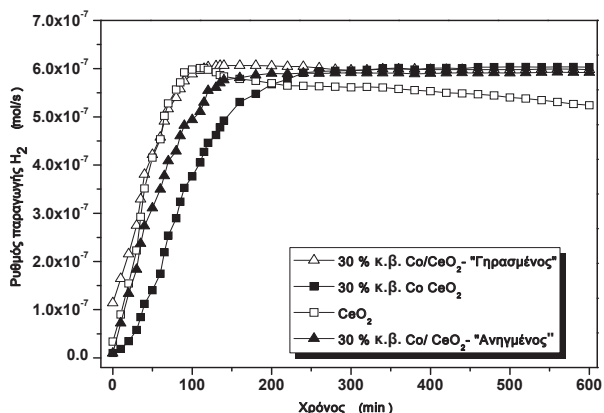
Εικόνα 6: Προσθήκη Pt (0.5%, 1%, 2%) στο βέλτιστο καταλύτη (30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>). Τροφοδοσία: 1% H<sub>2</sub>S/90% H<sub>2</sub>O/Ar, Καταλύτης: 250 mg, Παροχή: 100 cm<sup>3</sup>/min

### 3.2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ H<sub>2</sub>S ΠΑΡΟΥΣΙΑ H<sub>2</sub>O

Αφού διαπιστώθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα η υπεροχή του καταλύτη 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>, επιλέχθηκε να μελετηθεί στη συνέχεια και η σταθερότητα του σε πειράματα μακράς διάρκειας. Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν στους 850 °C και για το ίδιο μίγμα τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις των παραπάνω Εικόνων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα που ακολουθεί, μετά το αρχικό διάστημα ενεργοποίησης (~3 hrs), η απόδοση του βέλτιστου καταλύτη, 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub> σταθεροποιήθηκε στην τιμή που υπέδειξαν τα αντίστοιχα πειράματα ενεργότητας και παρέμεινε σταθερή μέχρι το πέρας των 10 h που διήρκεσε το πείραμα. Το αντίθετο παρατηρείται με χρήση καταλύτη καθαρής CeO<sub>2</sub>, που αν και έφτασε σε σταθερή κατάσταση νωρίτερα (~1.5 hr), η δραστηριότητα του υποβαθμιζόταν βαθμιαία με το χρόνο αντίδρασης. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν το αρχικό διάστημα ενεργοποίησης του καταλύτη 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub> οφείλεται στην επιτόπου θείωση ή στην αναγωγή του δείγματος κατά την διάρκεια της αντίδρασης, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα μακράς διάρκειας με καταλυτικά δείγματα, τα οποία είτε είχαν αρχικά εκτεθεί στο αντιδρών μίγμα για 10 h στους 850 °C ("γηρασμένος" καταλύτης), είτε είχαν αναχθεί για 1 h στους 850 °C παρουσία καθαρού H<sub>2</sub> ("ανηγμένος" καταλύτης). Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση της συμπεριφοράς του "γηρασμένου" καταλύτη 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>, ο οποίος απαιτεί το ήμισυ του χρόνου σε σύγκριση με τον "φρέσκο" καταλύτη για να προσεγγίσει την μόνιμη κατάσταση. Αντίθετα στην περίπτωση του "ανηγμένου" καταλύτη, απαιτείται σχεδόν ο ίδιος χρόνος με το "φρέσκο" καταλύτη για την επίτευξη μόνιμης κατάστασης.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η προοδευτική θείωση του καταλύτη, αλλά και σε μικρότερο βαθμό η επιτόπου αναγωγή του από το παραγόμενο H<sub>2</sub>, ευθύνονται για το αρχικό διάστημα ενεργοποίησης του και για την αξιοσημείωτη επιδεικνυόμενη σταθερότητά του καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου αντίδρασης. Οι παραπάνω διαπιστώσεις συνάδουν και με τις μετρήσεις περιεκτικότητας των καταλυτών σε στοιχειακό Θείο, οι οποίες υποδεικνύουν ότι η σταθερή κατάσταση που επιτυγχάνεται μετά την πάροδο του αρχικού διαστήματος ενεργοποίησης αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό Θείου της τάξεως του 6.5%. Επιπλέον, με αναλύσεις SEM και XRD που διεξήχθησαν στα "γηρασμένα" καταλυτικά συστήματα, επιβεβαιώθηκε η δημιουργία θειούχων φάσεων Co και CeO<sub>2</sub>. Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη τις μικρές σχετικά διαφορές στα χαρακτηριστικά δομής και υψής των καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub> με διαφορετική φόρτιση σε Co (Πίνακας 1), η

ανωτερότητα των καταλυτών 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub> θα πρέπει να αποδοθεί πιθανόν στα εγγενή χαρακτηριστικά των φάσεων Co και CeO<sub>2</sub> καθώς και στη φύση των αλληλεπιδράσεων μετάλλου-φορέα. Οι παράγοντες αυτοί αναμένεται να επηρεάζουν τόσο το είδος/ποσότητα των θειούχων ενώσεων Co και CeO<sub>2</sub> που σχηματίζονται, όσο και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των καταλυτών (οξειδωτική κατάσταση, κινητικότητα οξυγόνου, επιφανειακή δομή, κλπ). Μελέτες επιφανειακής και δομικής ανάλυσης είναι σε εξέλιξη προκειμένου να εξακριβωθεί η επίδραση των παραπάνω παραγόντων.



Εικόνα 7: Πειράματα σταθερότητας παρουσία H<sub>2</sub>O. Τροφοδοσία: 1% H<sub>2</sub>S/90% H<sub>2</sub>O/Ar, Καταλύτης: 250 mg, Παροχή: 100 cm<sup>3</sup>/min

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η καταλυτική διάσπαση του υδρόθειου (H<sub>2</sub>S) προς παραγωγή H<sub>2</sub>, παρουσία περίσσειας H<sub>2</sub>O (90% κ.ο.), σε καταλύτες Co/CeO<sub>2</sub> με διαφορετική φόρτιση σε Co (0-100% κ.β.). Τα αποτελέσματα υπέδειξαν την υπεροχή των καταλυτών 30% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>, τόσο ως προς την ενεργότητα όσο και τη σταθερότητά τους. Η ανωτερότητα των καταλυτών Co/CeO<sub>2</sub> αποδίδεται στον επί τόπου σχηματισμό θειούχων ενώσεων, όπως το CoS<sub>2</sub>, οι οποίες εμφανίζονται εξαιρετικά δραστικές και σταθερές κατά τη καταλυτική διάσπαση του H<sub>2</sub>S προς παραγωγή H<sub>2</sub>.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (11BS\_10\_28), στα πλαίσια του έργου "Hydrogen production from H<sub>2</sub>S decomposition in micro-structured proton-conducting (H<sup>+</sup>) solid oxide membrane reactors", Black Sea ERA-NET, 7<sup>ο</sup> ΠΠ.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Midilli, A., Ay, M., Kale, A., Veziroglu, T.N., 2007, "A parametric investigation of hydrogen energy potential based on H<sub>2</sub>S in Black Sea deep waters", Int. J. Hyd. Energy, 32, 117-124.
- [2] Baykara, S.Z., Figen, E.H., Kale, A., Veziroglu, T.N., 2007, "Hydrogen from hydrogen sulphide in Black Sea", Int. J. Hyd. Energy, 32, 1246-1250.
- [3] Iwahara, H., Asakura, Y., Katahira, K., Tanaka, M., 2004, "Prospect of hydrogen technology using proto-conducting ceramics", Sol. St. Ionics, 168 299-310.

## ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

**Χ. Ζιώγου<sup>1,\*</sup>, Σ. Παπαδοπούλου<sup>1,2</sup>, Σ. Βουτετάκης<sup>1</sup>**

<sup>1\*</sup>Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη, e-mail: [cziogou@cperi.certh.gr](mailto:cziogou@cperi.certh.gr)

<sup>2</sup>Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού, Αλεξάνδρειο ΤΕΙ Θεσσαλονίκης,  
Τ.Θ. 141, 57400, Θεσσαλονίκη

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία περιγράφει ένα πλαίσιο λειτουργίας που αναπτύχθηκε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το βέλτιστο σχεδιασμό και την αποδοτική λειτουργία αυτόνομων ή συνδεδεμένων σταθμών παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προσδιορίζει τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων ενός σταθμού παραγωγής υδρογόνου ώστε να ελαχιστοποιείται η απαιτούμενη ενέργεια για την υποστήριξη της διαδικασίας της παραγωγής του. Κάθε υποσύστημα εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο λειτουργικό σκοπό ενώ ταυτόχρονα αλληλεπιδρά με τα υπόλοιπα με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα σύνθετο πρόβλημα διαχείρισης που απαιτεί συστηματική αντιμετώπιση. Συνεπώς για τη βέλτιστη λειτουργία του σταθμού είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός κεντρικού συστήματος εποπτείας, ικανού να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε υποσυστήματος και ταυτόχρονα να μεγιστοποιεί την απόδοσή τους. Τα όρια λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος προσδιορίζονται από ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται για ένα εύρος χρόνου που αντιστοιχεί στις εποχές του έτους, λαμβάνοντας υπόψη τους λειτουργικούς στόχους του σταθμού που είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής του υδρογόνου, της διάρκειας ζωής των συσκευών και η μέγιστη αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.

Η εφαρμογή του πλαισίου λειτουργίας πραγματοποιήθηκε στον σταθμό παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου του Ινστιτούτου Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το εργαστήριο Ανάπτυξης Ολοκληρωμένων Συστημάτων και Διεργασιών (ΑΝΟΣΥΣ). Τα αποτελέσματα της λειτουργίας του σταθμού για μικρά χρονικά διαστήματα αλλά και για μεγάλα που περιλαμβάνουν διαφορετικές εποχές του έτους επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα της συνέργειας των υποσυστημάτων, την αξιοπιστία του συστήματος αυτοματισμού και καταδεικνύουν τη δυναμικότητα του σταθμού.

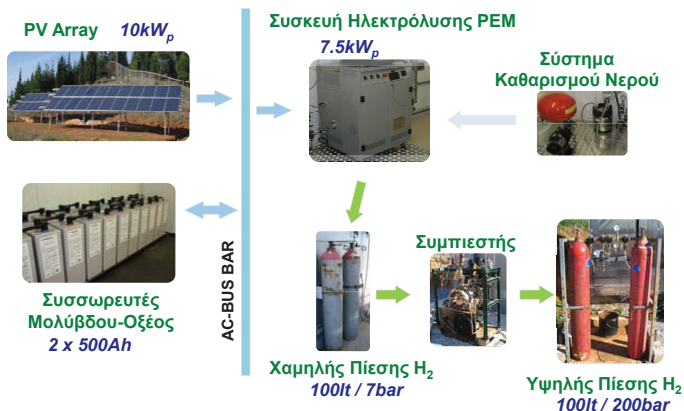
Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμο υδρογόνο, βέλτιστη παραγωγή, αυτοματοποιημένη λειτουργία

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια πολλά υποσχόμενη προοπτική για το ενεργειακό τοπίο του μέλλοντος είναι η χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα που μπορεί να συμβάλει καταλυτικά στην αντιμετώπιση των ενεργειακών προκλήσεων. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται από συστήματα κυψελών καυσίμου, μια φιλική προς το περιβάλλον και βιώσιμη τεχνολογική λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σταθμούς που καλύπτουν τοπικές απαιτήσεις φορτίου ή/και τροφοδοτούν το δίκτυο αλλά και για οχήματα. Το υδρογόνο ως χημικός φορέας και μέσο αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί μια εναλλακτική λύση, ιδιαίτερα όταν η παραγωγή του στηρίζεται ενεργειακά σε ανανεώσιμες πηγές και γίνεται με μεθόδους φιλικές προς το περιβάλλον, όπως είναι η ηλεκτρόλυση [1,2]. Ταυτόχρονα αποτελεί μια βιώσιμη λύση που συμβάλει στην ενεργειακή ασφάλεια. Ο στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση της λειτουργικής συμπεριφοράς ενός αυτόνομου σταθμού παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης από την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας φωτοβολταϊκών στοιχείων. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση των αποφάσεων και αλλαγών που επιβάλλονται από το σύστημα ελέγχου σε σχέση με τη λειτουργία ή την απενεργοποίηση των υποσυστημάτων για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, στην συνολική ενεργειακή κατανάλωση και την αυτονομία του συστήματος. Το παραγόμενο υδρογόνο που προκύπτει, αξιοποιείται για τη μετατροπή τηγανελαιών σε βιοκαύσιμα  $2^{ns}$  γενιάς μέσω καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας [3] αλλά και σε συστήματα κυψελών καυσίμου.

## 2. ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕΣΩ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο σταθμός παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιήθηκε σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το εργαστήριο Ανάπτυξης Ολοκληρωμένων Συστημάτων και Διεργασιών (ΑΝΟΣΥΣ) του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ και αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα τα οποία διασυνδέονται και αλληλεπιδρούν. Πιο συγκεκριμένα, το φωτοβολταϊκό (photovoltaic - PV) υποσύστημα αποτελείται από πάνελ συνολικής ισχύος  $10kW_p$  και η παραγόμενη ισχύς αποδίδεται σε μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού  $7.5kW_p$  (μέγιστη πίεση εξόδου στα 7bar). Υπάρχει επίσης το υποσύστημα αφύγρανσης του παραγόμενου ρεύματος υδρογόνου πριν την αποθήκευση λόγω της υγρασίας που εγγενώς φέρει. Η αποθήκευση του υδρογόνου γίνεται σε φιάλες υψηλής πίεσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συμπιεστής μεταξύ δύο συστοιχιών φιαλών (χαμηλής/υψηλής πίεσης) που συμπιέζει το αρχικά παραγόμενο υδρογόνο από τα 4bar στα 180bar. Λόγω της ύπαρξης διαρκώς μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών χρησιμοποιείται ένα υποσύστημα συσσωρευτών μολύβδου-οξέος (1000Ah/24V) για την κάλυψη των άμεσων ενεργειακών απαιτήσεων. Η εικόνα 1 παρουσιάζει τα υποσυστήματα και τις συνδέσεις του αυτόνομου σταθμού [4].



Εικόνα 1: Συνδέσεις υποσυστημάτων παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλιακής ενέργειας



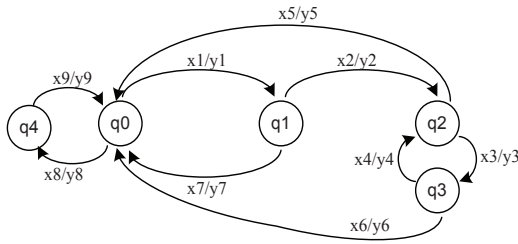
### 3. ΕΠΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι λειτουργίες εντός τους σταθμού ελέγχονται από το σύστημα αυτοματισμού που είναι υπεύθυνο για την εύρυθμη συμπεριφορά και απόκριση των επιμέρους συσκευών καθώς και για την έγκαιρη ενημέρωση των μη επιθυμητών καταστάσεων λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα οι ενέργειες που επιβάλλονται από το σύστημα αυτοματισμού εξασφαλίζουν ότι η ισχύς θα είναι διαθέσιμη όποτε χρειαστεί (για φόρτιση ή παραγωγή υδρογόνου) ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών. Παράλληλα, βασικός στόχος του συστήματος αποτελεί η μείωση των απωλειών ισχύος για τα επιμέρους υποσυστήματα σε συνδυασμό με τη μεγιστοποίηση της παραγωγής του υδρογόνου. Κάθε υποσύστημα αποτελείται από διάφορες συσκευές που επικοινωνούν με διαφορετικού τύπου πρωτόκολλα (CANbus, Profibus, RS485, RS232C, TCP/IP), πράγμα που καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Γενικά η απαίτηση για ανάκτηση των δεδομένων από τα υποσυστήματα και η διαχείριση της πληροφορίας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των επιμέρους διατάξεων προϋποθέτει τη χρήση ενός ευέλικτου και παραμετροποιήσιμου συστήματος αυτοματισμού [4,5] και γι' αυτό το λόγο η στρατηγική ελέγχου και η εποπτεία του συστήματος στηρίζεται σε ένα σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Ανάκτησης Δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA). Το SCADA σύστημα επικοινωνεί με όλες τις επιμέρους διατάξεις, τους αισθητήρες και τα στοιχεία ελέγχου, ώστε να συγκεντρώνει τις απαραίτητες μετρήσεις και να στέλνει τις αντίστοιχες εντολές. Η αρχιτεκτονική του αυτοματισμού διαιρείται σε τρία επίπεδα, τα οποία επιτρέπουν τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων των συσκευών σε ένα σύνολο από χρήσιμα για το σύστημα ελέγχου δεδομένα και τελικά σε πληροφορία. Τα επίπεδα αυτά περιλαμβάνουν: α) την ανάκτηση σημάτων από το πεδίο εισόδων/εξόδων του σταθμού, β) τη μετάφραση των δεδομένων σε μορφή συμβατή με το βιομηχανικό πρωτόκολλο επικοινωνίας OPC, γ) την οργάνωση των δεδομένων στη βάση δεδομένων του SCADA.

Επιπλέον για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας και τον έλεγχο των υποσυστημάτων, ένα έξυπνο μικροδίκτυο παρέχει τις απαραίτητες αποφορσεις και υλοποιείται μέσω ενός AC ζυγού. Η τοπολογία του συστήματος συμπληρώνεται από αντιστροφείς και φορτιστές ώστε η DC ισχύς των φωτοβολταϊκών και των συσσωρευτών να μετατρέπεται κατάλληλα. Συγκεκριμένα, η DC ισχύς που παράγεται από τα PV τροφοδοτείται σε 3 μονοφασικούς αντιστροφείς που αποτελούν τον κύριο AC ζυγό του σταθμού. Οι συσσωρευτές συνολικής χωρητικότητας 1000Ah στα 24V συνδέονται στο σύστημα μέσω 3 φορτιστών/αντιστροφέων. Κάθε φορτιστής/αντιστροφέας, συνδέεται στην έξοδο του σε μία φάση του AC μικροδικτύου.

### 4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε είναι σημαντικό ο σταθμός που λειτουργεί αυτόνομα να μπορεί να παράγει το απαιτούμενο υδρογόνο και να αξιοποιεί στο μέγιστο την διαθέσιμη ισχύ από τα PV. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν μια εφαρμοσμένη αλγόριθμοι διαχείρισης ενεργειών ώστε να ικανοποιούνται οι λειτουργικοί στόχοι του σταθμού. Γενικά η λειτουργία των διασυνδεδεμένων υποσυστημάτων εξασφαλίζεται μέσω μιας στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας (ΣΔΕ) που αποτελείται από ένα σύνολο κανόνων λειτουργίας που καθορίζουν το πότε και με ποιον τρόπο το σύστημα θα μεταφερθεί από μία κατάσταση σε μία άλλη, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ικανοποίηση των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών στους οποίους υπόκεινται τα υποσυστήματα. Ο βασικός σκοπός της ΣΔΕ είναι να διαχειριστεί τη λειτουργία του κάθε υποσυστήματος του σταθμού και αναπαριστάται μέσω μια Μηχανής Πεπερασμένων Καταστάσεων (Finite state machine, FSM). Η FSM αποτελεί μια δυναμικά μεταβαλλόμενη προσέγγιση που περιγράφει τη χρονική εξέλιξη ενός συνόλου συνεχών και διακριτών μεταβλητών. Γενικά η FSM ορίζεται από μία πλειάδα (tuple) όρων  $(Q, q_0, \delta, \lambda, X, Y)$ , όπου  $Q$  είναι το πεπερασμένο σύνολο των καταστάσεων,  $q_0 \in Q$  η αρχική κατάσταση,  $\delta$  η κατάσταση ως συνάρτηση μεταφοράς,  $\lambda$  η συνάρτηση εξόδου,  $X$  το αλφάβητο εισόδου και  $Y$  το αλφάβητο εξόδου. Η FSM περιγράφει όλες τις πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα και τους λογικούς κανόνες που ενεργοποιούν τις μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων (Εικόνα 2).



- q0: Κατάσταση αναμονής  
 q1: Προετοιμασία για παραγωγή H<sub>2</sub>  
 q2: Παραγωγή H<sub>2</sub>  
 q3: Συμπίεση H<sub>2</sub>  
 q4: Χρήση βοηθητικής ισχύος για λειτουργία του συστήματος

Εικόνα 2: Μηχανή Πεπερασμένων Καταστάσεων (FSM) για την λειτουργία του αυτόνομου συστήματος

Εάν το  $M$  δεχθεί ως είσοδο το  $x \in X$ , ενώ βρίσκεται στην κατάσταση  $q$  τότε η έξοδος του είναι  $y = \lambda(q, x)$  και μετακινείται στην κατάσταση  $q' = \delta(q, x)$ . Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται η μετάβαση  $(q, q', x/y)$ . Επομένως, η μετάβαση μεταξύ των καταστάσεων υλοποιείται σύμφωνα με ένα σύνολο κανόνων που καθορίζουν το αλφάβητο εισόδου ( $X$ ) της FSM [6]. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση εξόδου ( $y = \lambda(q, x)$ ) μπορεί να ενεργοποιήσει ή απενεργοποιήσει τη λειτουργία ενός υποσυστήματος (π.χ. μονάδα ηλεκτρόλυσης (EL), συμπίεστης (CP), σύστημα καθαρισμού νερού (WT)) σύμφωνα με τα επίπεδα ενέργειας που αφορούν το συσσωρευτή (BAT) και τις φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου (χαμηλής πίεσης – BF, υψηλής πίεσης – FT). Το σύνολο των δράσεων καθορίζει το αλφάβητο εξόδου της FSM ( $Y$ ) που συμπεριλαμβάνει όλες τις εφικτές δράσεις που πραγματοποιούνται στα υποσυστήματα του σταθμού. Οι λειτουργικοί κανόνες αναπαρίστανται με όρους προτασιακής λογικής (propositional-based logic approach). Η δομή των κανόνων είναι ένας συνδυασμός μεταξύ των λογικών τελεστών ( $AND, \vee, NOT, !$ ) και λογικών δύτιμων ( $\beta$ ) μεταβλητών. Οι δύτιμες μεταβλητές συσχετίζονται με την κατάσταση κάθε συσκευής στο σταθμό. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένα πλήρες σύνολο κανόνων που εξάγεται από τη λειτουργία των υποσυστημάτων λαμβάνοντας υπόψη και τους φυσικούς περιορισμούς που επιβάλλονται από τις συσκευές. Κάθε κανόνας σχετίζεται με μία μετάβαση.

Πίνακας 1: Κατάσταση μεταβλητών που αφορούν την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου	
Κατάσταση Μεταβλητής	Περιγραφή
$[\beta_{WT} = 1] \leftrightarrow [WT_{Res} \geq WT_{Res,high}]$	Η μεταβλητή $\beta_{WT}$ είναι αληθής ( $=1$ ) εάν και μόνον εάν ( <i>iff</i> ) η αντίσταση του νερού τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη/ίση από $WT_{Res,high}$ (2.2ΜΩ)
$[\beta_{WT} = 0] \leftrightarrow [WT_{Res} < WT_{Res,low}]$	Η μεταβλητή $\beta_{WT}$ είναι ψευδής ( $=0$ ) εάν και μόνον εάν η αντίσταση του νερού τροφοδοσίας είναι μικρότερη από $WT_{Res,low}$ (2.0ΜΩ)
Κανόνας Λειτουργίας	Περιγραφή
$x_2 : \beta_{WT} \wedge \beta_{ELon} \wedge !\beta_{FT}$	Η αντίσταση νερού είναι σε επιθυμητά επίπεδα ( $>2\text{ΜΩ}$ ) και οι συσσωρευτές φορτίζονται έως του σημείου που η μονάδα ηλεκτρόλυσης επιτρέπεται να λειτουργήσει, ενώ η πίεση αποθήκευσης είναι μικρότερη του ανώτερου ορίου της (200bar)

Στον πίνακα 1, παρουσιάζεται ως παράδειγμα η μεταβλητή ( $\beta_{WT}$ ) που παρακολουθεί την ποιότητα νερού βάσει της μέτρησης της αγωγιμότητας του νερού, ενώ ο κανόνας  $x_2$  είναι υπεύθυνος για τη μετάβαση που ενεργοποιεί την παραγωγή υδρογόνου. Πρακτικά, όταν η συνθήκη που συνδέεται με τον κανόνα  $x_2$  ισχύει τότε το σύστημα πηγαίνει από την κατάσταση  $q_1$  στην  $q_2$  και η έξοδος  $y_2$  επιβάλλει τις κατάλληλες εντολές για να ξεκινήσει να λειτουργεί η συσκευή ηλεκτρόλυσης. Με παρόμοιο τρόπο ορίζονται τα υπόλοιπα στοιχεία του συνόλου των δύτιμων μεταβλητών για τα υπόλοιπα υποσυστήματα (EL, BF, FT, CP). Σε αυτούς τους κανόνες υπάρχουν και κάποιες παράμετροι που συσχετίζονται με τα όρια λειτουργίας των υποσυστημάτων. Για παράδειγμα, το άνω και κάτω όριο λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης καθορίζεται από την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή ( $SOC_{el,on}, SOC_{el,off}$ ). Η βέλτιστη τιμή αυτών των μεταβλητών επηρεάζει την απόδοση και τη λειτουργία ολόκληρου του σταθμού. Γι' αυτό και είναι σημαντικό να προσδιορίζονται οι βέλτιστες τιμές αυτών των παραμέτρων.

Εκτός των λογικών κανόνων και της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας, η βέλτιστη λειτουργία του σταθμού κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική. Βάση προηγούμενων μελετών [4,6], προέκυψε πως κατά την ανάλυση ευαισθησίας οι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή υδρογόνου και τη συνολική λειτουργία του σταθμού είναι τα όρια της κατάστασης φόρτισης ( $SOC_{el,on}, SOC_{el,off}$ ) των συσσωρευτών, η μέγιστη ισχύς ( $P_{bat,max}$ ) των συσσωρευτών που επιτρέπεται να αξιοποιηθεί στην συσκευή ηλεκτρόλυσης και η ελάχιστη ισχύς ( $P_{el,min}$ ) όπου επιτρέπεται να λειτουργεί η μονάδα ηλεκτρόλυσης. Επομένως το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται με σκοπό να προσδιορίσει τη βέλτιστη τιμή για κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους [6]. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καταχωρούνται ως μεταβλητές στο σύστημα SCADA και η συνολική λειτουργία καθορίζεται από την ΣΔΕ βάσει των προκαθορισμένων κανόνων λειτουργίας. Το επόμενο βήμα είναι η διερεύνηση της online λειτουργίας του σταθμού για διάφορες χρονικές περιόδους.

## 5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Αρχικά παρουσιάζεται η λειτουργία του σταθμού για δύο τυπικές μέρες της χειμερινής και της θερινής περιόδου (ηλιόλουστες ημέρες). Από αυτές τις αντιπροσωπευτικές μέρες έχουμε μια εκτίμηση για το χειρότερο και καλύτερο σενάριο για την παραγωγή υδρογόνου. Σκοπός της ανάλυσης σε αυτό το σημείο, αποτελεί η διερεύνηση των δυνατοτήτων του σταθμού παραγωγής υδρογόνου υπό παρόμοιες συνθήκες αλλά σε διαφορετικές εποχές του χρόνου. Στην συνέχεια, αναλύεται ένα σενάριο εξοικονόμησης ενέργειας και αποτιμώνται τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν. Επιπλέον παρατίθεται μια σύντομη μελέτη όπου αναλύονται τα οφέλη που προκύπτουν από τις δράσεις που στοχεύουν στην εξοικονόμηση της διαθέσιμης ενέργειας σε βάθος χρόνου.

Όπως προαναφέρθηκε ο σταθμός λειτουργεί αυτόματα χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιου χειριστή μέσω του συστήματος εποπτικού ελέγχου. Η δειγματοληψία είναι 1min. Η αποδοτικότητα του σταθμού αξιολογείται με βάση το παραγόμενο υδρογόνο και την απόδοση που υπολογίζεται από το λόγο της παρεχόμενης ενέργειας που δίνεται στο τροφοδοτικό της συσκευής ηλεκτρόλυσης προς την ενέργεια που καταναλώνει η συσκευή ηλεκτρόλυσης. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει συνολικά τα αποτελέσματα της λειτουργίας.

Πίνακας 2. Στατιστικά και συγκριτικά στοιχεία λειτουργίας					
	Πίεση H <sub>2</sub>	Παραγόμε νο H <sub>2</sub>	Μέση Παραγωγή H <sub>2</sub>	Ώρες Λειτουργίας	Μέση Απόδοση
Χειμερινή περίοδος	99 bar	8.5 Nm <sup>3</sup>	1.53 Nm <sup>3</sup> /h	5 h 30 min	69 %
Θερινή περίοδος	165 bar	13.4 Nm <sup>3</sup>	1.49 Nm <sup>3</sup> /h	9 h	71 %

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απόδοση του σταθμού είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Κατά μέσο όρο  $1\text{Nm}^3/\text{h}$  απαιτεί  $3.2\text{kWh} - 4\text{kWh}$  για να παραχθεί. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης παράγει υδρογόνο με την ίδια απόδοση για τις δύο μέρες ενώ η διαφορά τους είναι στο ότι παράγεται κατά 63% περισσότερο υδρογόνο επειδή λειτουργεί περισσότερες ώρες τη θερινή περίοδο. Η διαφορά που εμφανίζεται στην μέση παραγωγή οφείλεται στο ότι η συσκευή ηλεκτρόλυσης λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία του θερινού μήνα και χρειάζεται περιοδικά να μειώνεται η παραγωγή ώστε η θερμοκρασία να μην αυξηθεί πέρα από το μέγιστο όριο.

## 6. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Εκτός από την παραγωγή του υδρογόνου μας ενδιαφέρει και η αυτονομία του σταθμού. Όπως προαναφέρθηκε η τυπική λειτουργία του σταθμού βασίζεται στην ενέργεια που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές που φορτίζονται από τα φωτοβολταϊκά. Επιπλέον καθώς ο σταθμός παραγωγής υδρογόνου δεν είναι συνδεδεμένος στο κυρίως δίκτυο, είναι σημαντικό να αξιοποιείται με το βέλτιστο τρόπο η διαθέσιμη ενέργεια των συσσωρευτών. Εκτός από τα κύρια υποσυστήματα που καταναλώνουν ενέργεια, υπάρχουν και περιφερειακά συστήματα που απαιτούν ενέργεια ακόμα και όταν ο σταθμός δεν παράγει υδρογόνο. Μέσω της ανάλυσης της συνολικής λειτουργίας προκύπτει πως κάποια υποσυστήματα μπορούν μερικώς ή ολικώς να απενεργοποιούνται κατά την διάρκεια της νυχτερινής κυρίως περιόδου. Οι συσκευές που επιλέχθηκαν για να απενεργοποιηθούν είναι:

- Η αντλία του νερού.
- Ο αντιστροφάς του συμπιεστή.
- Η ισχύς που παρέχεται για το μετατροπέα ισχύος στη μονάδα ηλεκτρόλυσης.

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση που έχει η απενεργοποίηση των συσκευών αυτών πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική πειραματική μελέτη που βασίζεται σε δύο σενάρια. Στο πρώτο (*noES*) ο σταθμός λειτουργεί όπως αρχικά είχε σχεδιαστεί, ενώ στο δεύτερο απενεργοποιούνται οι επιλεγμένες συσκευές (*ES*). Μία μικρή αλλαγή πραγματοποιείται στο σύστημα SCADA έτσι ώστε να συμπεριληφθούν αυτές οι δράσεις, ενώ στην ΣΔΕ οι παραπάνω συσκευές απενεργοποιούνται όταν η FSM είναι σε κατάσταση αναμονής ( $q_0$ ) και ενεργοποιούνται όταν αρχίζει η προετοιμασία για την παραγωγή υδρογόνου ( $q_1$ ). Η πειραματική ανάλυση εστιάζει στο βάθος εκφόρτισης (*depth of discharge*, DOD) των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια της νύχτας, καθώς και στην καταναλισκόμενη ισχύ κατά τη διάρκεια της νύχτας από τα περιφερειακά υποσυστήματα. Ο πίνακας 3, παρουσιάζει αυτές τις περιπτώσεις.

Πίνακας 3. Επίδραση αποφάσεων απενεργοποίησης υποσυστημάτων			
Περίπτωση Λειτουργίας	Βάθος Εκφόρτισης (DOD)	Ρυθμός Εκφόρτισης	Αυτονομία Συστήματος
noES	29.4 %	2.1 %/h	2.8 μέρες
ES	21.5 %	1.54 %/h	3.9 μέρες

Ο σταθμός χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη στους συσσωρευτές ενέργεια για 14ώρες (από 17:10 έως 7:20). Κατά το σενάριο ES, η καταναλισκόμενη ισχύς για την ίδια περίοδο μειώνεται κατά  $0.36\text{kWh/hr}$  εξοικονομώντας συνολικά περίπου  $5.04\text{kWh}$ . Ο ρυθμός εκφόρτισης στο ίδιο σενάριο μειώνεται ενώ παρατηρείται και μία σημαντική μείωση κατά 8% του βάθους εκφόρτισης (διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης κατάστασης φόρτισης). Εάν τα παραπάνω αποτελέσματα επεκταθούν για λειτουργία ενός χρόνου, αποδεικνύεται πως μπορούν να εξοικονομηθούν έως  $1825\text{ kWh}$  που αντιστοιχούν σε περίπου  $346\text{ Nm}^3$  υδρογόνου (μέση τιμή ενός μήνα). Η μοναδική παρενέργεια που παρατηρείται αφορά σε μία μικρή καθυστέρηση που εισάγεται στο σύστημα όταν ετοιμάζεται για την παραγωγή

υδρογόνου (κατάσταση  $q_2$ ) και οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό δεν καθαρίζεται συνεχώς, λόγω του κλεισίματος της αντλίας. Υποθέτοντας πως η βοηθητική πηγή ενέργειας ενεργοποιείται σε SOC<14% και δεδομένου πως στην αρχή της ανάλυσης οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι, το κέρδος της αυτονομίας όπως παρατηρείται στον πίνακα 3 ανέρχεται σε 1 ημέρα.

Η επίδραση αυτών των μικρών αλλά σημαντικών δράσεων στην αυτονομία του συστήματος κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς όπως προαναφέρθηκε το σύστημα δεν είναι συνδεδεμένο στο κυρίως δίκτυο για συνεχή παροχή ισχύος. Κατά τους χειμερινούς μήνες στόχο αποτελεί η μη εξάντληση των μπαταριών ενώ τον υπόλοιπο χρόνο, βασική μέριμνα αποτελεί η παραγωγή υδρογόνου μέσω της αποθηκευμένης ενέργειας.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε υποδομή και λειτουργία ενός αυτόνομου σταθμού παραγωγής υδρογόνου που βασίζεται στην αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας και βρίσκεται εγκατεστημένος στο ΕΚΕΤΑ. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα η παραγωγή υδρογόνου γίνεται με αποδοτικό τρόπο ενώ παράλληλα το σύστημα ελέγχου φροντίζει την βέλτιστη λειτουργία των υποσυστημάτων. Συνολικά παρουσιάστηκε η προσαρμοστικότητα του συστήματος εποπτικού ελέγχου που επιτρέπει την ευέλικτη λειτουργία του σταθμού μέσω της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας. Κατά την ανάλυση της χειμερινής και θερινής περιόδου διαπιστώθηκε πως στη δεύτερη παράγεται σαφώς μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου λόγω μεγαλύτερης ηλιοφάνειας, ενώ η απόδοση του σταθμού είναι παρόμοια. Παράλληλα, μέσω τεχνικών απενεργοποίησης συσκευών κατά τη νυχτερινή περίοδο με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά η αυτονομία του σταθμού κατά τους χειμερινούς μήνες και να αυξηθεί η παραγωγή του υδρογόνου κατά τη θερινή περίοδο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wulf C., Kaltschmitt M., Life cycle assessment of hydrogen supply chain with special attention on hydrogen refuelling stations *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 37 (2012), pp. 16711-16721.
- [2] Winter C.J., Hydrogen energy — Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 34 (2009), pp. 1-52.
- [3] Bezergianni S., Kalogianni A., Dimitriadis A., Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing, *FUEL*, 93 (2012), 638-647.
- [4] Ziogou C., Ipsakis D., Seferlis P., Bezergianni S., Papadopoulou S., Voutetakis S., Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy, *Energy*, 55 (2013), 58-67.
- [5] Ziogou C., Ipsakis D., Elmasides C., Stergiopoulos F., Papadopoulou S., Seferlis P., Voutetakis S., Automation infrastructure and operation control strategy in a stand-alone power system based on renewable energy sources, *Journal of Power Sources*, 196 (2011), 9488-9499.



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΝΑΝΟΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΑΓΩΓΙΜΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Γ. Καστρινάκη<sup>1</sup>, Ε. Δάσκαλος<sup>1</sup>, Χ. Παγκούρα<sup>1</sup>, Ν. Βλάχος<sup>1</sup>,  
Γ. Σκεύης<sup>1\*</sup>, Α. Γ. Κωνσταντόπουλος<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Τεχνολογίας Σωματιδίων και Αερολυμάτων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ, 6<sup>ο</sup> χλμ. Χαριλάου-Θέρμης, Τ.Θ. 60361, 57001 Θέρμη, Θεσσαλονίκη  
e-mail: [gskevis@cperi.certh.gr](mailto:gskevis@cperi.certh.gr)

<sup>2</sup>Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 1517, 54006, Θεσσαλονίκη

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά στην διατήρηση των ενεργειακών πόρων, στην διασφάλιση της ενεργειακής τροφοδοσίας και στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας αποτελεί η τεχνολογία παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου από την ηλιακή διάσπαση του νερού. Μία καινοτόμος μέθοδος για την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος βασίζεται σε μίμηση της διεργασίας της φωτοσύνθεσης με την οποία τα φύλλα μπορούν να διαχωρίσουν το νερό σε O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας. Η διάταξη αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται από ποσότητα νερού. Η άνοδος εκτίθεται στο φως του ήλιου, και κατασκευάζεται από κατάλληλο διαφανές ηλεκτροαγώγιμο (TCO, Transparent Conductive Oxide) πορώδες υλικό. Η διάσπαση του νερού πραγματοποιείται στην πορώδη άνοδο και το παραγόμενο οξυγόνο απομακρύνεται μέσω των υδρόφοβων πόρων υποβοηθούμενο από επαγόμενη παλμική κίνηση του νερού μέσα στην νανοδομή της ανόδου. Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια και πρωτόνια συνενώνονται στην κάθοδο σε καθαρό υδρογόνο. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας διάσπασης του νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή κατάλληλου TCO και την βελτιστοποίηση της νανοδομής της μεμβράνης. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της πορώδους νανοδομημένης ανόδου χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό πειραματικών χαρακτηρισμών και εργαλείων αριθμητικής προσομοίωσης. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε μορφολογικός χαρακτηρισμός TCO κόνεων και μεμβρανών με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM, TEM). Παράλληλα αναπτύχθηκαν εργαλεία αριθμητικής προσομοίωσης για το σχεδιασμό της μικροπορώδους μεμβράνης μέσω μοντέλων εικονικών υλικών (virtual material models) βασιζόμενων στη γεωμετρικά πιστή ψηφιακή αναπαράσταση της μικροδομής. Τα εικονικά δείγματα των μικροδομημένων υλικών δημιουργούνται με αλγόριθμους εναπόθεσης των πρωτογενών νανοσωματιδίων (random sequential addition) με τρόπο που μιμείται τις πραγματικές διεργασίες σύνθεσης των μεμβρανών, επιτρέποντας έτσι την αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιασμών συναρτήσει μεταβλητών που καθορίζουν τα μικροδομικά χαρακτηριστικά. Οι παράμετροι που μπορούν να ελεγχθούν περιλαμβάνουν το πάχος και το συνολικό πορώδες του ηλεκτροδίου, το μέσο μέγεθος και κατανομή μεγέθους των πρωτογενών σωματιδίων, τον βαθμό συσσωμάτωσης κτλ. Επιπλέον, παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα και συγκριτική αξιολόγηση κόνεων/μεμβρανών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή σταθμισμένων τιμών μακροσκοπικών ιδιοτήτων της μεμβράνης (διαπερατότητα, θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, κτλ.) για χρήση σε τρισδιάστατους CFD υπολογισμούς σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμο υδρογόνο, Ηλεκτροαγώγιμες μεμβράνες, Ψηφιακή αναπαράσταση, Αλγόριθμοι εναπόθεσης σωματιδίων

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να συμβάλλει αποτελεσματικά στην διατήρηση των ενεργειακών πόρων, στην διασφάλιση της ενεργειακής τροφοδοσίας και στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας αποτελεί η τεχνολογία παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου από την ηλιακή διάσπαση του νερού, η οποία σήμερα μπορεί να επιτευχθεί σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες [1]. Μία καινοτόμος μέθοδος για την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος βασίζεται σε μίμηση της διεργασίας της φωτοσύνθεσης με την οποία τα φύλλα μπορούν να διαχωρίσουν το νερό σε  $O_2$  και  $H_2$  με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας. Η ανάπτυξη πρότυπης εργαστηριακής μονάδας τεχνητής φωτοσύνθεσης αποτελεί αντικείμενο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ArtipHyction. Η διάταξη αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται από ποσότητα νερού. Η άνοδος εκτίθεται στο φως του ήλιου, και κατασκευάζεται από κατάλληλο διαφανές ηλεκτροαγώγιμο (TCO, Transparent Conductive Oxide) πορώδες υλικό. Η διάσπαση του νερού πραγματοποιείται στην πορώδη άνοδο και το παραγόμενο οξυγόνο απομακρύνεται μέσω των υδρόφοβων πόρων υποβοηθούμενο από επαγόμενη παλμική κίνηση του νερού μέσα στην νανοδομή της ανόδου. Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια και πρωτόνια συνενώνονται στην κάθοδο σε καθαρό υδρογόνο. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας διάσπασης του νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή κατάλληλου TCO και την βελτιστοποίηση της νανοδομής της μεμβράνης. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της πορώδους νανοδομημένης ανόδου χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό πειραματικών χαρακτηρισμών και εργαλείων αριθμητικής προσομοίωσης.

## 2. ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΑΓΩΓΙΜΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

Η επιλογή της κατάλληλης νανοδομημένης TCO μεμβράνης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία της ανόδου της μονάδας τεχνητής φωτοσύνθεσης. Αυτό εξαρτάται τόσο από την νανοδομή της κόνεως όσο και από την μικροδομή της μεμβράνης. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι TCO και συγκεκριμένα το Indium Tin Oxide (ITO) [2], το Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) [3] και το Aluminium Zinc Oxide (AZO) [4]. Κάθε ένα από τα παραπάνω υλικά έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Το ITO έχει εξαιρετική οπτική διαπερατότητα και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα αλλά είναι ιδιαίτερα ακριβό λόγω της σχετικής σπανιότητας του ινδίου. Το FTO, στο οποίο άτομα φθορίου αντικαθιστούν το οξυγόνο στο κρυσταλλικό πλέγμα παρέχοντας ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία προάγουν την αγωγιμότητα των δειγμάτων, είναι ένα n-τύπου διαφανές αγώγιμο οξείδιο (TCO). Σε σύγκριση με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ITO, το εμπλουτισμένο με φθόριο  $SnO_2$  χαρακτηρίζεται από σημαντικά υψηλότερη διαπερατότητα στο ορατό φάσμα, ενώ παράλληλα επιδεικνύει ιδιαίτερα αυξημένη θερμική ανθεκτικότητα, ισχυρή προσκόλληση σε υαλώδη υποστρώματα και εκπληκτική χημική σταθερότητα. Αρχικά ως αντικαταστάτης του ITO προτάθηκε το AZO λόγω της υψηλής διαπερατότητας, της μη τοξικότητας και του χαμηλού κόστους του. Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές τα προαναφερθέντα οξείδια αναπτύσσονται ως συνεχή υμένα εν αντιθέσει με την μορφολογία πορώδους μεμβράνης η οποία μελετάται στην παρούσα εργασία. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε στοιχειακός χαρακτηρισμός των TCO κόνεων με EDS από SEM και TEM ανάλυση, και μοριακός χαρακτηρισμός από FTIR ενώ σε δεύτερο στάδιο ακολούθησε μορφολογικός χαρακτηρισμός τριών μεμβρανών ( $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  και METCO ( $Al_2O_3-TiO_2$ ) με SEM και μοριακός χαρακτηρισμός με φασματοσκοπία Raman. Οι μεμβράνες παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο πυρόλυσης πλάσματος στα πλαίσια του προγράμματος ArtipHyction.

**Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Διέλευσης (TEM):** Για την SEM ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο JEOL® JSM 6300 το οποίο είναι εξοπλισμένο με το σύστημα Oxford® ISIS 2000 το οποίο παρέχει την δυνατότητα διενέργειας EDS ανάλυσης. Για την προετοιμασία των δειγμάτων αρχικά έγινε απόθεση 2-3 σταγόνων των αραιωμένων αιωρημάτων στην επιφάνεια δειγματοφορέων mica με μεταλλικό/μαγνητικό υπόστρωμα και στη συνέχεια ακολούθησε παραμονή τους σε



προστατευμένο περιβάλλον για περίοδο εβδομήντα ημερών για την εξάτμιση του διαλύτη.



Εικόνα-11 : Εικόνες των κυλινδρικών μεμβρανών ρητίνης εγκιβωτισμένη με

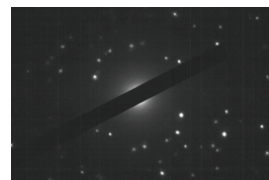
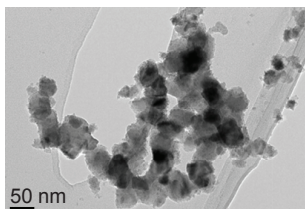
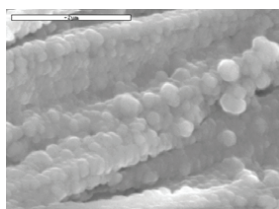
Εν συνεχεία, για να ενισχυθεί η αγωγιμότητα του δείγματος, έγινε επικάλυψή του με λεπτό υμένιο χρυσού με διαδικασία καθοδικής ιοντοβολής (sputtering) για περίοδο πέντε λεπτών. Για την απεικόνιση της μορφολογίας των μεμβρανών σε διαφορετικούς προσανατολισμούς πραγματοποιήθηκε εγκιβωτισμός τους σε ρητίνη. Πιο συγκεκριμένα, οι μεμβράνες τοποθετήθηκαν με τον επιθυμητό προσανατολισμό, σταθεροποιήθηκαν, με συγκεκριμένη διεργασία και σε τελικό στάδιο έγινε έγχυση της ρητίνης. Στην Εικ. 1 απεικονίζονται οι τελικοί

στερεοποιημένοι κύλινδροι ρητίνης. Η TEM ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το μικροσκόπιο JEOL<sup>®</sup> 2011 (200 KV, σημειακή ανάλυση: 0.23nm) το οποίο είναι εξοπλισμένο με τον EDS ανιχνευτή INCAx-sight της Oxford<sup>®</sup>. Για την προετοιμασία των δειγμάτων έγινε απόθεση μιας σταγόνας των αραιωμένων αιωρημάτων στην επιφάνεια TEM δειγματοφορέων διάτρητου υμενίου άνθρακα (lacey carbon film), χάλκινου υποστρώματος, πυκνότητας πλέξης (mesh) 200 της EMS<sup>®</sup>.

**Φασματοσκοπία Raman:** Για τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων με Raman ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο Renishaw 2000 micro Raman το οποίο είναι εφοδιασμένο με laser ιόντων αργού 514nm. Η δέση laser έχει διατομή 1μm και εστιάζει στην επιφάνεια του δείγματος χαρακτηρίζοντας έτσι τους μοριακούς της δεσμούς. Τα αιωρήματα (slurry) αποτέθηκαν στον δειγματοφορέα του μικροσκοπίου και αφέθηκαν στους 100°C έως πλήρους εξάτμισης του διαλύτη με σκοπό να απομείνει μόνο δείγμα κόνεως TCO. Οι ανοιχτόχρωμες σκόνες παρουσίασαν έντονη φωταύγεια λόγω της έντονης απορρόφησης της δέσης laser, με αποτέλεσμα κανένα από τα τέσσερα δείγματα να μην δώσει διακριτές κορυφές Raman. Αντιθέτως, οι σκουρόχρωμες μεμβράνες, οι οποίες είχαν λεία και τραχιά επιφάνεια χαρακτηρίστηκαν επιτυχώς. Στην περίπτωση των μη επικαλυμμένων μεμβρανών τα φάσματα ήταν πανομοιότυπα, συνηγορώντας υπέρ της ομοιογένειάς τους, ενώ στις περιπτώσεις όπου η τραχιά επιφάνεια ήταν επικαλυμμένη λαμβάνονταν οι κορυφές των μοριακών δεσμών του εκάστοτε οξειδίου. Όλα τα φάσματα ελήφθησαν σε περιβάλλον ελεγχόμενης υγρασίας στους 23 °C.

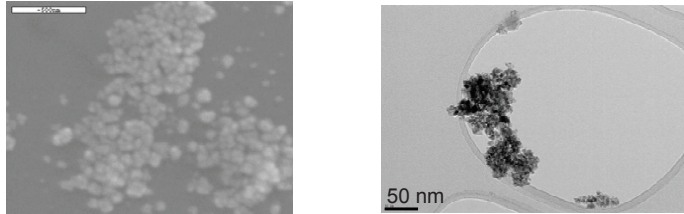
**Φασματοσκοπία FTIR:** Για την FTIR ανάλυση των κόνεων χρησιμοποιήθηκε το φασματοσκόπιο Smith IlluminatiR το οποίο είναι εξοπλισμένο με συνθεσιακό μικροσκόπιο ώστε να χαρακτηριστούν οι μοριακοί δεσμοί και να συσχετιστούν οι διαφορετικές συνθήκες σύνθεσης με την αντίστοιχη δομή. Για την προετοιμασία των κόνεων έγινε απόθεση σταγόνων των αιωρημάτων σε κατάλληλους δειγματοφορείς FTIR και εν συνεχεία τοποθετήθηκαν για ξήρανση για περίοδο δύο ημερών ώστε να απομακρυνθεί ο διαλύτης και να απομείνει το δείγμα υπό μορφή σκόνης.

Ο χαρακτηρισμός των κόνεων AZO με SEM αποκάλυψε την ύπαρξη πυκνών, σφαιρικών, κοκκωδών δομών, με το χαρακτηριστικό μέγεθος κόκκου να βρίσκεται στο εύρος των 100 με 200nm, Εικ. 2(α). Από την αντίστοιχη TEM ανάλυση προέκυψε ότι το χαρακτηριστικό μέγεθος των πρωτογενών σωματιδίων βρίσκεται στο εύρος 20 με 40nm, παρουσιάζουν χαμηλό βαθμό συσσωμάτωσης, Εικ. 2(β), ενώ έχουν μονοκρυσταλλική δομή, Εικ. 2(γ).

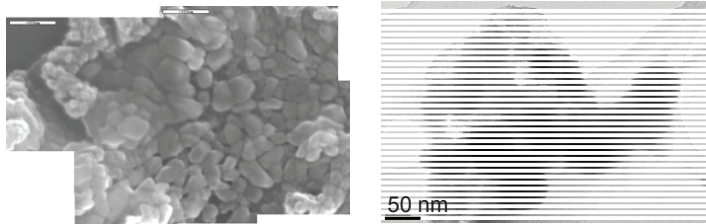


Εικόνα 2: (α) SEM απεικονίσεις AZO σωματιδίων σε ανάλυση 2μm, (β) TEM απεικονίσεις AZO σωματιδίων σε ανάλυση 50 nm, (γ) Διάγραμμα περίθλασης των AZO σωματιδίων.

Με την SEM ανάλυση των κόνεων ITO, Εικ. 3(α), τα πρωτογενή σωματίδια εμφανίστηκαν να συσσωματώνονται σε πιο πυκνές δομές, σε σχέση με τα αντίστοιχα των AZO κόνεων, ενώ παράλληλα σχηματίζουν μικρότερους κόκκους, της τάξης των 50nm. Από την TEM ανάλυση των κόνεων ITO, Εικ. 3(β), ο βαθμός συσσωμάτωσης των πρωτογενών σωματιδίων βρέθηκε να είναι αυξημένος εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα σωματίδια AZO, με χαρακτηριστικό μέγεθος της τάξης των 10nm, ενώ προέκυψε ότι είναι και πιο κρυσταλλικά

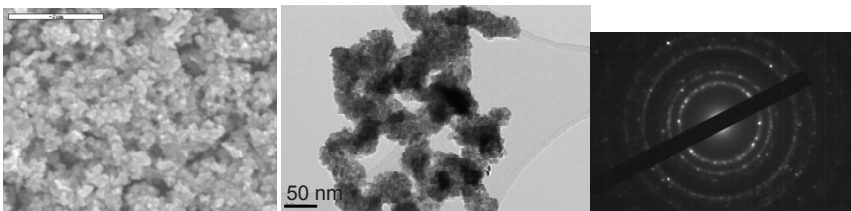


Εικόνα 3: (α) SEM απεικόνιση σωματιδίων ITO σε ανάλυση 500nm, (β) TEM απεικόνιση σωματιδίων ITO σε ανάλυση 50nm.



Εικόνα 4: (α) SEM απεικόνιση του ακατέργαστου FTO δείγματος σε ανάλυση 500μm, (β) TEM απεικόνιση του ακατέργαστου FTO δείγματος σε ανάλυση 50nm

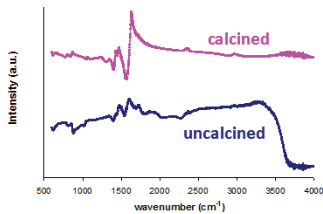
Για τον SEM χαρακτηρισμό του δείγματος ακατέργαστου FTO πραγματοποιήθηκε απεικόνιση μεγαλύτερης επιφάνειας με συνδυασμό τεσσάρων διαφορετικών λήψεων αλληλοεπικαλυπτόμενων περιοχών με σκοπό την ανάδειξη όχι μόνο της τοπικής αλλά και της ευρύτερης μορφολογίας των σωματιδίων Εικ. 4(α). Από την ανάλυση προέκυψε ότι τα πρωτογενή σωματίδια έχουν ένα τυπικό μέγεθος της τάξης των 50nm. Η αντίστοιχη TEM ανάλυση έδειξε ότι τα πρωτογενή σωματίδια συναθροίζονται σχηματίζοντας άμορφους κόκκους, γεγονός που δείχνει ότι η σύνθεση ηλεκτροδίων μέσω απόθεσης σωματιδίων με πρόδρομη ένωση το FTO είναι μια διαδικασία με πολλές προκλήσεις, Εικ. 4(β).



Εικόνα 5: (α) SEM απεικόνιση θερμικά κατεργασμένου FTO δείγματος σε ανάλυση 500μm, (β) TEM απεικόνιση θερμικά κατεργασμένου FTO δείγματος σε ανάλυση 50nm, (γ) Διάγραμμα περίθλασης θερμικά κατεργασμένου FTO δείγματος.

Από την SEM ανάλυση του θερμικά κατεργασμένου δείγματος FTO προέκυψε ότι οι κόκκοι των σωματιδίων είναι μικρότεροι σε σύγκριση με αυτούς του μη κατεργασμένου, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν πυκνότερη συσσωμάτωση, πιθανόν λόγω της θερμικής κατεργασίας, Εικ. 5(α). Η αντίστοιχη TEM ανάλυση έδειξε ότι μορφολογικά χαρακτηρίζεται από μικρότερα νανοσωματίδια υψηλότερου βαθμού συσσωμάτωσης, Εικ. 5(β), ενώ, από

πλευράς κρυσταλλικότητας, τα κατεργασμένα σωματίδια εμφανίζουν κρυσταλλική δομή εν αντιθέσει με τα αντίστοιχα άμορφα σωματίδια τα οποία δεν έχουν υποστεί θερμική κατεργασία. Επίσης, οι συσσωματώσεις σχηματίζουν fractal δομές, πιθανώς λόγω της κατεργασίας, σχηματίζοντας έτσι ένα πορώδες δίκτυο από τα τοιχώματα των πρωτογενών σωματιδίων. Αυτό το χαρακτηριστικό αποδίδει ένα πλεονέκτημα στο θερμικά κατεργασμένο FTO όσον αφορά την πιθανή χρήση του ως υλικό ηλεκτροδίων, καθώς με έλεγχο των συνθηκών θερμικής κατεργασίας μπορεί να καθοριστεί και η δομή του πορώδους δικτύου.

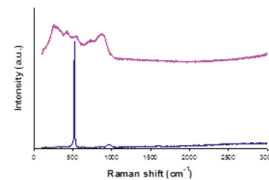


**Εικόνα 6:** Φάσμα FTIR των θερμικά κατεργασμένων και ακατέργαστων δειγμάτων FTO.

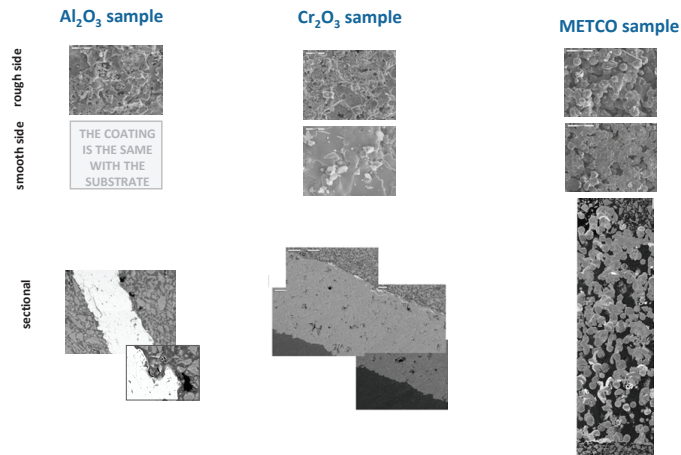
Οι μεμβράνες χαρακτηρίστηκαν επίσης με φασματοσκοπία Raman με σκοπό την εκτίμηση των επιφανειακών μοριακών δεσμών των δύο πλευρών των μεμβρανών. Η Εικ. 8 απεικονίζει τις κορυφές των  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  μεμβρανών. Η τραχιά πλευρά εμφανίζει κορυφή στα  $150\text{ cm}^{-1}$  κάτι που πιθανώς οφείλεται στο  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ , ενώ οι υπόλοιπες κορυφές σε μεγαλύτερους κυματάρθμους δεν μπορούν να αποδοθούν στο  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ή στο  $\text{TiO}_2$ . Η ομαλή πλευρά εμφανίζει την χαρακτηριστική κορυφή του  $\text{TiO}_2$  στα  $510\text{ cm}^{-1}$ .

Τα φάσματα FTIR παρουσιάζουν την ποιοτική διαφορά ανάμεσα στα θερμικά κατεργασμένα και ακατέργαστα FTO σωματίδια, όπου τα κατεργασμένα δείγματα δίνουν μια παραμόρφωση στα  $1600\text{ cm}^{-1}$  που μπορεί να αποδοθεί στο πάχος των αποξηραμένων μεμβρανών του δείγματος.

Οι μεμβράνες χαρακτηρίστηκαν επίσης με φασματοσκοπία Raman με σκοπό την εκτίμηση των



**Εικόνα 8 :** Φάσμα Raman της τραχιάς και λείας επιφάνειας του υμενίου  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ .



**Εικόνα 7:** SEM απεικονίσεις της τραχιάς και λείας επιφάνειας καθώς και πλευρική τομή των δειγμάτων  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and METCO ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ )

### 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Η αύξηση της απόδοσης της τεχνητής φωτοσύνθεσης απαιτεί την βελτιστοποίηση της μορφολογίας και της μικροδομής των μικροπορώδων ηλεκτροδίων με χρήση υπολογιστικών εργαλείων. Το δεύτερο τμήμα της εργασίας αφορά την ανάπτυξη και την εφαρμογή

εργαλείων αριθμητικής προσομοίωσης για το σχεδιασμό της μικροπορώδους μεμβράνης μέσω μοντέλων εικονικών υλικών (virtual material models) βασισμένων στη γεωμετρικά πιστή ψηφιακή αναπαράσταση μικροδομημένων υλικών. Τα εικονικά δείγματα της μικροδομής δημιουργούνται με τρόπο που μιμείται τις πραγματικές διεργασίες σύνθεσης των μεμβρανών, επιτρέποντας έτσι την αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιασμών συναρτήσει μεταβλητών που καθορίζουν τα μικροδομικά χαρακτηριστικά. Η αξιολόγηση των ψηφιακών υλικών γίνεται με την προσομοίωση των φαινομένων που διέπουν την λειτουργία/απόδοση των μεμβρανών στην εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Η υπολογιστική εργαλειοθήκη που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σωματιδίων και Αερολυμάτων του ΕΚΕΤΑ και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, συνίσταται στην εφαρμογή ρευστομηχανικών επιλυτών όπως και μεθοδολογιών με διακριτά στοιχεία/σωματίδια σε συνδυασμό με πολύ λεπτομερή περιγραφή της μικροδομής των μεμβρανών. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ακριβή περιγραφή φαινομένων μεταφοράς (π.χ. ροή διαμέσου διαπερατού υλικού, ηλεκτρική αγωγιμότητα) στις μεμβράνες και αποτελεί “σχεδιαστικό εργαλείο” βασισμένο στην δημιουργία ρεαλιστικών ψηφιακών απεικονίσεων της πορώδους μικροδομής με μεθόδους που μιμούνται τις διεργασίες σύνθεσης της υπό μελέτη μικροδομής (χωρίς να αποτελούν εξ αρχής φυσικές προσομοιώσεις αυτών των πολύπλοκων διεργασιών). Η εφαρμογή της μεθόδου ακολουθεί τρία διακριτά στάδια:

- Δημιουργία ψηφιακών αναπαραστάσεων των πιθανών σχεδιασμών της μεμβράνης με βάση τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές των νανο-υλικών.
- Εξαγωγή τοπικών/σταθμισμένων σχεδιαστικών παραμέτρων (διαπερατότητα, αγωγιμότητα, καμπύλες διήθησης, κτλ) για την μοντελοποιημένη μικροδομή της μεμβράνης.
- Αξιολόγηση υποψηφίων σχεδιασμών μεμβράνης και λειτουργικών σεναρίων συναρτήσει των ανωτέρω παραμέτρων.

Στην παρούσα εργασία, η ψηφιακή σύνθεση των μεμβρανών επιτυγχάνεται μέσω της τυχαίας εναπόθεσης πρωτογενών γεωμετρικών σχημάτων με τρόπο που στοχεύει στο να αναπαραχθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης. Διατηρείται στον αλγόριθμο αρκετή ομοιότητα με τις φυσικές διεργασίες παραγωγής της μεμβράνης ώστε οι παράμετροι της ψηφιακής αναπαράστασης να σχετίζονται με την διεργασία σύνθεσης στο εργαστήριο. Η ανωτέρω γενική μεθοδολογία απαιτεί προσαρμογή, σε επίπεδο αλγορίθμου / υπολογιστικού κώδικα, ανάλογα με το είδος του υλικού.

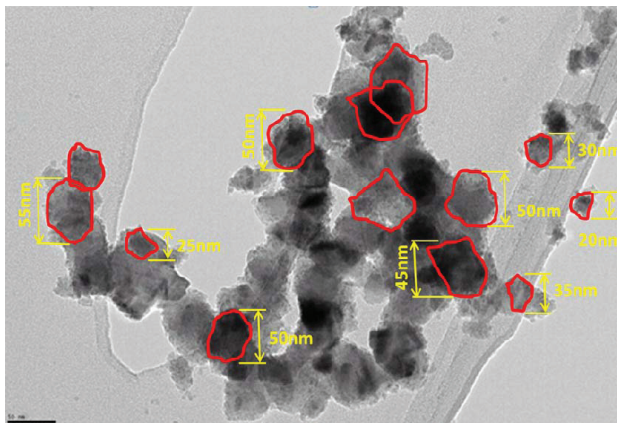
Βασικό στοιχείο της ψηφιακής αναπαραγωγής των μεμβρανών της παρούσας εργασίας είναι τα νανοσωματίδια που συνθέτουν την μεμβράνη. Τα σφαιρικά σωματίδια είναι τα απλούστερα διακριτά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο τυχαίας διαδοχικής προσθήκης (random sequential addition) για την κατασκευή της μεμβράνης. Ωστόσο, ο χαρακτηρισμός των TCO κόνων, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καταδεικνύει ότι η αλγοριθμική μεθοδολογία πρέπει να προσαρμοσθεί για την απεικόνιση της

μορφολογίας μη-σφαιρικών σωματιδίων (πολυεδρικοί κρυσταλλίτες). Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένας πιο γενικός φορμαλισμός για μη-σφαιρικά σωματίδια. Αυτός συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη μίας γεννήτριας πρωτογενών σχημάτων (grain shape generator) ο οποίος μπορεί να ελέγχει, σε στατιστική βάση, την γωνιότητα, των αριθμό εδρών, και τις αναλογίες των διαστάσεων των παραγόμενων σχημάτων. Τυπικά μεγέθη



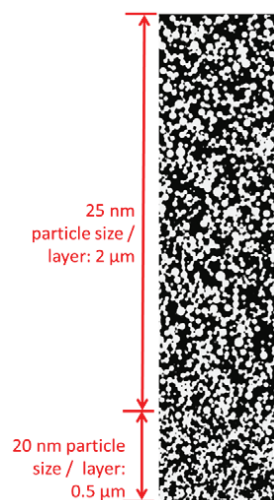
Εικόνα 9: Ένα σύνολο (βιβλιοθήκη) σχημάτων που προσομοιάζει τα πρωτογενή σωματίδια που εναποτίθενται στις μικροδομημένες μεμβράνες.

αυτών των σωματιδίων είναι στο εύρος 10 με 50 nm. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε μια βασική βιβλιοθήκη ψηφιακών κόκκων αποτελούμενη από 70 σχήματα που προέρχονται από 7 διαφορετικά σύνολα μορφολογικών παραμέτρων. Ένα χαρακτηριστικό δείγμα των ψηφιακών κόκκων/σχημάτων απεικονίζεται στην Εικ. 9.



Εικόνα 10: Εξαγωγή γεωμετρικής και οπτικής πληροφορίας από εικόνες SEM/TEM για τον προσδιορισμό πρωτογενών σωματιδίων της ψηφιακά αναπαραγόμενης μεμβράνης.

Οι γεωμετρικοί παράμετροι επιλέχθηκαν με βάση την ποικιλία μορφολογίας που παρατηρήθηκε στις απεικονίσεις των σωματιδίων από μικροσκοπία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της οπτικής/γεωμετρικής πληροφορίας που προέρχεται από τον μικροσκοπικό χαρακτηρισμό και καθοδηγεί την αλγοριθμική διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικ. 10. Η δημιουργία ψηφιακών μεμβρανών επιτυγχάνεται με τυχαία δειγματοληψία από τη βιβλιοθήκη ψηφιακών σωματιδίων και εφαρμόζοντας την επιθυμητή κατανομή μεγέθους. Τυπικά μεγέθη ενός ψηφιακού/εικονικού δείγματος των μεμβρανών περιγράφεται από διαστάσεις περίπου  $10 \times 10$  διαμέτρους του μέσου σωματιδίου (δηλαδή, αντιπροσωπεύεται μια περιοχή μεμβράνης περί τα  $200 \times 200$  nm, αναλόγως τις απαιτήσεις της προσομοίωσης). Στην πορεία της ανάπτυξης των μεθόδων αναπαραστάσης, υπήρξε προσαρμογή του αλγορίθμου της ψηφιακής δόμησης του πορώδους δείγματος ως ανταπόκριση στις ιδιαιτερότητες των μεμβρανών TCO και συγκεκριμένα για την προσομοίωση της ξήρανσης ενός υμενίου από μέθοδο spin-coating ή screen-printing (οι συνηθέστερες διαδικασίες σχηματισμού μεμβράνης από αιώρημα νανοσωματιδίων). Η προσομοίωση του σχηματισμού της μεμβράνης έχει επίσης τη δυνατότητα να εφαρμόσει κλιμακωτή διαβάθμιση μεγεθών (μέγεθος νανοσωματιδίων, πυκνότητα σιβάδας) σε όλο το πάχος του στρώματος, μιμούμενο είτε διαδοχικές επικαλύψεις ή την διαστρωμάτωση της σιβάδας που προκύπτει κατά την διεργασία της ξήρανσης.

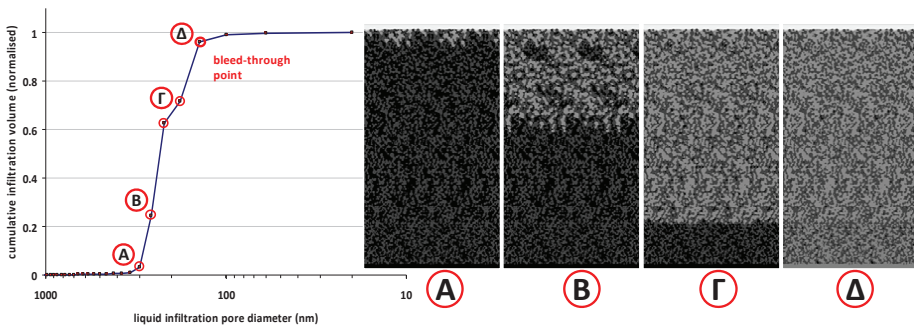


Εικόνα 11: Τομή μεμβράνης με 2 διαβαθμίσεις πυκνότητας

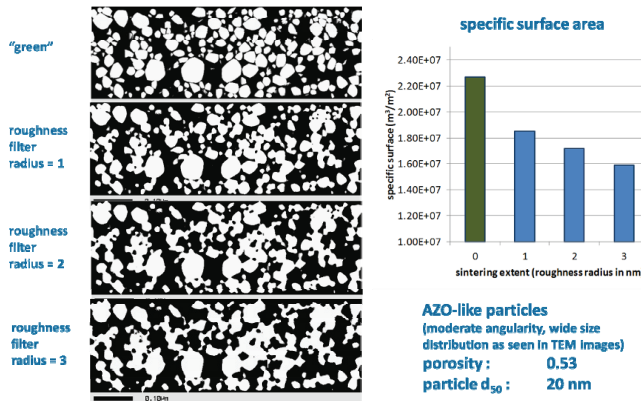
Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζεται προσομοίωση της ροής ενός ηλεκτρολυτικού υγρού διαμέσου μεμβρανών TCO. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την δημιουργία ψηφιακού δείγματος της μεμβράνης METCO ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω. Τομή της ψηφιακά παραγόμενης μεμβράνης απεικονίζεται στην Εικ. 11. Η μεμβράνη αποτελείται από δύο στρώματα. Το κύριο στρώμα χαρακτηρίζεται από

μέσο μέγεθος σωματιδίων 25 nm, ενώ ένα πρόσθετο, πυκνότερο και πιο λεπτόκοκκο, υμένιο παρέχει ένα φράγμα για την αποτροπή της διαφυγής του ηλεκτρολύτη.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν υποθέτοντας διήθηση του ηλεκτρολύτη στη μεμβράνη από την πλευρά της κύριας στρώσης και υδρόφοβη συμπεριφορά του υλικού της μεμβράνης. Η πίεση του υγρού αυξήθηκε σε βήματα χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην αντιστοιχία μεταξύ της ακτίνας του μηνίσκου της επιφάνειας του υγρού (αποτέλεσμα της επιφανειακής τάσης) και της πίεσης διήθησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στην Εικ. 12. Η διείσδυση του διαλύματος δεν είναι συνεχής αλλά λαμβάνει χώρα σε απότομες “εκρήξεις” καθώς η επιτυγχάνεται η πίεση που επιτρέπει να ξεπεραστούν οι στενώσεις στη μεμβράνη. Είναι επίσης ενδιαφέρον να τονισθεί ότι σε ορισμένα στάδια της ροής το υγρό παρακάμπτει περιοχές της μεμβράνης και ρέει κατά προτίμηση μέσω πόρων μεγαλύτερου μεγέθους. Ο όγκος τέτοιων παρακαμπτώμενων περιοχών μπορεί να υπολογιστεί για κάθε ξεχωριστή σύνθεση μεμβράνης.



Εικόνα 12: Προσομοίωση διείσδυσης υγρού σε ψηφιακά ανακατασκευασμένη μεμβράνη TCO.



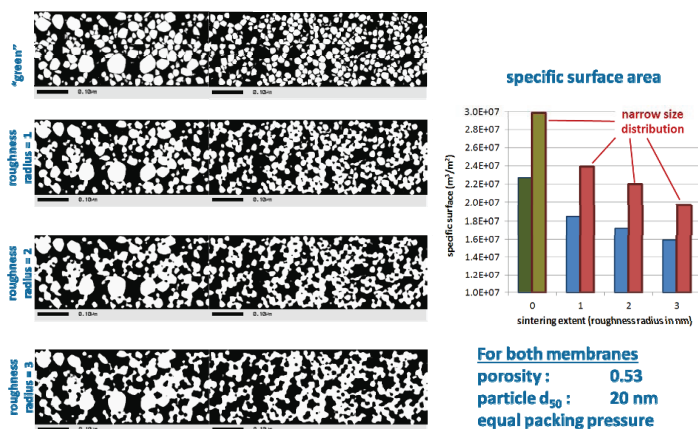
Εικόνα 13: Επίδραση της πυροσυσσωμάτωσης (sintering) στην ειδική επιφάνεια ψηφιακά ανακατασκευασμένης μεμβράνης AZO.

Η μεθοδολογία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σχεδιασμού προκειμένου να παρέχει ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με την επίδραση μιας κατεργασίας της μεμβράνης, στην μορφολογία της και στην συμπεριφορά της. Ορισμένα επιλεγμένα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Μια σημαντική παράμετρος είναι η έκταση της πυροσυσσωμάτωσης που προκύπτει ως συνέπεια είτε της διαδικασίας εναπόθεσης ή της

μετέπειτα θερμικής κατεργασίας. Η πυροσυσσωμάτωση προσομοιάζεται με καθαρά γεωμετρικό τρόπο: ένα φίλτρο τοπικής καμπυλότητας (τραχύτητας) της επιφάνειας των πόρων σαρώνει την ψηφιακή γεωμετρία της μεμβράνης και καταδεικνύει περιοχές υλικού που πρέπει να υποβληθούν σε μείωση τραχύτητας (εναλλαγή στερεού υλικού σε πόρο ή ανιστρόφως). Αυξάνοντας τη λεγόμενη ακτίνα τραχύτητας του φίλτρου, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται σταθερό το πορώδες της μεμβράνης, μπορεί να προσομοιωθεί πιο έντονη πυροσυσσωμάτωση όπως απεικονίζεται στην Εικ. 13 όπου παρουσιάζεται και η επίδραση του βαθμού πυροσυσσωμάτωσης στην ειδική επιφάνεια μεμβρανών AZO. Είναι προφανές ότι η ειδική επιφάνεια μειώνεται καθώς μειώνονται οι μικρότεροι πόροι και μικρότερα σωματίδια ενσωματώνονται σε μεγαλύτερα. Παρόμοια ποσοτικά αποτελέσματα μπορούν να χαρακτηριστούν και την επίδραση της κατανομής μεγέθους των πρωτογενών σωματιδίων, όπως φαίνεται στην Εικ. 14. Η στενότερη κατανομή μεγέθους του αρχικού αιωρήματος (περισσότερο ελεγχόμενες συνθήκες σύνθεσης) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής επιφάνειας της μεμβράνης, για ένα δεδομένο επίπεδο πυροσυσσωμάτωσης, καθώς τα σωματίδια γίνονται πιο "παρόμοια".

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μεθοδολογία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού πορώδους ναοδομημένης ανόδου, σε πρότυπο σύστημα τεχνητής φωτοσύνθεσης για παραγωγή υδρογόνου, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό πειραματικών χαρακτηρισμών και εργαλείων αριθμητικής προσομοίωσης. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε μορφολογικός χαρακτηρισμός και αξιολόγηση TCO κόνεων και μεμβρανών ο οποίος και κατέδειξε την επίδραση της διαδικασίας εναπόθεσης και της θερμικής κατεργασίας στην μορφολογία των υλικών. αναπτύχθηκαν εργαλεία αριθμητικής προσομοίωσης για το σχεδιασμό της μικροπορώδους μεμβράνης μέσω μοντέλων εικονικών υλικών (virtual material models) βασιζόμενων στη δημιουργία 3-D ψηφιακών δειγμάτων μεμβράνης μέσω στοχαστικών αλγόριθμων εναπόθεσης σωματιδίων (random sequential addition). Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ροής υγρού διαμέσου πορωδών μεμβρανών. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της διαδικασίας σύνθεσης της μεμβράνης σε δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της. Δείχθηκε ότι διαπερατότητα είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από την έκταση της πυροσυσσωμάτωσης. Από την άλλη πλευρά, η ειδική περιοχή επιφάνειας της μεμβράνης, ένας σημαντικός παράγοντας για την ανταλλαγή φορτίου, εξαρτάται από πυροσυσσωμάτωση και από την κατανομή μεγέθους των πρωτογενών σωματιδίων.



Εικόνα 14: Επίδραση της πυροσυσσωμάτωσης (sintering) και της κατανομής μεγέθους των πρωτογενών σωματιδίων στην ειδική επιφάνεια της μεμβράνης AZO.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το Hydrogen & Fuel Cell Joint Technology Initiative και συγκεκριμένα από το ερευνητικό έργο "*Fully artificial photo-electrochemical device for low temperature hydrogen production, ArtipHyction*" (Contact No. 303435).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Konstandopoulos A.G., Lorentzou S., 2010 "Novel Monolithic Reactors for Solar Thermochemical Water Splitting", In (Vayssieres L., Ed.) *On Solar Hydrogen and Nanotechnology*, John Wiley & Sons, pp. 623-639.
- [2] Popovic J., Grzeta B., Tkalcec, E., Tonejc, A., Bijelic, M., Goebbert, C., 2011. "Effect of tin level on particle size and strain in nanocrystalline tin-doped indium oxide (ITO)" *Materials Science and Engineering B* 176, pp. 93-98.
- [3] Moholkar, A.V., Pawar, S.M., Rajpure, K.Y., Bhosale, C.H., Kim, J.H., 2009. "Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films" *Applied Surface Science*, 255, pp. 9358-9364.
- [4] Zhu D., Li, K., Luo, F., Zhou, W., 2009. "Preparation and infrared emissivity of ZnO: Al (AZO) thin films" *Applied Surface Science* 255, pp. 6145–6148.
- [5] P. Koumoutsakos et al. "Nanoscale Fluid Mechanics," in (A. Lakhtakia, Ed.) *The Handbook of Nanotechnology. Nanometer Structures: Theory, Modeling, and Simulation*, SPIE, Washington, USA, 2004.
- [6] Vlachos, N.D., Konstandopoulos, A.G., 2006. "Digital materials methods for DPF development" SAE Technical Paper No 90162.



## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ

**Ν. Κακλίδης<sup>1</sup>, Μ. Νεοφύτου<sup>2</sup>, Γ.Ε. Μαρνέλλος<sup>1,3</sup>, Μ. Κονσολάκης<sup>4\*</sup>**

<sup>1</sup>Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας,  
50100, Κοζάνη

<sup>2</sup>Κυλινδρόμυλοι Κρήτης Α.Ε., Χανιά, Κρήτη

<sup>3</sup>Ινστιτούτο Διεργασιών & Ενεργειακών Πόρων, ΕΚΕΤΑ, 57001 Θέρμη, Θεσσαλονίκη

<sup>4\*</sup>Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης,  
73100 Χανιά, Κρήτη, e-mail: [mkonsol@science.tuc.gr](mailto:mkonsol@science.tuc.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η δυνατότητα άμεσης χρήσης της παραγόμενης βιομάζας από την επεξεργασία της ελιάς (ΜΥΛΟΙ ΚΡΗΤΗΣ, Χανιά, Κρήτη) σε κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη του τύπου: καύσιμο|Co-CeO<sub>2</sub>|YSZ|Ag|αέρα. Το πυρηνόξυλο υπόκειται σε ειδική επεξεργασία ώστε να διαχωριστεί πλήρως το ξυλώδες μέρος του (ελαιοπυρήνας) από την ψίχα της ελιάς (ελαιοπίπτα). Εξετάστηκαν διεξοδικά διάφορες λειτουργικές παράμετροι που αφορούν στην θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου (700-800°C), στην χρήση αδρανούς ή αντιδρώντος μίγματος ως φέροντος αερίου (He, CO<sub>2</sub>) καθώς και στην επίδραση της προσθήκης τήγματος ανθρακικών αλάτων (62 mol% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 38 mol% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ή/και καταλύτη (20 % κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>) στο καύσιμο τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την ευεργετική επίδραση του καταλύτη καθώς και του τήγματος ανθρακικών αλάτων στην ηλεκτροχημική απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Στους 800°C, επιτεύχθηκαν τιμές μέγιστης ισχύος ίσες με 10, 21.7, 23.5 και 25.7 mW κατά την τροφοδοσία της κυψέλης με ελαιοπυρήνα, ελαιοπυρήνα+καταλύτη, ελαιοπυρήνα+ανθρακικά άλατα και ελαιοπυρήνα+ανθρακικά+καταλύτη, αντίστοιχα. Η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου αναλύεται περαιτέρω βασιζόμενοι και στις μετρήσεις φασματοσκοπίας εμπέδησης σύνθετης αντίστασης.

Λέξεις κλειδιά: Κυψέλη καυσίμου άμεσης τροφοδοσίας βιομάζας, ενεργειακή αξιοποίηση ελαιοπυρήνα, καταλυτική αεριοποίηση, τήγμα ανθρακικών αλάτων

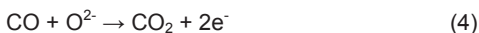
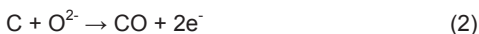
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παγκόσμιες απαιτήσεις σε ενέργεια βαίνουν διαρκώς αυξανόμενες, εξαιτίας κυρίως της αύξησης του πληθυσμού και της αλματώδους τεχνολογικής ανάπτυξης. Ωστόσο, η παραγωγή ενέργειας εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο ποσοστό (>85%) στα ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, συντελώντας στην επικείμενη εξάντληση των υφιστάμενων αποθεμάτων τους καθώς και στην επακόλουθη σημαντική επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

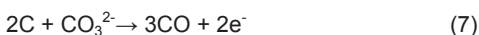
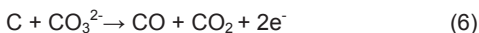
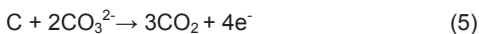
Η βιομάζα, μπορεί να αποτελέσει ένα εν δυνάμει ενεργειακό φορέα, αφού αποτελεί μια ανανεώσιμη και συνάμα φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας με μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα. Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων αποκεντρωμένων συστημάτων, συμβάλλοντας τα μέγιστα προς την κατεύθυνση της αειφόρου ανάπτυξης. Ωστόσο, στις μέρες μας η ενεργειακή εκμετάλλευση της βιομάζας βασίζεται κυρίως στη διεργασία καύσης με αποδόσεις μικρότερες από 35%. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη περισσότερο αποδοτικών και περιβαλλοντικά φιλικών εναλλακτικών τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας, είναι ζωτικής σημασίας για την μετάβαση σε μια αειφόρο ενεργειακή οικονομία [1].

Η ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου απευθείας τροφοδοσίας άνθρακα (DCFCs) προσφέρει νέους ορίζοντες για την απευθείας μετατροπή ανθρακούχων πρώτων υλών σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι DCFCs μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των ανθρακούχων στερεών καυσίμων απευθείας σε ηλεκτρική, με θεωρητικές αποδόσεις οι οποίες προσεγγίζουν το 100% και χαμηλές εκπομπές ρύπων ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος [2, 3]. Η χρήση στερεών βιοκαυσίμων και οργανικών αποβλήτων χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία σε DCFCs συνοδεύεται από επιπλέον πλεονεκτήματα τα οποία αφορούν στην ευκολία μεταφοράς και αποθήκευσης αυτών των ενεργειακών φορέων, στον ανανεώσιμο χαρακτήρα τους καθώς στις μηδανιές εκπομπές NOx και SOx εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε N, S και βαρέα μέταλλα [1].

Η αρχή λειτουργίας των DCFCs βασίζεται στην ηλεκτροχημική οξειδωση του άνθρακα από ιόντα οξυγόνου ( $O^{2-}$ ), τα οποία μεταφέρονται από την κάθοδο διαμέσου του στερεού ηλεκτρολύτη προς το ηλεκτρόδιο της ανόδου, παράγοντας  $CO_2$  (αντίδραση (1)) και  $CO$  (αντίδραση(2)). Στην άνοδο μπορούν επίσης να λάβουν χώρα δευτερεύουσες αντιδράσεις, όπως η μη-ηλεκτροχημική αντίδραση Boudouard (αντίδραση(3)) και η ηλεκτροχημική οξειδωση του παραγόμενου  $CO$  (αντίδραση (4)).



Οι αντιδράσεις (1) και (2) παρεμποδίζονται κυρίως από τις περιορισμένες αλληλεπιδράσεις στη διεπαφή στερεού άνθρακα/στερεού ηλεκτρολύτη-ηλεκτροδίου. Ωστόσο, η διάχυση του άνθρακα στην ενεργή ηλεκτροχημική ζώνη της ανόδου μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά μέσω της χρήσης τήγματος ανθρακικών αλάτων, οπότε οι παρακάτω αντιδράσεις μπορούν να διεξάγονται ταυτόχρονα με τις αντιδράσεις (1)-(4), συμβάλλοντας στην περαιτέρω κατανάλωση άνθρακα:



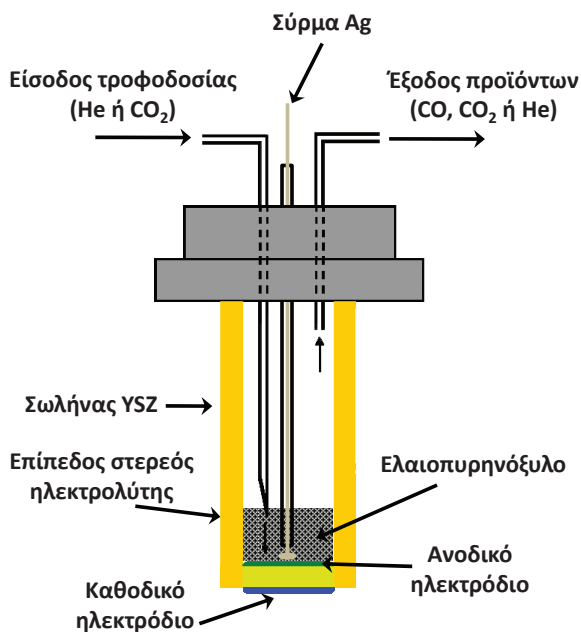
Με βάση τα παραπάνω καθίσταται φανερό ότι η ανάπτυξη κυψελών καυσίμου άμεσης τροφοδοσίας βιομάζας μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετικά αποδοτική και συνάμα περιβαλλοντικά φιλική εναλλακτική τεχνολογία αξιοποίησης της βιομάζας. Ιδιαίτερα σημαντική τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη είναι η ενεργειακή

αξιοποίηση τοπικών πηγών βιομάζας (π.χ. ελαιοπυρήνας, υπολείμματα επεξεργασίας και καλλιέργειας αγροτικών προϊόντων, κλπ.), συνεισφέροντας σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων αποκεντρωμένων συστημάτων. Ειδικότερα, για την περιοχή της Κρήτης, τα γεωργικά υποπροϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία του ελαιοκάρπου μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό ενεργειακό πόρο, καλύπτοντας μεγάλο μέρος των ενεργειακών απαιτήσεων του νησιού. Υπολογίζεται ότι τα πυρηνελαιουργεία της Κρήτης επεξεργάζονται ετησίως πάνω από 200.000 τόνους ελαιοπυρήνα, παράγοντας περί τους 110.000 τόνους ελαιοπυρηνόξυλο [4].

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται για πρώτη φορά στον Ελλαδικό χώρο η δυνατότητα απευθείας μετατροπής ελαιοπυρηνόξυλου, προερχόμενο από την εταιρεία ΜΥΛΟΙ ΚΡΗΤΗΣ (Χανιά, Κρήτη), σε ηλεκτρική ενέργεια σε κυψελίδες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (SOFC). Εξετάζονται διάφορες παράμετροι που αφορούν στην θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, στο είδος του αερίου μίγματος που θα χρησιμοποιηθεί ως φέρον αέριο (He, CO<sub>2</sub>) καθώς και στην επίδραση της προσθήκης τήγματος ανθρακικών αλάτων (62 mol% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 38 mol% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ή/και καταλύτη στο στερεό καύσιμο τροφοδοσίας.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ο αντιδραστήρας κυψέλης καυσίμου που πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις, έχουν περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενη εργασία [3]. Οι πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν στην γαλβανική κυψέλη του Σχήματος 1.



Σχήμα 1: Σχηματική αναπαράσταση κυψέλης καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη με απευθείας τροφοδοσία ελαιοπυρήνα.

Ο στερεός ηλεκτρολύτης συνίσταται από σωλήνα YSZ κλειστό στο ένα του άκρο. Ως κάθοδος χρησιμοποιήθηκε Άργυρος, ο οποίος παρασκευάστηκε από το αντίστοιχο οργανο-

μεταλλικό αιώρημα (Metalor), έπειτα από θέρμανση στους 800°C για 2 h παρουσία αέρα. Ως άνοδος χρησιμοποιήθηκε καταλύτης 20% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>, ο οποίος παρασκευάστηκε με την μέθοδο του υγρού εμπότισμού, χρησιμοποιώντας ως πρόδρομες ενώσεις τα αντίστοιχα νιτρικά άλατα, ενώ η πύρωση του έλαβε χώρα στους 600°C για 2 h παρουσία αέρα. Το ηλεκτρόδιο της ανόδου παρασκευάστηκε ως εξής: αρχικά η απαιτούμενη ποσότητα καταλύτη 20% κ.β. Cu/CeO<sub>2</sub> σε μορφή σκόνης αναμιγνύεται με αιθυλενογλυκόλη σε αναλογία βάρους 1:2. Το διάλυμα θερμαίνεται υπό ανάδευση στους 200°C μέχρι το ήμισυ του όγκου του να εξατμιστεί. Το παχύρευστο αιώρημα εναποτίθεται στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός πινέλου, στον εσωτερικό πυθμένα του σωλήνα YSZ. Στη συνέχεια πυρώνεται, υπό ατμοσφαιρικό αέρα, στους 850°C για 2 h με ρυθμό θέρμανσης 4°C/min. Μετά την πύρωση, η κυψέλη ψύχεται με φυσικό ρυθμό και στους 200 °C το ανοδικό ηλεκτρόδιο ανάγεται υπό ροή H<sub>2</sub> (30 cm<sup>3</sup>/min) για 2 h. Σε κάθε περίπτωση, η ποσότητα του ανοδικού ηλεκτροδίου ήταν 115 mg. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση συρμάτων Ag.

Σε κάθε πείραμα το κελί φορτώνεται με 800 mg ελαιοπυρήνα. Η επίδραση του καταλύτη (20% κ.β. CO/CeO<sub>2</sub>) ή/και του τήγματος ανθρακικών αλάτων (62 mol% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 38 mol% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ελέγχθηκε διαμέσου της ανάμιξης του ελαιοπυρήνα με 400 mg καταλύτη ή/και 200 mg ανθρακικών αλάτων μέσω της μεθόδου του υγρού εμπότισμού [3]. Οι ποσότητες αυτές επιλέχθηκαν ως οι βέλτιστες βασιζόμενοι σε προκαταρκτικά πειράματα που αφορούσαν στην διερεύνηση του βέλτιστου λόγου ποσοτήτων καυσίμου:καταλύτη:ανθρακικών αλάτων. Αρχικά, η κυψέλη θερμαίνεται έως τους 700°C με ρυθμό 4°C/min υπό ροή He. Κατόπιν εισάγεται είτε He ή CO<sub>2</sub>(99.999%, AirLiquide) ως φέρον αέριο στην πλευρά της ανόδου, με συνολικό ρυθμό ροής 30cm<sup>3</sup>(STP)/ min. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στους 700, 750 και 800°C σε ατμοσφαιρική πίεση. Οι καμπύλες δυναμικού-ρεύματος λαμβάνονται διαμέσου ψηφιακού πολύμετρου (RE60-69) με τη χρήση κυτίου αντιστάσεων (TimeElectronics 1051). Τα φάσματα ηλεκτροχημικής εμπέδησης λαμβάνονται σε εύρος συχνοτήτων 0.1 Hz-1 MHz σε ηλεκτροχημικό σταθμό VersaStat 4. Η ανάλυση της σύστασης των απαερίων πραγματοποιήθηκε με χρήση αερίου χρωματογράφου SRI8610B. Ως καύσιμο, σε όλες τις περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε καθαρό ελαιοπυρηνόξυλο, το οποίο προέρχεται από τις εγκαταστάσεις της εταιρείας ΜΥΛΟΙ ΚΡΗΤΗΣ (ΧΑΝΙΑ, ΚΡΗΤΗΣ). Το καθαρό ελαιοπυρηνόξυλο λαμβάνεται κατόπιν ειδικής προεπεξεργασίας κατά την οποία ο καρπός διαχωρίζεται πλήρως από την σάρκα της ελιάς.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ

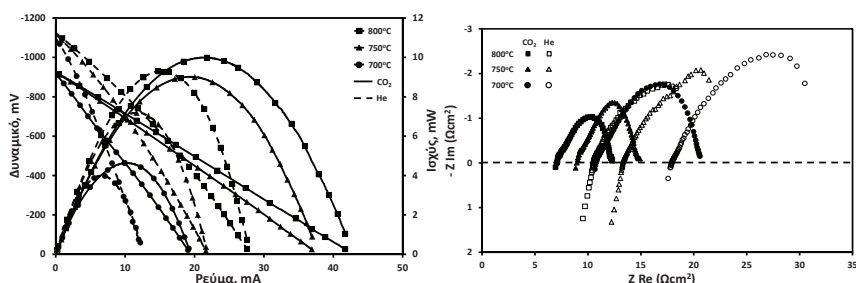
Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης του ελαιοπυρήνα. Αξίζει να σημειωθεί η χαμηλή περιεκτικότητα του ελαιοπυρήνα σε τέφρα και θείο, τα οποία δρουν κατασταλτικά στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Αντίθετα, ο ελαιοπυρήνας χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και οξυγόνο, γεγονός που αναμένεται να συμβάλλει ευεργετικά στην επιτευχθείσα ηλεκτροχημική απόδοση.

Πίνακας 1: Προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση ελαιοπυρήνα.

Προσεγγιστική ανάλυση (% κ.β.)				Στοιχειακή ανάλυση επί ξηρού (% κ.β.)				
Πτητικά	Τέφρα	Υγρασία	Δεσμευμένος Άνθρακας	C	H	N	S	O
71.88	3.62	2.26	22.24	46.90	5.43	0.41	0.02	43.82

### 3.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΑΕΡΙΟΥ (He ή CO<sub>2</sub>) ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Το Σχήμα 2 απεικονίζει την επίδραση του φέροντος αερίου (He ή CO<sub>2</sub>) στην ηλεκτροχημική απόδοση της κυψέλης καθώς και στα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης (AC impedance), σε θερμοκρασίες 700-800°C. Είναι εμφανής η ανωτερότητα της κυψέλης καυσίμου υπό ροή CO<sub>2</sub> σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος που μελετήθηκε.



Σχήμα 2: Επίδραση του φέροντος αερίου (He ή CO<sub>2</sub>) στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου στους 700-800°C και τα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Τροφοδοσία 800 mg ελαιοπυρήνα, ροή αερίου τροφοδοσίας (He ή CO<sub>2</sub>) = 30 cm<sup>3</sup>/min.

Οι τιμές μέγιστης ισχύος που επιτεύχθηκαν υπό ροή CO<sub>2</sub> ήταν 4.64, 9.0 και 10 mW στους 700, 750 και 800°C, αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες υπό ροή He ήταν 4.0, 7.2 και 9.3 mW. Επιπλέον, υπό ροή CO<sub>2</sub> παρατηρήθηκαν μικρότερες απόλυτες τιμές στο δυναμικό ανοικτού κυκλώματος (OCV), έναντι των αντίστοιχων με He (Πίνακας 2). Η βελτιωμένη συμπεριφορά της κυψέλης υπό ροή CO<sub>2</sub>, μπορεί να αποδοθεί στον επιτόπιο σχηματισμό CO, μέσω της αντίστροφης αντίδρασης Boudouard (αντίδραση (3)), και στη μετέπειτα ηλεκτρο-οξειδωση του στην ενεργή τριεπιφάνεια (αντίδραση (4)).

Πίνακας 2: Επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου (Μέγιστη Ισχύς, P<sub>max</sub>, και Δυναμικό Ανοικτού Κυκλώματος, OCV) με απευθείας τροφοδοσία ελαιοπυρήνα.

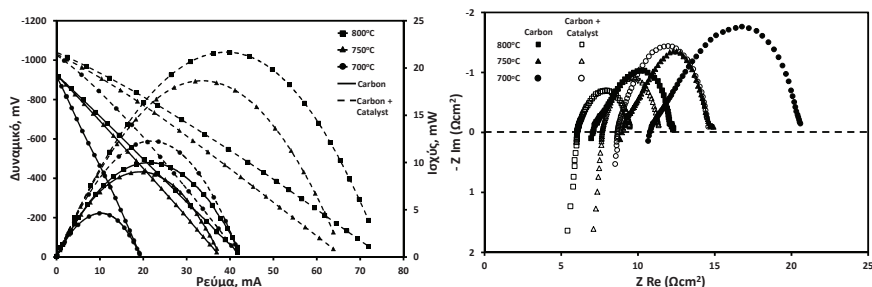
Στερεή τροφοδοσία	700°C		750°C		800°C	
	OCV (mV)	P <sub>max</sub> (mW)	OCV (mV)	P <sub>max</sub> (mW)	OCV (mV)	P <sub>max</sub> (mW)
<b>Υπό ροή He</b>						
Ελαιοπυρήνας	-	4.0	-	7.2	-1121	9.3
	1094		1112			
Ελαιοπυρήνας+Καταλύτης	-	12.0	-	16.7	-1245	20.3
	1164		1195			
<b>Υπό ροή CO<sub>2</sub></b>						
Ελαιοπυρήνας	-913	4.6	-921	9.0	-923	10.0
Ελαιοπυρήνας+Καταλύτης	-	12.3	-	18.7	-1037	21.7
	1023		1028			
Ελαιοπυρήνας+Ανθρακικά	-985	13.6	-	20.5	-1030	23.5
			1002			
Ελαιοπυρήνας+Καταλύτης+Ανθρακικά	-999	16.1	-	21.7	-1038	25.7
			1015			

Η εξήγηση αυτή συνάδει και με την σημαντική ενίσχυση της ηλεκτροχημικής απόδοσης σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 700°C, όπου και ευνοείται η αντίδραση (3). Να σημειωθεί ωστόσο η σχετικά μικρή διαφορά στις τιμές μέγιστης ισχύος υπό ροή He και CO<sub>2</sub>. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται μια γραμμική εξάρτηση της τάσης της κυψέλης με την πυκνότητα ρεύματος, υποδηλώνοντας ότι οι ωμικές απώλειες που αντιστοιχούν στα υλικά της κυψέλης, στις ηλεκτρικές επαφές και στις αντιστάσεις του καυσίμου, αποτελούν την κύρια πηγή υπέρτασης.

Όσον αφορά στο ωμικό τμήμα της σύνθετης αντίστασης (ASR,  $Z_{re}$  για  $Z_{im} = 0 \Omega cm^2$ ) της κυψέλης καυσίμου (Σχήμα 2), η τιμή του μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας από 10.8  $\Omega cm^2$  στους 700°C σε 7  $\Omega cm^2$  στους 800°C υπό ροή CO<sub>2</sub>. Επίσης, η θερμοκρασία λειτουργίας επέδρασε θετικά και στην αντίσταση του ηλεκτροδίου (μέγεθος του τόξου), αφού με αύξηση της η διεπιφανειακή αντίσταση που περιλαμβάνει την συνεισφορά από τις αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου και την διάχυση των ουδέτερων και φορτισμένων χημικών ειδών, μειώθηκε αισθητά από 9.9  $\Omega cm^2$  στους 700°C σε 5.3  $\Omega cm^2$  στους 800°C. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στην περίπτωση τροφοδοσίας He μόνο που τόσο το ASR (10.5  $\Omega cm^2$  στους 800°C) όσο και οι αντιστάσεις του ηλεκτροδίου ήταν πολύ υψηλότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες αντιστάσεις παρουσία CO<sub>2</sub> ως φέροντος αερίου. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στην παρουσία μεγαλύτερων ποσοτήτων CO που σχηματίζονται υπό ροή CO<sub>2</sub>. Το CO επιδρά αφώνως στην οξειδοαναγωγική κατάσταση του ηλεκτροδίου, καθιστώντας το περισσότερο ανώγειμο, ενώ εμφανίζει ταχύτερη κινητική ηλεκτρο-οξειδωσης και διάχυσης συγκρινόμενο με το στερεό ελαιοπυρήνα.

### 3.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗ (20% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>) ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η επίδραση της προσθήκης καταλύτη στον ελαιοπυρήνα υπό τροφοδοσία CO<sub>2</sub>, στις καμπύλες δυναμικού – ρεύματος της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει της θερμοκρασίας καθώς και τα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Οι τιμές του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος (OCV) φαίνεται να αυξάνονται σε απόλυτες τιμές με αύξηση της θερμοκρασίας και με την προσθήκη του καταλύτη. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις, η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού και του ρεύματος είναι γραμμική, υποδηλώνοντας την επικράτηση της ωμικής υπέρτασης έναντι των υπερτάσεων ενεργοποίησης και συγκέντρωσης. Η μέγιστη ισχύς με προσθήκη καταλύτη, 21.7 mW, επιτεύχθηκε στη θερμοκρασία των 800°C, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από την αντίστοιχη τιμή, 10 mW, που επιτεύχθηκε απουσία του καταλύτη. Όσον αφορά στις μετρήσεις της φασματοσκοπίας εμπέδησης σύνθετης αντίστασης παρατηρείται πως με αύξηση της θερμοκρασίας το σημείο τομής της καμπύλης με τον πραγματικό άξονα, που αντιστοιχεί στο ωμικό τμήμα της σύνθετης αντίστασης (ASR), μειώνεται από 8.7  $\Omega cm^2$  στους 700°C σε 6  $\Omega cm^2$  στους 800°C παρουσία του καταλύτη. Όπως φαίνεται τα φάσματα της εμπέδησης σύνθετης αντίστασης αποτελούνται από ένα τόξο, το οποίο επικεντρώνεται στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων. Εφόσον η κάθοδος και ο στερεός ηλεκτρολύτης παραμένουν τα ίδια σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, οι αλλαγές στα φάσματα μπορούν να αποδοθούν στις ηλεκτροχημικές διεργασίες και σε φαινόμενα διάχυσης που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της ανόδου και στην διεπιφάνεια ανόδου/στερεού ηλεκτρολύτη. Όσο η θερμοκρασία μειώνεται το μέγεθος των τόξων αυξάνει, υποδηλώνοντας ότι η υπέρταση της διεπιφανειακής αντίστασης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας (από 5.9  $\Omega cm^2$  στους 700°C σε 3.4  $\Omega cm^2$  στους 800°C). Τέλος, τόσο η αντίσταση ASR όσο και η αντίσταση του ηλεκτροδίου είναι φανερά βελτιωμένες παρουσία καταλύτη.

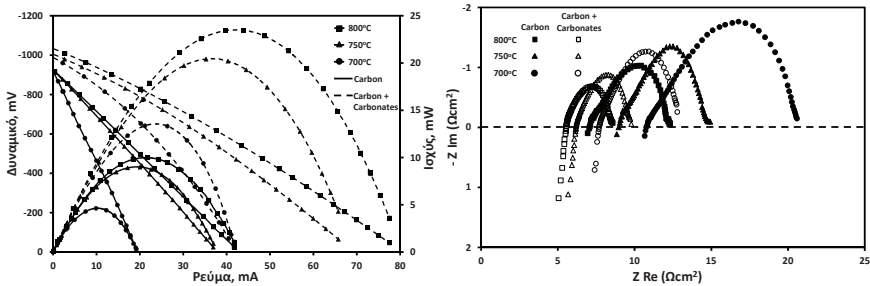


Σχήμα 3: Επίδραση της προσθήκης καταλύτη(20% κ.β. Co/CeO<sub>2</sub>) στους 700-800°C και τα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Τροφοδοσία: 800 mg ελαιοπυρήνα+400 mgκαταλύτη, Ροή αερίου τροφοδοσίας (100% CO<sub>2</sub>) = 30 cm<sup>3</sup>/min.

Τα ίδια πειράματα, παρουσία καταλύτη διεξήχθησαν και στην περίπτωση χρήσης καθαρού H<sub>2</sub> ως φέρον αέριο. Τα κυριότερα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 1. Παρατηρείται αρχικά ότι παρουσία He, οι τιμές του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος είναι υψηλότερες σε σύγκριση με την τροφοδοσία 100% CO<sub>2</sub>, όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στις αντίστοιχες περιπτώσεις απουσία καταλύτη. Οι τιμές μέγιστης ισχύος που επιτεύχθηκαν αυξάνονταν με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας και ήταν εφάμιλλες με τις αντίστοιχες τιμές παρουσία CO<sub>2</sub>.

#### 3.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

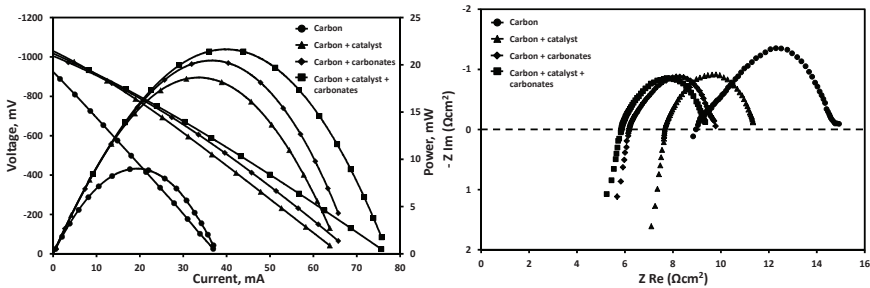
Ένα ευτηκτικό μίγμα ανθρακικών αλάτων λιθίου και καλίου (62 mol% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+38mol% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) αναμίχθηκε με τον ελαιοπυρήνα σε αναλογία βάρους άνθρακα/ανθρακικών αλάτων 4:1, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης των τηγμένων ανθρακικών αλάτων στην απόδοση της κυψέλης. Το Σχήμα 4απεικονίζειτην επίδραση των ανθρακικών αλάτων στο δυναμικό της κυψέλης, στο αναπτυσσόμενο ρεύμα και στην ισχύστους700, 750και800°C υπό ροήCO<sub>2</sub>καθώς και τα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Η έντονη επίδραση της προσθήκης των ανθρακικών αλάτων στον ελαιοπυρήνα είναι εμφανής σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα, η προσθήκη των ανθρακικών αλάτων οδήγησε σε 250% αύξηση της ισχύος στους800°C, σε σύγκριση με εκείνη που επιτεύχθηκε απουσία αυτών. Επιπλέον, αναπτύσσονται γενικά χαμηλότερες τιμές OCV κατά την παρουσία ανθρακικών αλάτων. Από τα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης παρατηρείται ότι η συνολική αντίσταση της κυψέλης μειώνεται σημαντικά με την προσθήκη των ανθρακικών αλάτων στον ελαιοπυρήνα. Αυτή η βελτίωση είναι περισσότερο έντονη σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπρόσθετα, από την μελέτη του φάσματος εμπέδησης σύνθετης αντίστασης στους 750°C είναι προφανές ότι η αντίσταση του ηλεκτροδίου, μειώθηκε από9.0Ωcm<sup>2</sup>σε6.2Ωcm<sup>2</sup>μετην προσθήκη των ανθρακικών αλάτων. Αντίστοιχα, η αντίσταση του ηλεκτροδίου μειώθηκε από 5.8Ωcm<sup>2</sup> σε 3.6Ωcm<sup>2</sup>. Είναι ενδιαφέρον ότι η βελτίωση στην απόδοση της κυψέλης με την παρουσία ανθρακικών αλάτων συνοδεύεται από υψηλότερα ποσοστά σχηματισμού CO. Αυτό υποδεικνύει ότι η ευεργετική επίδραση των ανθρακικών αλάτων μπορεί να αποδοθεί, εκτός από την υψηλή ρευστότητα και βελτιωμένη διάχυση του καυσίμου στην πλευρά της ανόδου, στην επιπλέον ποσότητα του CO που σχηματίζεται μέσω των αντιδράσεων (6) και (7) και στη μετέπειτα ηλεκτρο-οξειδωσή του στην ενεργή τριεπιφάνεια (TPB).



Σχήμα 4: Επίδραση της προσθήκης ευθηκτικού μίγματος ανθρακικών αλάτων στους 700-800°C και τα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Τροφοδοσία: 800 mg ελαιοπυρήνα+200 mg ανθρακικών αλάτων, Ροή αερίου τροφοδοσίας (100% CO<sub>2</sub>) = 30 cm<sup>3</sup>/min.

### 3.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΩΝ ΑΛΑΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΛΥΤΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται συγκριτικά η επίδραση του καταλύτη ή/και του τήγματος ανθρακικών αλάτων στην ηλεκτροχημική απόδοση της κυψέλης στους 750°C καθώς και στα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Είναι εμφανής η ευεργετική δράση τόσο της ανεξάρτητης όσο και της εν συνεργία επίδρασης του καταλύτη και του τήγματος ανθρακικών αλάτων. Η ταυτόχρονη προσθήκη καταλύτη και ανθρακικών αλάτων οδηγεί σε τιμές ισχύος της τάξεως των 22 mW, έναντι 9 mW υπό τροφοδοσία καθαρού ελαιοπυρήνα. Αξίζει να αναφερθεί ότι και μόνο η προσθήκη καταλύτη οδηγεί σε εφάμιλλη συμπεριφορά (18.7 mW), καταδεικνύοντας την αποδοτικότητα της προτεινόμενης διεργασίας. Το τελευταίο αποτέλεσμα κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης κυψελών καυσίμου άμεσης τροφοδοσίας ανθρακούχων στερεών καυσίμων, χωρίς την χρήση τήγματος ανθρακικών αλάτων, τα οποία σταδιακά οδηγούν σε υποβαθμισμένες αποδόσεις λόγω της διαβρωτικής τους φύσης.



Σχήμα 5: Επίδραση της προσθήκης ευθηκτικού μίγματος ανθρακικών αλάτων ή/και καταλύτη στους 750°C στα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά της κυψέλης και τα αντίστοιχα φάσματα εμπέδησης σύνθετης αντίστασης. Τροφοδοσία: 800 mg ελαιοπυρήνα+200 mg ανθρακικών αλάτων+400 mgκαταλύτη. Ροή αερίου τροφοδοσίας (100% CO<sub>2</sub>) = 30 cm<sup>3</sup>/min.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα η δυνατότητα απευθείας μετατροπής ελαιοπυρήνζουλου, προερχόμενο από το εταιρεία ΜΥΛΟΙ ΚΡΗΤΗΣ (Χανιά, Κρήτη), σε ηλεκτρική ενέργεια σε κυψελίδες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη άμεσης τροφοδοσίας με στερεά βιοκαύσιμα. Εξετάστηκαν διεξοδικά διάφορες παράμετροι που αφορούν στην



θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης, στο είδος του φέροντος αερίου (He, CO<sub>2</sub>) καθώς και στην επίδραση της προσθήκης τήγματος ανθρακικών αλάτων (62 mol% Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 38 mol% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ή/και καταλύτη στο στερεό καύσιμο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση CO<sub>2</sub> ως φέροντος αερίου οδηγεί σε μεγιστοποίηση της απόδοσης. Επιπρόσθετα, η προσθήκη τόσο καταλύτη όσο/και ανθρακικών αλάτων οδήγησε σε σημαντική αύξηση της ηλεκτροχημικής απόδοσης έως και 300% στους 700°C. Στους 800°C, επιτεύχθηκαν τιμές μέγιστης ισχύος ίσες με 10, 21.7, 23.5 και 25.7 mW κατά την τροφοδοσία της κυψέλης με ελαιοπυρήνα, ελαιοπυρήνα/καταλύτη, ελαιοπυρήνα/ανθρακικά και ελαιοπυρήνα/ανθρακικά/καταλύτη, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται κυρίως επί τη βάση του επιτόπιου σχηματισμού CO διαμέσου της αντίστροφης αντίδρασης Boudouard, η οποία ευνοείται με χρήση φέροντος αερίου CO<sub>2</sub>, καθώς και υπό την παρουσία ανθρακικών αλάτων. Το σχηματιζόμενο CO φαίνεται να επηρεάζει θετικά την αντίσταση της κυψέλης, συμβάλλοντας στην βελτίωση της ηλεκτροκινητικής του ηλεκτροδίου όσο και στην έμμεση αντιμετώπιση των αντιστάσεων στην μεταφορά μάζας που οφείλονται στην περιορισμένη διάχυση του ελαιοπυρήνα στη ενεργή τριεπιφάνεια. Οι αλλαγές αυτές αντανακλώνται στα χαρακτηριστικά της κυψέλης συντελώντας σε αύξηση της παρατηρούμενης ηλεκτροχημικής απόδοσης. Ιδιαίτερης σημασίας επίσης κρίνεται το γεγονός της σημαντικής ενίσχυσης της απόδοσης της κυψέλης υπό την προσθήκη μόνο καταλύτη στο στερεό καύσιμο. Το τελευταίο αποτέλεσμα ανοίγει νέους ορίζοντες προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης κυψελών καυσίμου άμεσης τροφοδοσίας ανθρακούχων στερεών καυσίμων, χωρίς την χρήση τήγματος ανθρακικών αλάτων, τα οποία σταδιακά οδηγούν σε υποβαθμισμένες αποδόσεις λόγω της διαβρωτικής τους φύσης.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Dudek, P. Tomczyk, R. Socha, M. Skrzykiewicz, J. Jewulski, *Int. J. Electrochem. Sci.* 8 (2013) 3229.
- [2] T.M. Gür, *Chemical Reviews* 113 (2013) 6179.
- [3] N. Kaklidis, V. Kyriakou, I. Garagounis, A. Arenillas, J.A. Menéndez, G.E. Marnellos and M. Konsolakis, *Royal Society Chemistry: Advances* 4 (2014) 18792.
- [4] D.Vamvuka and T.D. Tsoutsos, *Energy Exploration and Exploitation* 20 (2012) 113.



**ΥΔΡΟΪΣΧΥΣ - ΚΥΜΑΤΑ**

---



## ΑΞΙΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ

**Χρ. Γιανναράκη, Φλ. Ξανθάκη, Δ. Ζαφειράκης, Ι. Κ. Καλδέλλης**

Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Πειραιά,  
[jkald@teipir.gr](mailto:jkald@teipir.gr), <http://www.sealab.gr>, Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201

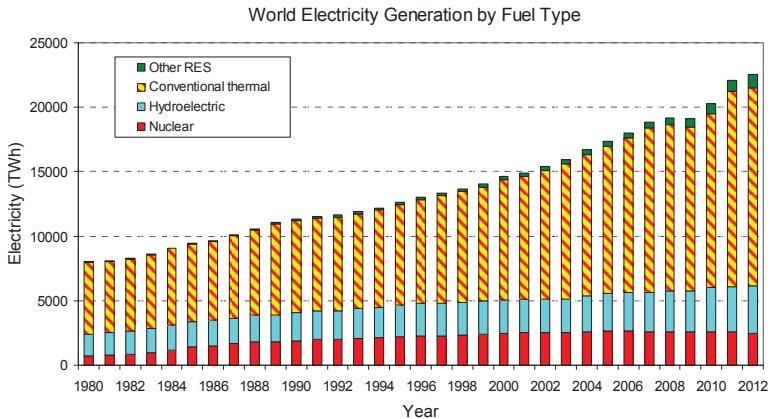
### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, γεγονός που έχει οδηγήσει στην υλοποίηση μεγάλου αριθμού ενεργειακών έργων, με εξαίρεση τα μη διασυνδεδεμένα νησιά. Η αξιοποίηση της ενέργειας των θαλασσών δεν είναι μια νέα σκέψη, ωστόσο έχει παραμείνει μέχρι σήμερα μια ανεκμετάλλευτη ενεργειακή προοπτική. Στα πλαίσια αυτά, λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό της θάλασσας, καθώς και το γεγονός ότι οι παράκτιες και νησιωτικές περιοχές μπορούν να ωφεληθούν περισσότερο από την εφαρμογή των εν λόγω ενεργειακών λύσεων, η παρούσα μελέτη δίνει έμφαση στην αξιολόγηση του δυναμικού της κυματικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Παράλληλα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περιοχή έγινε μια προσπάθεια για τον εντοπισμό υποψήφιων περιοχών όπου θα μπορούσε κανείς να εκμεταλλευτεί την ενέργεια από τα κύματα, προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Η εργασία ολοκληρώνεται με την ανάλυση στοιχείων που αφορούν σε επιλεγμένες περιοχές κάνοντας χρήση μακροχρόνιων μετρήσεων από τις διαθέσιμες πηγές. Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, θα μπορούσε να υποστηριχθεί η εφαρμογή καινοτόμων θαλάσσιων τεχνολογιών, οδηγώντας σε σημαντικά οφέλη τις νησιωτικές περιοχές της χώρας μας.

Λέξεις Κλειδιά: Ύψος κύματος, ενεργειακή παραγωγή, νησιωτικές περιοχές

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας τα τελευταία 50 χρόνια έχει προκαλέσει φόβους για την εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη, ενώ έχει προκαλέσει εμφανείς βλάβες στο περιβάλλον. Ως εκ τούτου, οι έρευνες στον τομέα αξιοποίησης των τεχνολογιών των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) εντάθηκαν τα τελευταία χρόνια οδηγώντας σε αξιόλογη παρουσία της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο αρκετών ευρωπαϊκών χωρών, βλ.επε και Εικόνα (1).



Εικόνα 1: Εξέλιξη στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού ανά τύπο καυσίμου.

Σε αρκετές όμως περιπτώσεις το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό στην ξηρά έχει αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό (π.χ. στη Δανία και στη Γερμανία) [1], ενώ δεν πρέπει να αγνοηθεί ότι η χρήση γης για την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ συχνά προκαλεί σοβαρές αντιδράσεις από τις τοπικές κοινωνίες [2]. Στα πλαίσια αυτά, το ενδιαφέρον προς τις θαλάσσιες εφαρμογές ΑΠΕ έχει πρόσφατα ενισχυθεί, με τις υπερράπιες αιολικές εγκαταστάσεις να αποτελούν το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα [3,4], ενώ παράλληλα η έρευνα στους τομείς της παραγωγής ενέργειας από τα κύματα έχει ενθαρρύνει την ανάπτυξη νέων θαλάσσιων τεχνολογιών [5,6,7].

Οι ενεργειακές εφαρμογές που βασίζονται στη θάλασσα συμπεριλαμβάνουν διάφορες δυνατότητες, όπως οι παλίρροιες, η κυματική ενέργεια, τα θαλάσσια ρεύματα και η διαφορά θερμοκρασίας των θαλασσών. Στην παρούσα μελέτη θα επικεντρωθούμε στην πιο ενδιαφέρουσα από τις παραπάνω επιλογές, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα.

Τα κύματα αποτελούν μια σημαντική πηγή ενέργειας και είναι ικανά να αποδώσουν υψηλές τιμές ειδικής ισχύος (kW/m), σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ. Ωστόσο, πολλές φορές αυτή η ενέργεια δεν είναι εύκολο να αξιοποιηθεί και να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό αφενός λόγω της στοχαστικότητας του κυματικού δυναμικού αφετέρου λόγω των τεχνικών ιδιομορφιών που συνεπάγεται η εγκατάσταση θαλάσσιων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

Από τις υφιστάμενες αναλύσεις είναι γνωστό ότι οι περισσότερες περιοχές με υψηλό κυματικό δυναμικό ανήκουν κυρίως σε χώρες που εκτίθενται σε ανοιχτές θάλασσες (π.χ. Ηνωμένο Βασίλειο, Πορτογαλία, κ.λπ.), ωστόσο πρόσφατες μελέτες υποδεικνύουν ένα αξιόλογο κυματικό δυναμικό και σε διάφορες περιοχές της Νότιο - Ανατολικής Μεσογείου [8]. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιοχές αυτές περιλαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός νησιών, τα οποία καλύπτουν οριακά τις ενεργειακές τους ανάγκες σχεδόν αποκλειστικά με τη λειτουργία υψηλού κόστους και αμφισβητούμενης αξιοπιστίας θερμικών σταθμών που καταναλώνουν πετρέλαιο. Πιο συγκεκριμένα το αντίστοιχο κόστος ηλεκτροπαραγωγής σε

αρκετές περιπτώσεις προσεγγίζει τα 300€/MWh, ενώ παράλληλα καταγράφονται και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [8].

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω και παρά το γεγονός ότι οι θαλάσσιες τεχνολογίες μέχρι σήμερα έχουν δοκιμαστεί και λειτουργούν κυρίως σε πειραματική μορφή, η έρευνα για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ενισχύεται συνεχώς σε ευρωπαϊκό επίπεδο, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον εντοπισμό περιοχών με οικονομικά αξιοποιήσιμο δυναμικό. Στα πλαίσια αυτά, κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του δυναμικού της κυματικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα, η καταγραφή των υποψήφιων περιοχών στην περιοχή του Αρχιπελάγους, όπου η εγκατάσταση συσκευών αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας εμφανίζει τεχνοοικονομικό ενδιαφέρον.

## 2. ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η Μεσόγειος καλύπτει μία έκταση 2,500,000 τετραγωνικών χιλιομέτρων που περιβάλλεται από την Ευρώπη, την Ασία και την Αφρική. Συνδέεται με τον Ατλαντικό Ωκεανό μέσω των Στενών του Γιβραλτάρ, με τη Μαύρη Θάλασσα μέσω του Βοσπόρου και με την Ερυθρά θάλασσα μέσω της διώρυγας του Σουέζ. Η Νότιο-Ανατολική Μεσόγειος και ειδικότερα η περιοχή του Αιγαίου θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μια απομονωμένη περιοχή που περιλαμβάνει εκατοντάδες διάσπαρτα νησιά κάθε μεγέθους. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι πολλά από αυτά αποτελούν τουριστικούς προορισμούς, είναι λογικό να παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις στις ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια, ιδιαίτερα κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών. Για το λόγο αυτό, μεταφέρονται μεγάλες ποσότητες πετρελαίου παρά το υψηλό διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό ΑΠΕ της περιοχής.

Η μοναδική θέση της Μεσογείου συνδέεται με την εμφάνιση ιδιαίτερα ισχυρών ανέμων κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, γεγονός που συνεπάγεται και την ύπαρξη αξιόλογου κυματικού δυναμικό. Λαμβάνοντας υπόψιν το ιδιαίτερα υψηλό κόστος ηλεκτροπαραγωγής των αυτόνομων νησιωτικών σταθμών και το υψηλό ενεργειακό δυναμικό των ΑΠΕ της περιοχής, τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη περιοχή με στόχο να εντοπιστούν οι καταλληλότερες περιοχές για εκμετάλλευση των ΑΠΕ και να μειωθεί η εξάρτηση των νησιωτικών οικονομιών από εισαγόμενη ενέργεια.

Για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου δυναμικού, που υπό προϋποθέσεις μπορεί να οδηγήσει στην εγκατάσταση αντίστοιχων σταθμών παραγωγής ενέργειας, είναι απαραίτητη η συγκεντρώνση μιας σειράς αξιόπιστων δεδομένων. Ορισμένοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν όταν θέλουμε να εντοπίσουμε κατάλληλες περιοχές για την εγκατάσταση και τη λειτουργία των συσκευών αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων είναι το (σημαντικό) ύψος « $H_s$ », η ταχύτητα του κύματος « $V$ », η (ενεργειακή) περίοδος « $T_e$ » και η πυκνότητα του νερού « $\rho$ ».

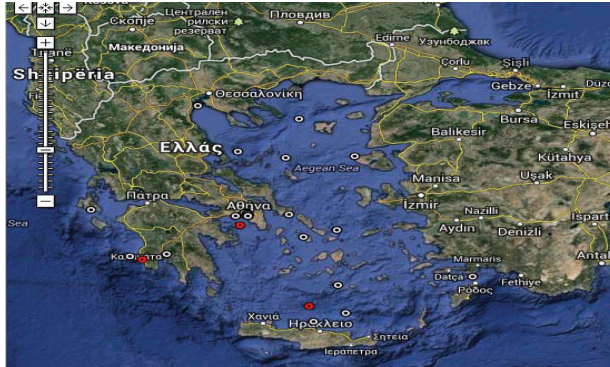
Αντίστοιχα, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή και την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων προέρχονται από τρεις διαφορετικές πηγές:

- ✓ Επιτόπιες μετρήσεις, που παρέχουν μετρήσεις (χρονοσειρές) των βασικών παραμέτρων του κύματος με συνεχή τρόπο αλλά σε τοπική βάση.
- ✓ Αλτιμετρία (μέσω δορυφόρων), παρέχοντας μια συνεχή βάση δεδομένων αλλά με μέσες τιμές για μια σχετικά μεγάλη περιοχή.
- ✓ Υπολογιστικά κυματικά μοντέλα (μοντέλα προσομοίωσης), τα οποία παρέχουν εκτιμήσεις χρησιμοποιώντας παραμέτρους που σχετίζονται με το χώρο και το χρόνο.

Παρά το γεγονός ότι η αξιολόγηση της ενέργειας των θαλασσών είναι μια στοχαστική διαδικασία, υπάρχουν πολλές ειδικές παραμέτροι που πρέπει να εξετάζονται προκειμένου να γίνει μια σωστή εκτίμηση του κυματικού δυναμικού σε μια περιοχή. Στα πλαίσια αυτά, ο αριθμός των δεδομένων που συγκεντρώνονται κάθε φορά καθώς και το χρονικό διάστημα μελέτης προσδιορίζουν την ποιότητα μιας έρευνας.

Ατυχώς στην Ελλάδα ο αριθμός των επιτόπιων μετρήσεων είναι αρκετά περιορισμένος, αν και τα κυματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί χρειάζονται αξιόπιστα και λεπτομερή στοιχεία, προκειμένου να υπολογίσουν το διαθέσιμο δυναμικό. Στην Εικόνα (2) παρουσιάζεται μία απεικόνιση των μετρητικών σταθμών στην περιοχή του Αιγαίου (αρκετοί

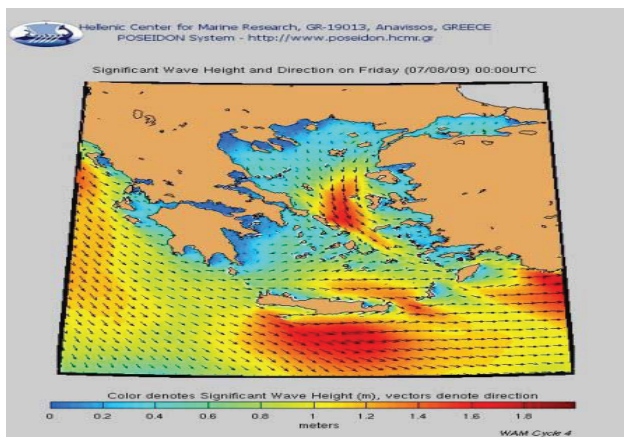
από τους οποίους εμφανίζουν χρονική ασυνέχεια στις μετρήσεις). Αντιπροσωπευτικοί μετρητικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη [9].



Εικόνα 2: Το δίκτυο των ενεργών και μη ενεργών μετρητικών σταθμών κατά μήκος των ελληνικών θαλασσών (Πηγή: ΕΛΚΕΘΕ - βάση δεδομένων ΠΟΣΕΙΔΩΝ).

Πιο συγκεκριμένα, το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) [10], μέσω ενός δικτύου πλωτών μετρητικών σταθμών καταγράφει τις φυσικές, βιολογικές και χημικές παραμέτρους των Ελληνικών θαλασσών. Στη συνέχεια τα δεδομένα μεταδίδονται στο Επιχειρησιακό Κέντρο όπου τροφοδοτούν τα διαθέσιμα μοντέλα πρόγνωσης τελευταίας γενιάς, βάσει των οποίων γίνονται αξιόπιστες εκτιμήσεις/προβλέψεις του κυματικού δυναμικού. Η βάση δεδομένων «Ποσειδών» διαθέτει μετρήσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος την τελευταία δεκαετία. Οι μετρήσεις είναι ημερήσιες και συλλέγονται περίπου κάθε τρεις ώρες.

Ωστόσο, σε περιπτώσεις απουσίας των επιτόπιων μετρήσεων οι τεχνικές της δορυφορικής αλιμετρίας με τη χρήση κατάλληλων δορυφόρων είναι σε θέση να παρέχουν ένα σημαντικό συμπλήρωμα στη βάση δεδομένων «Ποσειδών». Χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να γίνει εκτίμηση του σημαντικού ύψους κύματος. Στην Εικόνα (3) παρουσιάζεται ένας τυπικός χάρτης που απεικονίζει τις τιμές του σημαντικού ύψους κύματος, με βάση στοιχεία που προκύπτουν από τεχνικές αλιμετρίας.



Εικόνα 3: Οι τιμές ύψους κύματος χρησιμοποιώντας το προγνωστικό μοντέλο WAM-Cycle 4 στο Αιγαίο Πέλαγος (Πηγή: ΕΛΚΕΘΕ - βάση δεδομένων ΠΟΣΕΙΔΩΝ).



Αναφορικά με τα δεδομένα που συγκεντρώνονται από τις παραπάνω τεχνικές είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι επιτόπιες μετρήσεις παρέχουν χρονοσειρές δεδομένων που αφορούν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, ενώ οι τεχνικές αλιμετρίας παρέχουν δεδομένα για ολόκληρες περιοχές σε συνεχόμενη βάση από τις αρχές του 1990. Για την ακρίβεια, οι δορυφόροι υπολογίζουν το σημαντικό ύψος κύματος « $H_s$ » και το συντελεστή « $\sigma_g$ » που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της περιόδου κύματος καθώς και την αντίστοιχη ταχύτητα του ανέμου.

Σε γενικές γραμμές, οι δορυφόροι είναι ικανοί να παρέχουν δεδομένα κυμάτων υψηλής ποιότητας προκειμένου να έχουμε μια αξιόπιστη εικόνα του κυματικού δυναμικού απαραίτητη για μια ποικιλία θαλάσσιων εφαρμογών. Βεβαίως, είναι αναμενόμενο να υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων, όπως η επίδραση της βροχής, οι πιθανές διακοπές λειτουργίας κ.λπ. Ωστόσο, η ακρίβεια των συγκεκριμένων μετρήσεων βελτιώνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα μετά την υιοθέτηση τεχνικών βαθμονόμησης [11].

### 3. ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κύματα πρέπει να μπορούν να αντέξουν ακόμα και τις πιο δύσκολες συνθήκες στη θάλασσα, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να είναι σε θέση να παράγουν ενέργεια ακόμα και από όχι ιδιαίτερα υψηλά κύματα. Το μέγεθος της ισχύος των κυμάτων σχετίζεται με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως το ύψος και η ενεργειακή περίοδος του κύματος. Πιο συγκεκριμένα, η ισχύς « $P_w$ » ανά μονάδα μήκους του κύματος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_w = \xi \cdot H_s^2 \cdot T_e \quad (1)$$

όπου η παράμετρος « $\xi$ » της εξίσωσης (1) εξαρτάται από την όλη φυσική του κύματος και περιέχει τόσο την πυκνότητα του θαλασσινού νερού όσο και την επιτάχυνση της βαρύτητας « $g$ ». Για περιπτώσεις κυμάτων ανοικτής θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (2):

$$\xi = \frac{\rho \cdot g^2}{64 \cdot \pi} \quad (2)$$

Σε άλλες περιπτώσεις διαφοροποιείται κατά κανόνα ο παρανομαστής της εξίσωσης (2).

Η μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων σε ωφέλιμη (ηλεκτρική) ενέργεια είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία, λόγω των ποικίλων ενεργειακών διεργασιών που απαιτούνται. Αντίστοιχα, το ενεργειακό περιεχόμενο του κύματος (ανά μονάδα μήκους) σε μια περιοχή για ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$  δίδεται ως:

$$E = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} P_w(t) \cdot dt = \xi \cdot \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} H_s^2(t) \cdot T_e(t) \cdot dt \quad (3)$$

Σε πρακτικούς υπολογισμούς και λαμβάνοντας υπόψιν ότι το κυματικό δυναμικό εξαρτάται κυρίως από το σημαντικό ύψος του κύματος, το οποίο μεταβάλλεται από μηδέν έως μια μέγιστη τιμή « $H_{max}$ » για κάθε περιοχή και χρονική περίοδο, και χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή της ενεργειακής περιόδου « $T_{avg}$ », η εξίσωση (3) μπορεί να γραφεί ισοδύναμα:

$$E = \xi \cdot T_{avg} \int_0^{H_{max}} f(H_s) \cdot H_s^2(t) \cdot dH_s \quad (4)$$

όπου « $f(H_s)$ » είναι η πυκνότητα πιθανότητας να εμφανιστούν σε μια περιοχή κύματα σημαντικού ύψους « $H_s$ ».

Όπως ήδη αναφέρθηκε, για να εξετασθεί κατά πόσον είναι εφαρμόσιμες οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης των κυμάτων σε μια συγκεκριμένη περιοχή θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν το κυματικό δυναμικό της περιοχής. Επιπλέον όμως, αν και τα συγκεκριμένα δεδομένα παρέχουν τις πρώτες ποσοτικές πληροφορίες, υπάρχουν πολλές άλλες παράμετροι που

πρέπει να εξεταστούν ώστε να προσδιοριστεί η βιωσιμότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης. Στην πραγματικότητα εκτός από την αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή, είναι σημαντικό πριν από κάθε προσπάθεια εγκατάστασης να γίνεται μια αρχική οικονομική αξιολόγηση που να περιλαμβάνει μια εκτίμηση του κόστους της επένδυσης καθώς και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του εξοπλισμού.

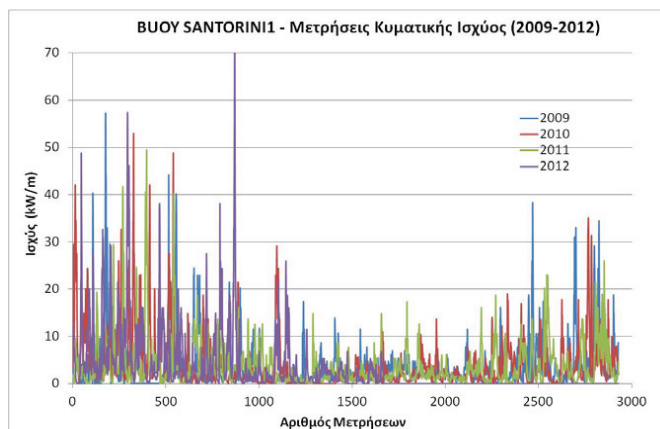
Υπενθυμίζεται ότι στις μέρες μας υπάρχει ένα σοβαρό ενδιαφέρον σχετικά με τις υπεράκτιες τεχνολογίες εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας στην ΕΕ [12] παρά το γεγονός ότι το κόστος της παραμένει σημαντικά υψηλότερο από αυτό των συμβατικών και των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Βέβαια, στις περιοχές του Αιγαίου το κόστος ηλεκτροπαραγωγής είναι πολλαπλάσιο αυτού των διασυνδεδεμένων δικτύων, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της άμεσης αξιοποίησης της διαθέσιμης κυματικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως τιμές αρχικού κόστους εγκατάστασης στα επίπεδα των 8-12Μ€/ΜW δεν αποτελεί κίνητρο για την υλοποίηση σταθμών αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας. Αντιθέτως, οι τιμές αναμένεται να μειωθούν σημαντικά κατά την επόμενη δεκαετία πλησιάζοντας τα 4 Μ€/ΜW μέχρι το 2020 [13,14].

#### 4. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΩΝΤΑΣ ΤΟ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού έχει προσελκύσει πολλές ερευνητικές προσπάθειες τις τελευταίες δεκαετίες [15,16]. Ειδικότερα σε απομονωμένες νησιωτικές περιοχές, οι θαλάσσιες τεχνολογίες θα μπορούσαν να τροφοδοτούν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Στην παρούσα εργασία, λαμβάνοντας υπόψιν το αξιόλογο διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό της Ανατολικής Μεσογείου, επιχειρείται μια εκτίμηση του κυματικού δυναμικού σε επιλεγμένες περιοχές του Νότιου και Βόρειου Αιγαίου. Στα πλαίσια αυτά, θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα διαθέσιμα στοιχεία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι συνεχή για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης ενώ και η αξιοπιστία των μετρήσεων χρήζει περαιτέρω διερεύνησης λόγω της πλημμελούς συντήρησης του μετρητικού εξοπλισμού.

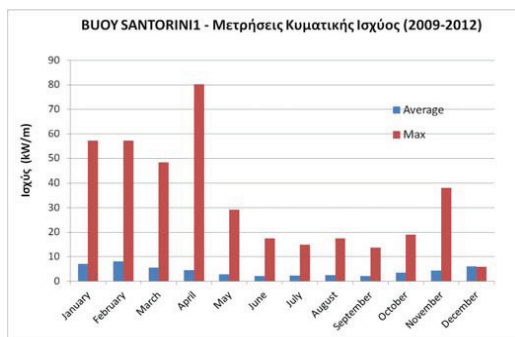
##### 4.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

Η περιοχή του κεντρικού και νότιου Αιγαίου βρίσκεται σχεδόν ολόκληρη το έτος κάτω από την επίδραση έντονων ανέμων. Ως αποτέλεσμα των έντονων μετεωρολογικών φαινομένων καταγράφονται οι ενεργειακές παράμετροι των κυμάτων στην περιοχή μετρήσεων (βλέπε και (2)) ανοιχτά της Σαντορίνης, οπότε και με την εφαρμογή της ανάλυσης της παραγράφου 3 προκύπτουν οι χρονοσειρές των διανομών της ανηγμένης κυματικής ισχύος για τέσσερα διαδοχικά έτη (2009-2012), Εικόνα (4).



Εικόνα 4: Χρονική Διανομή Ανηγμένης (kW/m) Κυματικής Ισχύος, περιοχή Σαντορίνης

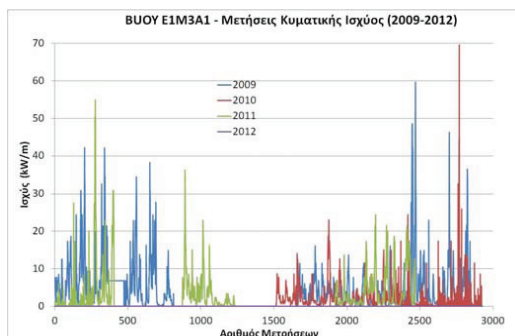
Από τα διαθέσιμα στοιχεία προκύπτει αφενός ότι και για τα τέσσερα έτη καταγράφονται παρόμοιες τιμές της κυματικής ισχύος αφετέρου ότι το κυματικό δυναμικό είναι υψηλό κυρίως τους χειμερινούς μήνες ξεπερνώντας τα 50kW/m, Εικόνα (5).



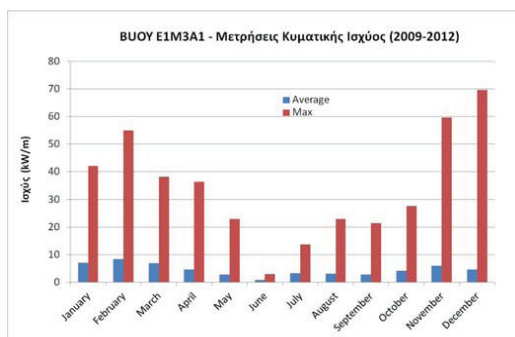
Εικόνα 5: Μηνιαίες Τιμές Ανηγμένης Κυματικής Ισχύος, περιοχή Σαντορίνης

## 4.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΡΗΤΗΣ

Στη συνέχεια επιχειρείται μια πρώτη αξιολόγηση του κυματικού δυναμικού στην περιοχή βόρεια της Κρήτης (Εικόνα (2)), οπότε στην Εικόνα (6) παρουσιάζεται το εκτιμώμενο κυματικό δυναμικό για την περίοδο 2009-2012 με βάση τα στοιχεία των διαθέσιμων μετρήσεων.



Εικόνα 6: Χρονική Διανομή Ανηγμένης (kW/m) Κυματικής Ισχύος, περιοχή Κρήτης

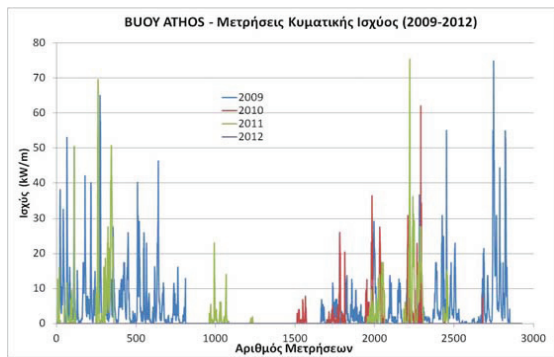


Εικόνα 7: Μηνιαίες Τιμές Ανηγμένης Κυματικής Ισχύος, περιοχή Κρήτης

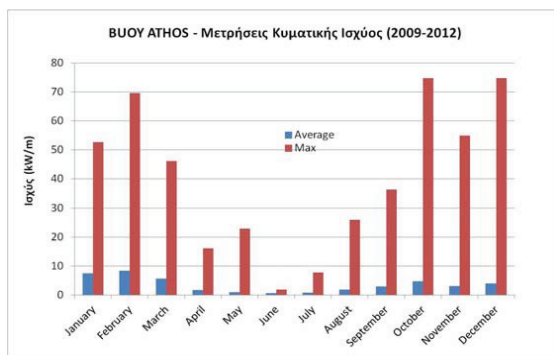
Στην περίπτωση αυτή είναι προφανής η ασυνέχεια των στοιχείων για το χρονικό διάστημα μελέτης, ωστόσο και στην περίπτωση αυτή καταγράφεται κυματική ισχύς που υπερβαίνει τα 50kW/m κατά τους χειμερινούς μήνες, βλέπε και Εικόνα (7). Αντίστοιχα, κατά τους θερινούς μήνες η απουσία ικανού αριθμού μετρήσεων δεν μας επιτρέπει να εξαγάγουμε ασφαλή συμπεράσματα.

#### 4.3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΘΩΣ

Αντίστοιχη εικόνα σχετικά με την πληρότητα μετρήσεων εμφανίζεται και για την περιοχή ανοιχτά της Χαλκιδικής και ΒΔ της Λήμνου (Εικόνα (2)), όπου όπως προκύπτει και από τις Εικόνες (8) και (9) στο μεγαλύτερο μέρος του έτους καταγράφεται αξιόλογο κυματικό δυναμικό που ξεπερνά ακόμα και τα 70kW/m. Και στην περίπτωση αυτή τα διαθέσιμα στοιχεία υποδεικνύουν μια ομοιόμορφη συμπεριφορά της κυματικής ισχύος στη διάρκεια των τεσσάρων ετών, ενώ απουσιάζουν πρακτικά τα στοιχεία για τους θερινούς μήνες.



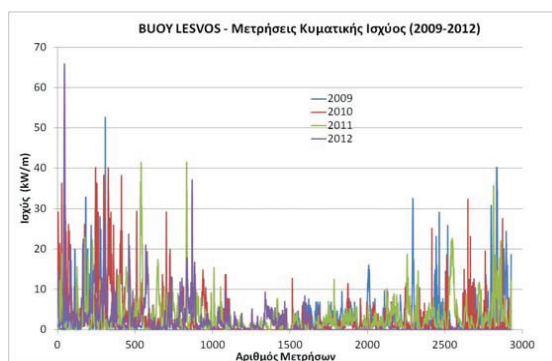
Εικόνα 8: Χρονική Διανομή Ανηγμένης (kW/m) Κυματικής Ισχύος, περιοχή Χαλκιδικής



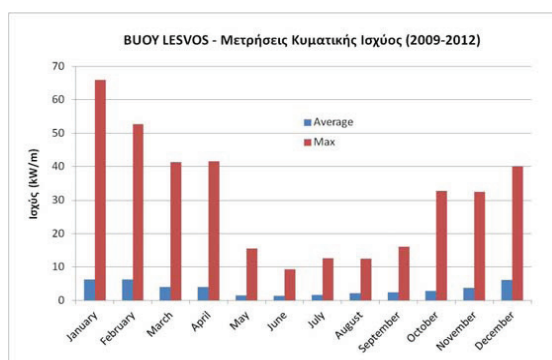
Εικόνα 9: Μηνιαίες Τιμές Ανηγμένης Κυματικής Ισχύος, περιοχή Χαλκιδικής

#### 4.4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΣΒΟΥ

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα στοιχεία των μετρήσεων για την περιοχή δυτικά της Λέσβου (Εικόνα (2)). Να σημειωθεί ότι στην εν λόγω θέση διατίθεται σημαντικός αριθμός μετρήσεων ακόμα και για τους θερινούς μήνες. Από τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης (Εικόνα (10)) είναι φανερό ότι με εξαίρεση τους καλοκαιρινούς μήνες το κυματικό δυναμικό είναι ιδιαίτερα αξιόλογο ξεπερνώντας σε αρκετές περιπτώσεις τα 30kW/m. Πράγματι από τα αποτελέσματα της Εικόνας (11) καταγράφονται τουλάχιστον για επτά μήνες το χρόνο περιπτώσεις κυματικού δυναμικού μεγαλύτερου των 30kW/m.



Εικόνα 10: Χρονική Διανομή Ανηγμένης (kW/m) Κυματικής Ισχύος, περιοχή Λέσβου



Εικόνα 11: Μηνιαίες Τιμές Ανηγμένης Κυματικής Ισχύος, περιοχή Λέσβου

Συνοψίζοντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων από την ανάλυση των διαθέσιμων στοιχείων τόσο για το βόρειο όσο και για το νότιο Αιγαίο είναι άσφες ότι η περιοχή του Αρχιπελάγους διαθέτει αξιόλογο κυματικό δυναμικό ικανό να υποστηρίξει μελλοντικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, οικονομικοί λόγοι που σχετίζονται με το κόστος μεταφοράς της ενέργειας στην ξηρά, καθώς και με το κόστος των εργασιών συντήρησης [17], δείχνουν ότι οι υποψήφιες περιοχές πρέπει να διαθέτουν και πρόσθετα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, λόγω του γεγονότος ότι το ενεργειακό δυναμικό μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί μεταξύ κοντινών περιοχών, η ακριβής ανάλυση του ενεργειακού πεδίου είναι απαραίτητη, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας κάθε περιοχής.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάσθηκε ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό πλαίσιο που εξετάζει την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού σε μια επιλεγμένη περιοχή και παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης των μετρήσεων που αφορούν τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των κυμάτων. Η προτεινόμενη ανάλυση εφαρμόστηκε σε τέσσερις περιοχές του Αιγαίου, όπου διατίθεται ένας ικανοποιητικός αριθμός καταγεγραμμένων στοιχείων. Η συστηματική μελέτη των δεδομένων υποδεικνύει την ύπαρξη αξιόλογου κυματικού δυναμικού που κατά μέσο όρο κυμαίνεται σε ετήσια βάση στα επίπεδα των 5-10kW/m, ενώ τους χειμερινούς κατά κανόνα μήνες καταγράφονται τιμές που ξεπερνούν και τα 50kW/m.

Αναφορικά με τις δυνατότητες εφαρμογών, σε πλανητικό επίπεδο αναφέρονται πολλά παραδείγματα συστημάτων που αξιοποιούν την κυματική ενέργεια, ιδιαίτερα σε

απομονωμένες περιοχές. Αντίθετα, στη χώρα μας, μια καθαρά νησιωτική χώρα με πολύ μεγάλο μήκος ακτογραμμών, τα παραδείγματα έρευνας πάνω στο συγκεκριμένο πεδίο είναι απογοητευτικά. Στα πλαίσια αυτά, από την ανάλυση υφιστάμενων στοιχείων τα οποία προκύπτουν από μετρήσεις, που δεν είχαν σαν σκοπό την ενεργειακή αξιοποίηση του κυματικού δυναμικού, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ενθαρρυντικά. Με δεδομένη την επιλογή της Ε.Ε. για ενεργειακή ανεξαρτησία και προστασία του περιβάλλοντος είναι σχεδόν σίγουρο ότι η κυματική ενέργεια θα παίξει σταδιακά σημαντικό ρόλο στο ευρωπαϊκό ενεργειακό ισοζύγιο. Συνεπώς η χώρα μας καλείται να συμμετάσχει στην προσπάθεια αυτή με προφανή οφέλη για το νησιωτικό χώρο του Αιγαίου και όχι μόνο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kaldellis J.K., Zafirakis D. The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, 2011; 36(7):1887-1901.
- [2] Kaldellis J.K., Kapsali M., Kaldelli El., Katsanou Ev. Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications. *Renewable Energy*, 2013; 52:197-208.
- [3] Kaldellis J.K., Kapsali M., Shifting towards offshore wind energy recent activity and future development. *Energy Policy*, 2013; 53:136-148.
- [4] Esteban M.D., Diez J.J., López J.S., Negro V. Why offshore wind energy?. *Renewable Energy*, 2011; 36(2):444-450.
- [5] Breeze P. *Marine Power Generation Technologies*. 2<sup>nd</sup> ed, Elsevier. UK; 2014.
- [6] Carlos C. Autonomic computing technology for Autonomous Marine Vehicles. *Ocean Engineering*, 2013; 74:233-246.
- [7] Minqiang T., Zhiqiang Zh., Yuqing X. Analysis of New Developments and Key Technologies of Autonomous Underwater Vehicle in Marine Survey. *Procedia Environmental Sciences*. ESIAT 2011: Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Science-Information Application Technology; 2011; 10:1992-1997.
- [8] Kaldellis J.K., Zafirakis D. Present Situation and Future Prospects of Electricity Generation in Aegean Archipelago Islands. *Energy Policy*, 2007; 35(9):4623-4639.
- [9] Soukissian H., Hatzinaki M., Korres G., Papadopoulos A., Kallos G., Anadranistakis E. *Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas*. 2007; Anavyssos, Greece: Hellenic Centre for Marine Research.
- [10] Hellenic Centre for Marine Research [Internet]. Poseidon Data Base(Athens); c2008-2012. Available from: <http://www.poseidon.hcmr.gr/listview.php?id=136>.
- [11] Soukissian T.H., Prospathopoulos A.M. The Errors-in-Variables approach for the validation of the WAM wave model in the Aegean Sea. *Mediterranean Marine Science*, 2006; 7/1:47-62.
- [12] Clement A., McCullen P., Falcao A., Fiorentino A., Gardner Fr., Hammarlund K. et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002; 6(5):405-431.
- [13] Allan G., Gilmartin M., McGregor P., Swales K. Levelised costs of Wave and Tidal energy in the UK: Cost competitiveness and the importance of "banded" Renewable Obligation Certificates. *Energy Policy*, 2011; 39(1):23-39.
- [14] Stallard T. Economics of ocean energy. In: Sayigh A, editor. *Ocean Energy Volume of Comprehensive Renewable Energy encyclopedia*; 2012.
- [15] Liberty L., Carillo A., Sannino G. Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renewable Energy*, 2012; 50:938-949.
- [16] Berna A. Wave power atlas of Eastern Mediterranean and Aegean Seas. *Energy*, 2013; 54:251-262.
- [17] Waveplam, Pre-feasibility studies - Case Study: Greece, Southwest Peloponnese, Available from: <http://www.waveplam.eu/>.

## ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Α. Ιωάννου<sup>1\*</sup>, Α. Ι. Κάλφας<sup>1</sup>, Θ. Β. Καραμπάς<sup>2</sup>**

<sup>1\*</sup> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ  
541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: [ioannou@lec.mavt.ethz.ch](mailto:ioannou@lec.mavt.ethz.ch), [akalfas@auth.gr](mailto:akalfas@auth.gr)

<sup>2</sup>Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλονίκης, 541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: [karambas@civil.auth.gr](mailto:karambas@civil.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ανύψωση της στάθμης των θαλασσών και διάβρωση των ακτών, θέτουν επιτακτική την ανάγκη επαναπροσδιορισμού των λιμενικών έργων. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η ενεργειακή αξιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος που ενσωματώνει στο σχεδιασμό του μια διάταξη εκμετάλλευσης της ενέργειας των αναρριχόμενων κυμάτων, τύπου OWEC (ενεργειακός κυματοθραύστης). Η μελέτη εφαρμόστηκε σε ένα νησί του μη διασυνδεδεμένου δικτύου της χώρας μας, στη νήσο Δονούσα.

Δύο υβριδικά συστήματα μελετήθηκαν συνδυάζοντας ξεχωριστά τον ενεργειακό κυματοθραύστη (OWEC) με έναν μικρο-αεριοστρόβιλο 80kW και με μια ανεμογεννήτρια 200kW. Ο συνδυασμός του OWEC και της ανεμογεννήτριας μελετήθηκε και σε υπεράκτια βάση, προς σχηματισμό ενός καινοτόμου υβριδικού συστήματος.

Με την εγκατάσταση του ενεργειακού κυματοθραύστη, πετυχαίνεται σε ετήσια βάση παραγωγή ενέργειας της τάξεως των 320MWh/y που συνεπάγεται την κάλυψη των απαιτήσεων του νησιού κατά 50%. Με την ταυτόχρονη εκμετάλλευση του κυματικού και του αιολικού δυναμικού της περιοχής πετυχαίνεται πλήρης ανεξαρτησία του νησιού από το πετρέλαιο. Μια αρχική οικονομική ανάλυση ενδεικνύει ότι παρά το μεγαλύτερο αρχικό κόστος επένδυσης, η υπεράκτια σύζευξη μπορεί να αποφέρει μεγαλύτερες ενεργειακές αποδόσεις και οικονομικά οφέλη συνιστώντας ανταγωνιστική επιλογή.

Η έρευνα αξιολογεί ότι η διάταξη της υπεράκτιας σύζευξης του ενεργειακού κυματοθραύστη και της ανεμογεννήτριας πέρα από την προστατευτική και αντιδιαβρωτική της λειτουργία μπορεί να μειώσει τον αριθμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών κατά 2, θέτοντας έτσι καινούργιες βάσεις στο σχεδιασμό των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Λέξεις Κλειδιά: αναρρίχηση κυματισμών, κυματοθραύστης, ενεργειακός, υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχει επικεντρωθεί κυρίως στην ανάπτυξη της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας και λιγότερο στην κυματική ενέργεια καθώς η ανάπτυξη της έχει να αντιμετωπίσει αρκετές τεχνικές δυσκολίες (υψηλά διαβρωτικό περιβάλλον κ.α.). Παρόλα αυτά, επίμονες προσπάθειες έχουν γίνει στον τεχνολογικό τομέα για την βελτίωση της απόδοσης κυματικών διατάξεων καθώς το κυματικό δυναμικό ανέρχεται στα 3.7TW παγκοσμίως και οι ωκεανοί καλύπτουν το 70% του πλανήτη [1-2]. Στην Νορβηγία μια νέα κυματική διάταξη αναπτύχθηκε αξιοποιώντας την αναρρίχηση των κυμάτων – Sea slot Generator (SSG) [3,4]. Η διάταξη χρησιμοποιεί 3 επίπεδα δεξαμενών για την συλλογή κυματισμών πάνω από την στάθμη της θάλασσας και παράγει 320MWh/έτος στην Βόρεια Θάλασσα. Ακόμη, σε υπεράκτια βάση, η διάταξη Wave Dragon παράγει 12GWh/έτος από την εκμετάλλευση της ενέργειας αναρρίχησης των κυμάτων σε περιοχή κυματικού κλίματος 24kW/m [5].

Στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης, η ανάγκη επένδυσης κάθε χώρας σε ΑΠΕ σύμφωνα με τον ενεργειακό της πλούτο τίθεται επιτακτική. Δεδομένου του ισχυρού αιολικού και κυματικού δυναμικού της χώρας μας, αλλά και της μεγάλης έκτασης της ακτογραμμής της (πάνω από 16,000 km στο Αιγαίο και Ιόνιο πέλαγος), εκτιμάται ότι προσφέρεται για ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ενέργειας των αναρριχόμενων κυματισμών στις ακτές της. Το ενδιαφέρον για μελλοντικές προοπτικές εφαρμογής τέτοιων τεχνολογιών στον Ελλαδικό χώρο αποτέλεσε το κίνητρο της παρούσας μελέτης.

Με αφορμή τις άμεσες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο σημείο σχεδιασμού των υφιστάμενων παράκτιων έργων και το εντεινόμενο φαινόμενο της διάβρωσης των ακτών που σηματοδοτεί μελλοντική μείωση τους κατά 80%, προτείνεται να παράκτια έργα να αποκτήσουν περά από την αντιδιαβρωτική και προστατευτική τους λειτουργία και ενεργειακή [6,7]. Στην παρούσα δημοσίευση, μελετάται ο σχεδιασμός ενός κυματοθραύστη προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς κάθε ΑΠΕ, η μελέτη του εντάχθηκε στα πλαίσια των υβριδικών συστημάτων [8-12].

Δυο υβριδικά συστήματα μελετήθηκαν συνδυάζοντας έναν 100kW ενεργειακό κυματοθραύστη OWEC με έναν μικροαεριοστρόβιλο 80kWμGT και μια ανεμογεννήτρια WT 200kW, αντιστοίχως. Ο συνδυασμός του ενεργειακού κυματοθραύστη και της ανεμογεννήτριας μελετήθηκε και σε υπεράκτια βάση. Η ταυτόχρονη εκμετάλλευση του αιολικού και του κυματικού δυναμικού είναι το μέγιστο πλεονέκτημα της προτεινόμενης υπεράκτιας διάταξης θέτοντας μια νέα παράμετρο στον σχεδιασμό των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

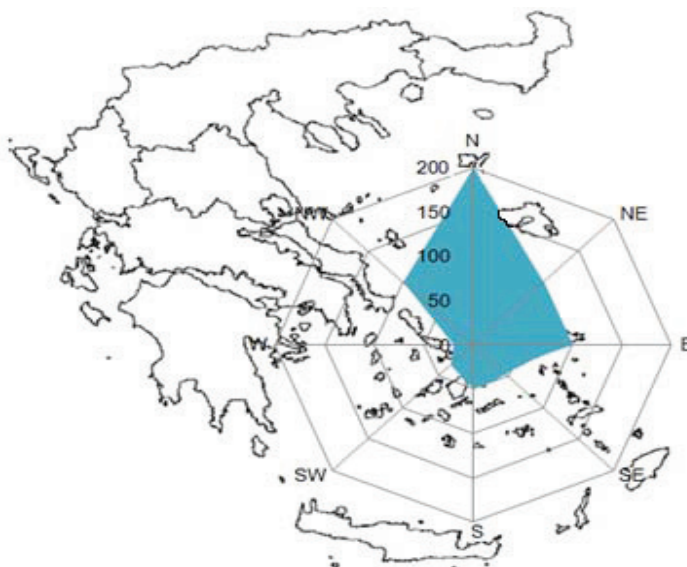
### 2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η μελέτη επικεντρώθηκε σε ένα από τα ανατολικότερα νησιά των Κυκλάδων, νήσο Δονούσα. Η νήσος Δονούσα, αριθμεί περίπου 180 μόνιμους κατοίκους ενώ δεν έχει εγκατεστημένες ΑΠΕ. Σύμφωνα με συλλεχθέντα στοιχεία από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.), η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων, γίνεται μέσω 6 αυτόνομων πετρελαϊκών μονάδων συνολικής ονομαστικής ισχύος 568kW. Η ετήσια ζήτηση του νησιού κυμαίνεται τα 667.4MWh (2012). Αξιοσημείωτο είναι ότι κατά την θερινή περίοδο και συγκεκριμένα του μήνες Ιούλιο και Αύγουστο η ζήτηση ανέρχεται στα 98,59MWh και 121MWh αντίστοιχα, ποσό που αποτελεί τριπλάσιο της χειμερινής απαίτησης σε ενέργεια – 34.5MWh. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον αυξημένο τουρισμό κατά τους θερινούς μήνες αλλά και στην εκτεταμένη χρήση κλιματιστικών συσκευών. Σε αντίθεση με την υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση του νησιού, η Δονούσα χαρακτηρίζεται από υψηλό αιολικό δυναμικό. Σύμφωνα με συλλεχθέντα ανεμολογικά δεδομένα από την Εθνική Μετεωρολογική υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.), η μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου κυμαίνεται στα 7,25m/s τον Αύγουστο μέχρι 11m/s το Φεβρουάριο με συχνότερη διεύθυνση ανέμου Βόρειας διεύθυνσης. Το πλούσιο αιολικό δυναμικό της περιοχής την καθιστά περιοχή κατάλληλη για μελλοντική εγκατάσταση Α.Π.Ε.



## 2.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ JONSWAP

Η πρόγνωση των κυματισμών για την νήσο Δονούσα πραγματοποιήθηκε μέσω του ενεργειακού φάσματος JONSWAP, ένα από τα πιο γνωστά και ευρέως εφαρμοσμένα μοντέλα για την πρόβλεψη της κυματικής κατάστασης μιας περιοχής [14-16]. Η εφαρμογή του μοντέλου JONSWAP οδηγεί στον υπολογισμό του σημαντικού ύψους  $H_s$  και της περιόδου μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας  $T_p$  όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Στην Εικ. 1 εικονίζεται η επίδραση της απέναντι ακτής στη δυνατότητα ανάπτυξης των κυματισμών περιφερειακά του νησιού όπως προέκυψε από δεδομένα εισόδου τα ανεμολογικά στοιχεία και την απόσταση της απέναντι ακτής. Διαπιστώνεται ότι υψηλότερη δυνατότητα ανάπτυξης και δράσης των κυματισμών είναι αυτή της Βόρειας πλευράς. Η ανάπτυξη κυματισμού για τιμές έντασης ανέμου μικρότερες των 4Bf και μεγαλύτερες από 8Bf δεν λήφθηκαν υπόψη καθώς στην πρώτη περίπτωση δεν συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη ύψους κύματος ενώ στην δεύτερη αναμένεται ότι έχουν πολύ χαμηλή συχνότητα εμφάνισης. Τέλος, η αποκρημνότητα της Βόρειας πλευράς του νησιού σε συνδυασμό με την μελλοντική εγκατάσταση βιολογικού σταθμού στην περιοχή αυτή ορίζει την περιοχή κατάλληλη προς εγκατάσταση της προτεινόμενης διάταξης.



Εικόνα 1: Ανάπτυξη κυματισμού σε σχέση με την απόσταση της απέναντι ακτής.

Πίνακας 1: Δυνατότητα ανάπτυξης κυματισμού σε σχέση με το ενεργειακό φάσμα JONSWAP		
Beaufort [Bf]	Ύψος Κύματος $H_s$ [m]	Περίοδος Κύματος $T_s$ [s]
4	1,26	5,84
5	1,9	6,89
6	2,28	7,11
7	3,04	7,99
8	3,9	8,83

### 2.3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΡΡΙΧΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Ο σχεδιασμός της διάταξης του ενεργειακού κυματοθραύστη OWEC βασίζεται στην ιδέα δέσμωσης ενέργειας από την αναρρίχηση των κυμάτων στις ακτές όπως παρουσιάζεται στην Εικ.2 [6]. Σε αντίθεση με τους κλασσικούς κυματοθραύστες, η διάταξη είναι σχεδιασμένη για μέγιστη αναρρίχηση κύματος ενώ παράλληλα προσφέρει προστασία από την διάβρωση των ακτών [17]. Η διάταξη αποτελείται από κεκλιμένη επιφάνεια κατάλληλης κλίσης ώστε τα εισερχόμενα κύματα να αναρριχώνται και να συλλέγονται στην ειδικά διαμορφωμένη δεξαμενή.

Το συλλεγόμενο νερό διοχετεύεται σε κατάλληλο υδροστρόβιλο Kaplan χαμηλού μονομετρικού ύψους, άμεσα συζευγμένο με ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκτίμηση της παροχής αναρρίχησης των κυματισμών πραγματοποιήθηκε μέσω του μοντέλου Van der Meer and Janssen (VMJ) καθώς χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για διατάξεις τέτοιου τύπου [4]. Το μοντέλο VMJ εκτιμά την παροχή αναρρίχησης σύμφωνα με την εξίσωση (1):

$$q = \begin{cases} \sqrt{\frac{\tan \theta}{S_{op}}} \sqrt{g H_s^3} Q, & \xi < 2 \\ \sqrt{g H_s^3} Q, & \xi \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

όπου  $H_s$  είναι το ύψος του κύματος στη βάση της κατασκευής,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας 9,81,  $\theta$  η γωνία κλίσης της διάταξης και  $S_{op}$  η αποκρημνότητα του κύματος σύμφωνα με την εξίσωση (2):

$$S_{op} = \frac{H_s}{L_o} \quad (2)$$

όπου  $L_o$  είναι το μήκος κύματος που εκφράζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3):

$$L_o = \sqrt{g d_o T} \quad (3)$$

Όπου  $d_o$  είναι το βάθος της εγκατάστασης της διάταξης και  $T$  η περίοδος του κυματισμού. Ο όρος  $Q$  αποτελεί την αδιαστατοποιημένη παράμετρο της παροχής αναρρίχησης η οποία υπολογίζεται μέσω της σχέσης(4). Ως  $R_c$  ορίζεται το ύψος της κατασκευής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και  $\gamma_r \gamma_h \gamma_b \gamma_\beta$  είναι μειωτικοί συντελεστές συνυφασμένοι με χαρακτηριστικά της διάταξης (η γεωμετρία της κεκλιμένης επιφάνειας στην βάση της κατασκευής, η τραχύτητα του υλικού κατασκευής, η κλίση της επιφάνειας κ.α). Όλοι οι μειωτικοί παράγοντες κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,5 έως 1 όπου 1 είναι η περίπτωση μέγιστης αναρρίχησης και άρα λείας επιφάνειας.

$$Q = \begin{cases} 0.06 \exp\left(-5.2 \frac{R_c}{T \sqrt{g H_s}}\right), & \xi < 2 \\ 0.2 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_r \gamma_h \gamma_b \gamma_\beta}\right), & \xi \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

Ο υπολογισμός της τελικής αναρρίχησης των κυματισμών εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Iribarren  $\xi$  ή αλλιώς της παράμετρου αποκρημνότητας του κύματος και υπολογίζεται σύμφωνα με τη εξίσωση (5):

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{S_{op}}} \quad (5)$$

Η τιμή της μεταβλητής  $\xi$  καθορίζει αν θα επέλθει θραύση στους εισερχόμενους κυματισμούς και εξαρτάται άμεσα από την γεωμετρία της διάταξης. Η θραύση στην ανοιχτή θάλασσα και στις ακτές αποτελεί το μηχανισμό περιορισμού του ύψους του κύματος με δεδομένη την περίοδο τους.

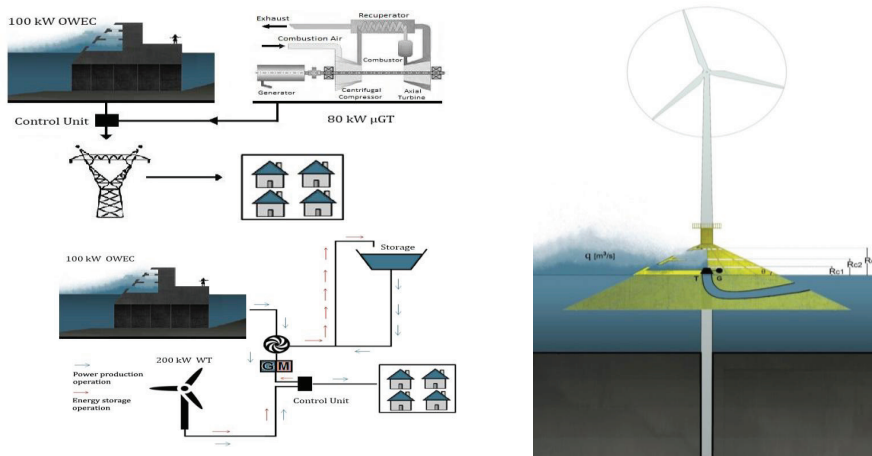
Για τιμές μικρότερες του  $\xi < 2$ , ο κυματισμός θραύεται και άρα χάνει ενέργεια πριν συλλεχθεί στις δεξαμενές. Αντίθετα, για τιμές μεγαλύτερες του  $\xi > 2$ , η ενέργεια των κυμάτων αν δεν απορροφηθεί με θραύση ανακλάται.



ζήτηση του οικισμού καλύπτεται από την ενέργεια που παράγει η WT, η περίσσεια ενέργειας χρησιμοποιείται για την αντίστροφη λειτουργία του OWEC ως σύστημα αντλιοσταμείωσης. Το ανάγλυφο της Δονούσας, με μέγιστο υψόμετρο τα 300m προσφέρει την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω μεταφοράς νερού από το επίπεδο της θάλασσας σε έναν μεγαλύτερο υψόμετρο ταμιευτήρα. Η αποθηκευμένη ενέργεια παρέχει στο νησί ημέρες αυτονομίας, επιτυγχάνοντας τη μείωση του φορτίου της λειτουργίας του κινητήρα ντίζελ στην ακραία περίπτωση ζήτησης ενέργειας κατά την περίοδο αιχμής του καλοκαιριού.

### 3.2.2. ΣΕΝΑΡΙΟ Β.2 – ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ OWEC / WT

Στο σενάριο Β.2, η διάταξη του σεναρίου Β.1 συνδυάστηκε και υπεράκτια καθώς το επίπεδο της πλατφόρμας μιας υπεράκτιας αιολικής ανεμογεννήτριας βρίσκεται συνήθως σε ύψος 9m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, γεγονός που επιτρέπει την εγκατάσταση ενός OWEC ύψους 6m, κάτω από το επίπεδο της πλατφόρμας [16].



Εικόνα 3: Υβριδικό σύστημα ενεργειακού κυματοθραύστη OWEC και μικροαεριοστρόβιλου μGT (Σενάριο Α: αριστερά πάνω) - Υβριδικό σύστημα ενεργειακού κυματοθραύστη OWEC και ανεμογεννήτριας WT (Σενάριο Β.1: αριστερά κάτω) - Προτεινόμενη υπεράκτια σύζευξη ενεργειακού κυματοθραύστη και ανεμογεννήτριας (Σενάριο Β.2: δεξιά).

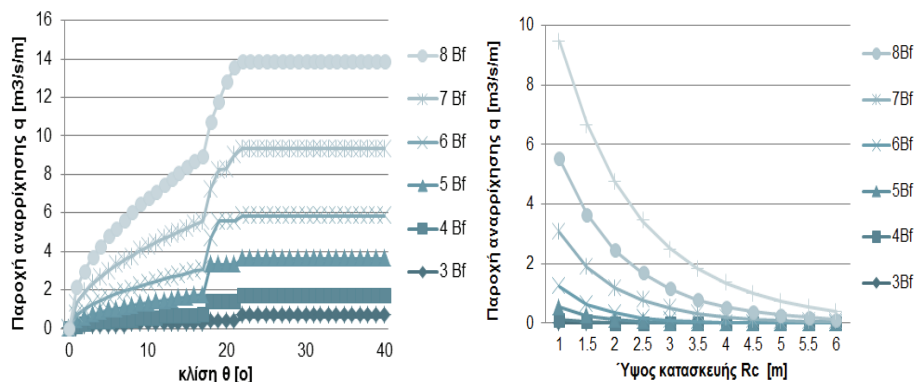
Στην Εικ.3, απεικονίζεται ο προτεινόμενος σχεδιασμός ενός 100kWOWEC ενσωματωμένου σε μία 200kW υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι υπεράκτιοι άνεμοι είναι πιο ισχυροί και πιο συνεκτικοί από τους ανέμους της ξηράς [17], είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι το σενάριο Β.2 θα προσφέρει υψηλότερη απόδοση ενέργειας, παρόλο που στην μελέτη αυτή, το γεγονός αυτό δεν λήφθηκε υπόψη. Η παραγωγή ενέργειας και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της διάταξης Β.2 ενδεικνύουν τα εξής: Η αναλογία της παραγωγής ενέργειας του OWEC σε σχέση με την ανεμογεννήτρια είναι  $\frac{3}{4}$ , ενώ η αναλογία ύψους του ρότορα στρόβιλου της ανεμογεννήτριας προς τον OWEC είναι ίση με  $\frac{1}{5}$ . Ο προτεινόμενος σχεδιασμός επιτρέπει μεγαλύτερη ισχύ, έναντι μίας απλής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας ισχύος 200kW.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η γεωμετρία της διάταξης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην ποσότητα του νερού που θα συλλεχτεί και άρα στην ενέργεια που θα δεσμευτεί. Κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν τον ρυθμό παροχής κυματικής αναρρίχησης  $q$  [m<sup>3</sup>/s/m] και την συνολική

παραγωγή ενέργειας OWEC [MWh], είναι η κλίση της ράμπας  $\theta$  και το ύψος της διάταξης  $R_c$ . Για τη μελέτη επίδρασης των δυο παραμέτρων  $\theta$  και  $R_c$ , μελετήθηκε ένα εύρος γωνιών εισερχόμενων κυματισμών μεταξύ  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  και ένα εύρος υψών διάταξης μεταξύ  $1\text{m} < R_c < 6\text{m}$  πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Στην Εικ.4 (αριστερά), απεικονίζεται η εξάρτηση του ρυθμού αναρρίχησης, σε σχέση με τη γωνία του κεκλιμένου επιπέδου για διαφορετικές εντάσεις ανέμου. Σε χαμηλότερες γωνίες, τα κύματα θραύονται με άμεση συνέπεια την απώλεια ενέργειας. Για υψηλές γωνίες, το φαινόμενο της ανάκλασης των κυματισμών αυξάνεται. Πλήρης ανάκλαση εμφανίζεται για γωνία  $90^\circ$ . Μέγιστη αναρρίχηση εμφανίζεται για γωνίες εύρους από  $25^\circ$  έως  $35^\circ$ . Για το κυματικό κλίμα της Δονούσας, η γωνία των  $27^\circ$  παρουσιάζεται να είναι η βέλτιστη για τον σχεδιασμό του ενεργειακού κυματοθραύστη. Στην Εικ.4 (δεξιά), παρουσιάζεται η παροχή αναρρίχησης σε συνάρτηση με το ύψος της κατασκευής  $R_c$  για διάφορες συνθήκες ανέμου της κλίμακας Bf.



Εικόνα4: Παροχή αναρρίχησης κυματισμού  $Q$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  για διάφορες εντάσεις ανέμου κλίμακας BeaufortBf (αριστερά) - Παροχή αναρρίχησης  $Q$  προς το ύψος της κατασκευής για διάφορες εντάσεις ανέμου κλίμακας BeaufortBf (δεξιά).

Για όλες τις συνθήκες ανέμου και κυμάτων παρατηρείται ότι ο ρυθμός παροχής αναρρίχησης μειώνεται εκθετικά με την σταδιακή αύξηση του ύψους της κατασκευής  $R_c$ . Στην περίπτωση των 6m ύψους κατασκευής η αναρρίχηση των κυματισμών είναι αμελητέα. Σημειώνεται ότι η χρήση πολλαπλών δεξαμενών βελτιώνει την συνολική παροχή αναρρίχησης.

## 4.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Για την αξιολόγηση των προτεινόμενων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, η λειτουργία τους προσομοιώθηκε κατά την διάρκεια ενός έτους. Στην Εικ.5 απεικονίζεται η συνολική παραγωγή ενέργειας από το παράκτιο υβριδικό σύστημα OWEC/μGT (σενάριο A) καθώς και οι ημέρες λειτουργίας κάθε μονάδας ξεχωριστά. Παρατηρείται ότι η διάταξη OWEC μπορεί να παράγει 320MWh/year, ένα ποσό που αποτελεί το 50% της ετήσιας ζήτησης σε ενέργεια του νησιού. Η παραγωγή ενέργειας των σεναρίων B.1 & B.2 παρουσιάζεται στην Εικ.6 – (αριστερά) και ανέρχεται στα 320MWh και 437MWh από τον OWEC και την ανεμογεννήτρια (WT) αντιστοίχως. Για 7 μήνες όλο το χρόνο, παρατηρείται ότι η λειτουργία του OWEC και της WT οδηγεί σε πλεόνασμα ενέργειας, γεγονός που καθιστά σκόπιμη την ανάπτυξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Η ενέργεια που θα μπορούσε να αποθηκευθεί στην περίπτωση της λειτουργίας του OWEC ως αντλία αποθήκευσης ενέργειας, παρουσιάζεται στην Εικ.6 – (δεξιά) και εκτιμάται στα 136MWh.

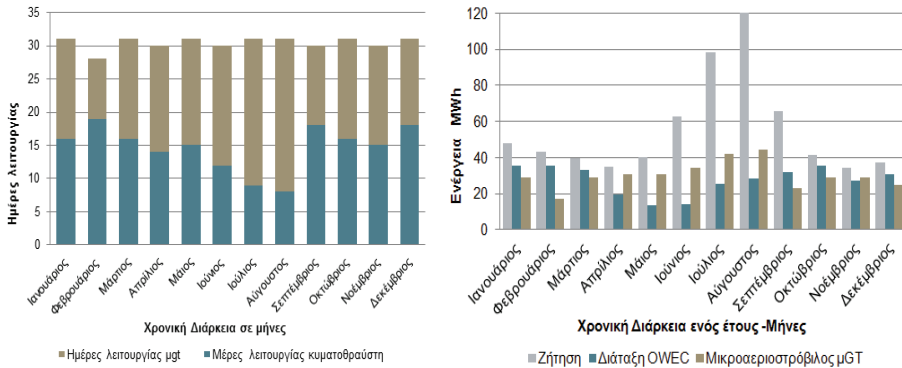
### 4.3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα επιμέρους τμήματα των υπό μελέτη υβριδικών συστημάτων κρίθηκε σκόπιμο να αξιολογηθούν υπό οικονομικούς παράγοντες. Τα επιμέρους κόστη κάθε τεχνολογίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Κάθε τεχνολογία αξιολογήθηκε για το ίδιο οικονομικό σενάριο περιόδου 20 ετών [18] στοιχεία του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Πιο συγκεκριμένα 30% του συνολικού κόστους επένδυσης θεωρήθηκε ότι δανείζεται, 35% επενδύεται από ίδια κεφάλαια και το υπόλοιπο 35% επιχορηγείται με επιτόκιο 8% και περίοδο αποπληρωμής 10 χρόνια. Η παρούσα αξία του χρήματος καθώς και η ετήσια δόση μπορεί να υπολογιστεί μέσω των σχέσεων (9 - 10).

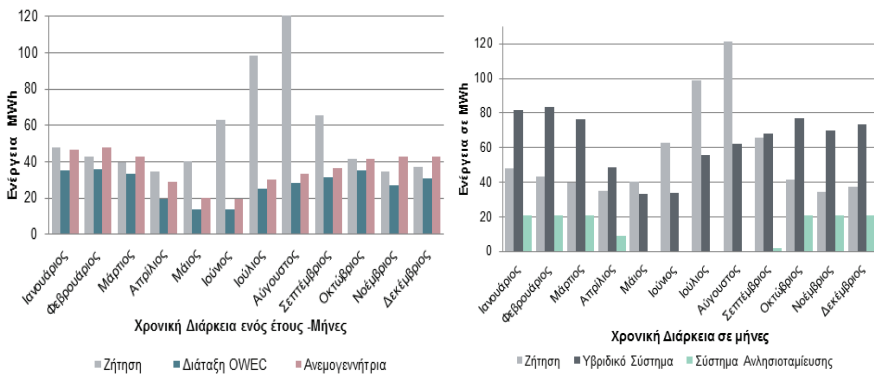
$$V_n = V_p (1 + \rho)^n \quad (9)$$

$$ALP = \frac{TL}{\frac{1-(1+\rho)^n}{\rho}} \quad (10)$$




όπου  $V_p$  είναι η παρούσα αξία του χρήματος,  $\rho$  το επιτόκιο και  $n$  τα συνολικά έτη διάρκειας του έργου,  $ALP$  το ετήσιο δάνειο πληρωμής,  $TL$  το συνολικό ύψος δανείου και  $n$  η περίοδος δανεισμού.



Εικόνα 5: Ημέρες λειτουργίας κάθε ξεχωριστής μονάδας της παράκτιας διάταξης OWEC/μGT HPWS (Σενάριο A :αριστερά) - Ετήσια παραγωγή ενέργειας της παράκτιας διάταξης WEC/μGT HPWS (δεξιά).



Εικόνα 6: Ετήσια παραγωγή ενέργειας της διάταξης OWEC/WTHPGS (Σενάρια B1. & B.2:αριστερά) – Αποθήκευση ενέργειας κατά την διάρκεια ενός έτους (δεξιά).

Πίνακας 2: Κοστολόγιο επιμέρους τεχνολογίας			
Επιμέρους Κόστη (€)			
Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	200.000	230.000	403.000
Σύνδεση με το δίκτυο (καλώδια κ.α)	40.000	143.500	188.125
Θεμελίωση	10.000	86.250	169.875
Εγκατάσταση	60.000	115.00.	171.500
Συνολικό Ύψος Επένδυσης	400.000	575.000	932.500
Περίοδος αποπληρωμής	11	11	13

Πίνακας 3: Στοιχεία υποτιθέμενου οικονομικού σεναρίου.			
Πληθωρισμός	2,6%	Ετήσια Αύξηση Εσόδων	2,5%
Ετήσια απόσβεση	10%	Ετήσιο κόστος συντήρησης	2,3%

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια παρούσας μελέτης αξιολογήθηκε η ενεργειακή συμπεριφορά μιας διάταξης αναρρίχησης κυματισμών OWEC μέσω της συνδυαστικής της λειτουργίας με ένα μικροαεριοστρόβιλο 80kW και μια ανεμογεννήτρια 200kW σε θεωρητική εφαρμογή της στην νήσο Δονούσα.

- Η ετήσια ενεργειακή αποτίμηση αξιολογεί ότι η τεχνολογία του ενεργειακού κυματοθραύστη μπορεί να καλύψει 50% των ενεργειακών απαιτήσεων του νησιού και επιπρόσθετα να προσφέρει προστασία από την διάβρωση των ακτών.
- Το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα του σεναρίου Α μπορεί να προσφέρει στο νησί επάρκεια ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας την λειτουργία των πετρελαϊκών σταθμών σε κατάσταση εφεδρείας.
- Στην παρούσα μελέτη η παραγόμενη ενέργεια του υπερράκτιου και του παράκτιου συστήματος υβριδικού συστήματος (B.1 & B.2) θεωρήθηκε ίδια. Παρότι η υπερράκτια σύζευξη των δυο τεχνολογιών πρέπει να μελετηθεί εκτενέστερα είναι ασφαλές να εκτιμηθεί ότι θα παράγει υψηλότερη ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη το ισχυρότερο αιολικό δυναμικό.
- Από την οικονομική ανάλυση προκύπτει ότι παρότι μια τέτοια τεχνολογία απαιτεί την επένδυση μεγαλύτερου αρχικού κεφαλαίου θα μπορούσε να είναι οικονομικά βιώσιμη καθώς προσφέρει πέρα από ενεργειακά και περιβαλλοντολογικά οφέλη.
- Η μελέτη επικεντρώθηκε σε ένα μικρό νησί του Αιγαίου Πελάγους αλλά το ίδιο υβριδικό σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες περιοχές με αντίστοιχο ή μεγαλύτερο ενεργειακό δυναμικό. Σε περιοχές με υψηλότερο κυματικό δυναμικό όπως στον Ατλαντικό ή στον Ειρηνικό, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.
- Για την περίπτωση της νήσου Δονούσας το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα όχι μόνο διπλασιάζει την παραγωγή ενέργειας μιας υπερράκτιας ανεμογεννήτριας αλλά αυξάνει και τον ολικό βαθμό απόδοσης της διάταξης.



Εικόνα 7: Προτεινόμενη υπεράκτια σύζευξη ανεμογεννήτριας και διάταξης OWEC.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον κ. Κουρέλη και τον κ. Δρακούλη από την Ελληνική Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η) καθώς και την Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ) για την συνεισφορά τους στην παροχή απαραίτητων δεδομένων καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσαν.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A. and Pontes, M.T., 2010. "Assessing the Global Wave Energy Potential". ASME Paper No OMAE2010-20473, *Proceedings of 29<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering* June 6-11, Shanghai, China.
- [2] Clement, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.T., Schild, P., Sjordrom, B.O., Sorensen, H.C. and Thorpe, T., 2002. "Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives". *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, **6**(5), pp.405–431.
- [3] Margheritini, L., Vicinanza, D. and Frigaard, P., 2008. "SSG Wave Energy Converter: Design, Reliability and Hydraulic Performance of an Innovative Overtopping Device". *Journal of Renewable Energy*, Elsevier, **34**(5), pp.1371-1380.
- [4] Wiegand, B.E., 2011. "An Initial Study into the Economic Feasibility of the Composite seawall for Energy Conversion (CSWEC) in North-West Sardinia". M.Sc. Thesis, Faculty of Engineering and the Environment, School of Ocean and the Earth Sciences, University of Southampton, UK.
- [5] Kofoed, J.P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E. and Sørensen, J.C., 2006. "Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon". *Journal of Renewable Energy*, Elsevier, **31**(2), pp.181-189.
- [6] Shankar, N.J. and Jayaratne, M.P.R., 2002. "Wave Run-up and Overtopping on Smooth and Rough Slopes of Coastal Structures". *Journal of Ocean Engineering*, Elsevier, **30**(2), pp. 221–238.
- [7] Li, J., Wang, Z. and Liu, S., 2012. "Experimental Study of Interaction between Multi-directional Focused Wave and Vertical Circular Cylinder, Part I: Wave Run-up". *Journal of Coastal Engineering*, Elsevier, **64**, pp.151-160.
- [8] Karageorgakis, N.I., Kalfas, A., and Abhari, R.S., 2005. "Performance Investigation of a Hybrid Wind Turbine/Fuel-Cell Power Generation System through a Small Scale Experiment". ASME Paper No EFC-2005-86258, *Proceedings of 1<sup>st</sup> European Fuel Cell Technology and Application Conference*, Rome, Italy.



- [9] Dalamagka, D., 2009. "Study of an On-grid Photovoltaic Station of 100kW Integrated into a Micro Gas Turbine Hybrid System". Dipl.-Ing. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- [10] Kallivretaki, M., 2005. "Real Scale Applications of Hybrid Power Generation Systems with Fuel Cell". Dipl.-Ing. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece
- [11] Psarra, A., Kallivretaki, M., Karageorgakis, N.I. and Kalfas, A., 2008, "Transient Performance and Loading Limitations of Hybrid Wind Turbine/Fuel Cell Power Generation System". ASME Paper No FC-08-1027, *Proceedings of 1<sup>st</sup> European Fuel Cell Technology and Application Conference*, Rome, Italy.
- [12] Bakos, G.C., 2002. "Feasibility Study of a Hybrid Wind/Hydro Power System for Low Cost Electricity Production". *Journal of Applied Energy*, Elsevier, **72**(3-4), pp.599-608.
- [13] Ibrahim, H., Ilinca, A. and Perron, J., 2007. "Energy Storage Systems-Characteristics and Comparisons". *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, **12**(5), pp.1221-1250.
- [14] Koutitas, C., 1998. "*Introduction to Coastal Technique and Marine Structures*". Ziti Publications, Thessaloniki, Greece.
- [15] Vousdoukas, M.I., Velegrakis, A.F., Karambas and Th.V., 2009. "Morphology and Sedimentology of Microtidal Beach with Beachrock Vatera, Lesvos, NE Mediterranean". *Journal of Continental Shelf Research*, Elsevier, **29**(16), pp.1937-1947.
- [16] Andersen, T.L., Frigaard, P., Damsgaard, M.L. and De Vos, L., 2010. "Wave Run-up on Slender Piles in Design Conditions-Model Tests and Design Rules for Offshore Wind". *Journal of Coastal Engineering*, Elsevier, **58**(4), pp.281-289.
- [17] Roald, L., Jonkman, J., Robertson, A., Chokani, N., 2013. "The Effect of Second-order Hydrodynamics on Floating Offshore Wind Turbines". *Journal of Energy Procedia*, Elsevier, **35**, pp.253-264.
- [18] Manwell, J.F., MCGOWAN, J.G., ROGERS, A.L., 2009. "*Wind Energy Explained - Theory, Design and Application*". John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, UK, Chap.9.



## **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

---



## ΧΡΗΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Ι. Τρυπαναγνωστόπουλος<sup>1</sup>, Π. Ζαφειράκης<sup>2</sup>,

Γ. Τρυπαναγνωστόπουλος<sup>3</sup>, Ι. Καούρης<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26504, [yantrip@physics.upatras.gr](mailto:yantrip@physics.upatras.gr)

<sup>2</sup>Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26504, [pzafeirakis@gmail.com](mailto:pzafeirakis@gmail.com)

<sup>3</sup>Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,

Πάτρα 26504, [dalee\\_geo@yahoo.gr](mailto:dalee_geo@yahoo.gr)

<sup>4</sup>Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών,

Πάτρα 26504, [caouris@helios.mech.upatras.gr](mailto:caouris@helios.mech.upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζονται τρόποι βελτίωσης της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, που βασίζονται στην αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους και σε διατάξεις παθητικής ψύξης τους. Για την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, προτείνεται η σύζευξη των φβ πλαισίων με διάχυτους ανακλαστήρες, για εφαρμογή τους κυρίως στις φβ εγκαταστάσεις σε οριζόντιο έδαφος ή σε οριζόντιες οροφές κτιρίων. Όσον αφορά την παθητική ψύξη των φβ, προτείνονται τρόποι άμεσης και έμμεσης ψύξης τους. Για την άμεση ψύξη, δοκιμάστηκε μια απλή και χαμηλού κόστους μέθοδος, με την κυκλοφορία νερού σε πλαστικό σωλήνα τοποθετημένο πίσω από το φβ πλαίσιο για διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας. Επίσης, εξετάστηκε η χρήση θερμο-αποθηκευτικής μάζας σε θερμική επαφή με την πίσω επιφάνεια των φβ πλαισίων, με την οποία επιδιώχτηκε η απορρόφηση θερμότητας για την διατήρηση χαμηλότερης θερμοκρασίας. Για την έμμεση ψύξη, εξετάστηκε η αύξηση της θερμικής ακτινοβολίας της πίσω πλευράς του φβ προς την επιφάνεια του εδάφους ή της οροφής, που έχει γίνει η φβ εγκατάσταση, με την επιφάνεια εδάφους ή οροφής να ψύχεται κατάλληλα, ώστε να έχει θερμοκρασία μικρότερη από του περιβάλλοντος. Επιπλέον, δοκιμάστηκε πειραματικά και μια χαμηλού κόστους διάταξη υβριδικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη και σε σύζευξη με διάχυτο ανακλαστήρα για την αύξηση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ενέργειας. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποδοτική εφαρμογή των τροποποιήσεων στην μείωση της θερμοκρασίας των φβ, βελτιώνοντας την απόδοσή τους κατά 5%-10%, με εξαίρεση την χρήση θερμο-απορροφητικής μάζας, που δίνει θετικό αποτέλεσμα κυρίως τις πρωινές ώρες, που χρήζει όμως περαιτέρω βελτιώσεων. Με τους ενισχυτικούς ανακλαστήρες, η αύξηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος των φβ πλαισίων, φτάνει ακόμη και το 30%.

Λέξεις Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά, Ενισχυτικά κάτοπτρα, Ψύξη φωτοβολταϊκών, Απόδοση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παράγοντες που μειώνουν την αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια των συνήθων επίπεδων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η αύξηση της θερμοκρασίας τους, η μη βέλτιστη κλίση και αζιμούθια γωνία ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η μερική σκίαση από δένδρα, διάφορα αντικείμενα και κτίρια που βρίσκονται μπροστά τους και η κακή λειτουργία των ηλεκτρονικών διατάξεων για την ρύθμιση της μέγιστης ισχύος (controllers) και αντιστροφών συνεχούς-εναλλασσόμενου ρεύματος (inverters). Η αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών συμβάλλει στην βελτίωση του αποδιδόμενου ηλεκτρισμού, καθιστώντας την φβ εγκατάσταση περισσότερο οικονομικά αποδοτική. Από τους παράγοντες αυτούς ιδιαίτερης σημασίας είναι η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών, επειδή εμφανίζεται σε συνδυασμό με όλους τους υπόλοιπους παράγοντες.

Τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό κατά ένα ποσοστό 5%-20% (ανάλογα τον τύπο των φβ κυττάρων), με την υπόλοιπη μεγαλύτερη ποσότητα να μετατρέπεται σε θερμότητα, που αποβάλλεται στο περιβάλλον. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών μονάδων, με αποτέλεσμα την μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Στην περίπτωση της εγκατάστασης των φβ στο έδαφος ή σε οριζόντιες οροφές κτιρίων, (παράλληλες σειρές φβ), αυτά έχουν την δυνατότητα για φυσικό δροσισμό, με την μετάδοση θερμότητας στο περιβάλλον με ακτινοβολία καθώς και με συναγωγή μέσω του αέρα, ιδιαίτερο όταν υπάρχει άνεμος. Η μείωση που επέρχεται στη θερμοκρασία των φβ πλαισίων είναι σημαντική [1] αλλά η θερμοκρασία τους εξακολουθεί να είναι σχετικά υψηλή, ιδιαίτερα την θερινή περίοδο (με υψηλές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας). Για τις φβ εγκαταστάσεις στις κεκλιμένες οροφές και στις προσόψεις των κτιρίων, το πρόβλημα της υπερθέρμανσης των φβ πλαισίων είναι ακόμη πιο έντονο, καθώς η πίσω πλευρά τους είναι θερμικά «προστατευμένη» από τα δομικά υλικά οροφής ή πρόσοψης και αποβάλλει πολύ λιγότερη θερμότητα από ότι η εμπρόσθια πλευρά τους, με αποτέλεσμα την σημαντική ανύψωση της θερμοκρασίας τους [1].

Η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται συνήθως με τη διαμόρφωση διαύλων αέρα μεταξύ των φβ πλαισίων και της κεκλιμένης οροφής, ή του κατακόρυφου τοίχου της πρόσοψης, για την φυσική κυκλοφορία του αέρα του περιβάλλοντος και την σχετική μείωση της θερμοκρασίας των φβ πλαισίων. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και έχει μικρό πρόσθετο οικονομικό κόστος, όμως απέχει από το αποτέλεσμα που λαμβάνεται στην μείωση της θερμοκρασίας με την τοποθέτηση των φβ πλαισίων σε παράλληλες σειρές στο έδαφος ή στην οριζόντια οροφή των κτιρίων, όπου συντελείται απαγωγή θερμότητας και από τις δύο πλευρές τους. Η μείωση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συντελεί στην διατήρηση ικανοποιητικής ηλεκτρικής απόδοσης και η επίτευξή της είναι ένα από τα θέματα που έχουν ερευνητικό ενδιαφέρον. Στην αναζήτηση λύσεων στο πρόβλημα αυτό, η μπροστινή επιφάνεια των φβ πλαισίων είναι συνήθως γυάλινη και θερμαίνεται από τις εν επαφή κυψελίδες, ενώ στην πίσω πλευρά υπάρχει δυνατότητα προσάρτησης στοιχείων παθητικής ή ενεργητικής ψύξης. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν μελετηθεί τρόποι για αύξηση της μετάδοσης θερμότητας, που μπορεί να οδηγήσει και στην παραγωγή θερμού αέρα για χρήση [2]. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της μείωσης της ηλεκτρικής απόδοσης με την θερμοκρασία το έχουν κυρίως τα ευρέως διαδεδομένα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si και pc-Si), ενώ άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών (άμορφο πυρίτιο, CIS, CdTe) έχουν μικρότερο πρόβλημα.

Για την αντιμετώπιση της αυξημένης θερμοκρασίας των φβ πλαισίων και ειδικά των συνήθων φβ c-Si και pc-Si, δοκιμάζονται στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας μέθοδοι που βασίζονται κυρίως στην βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας από το φβ πλαίσιο προς το περιβάλλον με μεταφορά και με ακτινοβολία, ή ακόμη και στην αξιοποίηση της απαγόμενης θερμότητας για τις θερμικές

ανάγκες του κτιρίου, όπου είναι εγκατεστημένη η ηλιακή διάταξη. Στην περίπτωση αυτή έχει γίνει εκτενές ερευνητικό έργο για την ψύξη των φωτοβολταϊκών και την αποδοτική θέρμανση του κυκλοφορούντος ρευστού και ειδικότερα για τις υβριδικές συσκευές φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών αέρα, ή νερού ή και συνδυασμένου αέρα/νερού [1,2]. Στις συσκευές αυτές η εξαγόμενη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί για θέρμανση χώρων, θέρμανση νερού χρήσεως, κλπ και επιτυγχάνεται αύξηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών (ηλεκτρικής και θερμικής). Τα συστήματα αυτά άρχισαν να ερευνώνται από τα μέσα της δεκαετίας του '70, αλλά πρόσφατα έχουν αρχίσει να εισάγονται εμπορικά μοντέλα τέτοιων συστημάτων στην αγορά.

Μελετώντας τις υβριδικές φβ/θ συσκευές και ειδικά αυτές που χρησιμοποιούν νερό για την απαγωγή της θερμότητας, διαπιστώθηκε ότι το κόστος της προστιθέμενης θερμικής μονάδας αποτελεί σήμερα σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους της συσκευής. Αυτό συμβαίνει επειδή το κόστος των φωτοβολταϊκών είναι διαρκώς μειούμενο ενώ το κόστος των υλικών της θερμικής μονάδας παραμένει στάσιμο και ίσως και να αυξάνεται. Όμως, οι περιορισμοί που τίθενται στα υβριδικά φβ/θ συστήματα, σχετικά με τις οπτικές και θερμικές απαιτήσεις και την προτεραιότητα που έχουν ως προς τον ηλεκτρισμό, καθιστούν σταδιακά τις φβ/θ συσκευές όχι ιδιαίτερα οικονομικά αποδοτικές. Πριν από δέκα χρόνια τα φβ κόστιζαν περί τις 5000 € ανά kW ονομαστικής ισχύος, ενώ τώρα έχουν πέσει κάτω από 2000 € το kW. Αντίθετα το κόστος των υλικών κατασκευής της θερμικής μονάδας (χαλκός, αλουμίνιο) όχι μόνο δεν μειώθηκε αλλά παρουσιάζει και αύξηση. Από την άλλη, η προσθήκη διαφανούς καλύμματος για βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς της θερμικής μονάδας (περιορισμός θερμικών απωλειών της φωτιζόμενης πλευράς του φβ πλαισίου) προκαλεί μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω οπτικών απωλειών (ανάκλαση και απορρόφηση). Παράλληλα, συνοδεύεται με περιορισμό των άνω θερμικών απωλειών του φβ πλαισίου που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του και κατά συνέπεια μείωση της ηλεκτρικής του απόδοσης. Έτσι, εκτιμήθηκε ότι χρειάζεται να εξεταστούν εναλλακτικοί τρόποι βελτίωσης της απόδοσης των φβ πλαισίων, οι οποίοι να συνοδεύονται από μικρότερο κόστος και να μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στα φβ τάρκα όσο και στις φβ εγκαταστάσεις στα κτίρια [3].

Στις φβ εγκαταστάσεις στις επικλινείς οροφές κτιρίων, επιδιώκεται η κλίση και η αζιμουθια γωνία της στέγης να είναι βέλτιστες ή να μην απέχουν πολύ από την βέλτιστη θέση. Ανάλογα εφαρμόζεται και για τις περιπτώσεις εγκατάστασης φβ στην πρόσοψη των κτιρίων. Όσο διαφέρει η θέση της στέγης (ή της πρόσοψης) από την βέλτιστη θέση, τόσο περισσότερο μειώνεται η δυνατότητα για οικονομικά αποδοτική εγκατάσταση. Στις εγκαταστάσεις φβ στις επικλινείς στέγες και στις προσόψεις των κτιρίων, πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια για τον αερισμό τους, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανσή τους, που συνεπάγεται μείωση της απόδοσής τους, καθώς και την μετάδοση ανεπιθύμητης ποσότητας θερμότητας εντός του κτιρίου, που αυξάνει την κατανάλωση ηλεκτρισμού για τον κλιματισμό του.

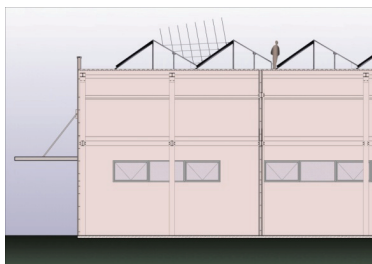
Μια τροποποίηση για βελτίωση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών είναι η αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα φβ πλαίσια, που οδηγεί και στην αύξηση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Προτείνεται τοποθέτηση διάχυτων ανακλαστήρων μεταξύ παράλληλων σειρών φβ. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για εγκαταστάσεις εδάφους και κυρίως για εγκαταστάσεις σε οριζόντιες οροφές κτιρίων [1-4]. Οι ενισχυτικοί ανακλαστήρες μπορούν να τοποθετηθούν κατάλληλα, τόσο σε συνδυασμό με απλές φβ μονάδες όσο και με υβριδικά φβ/θ συστήματα. Η πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των φβ ή φβ/θ διατάξεων από την άνοιξη ως το φθινόπωρο, συντελεί ώστε η προτεινόμενη εγκατάσταση να παρουσιάζει αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 1).

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται ορισμένες περιπτώσεις βελτίωσης της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φβ πλαισίων, εφαρμόζοντας χαμηλού πρόσθετου κόστους μεθόδους και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές που έγιναν.

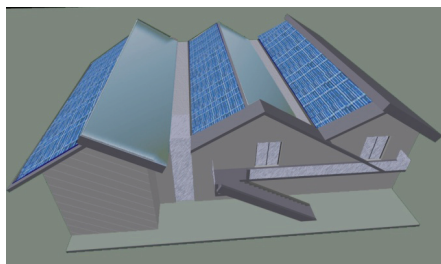
## 1. ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ

### 2.1.1. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Στις φβ εγκαταστάσεις σε παράλληλες σειρές, στο έδαφος ή στις οριζόντιες οροφές κτιρίων, πρέπει να εξασφαλίζεται ορισμένη ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σειρών, ώστε να αποφεύγεται η σκιάσή τους. Γενικά εφαρμόζεται η εγκατάσταση επίπεδων φβ πλαισίων σταθερού προσανατολισμού, επίπεδων προσανατολιζόμενων στον ήλιο φβ και συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Οι συγκεντρωτικές συσκευές χρησιμοποιούν επίπεδες, παραβολικές ή άλλες καμπύλες κατοπτρικές διατάξεις, ή φακούς Fresnel, για την συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε γραμμική ή σημειακή εστία, όπου βρίσκεται τοποθετημένος ο φωτοβολταϊκός απορροφητής, που φέρει κάποιο σύστημα παθητικής ή ενεργητικής ψύξης. Στις συγκεντρωτικές υβριδικές φβ/θ συσκευές, ο απορροφητής είναι υβριδικού τύπου (φωτοβολταϊκό με θερμική απολαβή), που παράγει ηλεκτρική ενέργεια και ταυτόχρονα παρέχει θερμό ρευστό για χρήση. Οι συγκεντρωτικές συσκευές χρησιμοποιούν διάταξη προσανατολισμού στον ήλιο, ενός άξονα περιστροφής για τις διατάξεις γραμμικής εστίας και δύο αξόνων περιστροφής για τις διατάξεις σημειακής εστίας. Οι ηλιακές συγκεντρωτικές διατάξεις με φωτοβολταϊκό απορροφητή απαιτούν την μέγιστη δυνατή ομοιομορφία πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, που συγκεντρώνεται στην επιφάνειά τους, επειδή σε διαφορετική περίπτωση παρουσιάζεται μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Η ανάγκη ομοιομορφίας στην πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φβ υπάρχει και στις ηλιακές συσκευές μικρής συγκέντρωσης (<10) και θέτει περιορισμούς, ειδικά στις ακίνητες συγκεντρωτικές διατάξεις, που είναι διατάξεις πολύ μικρής συγκέντρωσης (<2,5).



(α)



(β)

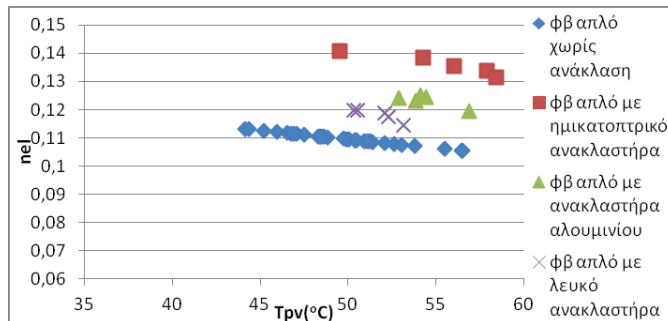
Εικόνα 1: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε: (α) οριζόντια οροφή κτιρίων και (β) επικλινή οροφή κτιρίων, με διάδρομο για διευκόλυνση συντήρησης ανακλαστήρων και φωτοβολταϊκών

### 2.2. ΔΙΑΧΥΤΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

Η πιο απλή φβ συγκεντρωτική διάταξη, μικρού λόγου συγκέντρωσης, είναι ο συνδυασμός φβ πλαισίων με διάχυτους ενισχυτικούς ανακλαστήρες, που είναι σταθερά τοποθετημένοι μεταξύ παράλληλων σειρών φβ πλαισίων. Με τους διάχυτους ανακλαστήρες η ανακλώμενη και (τελικά) προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φβ πλαισίων είναι ομοιόμορφη, ή σχεδόν

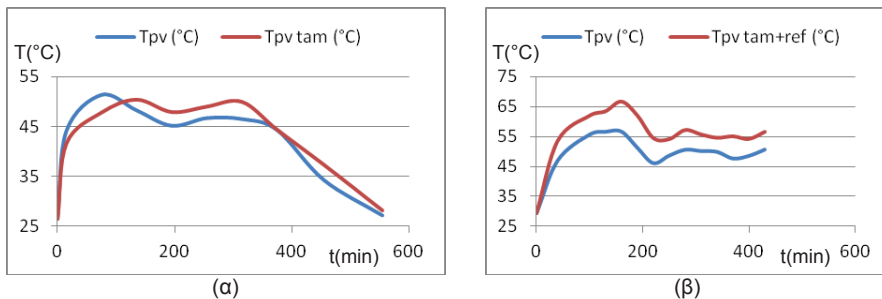


ομοιόμορφη. Όμως, η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από τον διάχυτο ανακλαστήρα διαδίδεται προς κατευθύνσεις και εκτός φβ, με αποτέλεσμα η πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία στο φβ πλαίσιο να είναι μικρότερη αυτής των κατοπτρικών ανακλαστήρων (οι διάχυτοι ανακλαστήρες δίνουν ένα ασαφές είδωλο της φωτεινής πηγής, αντί του ευκρινούς ειδώλου των κατοπτρικών). Στο θέμα αυτό έχει γίνει έρευνα στο Παν/μιο Πατρών και έχουν δημοσιευτεί πολλά αποτελέσματα [1,2], από όπου προκύπτει ότι, στις ακίνητες συγκεντρωτικές διατάξεις μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο φβ πλαίσιο ακόμη και 50%.



Εικόνα 2: Ηλεκτρική απόδοση φβ πλαισίου ως προς την θερμοκρασία λειτουργίας του, με πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία από διαφορετικούς ενισχυτικούς ανακλαστήρες

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφορετικών τύπων διάχυτων ανακλαστήρων στην αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια των φβ pc-Si πλαισίων, δοκιμάστηκαν 3 τύποι ανακλαστήρων, ημικατοπτρικός (λαμαρίνα γαλβανιζέ), λευκή επιφάνεια και ματ φύλλο αλουμινίου, μετρώντας την ηλεκτρική απόδοση του απλού φβ πλαισίου και την αποδοτικότητα του φβ με τον ανακλαστήρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν την θετική συμβολή των ανακλαστήρων και ιδιαίτερα του ημικατοπτρικού, που αύξησε την αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά 30% (Εικόνα 2).



Εικόνα 3: Σύγκριση της θερμοκρασίας του απλού φβ πλαισίου ( $T_{PV}$ ) και του φβ με την προσθήκη θερμοαπορροφητικού υλικού ( $T_{PV\ tam}$ ) ως προς τον χρόνο: (α) χωρίς χρήση ανακλαστήρα και (β) με ανακλαστήρα ημικατοπτρικό ( $T_{PV\ tam+ref}$ ) (μέχρι 220 min από την έναρξη της δοκιμής), λευκό (από 220 min μέχρι 340 min) και ματ αλουμινίου (από 340 min μέχρι τέλος)

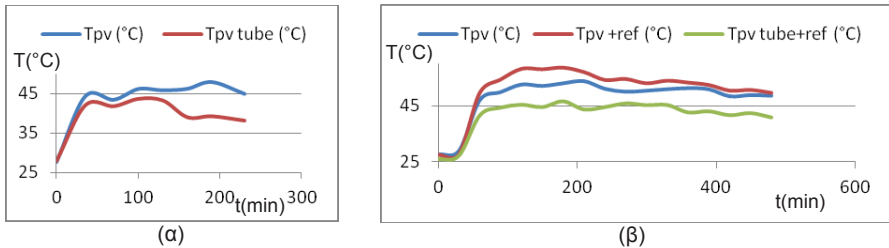
### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

#### 3.1. ΧΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟ-ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

Για την μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φβ πλαισίων κατά την ημερήσια λειτουργία τους, δοκιμάστηκε η χρήση θερμο-απορροφητικού υλικού (παγοκύστες) στην πίσω πλευρά του φβ pc-Si πλαισίου, με το οποίο επιδιώχτηκε η απορρόφηση της θερμότητας του φβ (Εικόνα 3α.) κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας του. Επίσης δοκιμάστηκε η διάταξη και με χρήση διάχυτου ανακλαστήρα (Εικόνα 3β.). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάταξη που δοκιμάστηκε δεν ήταν επιτυχής (ψύξη μόνο τις πρωινές ώρες) και χρειάζονται πιθανόν κάποιες βελτιώσεις.

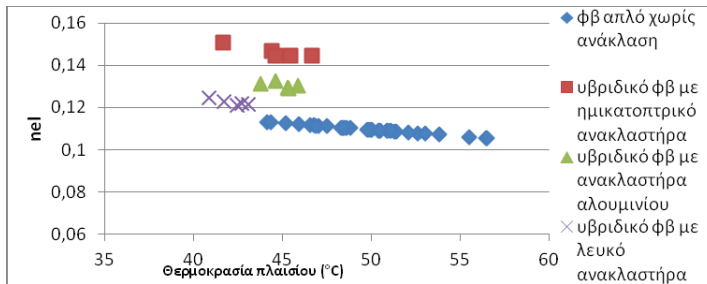
#### 3.2. ΨΥΞΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΑΓΟΝΤΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΜΕ ΝΕΡΟ

Η επόμενη σειρά πειραμάτων για μείωση της θερμοκρασίας των φβ βασίστηκε στην απαγωγή θερμότητας από αυτά, με κατάλληλη προσαρμογή απλού πλαστικού σωλήνα στο πίσω μέρος



Εικόνα 4: Θερμοκρασία απλού φβ πλαισίου ( $T_{pv}$ ) και με ψύξη μέσω σωλήνα νερού  $T_{pv \text{ tube}}$  ως προς τον χρόνο: (α) χωρίς ανακλαστήρα και μικρή ροή (μέχρι 130 min από την έναρξη της δοκιμής) και μεγάλη ροή (από 130 min μέχρι τέλος) και (β)  $T_{pv + ref}$ ,  $T_{pv \text{ tube} + ref}$ , με ανακλαστήρα ημικατοπτρικό (μέχρι 210 min από την έναρξη της δοκιμής), ματ αλουμινίου (από 210 μέχρι 360 min) και λευκό (από 360 min μέχρι τέλος)

του φβ πλαισίου και κυκλοφορία νερού. Χρησιμοποιήθηκαν πάλι φβ πλαίσια pc-Si και έγιναν



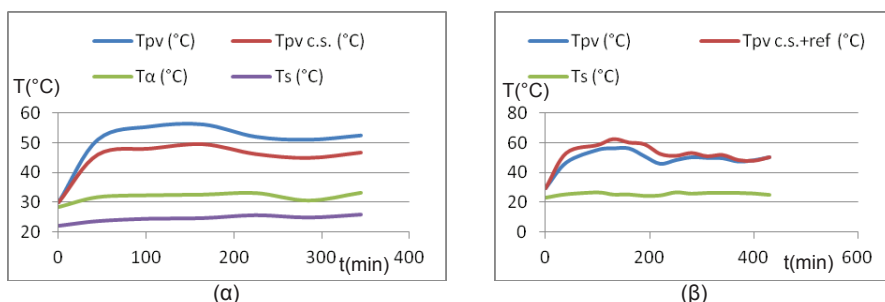
Εικόνα 5: Ηλεκτρική απόδοση απλού φβ πλαισίου χωρίς ανακλαστήρα και υβριδικού φβ/θ συστήματος, ως προς την θερμοκρασία λειτουργίας τους, με χρήση διαφορετικών ενισχυτικών ανακλαστήρων

επίσης δοκιμές με χρήση ανακλαστήρα, για διαφορετικές ροές νερού. Στην Εικόνα 4α φαίνεται η

μείωση που επιτυγχάνεται με την κυκλοφορία νερού. Επίσης, στην Εικόνα 4β παρουσιάζεται η μείωση που επιτυγχάνεται με ροή νερού, όταν και τα δύο φβ πλαίσια (το απλό φβ και αυτό που ψύχεται) συνδυάζονται με διάχυτο ανακλαστήρα. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η ηλεκτρική αποδοτικότητα των δοκιμασθέντων φβ πλαισίων για τους 3 διαφορετικούς τύπους διάχυτου ανακλαστήρα, όπου φαίνεται η υπεροχή του ημικατοπτρικού ανακλαστήρα.

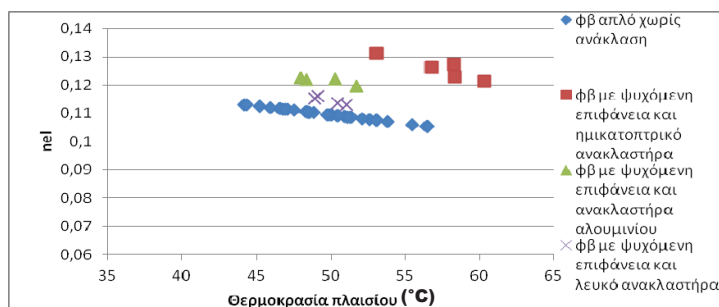
### 3.3. ΨΥΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΡΟΣ ΨΥΧΟΜΕΝΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η θερμοκρασία των φβ πλαισίων μπορεί να μειωθεί αν αυξηθεί η θερμική ακτινοβολία τους προς το έδαφος (ή την επιφάνεια της οριζόντιας οροφής του κτιρίου). Για τον σκοπό αυτό δοκιμάστηκε



Εικόνα 6: Σύγκριση της θερμοκρασίας του απλού φβ πλαισίου ( $T_{pv}$ ) και με ακτινοβολία σε ψυχόμενη επιφάνεια εδάφους ( $T_{pv.c.s.}$ ), ως προς τον χρόνο, με καταγραφή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_a$ ) και της ψυχόμενης επιφάνειας ( $T_s$ ): (α) χωρίς ανακλαστήρα και (β) με χρήση ανακλαστήρα ( $T_{pv.c.s.+ref}$ ) ημικατοπτρικό (μέχρι 220 min από την έναρξη της δοκιμής), λευκό (από 220 min μέχρι 340 min) και ματ αλουμινίου (από 340 min μέχρι τέλος)

διάταξη φβ πλαισίων pc-Si, ενός απλού τύπου σε κανονική θέση εγκατάστασης σε οριζόντιο δάπεδο και ενός άλλου, όπου το δάπεδο ψυχόταν κατάλληλα, για αύξηση της αποβαλλόμενης θερμότητας με ακτινοβολία της πίσω πλευράς. Επίσης, έγινε δοκιμή και με την προσθήκη ενισχυτικού ανακλαστήρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν την θετική επίδραση στην μείωση της θερμοκρασίας του φβ πλαισίου, που έφτασε και τους 6  $^{\circ}\text{C}$  (Εικόνα 6(α), 6(β)). Στην



Εικόνα 7: Ηλεκτρική απόδοση απλού φβ πλαισίου χωρίς ανακλαστήρα και φβ με ψυχόμενη επιφάνεια εδάφους και χρήση διαφορετικών ενισχυτικών ανακλαστήρων, ως προς την θερμοκρασία λειτουργίας τους

Εικόνα 7 παρουσιάζεται η ηλεκτρική αποδοτικότητα των φβ πλαισίων που δοκιμάστηκαν. Διαπιστώνεται και πάλι η βελτίωση που επιτυγχάνεται, τόσο από τον ανακλαστήρα όσο και από την μείωση της θερμοκρασίας του φβ πλαισίου λόγω της επίδρασης της ψυχόμενης επιφάνειας εδάφους.

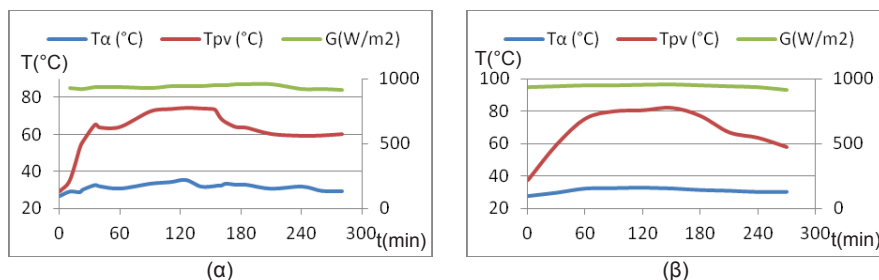
#### 4. ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΣ/ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

Τα συνήθη επίπεδα υβριδικά φβ/θ συστήματα αποτελούνται από φβ πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα για την απολαβή θερμότητας από το φβ, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό, χαμηλότερης θερμοκρασίας του φβ, θερμαίνεται ψύχοντάς το. Η χρήση νερού, ως ρευστού θερμικής απολαβής, είναι αποδοτική όλο το έτος, κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα. Αυτές οι υβριδικές διατάξεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την θέρμανση νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 40°C), ώστε να επιτυγχάνεται παράλληλα και διατήρηση χαμηλής θερμοκρασίας στα φβ πλαίσια. Η απαγωγή θερμότητας με χρήση αέρα, αντί νερού, είναι απλούστερη και πιο οικονομική σαν διάταξη, αλλά επιτυγχάνεται μικρότερη ψύξη. Όταν ο αέρας περιβάλλοντος έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20°C, τα φβ/θ συστήματα αέρα έχουν περιορισμένες δυνατότητες εφαρμογής και χρησιμοποιούνται κυρίως για την λειτουργία φυσικού αερισμού και θέρμανση αέρα. Τα περισσότερα υβριδικά φβ/θ που έχουν αναπτυχθεί είναι απλού τύπου, δηλαδή επίπεδης μορφής, όπως οι επίπεδοι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες. Στα συστήματα αυτά και κυρίως στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο απλός επίπεδος τύπος φβ, υπάρχει ο περιορισμός της μικρής ανύψωσης της θερμοκρασίας του ρευστού απολαβής θερμότητας. Διαφορετικά, επηρεάζεται αρνητικά η ηλεκτρική τους απόδοση και παράλληλα μειώνεται και η θερμική απόδοση της συσκευής. Η απαγωγή θερμότητας είναι πιο αποτελεσματική στα συγκεντρωτικά φβ, επειδή η συμπύκνωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φβ κυττάρου αυξάνει πολύ την θερμοκρασία του, ώστε η ψύξη του καθίσταται αναπόφευκτα αναγκαία. Έτσι, επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας του φβ και ικανοποιητική αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ επιπλέον παρέχεται και θερμό ρευστό σε θερμοκρασιακό επίπεδο πρακτικά χρήσιμο, για πληθώρα αναγκών (50°C – 60°C).

Από την διεξαγόμενη έρευνα, σε υβριδικές φβ/θ διατάξεις στο Παν/μιο Πατρών, έχουν προκύψει πολλά σχετικά αποτελέσματα [1,2]. Στα απλά φβ/θ συστήματα, το φβ πλαίσιο δεν προστατεύεται θερμικά, με επιπρόσθετο διάκενο και διαφανές κάλυμμα (όπως γίνεται στους θερμικούς συλλέκτες), για να αποφεύγεται έτσι η μείωση στη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, από τις οπτικές απώλειες του καλύμματος και την αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας του φβ συλλέκτη. Για την βελτίωση της αποδοτικότητας των φβ/θ συλλεκτών έχει προταθεί η αξιοποίηση των διάχυτων ανακλαστήρων, όπως αναλύθηκε προηγουμένως [1,2]. Ο συνδυασμός αυτός παρέχει αυξημένη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια μεγαλύτερη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η απορροφούμενη πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία από το φβ πλαίσιο αυξάνει ελαφρά την θερμοκρασία του αλλά η απαγωγή θερμότητας από το κυκλοφορούν ρευστό την διατηρεί ελεγχόμενη. Παράλληλα επιτυγχάνεται αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας. Για την επιπλέον αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας από την φβ/θ συσκευή είναι αναγκαίο ένα πρόσθετο διαφανές κάλυμμα. Στην περίπτωση αυτή, η πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία που παρέχει ο διάχυτος ανακλαστήρας στην υβριδική φβ/θ συσκευή [1] «αναπληρώνει» την μείωση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (λόγω των οπτικών απωλειών από το διαφανές κάλυμμα), αποδίδοντας τελικά την ίδια περίπου ηλεκτρική ενέργεια, που παρέχει το φβ πλαίσιο στην τυπική του μορφή (χωρίς πρόσθετο διαφανές κάλυμμα και χωρίς διάχυτο ανακλαστήρα).

Η χρήση των υβριδικών φβ/θ επιλέγεται σε εφαρμογές που απαιτούν θερμό ρευστό σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας (<40 °C), όταν η διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση των απαιτούμενων φωτοβολταϊκών και θερμικών συλλεκτών [4] είναι περιορισμένη και όταν στην

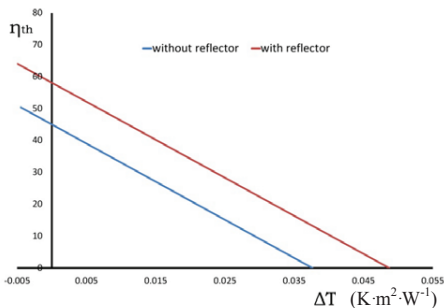
εφαρμογή εξυπηρετείται και πρόσθετη ανάγκη πέραν του παρεχόμενου ηλεκτρισμού και θερμότητας (π.χ. ρύθμιση φωτισμού). Επιπλέον, όσο πιο αναγκαία είναι η ψύξη των φβ για την διατήρηση της απόδοσής τους σε ικανοποιητικό επίπεδο, τόσο πιο οικονομικά αποδοτική είναι και η χρήση της φβ/θ συσκευής, όπως στα συγκεντρωτικά φβ/θ συστήματα. Σε ότι αφορά τις περιπτώσεις βέλτιστης εφαρμογής φβ/θ συστημάτων, η προσθήκη των διάχυτων ανακλαστήρων είναι θετική, εφ' όσον η προσθήκη τους δεν επηρεάζει αρνητικά άλλες λειτουργικές πλευρές της εγκατάστασης. Στις εγκαταστάσεις αυτές πρέπει να ληφθεί μέριμνα αερισμού των φβ πλαισίων ώστε να εμποδιστεί η αύξηση της θερμοκρασίας τους, τόσο από την αυξημένη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, όσο και από την προσθήκη των διάχυτων ανακλαστήρων στην πίσω πλευρά των φβ, που εμποδίζουν σε κάποιο βαθμό την φυσική απαγωγή θερμότητας. Επιπλέον, πρέπει να εξετάζεται και η βελτίωση του αερισμού μεταξύ φβ πλαισίων και διάχυτων ανακλαστήρων. Στον σχεδιασμό μιας φβ εγκατάστασης, σε οριζόντιες οροφές κτιρίων, πρέπει να προβλέπεται η διαμόρφωση διάκενου επί της οροφής, μεταξύ των φβ πλαισίων και των ανακλαστήρων, ώστε να διευκολύνεται η μετακίνηση των τεχνικών, για συντήρηση και καθαρισμό των δύο αυτών στοιχείων (Εικόνα 1α). Επίσης, στις εγκαταστάσεις αυτές πρέπει να προβλέπεται και η διάθεση κάποιας επιφάνειας στην οριζόντια οροφή, για πιθανή τοποθέτηση πρόσθετων σειρών φβ πλαισίων ή θερμικών ηλιακών συλλεκτών [4] αργότερα. Στην περίπτωση που τα φβ πλαίσια τοποθετούνται σε επικλινείς οροφές κατοικιών, βιομηχανικών κτιρίων, αποθηκών κλπ (Εικόνα 1β), η μία πλευρά της οροφής πρέπει να έχει όσο το δυνατόν καλύτερο νότιο προσανατολισμό και η κλίση της να είναι κατάλληλη για την βέλτιστη ετήσια αποδοτικότητα της στην ηλεκτρική ενέργεια με τοποθέτηση διάχυτων ανακλαστήρων στην απέναντι συζυγή πλευρά της επικλινούς οροφής. Η εγκατάσταση των διάχυτων ανακλαστήρων πρέπει να μελετάται προσεκτικά, για αποφυγή πρόσθετης θέρμανσης των φβ πλαισίων, λόγω δημιουργούμενης δυσκολίας φυσικής απαγωγής θερμότητας από αυτά, καθώς καλύπτονται από την πίσω πλευρά τους με τους ανακλαστήρες, παρά την απόσταση που υπάρχει μεταξύ τους. Όσο πιο μικρή είναι η κλίση των φβ πλαισίων, τόσο μικρότερη και η συμβολή των διάχυτων ανακλαστήρων που πιθανόν η τοποθέτησή τους να μην είναι οικονομικά αποδοτική.



Εικόνα 8: Μεταβολή της θερμοκρασίας υβριδικού φβ πλαισίου ( $T_{pv}$ ) χωρίς ανακλαστήρα (α) και με ανακλαστήρα (β), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φβ πλαισίων, ως προς τον χρόνο. Και στις δύο περιπτώσεις αρχικά δεν υπήρχε ροή νερού και μετά από 153 min (α) και 170 min (β) άρχισε ροή νερού για απολαβή της θερμότητας.

Τα δημοσιευμένα ερευνητικά αποτελέσματα του Εργαστηρίου, σε υβριδικά φβ/θ, αφορούν συσκευές με μεταλλικό αγωγό θερμότητας από το φβ πλαίσιο. Εδώ, παρουσιάζονται αυτά που λήφθηκαν με την φβ/θ συσκευή χαμηλού κόστους (με pc-Si και πλαστικό σωλήνα θερμικής απολαβής). Στην Εικόνα 8(α) φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας της υβριδικής φβ/θ διάταξης χωρίς ροή και με ροή νερού, όπου παρατηρείται μείωση κατά περίπου 15°C στη θερμοκρασία του. Στην Εικόνα 8(β) παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του φβ στην περίπτωση που χρησιμοποιείται και ενισχυτικός ανακλαστήρας, αρχικά χωρίς ροή και μετά με ροή. Τέλος στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται το διάγραμμα της θερμικής απόδοσης της νέας φβ/θ

συσσκευής χαμηλού κόστους. Αποδεικνύεται, ότι η χρήση του ανακλαστήρα στην διάταξη αυτή επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση στην θερμική απόδοση, αυξάνοντας κατά 30% την αποδιδόμενη θερμότητα για λειτουργία της σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και αυξάνοντας αντίστοιχα και την θερμοκρασία στασιμότητας, καθιστώντας την διάταξη πιο πρακτική.



Εικόνα 9: Θερμική απόδοση του υβριδικού φβ/θ συλλέκτη ( $\eta_{th}$  σε σχέση με τον λόγο  $\Delta T/l$ ) χωρίς ανακλαστήρα (κάτω γραμμή) και με ανακλαστήρα (πάνω γραμμή).

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην χώρα μας, το μεγαλύτερο μέρος των φβ εγκαταστάσεων αφορά φβ πάρκα, όπου η πλειονότητά τους είναι εγκαταστάσεις τυπικών επίπεδων φβ πλαισίων, σε παράλληλες σειρές σταθερού προσανατολισμού. Η εγκατάσταση φβ στις οροφές των κτιρίων, κυρίως κατοικιών, αποτελεί την δεύτερη σημαντική εφαρμογή, ενώ εφαρμογές σε πολυκατοικίες, δημόσια κτίρια, σχολεία, αθλητικά κέντρα, βιομηχανικά κτίρια και αγροτικές μονάδες, είναι μέχρι τώρα ελάχιστες. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάστηκε μία νέα και χαμηλού κόστους φβ συσκευή, στην οποία πλαστικός σωλήνας κατάλληλα καμπυλωμένος και προσαρτημένος μέσα σε θερμικά μονωμένη βάση αποτελεί την μονάδα θερμικής απολαβής από το φβ πλαίσιο. Η φβ αυτή συσκευή δοκιμάστηκε πειραματικά και τα αποτελέσματα εκτιμήθηκαν ικανοποιητικά, συγκρινόμενα με την απόδοση των υβριδικών φβ/θ συσκευών με πιο αποδοτική μεταλλική μονάδα θερμικής απαγωγής. Για τη μείωση της θερμοκρασίας των φβ, κυρίως σε εγκαταστάσεις στο έδαφος και σε οριζόντιες οροφές κτιρίων, αναπτύχθηκαν ορισμένες διατάξεις, όπου η απλή χρήση σωλήνα νερού και η μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας έδρασης, έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η χρήση θερμο-απορροφητικών πλακών σε επαφή με τα φβ πλαίσια λειτούργησε θετικά μόνο τις πρωινές ώρες και χρειάζεται βελτίωση. Ο συνδυασμός των φβ πλαισίων με ενισχυτικό διάχυτο ανακλαστήρα αποδείχτηκε αποδοτικός σε κάθε περίπτωση διάταξης (απλό φβ, βελτιωμένο φβ με ψυκτική διάταξη, φβ/θ).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M., Yianoulis P., Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar Energy* 72: 217–234, 2002
- [2] Tripanagnostopoulos Y.: Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems, *Solar Energy* 81, 1117 – 1131, (2007)
- [3] Y. Tripanagnostopoulos, M. Sigalas, Y. Caouris, E. Karantagli, G. Trypanagnostopoulos. "Optimized contribution of photovoltaics to cost effective building eco-retrofitting" 29<sup>th</sup> EUPVSEC, 6AV.4.16, Amsterdam, 22-26 Sep (2014).
- [4] Y. Tripanagnostopoulos. "Aspects and expectations for holistic buildings in next decade". *Int. Conf. "Energy Forum on Solar Building Skins"*. Bressanone, Italy, 6-7 Dec. (2012).

## ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΜΗ-ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ

Ι. Τσαβλίδης<sup>1</sup>, Π. Παναγιώτου<sup>1</sup>, Ν. Μπόσινας<sup>2</sup>, Κ. Υάκινθος<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ  
54124 Θεσσαλονίκη, email: [kyak@auth.gr](mailto:kyak@auth.gr)

<sup>2</sup>Intracom Defense Electronics

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η πρώτημη διαστασιολόγηση, ανάλυση και σχεδιασμός ενός υβριδικού ηλιακού μη-επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV). Βασικά πλεονεκτήματα ενός τέτοιου τύπου αεροχήματος είναι η βελτιωμένη αυτονομία, η χρήση Α.Π.Ε. και οι μειωμένες εκπομπές ρύπων. Μπορεί να εκτελεί πληθώρα αποστολών, όπως παρακολούθηση και πρόβλεψη καιρικών φαινομένων, καταγραφή ατμοσφαιρικών δεδομένων, πυροπροστασία, επιτήρηση συνόρων, συνεισφορά σε αποστολές διάσωσης και τηλεπικοινωνίες. Στα πλαίσια της εργασίας, καθορίζεται σε επίπεδο πρώιμης σχεδίασης (conceptual design) η γεωμετρία, και αναλύονται το βάρος και η απόδοση του αεροχήματος. Έμφαση δίνεται στην ενεργειακή διαχείριση του αεροχήματος, καθώς και στην αεροδυναμική του συμπεριφορά. Παράμετροι όπως η ανάγκη για απουσία νεφώσεων και κατά συνέπεια εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία, και η χαμηλή αεροδυναμική αντίσταση καθόρισαν ως καταλληλότερο το ύψος πτήσης στα 7,000m. Για την ανάλυση του ροϊκού πεδίου και την εξαγωγή αεροδυναμικών συντελεστών έγινε χρήση και υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Σημαντικό μέρος της παρούσας εργασίας αποτέλεσαν επίσης η επιλογή κατάλληλων φωτοβολταϊκών στοιχείων που θα τροφοδοτούν με την απαραίτητη ενέργεια το αεροσκάφος, η μελέτη του υβριδικού συστήματος πρόωσης αλλά και η διαστασιολόγηση των μπαταριών που θα εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του.

Λέξεις Κλειδιά: Αεροδυναμική σχεδίαση, UAV, CFD, ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκά

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα βασικά πλεονεκτήματα των μη-επανδρωμένων αεροχημάτων (unmanned aerial vehicles, ή UAVs), που απορρέουν κυρίως από την απουσία πληρώματος, είναι το μειωμένο κόστος λειτουργίας, η δυνατότητα επιχείρησης υπό αντίξοες συνθήκες, σε επικίνδυνα για τον άνθρωπο περιβάλλοντα, και η μεγαλύτερη αυτονομία. Ως προς το τελευταίο, ο χρόνος πτήσης ουσιαστικά περιορίζεται μόνο από τα διαθέσιμα καύσιμα, τα οποία αποτελούν μέχρι σήμερα την βασικότερη πηγή ενέργειας για τα αεροσκάφη, επανδρωμένα και μη.

Στα πλαίσια της γενικότερης προσπάθειας απεξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα, τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια ανάπτυξη και στην τεχνολογία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η ιδέα λοιπόν, για τη χρήση και εναλλακτικών πηγών ενέργειας, και κυρίως της ηλιακής, ως ενέργεια για την κίνηση και την λειτουργία των αεροσκαφών γίνεται όλο και πιο ρεαλιστική και οικονομικά συμφέρουσα. Η αρχή λειτουργίας ενός «ηλιακού αεροσκάφους» (solar aircraft) είναι η εξής: η ηλιακή ενέργεια δεσμεύεται την ημέρα από φωτοβολταϊκά, τα οποία τοποθετούνται στις πτέρυγες του αεροσκάφους, και αποθηκεύεται σε μπαταρίες, οι οποίες με τη σειρά τους τροφοδοτούν και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του οχήματος, και το σύστημα πρόωσης.

Έχοντας αναφέρει προηγουμένως τα πλεονεκτήματα των UAV, είναι κατανοητό ότι η χρήση ηλιακής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλη αύξηση της αυτονομίας. Πρόσθετα πλεονεκτήματα είναι επίσης οι μηδενικές εκπομπές ρύπων, το μειωμένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και η δυνατότητα επιχείρησης σε μεγαλύτερο υψόμετρο, όπως αναφέρει και ο [1]. Στα βασικά μειονεκτήματα των ηλιακών αεροσκαφών συγκαταλέγονται η εξάρτηση της απόδοσής τους από καιρικές συνθήκες (ρεύματα αέρα, σύννεφα) γεωγραφικό πλάτος και εποχή, ενώ η έλλειψη τεχνολογίας καθιστά την επιχείρηση σε μεγάλα υψόμετρα δύσκολη, καθώς οι κατασκευαστές συστημάτων ικανών να λειτουργήσουν υπό αντίξοες συνθήκες είναι περιορισμένοι [2].

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ο σχεδιασμός αεροσκάφους που θα χρησιμοποιεί τόσο ηλιακή ενέργεια, όσο και συμβατικά καύσιμα. Αξιοποιούνται έτσι κάποια από τα πλεονεκτήματα των ηλιακών UAV, ενώ η συμβατική πηγή ενέργειας εξασφαλίζει παράλληλα ομαλή λειτουργία και καλύτερες επιδόσεις. Παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία σχεδιασμού και διαστασιολόγησης και οι μέθοδοι εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με την ημέρα του έτους. Αναφορά γίνεται επίσης στο υβριδικό σύστημα πρόωσης, όπου παρουσιάζονται οι βασικές ιδέες/προτάσεις και στην επιλογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί ένα προσχέδιο, το οποίο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την κατασκευή ενός υβριδικού ή αμιγώς ηλιακού, UAV.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο σχεδιασμός ενός ηλιακού αεροσκάφους διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από ένα συνηθισμένο UAV. Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει το αντικείμενο, έχουν δημοσιευτεί πολλές μελέτες που περιγράφουν το σχεδιασμό ηλιακών UAV, είτε σε επίπεδο πρώιμης (conceptual design), είτε ολοκληρωμένης σχεδίασης ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]). Οι βασικές διαφορές στο σχεδιασμό μεταξύ ενός ηλιακού και ενός συμβατικού UAV είναι οι εξής:

- Η επιφάνεια αναφοράς S δεν επιλέγεται με βάση τις απαιτούμενες επιδόσεις του αεροσκάφους, αλλά με βάση την απαιτούμενη επιφάνεια των συλλεκτών, οι οποίοι καλύπτουν την κύρια πτέρυγα, σε ένα ποσοστό 90% της άνω επιφάνειάς της. Βασική απαίτηση είναι η ενέργεια που αποθηκεύεται κατά τη συλλογή, να υπερκαλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του οχήματος, για λειτουργία και κίνηση.



- Ο υπολογισμός του βάρους διαφέρει σημαντικά. Βασικοί λόγοι είναι η έλλειψη αποθηκευμένου καυσίμου και οι διαφορετικές δομικές απαιτήσεις (π.χ. φωτοβολταϊκά κύτταρα στις πτέρυγες, μεγαλύτερες μπαταρίες).
- Απόρροια των προηγούμενων είναι ότι και οι επιδόσεις ενός ηλιακού αεροσκάφους διαφέρουν από αυτές ενός συνηθισμένου UAV. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ταχύτητες πτήσης, οι οποίες λόγω της μεγάλης πτερυγικής επιφάνειας, είναι χαμηλότερες.

Λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσιάστηκαν και προηγουμένως (άμεση εξάρτηση των επιδόσεων από καιρικές συνθήκες, ημέρα και τόπο επιχείρησης, καθώς και έλλειψη προσιτής τεχνολογίας στην παγκόσμια αγορά) αποφασίστηκε σε πρώτη φάση ο σχεδιασμός ενός υβριδικού μη-επανδρωμένου αεροσκάφους, το οποίο θα λειτουργεί χρησιμοποιώντας τόσο συμβατικά καύσιμα όσο και ΑΠΕ. Έτσι, η διαδικασία πρώιμης σχεδίασης που θα αναλυθεί στη συνέχεια στηρίζεται στις βασικές μεθόδους της αεροναυτικής, όπως αυτές παρουσιάζονται από τους ([8], [9], [10]), ενώ παράλληλα εμπεριέχει στοιχεία από τις αντίστοιχες μεθόδους σχεδιασμού ηλιακών αεροσκαφών.

### 2.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για τις ανάγκες της μελέτης αυτής, έγινε μια λεπτομερής έρευνα όσον αφορά τα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που θα είναι διαθέσιμα στο αεροσκάφος για κάθε ημέρα του χρόνου. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα σημείο της γης είναι το υψόμετρο. Αυτή η επίδραση του υψομέτρου, οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη νεφώσεων στα κατώτερα τμήματα της τροπόσφαιρας η οποία όμως γίνεται όλο και ασθενέστερη με την αύξησή του. Τα αποτελέσματα ως προς την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας εξήχθησαν με χρήση του μοντέλου των Bailey και Bower [5] ιδανικό για υψόμετρα μεγαλύτερα των 2.5 km (8000 ft). Βασική παραδοχή αυτού του μοντέλου είναι ότι στην υπό μελέτη περιοχή δεν υπάρχει διακοπή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω νεφώσεων.

Η παραγόμενη ισχύς από μία εγκατάσταση φωτοβολταϊκών τυχαίου προσανατολισμού δίνεται από τη σχέση

$$P_{produced} = I_b n_{sc} S \cos(i) \quad (1)$$

όπου  $I_b [W/m^2]$  είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας,  $n_{sc}$  είναι ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών,  $S [m^2]$  είναι η επιφάνεια που καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και  $i$  είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια συλλογής (αναφέρεται στην κάθετη συνιστώσα της ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια).

Στην περίπτωση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στην πτέρυγα του ηλιακού μη-επανδρωμένου αεροσκάφους και δεδομένου ότι η πτήση θα διεξάγεται σε πολύ μικρές γωνίες προσβολής, μπορεί να θεωρηθεί ότι η επιφάνεια είναι επίπεδη. Για επίπεδες επιφάνειες ισχύει  $\sin(A) = \cos(i)$ , επομένως η σχέση 1 μπορεί να γραφεί και ως

$$P_{produced} = I_b n_{sc} S \sin(A) \quad (2)$$

όπου  $A$  είναι η γωνία ηλιακού ύψους (solar altitude angle), με

$$\sin(A) = \cos(D)\cos(H)\cos(L) + \sin(L)\sin(D) \quad (3)$$

Ως  $D$  [deg] ορίζεται η γωνία απόκλισης του ηλίου (declination angle), η οποία δίνεται από τη σχέση  $D = \left[ 23.5 \sin \left( 360 \frac{d}{365} \right) \right]^\circ$  με  $d$  την απόσταση σε ημέρες από την εαρινή ισημερία (20

Μαρτίου), ως  $H$  [deg] ορίζεται η ηλιακή ωρική γωνία (solar hour angle)  $H = \left( \frac{t}{24} \right) 360$  με  $t$  την διαφορά της ώρας υπολογισμού από το τις 12.00μ.μ. (π.χ. για τις 10 π.μ.  $t = 2$ ) και ως  $L$  [deg] ορίζεται το γεωγραφικό πλάτος.

Για τον υπολογισμό της ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας (atmospheric transmittance) όπου είναι ο λόγος της ακτινοβολίας που έχει διαπεράσει την ατμόσφαιρα μέχρι το σημείο ενδιαφέροντος ως προς την ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα.

$$T_{atm} = \frac{I_b}{I_o} \Leftrightarrow I_b = T_{atm} I_o \quad (4)$$

όπου  $I_o = 1353 \text{ [W/m}^2\text{]}$  είναι η μέση ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα.

Για την ατμοσφαιρική διαπερατότητα ισχύει επίσης

$$T_{atm} = 0.5 \left( e^{-0.65 m(z,A)} + e^{-0.095 m(z,A)} \right) \quad (5)$$

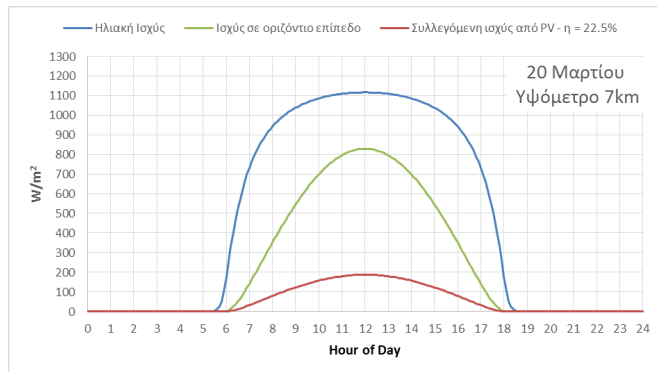
Το μέγεθος  $m(z, A)$  αναφέρεται στην μάζα του αέρα σε ένα συγκεκριμένο υψόμετρο  $z$  και συνδέεται με τους υπολογισμούς ως η ποσότητα του αέρα που θα πρέπει να διαπεράσει η ακτινοβολία ώστε να φτάσει στο σημείο ενδιαφέροντος. Η ποσότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί στο επίπεδο της θάλασσας ως

$$m(z = 0, A) = \sqrt{1229 + (614 \sin(A))^2} - 614 \sin(A) \quad (6)$$

και με χρήση της ατμοσφαιρικής πίεσης  $p(z)$ , σε οποιοδήποτε επιθυμητό υψόμετρο ως

$$m(z, A) = m(0, A) \left[ \frac{p(z)}{p(0)} \right] \quad (7)$$

Πλέον, με την χρήση της σχέσης (2) μπορεί να υπολογιστεί η ανά χρονική στιγμή παραγόμενη ισχύς από τις ηλιακές κυψέλες και με ολοκλήρωση της στην διάρκεια της ημέρας να προκύψει η ημερήσια παραγόμενη ισχύς.



Εικόνα 1. Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας.

Διευκρινίζεται πως η χρονική ολοκλήρωση γίνεται από την ανατολή έως την δύση του ηλίου οι οποίες σύμφωνα με το τρέχον μοντέλο δίνονται από τη σχέση

$$|H_{sr}| = |H_{ss}| = \cos^{-1}(-\tan(L)\tan(D)) \quad (8)$$

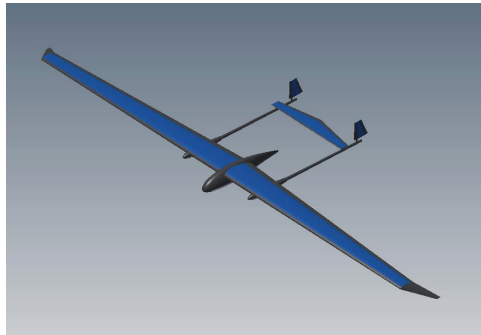
Στην εικόνα 1 παριστάνεται η διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας στο υψόμετρο πτήσης καθώς και πόση γίνεται διαθέσιμη μέσω των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών. Επιλέγεται βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών 22.5% όμοιος με αυτόν των φωτοβολταϊκών στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί στο SolarImpulse 2 [11]. Ο τελικός βαθμός απόδοσης του συστήματος θα είναι μικρότερος καθώς θα πρέπει να συμπεριληφθούν οι βαθμοί απόδοσης των μπαταριών, του ηλεκτροκινητήρα, της προπέλλας και των λοιπών εξαρτημάτων και συσκευών [1].

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας έγινε για τις 20 Μαρτίου, δηλαδή κατά την εαρινή ισημερία. Η περίοδος αυτή κρίθηκε καταλληλότερη για τη διαστασιολόγηση του αεροσκάφους καθώς τότε λαμβάνουμε τη μέση ηλιακή ισχύ κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνεται αυξομείωση του ποσού του καυσίμου ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία μέσα στο έτος, λιγότερο καύσιμο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και περισσότερο κατά τους χειμερινούς, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή αυτονομία (2.2).

## 2.2. ΠΡΩΙΜΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ (CONCEPTUAL DESIGN)

Στο πεδίο της αεροναυτικής ο σχεδιασμός χωρίζεται σε τρεις φάσεις, τον πρώιμο (conceptual), τον προκαταρκτικό (preliminary) και τον λεπτομερή (detail) σχεδιασμό [10]. Αρχικά αναγνωρίζονται και καταρτίζονται οι απαιτήσεις της αποστολής (mission requirements) την οποία το αερόχημα θα κληθεί να εκτελέσει. Έπειτα, με βάση τις απαιτήσεις αυτές, καθορίζεται η βασική διαμόρφωση (configuration layout) του αεροσκάφους, πραγματοποιούνται εκτιμήσεις των βασικών παραμέτρων (π.χ. βάρος, διαστάσεις) και υπολογίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του, όσον αφορά την αεροδυναμική και τις επιδόσεις του. Αυτά τα πρώτα στάδια συντελούν ουσιαστικά την πρώιμη σχεδίαση.

Οι βασικές απαιτήσεις καταρτίστηκαν σε συνεργασία με την Intracom Defense Electronics και ορίζουν μεταξύ άλλων ως βάρος του εξοπλισμού τα 50kg, ως αυτονομία τις 48 ώρες και ως υψόμετρο πτήσης τα 23,000ft (7,000m). Στόχος του είναι η διεξαγωγή αποστολών επιτήρησης θαλάσσιου περιβάλλοντος και ακτογραμμών με δυνατότητα επιχείρησης ημέρα και νύχτα.



Εικόνα 2. 3DCAD μοντέλο του αεροσκάφους.

Για την διαμόρφωση του αεροσκάφους εξετάστηκαν ενδελεχώς πολλές επιλογές, λαμβάνοντας υπόψη και προηγούμενες κατασκευές ηλιακών αεροχημάτων. Τελικά, επελέγη η διάταξη της εικόνας 2.

Για την διαστασιολόγηση και τον υπολογισμό των βασικών παραμέτρων του οχήματος αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών ένα εργαλείο, το οποίο συνδυάζει στοιχεία από τις μεθοδολογίες τόσο των συμβατικών, όσο και των ηλιακών αεροσκαφών. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Οι υπολογισμοί ξεκίνησαν με μια πρώτη εκτίμηση του βάρους του αεροσκάφους. Το μέγιστο βάρος υπολογίζεται στην αρχή της αποστολής ενός αεροχήματος (gross takeoff weight ή GTOW) και σε ένα μη-επιανδρωμένο αεροσκάφος αποτελείται από τα επιμέρους βάρη του φορτίου (payload), του καυσίμου (fuel) και της κατασκευής (empty). Δηλαδή

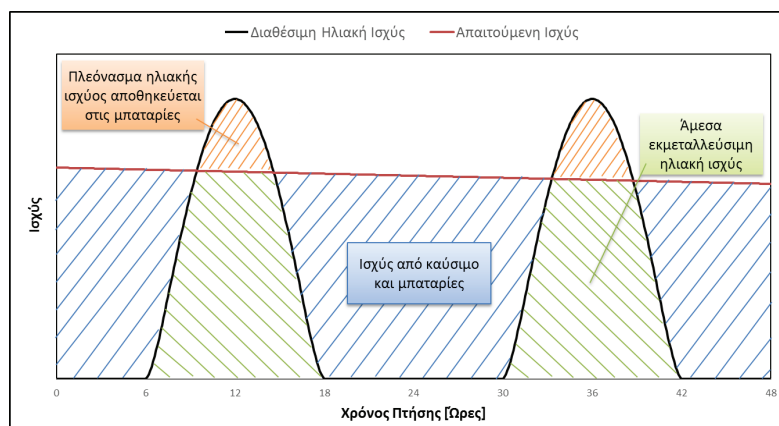
$$W_0 = W_p + W_g + W_f \quad (9)$$

Το φορτίο σε ένα UAV είναι ουσιαστικά ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός (υπολογιστές, κάμερες κλπ.) που απαιτείται, προκειμένου το αεροσκάφος να εκτελέσει την αποστολή του. Το βάρος του συνήθως καθορίζεται από τις απαιτήσεις και θεωρείται γνωστό κατά την διαδικασία διαστασιολόγησης. Το βάρος κατασκευής είναι το απόβαρο του οχήματος, και στις πρώτες φάσεις σχεδιασμού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας στατιστικά δεδομένα από ήδη υπάρχοντα αεροσκάφη ([8], [12]). Για τον υπολογισμό του βάρους του καυσίμου η αποστολή του αεροσκάφους χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, και στη συνέχεια, υπολογίζεται το ποσό του καυσίμου που απαιτείται για την ολοκλήρωση του κάθε τμήματος, είτε χρησιμοποιώντας στατιστικά στοιχεία, είτε αναλυτικούς υπολογισμούς [10]. Σημειώνεται ότι σε αυτό το σημείο δεν συμπεριλήφθηκε η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών, επομένως η τιμή του βάρους καυσίμου, και κατά συνέπεια και του συνολικού βάρους, αποτελεί υπερεκτίμηση του τελικού.

Επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός των βασικών αεροδυναμικών παραμέτρων του οχήματος, όπως είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας και τα χαρακτηριστικά της αεροτομής. Η επιλογή των παραμέτρων αυτών έγινε με βάση τις τάσεις και τους περιορισμούς που διέπουν το σχεδιασμό των ηλιακών αεροσκαφών. Για την κύρια πτέρυγα λοιπόν, επιλέχθηκε η αεροτομή Wortmann FX 63-137 [13], λόγω τόσο των καλών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της, όσο και της μικρής καμπυλότητας της άνω επιφάνειάς της (πλευρά αναρρόφησης), χαρακτηριστικό που διευκολύνει την ομαλότερη εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Επιπλέον, επιλέχθηκαν κατάλληλος λόγος εγκλεισμού και διάταμα (πίνακας 1), για βελτιωμένη αεροδυναμική συμπεριφορά, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία των ηλιακών αεροσκαφών [4].

Στη συνέχεια, ακολούθησε μια εκτίμηση των δυο πιο σημαντικών παραμέτρων απόδοσης, της πτερυγικής επιφάνειας (S) και της ιπποδύναμης (hp). Η ιπποδύναμη εκτιμήθηκε μέσω του λόγου hp/W θέτοντας κατάλληλους περιορισμούς που αφορούν τις επιδόσεις του αεροσκάφους, όπως έχουν καθοριστεί από τις απαιτήσεις. Όσον αφορά την πτερυγική επιφάνεια, η οποία εκτιμάται μέσω του λόγου W/S, έγινε ένας συμβιβασμός μεταξύ απαιτούμενης συλλεκτικής επιφάνειας και βέλτιστης απόδοσης. Το τελικό αποτέλεσμα του λόγου είναι μεταξύ των τυπικών τιμών των συμβατικών και των ηλιακών αεροσκαφών.

Για την εκτίμηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του αεροσκάφους, έγινε χρήση τόσο αναλυτικών μεθόδων, όσο και υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Οι αναλυτικές μέθοδοι παρουσιάζονται στον [9]. Για τους υπολογισμούς CFD σχεδιάστηκε τρισδιάστατο CAD μοντέλο, και με χρήση του μοντέλου τύρβης Spalart-Allmaras [14], έγινε επίλυση του ροϊκού πεδίου σε ένα μεγάλο εύρος γωνιών προσβολής (από  $-8^\circ$  έως  $20^\circ$ ), ώστε να μοντελοποιηθεί και η απώλεια στήριξης (πίνακας 1, εικόνα 6). Οι συνθήκες μοντελοποίησης αντιστοιχούν στη φάση της επιτήρησης (ταχύτητα 80 km/h, ύψος πτήσης 7,000 m), που αποτελεί και το μεγαλύτερο κομμάτι της αποστολής. Προκύπτει έτσι ένας αριθμός Reynoldsίσης με  $1.25 \cdot 10^6$ , με βάση τη μέση αεροδυναμική χορδή. Σε μεγάλες γωνίες προσβολής οι αναλυτικοί υπολογισμοί δεν προβλέπουν τα φαινόμενα απώλεια στήριξης και οδηγούν σε λάθος αποτελέσματα, ωστόσο στην γραμμική περιοχή οι δυο μέθοδοι είναι σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους (εικόνα 6).



Εικόνα 3. Ενεργειακή απεικόνιση πτήσης

Έπειτα, ακολούθησε ένας έλεγχος των επιδόσεων του αεροσκάφους με βάση τις μεθόδους που παρουσιάζονται στους ([8], [10]) για να πιστοποιηθεί η δυνατότητα του αεροσκάφους να εκτελέσει την αποστολή για την οποία σχεδιάστηκε.

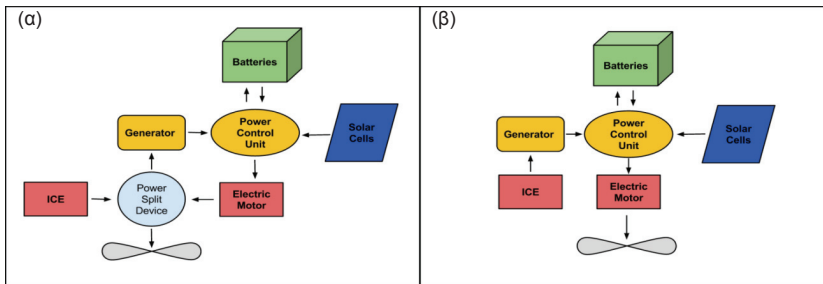
Τέλος, πραγματοποιήθηκε ένας πιο λεπτομερής υπολογισμός βάρους, λαμβάνοντας αυτή τη φορά υπόψη και την συνεισφορά της ηλιακής ακτινοβολίας (εικόνα 3). Η απαιτούμενη, για την κίνηση του αεροσκάφους, ισχύς προέκυψε με βάση τους αεροδυναμικούς συντελεστές, που υπολογίστηκαν προηγουμένως, ενώ η ισχύς του εξοπλισμού εκτιμήθηκε με βάση ήδη υπάρχοντα συστήματα. Προέκυψε έτσι το νέο βάρος καυσίμου, ενώ έγινε και μια πρώτη διαστασιολόγηση των μπαταριών, με βάση τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.4. Για το απόβαρο της κατασκευής μελετήθηκαν οι αναλυτικές σχέσεις των ([3], [4]), ωστόσο κρίθηκαν μη αξιόπιστες, λόγω μεγάλης απόκλισης στα μεταξύ τους αποτελέσματα. Επιλέχθηκε λοιπόν, η μεθοδολογία του [8], προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες ενός ηλιακού συστήματος (μειωμένη ποσότητα καυσίμου, αυξημένο βάρος μπαταριών κτλ). Ακολούθησε επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία οι συνθήκες πτήσης (π.χ. ταχύτητα) προσαρμόζονταν στο, μειωμένο σε κάθε βήμα, βάρος του UAV, ορίζοντας έτσι εκ νέου την απαιτούμενη ενέργεια πτήσης. Σημειώνεται ότι στο τελευταίο βήμα η ποσότητα καυσίμου σε σχέση με ένα συμβατικό αεροσκάφος υπολογίστηκε μειωμένη κατά 50% για την χρονική περίοδο υπολογισμού (ισημερία).

### 2.3. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΩΣΗΣ

Το σύστημα πρόωσης του μη-επανδρωμένου αεροσκάφους θα είναι υβριδικό και θα συνδυάζει την λειτουργία ηλεκτροκινητήρα και μηχανής εσωτερικής καύσης. Τα πιθανά σενάρια ως προς την διάταξη των κινητήρων είναι:

- Ανεξάρτητη λειτουργία ηλεκτροκινητήρων και μηχανής εσωτερικής καύσης. Κεντρικά τοποθετείται μια προπέλα η οποία θα παίρνει ισχύ από την μηχανή εσωτερικής καύσης, ενώ θα υπάρχουν δεξιά και αριστερά δύο (για λόγους συμμετρίας) μικρότερες συνδεδεμένες με έναν ηλεκτροκινητήρα η κάθε μία.
- Συνδυασμένη λειτουργία ηλεκτροκινητήρα και μηχανής εσωτερικής καύσης. Χρήση μίας προπέλας για την πρόωση του σκάφους. Πιθανοί τρόποι διάταξης (εικόνα 4):

- ο Σύνδεση των κινητήρων σε σειρά (Series Hybrid System) όπου ο ηλεκτροκινητήρας δίνει ισχύ στην προπέλα ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης μέσω μιας γεννήτριας παράγει το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα (λειτουργία ηλεκτροκινητήρα/φόρτιση μπαταριών)
- ο Συνδυασμένη παροχή ισχύς στην προπέλα με σύνδεση των κινητήρων κατά το πρότυπο Series/Parallel Hybrid System με χρήση πλανητικού διαφορικού συστήματος (Power-Split Device). Τον κύριο ρόλο έχει ο ηλεκτροκινητήρας με συνεισφορά της μηχανής εσωτερικής καύσης στις υψηλές στροφές και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4. Παραδείγματα υβριδικών διατάξεων α) μεικτό σύστημα β) σε σειρά.

#### 2.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Η επιλογή κατάλληλων φωτοβολταϊκών αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι στα ηλιακά αεροσκάφη. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν εκείνα τα φωτοβολταϊκά κύτταρα με τον καλύτερο συνδυασμό βάρους – απόδοσης ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Η επιστήμη των φωτοβολταϊκών γνωρίζει τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη άνθηση καθώς παρατηρείται συνεχής βελτίωση του βαθμού απόδοσης των κυττάρων[15].

Στα πλαίσια του πρώιμου σχεδιασμού του υβριδικού ηλιακού μη-επανδρωμένου αεροσκάφους επιλέχθηκαν για χρήση κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Monocrystalline Silicon) καθώς τέτοια έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε υπάρχουσες εφαρμογές ([11], [16]). Αυτή τη στιγμή υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμα monoSi κύτταρα με βαθμό απόδοσης 22.5% και δεδομένης της αρνητικής εξάρτησης του βαθμού απόδοσης από την θερμοκρασία, στο υψόμετρο πτήσης (7 km ) μπορούμε να πετύχουμε ακόμα υψηλότερο βαθμό απόδοσης λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας ( -30 °C ) [11].

Επίσης, για να μπορέσει να γίνει σωστή εγκατάσταση των κυττάρων στην επιφάνεια της πτέρυγας θα πρέπει αυτά να έχουν αντοχή στην κάμψη δεδομένου ότι η επιφάνεια τοποθέτησής τους δεν είναι πλέον επίπεδη αλλά ακολουθεί συγκεκριμένη καμπυλότητα.

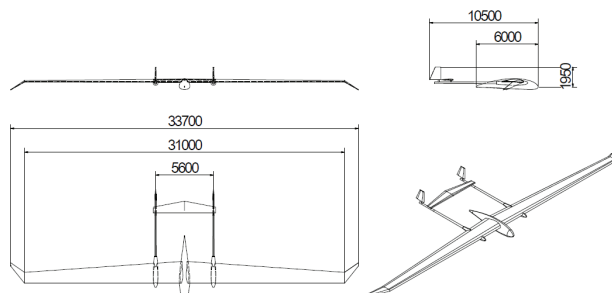
Η επιλογή των μπαταριών γίνεται με βάση την ενεργειακή πυκνότητά τους. Οι μπαταρίες με την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα που έχουν ως τώρα χρησιμοποιηθεί σε ηλιακό αεροσκάφος είναι αυτές του Zephyr με ενεργειακή πυκνότητα [4].

Για την βέλτιστη λειτουργία, θα πρέπει στο αεροσκάφος να υπάρχουν μπαταρίες ικανές να αποθηκεύσουν το πλεόνασμα ενέργειας που δημιουργείται κατά τις μεσημβρινές ώρες όταν και

η ακτινοβολία βρίσκεται στα μέγιστα επίπεδα. Δεδομένης της ανάγκης το αεροσκάφος να μπορεί να επιχειρεί καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, η διαστασιολόγηση των μπαταριών θα βασιστεί στο πλεόνασμα ενέργειας που δημιουργείται κατά το θερινό ηλιοστάσιο (20 – 21 Ιουνίου) αφού τότε λαμβάνουμε την μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά το υβριδικό ηλιακό UAV. Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η εξωτερική γεωμετρία και βασικές διαστάσεις του αεροσκάφους.



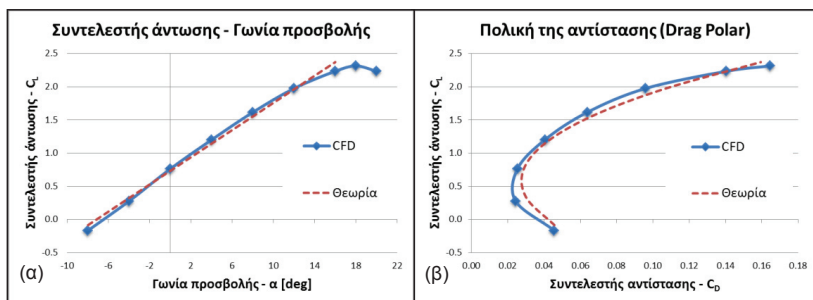
Εικόνα 5. Σχέδια του υβριδικού αεροσκάφους, μετά το τέλος του conceptual design.

Το αεροσκάφος που σχεδιάστηκε, ικανοποιεί τις αρχικές απαιτήσεις, όπως αυτές διαμορφώθηκαν κατά τα πρώτα στάδια της σχεδίασης. Από αεροδυναμικής άποψης, είναι ικανό να εκτελέσει τις αποστολές που ορίζουν οι απαιτήσεις, ενώ από ενεργειακή σκοπιά, πρόκειται για καινοτόμο σύστημα, αφού η λειτουργία του στηρίζεται τόσο σε συμβατικές, όσο και σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

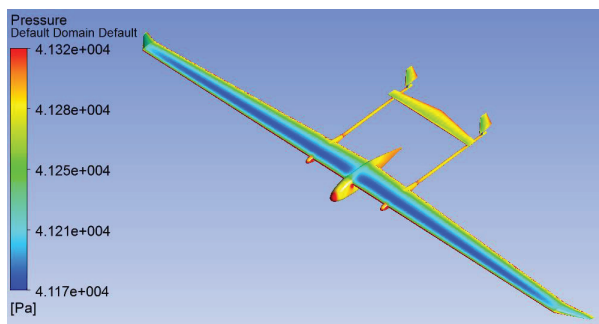
Στον πίνακα 1 καταγράφονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του UAV, ενώ στην εικόνα 6 παρουσιάζονται οι βασικοί αεροδυναμικοί συντελεστές, άνωσης και αντίστασης. Τέλος, στην εικόνα 7 παρουσιάζεται η κατανομή των πιέσεων στην επιφάνεια του UAV, όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς CFD.

Πίνακας 1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του υβριδικού UAV			
Συνολικό βάρος	370 kg	Επιφάνεια αναφοράς	50 m <sup>2</sup>
Βάρος εξοπλισμού	50 kg	Εκπέτασμα	31 m
Βάρος μπαταριών	45 kg	Διάταμα	19.22
Υψόμετρο επιχείρησης	7,000 m	Μέση αεροδυναμική χορδή	1.67 m
Αυτονομία πτήσης	48 h	Χορδή στη ρίζα της πτέρυγας	2.15 m
Ταχύτητα πτήσης	80 km/h	Λόγος εγκλεισμού	0.5
Ελάχιστη ταχύτητα (stall)	30 km/h	Αεροτομή κύριας πτέρυγας	FX 63-137

Σημειώνεται ότι στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων με αυτά της θεωρίας, όπου φαίνεται η σχετική ταύτιση των δυο μεθόδων, όπως προαναφέρθηκε.



Εικόνα 6. Αεροδυναμικοί συντελεστές. α) συντελεστής άντωσης ως συνάρτηση της γωνίας προσβολής, β) συντελεστής άντωσης ως συνάρτηση του συντελεστή αντίστασης



Εικόνα 7. Κατανομή πιέσεων στην επιφάνεια του αεροσκάφους, για γωνία προσβολής 0°

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, αναπτύχθηκε μια διαδικασία πρώιμου σχεδιασμού ενός υβριδικού ιπτάμενου συστήματος. Παρουσιάστηκαν τα βασικά στάδια της διαστασιολόγησης, συμπεριλαμβανομένης και της μεθοδολογίας εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ έγινε αναφορά στην διάταξη του υβριδικού συστήματος πρόωσης και στην επιλογή των φωτοβολταϊκών και των μπαταριών. Το εργαλείο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαστασιολόγηση τόσο υβριδικών, όσο και αμιγώς ηλιακών αεροσκαφών.

Κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας, περισσότερη βαρύτητα δόθηκε στην ενεργειακή προσέγγιση του προβλήματος, ώστε να αποτιμηθούν τα οφέλη από τη χρήση ΑΠΕ. Πράγματι, για την περίοδο σχεδιασμού (ισσημερία) προκύπτει αξιοσημείωτη εξοικονόμηση καυσίμου (50%). Ωστόσο, προκειμένου το μοντέλο να γίνει πλήρες, θα πρέπει σε επόμενη φάση να ενσωματωθεί μια πιο λεπτομερής μέθοδος υπολογισμού του βάρους κατασκευής.

Τέλος, σημαντική παρατήρηση, που απορρέει και από τα αποτελέσματα αυτής της δουλειάς, είναι ότι στον τομέα των ηλιακών αεροσκαφών υπάρχουν πολύ μεγάλα περιθώρια βελτίωσης, κυρίως όσον αφορά τα συστήματα δέσμησης και αποθήκευσης ενέργειας (βελτίωση απόδοσης, μείωση βάρους κτλ.). Μελλοντικές καινοτομίες στους τομείς αυτούς θα επιτρέψουν καθιερώσουν την ηλιακή ως μια βασική πηγή ενέργειας τόσο στα μη- όσο και στα επανδρωμένα αεροσκάφη.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] S. Jashnani, T.R. Nada, M. Ishfaq, A. Khamker, P. Shaholia, Sizing and preliminary hardware testing of solar powered UAV, Egypt. J. Remote Sens. Space Sci. 16 (2013) 189–198. doi:10.1016/j.ejrs.2013.05.002.
- [2] B.S. de Mattos, N.R. Secco, E.F. Salles, Optimal Design of a High-altitude Solar-Powered Unmanned Airplane, J. Aerosp. Technol. Manag. 5 (2013) 349–361. doi:10.5028/jatm.v5i3.223.
- [3] A. Noth, Design of solar powered airplanes for continuous flight, PhD Thesis, ETH, 2008.
- [4] M. Hajianmaleki, Conceptual design method for solar powered aircrafts, in: 49th AIAA Aerosp. Sci. Meet. New Horiz. Forum Aerosp. Expo., 2011.
- [5] M.D. Bailey, M.V. Bower, High altitude solar power platform, National Aeronautics and Space Administration, 1992, NASA TM-103578.
- [6] M.R. Bhatt, Solar power Unmanned Aerial Vehicle: High Altitude Long Endurance applications (HALE-SPUAV), San Jose State University, 2012.
- [7] Y. Najafi, Design of a high altitude long endurance solar powered UAV - Solar Powered Aerial Communicator (SPACOM), Master Thesis, San Jose State University, 2011.
- [8] D.P. Raymer, Aircraft Design: A Conceptual Approach, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 2012.
- [9] J. Roskam, Airplane flight dynamics and automatic flight controls, DARcorporation, Lawrence, Kansas, 2003.
- [10] J.D. Anderson, Aircraft performance and design, WCB/McGraw-Hill, Boston, Mass., 1999.
- [11] SunPower E20/327 Solar Panel Datasheet, <http://global.sunpower.com/products/solar-panels> (accessed September 1, 2014).
- [12] A. Sóbester, A.J. Keane, J. Scanlan, N.W. Bressloff, Conceptual design of uav airframes using a generic geometry service, AIAA InfotechAerosp. (2005) 26–29.
- [13] F.X. Wortmann, D. Althaus, Stuttgarter Profil katalog, Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1981.
- [14] P.R. Spalart, S.R. Allmaras, A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, in: 30th Aerosp. Sci. Meet. Exhib., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno, NV, 1992: pp. 5–21.
- [15] NREL, Natl. Cent. Photovolt. Natl. Renew. Energy Lab. NREL, <http://www.nrel.gov/ncpv> (accessed September 1, 2014).
- [16] Solar Impulse Datasheet, [http://www.solarimpulse.com/pdf/hb-sia/hb-sia\\_en.pdf](http://www.solarimpulse.com/pdf/hb-sia/hb-sia_en.pdf) (accessed September 1, 2014).



## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ/ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ

I. Καραθανάσης<sup>1,2,\*</sup>, Η. Παπανικολάου<sup>1</sup>, Β. Μπελεσιώτης<sup>1</sup>, Γ. Μπεργελές<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»,  
15310 Αγία Παρασκευή Αττικής. \*e-mail: [ikarathanassis@ipta.demokritos.gr](mailto:ikarathanassis@ipta.demokritos.gr)

<sup>2</sup>Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος, Σχολή  
Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15710 Ζωγράφος Αττικής.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού και αξιολόγησης της απόδοσης ενός γραμμικού παραβολικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συστήματος που έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμού νερού. Η επιφάνεια παραθύρου του συστήματος είναι ίση με  $1.0\text{m}^2$ , ενώ η ενεργός επιφάνεια του απορροφητή είναι ίση με  $(0.5 \times 0.06)\text{m}^2$  και συνεπώς ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης του συστήματος ισούται με 33. Εξετάστηκαν συνολικά δύο παραλλαγές του συστήματος, όπου στην μεν πρώτη ο απορροφητής αποτελείται από πάνελ ηλιακών κυψελών ενεργού πλάτους  $40.0\text{mm}$  και ψυκτική διάταξη που φέρει ευθεία μικρο-κανάλια ( $D_{h,1}=0.966\text{mm}$ ), ενώ στη δεύτερη παραλλαγή του απορροφητή το πάνελ αποτελείται από κυψέλες ενεργού πλάτους  $60.0\text{mm}$  και ψυκτική διάταξη που φέρει κανάλια, η υδραυλική διάμετρος των οποίων μειώνεται με κλιμακωτό τρόπο κατά το μήκος της διάταξης ( $D_{h,1}=7.013\text{mm}$ ,  $D_{h,2}=3.533\text{mm}$ ,  $D_{h,3}=1.064\text{mm}$ ). Η οπτική απόδοση του παραβολικού κατόπτρου αξιολογήθηκε πειραματικά και υπολογιστικά μέσω της μεθόδου «ιχνηλάτησης ακτίνων», ώστε να προσδιοριστεί η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή και οι οπτικές απώλειες λόγω της απόκλισης στο σχήμα του πλαισίου από τη γεωμετρική παραβολή. Ο «παράγοντας αποδοχής» (intercept factor) του απορροφητή υπολογίστηκε ίσος με 0.57. Επιπροσθέτως, αξιολογήθηκε πειραματικά η απόδοση των ηλιακών κυψελών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και πιο συγκεκριμένα η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στην απόδοσή τους, ώστε να προσδιορισθεί η παράμετρος θερμοκρασίας ( $\beta$ ) των φωτοβολταϊκών πánελ. Η απόδοση των ψυκτικών διατάξεων εξετάστηκε με κριτήρια τη θερμοκή αντίσταση και την πτώση πίεσης που προκαλούν στο ψυκτικό μέσο. Διαπιστώθηκε ότι η ψύκτρα με ευθεία κανάλια επιτυγχάνει τιμές της θερμοκή αντίστασης έως και  $0.0069\text{K/W}$  για παροχή του ψυκτικού ίση με  $40\text{mL/s}$ , οι οποίες είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με την αντίστοιχες για την ψύκτρα με κλιμακωτά κανάλια. Αντιθέτως, η πτώση πίεσης του ψυκτικού στη διάταξη με κλιμακωτά κανάλια είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη για την ψύκτρα με ευθεία κανάλια. Όσον αφορά την απόδοση των ολοκληρωμένων συστημάτων, τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι τόσο το σύστημα με ηλιακές κυψέλες πλάτους  $40.0\text{mm}$  και ψύκτρα με ευθεία κανάλια όσο και το σύστημα με κυψέλες πλάτους  $60.0\text{mm}$  και ψύκτρα με κλιμακωτά κανάλια παρουσιάζουν παρεμφερείς συνολικούς βαθμούς απόδοσης της τάξης του 50% με ασθενή εξάρτηση από τη θερμοκρασία λειτουργίας.

Λέξεις Κλειδιά: συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία, φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα, συμπαραγωγή, ενεργητική ψύξη, μικρο-κανάλια.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

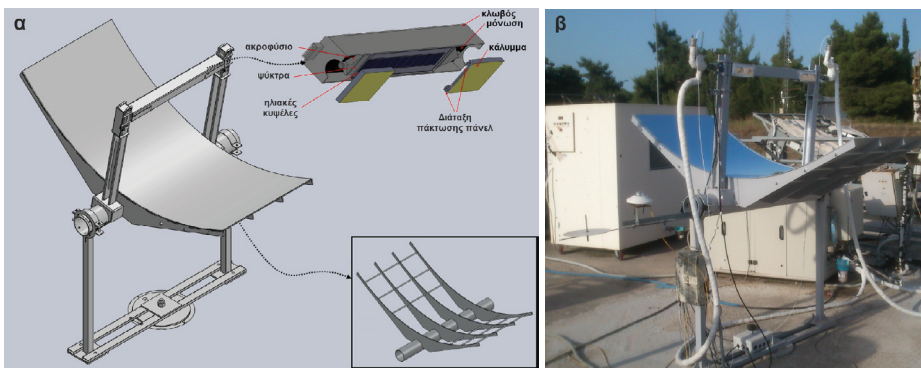
Τα φωτοβολταϊκά/θερμικά υβριδικά συστήματα έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας και εάν συνδυαστούν με διατάξεις συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλούς ολικούς βαθμούς απόδοσης της τάξης του 60-70%. Οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συστήματος είναι η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία των ηλιακών κυψελών [1]. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα για κατάλληλο σύστημα ψύξης, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία των κυψελών υπό υψηλή συγκέντρωση ακτινοβολίας, χωρίς να αναπτύσσονται ακραίες θερμοκρασίες στην επιφάνειά τους. Τα επίπεδα φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες ως προς τη λειτουργία και την κατασκευή τους με τους απλούς επίπεδους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να έχει παρουσιαστεί και αξιολογηθεί ένας σημαντικός αριθμός πρωτότυπων διατάξεων. Ένα σημαντικό αριθμός πρωτότυπων σχεδίων επίπεδων φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων μπορούν να βρεθούν στα άρθρα των Chow [2] και Charalambous et al. [3]. Αντιθέτως, όσον αφορά τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα, όπου η κατασκευή παρουσιάζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, καθώς ο συλλέκτης αποτελείται από διακριτές επιμέρους συνιστώσες, τα πρωτότυπα σχέδια που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία είναι περιορισμένα.

Ο Coventry [4] αξιολόγησε την απόδοση ενός παραβολικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συλλέκτη, όπου η διάταξη απαγωγής θερμότητας (ψύκτρα), επάνω στην οποία είναι κολλημένες κυψέλες πυριτίου μέσω εποξικής ρητίνης, αποτελείται από μια πλάκα και έναν αγωγό αλουμινίου με εσωτερικά πτερύγια, ώστε να ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας. Το σύστημα αναφέρεται ότι επιτυγχάνει θερμική και ηλεκτρική απόδοση ίση με 58% και 11% αντίστοιχα για παροχή του ψυκτικού της τάξης των 40 mL/s. Οι Li et al. [5] αξιολόγησαν πειραματικά ένα σύστημα με παρόμοια γεωμετρία και σύστημα ψύξης με αυτά που αναφέρονται στο [4], στο οποίο όμως χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες GaAs στον απορροφητή. Ο μέγιστος συνολικός βαθμός απόδοσης που μετρήθηκε ήταν ίσος με 50.6%. Οι Chemisana et al. [6] πρότειναν ένα πρωτότυπο σύστημα γραμμικής εστίασης, όπου η ακτινοβολία συγκεντρώνεται μέσω ενός ακίνητου φακού Fresnel, ενώ η παρακολούθηση του ήλιου γίνεται μέσω της γραμμικής κίνησης του απορροφητή. Οι Rossell et al. [7] κατασκεύασαν και αξιολόγησαν ένα σύστημα γραμμικής εστίασης με ανακλαστικές τύπου Fresnel και παρακολούθηση του ήλιου σε δύο άξονες. Ένας ορθογωνικός αγωγός εντός του οποίου έρεε νερό χρησιμοποιήθηκε ως ψυκτική διάταξη. Ο ημερήσιος θερμικός βαθμός απόδοσης του συστήματος, χωρίς παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ήταν της τάξης του 60%. Οι Vivar et al. [8] παρουσίασαν ένα σύστημα γραμμικής εστίασης, όπου συστοιχίες από ανακλαστικές τύπου Fresnel συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία επάνω σε δύο απορροφητές, με την όλη διάταξη (ανακλαστικές και απορροφητές) να βρίσκεται εντός προστατευτικού κλωβού με αποτέλεσμα το σύστημα εξωτερικά να προσομοιάζει έναν επίπεδο συλλέκτη. Απλοί κυλινδρικοί σωλήνες χρησιμοποιήθηκαν για την ψύξη των κυψελών με νερό. Η μέση ημερήσια απόδοση του συστήματος μετρήθηκε ίση με 58% (50% θερμική – 8% ηλεκτρική). Τέλος, οι Chaabane et al. [9] κατασκεύασαν ένα σύστημα γραμμικής εστίασης με ασύμμετρους ανακλαστικές τύπου «σύνθετης» (compound) παραβολής. Το σύστημα είχε θερμική και ηλεκτρική απόδοση ίση με 16% και 10%, αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας κυψέλες πυριτίου θερμικά συζευγμένες με έναν ορθογωνικό αγωγό.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού και πειραματικής αξιολόγησης ενός πρωτότυπου παραβολικού φωτοβολταϊκού/θερμικού συστήματος, καθώς και των επιμέρους συνιστωσών του. Αρχικά εξετάζεται η οπτική ποιότητα του συστήματος συγκέντρωσης και προσδιορίζεται η κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή. Στη συνέχεια αξιολογείται η απόδοση των ηλιακών κυψελών και της ψυκτικής διάταξης. Τέλος, προσδιορίζεται η συνολική απόδοση του ολοκληρωμένου συστήματος.

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ / ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα υπό διερεύνηση αποτελείται από τρεις διακριτές συνιστώσες: τη διάταξη συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, τη συστοιχία ηλιακών κυψελών και το ενεργητικό σύστημα ψύξης (Εικ. 1α). Το υποστηρικτικό πλαίσιο της στοιχειώδους μονάδας (module) του συστήματος (Εικ. 1β), το οποίο λειτουργεί ως διάταξη συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση ενός φύλλου ανοδιωμένου αλουμινίου υψηλής ανακλαστικότητα (95%), έχει ενεργή επιφάνεια παραθύρου ίση με  $1.0 \text{ m}^2$  και επιτρέπει την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου σε δύο άξονες. Στην εστιακή γραμμή του συστήματος βρίσκονται εντός θερμικά μονωμένου κλωβού μια συστοιχία (πάνελ) ηλιακών κυψελών σε θερμική σύζευξη με κατάλληλη συσκευή απαγωγής της πλεονάζουσας θερμότητας (ψύκτρα). Για την προσαγωγή και απαγωγή του ψυκτικού ρευστού (νερό) από την ψύκτρα σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ακροφύσια κατάλληλης γεωμετρικής διαμόρφωσης. Η ενεργή επιφάνεια του απορροφητή είναι ίση με  $(0.06 \times 0.5) \text{ m}^2$  και συνεπώς ο γεωμετρικός δείκτης συγκέντρωσης του συστήματος προκύπτει ίσος με 33. Οι ηλιακές κυψέλες είναι κατασκευασμένες από πυρίτιο και έχουν ειδική σχεδίαση των μεταλλικών αγωγών στην ενεργό επιφάνειά τους, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση της υψηλής πυκνότητας ρεύματος που προκύπτει εξαιτίας της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Για την πειραματική διερεύνηση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο ηλιακά πάνελ με κυψέλες πλάτους 40.0mm και 60.0mm αντίστοιχα, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της ενεργού επιφάνειας των κυψελών στην απόδοση του συστήματος. Την ενεργητική ψύξη των κυψελών επιτελεί μια ψύκτρα ορθογωνικής διατομής κατασκευασμένη από αλουμίνιο, η οποία φέρει σειρά από κανάλια ορθογωνικής διατομής, εντός των οποίων ρέει νερό. Κατά την πειραματική διερεύνηση, αξιολογήθηκαν δύο διαμορφώσεις της ψύκτρας, με ευθύγραμμο και κλιμακωτά κανάλια αντίστοιχα, όπως θα συζητηθεί εκτενέστερα στην παράγραφο 4. Για την κόλληση της ψύκτρας στο πάνελ χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη θερμοαγωγίμη ρητίνη ( $k=4.5 \text{ W/mK}$ ).



Εικόνα 1: Το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα υπό διερεύνηση: (α) Τρισδιάστατο σχέδιο CAD, (β) πραγματική διάταξη.

## 3. ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

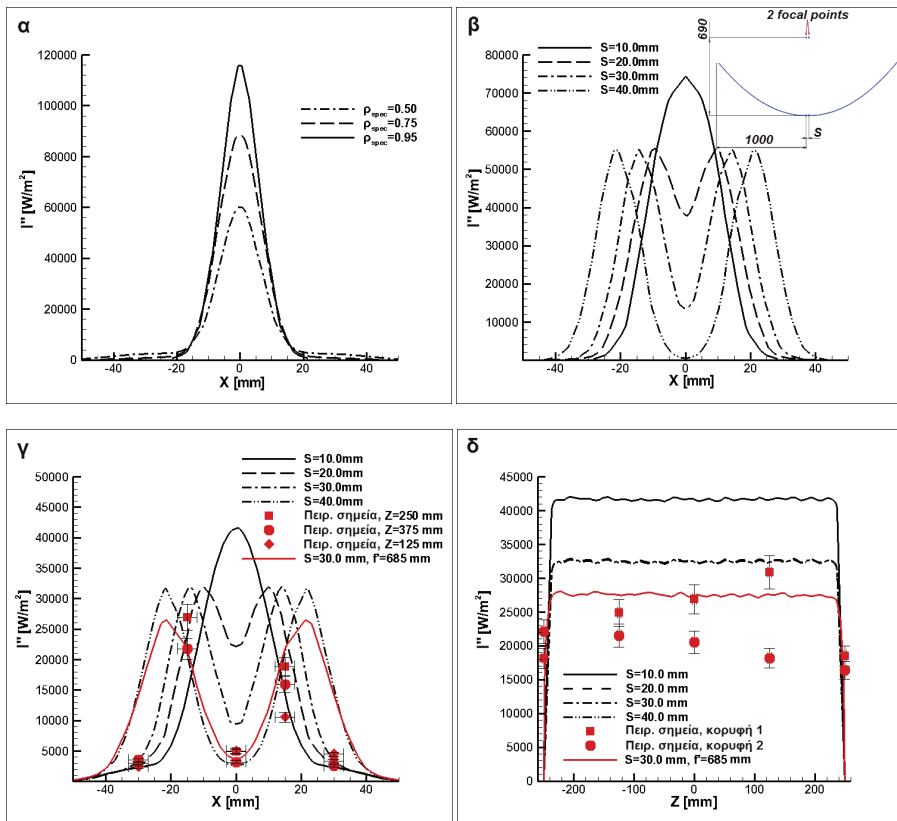
Η ποιότητα του γεωμετρικού σχήματος του παραβολικού πλαισίου αξιολογήθηκε μέσω κατάλληλης μετρητικής διάταξης, η οποία κατασκευάστηκε γι' αυτό το σκοπό και φέρει πλέγμα αισθητήριων (φωτοдиодών Vishay BPW-34), τα οποία παράγουν συνεχές ρεύμα ανάλογο της ακτινοβολίας. Μέσω της συγκεκριμένης διάταξης προσδιορίστηκε η ανομοιομορφία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή καθώς και ο επιτυγχανόμενος δείκτης συγκέντρωσης. Τα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με υπολογιστικές προβλέψεις που ελήφθησαν μέσω της μεθόδου ιχνηλάτησης ακτίνων (ray

tracing). Όσον αφορά τις προσομοιώσεις, εξακριβώθηκε ότι για αριθμό ακτίνων μεγαλύτερο των  $2 \cdot 10^6$  τα παραγόμενα αποτελέσματα παραμένουν αμετάβλητα.

Η Εικ. 2α παρουσιάζει την εγκάρσια κατανομή στον απορροφητή, όπως προέκυψε από προσομοίωση για τέλειο παραβολικό ανακλαστήρα, για διάφορες τιμές της κατοπτρικής ανακλαστικότητας  $\rho_{\text{spec}}$  του κατόπτρου. Όπως αναμενόταν, η μέγιστη ένταση της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας μειώνεται, καθώς η  $\rho_{\text{spec}}$  μειώνεται. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι η ακτινοβολία παρουσιάζει κανονική κατανομή με τη μέγιστη τιμή να εμφανίζεται στο μέσο του απορροφητή, ανεξαρτήτως της τιμής της κατοπτρικής ανακλαστικότητας. Οι πραγματικές μετρήσεις όμως έδειξαν ότι η κατανομή της ακτινοβολίας κατά το πλάτος του απορροφητή παρουσιάζει δύο κορυφές. Διενεργήθηκαν επιπλέον προσομοιώσεις ώστε να εξακριβωθεί τι είδους παραμόρφωση του ανακλαστήρα οδηγεί σε κατανομή της ακτινοβολίας με τέτοια μορφή. Όπως φαίνεται και από το ένθετο της Εικ. 2β μια μικρή παραμόρφωση στην κορυφή της παραβολής, δηλαδή η ύπαρξη ενός μικρού ευθύγραμμου τμήματος  $S$  που συνδέει τα συμμετρικά τμήματα της παραβολής, προκαλεί την ύπαρξη δύο κορυφών στην εγκάρσια κατανομή της ακτινοβολίας για τιμές του  $S \geq 20.0\text{mm}$ , (Εικ. 2β). Η ύπαρξη της συγκεκριμένης παραμόρφωσης στο πλαίσιο του συστήματος πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι τα μεταλλικά υποστηρίγματα του ανακλαστήρα κατασκευάστηκαν ως ξεχωριστά συμμετρικά τεμάχια και έπειτα συγκολλήθηκαν μεταξύ τους, ώστε να δημιουργηθεί η παραβολική γεωμετρία

Η Εικ. 2γ παρουσιάζει τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα υπολογιστικά αποτελέσματα για  $\rho_{\text{spec}}=0.50$ . Η εγκάρσια κατανομή μετρήθηκε σε έξι θέσεις κατά το πλάτος του απορροφητή ( $X=-30,-15,0,15,30\text{ mm}$ ) και σε τρεις θέσεις κατά το μήκος του απορροφητή ( $Z=125,250,375\text{ mm}$ ). Όπως φαίνεται στην Εικ. 2γ, τα πειραματικά σημεία βρίσκονται ανάμεσα στις κατανομές για  $S=30.0\text{mm}$  και  $S=40.0\text{mm}$  και είναι εμφανές ότι υπάρχει μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης στο μέσο του απορροφητή. Μία επιπλέον παράμετρος που έχει σημαντική επίδραση στην κατανομή της ακτινοβολίας είναι η κατακόρυφη μετατόπιση του απορροφητή σε σχέση με την ακριβή εστιακή γραμμή. Η κατανομή που απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα στην Εικ. 2γ προέκυψε από προσομοίωση για  $S=30.0\text{mm}$  και μετατόπιση του απορροφητή κατά  $5\text{mm}$  ( $f=685\text{mm}$ ) από την εστιακή γραμμή, δηλαδή το σφάλμα σε σχέση με το εστιακό ύψος είναι περίπου ίσο με  $0.7\%$ . Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σφάλμα μετατόπισης του απορροφητή μειώνει τη μέγιστη τιμή της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, ενώ η καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα καταδεικνύει ότι η συγκεκριμένη πρόβλεψη είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας.

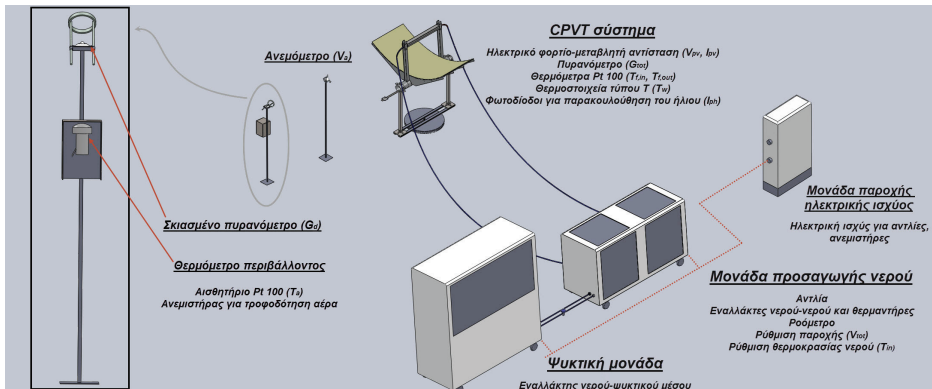
Η διαμήκης κατανομή της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στον απορροφητή παρουσιάζεται στην Εικ. 2δ. Η κατανομή μετρήθηκε σε τρεις θέσεις κατά το μήκος του απορροφητή ( $Z=125,250,375$ ) και στις εγκάρσιες θέσεις  $X$  όπου λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της (κατ' αναλογία με τις δύο κορυφές της Εικ. 2γ). Όπως φαίνεται από την Εικ. 2γ, η μετρούμενη ένταση της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας δεν διατηρείται σταθερή κατά το μήκος του απορροφητή, γεγονός που καταδεικνύει ότι το πλαίσιο παρουσιάζει τρισδιάστατη παραμόρφωση που οφείλεται σε κατασκευαστικά σφάλματα. Μάλιστα, οι τιμές της ακτινοβολίας στη δεύτερη κορυφή είναι συστηματικά μικρότερες σε σχέση με την πρώτη. Εν γένει, θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας παρουσιάζουν έντονες χωρικές διακυμάνσεις και μικρά σφάλματα όσον αφορά την ευθυγράμμιση και την ακριβή θέση των αισθητήριων έχων σημαντική επίδραση στις μετρούμενες τιμές της ακτινοβολίας. Σε κάθε περίπτωση τα πειραματικά δεδομένα αποκαλύπτουν ότι η συγκεντρωμένη ακτινοβολία λαμβάνει τιμές της τάξης των  $20\text{-}30 \cdot 10^3\text{ W/m}^2$ . Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι παρεμφερής συγκέντρωση επιτυγχάνεται για τιμή της κατοπτρικής ανακλαστικότητας  $\rho_{\text{spec}}=0.50$  (και  $S \geq 20.0\text{mm}$ ) και ο «συντελεστής αποδοχής» (intercept factor) του απορροφητή υπολογίστηκε ίσος με  $0.57$ , δηλαδή μόνο το  $57\%$  από την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από τον ανακλαστήρα προσπίπτει στην ενεργή επιφάνεια του απορροφητή, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό διασκορπίζεται εκτός των ορίων αυτής. Συνεπώς, η επίδραση των οπτικών απωλειών στην συνολική απόδοση του συστήματος αναμένεται να είναι σημαντική.



Εικόνα 2: Κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του απορροφητή: (α) Εγκάρσια κατανομή για γεωμετρική παραβολή, (β) εγκάρσια κατανομή για παραβολή με παραμόρφωση ( $\rho_{\text{spec}}=0.95$ ) (γ) εγκάρσια κατανομή για παραβολή με παραμόρφωση ( $\rho_{\text{spec}}=0.50$ ) (δ) διαμήκης κατανομή ( $\rho_{\text{spec}}=0.50$ ).

#### 4. ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τη θερμοϋδραυλική αξιολόγηση του συστήματος ψύξης (τόσο αυτόνομα όσο και ως μέρος του ολοκληρωμένου συστήματος) χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη διάταξη, η οποία αποτελείται από κλειστό κύκλωμα νερού, το οποίο συνδέεται υδραυλικά με το υπό αξιολόγηση σύστημα και επιπλέον είναι συζευγμένη (μέσω εναλλακτών θερμότητας) με κατάλληλη ψυκτική μονάδα, ώστε να είναι εφικτή η ρύθμιση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στο σύστημα. Επιπροσθέτως, όλα τα απαραίτητα για την αξιολόγηση του ολοκληρωμένου συστήματος φυσικά μεγέθη (περιβαλλοντικές συνθήκες, παροχή ρευστού, θερμοκρασίες κ.α.) μετρώνται μέσω διακριβωμένων οργάνων (Εικ. 3). Το πάνελ ηλιακών κυψελών συνδέθηκε με κατάλληλο μεταβαλλόμενο φορτίο (ποτενσιόμετρο ισχύος), ώστε να προσδιοριστεί το σημείο μεγιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος (Maximum Power Point-MPP), στο οποίο και λειτουργεί το πάνελ κατά την αξιολόγηση. Τα αναλογικά σήματα των οργάνων μεταφέρονται, μέσω αναлого-ψηφιακού μετατροπέα (data logger), σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και καταγράφονται με χρήση κατάλληλου κώδικα, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.



Εικόνα 3: Υδραυλικό κύκλωμα και πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση του συστήματος.

Οι αβεβαιότητες των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των διαφόρων φυσικών μεγεθών συγκεντρώνονται στον Πιν. 1. Για τον προσδιορισμό των αβεβαιοτήτων των μεγεθών που υπολογίζονται με βάση τα άμεσα μετρούμενα, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πιν. 2, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται από το Moffat [10].

Πίνακας 1: Αβεβαιότητες μετρούμενων μεγεθών.	
Μετρούμενο μέγεθος	U
$G$ [ $W/m^2$ ]	1.41%
$\dot{V}_{tot}$ [ $m^3/s$ ]	1.76%
$T_a$ [K]	0.054 K
$T_f$ [K]	0.054 K
$T_w$ [K]	0.5 K
$V$ [V]	0.66%
$\Delta p$ [Pa]	0.02%
CR	8.0%
$W_a$ [m]	0.05%
$L_a$ [m]	0.20%

Πίνακας 2: Αβεβαιότητες υπολογιζόμενων μεγεθών.	
Υπολογιζόμενο μέγεθος	U
$A_a$ [ $m^2$ ]	0.21%
$G_b$ [ $W/m^2$ ]	1.99%
$Q$ [W]	0.66%
$R_{th}$ [K/W]	$1.221 \cdot 10^{-4}$ K/W
$P_{pv}$	-
$\eta_{th}$	3.17%
$\eta_{el}$	2.05%
$\eta_{tot}$	3.75%

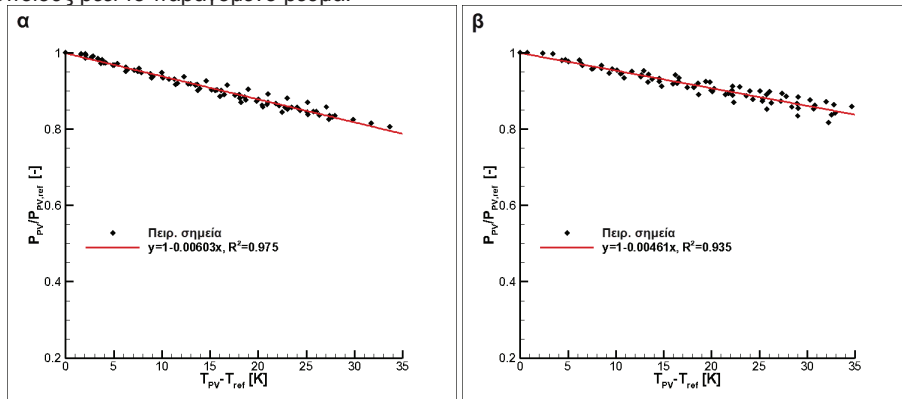
## 5. ΑΠΟΔΟΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

Η αξιολόγηση των ηλιακών κυψελών έγινε μέσω της έκθεσής τους σε συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία (χωρίς το σύστημα ψύξης) και την καταγραφή της αποδιδόμενης ισχύος ως συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας. Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε με χρήση δύο θερμοστοιχείων τύπου T τα οποία προσκολλήθηκαν στο υπόστρωμα του πάνελ.

Η Εικ. 4 παρουσιάζει της αδιάστατη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος ως συνάρτηση της διαφοράς της θερμοκρασίας λειτουργίας του πάνελ  $T_{PV}$  από τη θερμοκρασία αναφοράς  $T_{ref}$  (η οποία λαμβάνεται ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) για τα δύο πάνελ που εξετάστηκαν. Η κλίση της ευθείας αποτελεί την παράμετρο θερμοκρασίας ( $\beta$ ), η οποία αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος της ποιότητας του πάνελ. Όπως φαίνεται από την Εικ. 4, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι εντονότερη στο πάνελ με κυψέλες πλάτους 40.0mm (Εικ. 4α) σε σχέση με το αντίστοιχο με κυψέλες πλάτους 60.0mm (Εικ. 4β), καθώς οι αντίστοιχοι συντελεστές  $\beta$  έχουν τιμές ίσες με  $0.00603 K^{-1}$  και  $0.00461 K^{-1}$ . Η χαμηλότερη απόδοση του πάνελ με τις κυψέλες πλάτους 40.0mm αποδίδεται στην υψηλότερη «αντίσταση σειράς» (series resistance) που παρουσιάζει, η οποία προκύπτει εξαιτίας των ατελειών στον



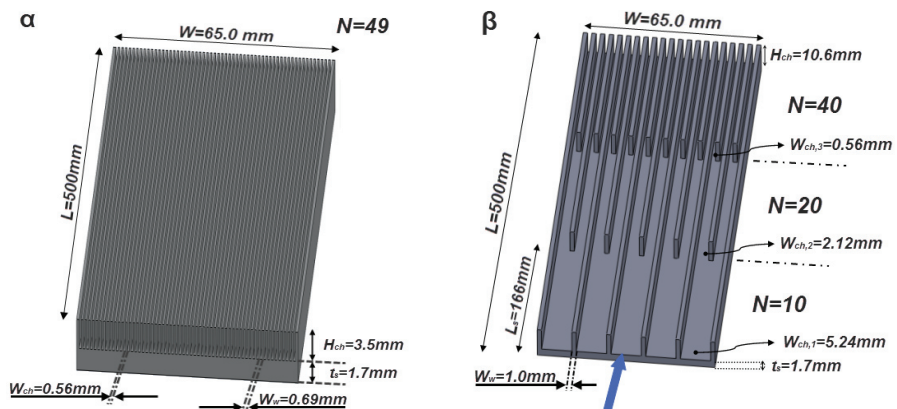
ηλεκτρικό δεσμό ανάμεσα στο υλικό των κυψελών και τους μεταλλικούς αγωγούς στους οποίους ρέει το παραγόμενο ρεύμα.



Εικόνα 4: Εξαρτηση απόδοσης των ηλιακών κυψελών από τη θερμοκρασία: Πλάτος κυψέλης (α) 40.0 mm και (β) 60.0 mm.

## 6. ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ

Δύο ψυκτικές διατάξεις συνολικών διαστάσεων 0.5 m x 0.065 m, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικ. 5, εξετάστηκαν για την ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών. Η πρώτη εκ των διατάξεων (Εικ. 5α) φέρει παράλληλα μικρο-κανάλια σταθερής υδραυλικής διαμέτρου ( $D_h=0.966\text{mm}$ ), ενώ η δεύτερη φέρει κανάλια κλιμακωτά μεταβαλλόμενης υδραυλικής διαμέτρου ( $D_{h,1}=7.013\text{mm}$ ,  $D_{h,2}=3.533\text{mm}$ ,  $D_{h,3}=1.064\text{mm}$ ), δηλαδή το μήκος της ψύκτρας χωρίζεται σε τρία τμήματα με αυξανόμενη πυκνότητα καναλιών. Το πλάτος των καναλιών της διάταξης της εικόνας 5α είναι ίσα με αυτό των καναλιών του 3<sup>ου</sup> τμήματος της ψύκτρας της Εικ. 5β, δηλ. αυτού με την πυκνότερη κατανομή πτερυγίων ( $W_{ch}=0.56\text{mm}$ ). Οι γεωμετρικές παράμετροι των διατάξεων προέκυψαν με χρήση της μεθόδου πολυ-κριτηριακής βελτιστοποίησης που περιγράφεται από τους Karathanassis et al. [11].



Εικόνα 5: Ψυκτικές διατάξεις για την απαγωγή της περίσσειας θερμότητας: (α) Ψύκτρα με ευθύγραμμα κανάλια, (β) ψύκτρα με κλιμακωτά κανάλια.

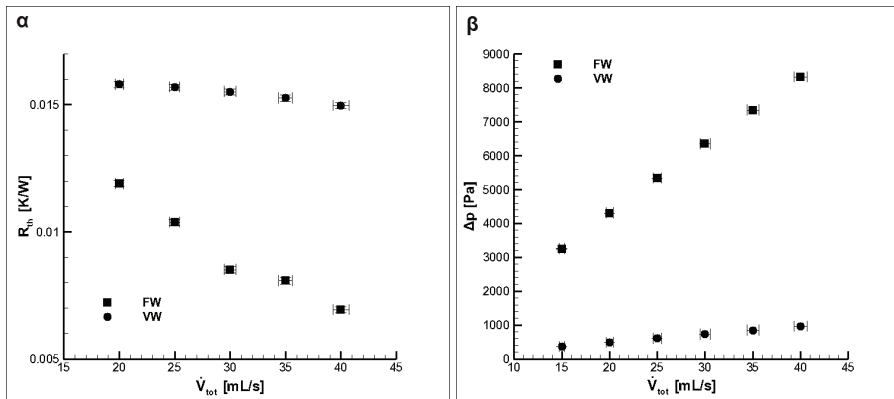
Η αξιολόγηση των δύο ψυκτικών διατάξεων περιλάμβανε τη μέτρηση της θερμοκρασίας μετάλλου για θέρμανση μέσω σταθερής θερμορροής, ώστε να προσδιοριστεί η θερμική αντίσταση (θερμική απόδοση) και τη μέτρηση της πτώσης πίεσης του ψυκτικού διαμέσου

αυτών (υδροδυναμική απόδοση). Για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδική συσκευή με θερμαντικά σώματα, η οποία συσφίχθηκε μηχανικά στην εκάστοτε ψύκτρα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παροχή σταθερής θερμορροής σε αυτή. Για μόνιμες συνθήκες λειτουργίας της ψύκτρας μετρήθηκαν η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού ρευστού με χρήση θερμομέτρου Pt100, η θερμοκρασιακή κατανομή στο στερεό υπόστρωμα της ψύκτρας με χρήση θερμοστοιχείων τύπου T και κατόπιν η θερμική αντίσταση υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_{th} = \frac{T_{w,max} - T_{f,i}}{Q} \quad (\text{Εξ. 1})$$

όπου  $T_{w,max}$ ,  $T_{f,i}$  είναι η μέγιστη θερμοκρασία στο υπόστρωμα της ψύκτρας και η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού αντίστοιχα, ενώ  $Q$  είναι η θερμική ισχύς που προσδίδεται από τους θερμαντές. Για τη μέτρηση της πτώσης πίεσης χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό διαφορικό μανόμετρο το οποίο παρενεβλήθη στο υδραυλικό κύκλωμα που περιγράφηκε στην παράγραφο 3, σε κατάλληλη θέση, ώστε να μετράται η πτώση πίεσης μόνο εξαιτίας της διέλευσης του ρευστού από την ψυκτική διάταξη.

Όπως απεικονίζεται στην Εικ. 6α η ψύκτρα με τα ευθέα κανάλια (χαρακτηρίζεται με το σύμβολο FW) επιτυγχάνει χαμηλότερες τιμές της θερμικής αντίστασης, που φτάνουν έως την τιμή 0.0069 K/W για παροχή νερού ίση με 40 mL/s, σε σχέση με την αντίστοιχη με κλιμακωτά κανάλια (συμβολίζεται με VW), εξαιτίας του μεγαλύτερου αριθμού επιφανειών μεταφοράς θερμότητας που φέρει. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί, ότι η θερμική αντίσταση της ψύκτρας με τα κλιμακωτά κανάλια παρουσιάζει αμελητέα εξάρτηση από την παροχή του ψυκτικού και διατηρείται σχετικά σταθερή με τιμή ελαφρώς μεγαλύτερη των 0.015 K/W. Η χαρακτηριστική αυτή συμπεριφορά οφείλεται στην αλλαγή των συνθηκών ροής και μεταφοράς θερμότητας εντός της ψύκτρας καθώς μειώνεται η παροχή, από εξαναγκασμένη σε μεικτή συναγωγή. Όσον αφορά την πτώση πίεσης του ψυκτικού (Εικ. 6β), υπάρχει γραμμική εξάρτηση από την παροχή και για τις δύο ψυκτικές διατάξεις. Η πτώση πίεσης είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη στην ψύκτρα με τα ευθέα κανάλια, καθώς η συνεισφορά στη συνολική πτώση πίεσης των δύο πρώτων τμημάτων με υδραυλικές διαμέτρους  $D_{h,1}$  και  $D_{h,2}$  της ψύκτρας με κλιμακωτά κανάλια είναι αμελητέα και συνεπώς η συνολική πτώση πίεσης οφείλεται στο τρίτο τμήμα μήκους 0.166m με υδραυλική διάμετρο στη μικροκλίμακα.



Εικόνα 6: Απόδοση ψυκτικών διατάξεων: (α) θερμική αντίσταση  $R_{th}$  και (β) πτώση πίεσης  $\Delta p$  του ψυκτικού μέσου.

## 7. ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ/ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

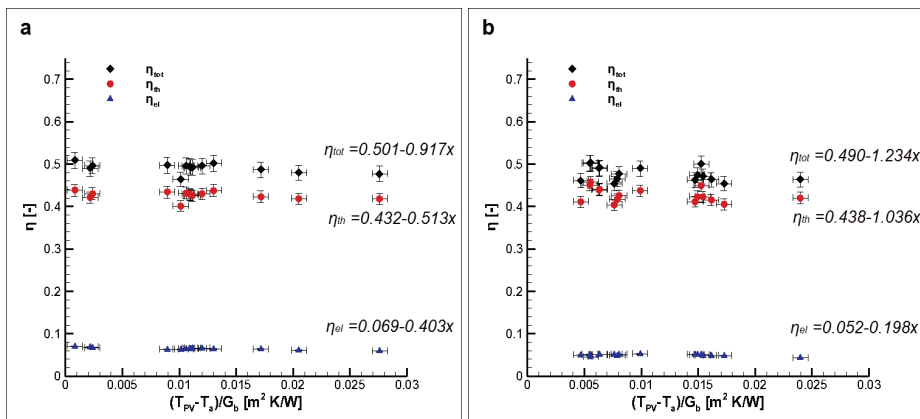
Η απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε για μόνιμες συνθήκες λειτουργίας με βάση τα πρότυπα που ισχύουν για συγκεντρωτικούς ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες [12,13]. Ο ηλεκτρικός  $\eta_{el}$  και ο θερμικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{th}$  του συστήματος προσδιορίστηκαν με

βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta_{el} = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{A_a G_b} \quad (\text{Εξ. 2})$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} c_p (T_{f,out} - T_{f,in})}{A_a G_b} \quad (\text{Εξ. 3})$$

όπου είναι  $V_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$  είναι η τάση και η ένταση του ρεύματος του πάνελ στο σημείο μέγιστης ισχύος,  $\dot{m}$  είναι η παροχή του ψυκτικού μέσου ίση με 40mL/s και στις δύο περιπτώσεις,  $T_{f,in}$ ,  $T_{f,out}$  η θερμοκρασία του ψυκτικού στην είσοδο και στην έξοδο του συστήματος αντίστοιχα,  $A_a$  η επιφάνεια παραθύρου του ανακλαστήρα και  $G_b$  η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης προκύπτει ως το άθροισμα  $\eta_{tot} = \eta_{el} + \eta_{th}$ .



Εικόνα 7: Απόδοση ολοκληρωμένου συστήματος: Ψύκτρα με (α) ευθύγραμμα και (β) κλιμακωτά κανάλια.

Η Εικ. 7 παρουσιάζει τον ηλεκτρικό, θερμικό και συνολικό βαθμό απόδοσης για τα συστήματα με διαφορετικούς απορροφητές που εξετάστηκαν. Τα συστήματα ανεξαρτήτως της διάταξης του απορροφητή επιτυγχάνουν μέγιστο συνολικό βαθμό απόδοσης περίπου ίσο με 50%. Είναι εμφανές ότι η απόδοση του συστήματος παρουσιάζει ασθενή εξάρτηση από τη θερμοκρασία του απορροφητή  $T_{pv}$  και καθίσταται με αυτό τον τρόπο εμφανές ότι οι οπτικές απώλειες αποτελούν με διαφορά το σημαντικότερο μηχανισμό απωλειών του συστήματος. Το σύστημα που φέρει την ψύκτρα με τα ευθύγραμμα κανάλια (Εικ. 7α) παρουσιάζει ελαφρά χαμηλότερο συντελεστή θερμικών απωλειών, αλλά η διαφορά βρίσκεται εντός του εύρους της πειραματικής αβεβαιότητας. Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος με τις κυψέλες πλάτους 40.0 mm (Εικ. 7β) μετρήθηκε χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη για κυψέλες πλάτους 60.0 mm λόγω της μικρότερης ενεργού επιφάνειας του πάνελ και συνεπώς της πρόσπτωσης λιγότερης ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτή. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η παρασιτική ισχύς της αντλίας δεν ελήφθη υπ' όψιν στο συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος, καθώς είναι αμελητέα λόγω του μικρού μήκους του απορροφητή. Εντούτοις, σε ένα σύστημα με μεγαλύτερο μήκος το οποίο θα είναι ικανό να καλύψει μεγάλο μέρος των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων, για παράδειγμα, μιας κατοικίας ή ενός ξενοδοχείου, η παρασιτική ισχύς θα είναι υπολογίσιμη. Επιπροσθέτως, είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι το υπό αξιολόγηση σύστημα, παρότι πρόκειται για πρωτότυπη διάταξη και όχι για εμπορικό προϊόν, επιτυγχάνει υψηλό ολικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Βελτίωση της ακρίβειας στην κατασκευή του παραβολικού πλαισίου θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση τόσο του ηλεκτρικού, όσο και του

συνολικού βαθμού απόδοσης. Αναφορικά με το κόστος του συστήματος, δεν είναι δυνατόν να γίνει ασφαλής εκτίμηση καθώς το σύστημα απαρτίζεται εξ' ολοκλήρου από πρωτότυπες συνιστώσες οι οποίες κατασκευάστηκαν κατά παραγγελία και όχι σε γραμμή παραγωγής.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα πρωτότυπο συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα γραμμικής εστίασης. Αρχικά αξιολογήθηκε η οπτική ποιότητα του ανακλαστήρα και ο παράγοντας αποδοχής του απορροφητή υπολογίστηκε ίσος με 0.57. Επιπλέον, αξιολογήθηκαν δύο πάνελ ηλιακών κυψελών με ενεργή επιφάνεια  $(0.04 \times 0.5) \text{ m}^2$  και  $(0.06 \times 0.5) \text{ m}^2$ , αντίστοιχα, και οι παράγοντες θερμοκρασίας τους μετρήθηκαν ίσοι με  $0.00603 \text{ K}^{-1}$  και  $0.0046 \text{ K}^{-1}$ , αντίστοιχα. Αναφορικά με το σύστημα ψύξης, εξετάστηκαν δύο ψύκτρες με κανάλια σταθερού και κλιμακωτά μεταβαλλόμενου πλάτους, με την ψύκτρα με τα μικροκανάλια σταθερού πλάτους να επιτυγχάνει χαμηλότερες τιμές της θερμικής αντίστασης που έφτασαν έως την τιμή των  $0.0069 \text{ K/W}$  για παροχή νερού ίση με  $40 \text{ mL/s}$ . Αντιθέτως, η θερμική αντίσταση της ψύκτρας με τα κλιμακωτά κανάλια διατηρείται περίπου σταθερή με τιμή  $0.015 \text{ K/W}$ , ανεξαρτήτως της παροχής του ψυκτικού μέσου. Επιπλέον, η πτώση πίεσης που προκαλεί η ψύκτρα με κλιμακωτά κανάλια είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη σε σχέση με τα σταθερά μικροκανάλια. Τέλος, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ολοκληρωμένου συστήματος για διαφορετικές ψυκτικές διατάξεις είναι της τάξης του 50% και εμφανίζεται σχετικά ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία λειτουργίας του απορροφητή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Blakers, A., 2007, "Silicon concentrator solar cells", in: A. Luque, V. Andreev (Eds.), *Concentrator Photovoltaics*, Springer Verlag, Heidelberg, pp. 51-66 and 133-149.
- [2] Chow, T.T., 2010, "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology", *Appl. Energy*, 87, pp. 365-379.
- [3] Charalambous, P.G., Maidment, G.G., Kalogirou, S.A., Yiakoumetti, K., 2007, "Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review", *Appl. Therm. Eng.*, 27, pp. 275-286.
- [4] Coventry, J.S., 2005, "Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector", *Sol. Energy*, 78, pp. 211-222.
- [5] Li, M., Li, G.L., Ji, X., Yin, F., Xu, L., 2011, "The performance analysis of the Trough Concentrating Solar Photovoltaic/Thermal system", *Energy Convers. Manag.*, 52, pp. 2378-2383.
- [6] Chemisana, D., Ibáñez, M., Rosell, J.I., 2011, "Characterization of a photovoltaic-thermal module for Fresnel linear concentrator", *Energy Convers. Manag.*, 52, pp. 3234-3240.
- [7] Rosell, J.I., Vallverdú, X., Lechón, M.A., Ibáñez, M., 2005, "Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system", *Energy Convers. Manag.*, 46, pp. 3034-3046.
- [8] Vivar, M., Everett, V., Fuentes, M., Blakers, A., Tanner, A., Le Lievre, P., Greaves, M., 2013 "Initial field performance of a hybrid CPV-T microconcentrator system", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 21, pp. 1659-1671.
- [9] Chaabane, M., Charfi, W., Mhiri, H., Bournot, P., 2013, "Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems", *Sol. Energy*, 98, pp. 315-321.
- [10] Moffat, R.J., 1988, "Describing the uncertainties in experimental results", *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, 1, pp. 3-17.
- [11] Karathanassis, I.K., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., Bergeles, G.C., 2013, "Multi-objective optimization of a micro heat sink for Concentrating Photovoltaic/Thermal (CPVT) systems", *Appl. Therm. Eng.*, 59, pp. 733-744.
- [12] ASHRAE 93-2010 Standard, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors.
- [13] ASTM E905-87 Standard, Standard test method for determining thermal performance of tracking concentrating solar collectors, 2007.

## ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΑΝΗΓΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ - ΙΣΟΤΙΜΙΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Γ. Παπαθανασίου<sup>1</sup>, Θ. Τσούτσος<sup>1\*</sup>, Α. Γιαννίδου<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Πολυτεχνειούπολη, 73100 Χανιά, [Theocharis.Tsoutsos@enveng.tuc.gr](mailto:Theocharis.Tsoutsos@enveng.tuc.gr)

<sup>2</sup> Κέντρο Ελέγχου Συστήματος Μεταφοράς Κρήτης/Διεύθυνση Διαχείρισης Νησιών/ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τα προσεχή έτη, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω μέσω των συστημάτων ενεργειακού συμφητισμού (net metering). Συχνά όμως εγείρονται ερωτηματικά σε σχέση με την ανταγωνιστικότητα της φωτοβολταϊκής ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με το υπάρχον σύστημα (κυρίως από συμβατικές πηγές ενέργειας).

Στόχος της συγκεκριμένης ερευνητικής εργασίας είναι η ανάλυση και η αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στην Κρήτη- αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα - με στόχο τη βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα των ΦΒ, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση στο υπάρχον δίκτυο από τη λειτουργία των ΦΒ πάνω σε αυτό.

Η αξιολόγηση αυτή γίνεται αξιοποιώντας τη μέθοδο υπολογισμού του ανηγμένου κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – ΑΚΗΕ- (Levelized Cost Of Electricity). Στην έρευνα αυτή αναλύονται διάφορες οικονομικές παράμετροι καθώς και σχετιζόμενες με το δίκτυο μεταφοράς και διανομής. Σκοπός με την βοήθεια της ανάλυσης είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός της ισοτιμίας στο δίκτυο καθώς και ο υπολογισμός της ωφέλειας από τις επενδύσεις στον τομέα των ΦΒ στην Κρήτη.

Με τον όρο "ισοτιμία" προσδιορίζεται η ανταγωνιστικότητα των ΦΒ συστημάτων παραγωγής σε σχέση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να διασφαλιστεί η εύρυθμη ανάπτυξη του κλάδου μέσω της δημιουργίας πλαισίου ανάπτυξης προσδιοριζόμενου από την αμφίδρομη ωφέλεια που προκύπτει (Παραγωγοί-Δίκτυο).

Στο τέλος της έρευνας δημιουργούνται σενάρια που θα αξιολογούν τα συστήματα (ΦΒ) σε διαφορετικές περιπτώσεις πάνω στο δίκτυο καθώς και εναλλακτικές πολιτικές που μπορούν να χαραχθούν για τη βιώσιμη ανάπτυξή τους.

Λέξεις Κλειδιά: Ανηγμένο Κόστος παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ισοτιμία, φωτοβολταϊκά, ηλιακή ενέργεια

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα είναι αδιαμφισβήτητος ο ρόλος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), για την παραγωγή ενέργειας φιλικής προς το περιβάλλον. Πλέον είναι τεχνικά εφικτό, βάσει συγκεκριμένων στόχων, τεχνολογίες των ΑΠΕ να υποκαταστήσουν εν μέρει ή ακόμη εξ ολοκλήρου τις υπάρχουσες υποδομές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύσιμα. Ωστόσο, οι οικονομικοί φραγμοί παραμένουν τα κύρια εμπόδια που θα οδηγήσουν σε 'κοινωνία βιώσιμης ενέργειας'.

Στην Ελλάδα έχοντας ήδη ολοκληρωθεί ένας κύκλος έντονης μεγέθυνσης του αριθμού των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) και του ρόλου τους στην ηλεκτροπαραγωγή, προκύπτουν ήδη ερωτήματα για τη βιωσιμότητα του τομέα, και συνεπώς η ανάγκη για την διαμόρφωση μίας νέας σύνθετης πολιτικής, η οποία θα καταστήσει βιώσιμη την παράλληλη ανάπτυξη των εφαρμογών ΑΠΕ καθώς και την ανάγκη του δικτύου για ωφέλιμη διοχέτευση πράσινης ενέργειας.

Η οικονομική σκοπιά ενός σχεδίου παραγωγής ενέργειας μπορεί να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας μετρήσεις, καθώς και οικονομικούς δείκτες αξιολόγησης, όπως το ανηγμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΚΗΕ). Το ΑΚΗΕ, είναι συχνά χρησιμοποιούμενος οικονομικός συντελεστής για τη σύγκριση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές τεχνολογίες ή για την εξέταση της ισοτιμίας δικτύου για τις αναδυόμενες τεχνολογίες όπως αυτή των ΦΒ συστημάτων παραγωγής. Δυστυχώς αυτή η μέθοδος ανάλυσης υποθάπτει κινδύνους καθότι πρόκειται για απλή μέθοδο ανάλυσης. Τα σενάρια που δημιουργούνται καθώς και οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται κρίνουν το βάθος και το μέγεθος της ανάλυσης. Η ιδέα της ισοτιμίας του δικτύου για τη ΦΒ ενέργεια αντιπροσωπεύει μια σύνθετη σχέση μεταξύ των τιμών της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος, τον προμηθευτή τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά καθώς και πληθώρα μεταβλητών που αφορούν το σύστημα, ανάλογα με την ανάλυση που ακολουθείται.

Τα διαφορετικά επίπεδα ενσωμάτωσης του κόστους και η πληθώρα υποθέσεων σε διάφορες τεχνολογίες οδηγούν σε διαφορετικά έξοδα. Επιπλέον, η τάση για εξάλειψη περιπτώσεων επιβαρύνσεων για τους καταναλωτές μπορεί να συγκαλύψουν το πραγματικό κόστος των συμβατικών τεχνολογιών σε σχέση με αυτό των ΑΠΕ.

Στόχος της συγκεκριμένης ερευνητικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός της ανταγωνιστικότητας της ΦΒ τεχνολογίας σε σχέση με τη συμβατική, καθώς και η ανάλυση του πλαισίου επενδύσεων στο οποίο αυτή την στιγμή βρίσκεται η ΦΒ τεχνολογία.

### 1.1. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΚΗΕ

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από το οριακό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από συγκεκριμένες μονάδες παραγωγής και παράλληλα, κατά κανόνα, με βάση την αγορά ενέργειας αλλά και διάφορα κανονιστικά μέτρα. Όσον αφορά την Ελληνική διαχείριση ενέργειας η τιμή καθορίζεται κατά βάση από την Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ), τις διαμορφώσεις της αγοράς μέσω της παραγωγής και της ζήτησης, αλλά παράλληλα και από τα όρια τα οποία μπαίνουν στην παραγωγή από τρίτους (βλ. ΦΒ), δηλαδή οι εγγυημένες τιμές (ταρίφες) οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από το υπάρχον πλαίσιο που έχει εφαρμοστεί από το έτος 2009 ή το πλαίσιο ενεργειακού συμψηφισμού που πλέον αρχίζει να ισχυρείται σαν υπόδειγμα στη ΦΝ αγορά.

Η μεθοδολογία του ΑΚΗΕ χρησιμοποιείται σαν εργαλείο συγκριτικής αξιολόγησης ή στην ανάλυση-σύγκριση για την εκτίμηση της σχέσης κόστους – αποτελεσματικότητας διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Το ΑΚΗΕ ουσιαστικά προσδιορίζει την τιμή που θα πρέπει να αποζημιωθεί η παραγόμενη ενέργεια, ώστε να αποπληρώσει τον επενδυτή για το συνολικό του κόστος και υπολογίζεται ως το πηλίκο του κόστους καθ' όλη

την οικονομική διάρκεια ζωής της επένδυσης (total lifetime expenses) προς τη παραγωγή ενέργειας της μονάδας, εκφρασμένα σε όρους παρούσας αξίας.

Για τον υπολογισμό του ΑΚΗΕ χρησιμοποιούνται διάφοροι παράμετροι όπως το κόστος εγκατάστασης, τα λειτουργικά έξοδα, το προεξοφλητικό επιτόκιο ή επιτόκιο αναγωγής που χρησιμοποιείται εφόσον η αξιολόγηση γίνεται ως προς το σύνολο της επένδυσης του συστήματος, τον ρυθμό υποβάθμισης του συστήματος του ΦΒ, η διάρκεια ζωής του συστήματος, τα τοκοχρεολύσια.

Ανάλογα με το μέγεθος και το στόχο της ανάλυσης χρησιμοποιούνται και άλλες παράμετροι όπως, ο φόρος εισοδήματος, ο φόρος επένδυσης, η υπολειμματική αξία επένδυσης κ.α. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη αποδεκτή τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη.

Η συγκεκριμένη μέθοδος συνήθως δεν περιλαμβάνει κινδύνους που συνδέονται με τις διαφορετικές μεθόδους χρηματοδότησης που είναι διαθέσιμες για τις διαφορετικές τεχνολογίες. Για παράδειγμα τις εγγυημένες τιμές που έχουν δημιουργηθεί για την εξασφάλιση της τιμής που πρέπει να καταβληθεί για την παραγόμενη ενέργεια. Σε όλες τις τεχνολογίες θα πρέπει να γίνεται η προσπάθεια για την ίδια οικονομική ανάλυση με διαφοροποίηση στο κόστος, στη διάρκεια ζωής και στην παραγόμενη ενέργεια.

Αναγνωρίζοντας ότι το ΑΚΗΕ είναι εργαλείο συγκριτικής αξιολόγησης, υπάρχει μεγάλη ευαισθησία στις παραδοχές που γίνονται, ειδικά όταν πρόκειται για μελλοντική πρόβλεψη πολλών ετών. Έτσι, εάν χρησιμοποιείται για να εξετάζει τις πρωτοβουλίες πολιτικής, οι υποθέσεις θα πρέπει να γίνονται ακριβείς όσο το δυνατόν, με τις αντίστοιχες αναλύσεις ευαισθησίας και αιτιολογήσεις. Συνήθως, το ΑΚΗΕ είναι στατικό μέτρο που μοιάζει με ένα στιγμιότυπο κατά τον υπολογισμό της τιμής ανά παραγόμενη ενέργεια, ενώ οι πραγματικές τιμές της αγοράς είναι δυναμικές.

Βελτιώσεις στο ΑΚΗΕ για τη ΦΒ ενέργεια μπορούν να γίνουν όταν λαμβάνονται υπόψη ρεαλιστικές υποθέσεις, πραγματικές τιμές χρηματοδότησης, καθώς και προσεκτική εξέταση των τεχνολογιών παραγωγής. Κατανοώντας το πραγματικό κόστος του συστήματος και τις ενεργειακές προδιαγραφές μπορεί να γίνει περαιτέρω βελτίωση [1,2].

## 1.2. ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Η Κρήτη είναι σε έκταση το 4<sup>ο</sup> μεγαλύτερο νησί της Μεσογείου και χαρακτηρίζεται από την πολύ έντονη τουριστική δραστηριότητα, συνεπάγοντας την ιδιαίτερη αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Ενεργειακά πρόκειται για αυτόνομο σύστημα, όπου κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της η ηλεκτροπαραγωγή στηρίζεται σε συμβατικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (ντίζελ, μαζούτ). Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει: 3 θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ισχύος 817 MW, 39 αιολικά πάρκα ισχύος 186 MW, ΦΒ πάρκα ισχύος 78 MW επιπλέον 16 MW από το ειδικό πρόγραμμα στεγών) και 2 ΥΗΣ ισχύος 0,6 MW [3,4]. Εξαιτίας του τουριστικού χαρακτήρα του νησιού, ακόμη και κατά την περίοδο της οικονομικής ύφεσης της Ελλάδας (2009), όταν στο διασυνδεδεμένο σύστημα παρατηρείται μείωση της ζήτησης στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο Κρήτης αύξηση 0.5%. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η ανάγκη για ενίσχυση του αυτόνομου δικτύου της Κρήτης και η εύρεση βέλτιστων λύσεων για την παραγωγή.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Στην παρούσα ερευνητική εργασία η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της ανταγωνιστικότητας των φωτοβολταϊκών βασίζεται σε 3 κύριους πυλώνες:

α) στη μεθοδολογία υπολογισμού του ΑΚΗΕ των ΦΒ συστημάτων της Κρήτης

β) στον υπολογισμό της Ισοτιμίας μεταξύ συστήματος παραγωγής και Φ/Β συστήματος και τέλος

γ) στον υπολογισμό ωφέλειας που προκύπτει αμφίδρομα μεταξύ παραγωγών της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας και δικτύου διανομής.

Στη συγκεκριμένη εργασία στόχος είναι η αξιολόγηση και η αποσαφήνιση της ορθής μεθόδου υπολογισμού του ανηγμένου κόστους για τη μελέτη στο αυτόνομο δίκτυο της Κρήτης, όπου έχει υλοποιηθεί περιορισμένος αριθμός μελετών.

Ο υπολογισμός του ΑΚΗΕ πρέπει να λαμβάνει υπόψη το κόστος του συστήματος παραγωγής ενέργειας και την ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια ζωής του

€  
 συστήματος παρέχοντας κόστος εκφρασμένο σε(  $\overline{kWh - MWh}$ ). Οι μεταβλητές και τα δεδομένα για τον υπολογισμό του ανηγμένου κόστους αναλύονται σε περιβάλλον Microsoft Office Excel και τελικά εξάγονται τα συμπεράσματα για την Ισοτιμία μεταξύ παραγωγής και δικτύου.

Η γενική μέθοδος υπολογισμού λοιπόν μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX}{EP} \quad (1)$$

Όπου CAPEX: Οι κεφαλαιακές δαπάνες για την ανάπτυξη του συστήματος

OPEX: Οι λειτουργικές δαπάνες του συστήματος

EP: Η παραγόμενη ενέργεια του κύκλου ζωής του συστήματος.

Η επιλογή των παραμέτρων στη μεθοδολογία για την προσέγγιση του ΑΚΗΕ στοχεύει στη βαθύτερη ανάλυση, αλλά και τη μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

Οι κύριες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ΑΚΗΕ είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο (%), η μέση τιμή αγοράς του συστήματος, η διάρκεια ζωής του συστήματος (έτη) και η υποβάθμιση της παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος(%).

Η τελική εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ΑΚΗΕ, η οποία βασίζεται στην εξίσωση (1), θα είναι η εξής:

$$AKHE = \frac{\text{Κόστος Συστηματος} + \sum_{n=1}^N \frac{\text{Ετησια Λειτουργικα Εξοδα}}{(1 + \pi\epsilon)^n} - \frac{YA}{(1 + \pi\epsilon)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{\text{Ετησια παραγωγή Η.Ε.} \cdot (1 - \sigma\alpha)^n}{(1 + \pi\epsilon)^n}} \quad (2)$$

Ανάλογα με τον τύπο επένδυσης οφείλεται να προστεθεί και η χρηματοδότηση κάθε επένδυσης. Στη συγκεκριμένη έρευνα δίδεται μέσω του υπολογιστικού προγράμματος η επιλογή χρηματοδότησης η μη.

## 2.2. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΑΚΗΕ

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν τρία είδη ΑΚΗΕ, τα οποία αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η προσέγγιση των μεταβλητών για τους υπολογισμούς:

- το ονομαστικό
- το πραγματικό
- το πραγματικό πληθωριστικό

Για τον υπολογισμό του ονομαστικού ΑΚΗΕ χρησιμοποιούνται ονομαστικές τιμές του κόστους εγκατάστασης. Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του πραγματικού ΑΚΗΕ



χρησιμοποιούνται πραγματικές τιμές (δυναμικές), οι οποίες αναφέρονται σε σημερινές τιμές και συνήθως πριν τη χρήση τους έχει γίνει ανάλυση ευαισθησίας.

Στον πραγματικό πληθωριστικό ΑΚΗΕ χρησιμοποιούνται παράλληλα τιμές πληθωρισμού που αναφέρονται στην αγορά, έτσι ώστε να διαμορφωθεί άποψη τόσο για την εξέλιξη των τιμών όσο και τη μελλοντική αξία του κεφαλαίου κατά τα χρόνια μελέτης.

Η χρήση μεταξύ ονομαστικού και πραγματικού ΑΚΗΕ ποικίλλει ανάλογα με τον στόχο κάθε μελέτης. Γενικά το πραγματικό ΑΚΗΕ προτιμάται κυρίως από κυβερνήσεις – κατασκευαστές πολιτικών, ενώ το ονομαστικό κυρίως από επενδυτές .

### 2.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΙΣΟΤΙΜΙΑΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η Ισοτιμία δικτύου θεωρείται κρίσιμο σημείο για την αποτελεσματικότητα του κόστους της ηλιακής ΦΒ ενέργειας σε σχέση με την παραγόμενη από συμβατικά μέσα ενέργειας του δικτύου. Ουσιαστικά πρόκειται για τη χάραξη της πολιτικής που ακολουθείται για την ανταγωνιστικότητα της ΦΒ ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των μειώσεων κόστους και τη συνολική ‘πράσινη’ πολιτική που χρειάζεται να ακολουθηθεί στον τομέα των ΑΠΕ γενικότερα.

Για την Ισοτιμία θα εξεταστούν 2 μέθοδοι Ισοτιμίας: (α) Δυναμική Ισοτιμία με ενσωματωμένα χαρακτηριστικά του δικτύου και (β) Ισοτιμία καυσίμου

Για τους υπολογισμούς της Δυναμικής Ισοτιμίας συγκρίνεται το ΑΚΗΕ με την τιμολόγηση οικιακής και εμπορικής κατανάλωσης, ανάλογα με τον παραγωγό και τη θέση που βρίσκεται ως προς την κατανάλωση του (λογαριασμός ηλεκτρικής κατανάλωσης).

Για τους υπολογισμούς της Ισοτιμίας καυσίμου γίνεται η σύγκριση μεταξύ του ΑΚΗΕ των ΦΒ και της συμβατικής ενέργειας του δικτύου. Λόγω των ελλিপών δεδομένων που υπάρχουν για το ΑΚΗΕ της συμβατικής ενέργειας μόνο κάποια ποιοτική σύγκριση μπορεί να γίνει μεταξύ των δύο αυτών πηγών. Αξιοποιήθηκαν βιβλιογραφικά στοιχεία τιμών του κόστους καυσίμου των συμβατικών πηγών και παράλληλα με μία ανάλυση να δοθεί ποιοτική πρόβλεψη ώστε να υπάρξει εμπειριστικώς ερμηνεία για την Ισοτιμία καυσίμου [5].

### 2.4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΩΦΕΛΕΙΑΣ

Οι υπολογισμοί της αμφίδρομης ωφέλειας παραγωγών-καταναλωτών της ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται με ποσοτική σύγκριση του φορτίου ζήτησης του δικτύου διανομής και της παραγόμενης από μη συμβατικές μονάδες (ΦΒ) καθώς και της σύγκρισης του ΑΚΗΕ των συμβατικών μονάδων – μονάδων ΦΒ ηλεκτροπαραγωγής στο διάστημα στο οποίο διοχετεύεται η ενέργεια αυτή στο δίκτυο διανομής ενέργειας. Εν συνεχεία καθίσταται δυνατός ο ποσοτικός υπολογισμός της ωφέλειας για κάθε παραγωγό με υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης για κάθε επένδυση σε χρονικό ορίζοντα 20ετίας σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί που αφορούν κόστος παραγωγής ΦΒ και συμβατικής ενέργειας.

## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΑΚΗΕ

Σύμφωνα με την εξίσωση υπολογισμών (2), το ανηγμένο κόστος εκφράζεται ως η Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) του κόστους προς την ΚΠΑ της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος. Οι μεταβλητές εισαγωγής για τους υπολογισμούς του ΑΚΗΕ αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα 1. Σημαντικό για τους υπολογισμούς που ακολουθούν:

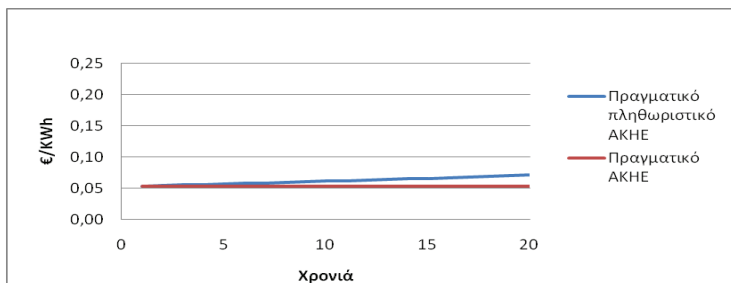
- Οι μεταβλητές που αναφέρονται στο σύστημα (ηλιακή ακτινοβολία, συντελεστής απόδοσης/αποδόμησης και παραγόμενη ενέργεια), αναφέρονται αποκλειστικά στην Κρήτη και έχουν συλλεχθεί έπειτα από πραγματικές μετρήσεις του εργαστηρίου

ανανεώσιμων και βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος [6]

- Οι μεταβλητές που αφορούν το κόστος του συστήματος αφορούν τρέχουσες τιμές αγοράς για το έτος 2014 [7]
- Τα λειτουργικά έξοδα αντιστοιχούν ως ποσοστό στο 1% επί του ολικού κόστους εγκατάστασης
- Για τον υπολογισμό του πραγματικού πληθωριστικού ΑΚΗΕ χρησιμοποιείται το ευρωπαϊκό ποσοστό πληθωρισμού που αντιστοιχεί στο 1,5% [8].
- Στο αρχικό σενάριο υπολογισμών χρησιμοποιούνται μόνο ίδια κεφάλαια

Πίνακας 1: Εισαγόμενες μεταβλητές		
Μεταβλητές συστήματος	Μονάδες	Τιμή
Μέγεθος συστήματος	W	1.000
Ηλιακή Ακτινοβολία	kWh/m <sup>2</sup> /day	4,3
Συντελεστής Απόδοσης	%	17,9
Συντελεστής Αποδόμησης	%	0,50
Χρόνος ζωής ΦΒ	Έτη	20
Παραγόμενη Ενέργεια	kWh/έτος	1.569,5
Κόστος ανά εγκατεστημένο Wp	€/Wp	1
Ολικό κόστος εγκατάστασης	€	1.000
Λειτουργικά έξοδα	€	
Προεξοφλητικό επιτόκιο	%	4
Επιτόκιο δανείου	%	-
Περίοδος Δανείου	Έτη	-
Κρατική χρηματοδότηση	%	0,00
Κεφάλαιο δανείου	€	-
Ετήσια δόση δανείου	€	-

Σύμφωνα με τις εισαγόμενες μεταβλητές του πίνακα 1 προκύπτει η τιμή του ΑΚΗΕ (=0,0536 €/kWh) και με την προσθήκη του ετήσιου πληθωρισμού παρουσιάζεται η εξέλιξη του ΑΚΗΕ στην διάρκεια έρευνας (Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα υπολογισμού ΑΚΗΕ

### 3.2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Για την πληρέστερη κατανόηση και εκβάθυνση στον έλεγχο της ανταγωνιστικότητας της τεχνολογίας και της ισοτιμίας για την Κρήτη δημιουργούνται σενάρια στα οποία μελετάται η συμπεριφορά της τιμής του ΑΚΗΕ αλλά και παράλληλα μελετάται και η ωφέλεια σε παραγωγούς για την χρήση της τεχνολογίας των ΦΒ συστημάτων.

Τα σενάρια αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Σενάρια και μεταβλητές						
Μεταβλητές συστήματος	Σενάρια					
	Αρχικό	1ο	2ο	3ο	4ο	5ο
Μέγεθος συστήματος (W)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m <sup>2</sup> /ημέρα)	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Συντελεστής Απόδοσης (%)	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
Συντελεστής Αποδόμησης (%)	0,5	0,5	0,5%	0,5%	0,5	0,5
Χρόνος ζωής ΦΒ (Έτη)	20	20	20	20	20	20
Παραγόμενη Ενέργεια (kWh/ Έτος)	1.569,5	1.569,5	1.569,5	1.569,5	1.569,5	1569,5
Κόστος ανά εγκατεστημένο Wp (€/Wp)	1	1	1	1	1	1
Ολικό κόστος εγκατάστασης (€)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	752
Λειτουργικά έξοδα (€)	18	18	18	18	18	7,52
Προεξοφλητικό επιτόκιο (%)	4	4	4	4	4	4
Επιτόκιο δανείου (%)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Περίοδος Δανείου (Έτη)	15	15	15	15	15	15
Κρατική χρηματοδότηση (%)	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0
Κεφάλαιο δανείου (€)	0	540	540	0	0	0
Ετήσια δόση δανείου (€)	0	68	68	0	0	0

Τα σενάρια που διαμορφώθηκαν είναι:

- **Σενάριο 1<sup>ο</sup>:** Δάνειο σε ποσοστό 30% και περίοδο αποπληρωμής 15 έτη
- **Σενάριο 2<sup>ο</sup>:** Ποσοστό δανείου 30% και κρατική επιδότηση 20% (σενάριο επιδότησης σε ενεργειακό συμψηφισμό)
- **Σενάριο 3<sup>ο</sup>:** (σενάριο ωφέλειας): Μεταβολή τιμών πώλησης ενέργειας δικτύου 3%
- **Σενάριο 4<sup>ο</sup>:** (σενάριο ωφέλειας): Συμψηφισμός σε ποσοστό 40% επί της διαφοράς της τελικής τιμής κιλοβατώρας στον καταναλωτή, 2,5% αύξηση κατά έτος στην οικιακή χρέωση και 2% στην εμπορική χρέωση (τιμή συμπεριλαμβανομένων ρυθμιζόμενων χρεώσεων δικτύου: 0,185 €/kWh)
- **Σενάριο 5<sup>ο</sup>:** Εφαρμογή εμπορίας δικαιωμάτων αερίων εκπομπών (CO<sub>2</sub>)

### 3.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΣΟΤΙΜΙΑΣ

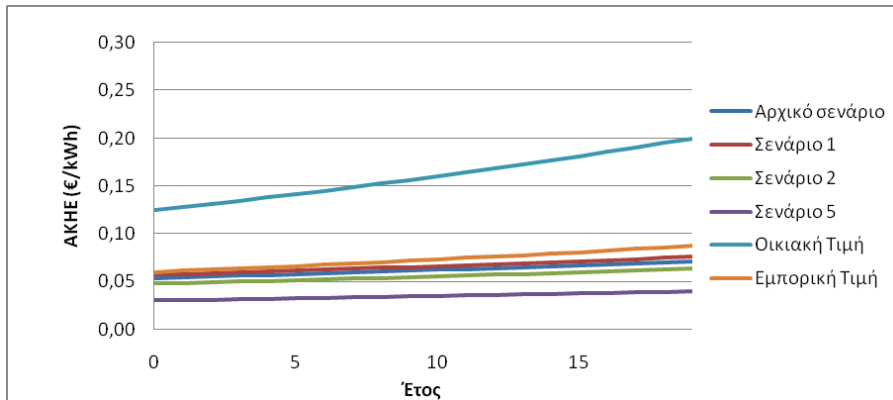
Κατά τον υπολογισμό της δυναμικής ισοτιμίας με ενσωματωμένα τα χαρακτηριστικά του δικτύου εξετάζεται το σημείο στο οποίο ο παραγωγός ωφελείται σε σχέση με την τιμολόγηση

της ενέργειας που καταναλώνει από το δίκτυο διανομής. Πρόκειται για σύγκριση των τιμών της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την τιμή της συμβατικής ενέργειας του δικτύου. Βάσει των πραγματικών τιμών της εταιρίας ΔΕΗ ΑΕ επιλέγονται οι εξής τιμές [9]

- Τιμή οικιακής κατανάλωσης: 0,125 €/kWh
- Τιμή εμπορικής κατανάλωσης: 0,060 €/kWh

Επίσης για τους υπολογισμούς ορίζεται μία ετήσια αύξηση των τιμών 2,5 %.

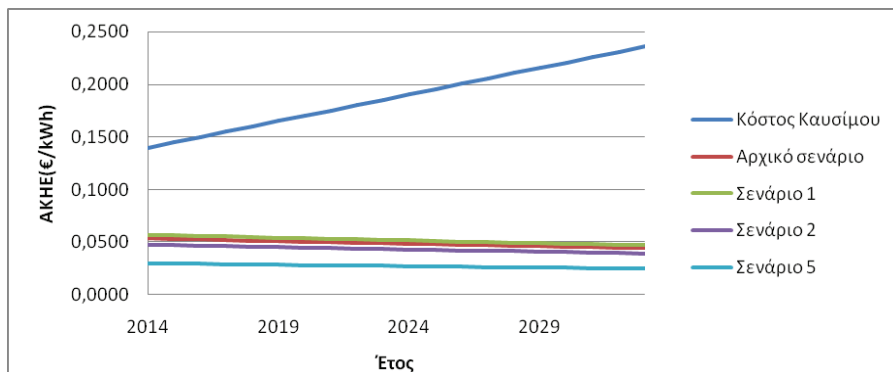
Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει το Διάγραμμα 2 για την εξέταση της Ισοτιμίας.



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα δυναμικής ισοτιμίας

Κατά τον υπολογισμό της Ισοτιμίας καυσίμου συγκρίνονται τα ΑΚΗΕ των ΦΒ και της συμβατικής παραγωγής. Τα στοιχεία του κόστους καυσίμου της συμβατικής παραγωγής Κρήτης συλλέχθηκαν από τον Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ) και αφορούν και τις τρεις υπάρχουσες μονάδες ντίζελ-μαζούτ του νησιού. Για την πρόβλεψη της τιμής καυσίμου θεωρείται αύξηση 1% κατά έτος σύμφωνα με την μεταβολή της αγοράς πετρελαίου. Για την εξέλιξη τιμής του ΑΚΗΕ θεωρείται πτώση της τάξεως του 1% κατά έτος στην αγορά.

Βάσει της εξέλιξης του ΑΚΗΕ και του κόστους καυσίμου δημιουργείται το Διάγραμμα 3.

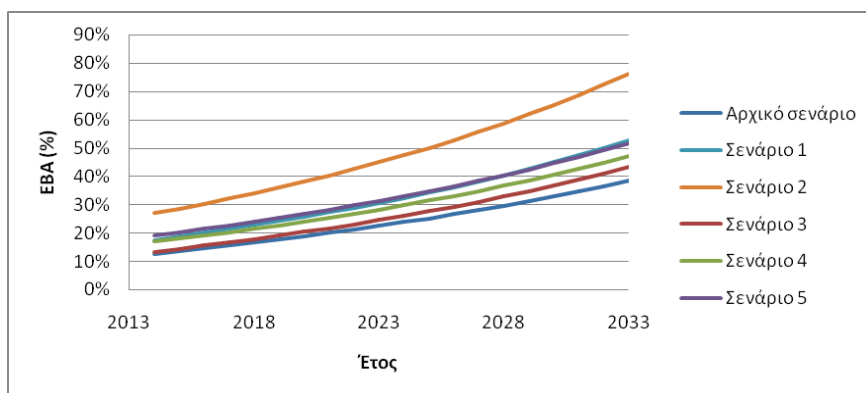


Διάγραμμα 3: Διάγραμμα ελέγχου ισοτιμίας καυσίμου

### 3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΩΦΕΛΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΕΒΑ

Με βάση το νόμο 4203/2013 και το νόμο 4254/2014 εισάγεται στην Ελλάδα το σύστημα ενεργειακού συμψηφισμού. Στο υπόδειγμα αυτό ο παραγωγός ουσιαστικά καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες και η ωφέλειά του προκύπτει με βάση την τιμολόγηση της καταναλισκόμενης ενέργειας που συμψηφίζεται από το δίκτυο. Το αρχικό σενάριο υπολογισμών περιλαμβάνει τις εξής παραδοχές: α) ο παραγωγός καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές του ανάγκες, β) ο συμψηφισμός γίνεται βάση της τιμής ενέργειας χωρίς τις όποιες ρυθμιζόμενες χρεώσεις του λογαριασμού της ΔΕΗ (ΥΚΟ-ΕΤΜΕΑΡ), γ) Οι χρεώσεις είναι ίδιες με αυτές των υπολογισμών για την ισοτιμία και δ) ο ΕΒΑ υπολογίζεται για σύνολο επένδυσης 20 ετών σύμφωνα με την εξέλιξη τιμών σε ΑΚΗΕ και χρέωση ενέργειας.

Σύμφωνα με το ΑΚΗΕ και τις χρεώσεις της καταναλισκόμενης ενέργειας προκύπτει το Διάγραμμα 4 που αφορά το έτος που θα ξεκινήσει η επένδυση με βάση το αρχικό αλλά και τα σενάρια που δημιουργήθηκαν.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα ΕΒΑ σεναρίου υπολογισμών

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση συμπεραίνονται κυρίως :

- Όσον αφορά την Ισοτιμία:
  - Η ΦΒ τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής στην Κρήτη είναι αισθητά ανταγωνιστική σε σχέση με την συμβατική τεχνολογία, επειδή σε όλα τα σενάρια, τα οποία έχουν δημιουργηθεί με πολύ συντηρητικές μεταβλητές, η τιμή του ΑΚΗΕ της ΦΒ ηλεκτροπαραγωγής είναι εμφανώς χαμηλότερη από την τιμή πώλησης της συμβατικής ενέργειας αλλά κυρίως του κόστους καυσίμου της παραγωγής των συμβατικών μονάδων παραγωγής (ντίζελ-μαζούτ) της Κρήτης.
  - Παρότι στα διάφορα σενάρια αλλάζει το κόστος, λόγω της υψηλής απόδοσης των ΦΒ στην Κρήτη δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις το ΑΚΗΕ, πράγμα που μας δείχνει ότι αν δεν υπάρξει πολύ σημαντική αύξηση στην τιμή των ΦΒ συστημάτων η ΦΒ τεχνολογία θα είναι για πάντα ανταγωνιστική σε σχέση με την συμβατική όσον αφορά το δίκτυο της Κρήτης.
  - Πλέον βάσει των αποτελεσμάτων είναι εύκολο να κριθεί ότι σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες της Κρήτης οι ΦΒ μονάδες είναι σαφώς πιο 'καθαρές' και πολύ πιο συμφέρουσες οικονομικά.

## 2. Όσον αφορά τον ΕΒΑ:

Για το υπόδειγμα ενεργειακού συμψηφισμού οι τιμές του ΕΒΑ είναι αρκετά υψηλές αποτελώντας θετικά οικονομική επιλογή. Το συγκεκριμένο υπόδειγμα δεν στοχεύει στην πώληση της παραγόμενης ενέργειας, αλλά στο συνδυασμό παραγωγής και ιδιοκατανάλωσης<sup>1</sup>. Και αυτό γιατί και ο στόχος κάθε παραγωγού είναι να καλύψει την κατανάλωση ενέργειας με ΦΒ παραγωγή, η οποία για σύστημα στην Κρήτη είναι παράλληλα και χαμηλού κόστους στην παραγωγή, αλλά και περιβαλλοντικά ωφέλιμη σε σχέση με την συμβατική παραγωγή από καύσιμα. Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι ήδη η ΦΒ τεχνολογία είναι ανταγωνιστική στο σύνολό της σε σχέση με την συμβατική και ότι ο τομέας της ΦΒ ενέργειας είναι ήδη ώριμος χωρίς επιδοτήσεις στα νέα συστήματα. Η ηλιακή ενέργεια τείνει να μεταβληθεί από 'εναλλακτική πηγή' σε πραγματικά ανταγωνιστική μορφή ενέργειας, αρκεί να χρησιμοποιηθούν διάφορα κανονιστικά μέτρα ως προς την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας με γνώμονα την ρύθμιση της ζήτησης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Weiss, I., Caneva, S. Arancón, S., Masson, G., Latour, M., Olson, C., Sinke, W.C., Tsoutsos, T., Tournaki, S., Pause, F., De Mango, F., Bastone, L., Raganella, M., Dalla Chiesa, C., Strbac, G., Pudjianto, D., Auer, H., Lettner, G., Montoya, C., Vázquez, R., Guilmar, S., 2012, "How to ensure a sustainable market growth for the PV sector: The PV Parity project", 27th Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 24 - 28 September 2012, Frankfurt
- [2] Tsoutsos, T., S. Tournaki, S. Weiss, I., Caneva, S. Arancón, S., Masson, G., Latour, M., Olson, C., Sinke, W.C., Pause, F., De Mango, F., Bastone, L., Raganella, M., Dalla Chiesa, C., Strbac, G., Pudjianto, D., Auer, H., Lettner, G., Montoya, C., Vázquez, R., Guilmar, S., , 2013"Photovoltaics competitiveness in MENA Countries. The European project PV PARITY", International Journal of Sustainable Energy, Taylor-Francis, accepted to be published.
- [3] Αναλυτικός Χάρτης Σταθμών [ΔΕΗ, 9/2014]
- [4] Πληροφοριακό Δελτίο ΔΕΔΔΗΕ για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά, [www.dedde.gr/el/miniaia-deltia-ape-kai-thermikis-paragwgis-sta-mi-diasundedemena-nisia/2014](http://www.dedde.gr/el/miniaia-deltia-ape-kai-thermikis-paragwgis-sta-mi-diasundedemena-nisia/2014) [08/2014]
- [5] "Grid parity definition" [EPIA, 2013]
- [6] Ζαβός, Ι. "Αξιολόγηση και σύγκριση αποτελεσμάτων ΦΒ", διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013
- [7] [pv.energytrend.com/pricequotes.html](http://pv.energytrend.com/pricequotes.html) [9/9/2014]
- [8] [www.inflation.eu](http://www.inflation.eu) [9/9/2014]
- [9] [www.dei.gr](http://www.dei.gr) [9/9/2014]

<sup>1</sup> παρακατανάλωση (παραγωγή-κατανάλωση) σε αντιστοιχία με prosuming (producing-consuming)

## ΗΛΙΑΚΟ ΤΡΙΤΡΟΧΟ ΟΧΗΜΑ

**Φ.Α. Κουτελιέρης**

Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πολυτεχνική Σχολή,  
Πανεπιστήμιο Πατρών, Σεφέρη 2, 30100 Αγρίνιο, E-mail: [fcoutelieris@upatras.gr](mailto:fcoutelieris@upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα μηδενικών ρύπων το οποίο χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά (Φ/Β) στοιχεία. Το όχημα σχεδιάστηκε ως τρίκυκλο προκειμένου να υπάρξει ο απαραίτητος χώρος για τα Φ/Β, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας τοποθετήθηκε στον εμπρόσθιο άξονα (FWD). Σε αντίθεση με τα αντίστοιχα εμπορικά ηλεκτροκίνητα οχήματα, το όχημα αυτό φορτίζει την συστοιχία των μπαταριών του αποκλειστικά από τον ήλιο μέσω τον Φ/Β χωρίς να είναι απαραίτητη η σύνδεσή του με το δίκτυο, επιτυγχάνοντας έτσι χαρακτήρα πλήρως φιλικό προς το περιβάλλον. Κατασκευάστηκαν δυο διαφορετικές εκδοχές του οχήματος, προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης: η πρώτη από βιομηχανικό χάλυβα εφοδιάστηκε με ένα hub motor 36VDC/500W, το οποίο τροφοδοτείται από μια συστοιχία 3 μπαταριών 12V/18Ah συνδεδεμένων εν σειρά. Επίσης, κατασκευάστηκε ένας πρωτότυπος πίσω άξονας με ελεύθερο διαφορικό, προκειμένου να επιτευχθεί αξιόλογη και ασφαλής οδική συμπεριφορά, δεδομένων των επιδόσεων του οχήματος. Η δεύτερη, επίσης προσθιοκίνητη, εκδοχή εφοδιάστηκε με ένα hub motor 24VDC/500W, το οποίο τροφοδοτείται από μια συστοιχία 2 μπαταριών 12V/18Ah συνδεδεμένων εν σειρά. Στην εκδοχή αυτή καταργήθηκε ο πίσω άξονας και αντικαταστάθηκε από ανεξάρτητη ανάρτηση με ψαλίδια και αμορτισέρ με ομόκεντρα σπειροειδή ελατήρια. Και οι δύο εκδοχές εφοδιάστηκαν με ηλεκτρικό φρένο εμπρός και διπλά μηχανικά δισκόφρενα πίσω. Ο έλεγχος των οχημάτων στο δρόμο έγινε στη βάση τριών διαφορετικών προτύπων χρήσης: (α) αδιάκοπη λειτουργία σε μέγιστη δυνατή ταχύτητα, (β) τυπική αστική χρήση και (γ) τυπική μετακίνηση εργαζόμενου. Σε όλες τις περιπτώσεις και ανεξαρτήτως της ηλιοφάνειας, η απόδοση και των δυο εκδοχών του οχήματος υπήρξε καλή. Ειδικά η εκδοχή των 24V κατάφερε να καλύψει τις ανάγκες των συγκεκριμένων προτύπων χρήσης με απόλυτη επιτυχία, αποδεικνύοντας έτσι ότι χρήση του δικτύου δεν είναι απαραίτητη για αστικές μετακινήσεις με ηλεκτροκίνητα οχήματα.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, Μηδενική εκπομπή ρύπων, Ηλιακή ενέργεια, Τρίκυκλο

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μετακινήσεις στην πλειοψηφία τους βασίζονται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα και εκλύουν σημαντική ποσότητα ρύπων [1]. Μια εναλλακτική λύση στην κατεύθυνση της μείωσης των εκπομπών είναι τα ηλεκτρικά οχήματα (EV), τα οποία υλοποιήθηκαν από τις απαρχές της αυτοκίνησης και διατίθενται εμπορικά από την δεκαετία του 1930. Για ένα μεγάλο διάστημα ο τομέας αυτός της αυτοκίνησης είχε παραμεληθεί, πλην όμως αναζωογονήθηκε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας την τελευταία δεκαετία, την «τρίτη ηλικία» των ηλεκτρικών οχημάτων που από το 2010 ξανά παράγονται μαζικά [2]. Τα υφιστάμενα EV δεν είναι στην πραγματικότητα «οχήματα μηδενικών ρύπων» αλλά «οχήματα που ρυπαίνουν κάπου αλλού», δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται ρυπογόνες και ενδεχομένως επικίνδυνες τεχνολογίες για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την φόρτιση των μπαταριών τους [3].

Το 1983 ένα όχημα με φωτοβολταϊκά στοιχεία (Φ/Β) διέσχισε την Αυστραλιανή ενδοχώρα, αποδεικνύοντας ότι τα ηλιακά οχήματα μπορούν να είναι αξιόπιστη επιλογή όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο [4]. Στη συνέχεια τα ηλιακά οχήματα έγιναν πιο δημοφιλή μέσω της ακαδημαϊκής έρευνας, των αγώνων οικονομίας (ελάχιστης κατανάλωσης) και τελικά μέσω των μεγάλων κατασκευαστών οχημάτων [5, 6]. Δυστυχώς η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας σε οχήματα αντιμετωπίζει σημαντικές δυσκολίες κυρίως οικονομικής αλλά και τεχνολογικής φύσεως, οι οποίες είναι επιπλέον των συνήθων προβλημάτων που αφορούν γενικά στα ηλεκτρικά οχήματα (μπαταρίες, μετάδοση, κλπ.). Έχουν γίνει βέβαια σημαντικές προσπάθειες για την επίλυση των προβλημάτων αυτών [7, 8]. Η παρούσα εργασία εστιάζει στη δημιουργία ενός ηλιακού οχήματος καθημερινής χρήσης σε αντίθεση με τις περισσότερες σχετικές εργασίες που αφορούν σε ηλιακά οχήματα επίδειξης ή αγώνων οικονομίας [9, 10].

## 2. ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η κεντρική ιδέα της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και η υλοποίηση ενός οχήματος μηδενικών ρύπων που να χρησιμοποιεί Φ/Β για να φορτίζει τις μπαταρίες που τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα που το κινεί. Το όχημα σχεδιάστηκε να είναι τρίκυκλο προκειμένου να εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος χώρος για την εγκατάσταση των Φ/Β, διάταξη που είναι αρκετά κοινή σε Ασιατικές κυρίως χώρες όπου μεγάλο πλήθος από τρίκυκλα με κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται κυρίως ως ελαφρά φορτηγά, αυξάνοντας σημαντικά τους εκλυόμενους ρύπους λόγω παρωχημένης τεχνολογίας και πλημμελούς συντήρησης [11]. Επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ο κινητήρας στον εμπρόσθιο τροχό (FWD), επιτρέποντας έτσι την ταυτόχρονη χρήση κινητήρα και πεντάλ, όποτε αυτό είναι απαραίτητο.

Προκειμένου να ελεγχθεί η σημασία της τάσης λειτουργίας ως παραμέτρου της απόδοσης του οχήματος, υλοποιήθηκαν δυο διατάξεις, μια με 36V και μια 24V. Πέραν της τάσης, οι διαφορές μεταξύ τους εστιάζονται στον χώρο που απαιτείται για τα Φ/Β (δηλ. στις διαστάσεις και το βάρος του οχήματος) και στη διάταξη τις πίσω ανάρτησης. Προφανώς, ακολουθήθηκαν και στις δυο διατάξεις όλες οι σχεδιαστικές αρχές που παρουσιάστηκαν πιο πάνω.

### 2.2. ΔΙΑΤΑΞΗ Νο 1: ΤΡΙΚΥΚΛΟ ΜΕ ΠΙΣΩ ΑΞΟΝΑ

Η πρώτη διάταξη παρουσιάζεται στην Εικ. 1 ενώ τα τεχνικά της χαρακτηριστικά εμφανίζονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 1. Το πλαίσιο κατασκευάστηκε από χαλύβδινο σωλήνα 1/2", ενώ τα Φ/Β τοποθετήθηκαν στο υψηλότερο δυνατό σημείο με την καλύτερη εφικτή γωνία και οι μπαταρίες στο χαμηλότερο εφικτό σημείο, προκειμένου να διατηρηθεί χαμηλά το κέντρο βάρους του οχήματος.



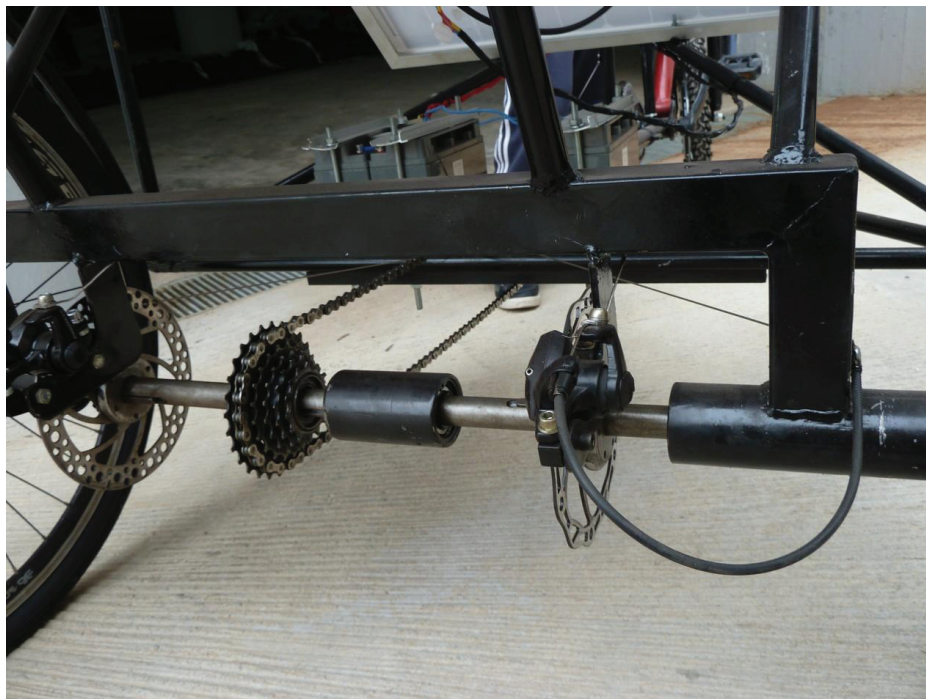


Εικόνα 1: Η πρώτη διάταξη του ηλιακού τρίκυκλου

Πίνακας 1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά		
	1 <sup>η</sup> διάταξη	2 <sup>η</sup> διάταξη
Ισχύς (W)	500	500
Μπαταρίες (-)	3x12 V / 18 Ah / Pb	2x12 V / 18 Ah / Pb
Φ/Β	3x12 V / 45 W / Polycrystalline silicon	2x12 V / 45 W / Polycrystalline silicon
Μήκος (cm)	255	303
Πλάτος (cm)	110	84
Ύψος (cm)	108	102
Απόσταση από έδαφος (cm)	18.5	30
Βάρος (kg)	82.5	60.5

Ένα από τα πλέον κρίσιμα σημεία της σχεδίασης και της κατασκευής ήταν ο πίσω άξονας, ο οποίος είναι τελείως διαφορετικός από τους συνήθως χρησιμοποιούμενους στα τρίκυκλα του εμπορίου. Δεδομένου ότι οι δυο πίσω τροχοί θα πρέπει να μπορούν να περιστρέφονται με διαφορετικές μεταξύ τους ταχύτητες, κατασκευάστηκαν δυο ημιαξόνια, τα οποία τοποθετήθηκαν σε δυο σταθερά έδρανα μόνιμα συνδεδεμένα μεταξύ τους, ενώ ευθυγραμμίζονται μέσω ενός ενδιάμεσου περιστρεφόμενου στοιχείου (βλ Εικ. 2). Η διάταξη αυτή παρουσιάζει αυξημένο βάρος σε σχέση με τα συμβατικά τρίκυκλα, οπότε κρίθηκε απαραίτητη η τοποθέτηση διπλών δισκόφρενων, ενώ τοποθετήθηκε εκεί και το κιβώτιο των 7

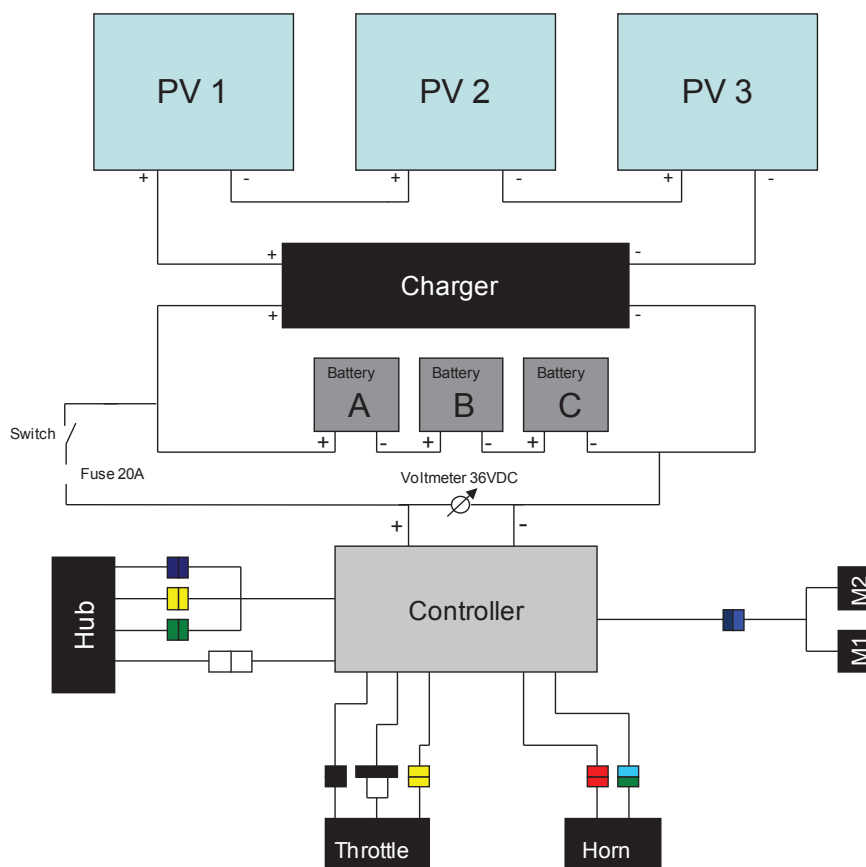
ταχυτήτων. Όλα τα παραπάνω στοιχεία είναι πρωτότυπα και δεν απαντώνται σε άλλα εμπορικά τρίκυκλα.



Εικόνα 2: Ο πίσω άξονας

Στον εμπρός τροχό τοποθετήθηκε ένα Hub Motor κατασκευής Golden Motor ©. Οι κινητήρες αυτού του τύπου είναι πολύ κοινοί σε e-bikes, scooters, και άλλα ελαφρά ηλεκτρικά οχήματα, επειδή δεν απαιτούν εξωτερικές βάσεις και μηχανικές συνδέσεις, έχουν χαμηλό βάρος, δεν χρειάζονται σύστημα μετάδοσης ενώ παρέχουν και ηλεκτρικό φρένο.

Στην Εικ. 3 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα που υλοποιήθηκε. Χρησιμοποιήθηκαν 3 Φ/Β στοιχεία 12V έκαστο, συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία συνδέθηκαν με τον φορτιστή (charger), ο οποίος συνδέθηκε απευθείας με τη συστοιχία των 3 μπαταριών, 12V/18Ah εκάστη. Στη συνέχεια συνδέθηκε ο ελεγκτής του κινητήρα (controller), ο κινητήρας και τα λοιπά περιφερειακά. Τέλος, προστέθηκαν μια γενική ασφάλεια και ένα κεντρικός διακόπτης με κλειδί.



Εικόνα 3: Το ηλεκτρικό κύκλωμα

### 2.3. ΔΙΑΤΑΞΗ Νο 2: ΤΡΙΚΥΚΛΟ ΜΕ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ ΠΙΣΩ

Στην υλοποίηση της δεύτερης διάταξης ακολουθήθηκαν οι ίδιες σχεδιαστικές αρχές με αυτές της πρώτης διάταξης (Εικ. 4), αλλά το όχημα έγινε γενικά μικρότερο και ελαφρύτερο (βλ. την δεύτερη στήλη του Πίνακα 1). Έτσι, κατασκευάστηκε ένα απολύτως νέας σχεδίασης αλουμινένιο πλαίσιο, στο οποίο προσαρμόστηκε ένα δερμάτινο κάθισμα αντί για σέλλα, προκειμένου να εξασφαλιστεί κάποια άνεση. Και πάλι επιλέχθηκε ένα 24V/500W Hub Motor της Golden Motor ©, το οποίο τοποθετήθηκε στον εμπρός τροχό και τροφοδοτείται από δυο μπαταρίες 12V/18Ah. Σημαντική καινοτομία αποτελεί η πίσω ανάρτηση, η οποία αποτελείται από δυο ανεξάρτητα ψαλίδια που εδράζονται σε έναν κεντρικό άξονα και σε δυο αμορτισέρ με ομοαξονικά σπειροειδή ελατήρια (Εικ. 5). Η διάταξη αυτή καταργεί τον πίσω άξονα και μαζί του την ύπαρξη πεντάλ, αλυσίδας και κιβωτίου ταχυτήτων.

Το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι το ίδιο με αυτό της προηγούμενης διάταξης, με τις απαραίτητες όμως διαφορές λόγω της τάσης 24 V που χρησιμοποιείται εδώ.



Εικόνα 4: Η δεύτερη διάταξη του ηλιακού τρικύκλου

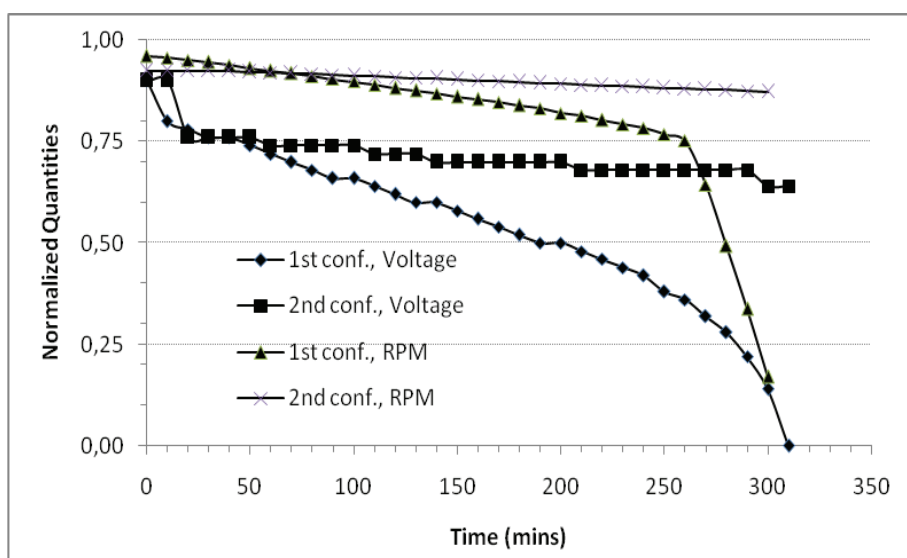


Εικόνα 5: Το σύστημα πίσω ανάρτησης

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά ελέγχθηκε η ενεργειακή συμπεριφορά των ηλεκτροκινητήρων, όταν λειτουργούν χωρίς φορτίο. Έτσι, οι κινητήρες συνδέθηκαν στους εμπρόσθιους τροχούς των δυο διατάξεων (προκειμένου να συμπεριληφθούν στις εργαστηριακές μετρήσεις οι απώλειες λόγω τριβών στον άξονα) αλλά αφέθηκαν να λειτουργούν εν κενώ (χωρίς οι τροχοί να ακουμπούν στο έδαφος). Οι κινητήρες τροφοδοτήθηκαν με πλήρως φορτισμένες μπαταρίες (SOC=100%) και λειτούργησαν σε πλήρη ισχύ έως ότου η τάση έπεσε κάτω από ένα αποδεκτό επίπεδο. Όλες οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν δυο φορές και στην Εικ. 6 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των δυο μετρήσεων, κανονικοποιημένοι ούτως ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμοι. Η κανονικοποίηση έγινε με βάση τις ακόλουθες τιμές:

- 1<sup>η</sup> διάταξη: Μέγιστη τάση = 38VDC, Ελάχιστη τάση = 33VDC, Μέγιστη περιστροφή = 350 rpm, Ελάχιστη περιστροφή = 250 rpm
- 2<sup>η</sup> διάταξη: Μέγιστη τάση = 27VDC, Ελάχιστη τάση = 22VDC, Μέγιστη περιστροφή = 220 rpm, Ελάχιστη περιστροφή = 120 rpm.



Εικόνα 6: Κατανάλωση των ηλεκτροκινητήρων εν κενώ (πλήρης ισχύς)

Είναι μάλλον προφανές ότι ο κινητήρας 24 VDC είναι πολύ πιο αποδοτικός από τον 36 VDC, δεδομένου ότι καταναλώνει λιγότερη από το 30% της διαθέσιμης ενέργειας σε διάστημα 4 ωρών τη στιγμή που ο 36 VDC καταναλώνει περίπου το 50%, όπως φαίνεται από την συμπεριφορά της τάσης. Τα ίδια παρατηρούνται όσον αφορά τις στροφές των κινητήρων, όπου ο 24 VDC κυμαίνεται πάνω από 90% καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων ενώ ο 36 VDC πέφτει κάτω από 70% μετά από 4 ½ ώρες. Το πλεονέκτημα που έχει ο κινητήρας 24 VDC όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποδοθεί στην πιο σύγχρονη τεχνολογία που ενσωματώνει, καθώς είναι σχεδόν 4 έτη νεώτερος του 36 VDC.

Πριν ελεγχθεί η συμπεριφορά των οχημάτων στο δρόμο, κρίθηκε απαραίτητο να εκτιμηθεί τόσο η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β πλαισίων όσο και αυτή του συνολικού συστήματος. Έτσι, μετρήθηκε αρχικά ο χρόνος φόρτισης των μπαταριών από τα Φ/Β, όταν αυτές έχουν αποφορτιστεί πλήρως (SOC=40%) και υπολογίστηκε ως ακολούθως:

- 1<sup>η</sup> διάταξη (36VDC): Πλήρης ηλιοφάνεια = 215 min, Συνεχόμενη συννεφιά = 320 min, Μικτές συνθήκες = 260 min
- 2<sup>η</sup> διάταξη (24VDC): Πλήρης ηλιοφάνεια = 190 min, Συνεχόμενη συννεφιά = 285 min, Μικτές συνθήκες = 230 min.

Φαίνεται ότι η δεύτερη διάταξη απαιτεί περίπου 11% λιγότερο χρόνο φόρτισης σε όλες τις περιπτώσεις. Δεδομένου ότι τόσο τα Φ/Β πλαίσια όσο και οι μπαταρίες είναι ακριβώς του ίδιου τύπου, η βελτίωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στον charger, ο οποίος στη 2<sup>η</sup> διάταξη είναι περισσότερο εξελιγμένος όσον αφορά στη διαχείριση των φορτίων. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή τους, τα Φ/Β έχουν απόδοση 14% ενώ οι κινητήρες περισσότερο από 80%. Οι ωμικές απώλειες στα ενδιάμεσα ηλεκτρονικά δεν είναι σημαντικές, λόγω της σχετικά χαμηλής έντασης του ρεύματος.

Προκειμένου ο έλεγχος του οχήματος στο δρόμο να είναι πλήρης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι δυνατές συνθήκες κίνησης. Έτσι, θεωρήθηκαν εδώ τρία πρότυπα χρήσης: (α) αδιάκοπη λειτουργία σε μέγιστη δυνατή ταχύτητα, (β) τυπική αστική χρήση και (γ) τυπική μετακίνηση εργαζόμενου. Το πρώτο αφορά σε αδιάκοπη χρήση με μέγιστη δυνατή ταχύτητα έως ότου η ενέργεια των μπαταριών πέσει κάτω από το αποδεκτό επίπεδο ασφαλείας. Το δεύτερο προσομοιάζει την καθημερινή χρήση σε αστικές συνθήκες, όπου υπάρχουν διαδρομές μικρής σχετικά απόστασης και συχνές στάσεις διαφορετικής χρονικής διάρκειας. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι μπαταρίες ήταν αρχικά πλήρως φορτισμένες (SOC=100%) Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι αντικειμενικά, ελέγχθηκαν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί διαδρομών και στάσεων. Το τρίτο πρότυπο προσομοιάζει την τυπική χρήση του οχήματος από ένα εργαζόμενο, ο οποίος θεωρείται ότι κατά μέσο όρο εργάζεται 8 ώρες και διανύει απόσταση περίπου 8 km προς και από την εργασία του [12].

Προφανώς όλες οι μετρήσεις αυτές εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες (ηλιοφάνεια) και τη γεωμορφολογία (υψομετρικές διαφορές). Επιλέχθηκε μια σχετικά επίπεδη πόλη (συγκεκριμένα το Αγρίνιο) όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις, προκειμένου να εξαλειφθεί η επίδραση του παράγοντα της μορφολογίας του εδάφους. Όσον αφορά στις κλιματικές συνθήκες, οι μετρήσεις για κάθε πρότυπο χρήσης πάρθηκαν 4 φορές, μια για κάθε εποχή του έτους. Τέλος, να σημειωθεί ότι όλες οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν 2 φορές και οι τιμές που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στο 1<sup>ο</sup> πρότυπο χρήσης. Είναι σαφές ότι η δεύτερη διάταξη υπερτερεί σημαντικά, καλύπτοντας 37.8 % μεγαλύτερη απόσταση (22.8 km αντί 16.55 km), ενώ οι μέγιστες και οι μέσες ταχύτητες είναι πρακτικώς οι ίδιες και στις δυο διατάξεις.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα συνεχούς χρήσης		
	1 <sup>η</sup> διάταξη	2 <sup>η</sup> διάταξη
Απόσταση (Km)	16.55	22.8
Μέση ταχύτητα (km/h)	17.6	17.4
Μέγιστη ταχύτητα (km/h)	29.5	28.5

Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στα άλλα δυο πρότυπα (Πίνακες 3 & 4), όπου και πάλι η 2<sup>η</sup> διάταξη εμφανίζεται 38%καλύτερη. Η καλύτερη αυτή συμπεριφορά αποδίδεται στο χαμηλότερο βάρος και στην καλύτερη διαχείριση ενέργειας που παρουσιάζει η διάταξη αυτή. Στα αποτελέσματα τυπικής μετακίνησης εργαζόμενου είναι αξιοσημείωτο ότι η δεύτερη διάταξη παρουσιάζει επαρκώς μικρή κατανάλωση, έτσι ώστε να παραμένει στην μπαταρία ενέργεια ικανή να κινήσει το όχημα την επόμενη μέρα, ακόμη και όταν υπάρχει συννεφιά. Αντιθέτως, η διάταξη με τον κινητήρα των 36 VDC αποτυγχάνει να επιστρέψει τις

συννεφιασμένες μέρες, καταδεικνύοντας έτσι ακόμη περισσότερο την υπεροχή της 2<sup>ης</sup> διάταξης.

	1 <sup>η</sup> διάταξη	2 <sup>η</sup> διάταξη
Απόσταση (Km)	18.10	18.10
Μέση ταχύτητα (km/h)	17.21	17.55
Μέγιστη ταχύτητα (km/h)	30.50	30.10
Ενέργεια που παραμένει στην μπαταρία (%)	36.67	59.78

	1 <sup>η</sup> διάταξη		2 <sup>η</sup> διάταξη	
	Ηλιόλουστη μέρα	Συννεφιασμένη μέρα	Ηλιόλουστη μέρα	Συννεφιασμένη μέρα
Απόσταση (Km)	16.34	14.63	17.10	17.60
Μέση ταχύτητα (km/h)	14.70	15.45	18.65	15.85
Μέγιστη ταχύτητα (km/h)	28.70	29.30	28.50	28.70
Ενέργεια που παραμένει στην μπαταρία (%)	41.20	30	60.30	39.05

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε η σχεδίαση ενός πειραματικού ηλιακού οχήματος, όπου χρησιμοποιούνται Φ/Β για την φόρτιση των μπαταριών. Έτσι σχεδιάστηκε ένα τρίκυκλο με κινητήρα στον εμπρός τροχό, το οποίο δεν συνδέεται με το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν δυο διατάξεις: (α) μια με κινητήρα 36 VDC /500W με πίσω ημιαξόνια, και (β) μια με κινητήρα 24 VDC /500W με ανεξάρτητα ψαλίδια πίσω. Το όχημα ελέγχθηκε για τρία διαφορετικά πρότυπα χρήσης: (α) αδιάκοπη λειτουργία σε μέγιστη δυνατή ταχύτητα, (β) τυπική αστική χρήση και (γ) τυπική μετακίνηση εργαζόμενου. Όλες οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν ανταπεξήλθαν επιτυχώς στους ελέγχους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάταξη 24V υπερτερεί της διάταξης 36 V, μιας και καλύπτει μεγαλύτερη απόσταση με λιγότερη ενέργεια. Η καλύτερη συμπεριφορά της δεύτερης διάταξης αποδίδεται στο χαμηλότερο βάρος του οχήματος και στον περισσότερο εξελιγμένο controller, οπότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αυτονομία. Επιπλέον, και οι δυο διατάξεις απέδειξαν ότι είναι εφικτή η αστική μετακίνηση με ηλεκτρικά οχήματα που δεν χρειάζονται σύνδεση με το δίκτυο.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πολλές ευχαριστίες στους κ.κ. Δημήτρη Πατερέλη, Δημήτρη Ζαγγάνα, Βαλάντη Παταρόκα, Νίκο Φιλιάνακη, Αλέξανδρο Χανδόλια και Γιώργο Ψυλλάκη για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Επίσης, πολλές ευχαριστίες στον Δρ. Γιώργο Προδρομίδη για την γενική βοήθεια που παρείχε όποτε χρειάστηκε.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Dunn, S., 2002, "Hydrogen futures: toward a sustainable energy system", *Int. J. Hydrog. Energ.*, 27, pp. 235–264.
- [2] Cairns, E.J., 1992, "A new mandate for energy conversion: zero emission (electric) vehicles", *Proc. IEEE 35TH International Power Sources Symposium*, Cherry Hill, NJ, USA, pp. 37-65.
- [3] Chen, C.C., 2007, "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proc. of IEEE*, 95, pp. 704-718.
- [4] Roche, D.M., Schinckel, A.E.T., Storey, J.W., Humphris, C.P., Guelden, M.R., 1997, "Speed of light", *Photovoltaics Special Research Centre*, School of Electrical Engineering, The University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia.
- [5] Gillespie, T.D., 1992, "Fundamentals of vehicle dynamics" *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, USA.
- [6] Robert Bosch GmbH, 2011, "Automotive Handbook (8<sup>th</sup> ed.)", Bentley Publishers, Stuttgart, Germany.
- [7] Pudney, P., Howlett, P., 2002, "Critical speed control of a solar car", *Optim. Eng.*, 3 pp. 97-107.
- [8] Hui-Min, W., Xuan-Zuo, L., Qian-Cheng, L., 2013, "Green traffic tool innovation-design and implementation of a solar car prototype" *App. Mech. Mat.*, 281, pp. 221-224.
- [9] Ozawa, H., Nishikawa, S., Higashida, D., 1998, "Development of aerodynamics for a solar race car" *JSAE Rev.*, 19, pp. 343-349.
- [10] Hammad, M., Khatib, T., 1996, "Energy parameters of a solar car for Jordan", *Energ. Conv. Manag.*, 37, pp. 1695-1702.
- [11] Mulhall, P., Lukic, S.M., Wirasingha, S.G., Lee, Y.-J., Emadi, A., 2010, "Solar-assisted electric auto rickshaw three-wheeler", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 59, pp. 2298-2307.
- [12] Gjoen, H., Hard, M., 2002, "Cultural politics in action: Developing user scripts in relation to the electric vehicle", *Sci. Tech. Human Val.*, 27, pp. 262-281.



## ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΒΟΛΟΕΙΔΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΚΥΨΕΛΙΔΑ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ

Γεράσιμος Α. Παγκράτης, Χαράλαμπος Α. Χρυσίνας, Νίκος Ε. Στεφανάκης\*,  
Ανδρέας Γ. Μπουντουβής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Ηλιακής Μηχανικής  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

\* Τηλ.: 210-7723296, email: nstefa@chemeng.ntua.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν σήμερα μία ώριμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αν και τα τελευταία χρόνια το κόστος παραγωγής των φωτοβολταϊκών κυψελίδων έχει μειωθεί δραστικά, απαιτείται περαιτέρω μείωση του κόστους ώστε τα φωτοβολταϊκά να είναι οικονομικά βιώσιμα. Αυτός ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί, μεταξύ άλλων, με συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα, στα οποία κατάλληλο οπτικό σύστημα συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε ειδικές φωτοβολταϊκές κυψελίδες υψηλού βαθμού απόδοσης. Στην παρούσα εργασία διερευνάται ένα στοιχείο (module) συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος στο οποίο ένα ελλειπτικό παραβολοειδές κάτοπτρο (ανακλαστήρας) συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε τραπεζοειδή ομογενοποιητή και καταλήγει σε συγκεντρωτική φωτοβολταϊκή κυψελίδα, η οποία είναι προσαρτημένη σε κατάλληλη επιφάνεια απορροής θερμότητας. Η ανάλυση του οπτικού τμήματος γίνεται με την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo Ray Tracing, μέσω της οποίας υπολογίζεται ο γεωμετρικός και οπτικός λόγος συγκέντρωσης και εξετάζεται και η επίδραση της γεωμετρίας του ομογενοποιητή στις οπτικές απώλειες. Η ανάλυση του συστήματος παθητικής ψύξης της φωτοβολταϊκής κυψελίδας γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω της οποίας διερευνάται η επίδραση της γεωμετρίας της ψύκτρας στην απόδοση του συστήματος. Τέλος, με την κατάλληλη συνδυαστική εφαρμογή των δύο μεθόδων υπολογίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συγκεκριμένου συστήματος.

Λέξεις Κλειδιά: Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Οπτική Ανάλυση, Θερμική Ανάλυση, Προσομοίωση Λειτουργίας

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αν και η ανάπτυξη συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (ΣΦΒ) συστημάτων έχει μακρά ιστορία [1], μόνο τα τελευταία χρόνια αυτά κατάφεραν να εισέλθουν στην αγορά των φωτοβολταϊκών. Τα πρώτα ΣΦΒ συστήματα που αναπτύχθηκαν λειτουργούσαν με σχετικά χαμηλό λόγο συγκέντρωσης (<100ήλιους) και χρησιμοποιούσαν φωτοβολταϊκές κυψελίδες πυριτίου. Τα συστήματα αυτά ήταν εμπορικά μη ανταγωνιστικά εξαιτίας του υψηλού κόστους και της ανεπαρκώς αποδεδειγμένης αξιοπιστίας τους. Η τεχνολογία των ΣΦΒ ανέκτησε το επενδυτικό ενδιαφέρον στα τέλη της δεκαετίας του 1990, με την εκτεταμένη ανάπτυξη των πολυστρωματικών (multi-junction) κυψελίδων, οι αποδόσεις των οποίων ξεπερνούν κατά πολύ τις αντίστοιχες αποδόσεις των φωτοβολταϊκών κυψελίδων πυριτίου αγγίζοντας ακόμα και το 42% [2],[3].

Συγκεντρώσεις της τάξης των 100 με 200ήλιους είχαν θεωρηθεί ως το ανώτερο λειτουργικό όριο συγκέντρωσης για τα ΣΦΒ συστήματα, εξαιτίας περιορισμών σχετιζόμενων με τις σειριακές αντιστάσεις των κυψελίδων και την απορροφή θερμότητας [1]. Παρόλα αυτά τα σύγχρονα ΣΦΒ μπορούν και λειτουργούν σε συνθήκες συγκέντρωσης κοντά στους 500 ήλιους, ενώ η τεχνολογική τάση είναι προς συστήματα υψηλότερων ηλιακών συγκεντρώσεων [4],[5]. Δεδομένου ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές κυψελίδες είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η επίτευξη υψηλής ηλιακής συγκέντρωσης συνεπάγεται μικρότερη επιφάνεια φωτοβολταϊκού για την παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δραστική μείωση του κόστους, καθότι οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες αντιπροσωπεύουν περίπου το 30-40% του συνολικού κόστους ενός τυπικού ΣΦΒ συστήματος.

Η λειτουργική επίτευξη υψηλών συγκεντρώσεων προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλου συστήματος απορροής της θερμότητας από τις φωτοβολταϊκές κυψελίδες. Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελίδων επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της, μειώνοντας την μέσω ενός αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας [1]. Επιπλέον, υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές καταπονήσεις, όπως για παράδειγμα παραμορφώσεις της φωτοβολταϊκής επιφάνειας, αποκόλληση της εμπρόσθιας επίστρωσης, δημιουργία μικρο-ρωγμών στην κυψελίδα κ.α. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται συνήθως στους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής των υλικών που χρησιμοποιούνται για να συνθέσουν την πολυστρωματική δομή της κυψελίδας [6].

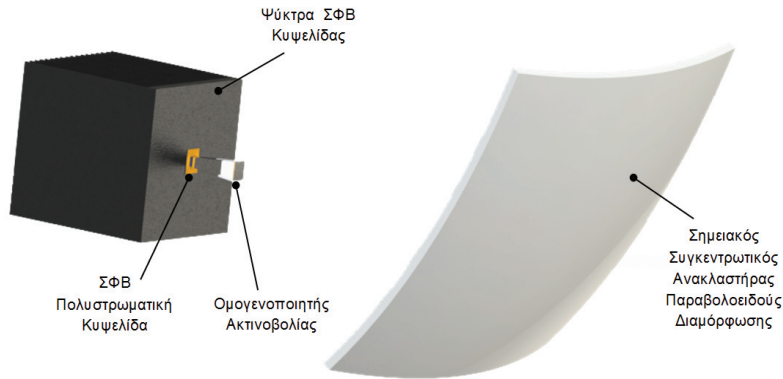
Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ένα στοιχείο (module) συγκεντρωτικού συστήματος υψηλής συγκέντρωσης στο οποίο ένα ελλειπτικό παραβολοειδές κάτοπτρο συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε τραπεζοειδή ομογενοποιητή. Η ομογενοποιημένη ακτινοβολία καταλήγει σε πολυστρωματική φωτοβολταϊκή κυψελίδα, η οποία είναι προσαρτημένη σε κατάλληλη επιφάνεια απορροής θερμότητας (ψύκτρα). Σκοπός της εργασίας είναι η εφαρμογή μιας ολιστικής μεθοδολογίας σχεδιασμού και ανάλυσης του συγκεκριμένου συστήματος με στόχο τη διερεύνηση της λειτουργίας του και την αποτίμηση της απόδοσης του. Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα εφαρμοστεί και σε αντίστοιχο ΣΦΒ σύστημα που θα αναπτυχθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011: ΠΡΩΤΕΑΣ ΗΛΙΑΚΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗ/11ΣΥΝ\_7\_1500».

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

### 2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα που εξετάστηκε αποτελείται από ένα ελλειπτικό παραβολοειδή καθρέπτη (ανακλαστήρα) διαστάσεων 400x400mm, ο οποίος συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία σε εστιακή απόσταση 310mm. Στην εστία συγκέντρωσης βρίσκεται κατάλληλα τοποθετημένος γυάλινος τραπεζοειδής ομογενοποιητής (επιφάνεια εισόδου: 20x20mm,

επιφάνεια εξόδου: 10x10mm) ολικής εσωτερικής ανάκλασης, ο οποίος διαχέει την ηλιακή ακτινοβολία σε πολυστρωματική κυψελίδα διαστάσεων 10x10mm. Η κυψελίδα είναι προσαρτημένη σε κατάλληλη επιφάνεια απορροής θερμότητας η οποία διαμορφώνεται ως μεταλλική ψύκτρα επάλληλων περυγίων. Το σύστημα σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα τρισδιάστατης στερεάς μοντελοποίησης SOLIDWORKS® και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση των στοιχείων του συστήματος

## 2.2. ΟΠΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Για την ανάλυση του συστήματος συγκέντρωσης εφαρμόστηκε στο τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο οπτική προσομοίωση ιχνηλάτησης (ray tracing) με το πρόγραμμα TRACEPRO®. Με τη μέθοδο της ιχνηλάτησης πραγματοποιείται εκπομπή ακτίνων από κατάλληλη πηγή, οι οποίες προσπίπτουν στο οπτικό σύστημα, και λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι ανάκλασης, διαπερατότητας, σκίασης κ.α. [7]. Για τη προσομοίωση των φαινομένων της σκέδασης και της περίθλασης του φωτός, καθώς και για τη κατανομή των ακτίνων της πηγής εφαρμόζεται η στοχαστική μέθοδος Monte Carlo. Για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης η πηγή διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να πραγματοποιεί γεωμετρική κατανομή ακτίνων η οποία θα λαμβάνει υπόψη και τη φαινόμενη γωνία του ηλιακού δίσκου από την Γή. Για τον περιορισμό του στατιστικού σφάλματος σε τιμές κάτω του 1% επιλέχθηκε μεγάλος αριθμός ακτίνων (>10,000). Η ανακλαστική επιφάνεια του ανακλαστήρα ορίστηκε να είναι τυπικός καθρέπτης, ενώ το υλικό κατασκευής του ομογενοποιητή επιλέχθηκε να είναι ειδικό οπτικό γυαλί N-BK7.

Για την αποτίμηση της σχεδίασης υπολογίστηκαν οι απώλειες των οπτικών υποσυστημάτων καθώς και ο λόγος συγκέντρωσης (concentration ratio) της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο τελευταίος διακρίνεται στο γεωμετρικό  $C_G$  και στον οπτικό  $C_o$  λόγο συγκέντρωσης, ο υπολογισμός των οποίων δίνεται από τις σχέσεις:

$$C_G = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

$$C_o = \frac{1}{A_2} \cdot \frac{\int I_2 dA_2}{I_1} \quad (2)$$

όπου,  $A_1$  η επιφάνεια εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας,  $A_2$  η επιφάνεια του τελικού αποδέκτη,  $I_1$  η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια εισόδου και  $I_2$  η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του τελικού αποδέκτη.

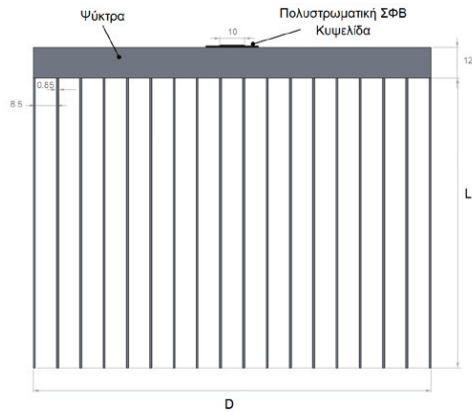
Στα πλαίσια της μελέτης πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης του μήκους του ομογενοποιητή στις απώλειες του οπτικού συστήματος.

### 2.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΚΥΨΕΛΙΔΑΣ

Η θερμική προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων του SOLIDWORKS® και συγκεκριμένα με το πρόσθετο θερμικής προσομοίωσης. Κατά το σχεδιασμό της πολυστρωματικής φωτοβολταϊκής κυψελίδας ελήφθησαν υπόψη όλα τα στρώματα υλικών που την συνθέτουν και τους αποδόθηκαν οι κατάλληλες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 1 [8]. Η σχεδίαση του συστήματος ψύξης έγινε με σημείο αναφοράς μια τυπική μεταλλική ψύκτρα ηλεκτρονικών κυκλωμάτων βασισμένη στην αρχή της παθητικής ψύξης (passive cooling). Μια εγκάρσια τομή του συστήματος εικονίζεται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1: Τιμές θερμικής αγωγιμότητας των υλικών σύνθεσης της ΦΒ κυψελίδας

Υλικό/ Στρώση	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Conformal Coating	0.18
Solar Cell	60
Sn95Ag5 Solder	37.8
Copper	385
Alumina (96% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	25



Σχήμα 2: Εγκάρσια τομή συστήματος παθητικής ψύξης της φωτοβολταϊκής κυψελίδας

Κατά τη θερμική προσομοίωση ορίστηκε κατάλληλη πηγή θερμότητας σχετιζόμενη με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και αποδόθηκαν κατάλληλες τιμές παραμέτρων για τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας που υφίστανται στο πρόβλημα ως εξής:

- Ακτινοβολία: από την εξωτερική επιφάνεια του συστήματος ψύξης προς το περιβάλλον με συντελεστή εκπομπής  $\epsilon=0.7$ .
- Συναγωγή: από την εξωτερική επιφάνεια του συστήματος ψύξης και από τα πτερύγια του προς το περιβάλλον. Ο μέσος συντελεστής συναγωγής που χρησιμοποιήθηκε είναι  $h=4.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Αγωγή: ανάμεσα στα στρώματα που αποτελούν την φωτοβολταϊκή κυψελίδα και στην συνέχεια στη ψύκτρα. Οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας λόγω αγωγής που χρησιμοποιήθηκαν για τα στρώματα της κυψελίδας αναφέρονται στον Πίνακα 1, ενώ για την ψύκτρα χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του Αλουμινίου-6063,  $k=218 \text{ W/mK}$ .

Στα πλαίσια της μελέτης της ψύκτρας πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της διάστασης  $D$  της βάσης και του μήκους  $L$  των πτερυγίων στη θερμοκρασία  $T_c$  της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Η τελευταία θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των λειτουργικών ορίων  $-40^\circ\text{C}$  και  $100^\circ\text{C}$  [9]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη έγινε βάσει τυπικών ακραίων τιμών

προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ήτοι  $I = 100\text{W/cm}^2$  και  $T_a=40^\circ\text{C}$ .

#### 2.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Τα σημειακά συγκεντρωτικά συστήματα πρέπει να παρακολουθούν χρονικά την πορεία του ήλιου στον ουράνιο θόλο, ενώ συγκεντρώνουν μόνο την άμεση (beam) συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να υπολογιστεί σε ωριαία βάση,  $I_T$ , μέσω της εξίσωσης:

$$I_T = \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_b(\omega) d\omega \cdot R_b(\omega) d\omega \quad (3)$$

όπου,  $\omega$  είναι η ωριαία γωνία του ήλιου σε μοίρες,  $I_b$  η άμεση ακτινοβολία,  $R_b$  γεωμετρικός λόγος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την οριζόντια ακτινοβολία.

Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των ανωτέρω μεγεθών παρατίθεται στο βιβλίο των Duffie και Beckman [10] και προαπαιτεί τη γνώση της συνολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, η οποία είναι ευρέως διαθέσιμη στα αρχεία των μετεωρολογικών σταθμών. Στην παρούσα μελέτη, έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες μηνιαίες τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας από τα αρχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την περιοχή της Αθήνας ( $37^\circ 58'N$ ,  $23^\circ 43'E$ ) [11].

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της ΦΒ κυψελίδας ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_{PV} = I_T \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot n_{PV} \cdot (1 - \lambda) \quad (4)$$

όπου,  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  είναι οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή αντίστοιχα,  $\lambda$  ένας αδιάστατος συντελεστής απωλειών της ΦΒ κυψελίδας συμπεριλαμβανομένων των απωλειών από τις συρματώσεις, των απωλειών από την σκόνη και τις αστοχίες του συστήματος παρακολούθησης του ήλιου.

Η μέση απόδοση της συγκεντρωτικής κυψελίδας  $n_{PV}$ , είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της,  $T_c$ :

$$n_{PV} = n_{ref} \cdot [1 - \beta_p \cdot (T_c - T_{ref})] \quad (5)$$

όπου,  $n_{ref}$  είναι η απόδοση της κυψελίδας σε θερμοκρασία αναφοράς  $T_{ref}$  ( $= 25^\circ\text{C}$ ) και σε έκθεση ακτινοβολίας  $50\text{W/cm}^2$ , και  $\beta_p$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας της κυψελίδας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές  $n_{ref} = 40\%$  και  $\beta_p = 0.06\%/^\circ\text{C}$  [9].

Επειδή η ενεργειακή προσομοίωση θα εκτελεσθεί σε ωριαία βάση, θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση που πρότεινε ο Erbs και οι συνεργάτες του [11] για την αναγωγή δεδομένων μέσης-μηνιαίας ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $T_{a,d}$  σε μέσες-μηνιαίες ωριαίες τιμές  $T_{a,h}$ .

$$T_{a,h} = T_{a,d} + (25.8 \cdot K_T - 5.21) \cdot [0.4632 \cos(t - 3.805) + 0.0984 \cos(2t - 0.360) + 0.0168 \cos(3t - 0.822) + 0.0138 \cos(4t - 3.513)] \quad (6)$$

$$t = \frac{2\pi \cdot (h - 1)}{24}, \quad \begin{matrix} h = 1 \rightarrow 1:00 \\ h = 24 \rightarrow 24:00 \end{matrix} \quad (7)$$

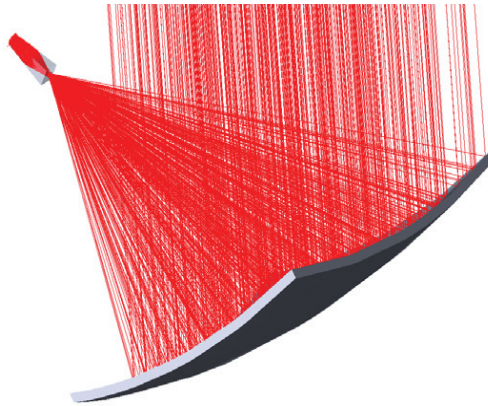
Τα αποτελέσματα της ενεργειακής παραγωγής θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα από ένα απλό φωτοβολταϊκό σύστημα πολυκρυσταλλικού πυριτίου που παρακολουθεί τον ήλιο. Η μεθοδολογία υπολογισμού και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συμβατικού φωτοβολταϊκού συστήματος περιγράφονται στην εργασία [12].

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

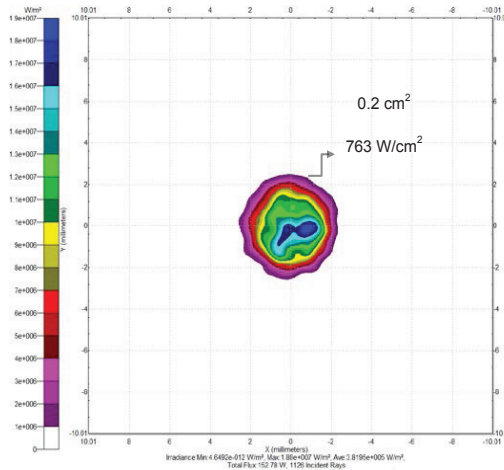
#### 3.1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ, ΟΠΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Από την οπτική προσομοίωση Ray Tracing προκύπτουν χάρτες ακτινοβολίας για κάθε επιφάνεια του οπτικού συστήματος από την ανάγνωση των οποίων προκύπτει η απόδοση του συστήματος και οι λόγοι συγκέντρωσης. Στο Σχήμα 3 εικονίζεται η εφαρμογή της ιχνηλάτησης ακτίνων στο οπτικό συγκεντρωτικό σύστημα, ενώ στο Σχήμα 4 δίνεται ο χάρτης ακτινοβολίας στο επίπεδο της εστίας. Τα αποτελέσματα αφορούν μήκος ομογενοποιητή 65mm. Οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή υπολογίζονται αντίστοιχα  $\alpha_1 = 95.5\%$  και  $\alpha_2 = 80.6\%$ . Ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης του ανακλαστήρα υπολογίζεται σε 8,000 και ο οπτικός σε 7,639.

Προσπίπτουσα Ακτινοβολία 1,000 W/m<sup>2</sup>



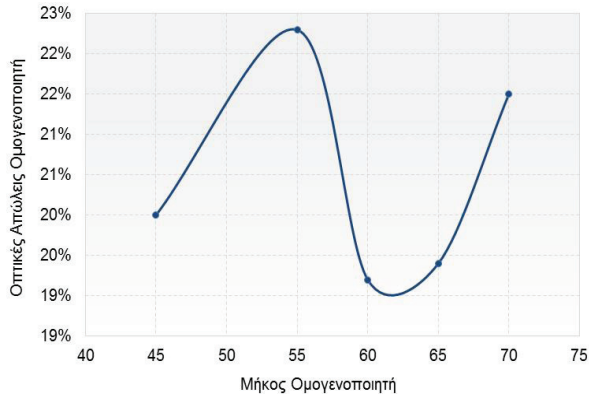
Σχήμα 3: Εφαρμογή προσομοίωσης Ray Tracing στο οπτικό σύστημα



Σχήμα 4: Χάρτης ακτινοβολίας στην είσοδο του ομογενοποιητή

### 3.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΤΗ

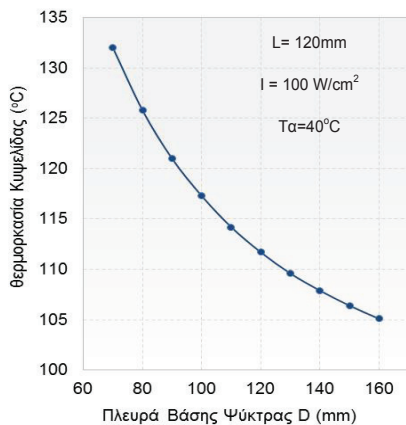
Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης του μήκους του ομογενοποιητή στην οπτική απόδοση. Τα αποτελέσματα εικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 5. Για τη δεδομένη σχεδίαση του ανακλαστήρα οι λιγότερες οπτικές απώλειες (κοντά στο 19%) εμφανίζονται για μήκος ομογενοποιητή περίπου ίσο με 62mm. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή του διαγράμματος, η οποία υποδεικνύει ότι π.χ. για μήκος ομογενοποιητή ίσο με 45mm, οι απώλειες μπορεί εμφανίζονται κατά μια ποσοστιαία μονάδα μεγαλύτερες (20%), όμως το μήκος εμφανίζεται κατά 27% μειωμένο γεγονός που συσχετίζεται άμεσα με το κόστος του ομογενοποιητή.



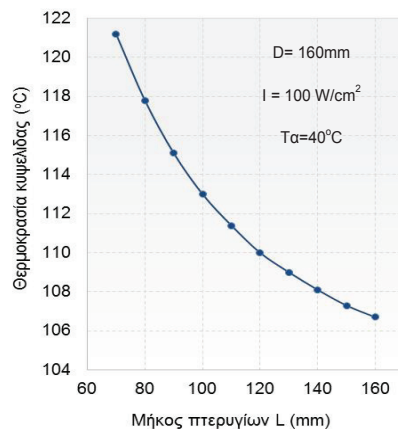
Σχήμα 5: Επίδραση του μήκους του ομογενοποιητή στις οπτικές απώλειες

### 3.3. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΨΥΚΤΡΑΣ

Αρχικά επιλέχθηκε μία τυπική γεωμετρία ψύκτρας για κοινά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραμετρική θερμική ανάλυση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη μεταβολή της διάστασης της βάσης, D.



Σχήμα 6: Επίδραση της διάστασης D στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας



Σχήμα 7: Επίδραση του μήκους L στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας

Για το δεδομένο πρόβλημα και για μήκος πτερυγίων ίσο με 120mm, η θερμοκρασία της κυψελίδας μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το D σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 6. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τη μεταβολή του μήκους των πτερυγίων (για D=160mm) και τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 7

Όπως γίνεται αντιληπτό, για την κατάλληλη επιλογή της ψύκτρας των φωτοβολταϊκών θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο παράγοντας του κόστους, κάτι το οποίο απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση με τεχνοοικονομικούς όρους.

### 3.4. ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Βάσει της συνδυαστικής εφαρμογής των δύο μεθόδων ανάλυσης, εκτελείται ενεργειακή προσομοίωση ολόκληρου του module. Στη συγκεκριμένη μελέτη ο ομογενοποιητής επιλέχθηκε να έχει μήκος 60mm, ενώ για τη ψύκτρα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές D=160mm, L=160mm. Οι οπτικές αποδόσεις του ανακλαστήρα και του ομογενοποιητή είναι αντίστοιχα  $\alpha_1 = 95.5\%$  και  $\alpha_2 = 80.8\%$ . Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας υπολογίζεται από την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων για χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $I_T$  και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος  $T_a$ . Οι τιμές αυτές υπολογίζονται ως μέσες-μηνιαίες τιμές σε ωριαία βάση σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.3. Τέλος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος με την εφαρμογή των Εξισώσεων 4 και 5.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τη θερμοκρασία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψελίδας δίνονται στο Πίνακα 2, ενώ στο Πίνακα 3 δίνονται οι τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, στο Πίνακα 4 δίνονται τα αποτελέσματα της μηνιαίας παραγωγής ενέργειας του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος (ανοιγμένα στην επιφάνεια εισόδου του ανακλαστήρα) και συγκρίνονται με την ενεργειακή παραγωγή συμβατικού συστήματος πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού που παρακολουθεί τον ήλιο (με την ενέργεια ανοιγμένη στη φωτοβολταϊκή επιφάνεια). Η σύγκριση καταδεικνύει ότι το συγκεντρωτικό σύστημα παράγει 37.1% περισσότερη ετήσια ενέργεια από το ισοδύναμη επιφάνειας συμβατικό φωτοβολταϊκό.

Πίνακας 2: Μέσες-μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψελίδας (°C)

Μήνας	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ιανουάριος	-	-	-	23.6	30.4	36.0	39.8	41.5	41.1	38.6	34.4	28.4	-	-	-
Φεβρουάριος	-	-	17.3	23.8	29.7	34.5	38.2	39.3	39.0	37.1	33.3	28.2	22.0	-	-
Μάρτιος	-	-	25.8	32.3	38.4	43.3	46.7	48.4	48.3	46.4	42.6	37.7	31.7	-	-
Απρίλιος	-	29.4	34.1	39.9	45.5	50.2	53.5	55.2	55.1	53.7	50.4	46.1	40.6	34.4	-
Μάιος	36.8	41.9	47.4	53.2	58.7	63.5	66.9	68.7	68.9	67.5	64.4	60.3	55.4	48.9	42.7
Ιούνιος	36.8	50.5	55.9	61.5	67.0	71.7	75.1	77.0	77.3	76.1	73.1	69.2	64.0	58.0	51.8
Ιούλιος	51.0	56.4	62.2	62.0	74.5	79.6	83.3	85.9	85.7	84.3	81.8	76.8	71.1	64.6	57.8
Αύγουστος	-	54.2	60.6	67.9	74.2	79.8	84.4	86.0	86.7	84.5	81.1	76.4	69.5	62.2	-
Σεπτέμβριος	-	39.9	47.0	54.2	61.4	66.8	70.8	73.3	72.8	71.2	67.0	61.9	54.8	47.3	-
Οκτώβριος	-	-	36.0	43.7	51.0	56.9	61.1	63.1	62.9	60.6	56.4	50.4	43.0	-	-
Νοέμβριος	-	-	-	30.8	37.7	43.3	47.2	49.1	48.7	46.2	41.9	36.0	-	-	-
Δεκέμβριος	-	-	-	23.4	30.3	35.7	39.4	41.2	40.7	38.3	33.8	28.0	-	-	-



Πίνακας 3: Μέσες-μηνιαίες τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό συστήματα (Wh ανά τετραγωνικό εκατοστό φβ)

Μήνας	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Ιανουάριος	-	-	-	8.82	12.23	14.81	16.43	16.97	16.41	14.79	12.20	8.80	-	-	-
Φεβρουάριος	-	-	5.14	8.54	11.43	13.63	15.00	15.47	14.99	13.61	11.40	8.51	5.13	-	-
Μάρτιος	-	-	9.49	12.79	15.59	17.73	19.06	19.51	19.04	17.70	15.55	12.75	9.46	-	-
Απρίλιος	-	9.42	12.55	15.45	17.91	19.78	20.95	21.34	20.93	19.74	17.86	15.39	12.51	9.39	-
Μάιος	11.64	14.61	17.55	20.27	22.58	24.34	25.43	25.79	25.40	24.28	22.50	20.18	17.47	14.54	11.60
Ιούνιος	14.30	17.07	19.88	22.48	24.69	26.37	27.41	27.75	27.37	26.30	24.60	22.38	19.78	16.99	14.17
Ιούλιος	16.28	19.38	22.46	25.39	27.70	29.52	30.65	31.01	30.61	29.44	27.57	25.16	22.34	19.28	16.21
Αύγουστος	-	18.10	21.64	24.90	27.67	29.77	31.06	31.49	31.01	29.68	27.55	24.77	21.52	18.01	-
Σεπτέμβριος	-	11.79	15.65	19.22	22.24	24.54	25.96	26.43	25.93	24.47	22.16	19.12	15.58	11.74	-
Οκτώβριος	-	-	11.40	15.38	18.77	21.34	22.94	23.47	22.91	21.29	18.70	15.32	11.35	-	-
Νοέμβριος	-	-	-	10.07	13.48	16.08	17.70	18.24	17.68	16.05	13.45	10.04	-	-	-
Δεκέμβριος	-	-	-	7.83	11.23	13.81	15.42	15.97	15.41	13.79	11.20	7.81	-	-	-

Πίνακας 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα και από συμβατικό φωτοβολταϊκό σύστημα

Μήνας	Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας	
	Συγκεντρωτικό ΦΒ Σύστημα (kWh ανά τετραγωνικό μέτρο ανακλαστήρα)	Συμβατικό ΦΒ Σύστημα (kWh ανά τετραγωνικό μέτρο φωτοβολταϊκού)
Ιανουάριος	23.53	16.81
Φεβρουάριος	21.50	16.33
Μάρτιος	32.68	24.05
Απρίλιος	39.98	28.15
Μάιος	57.77	35.64
Ιούνιος	62.16	36.27
Ιούλιος	72.27	40.02
Αύγουστος	65.32	36.19
Σεπτέμβριος	49.65	29.90
Οκτώβριος	39.31	24.98
Νοέμβριος	24.90	17.25
Δεκέμβριος	21.79	15.59
<b>ΕΤΗΣΙΟ ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>511</b>	<b>321</b>

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια ολιστική προσέγγιση για την υπολογιστική ανάλυση συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη συνδυαστική

εφαρμογή της μεθόδου ιχνηλάτησης ακτίνων για την οπτική εξέταση του συστήματος, και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη θερμική ανάλυσή του. Τελικός σκοπός είναι ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και για την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης ποικίλων σχεδιαστικών παραμέτρων στην τελική απόδοση του συστήματος. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε εφαρμογή της μεθοδολογίας και μελετήθηκε ένα στοιχείο (module) συγκεντρωτικού συστήματος υψηλής συγκέντρωσης στο οποίο ένα ελλειπτικό παραβολοειδές κάτοπτρο συγκεντρώνει σημειακά την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε τραπέζοειδή ομογενοποιητή.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία υποστηρίχθηκε οικονομικά από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας στο πλαίσιο του προγράμματος «ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 2011» και συγκεκριμένα του έργου ΠΡΩΤΕΑΣ ΗΛΙΑΚΗ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗ με Κωδικό 11ΣΥΝ\_7\_1500.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Luque, A., Andreev, V., 2007, Concentrator photovoltaics. Springer series in optical Sciences 2007, Vol.130.
- [2] Guter, W., Schöne, J., Philipps, S.P., Steiner, M., Siefer, G., Wekkeli, A., 2009, "Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight", Applied Physics Letters, 94:223504.
- [3] King, R.R., Boca, A., Hong, W., Liu, X.Q., Bhusari, D., Larrabee, D., Edmondson, K.M., Law, D.C., Fetzer, C.M., Mesropian, S., Karam, N.H., 2009, "Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells", Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany 21-25 September 2009, pp 55-61.
- [4] Hering, G., 2008, "Dawn of 500 suns", Photon International 2008, 11, pp. 146-158.
- [5] Hering G., 2009, "Staying focused", Photon International 2009, 8, pp.130-140.
- [6] Zhangbo, Y., Qifen, L., Qunzhi, Z., Weiguo, P., 2009, "The cooling technology of solar cells under concentrated system", IEEE 6th international power electronics and motion control conference, Vol. 3, pp. 2193–2197.
- [7] A. Watt, M. Watt, Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice, Addison-Wesley, Ontario, 1992.
- [8] H. Cotal et al., 2010, Heat Transfer Modeling of Concentrator Multijunction Solar Cell, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 35th IEEE, June 2010.
- [9] [http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C4MJ\\_40Percent\\_Solar\\_Cell.pdf](http://www.spectrolab.com/DataSheets/PV/CPV/C4MJ_40Percent_Solar_Cell.pdf)
- [10] J.A. Duffie, W.A. Beckman, 2013, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [11] G. Kornaros, 1999, Climatic data of the stations of the Hellenic National Meteorological Service (period 1955-1997), Vols. 1 & 2. National Meteorological Service (EMY), Athens, Greece.
- [12] Ioannou, A.K., Stefanakis, N.E., Boudouvis, A.G., 2014, "Design optimization of residential grid-connected photovoltaics on rooftops", Energy and Buildings 76, pp.588-596.

## ΔΙΑΦΑΝΕΙΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΥΨΕΛΙΔΕΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**Δ. Συγκρίδου<sup>1,2</sup>, Α. Ραφομανίκης<sup>1</sup>, Η. Σταθάτος<sup>1,\*</sup>, Ε. Βιτωράτος<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος,  
26334 Πάτρα, Ελλάδα, e-mail: [estathatos@teipat.gr](mailto:estathatos@teipat.gr)

<sup>2</sup> Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται φωτοευαίσθητοποιημένες με χρωστική ηλιακές κυψελίδες σε μορφή λωρίδων με σταθερό πλάτος και μεταβαλλόμενο μήκος, οι οποίες αποτελούν δομικές μονάδες για ηλιακά πλαίσια μεγάλων διαστάσεων. Στα πλαίσια της μελέτης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και υπολογισμοί της πυκνότητας ρεύματος βραχυκυκλώσης, της τάσης ανοικτού κυκλώματος, του παράγοντα πλήρωσης και της συνολικής απόδοσης των κυψελίδων από όπου διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος των κυττάρων δεν επηρεάζει την απόδοση των κυψελίδων, το οποίο είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την εμπορική αξιοποίηση των ηλιακών στοιχείων. Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης για την εύρεση του ισοδύναμου κυκλώματος που περιγράφει την ηλιακή κυψελίδα. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις εμπέδησης μπορούν να προσδιοριστούν η εν σειρά αντίσταση, η αντίσταση του αντιηλεκτροδίου της κυψελίδας, η αντίσταση διάχυσης του ηλεκτρολύτη, η αντίσταση της μεταφοράς ηλεκτρονίων και επανασύνδεσης στο  $\text{TiO}_2$  και η χημική χωρητικότητα του πορώδους ηλεκτροδίου  $\text{TiO}_2$ .

Λέξεις Κλειδιά: DSSCs, εξοικονόμηση ενέργειας, φασματοσκοπία εμπέδησης

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες η αύξηση της τιμής των συμβατικών καυσίμων, η σταδιακή εξάντληση τους και οι επιπτώσεις της χρήσης τους στο περιβάλλον οδήγησαν στην ενίσχυση της έρευνας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Από τις ΑΠΕ, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των επόμενων γενιών και τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) μπορούν να συνδράμουν προς αυτή την κατεύθυνση. Οι φωτοευαίσθητοποιημένες με χρωστική ηλιακές κυψελίδες ανήκουν στα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς και προσελκύουν έντονο ενδιαφέρον εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους και των απλών διεργασιών προετοιμασίας και κατασκευής τους σε σύγκριση με αυτές που χρησιμοποιούνται για τα φωτοβολταϊκά από τις άλλες γενιές. Οι ηλιακές κυψελίδες τρίτης γενιάς βασίζονται στα νανοδομημένα υλικά και κατασκευάζονται από αμιγώς οργανικές ή ένα μείγμα από οργανικά και ανόργανα υλικά, επιτρέποντας έτσι μια ανεξάντλητη πηγή υλικών. Η μεσοπορώδης φύση τους καθιστά δυνατή την κατασκευή διάφανων κυψελίδων οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν φωτοβολταϊκά παράθυρα. Τα φωτοβολταϊκά αυτά παράθυρα μπορούν να ενσωματωθούν σε προσόψεις κτιρίων και να λειτουργούν τόσο με άμεσο και διάχυτο φωτισμό όσο και με φωτισμό από την πίσω πλευρά των κυψελίδων.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε πώς το μέγεθος των φωτοευαίσθητοποιημένων με χρωστική ηλιακών κυψελίδων επιδρά στην πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, στην τάση ανοιχτού κυκλώματος, στον παράγοντα πληρότητας και στην συνολική απόδοσή τους. Η έρευνα περιορίστηκε σε κυψελίδες σε μορφή λωρίδων οι οποίες αποτελούν τις δομικές μονάδες για την κατασκευή πλαισίων μεγάλων διαστάσεων. Επιπλέον, οι κυψελίδες χαρακτηρίστηκαν και μέσω της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης από όπου προέκυψε το ισοδύναμο κύκλωμα και οι εσωτερικές αντιστάσεις τους.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1. ΥΛΙΚΑ

Στα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των DSSC συμπεριλαμβάνονται τα: ιωδιούχο λίθιο, ιώδιο, 1-methyl-3-propylimidazolium iodide, tert-butyl pyridine, guanidine thiocyanate, εξαιένυδρο χλωροπταινικό οξύ ( $H_2PtCl_6$ ), poly(propylene glycol)bis(2-aminopropyl) ether, 3-isocyanatopropyltriethoxysilane και μαζί με όλους τους διαλύτες προμηθεύτηκαν από την εταιρεία Sigma-Aldrich. Η χρωστική 3- *Cis*-diisothiocyanato-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium(II) bis(tetrabutylammonium), N719 προμηθεύτηκε από τη Solaronix S.A, Switzerland. Τα διάφανα γυαλιά με αγώγιμο υπόστρωμα οξειδίου του κασσιτέρου νιοπαρισμένο με φθόριο  $SnO_2:F$  (FTO, TEC<sup>TM</sup> A10) και αντίσταση 10 Ohm/τετράγωνο αγοράστηκαν από την Pilkington NSG Group. Για την παρασκευή του πρόδρομου διαλύματος  $TiO_2$  χρησιμοποιήθηκε υπερκάρθαρο titanium isopropoxide (TTIP, 97%, Aldrich), επιφανειοδραστική ουσία Triton X-100 (polyoxyethylene-10- isooctylphenyl ether) (99.8%, Aldrich) και οξικό οξύ (AcOH, Aldrich).

### 2.2. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟΑΝΟΔΩΝ $TiO_2$ ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Για την εναπόθεση των φιλμ  $TiO_2$  παρασκευάστηκε διάλυμα πιάνιας. Εν συντομία για την παρασκευή 12.5 ml διαλύματος, έγινε ανάδευση 1.8 g της επιφανειοδραστικής ουσίας Triton X-100 με 10 ml αιθανόλης, ακολουθούμενο από την προσθήκη 0.8 ml οξικού οξέος και 0.9 ml από το titanium isopropoxide υπό έντονη ανάδευση. Ύστερα από λίγα λεπτά ανάδευσης, το διάλυμα εκτυπώθηκε πάνω στα αγώγιμα γυαλιά FTO χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή ψεκασμού (inkjet printer, Dimatix materials printer DMP-5000). Τα αγώγιμα γυαλιά με το φιλμ  $TiO_2$  ψήθηκαν σε φούρνο στους 500°C για 30 λεπτά χρησιμοποιώντας ράμπα αύξησης της θερμοκρασίας 20°C/λεπτό. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε αρκετές φορές μέχρι να προκύψουν φιλμ  $TiO_2$  με πάχος περίπου 2 μm. Οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων  $TiO_2$  μεταβαλλόταν από 1x1 cm<sup>2</sup> μέχρι 1x45 cm<sup>2</sup> διατηρώντας τη μια διάσταση σταθερή. Για την

ευαισθητοποίηση των ηλεκτροδίων TiO<sub>2</sub> στην ορατή περιοχή του φάσματος, τα φιλμ TiO<sub>2</sub> εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα N719 σε αιθανόλη/ακετονιτρίλιο σε αναλογία 1/1 v/v (συγκέντρωση διαλύματος 5x10<sup>-4</sup> M).

Η παρασκευή των αντιηλεκτροδίων πλατίνας πραγματοποιήθηκε εναποθέτοντας λίγες σταγόνες διαλύματος εξαένυδρου χλωροπλατινικού οξέως (5mg H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>/1ml αιθανολής) πάνω σε αγώγιμο γυαλιά. Το στρώμα πλατίνας σχηματίζεται μετά θερμική αποσύνθεση του παραπάνω διαλύματος κατά το ψήσιμο των γυαλιών στους 500°C για 10 λεπτά.

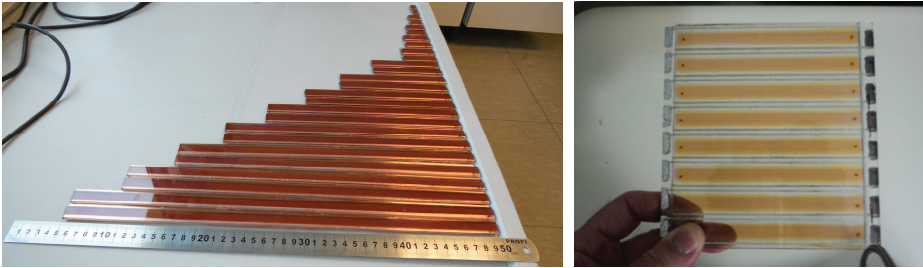
### 2.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ

Για την κατασκευή των ηλιακών κυψελίδων χρησιμοποιήθηκε ένας ημιστερεός ηλεκτρολύτης. Ο ημιστερεός ηλεκτρολύτης συνδυάζει το πλεονέκτημα της υψηλής ιοντικής αγωγιμότητας των υγρών ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον κίνδυνο διαρροής και ελαχιστοποιεί τα προβλήματα μόνωσης των κυψελίδων. Για την παρασκευή του ημιστερεού ηλεκτρολύτη που εφαρμόστηκε στα DSSCs, χρησιμοποιήθηκε ένα οργανικό-ανόργανο υλικό το οποίο παρασκευάστηκε στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα, σε ένα δοχείο τοποθετήθηκαν για να αντιδράσουν το poly(propylene glycol)bis(2-aminopropyl ether) μοριακού βάρους 230 και το 3-isocyanatopropyltriethoxysilane (ICS; Μοριακή αναλογία ICS/diamine=2) παράγοντας δεσμούς ουρίας μεταξύ του πολυμερούς και της ανόργανης φάσης. Η παρασκευή του ημιστερεού ηλεκτρολύτη πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία: σ' ένα διάλυμα από 1.6g sulfolane και 0.8g 3-methoxypropionitrile υπό γρήγορη ανάδευση προστέθηκαν 0.7g από το πρόδρομο αλκοξειδίου που παρασκευάστηκε. Στη συνέχεια προστέθηκαν 0.368g οξικού οξέος (AcOH) ακολουθούμενο από 0.12g ιωδιούχο λίθιο (LiI) 0.12g 1-methyl-3-propylimidazolium iodide (MPImI), και 0.06g ιώδιο (I<sub>2</sub>). Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη ολοκληρώθηκε προσθέτοντας 0.204 g tert-butyl pyridine και 0.036g guanidine thiocyanate. Ύστερα από έξι ώρες ανάδευση, λίγες σταγόνες του παραπάνω διαλύματος εναποτέθηκαν πάνω από το ηλεκτρόδιο TiO<sub>2</sub> στο οποίο είχε προσροφηθεί η χρωστική και από πάνω τοποθετήθηκε το αντιηλεκτρόδιο με την πλατίνα. Τέλος, για τις επαφές στις κυψελίδες και τη συλλογή του ρεύματος τοποθετήθηκε αγωγίμη ταινία χαλκού από την εταιρεία Kemtron.

### 2.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΩΣΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ

Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος με την ένταση της ακτινοβολίας να είναι σχεδόν σταθερή στα 950 W/m<sup>2</sup> όπως μετρήθηκε με ένα πυρανόμετρο CMP 3 Kipp & Zonen. Η καταγραφή των δεδομένων έγινε με τη σύνδεση των κυψελίδων με ένα μηχάνημα το οποίο μεταβάλλει την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα της κυψελίδας και καταγράφει τις ενδείξεις του ρεύματος (Keithley Source Meter (model 2420)) το οποίο ελεγχόταν μέσω προγράμματος λογισμικού για τον υπολογιστή (LabTracer). Για να γίνει μια εις βάθος μελέτη των παραγόντων που μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στην απόδοση των DSSC κατασκευάστηκαν κυψελίδες σε μορφή λωρίδων με διαφορετικά μεγέθη. Η ενεργή επιφάνεια των DSSC σε μορφή λωρίδων μεταβαλόταν από 1 μέχρι 45 cm<sup>2</sup>, ενώ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν χρησιμοποιήθηκαν πίσω ανακλαστήρες. Για να είναι ακριβή τα αποτελέσματα, κατασκευάστηκαν δύο κυψελίδες για κάθε περίπτωση και εξετάστηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Στην Εικόνα 1(α) απεικονίζονται όλα τα DSSC σε μορφή λωρίδων που κατασκευάστηκαν και στην εικόνα 1(β) ένα πλαίσιο DSSC το οποίο αποτελείται από διαδοχικές λωρίδες DSSC διαστάσεων 20x20 cm<sup>2</sup>. Επειδή το βέλτιστο πλάτος των λωρίδων είναι μεταξύ 0.8 και 1 cm, αποφασίστηκε η μια διάσταση των DSSC να διατηρήθει σταθερή ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν στην απόδοσή τους. Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν το ρεύμα

βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ), η τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ), η μέγιστη ισχύς ( $P_{max}$ ), ο παράγοντας πληρότητας ( $ff$ ) και η συνολική απόδοση της κυψελίδας.



Εικόνα 1: (α) Εικόνα όλων των DSSC σε μορφή λωρίδων που κατασκευάστηκαν με διαστάσεις 1x1 μέχρι 1x45 cm<sup>2</sup> (β) πλαίσιο DSSC διαστάσεων 20x20 cm<sup>2</sup>

Εκτός από τις μετρήσεις ρεύματος-τάσης πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης σε κάποια ενδεικτικά μήκη κυψελίδων. Οι μετρήσεις εμπέδησης διεξήχθησαν με τις κυψελίδες να φωτίζονται απευθείας από τον ήλιο και χρησιμοποιώντας έναν ποτενσιοστάτη-γαλβανοστάτη της Metrohm Autolab 3.v potentiostat galvanostat (Model PGSTAT 128N) σε ένα εύρος συχνοτήτων από 100 kHz-0.01 Hz χρησιμοποιώντας μια διαταραχή της τάξης των  $\pm 10$  mV πάνω από την τάση ανοικτού κυκλώματος. Για την προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Nova 1.10.

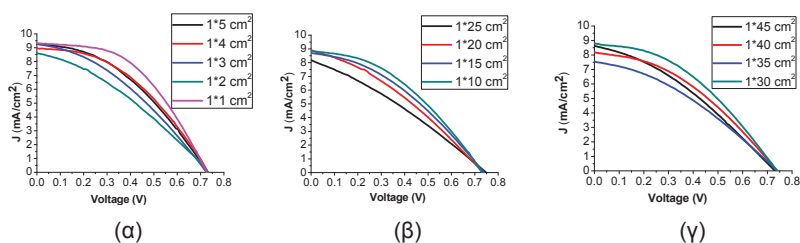
### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα για όλες τις ηλεκτρικές παραμέτρους των κυψελίδων συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Παρατηρείται ότι καθώς το μήκος των κυψελίδων αυξάνεται από το 1 στα 45 cm οι τιμές των μετρούμενων ηλεκτρικών παραμέτρων είναι σχεδόν σταθερές. Πιο συγκεκριμένα σημειώνονται μικρές μεταβολές στην πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης ( $J_{sc}$ ) ενώ οι τιμές της τάσης ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) παραμένουν σταθερές και δεν επηρεάζονται από την αύξηση του μήκους των κυψελίδων, καθώς εξαρτάται από το οξειδίο του μετάλλου και τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Ο παράγοντας πληρότητας ( $ff$ ) επηρεάζεται ελαφρώς όταν αυξάνεται το μήκος εξαιτίας της αύξησης της συνολικής εν σειρά αντίστασης της κυψελίδας ( $R_s$ ). Τέλος, το γεγονός ότι δε σημειώνονται σημαντικές διακυμάνσεις στις αποδόσεις των κυψελίδων με διαφορετικά μήκη είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό για τη μετάβαση σε πλαίσια μεγάλων διαστάσεων τα οποία θα μπορούν να ενσωματωθούν σε προσόψεις κτιρίων σαν φωτοβολταϊκά παράθυρα. Όλες οι καμπύλες J-V των κυψελίδων απεικονίζονται στην Εικόνα 2.

Πίνακας 1: Ηλεκτρικές παράμετροι φωτοευαίσθητοποιημένων με χρωστική ηλιακών κυψελίδων σε μορφή λωρίδων σε διάφορα μήκη				
Μέγεθος DSSC (cm <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (Volts)	ff <sup>*</sup>	n <sup>ο</sup> (%)
1x1	9.33	0.73	0.48	3.45
1x2	8.58	0.73	0.34	2.25
1x3	9.26	0.73	0.36	2.55
1x4	8.94	0.73	0.42	3.00
1x5	9.26	0.73	0.40	2.85
1x10	8.84	0.73	0.36	2.85
1x15	8.70	0.74	0.40	2.55
1x20	8.85	0.73	0.34	2.40
1x25	8.12	0.75	0.31	1.95
1x30	8.81	0.74	0.41	2.85
1x35	7.55	0.74	0.35	2.10
1x40	8.19	0.74	0.39	2.55
1x45	8.64	0.73	0.34	2.40

\* Παράγοντας πληρότητας:  $ff = \frac{(V \cdot J)_{\max p}}{V_{oc} \cdot J_{sc}}$ , και  $n^{\circ}$  η συνολική απόδοση υπολογίζεται από τη

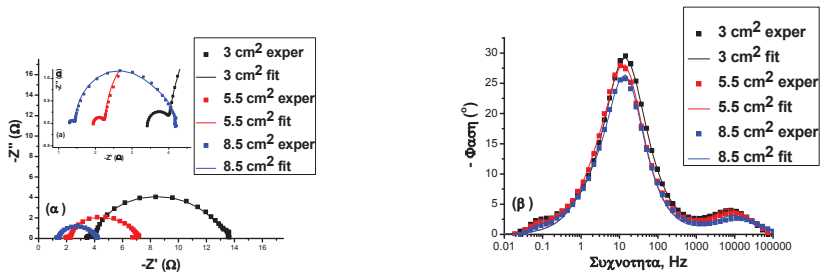
σχέση:  $n = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot ff}{A \cdot P_{light}}$  όπου A η ενεργή επιφάνεια των κυψελίδων. Η τιμή για την P<sub>light</sub> ήταν σταθερή στα 950 W/m<sup>2</sup>.



Εικόνα 2: Καμπύλες J-V για DSSC σε μορφή λωρίδων (α) 1x1 μέχρι 1x5 cm<sup>2</sup> (β) 1x10 μέχρι 1x25 cm<sup>2</sup> και (γ) 1x30 μέχρι 1x45 cm<sup>2</sup>

Στην Εικόνα 3 απεικονίζονται τα διαγράμματα Nyquist και Bode κυψελίδων σε κάποια ενδεικτικά μήκη. Τα πειραματικά δεδομένα συμβολίζονται με σημεία ενώ η καμπύλη της προσομοίωσης με συνεχή γραμμή. Το πρώτο ημικύκλιο που προκύπτει (Εικόνα 3α, ένθετο

γράφημα) αντιστοιχεί στη διεπαφή Pt/ηλεκτρολύτη (charge transfer resistance,  $R_{pt}$ ). Η αντίσταση μετακίνησης φορτίου στο αντιηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν ημικύκλιο στα διαγράμματα της εμπέδησης και σαν κορυφή στα διαγράμματα φάσης Bode (Εικόνα 3β). Η αντίσταση η οποία σχετίζεται με την απόκριση στην ενδιάμεση συχνότητα ανππροσωπεύει τη μεταφορά φορτίου στη διεπαφή  $TiO_2$ /χρωστική/ηλεκτρολύτη (charge transport resistance,  $R_{tr}$ ) και εμφανίζει συμπεριφορά διόδου. Το ημικύκλιο στη χαμηλή συχνότητα, το οποίο αποδίδεται στη διάχυση στον ηλεκτρολύτη (diffusion in the electrolyte resistance,  $R_{dif}$ ), ήταν μικρό και δε σχηματιζόταν ξεκάθαρα γεγονός που υποδηλώνει γρήγορη διάχυση. Τέλος, το σημείο τομής των διαγραμμάτων με τον άξονα των τετμημένων αντιστοιχεί στην αντίσταση του υποστρώματος FTO και στην αντίσταση επαφής μεταξύ του FTO/ $TiO_2$  ( $R_h$ ).



Εικόνα 3: (α) Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία εμπέδησης και (β) διαγράμματα φάσης Bode για ορισμένα ενδεικτικά μήκη κυψελίδων σε συνθήκη ανοικτού κυκλώματος και υπό ακτινοβολία περίπου ενός ήλιου

Η συνολική εν σειρά αντίσταση για κάθε κυψελίδα υπολογίζεται από τη σχέση (1)

$$R_S = R_h + R_{pt} + R_{dif} \quad (1)$$

Επειδή, οι κυψελίδες είχαν διαφορετικό μήκος η συνολική αντίσταση  $R_s$  υπολογίστηκε σε  $\Omega \cdot cm^2$  έτσι ώστε να μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα. Οι τιμές της  $R_s$  ήταν  $18.2 \Omega \cdot cm^2$ ,  $19.48 \Omega \cdot cm^2$  και  $19.74 \Omega \cdot cm^2$  για τις κυψελίδες σε μορφή λωρίδων με ενεργή επιφάνεια  $3 cm^2$ ,  $5.5 cm^2$  και  $8.5 cm^2$  αντίστοιχα.

Τα ισοδύναμα κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να προσεγγίσουν τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται στην Εικόνα 4. Όταν τα ηλεκτρόδια έχουν τραχιά επιφάνεια το χωρητικό στοιχείο της Εικόνας 2 (α) αντικαθίσταται με ένα στοιχείο σταθερής φάσης (constant phase element CPE, Q) το οποίο ορίζεται από τις παραμέτρους  $Y_o$  και  $N$ . Όταν το στοιχείο CPE είναι παράλληλα με μια αντίσταση, το στοιχείο μπορεί να μετατραπεί σε ψευδο-πυκνωτή χρησιμοποιώντας τη σχέση (2).

$$C_{pseudo} = Y_o^{1/N} \cdot R^{(1/N-1)} \quad (2)$$



Εικόνα 4: Ισοδύναμα κυκλώματα DSSCs (α)  $R(RC)(RC)(RC)$  και (β)  $R(RQ)(RQ)(RQ)$  τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν τις πειραματικές τιμές της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης



Πίνακας 2: Παράμετροι ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης

Μέγεθος DSSC (cm <sup>2</sup> )	R <sub>h</sub> (Ω)	R <sub>pt</sub> (Ω)	C <sub>pt</sub> (F)	R <sub>tr</sub> (Ω)	C <sub>tr</sub> (F)	R <sub>dif</sub> (Ω)	C <sub>dif</sub> (F)
1x3	3.44	0.536	0.413*10 <sup>-4</sup>	7.86	2.607*10 <sup>-3</sup>	2.09	0.725*10 <sup>-1</sup>
1x5.5	1.97	0.302	0.801*10 <sup>-4</sup>	3.49	5.53*10 <sup>-3</sup>	1.27	0.635*10 <sup>-1</sup>
1x8.5	1.41	0.248	1.27*10 <sup>-4</sup>	2.15	8.40*10 <sup>-3</sup>	0.664	1.95*10 <sup>-1</sup>

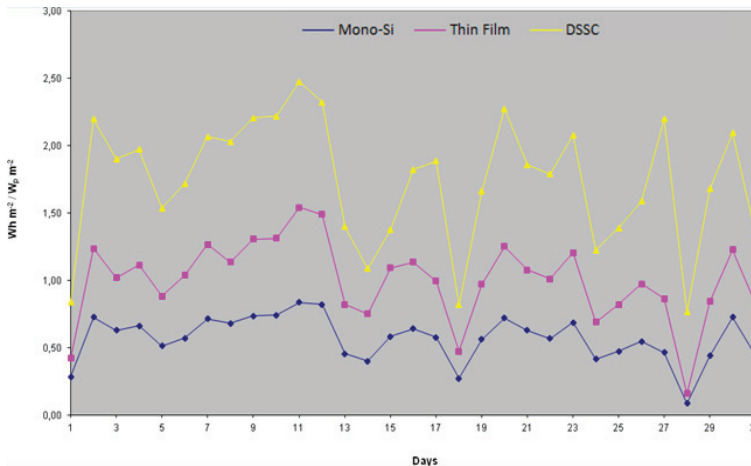
Παράλληλα, εξετάστηκαν κυψελίδες με διαφορετικό πάχος ηλεκτρολύτη ώστε να εντοπιστεί πώς αυτό επιδρά στις ηλεκτρικές παραμέτρους. Η υπερβολική ποσότητα ηλεκτρολύτη στις κυψελίδες οδηγεί σε αύξηση της τιμής της αντίστασης R<sub>s</sub> που επηρεάζει τη συνολική απόδοση. Όταν το πάχος του ηλεκτρολύτη αυξάνεται από τα 50 στα 80 μm η συνολική απόδοση μειώνεται κατά 10%. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για τη συλλογή του ρεύματος στις κυψελίδες χρησιμοποιήθηκε αγώγιμη ταινία χαλκού, η οποία είχε αντίσταση 1-1.5 Ω. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντίσταση της αγώγιμης ταινίας είναι άλλος ένας παράγοντας που εισάγει περιορισμούς στην απόδοση καθώς προστίθεται επιπλέον αντίσταση στις κυψελίδες. Για ακριβείς μετρήσεις και ασφαλή συμπεράσματα έχει ιδιαίτερη σημασία η αποδοτική συλλογή ρεύματος, αφού οι επαφές κακής ποιότητας εισάγουν παρασιτικές αντιστάσεις που επιδρούν άμεσα στο ρεύμα βραχυκύκλωσης I<sub>sc</sub> και στον παράγοντα πληρότητας ff της κυψελίδας.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από τον παράλληλο συνδυσμό τριών λωρίδων σε ένα ενιαίο γυαλί για την κατασκευή ενός υπο-πλαίσιου με DSSCs. Στο αγώγιμο γυαλί πραγματοποιείται χημική απόξεση ανάμεσα στις λωρίδες ώστε να απομακρυνθεί το αγώγιμο υπόστρωμα από τα σημεία αυτά και να απομονωθεί η μια λωρίδα απ' την άλλη, σχηματίζοντας έτσι τρεις ξεχωριστές λωρίδες. Για τις επαφές στο υπο-πλαίσιο χρησιμοποιείται και πάλι αγώγιμη ταινία χαλκού. Ο παράγοντας πληρότητας του υπο-πλαίσιου επηρεάστηκε σημαντικά ενώ το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσής του ήταν χαμηλότερο από το αναμενόμενο. Συγκρίνοντας τις τιμές των τριών παράλληλα συνδεδεμένων λωρίδων με μια κυψελίδα με ενεργή επιφάνεια 1x20 cm<sup>2</sup>, όσο δηλαδή κάθε ξεχωριστή κυψελίδα του υπο-πλαίσιου, παρατηρήθηκε ότι η τιμή του παράγοντα πληρότητας του υπο-πλαίσιου ήταν μειωμένη κατά 35%, ενώ η ανεμενόμενη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ήταν 5% χαμηλότερη. Κύρια αιτία για τις μειωμένες τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων είναι οι κακές εξωτερικές συνδέσεις και το γεγονός ότι πρακτικά είναι δύσκολο να απομονωθούν οι κυψελίδες όταν έχουν κατασκευαστεί σε ένα κοινό γυαλί. Η ύπαρξη ηλεκτρολύτη ανάμεσα στις λωρίδες απαιτεί αποτελεσματική μόνωση ανάμεσα στις κυψελίδες ώστε να μην υπάρχουν διαρροές ηλεκτρολύτη ανάμεσά τους.

Για να γίνει σύγκριση των φωτοευαίσθητοποιημένων με χρωστική ηλιακών κυψελίδων σε μορφή λωρίδων με φωτοβολταϊκά πρώτης και δεύτερης γενιάς υπό πραγματικές εξωτερικές συνθήκες, τοποθετήθηκε ένα πλαίσιο αντιπροσωπευτικό της κάθε γενιάς (μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Mono-Si), άμορφου πυριτίου (Thin Film) και DSSC module) κατακόρυφα σε οροφή κτιρίου με νότιο προσανατολισμό. Το ΦΒ πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου αποτελούνταν από 72 κυψελίδες συνδεδεμένες εν σειρά με συνολική ονομαστική ισχύ 180 W<sub>p</sub> και ενεργή επιφάνεια 1.125 m<sup>2</sup>. Ωστόσο, λόγω των περιορισμένων ηλεκτρικών απαιτήσεων των MPP-Trackers της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα τμήμα του του ΦΒ πλαισίου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι 24 κυψελίδες από τις συνολικά 72 εν σειρά συνδεδεμένες γεγονός που οδήγησε στη μείωση της τάσης εξόδου και της ενεργής επιφάνειας του πλαισίου (0.426 m<sup>2</sup>). Αντίστοιχα το ΦΒ πλαίσιο λεπτού φιλμ είχε ενσωματωμένα 72 εν σειρά συνδεδεμένες κυψελίδες, είχε ενεργή επιφάνεια 103 W<sub>p</sub> και είχε συνολική ενεργή επιφάνεια 1.449 m<sup>2</sup>. Το πλαίσιο με DSSC κατασκευάστηκε από τέσσερα παράλληλα συνδεδεμένα υπο-πλαίσια καθένα από τα οποία είχε προκύψει από οχτώ

κυψελίδες σε μορφή λωρίδων συνδεδεμένες εν σειρά. Οι διαστάσεις κάθε λωρίδας ήταν  $0.9 \text{ cm} \times 15.5 \text{ cm}$  και η συνολική ενεργή επιφάνεια του πλαισίου ήταν  $0.045 \text{ m}^2$ .

Για μια περίοδο ενός μήνα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, τα δεδομένα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ανά ονομαστική ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο βρέθηκαν να είναι 53.75, 30.93 και  $17.55 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} / (W_p \cdot \text{m}^{-2})$  για το πλαίσιο με τα DSSCs, το πλαίσιο λεπτού φιλμ και του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αντίστοιχα (Εικόνα 5). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την υπεροχή του πλαισίου με τα DSSCs συγκριτικά με τα ΦΒ πλαίσια των άλλων τεχνολογιών.



Εικόνα 5: Συνολική παραγόμενη ενέργεια ανά ονομαστική ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο για τα ΦΒ πλαίσια από τις τρεις διαφορετικές γενιές για περίοδο ενός μήνα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού

Οι φωτοευαίσθητοποιημένες με χρωστική ηλιακές κυψελίδες μπορούν να αποτελέσουν μια καλή εναλλακτική έναντι των συμβατικών ηλιακών κυψελίδων πυριτίου. Ωστόσο, πριν την τελική εμπορική διάθεσή τους απαιτούνται τροποποιήσεις και βελτιώσεις τόσο στην κατασκευή όσο και στις συνδέσεις, με προτεραιότητα να πρέπει να δοθεί στο πάχος του ηλεκτρολύτη, την αποτελεσματική συλλογή του ρεύματος και την απομόνωση των κυψελίδων μεταξύ τους.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κύρια πλεονεκτήματα των φωτοευαίσθητοποιημένων με χρωστική ηλιακών κυψελίδων και γίνεται μια αναφορά στα κύρια προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη μετάβαση σε κλίμακα μεγάλων διαστάσεων. Συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται το μήκος των κυψελίδων παρατηρείται μια μικρή αύξηση της συνολικής εν σειρά αντίστασης της κυψελίδας, γεγονός όμως που δεν επιδρά σημαντικά στις ηλεκτρικές της παραμέτρους. Γενικότερα, πρέπει να δοθεί έμφαση στην έρευνα για την περαιτέρω βελτίωση των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή του ρεύματος και τις εσωτερικές συνδέσεις των κυψελίδων, ώστε να μπορέσει να αυξηθεί κι άλλο η απόδοση των φωτοευαίσθητοποιημένων με χρωστική ηλιακών κυψελίδων με ημιστερεό ηλεκτρολύτη.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wolden, C. A., Kurtin, J., Baxter, J. B., Repins, I., Shaheen, S. E., Torvik, J. T., Rockett, A. A., Fthenakis, V. M., Aydil, E. S., 2011, "Photovoltaic manufacturing: Present status, future prospects, and research needs", *J. Vac. Sci. Technol. A* 29, 030801.
- [2] Späth, M., Sommeling, P.M., van Roosmalen, J.A.M., Smit, H.J.P., van der Burg, N.P.G., Mahieu, D.R., Bakker, N.J., Kroon, J.M., 2003, "Reproducible manufacturing of Dye-sensitized solar cells on a semi-automated baseline" *Progress in Photovoltaics: Research and applications*. 11, pp. 207-220.
- [3] Faccio, R., Fernández-Werner, L., Pardo, H., Mombrú, A.W., 2011, "Current trends in materials for dye sensitized solar cells" *Recent Patents on Nanotechnology*, 5, pp. 46-61.
- [4] Quasi-solid-state photoelectrochemical solar cell formed using inkjet printing and nanocomposite organic-inorganic material: inventors E. Stathatos, P. Lianos, US patent 2011/0203644 A1.
- [5] Stathatos, E., Lianos, P., Surca Vuk, A., Orel, B., 2004, "Optimization of a quasi-solid-state dye-sensitized photoelectrovoltaic solar cell employing a ureasil/sulfolane gel electrolyte", *Adv. Funct. Mater.*, 14 pp. 45-48.
- [6] Stathatos, E., Lianos, P., Tsakiroglou, C., 2004, "Highly efficient nanocrystalline titania films made from organic/inorganic nanocomposite gels", *Microporous and Mesoporous Materials*. 75, pp. 255-260.
- [7] Chen, Y., Stathatos, E., Dionysiou, D.D., 2009, "Sol-gel modified TiO<sub>2</sub> powder films for high performance dye-sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 203, pp. 192-198.
- [8] Stathatos, E., 2005, "Organic-inorganic nanocomposite materials prepared by the sol-gel route as new ionic conductors in quasi solid state electrolytes", *Ionics* 11, pp. 140-145.
- [9] Lee, C.L., Lee, W.H., Yang, H.H., 2011, "Reduction of collection efficiency of charge carriers with increasing cell size in dye-sensitized solar cell", *Technical Proceedings of the 2011 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech 2011* 3, pp. 713-716.
- [10] Fabregat-Santiago, F., Garcia-Belmonte, G., Mora-Seró, I., Bisquert, J., 2011, "Characterization of nanostructured hybrid and organic solar cells by impedance spectroscopy", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 13, pp. 9083-9118.
- [11] Wang, Q., Moser, J.-E., Grätzel, M., 2005, "Electrochemical Impedance Spectroscopic Analysis of Dye-Sensitized Solar Cells", *J. Phys. Chem. B* 109, pp. 14945-14953.



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 97kWp

**Κ. Γκαράκης<sup>1\*</sup>, Π. Αξαόπουλος<sup>1</sup>**

<sup>1\*</sup>Εργαστήριο ΑΠΕ, Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας  
Αγ. Σπυρίδωνος 17, 12210 Αιγάλεω  
ape@teiath.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αφορά την μελέτη των πειραματικών επιδόσεων ενός διασυνδεδεμένου φ/β πάρκου ισχύος 97kWp που βρίσκεται στην Ροδόπη, λειτουργεί από τον Νοέμβριο του 2012 και αποτελείται από πολυκρυσταλλικά φ/β ισχύος 245Wp, πέντε τριφασικούς μετατροπείς ισχύος 17kW και έναν 15kW. Η μελέτη και η κατασκευή του πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών (πχ. ελαχιστοποίηση ηλιακής σκίασης, ηλεκτρικών απωλειών, sorting φ/β γεννητριών κ.α) και η ενεργειακή του αποδοτικότητα το 2013 ήταν 1562 kWh/kWp.

Επιπλέον, υπάρχει εγκατεστημένος μετεωρολογικός σταθμός για την καταγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας ανέμου στο επίπεδο των φ/β αλλά και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της θερμοκρασίας πλάτης φ/β. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται ανά 15min και αποθηκεύονται σε κάρτα μνήμης ενώ είναι διαθέσιμα και μέσω web portal. Τα επεξεργασμένα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επίδοσης του φ/β πάρκου, για χρονική περίοδο ενός έτους στην οποία υπάρχει ομαλή λειτουργία όλων των αισθητήρων.

Επίσης, γίνεται μελέτη της επίδρασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος/πλάτης φ/β και της ταχύτητας ανέμου στις επιδόσεις του φ/β πάρκου και παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι συσχετίσεις των μεγεθών αυτών με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν ένα πλήθος σημαντικών πληροφοριών για τις επιδόσεις του φ/β πάρκου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο και την αξιολόγηση λειτουργίας φ/β σταθμών.

Λέξεις Κλειδιά: πειραματικές επιδόσεις φωτοβολταϊκός σταθμός, αξιολόγηση.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φωτοβολταϊκά (φ/β) είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Μιας νέας εποχής που θα χαρακτηρίζεται ολοένα και περισσότερο από τις μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς [1]. Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής (όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά συστήματα συμπαραγωγής, οι μικρές ανεμογεννήτριες και οι κυψέλες καυσίμου) αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στα επόμενα χρόνια. Κοινό χαρακτηριστικό αυτών των νέων τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον.

Στην Ελλάδα, την εξαετία 2008-2013 υπήρξε ταχεία εγκατάσταση διασυνδεδεμένων φ/β σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των υψηλών τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και της απλουστευμένης αδειοδότησής τους. Η εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φ/β έφτασε από τα 11MW το 2008, στα 2579MW στα τέλη του 2013 ενώ οι επενδύσεις της εξαετίας έφτασαν τα 5 δις ευρώ. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας έφτασε το 6,7% το 2013, κατατάσσοντας την Ελλάδα στη δεύτερη θέση διεθνώς [2].

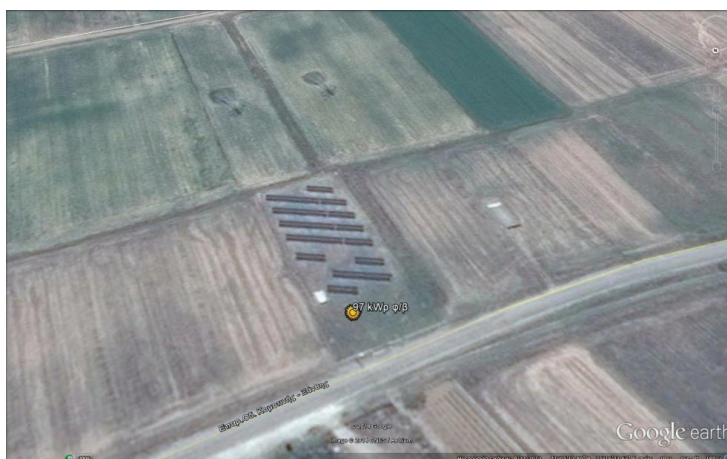
Το 35,5% της εγκατεστημένης ισχύος φ/β σταθμών στην Ελλάδα (917 MW) αφορούν εγκαταστάσεις ονομαστικής ισχύος από 20-150kWp [2], με συντριπτική πλειονότητα αυτών με ισχύ μικρότερη των 100kWp λόγω της αυξημένης τιμής πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που παρείχε το νομοθετικό πλαίσιο.

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η πειραματική μελέτη των επιδόσεων ενός διασυνδεδεμένου φ/β σταθμού ισχύος 97 kWp καθώς επίσης και η εξέταση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων στις επιδόσεις του φ/β σταθμού.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ

Ο φ/β σταθμός βρίσκεται στην πεδιάδα της Ροδόπης στη θέση «Καμάλες - αγροτεμάχιο 215», στο Δήμο Κομοτηνής, Π.Ε Ροδόπης, σε μικρή απόσταση από τον οικισμό της Αιγείρου. Το γήπεδο εγκατάστασης έχει εμβαδόν 3.515 m<sup>2</sup> και οι συντεταγμένες του είναι 41°05' 14,07" Β, 25°16' 34,28" Α με υψόμετρο 20m asl, ενώ δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο που να δημιουργεί σκίαση στην εγκατάσταση.

Στην εικόνα 1, παρουσιάζεται ο υπό μελέτη φ/β σταθμός με χρήση υποβάθρου Google Earth και στην εικόνα 2 φωτογραφία του.



Εικόνα 1: Ο υπό μελέτη φ/β σταθμός με χρήση υποβάθρου Google Earth.



Εικόνα 2 : Φωτογραφία του φ/β σταθμού ισχύος 97 kWp.

Ο φ/β σταθμός έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ ίση με 96,775kWp και περιλαμβάνει 395 φ/β γεννήτριες τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας Solarworld, τύπος SW 245 Poly, ονομαστικής ισχύος 245 Wp η καθεμία. Οι φ/β γεννήτριες είναι τοποθετημένες σε σύστημα σταθερών βάσεων της εταιρίας Exalco Synergy Land 3L με τη μέθοδο της πασαλόμπηξης. Η συνολική επιφάνεια των φ/β γεννητριών είναι 662 m<sup>2</sup> και η κλίση τους είναι 30°, με νότιο προσανατολισμό.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας.

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά φ/β γεννήτριας του σταθμού.	
Κατασκευαστής	SolarWorld
Τύπος	SW 245 Poly, 245 Wp
Ονομαστική ισχύς (P <sub>mpp</sub> ) – Ανοχή ισχύος	245,0 0/+5Wp
Μέση ισχύς (W <sub>p</sub> /m <sup>2</sup> )	146,12
Τάση στην αιχμή ισχύος (V <sub>mpp</sub> )	30,8 V
Ρεύμα στην αιχμή ισχύος (I <sub>mpp</sub> )	7,96 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος (V <sub>oc</sub> )	37,5 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I <sub>sc</sub> )	8,49 A
Συντελεστής απόδοσης	14,61%
Θερμοκρασιακός συντελεστής T <sub>k</sub> U <sub>oc</sub>	-0,37 %/K
Θερμοκρασιακός συντελεστής T <sub>k</sub> I <sub>sc</sub>	+0,081 %/K
Θερμοκρασιακός συντελεστής T <sub>k</sub> P <sub>mpp</sub>	-0,45 %/K
Διαστάσεις	1.675x1001x31 mm
Βάρος	21,2 kg

Η σύνδεση των φ/β με το δίκτυο χαμηλής τάσης της ΔΕΗ γίνεται μέσω έξι (6) τριφασικών μετατροπέων DC/AC δικτύου της εταιρείας SMA Solar Technology AG, τύπος STP 17000 TL (5) και STP 15000 TL (1) με μέγιστο βαθμό απόδοσης 98,2%. Στον κάθε μετατροπέα DC/AC δικτύου STP 17000TL συνδέονται τρεις στοιχειοσειρές, αποτελούμενη η καθεμία από 22 φ/β γεννήτριες, ενώ στον STP15000TL συνδέονται δύο στοιχειοσειρές αποτελούμενες από 22 φ/β γεννήτριες και μια στοιχειοσειρά με 21 φ/β γεννήτριες. Παρατηρείται κατά 4% υπερδιαστασιολόγηση των χρησιμοποιούμενων μετατροπέων.

Ο σταθμός διαθέτει μετεωρολογικό σταθμό Sunny Sensorbox και μετρητικά όργανα μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πλάτης φ/β, ηλιακής ακτινοβολίας και ταχύτητας ανέμου (εικόνες 3,4,5).

Η παρακολούθηση της παραγωγής και της λειτουργίας των μετατροπέων δικτύου και του μετεωρολογικού σταθμού, πραγματοποιείται μέσω του συστήματος τηλεπαρακολούθησης και καταγραφής Sunny WebBox (εικόνα 6), για έλεγχο του συστήματος και παρακολούθηση των δεδομένων μέσω Internet, σε τοπικό Η/Υ και σε απομακρυσμένο κεντρικό σημείο μέσω Internet (SunnyPortal website), το οποίο καταγράφει σε πραγματικό χρόνο την ισχύ και τις επιμέρους παραμέτρους της εγκατάστασης και υπολογίζει το βαθμό απόδοσής της. Η

διάγνωση και επικοινωνία πραγματοποιείται ασύρματα μέσω GSM modem. Τα δεδομένα λειτουργίας και από τον μετεωρολογικό σταθμό συλλέγονται ανά 15min και αποθηκεύονται σε κάρτα μνήμης (SD card) ενώ είναι διαθέσιμα και μέσω της ιστοσελίδας SunnyPortal.



Εικόνες 3,4,5 : Ο μετεωρολογικός σταθμός Sunny Sensorbox και οι αισθητήρες του.

Ο φ/β σταθμός έχει τεθεί σε εμπορική λειτουργία στις 9/11/2012.

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Στην μελέτη και την κατασκευή του φ/β σταθμού εφαρμόστηκαν μέθοδοι βέλτιστων πρακτικών για την μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του έργου στην διάρκεια λειτουργίας του. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα :

#### 3.1. ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΕΠΙΛΟΓΗ Φ/Β ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η φ/β γεννήτρια έχει βαθμό απόδοσης ίσο με 14,61%, ο οποίος είναι αρκετά υψηλός ενώ ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος ( $T_k$  σε  $P_{mp}$ ) ισούται με  $-0,45\%/K$  ο οποίος είναι χαμηλός. Επίσης έχουν θετική ανοχή ισχύος  $0/+5Wp$  η οποία εγγυάται την υψηλή απόδοση της εγκατάστασης. Με τη γραμμική εγγύηση απόδοσης για 25 χρόνια η SolarWorld εγγυάται μια μέγιστη προοδευτική μείωση της απόδοσης κατά 0,7% ετησίως – δηλαδή ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των συνηθισμένων εγγυήσεων δύο επιπέδων του κλάδου.

Οι μετατροπείς DC/AC δικτύου της SMA έχουν μέγιστο βαθμό απόδοσης στην ονομαστική τους ισχύ ίσο με 98,2%.

#### 3.2. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η διαστασιολόγηση του έργου πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού διαστασιολόγησης και ελέγχου καταλληλότητας της SMA, Sunny Design ενώ η εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό PVSYST. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι συντελεστές απόδοσης του φ/β σταθμού.

Πίνακας 2 : Οι συντελεστές απόδοσης της σχεδίασης του έργου.		
Συντελεστής	Τιμή	Επεξήγηση
Λόγος ονομαστικής ισχύος	96,0%	Ονομαστική ισχύς DC μετατροπέων / ονομαστική ισχύς φ/β
Απόδοση μετατροπέων	97,5%	Ενέργεια παραγόμενη AC / Ενέργεια λαμβανόμενη DC
Συντελεστής ενεργειακής χρήσης	100%	Ενέργεια μετατρεπόμενη DC / Ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από τα φ/β

Ο λόγος ονομαστικής ισχύος βρίσκεται στο συνιστώμενο εύρος τιμών 84-120%.

Στην τιμή της απόδοσης των μετατροπέων συνυπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης των μετατροπέων, ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPP tracking) και η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα από την τάση εισόδου DC.



Η επιλογή των καλωδίων πραγματοποιήθηκε μετά από μελέτη απωλειών, σύμφωνα με την απόσταση και την τάση λειτουργίας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες, με μέγιστες πτώσεις τάσης να είναι χαμηλότερες από 1% τόσο στα DC, όσο και στα AC καλώδια.

### 3.3. ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ - ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ

Οι φ/β γεννήτριες εγκαταστάθηκαν σε νότιο προσανατολισμό ενώ η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των βάσεων δυο παράλληλων σειρών είναι 2,7 φορές το ύψος των βάσεων από έδαφος (με όριο το 2).

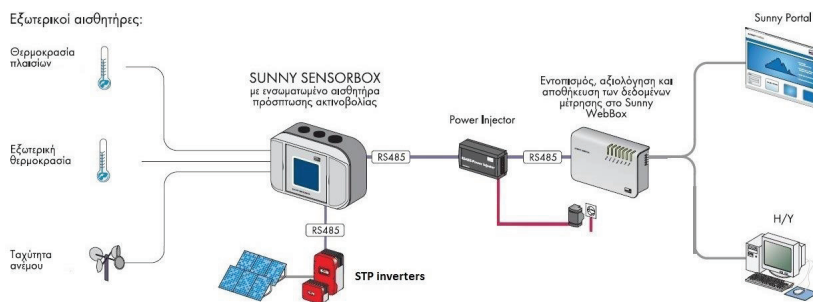
### 3.4. ΚΑΤΑΤΑΞΗ Φ/Β ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (SORTING)

Σε κάθε στοιχειοσειρά εγκαταστάθηκαν φ/β γεννήτριες ίδιας κατηγορίας ρεύματος (current class) ώστε να περιορίζονται οι απώλειες λόγω ηλεκτρικής ανομοιομορφίας (mismatch). Η κατάταξη (sorting) πραγματοποιήθηκε σε τρεις κατηγορίες ρεύματος σύμφωνα με το αρχείο μετρήσεων των φ/β γεννητριών από τον κατασκευαστή (flash report).

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα μετρούμενα μεγέθη που καταγράφει ο μετεωρολογικός σταθμός είναι : ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο των φ/β (30°), θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία πλάτης φ/β και ταχύτητας ανέμου. Το Sunny Webbox λαμβάνει όλες τα δεδομένα λειτουργίας από τους μετατροπείς.

Στον πίνακα 3 δίνονται περισσότερα στοιχεία για τα μετρητικά όργανα του μετεωρολογικού σταθμού, καθώς και η ακρίβεια μέτρησης της παραγόμενης ηλ. ενέργειας από τους μετατροπείς του δικτύου.



Εικόνα 6 : Σχηματική παράσταση Sunny WebBox στον φ/β σταθμό.

Πίνακας 3 : Ο εξοπλισμός του μετεωρολογικού σταθμού, η ακρίβεια και η περιοχή μετρήσεων τους καθώς και η ακρίβεια μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας.		
Παράμετρος μέτρησης	Εξοπλισμός	Ακρίβεια μέτρησης – Περιοχή μετρήσεων
Ηλιακή ακτινοβολία	Δομοστοιχείο ASI	±8,0% - 0 ... 1500 W/m <sup>2</sup>
Θερμοκρασία φ/β γεννήτριας	Επικολούμενος αισθητήρας από λευκόχρσο PT100	±0,5% - -40C – 125 C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Αισθητήρας από λευκόχρσο PT100	±0,5% - -25C – 85C
Μέτρηση ταχύτητας ανέμου	Ανεμόμετρο Thies clima compact	±0,5m/s - 0,8m/s – 40m/s
Μέτρηση ηλ. ενέργειας	Μετατροπέας δικτύου	±3,0%

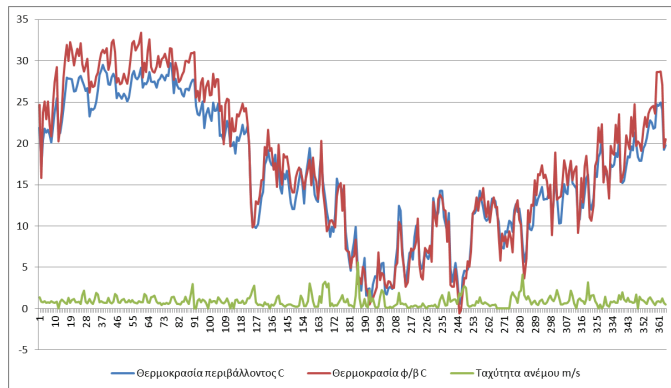
Έχουν διορθωθεί οι μετρήσεις των ενεργειακών παραγωγών του φ/β σταθμού την περίοδο 21/11/2013-6/12/2013 κατά την οποία λόγω βλάβης της κάρτας δεδομένων του μετατροπέα STP 15000TL η ενεργειακή παραγωγή αυτών των ημερών δεν είναι η πραγματική. Μόλις συνδέθηκε πάλι η νέα κάρτα στον μετατροπέα έδωσε τη παραγωγή αυτή (μόνο τον αριθμό

των παραγόμενων kWh), η οποία ενσωματώθηκε στην ενεργειακή παραγωγή των δύο μηνών αλλά όχι στις ημέρες. Η διόρθωση στηρίχθηκε στην αναλογία παραγόμενης ενέργειας του μετατροπέα STP 15000TL με αυτή του γειτονικού STP17000TL για την περίοδο του Δεκεμβρίου 2012.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

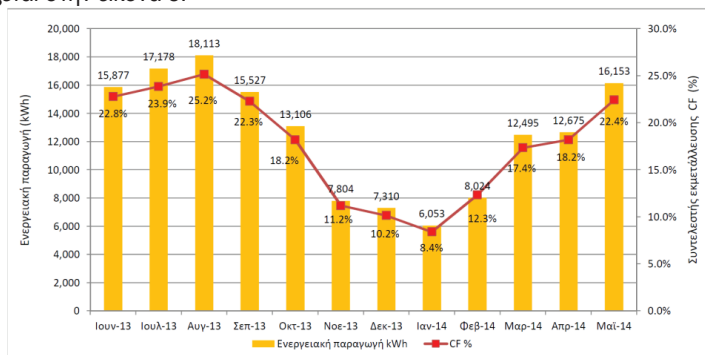
Για την πειραματική μελέτη του φ/β σταθμού χρησιμοποιήθηκε η χρονική περίοδος ενός έτους (1/6/2013-31/5/2014). Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι 150.315 kWh και η ενεργειακή αποδοτικότητα ισούται με 1.553 kWh/kWp. Ο συντελεστής εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι ίσος με 17,7%.

Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος και πλάτης φ/β καθώς και η ταχύτητα του ανέμου. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι στην διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών υπερτερεί η θερμοκρασία της πλάτης φ/β από την θερμοκρασία περιβάλλοντος για τις αντίστοιχες ώρες του ημερονυκτίου, ενώ το χειμώνα λόγω σχετικά υψηλότερης ταχύτητας του ανέμου αλλά και μειωμένης ακτινοβολίας, υπάρχουν χρονικά διαστήματα που υπερτερεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 7 : Η ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος & φ/β και της ταχύτητας του ανέμου.

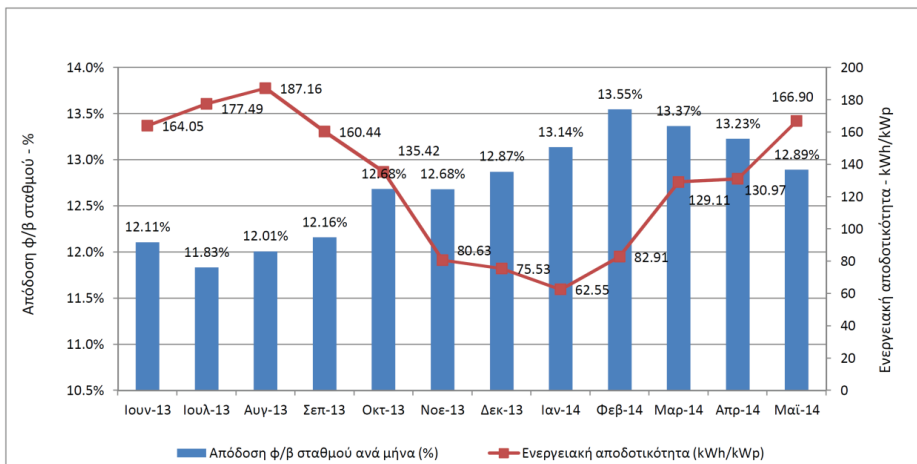
Η μηνιαία μεταβολή της ενεργειακής παραγωγής και του συντελεστή εκμετάλλευσης παρουσιάζεται στην εικόνα 8.



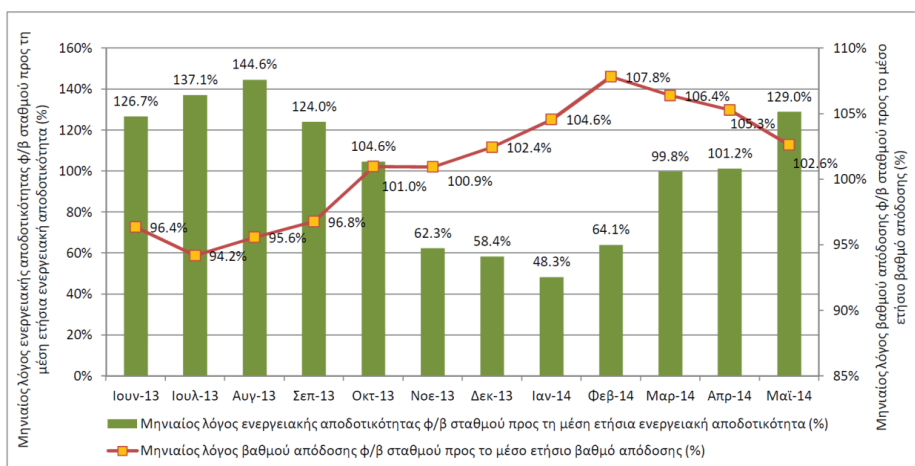
Εικόνα 8 : Μεταβολή της μηνιαίας ηλεκτρ. ενέργειας και του συντελεστή εκμετάλλευσης.

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μηνιαία μεταβολή της απόδοσης και της ενεργειακής αποδοτικότητας, ενώ στην εικόνα 10 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές της απόδοσης και αποδοτικότητας ανά μήνα προς τον ετήσιο μέσο όρο. Η ετήσια απόδοση

του φ/β σταθμού είναι ίση με 12,56%, δηλαδή αυτό το ποσοστό από την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

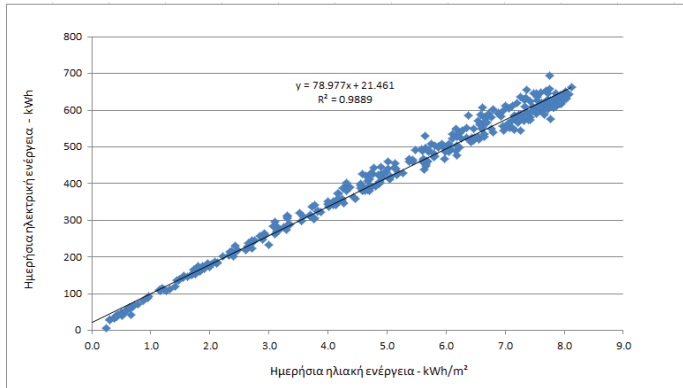


Εικόνα 9 : Μεταβολή της απόδοσης του φ/β σταθμού και της ενεργειακής αποδοτικότητας ανά μήνα.



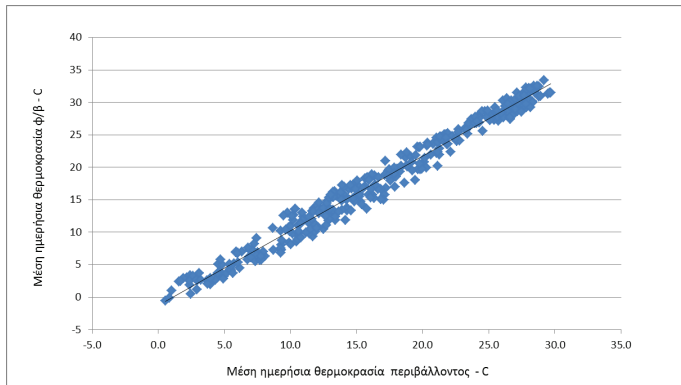
Εικόνα 10 : Μεταβολή του μηνιαίου λόγου απόδοσης φ/β σταθμού προς τον μέσο ετήσιο και η μεταβολή του μηνιαίου λόγου αποδοτικότητας φ/β σταθμού προς την μέση ετήσια.

Στη χρονική αυτή περίοδο η μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμάνθηκε από 0,5°C μέχρι 29,7°C με μέσο όρο 16,5°C και η ημερήσια ολική ηλιακή ενέργεια από 0,24kWh/m<sup>2</sup> (21/11/2013) μέχρι 8,12kWh/m<sup>2</sup> (5/8/2013). Η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος των 1,7m agl κυμάνθηκε από 0 έως 5,6m/s με μέσο όρο 0,89m/s.

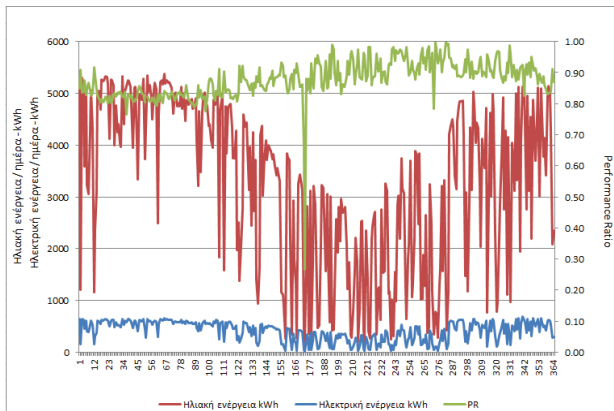


Εικόνα 11 : Μεταβολή της ημερήσιας ηλεκτρ. ενέργειας με την ημερήσια ηλιακή ενέργεια.

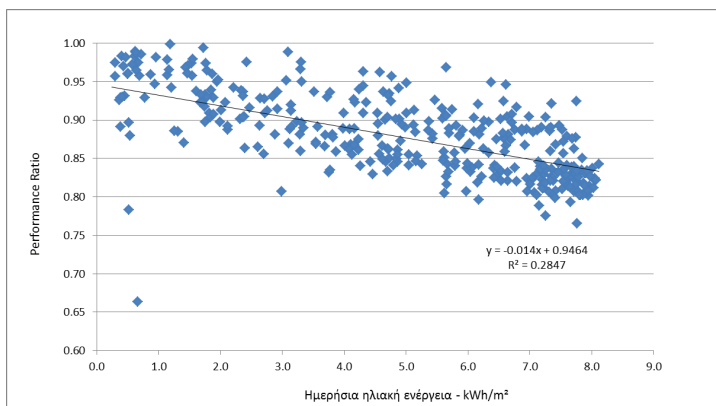
Από την εικόνα 11 φαίνεται η γραμμική αύξηση της διαθέσιμης ηλεκτρικής ενέργειας έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αύξηση των επιδόσεων της φ/β γεννήτριας, αφού το ρεύμα και η τάση αυξάνουν με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, με το ρεύμα βέβαια να αυξάνει πολύ περισσότερο από την τάση.



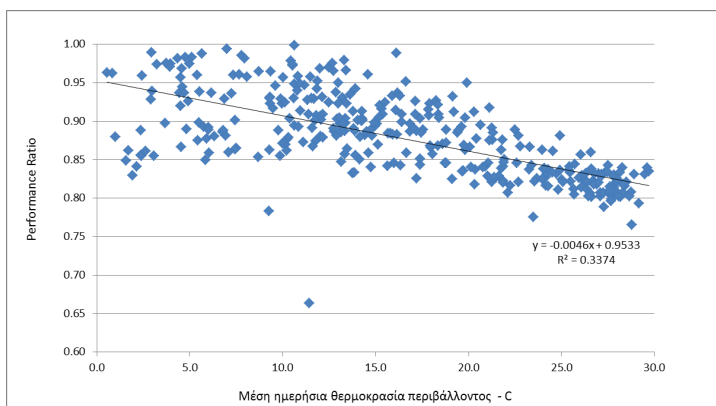
Εικόνα 12 : Μεταβολή της θερμοκρασίας φ/β με τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος.



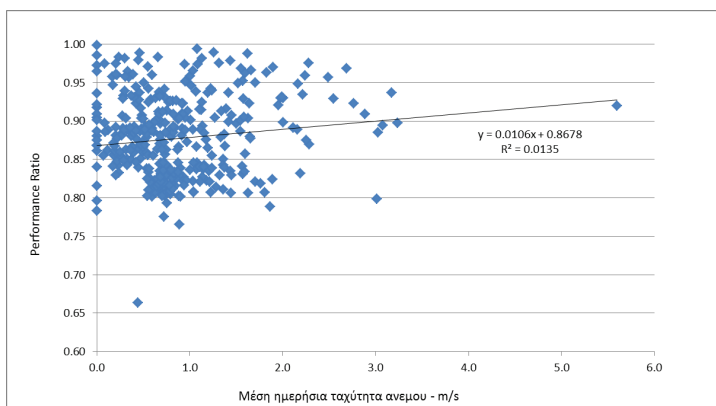
Εικόνα 13 : Μεταβολή του δείκτη PR και της ηλιακής/ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 14 : Μεταβολή του δείκτη PR με την ημερήσια ηλιακή ενέργεια.



Εικόνα 15 : Μεταβολή του δείκτη PR με την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 16 : Μεταβολή του δείκτη PR με την μέση ταχύτητα ανέμου στην επιφάνεια των φ/β.

Ο λόγος επίδοσης (Performance Ratio – PR%) [3] χαρακτηρίζει τη σχέση μεταξύ της πραγματικής και θεωρητικής απόδοσης μια φ/β εγκατάστασης. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται το ποσοστό της ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμο μετά την αφαίρεση

των ενεργειακών απωλειών (π.χ. λόγω απωλειών θερμότητας και αγωγών, χαμηλή απόδοση μετατροπείας, διαφοροποιήσεις φ/β γεννητριών, θερμοκρασία λειτουργίας, απώλειες λόγω ανάκλασης, υποβιβασμός φ/β κυψελών, ρύπανση, σκιάσεις κα). Όσο πιο κοντά στο 100% είναι η τιμή του PR τόσο πιο αποδοτικά δουλεύει μια φ/β εγκατάσταση (η τιμή του δείκτη PR στο διάστημα μελέτης του φ/β σταθμού ισούται με 88%. Λόγω των απωλειών που οφείλονται στην θερμοκρασία που αναπτύσσονται τα φ/β, οι τιμές του συντελεστή PR παρουσιάζονται αυξημένες κατά την διάρκεια του χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι, όπως φαίνεται στην εικόνα 13.

Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στον δείκτη PR. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνει ελαφρά το δείκτη PR, λόγω της αρνητικής επίδρασης που έχει η προκύπτουσα αύξηση της θερμοκρασίας των φ/β γεννητριών

Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στο δείκτη PR. Το διάγραμμα αυτό δείχνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μειώνει τον δείκτη PR λόγω της εξάρτησης της θερμοκρασίας των φ/β με την θερμοκρασία περιβάλλοντος (εικόνα 12). Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται η επίδραση της ταχύτητας ανέμου στο δείκτη PR. Από το διάγραμμα αυτό εξάγεται ότι η αύξηση της ταχύτητας αυξάνει ελαφρά τον δείκτη PR λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας των φ/β γεννητριών.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι για συγκεκριμένη ηλιακή ακτινοβολία, οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν την παραγωγή ηλεκτρισμού από τα φ/β συστήματα. Αντίθετα σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, επειδή η αύξηση του ρεύματος από τα φ/β είναι πολύ μικρότερη από την μείωση της τάσης, το συνολικό αποτέλεσμα είναι η μείωση της ισχύος των φ/β. Έτσι το πιο σημαντικό φαινόμενο είναι αυτό της εξάρτησης της τάσης από την θερμοκρασία.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων του συγκεκριμένου φ/β σταθμού ισχύος 97 kWp στην Ροδόπη, έδειξε ότι οι κλιματικές παράμετροι οι οποίες έχουν σημαντική επίδραση στις επιδόσεις του, είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα ανέμου. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου είναι ευνοϊκές για την ενεργειακή αποδοτικότητα του σταθμού σε αντίθεση με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ο φ/β σταθμός που μελετήθηκε προσφέρει όλα τα πλεονεκτήματα των φ/β συστημάτων όπως η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς κινητά μέρη και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η λειτουργία του φ/β σταθμού είναι ομαλή, με μία ικανοποιητική ετήσια απόδοση 12,56% και μία υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα που φθάνει τις 1553 kWh/kWp, επιβεβαιώνοντας τις βέλτιστες πρακτικές που ακολουθήθηκαν κατά τη σχεδίαση και κατασκευή του αλλά και τον έλεγχο λειτουργίας του.

Η πειραματική μελέτη του φ/β σταθμού έγινε για ένα πλήρες έτος και καλύφθηκε ένα αντιπροσωπευτικό εύρος τιμών κλιματικών παραμέτρων. Το επόμενο βήμα θα είναι να αναλυθεί περίοδος περισσότερων χρόνων και να υπάρξει παράλληλα μέτρηση καμπυλών I-V των φ/β γεννητριών και θερμογράφιση του φ/β σταθμού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός», Αύγουστος 2013.
- [2] Σύνδεσμος Εταιρειών φ/β - ΣΕΦ, «Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013», Ιούνιος 2014.
- [3] Marion B., Adelstein J., Boyle K. "Performance parameter for Grid-Connected PV Systems", 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaics Specialists, Florida 2005.

## ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΝΕΩΝ ΤΥΠΩΝ ΦΩΤΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Δ. Α. Χαλκιάς\*, Γ. Χ. Παπανικολάου

Composite Materials Group, CMG  
Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26500  
Email: [chalkias@mech.upatras.gr](mailto:chalkias@mech.upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Φωτοβολταϊκά στοιχεία από νανο-πορώδες ημιαγωγό διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) κατασκευάζονται για να βελτιώσουν την απόδοση φωτοευαίσθητων ηλιακών κυττάρων, αυξάνοντας την συνολική ενεργό διεπιφάνεια του  $\text{TiO}_2$ . Στην παρούσα μελέτη κατασκευάστηκε μια παχύρρευστη πάστα από την εμπορικά διαθέσιμη P25 νανο-σκόνη του  $\text{TiO}_2$ , χωρίς την προσθήκη κάποιου πολυμερούς, με απλή χημική τεχνική, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτροδίων φωτοευαίσθητων ηλιακών κυττάρων με χρωστική ουσία (Dye Sensitized Solar Cells, DSSCs). Τα νανο-πορώδη ημιδιάφανα υμένια  $\text{TiO}_2$ , πάχους περίπου 30  $\mu\text{m}$ , κατασκευάστηκαν με την τεχνική “doctor blade” πάνω στην επιφάνεια αγωγίμου γυαλιού (Fluorine doped Tin Oxide, FTO Glass) ή στην επιφάνεια αγωγίμου πλαστικού (Indium Tin Oxide, ITO PET). Με τη χρήση αυτών των δύο διαφορετικών αγωγίμων επιφανειών σε DSSCs έγινε μελέτη της επίδρασης της εφαρμογής τους στην απόδοση των στοιχείων. Όσον αφορά στη μελέτη της κατασκευής των ηλεκτροδίων, τα γυάλινα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν στους 500°C για 30 ή 90 λεπτά και τα πλαστικά στους 80°C για αντίστοιχο χρόνο, ενώ στη συνέχεια μετρήθηκαν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν με στοιχεία των οποίων τα ηλεκτρόδια δεν είχαν υποστεί προηγούμενη όπτηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διαδικασία της όπτησης είχε σημαντική επίδραση στην απόδοση των στοιχείων, αφού τα φωτοβολταϊκά αυτά στοιχεία παρουσίασαν ασύγκριτα καλύτερες αποδόσεις από τα προηγούμενα. Όσον αφορά στην ευαισθητοποίηση των υμενίων  $\text{TiO}_2$ , έγιναν μετρήσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των στοιχείων, των οποίων τα ηλεκτρόδια είχαν υποστεί διαφορετική τεχνική και χρόνο ευαισθητοποίησης του υμενίου από την χρωστική με σκοπό την μελέτη της επίδρασης της διαδικασίας αυτής στην απόδοση. Εκτός των άλλων, κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν διαφορετικού τύπου αντι-ηλεκτρόδια εναποθέτοντας γραφίτη ή νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος (MWCNTs) σε αγωγίμα γυαλιά ή πλαστικά με σκοπό τη χρήση τους σε χαμηλού κόστους, χωρίς πλατίνα, αντι-ηλεκτροδίων DSSCs. Τα αποτελέσματα έδειξαν συγκρίσιμες αποδόσεις των στοιχείων αυτών με τα στοιχεία των οποίων τα αντι-ηλεκτρόδια ήταν εργοστασιακά κατασκευασμένα από πλατίνα. Τέλος, κατασκευάστηκαν πολυμερικοί ηλεκτρολύτες, διαφορετικών συνθέσεων, που αποτελούνταν από πολυβινυλοπυρρολιδόνη (PVP), ιωδιούχο κάλιο (KI), ιώδιο (I) και αιθανόλη ή μεθανόλη ως διαλύτες και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή στερεάς κατάστασης DSSCs. Τα αποτελέσματα των εφαρμογών τους συγκρίθηκαν με αντίστοιχου τύπου στοιχεία που είχαν κατασκευαστεί από υγρό, εργοστασιακά διαθέσιμο ηλεκτρολύτη. Ο πειραματικός χαρακτηρισμός των στοιχείων περιελάμβανε μετρήσεις του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ενώ προσδιορίστηκε και η μέγιστη απόδοση υπό πραγματικές συνθήκες δοκιμής για διάφορα εμβαδά ενεργού επιφάνειας κυττάρου, μελετώντας και την επίδραση αυτού του παράγοντα στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Έγινε επίσης μελέτη της λειτουργίας τους σε διαφορετικές τιμές έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Λέξεις κλειδιά: Φωτο-ευαίσθητα ηλιακά κύτταρα, P25  $\text{TiO}_2$  σκόνη, πολυβινυλοπυρρολιδόνη, νανοσωλήνες άνθρακα, γραφίτης

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τότε που αναφέρθηκε από τον Grätzel το πρώτο τυπικό νανο-κρυσταλλικό διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) φωτο-ευαίσθητο ηλιακό κύτταρο με χρωστική ουσία (Dye Sensitized Solar Cell, DSSC), αυτού του τύπου DSSCs θεωρούνται ως μία πολλά υποσχόμενη λύση για πολλά υπάρχοντα ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα, λόγω του χαμηλού κόστους τους, των φιλικών προς το περιβάλλον χαρακτηριστικών τους, και της σχετικά ικανοποιητικής απόδοσής τους (>11%) [1].

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές ερευνητικές προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης των DSSCs που βασίζονται σε νανο-κρυσταλλικά πορώδη  $\text{TiO}_2$  ηλεκτρόδια. Ειδικότερα, όλο και περισσότεροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με νανο-κρυσταλλικά πορώδη  $\text{TiO}_2$  ηλεκτρόδια μεγάλης ειδικής επιφάνειας, όπου περισσότερα μόρια χρωστικής μπορούν να προσροφηθούν και να οδηγήσουν στην κατασκευή κυττάρων υψηλότερης απόδοσης. Για να κατασκευαστεί ένα ηλεκτρόδιο με τόσο τέλεια χαρακτηριστικά, η πρόκληση είναι να βρεθεί μια βέλτιστη μέθοδος για την κατασκευή της αντίστοιχης, μοναδικής ποιότητας και χαρακτηριστικών,  $\text{TiO}_2$  πάστας που θα επιστρωθεί στο αγώγιμο υπόστρωμα. Πολλές προτάσεις μεθόδων κατασκευής έχουν δημοσιευθεί, αλλά οι περισσότερες απαιτούν εξειδικευμένο και πολύπλοκο εξοπλισμό και τεχνικές οι οποίες είναι οικονομικά ασύμφορες για βιομηχανική παραγωγή. Προκειμένου να απλουστευθεί η τεχνολογία, πολλές αναφορές και μελέτες έχουν αναπτυχθεί για την κατασκευή ημι-αγώγιμης  $\text{TiO}_2$  πάστας από την εμπορικά διαθέσιμη P25 νανο-σκόνη διοξειδίου του τιτανίου (P25, Degussa) [2]. Οι περισσότερες από τις  $\text{TiO}_2$  πάστες όμως, που βασίζονται σε νερό και αιθανόλη, οδηγούν σε πολλά συσσωματώματα δίνοντας έτσι όχι και τόσο ενθαρρυντικά καθώς και μη επαναλήψιμα αποτελέσματα. Μια απλή χημική τεχνική που θα μπορούσε να αντικαταστήσει τις συμβατικές πολύπλοκες μεθόδους κατασκευής  $\text{TiO}_2$  πάστας περιγράφεται σε αυτή τη μελέτη [3].

Είναι κοινώς παραδεκτό όμως ότι η χρήση υγρού ηλεκτρολύτη αποτελεί στις μέρες μας το βασικότερο εμπόδιο για τη βιομηχανική παραγωγή των DSSCs. Το πρόβλημα της παρασκευής ενός σταθερού (με μακροχρόνια λειτουργία) και αποδοτικού ηλεκτρολύτη σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη μερική διάσπαση της χρωστικής και τη μικρή διαλυτότητα του άλατος του ιωδίου σε χαμηλές θερμοκρασίες, την πιθανή εξάτμιση του διαλύτη λόγω του χαμηλού του σημείου ζέσεως (ιδίως στις σχετικά μεγάλες θερμοκρασίες λειτουργίας μιας κυψελίδας), τη διαρροή του από το εσωτερικό της κυψελίδας (όταν λειτουργεί επί μακρόν σε εξωτερικούς χώρους) ή ακόμα και μια ενδεχόμενη ρήξη της κυψελίδας (εάν σε υψηλές θερμοκρασίες αναπτυχθεί ισχυρή εσωτερική τάση ατμών). Κατά συνέπεια, η αντικατάσταση του υγρού ηλεκτρολύτη από ένα στερεάς μορφής μέσο μεταφοράς φορτίων που να προσφέρει όχι μόνο σταθερότητα και ερμητικό σφράγισμα της κυψελίδας, αλλά και να μειώνει τους περιορισμούς για το σχήμα, το σχεδιασμό (design) άλλα και την ευκαμψία της (flexibility) έγινε εδώ και αρκετά χρόνια αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας. Στην παρούσα μελέτη, με κατεύθυνση όλα τα παραπάνω, περιγράφεται η κατασκευή πολυμερικών ηλεκτρολυτών και η χρήση τους σε στερεάς κατάστασης DSSCs [4].

Παρόλο που τα DSSCs αποτελούν έναν πολλά υποσχόμενο τύπο φωτοβολταϊκών που θα αντικαταστήσουν τα φωτοβολταϊκά πυριτίου, η διαθεσιμότητα και η αξιοποίησή τους σε ευρεία κλίμακα είναι περιορισμένη. Η πλατίνα (Pt) που αποτελεί το κύριο υλικό καθόδου ως τώρα σε DSSCs, λόγω της σταθερότητάς της όταν έρχεται σε επαφή με κάποιον ηλεκτρολύτη και της υψηλής καταλυτικής της δράσης, έχει πολύ υψηλό κόστος για να εφαρμοστεί σε εμπορικά διαθέσιμα φωτοβολταϊκά. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται συχνά διάλυμα πλατίνας που επιστρώνεται σε πάχος της τάξεως των nm πάνω σε αγώγιμο υπόστρωμα για την κατασκευή αντι-ηλεκτροδίων. Ακόμα και με πολύ μικρή ποσότητα Pt αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υψηλής απόδοσης DSSCs. Από την άλλη πλευρά, ο άνθρακας στις διάφορες μορφές του όπως νανο-σωλήνες άνθρακα, γραφίτης, γραφένιο έχει προταθεί ως κατάλληλο υποψήφιο υλικό για την κατασκευή αντι-ηλεκτροδίων DSSCs. Αν και δεν είναι τόσο αποτελεσματικός όπως η Pt στις περισσότερες περιπτώσεις, το χαμηλό κόστος του είναι μεγάλο πλεονέκτημα για τη χρήση του σε DSSCs σε βιομηχανικό επίπεδο [5]. Σε αυτή τη μελέτη κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν διαφορετικού τύπου αντι-



ηλεκτρόδια εναποθέτοντας γραφίτη ή νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος (Multi Wall Carbon Nanotubes, MWCNTs) σε αγώγιμα υποστρώματα με σκοπό τη χρήση τους σε χαμηλού κόστους, χωρίς πλατίνα, αντι-ηλεκτροδίων DSSCs. Τα αποτελέσματα αυτών συγκρίθηκαν με τα στοιχεία των οποίων τα αντι-ηλεκτρόδια ήταν εργοστασιακά κατασκευασμένα από διάλυμα νανο-σωματιδίων Pt.

Εκτός των παραπάνω, στην παρούσα μελέτη περιγράφεται η κατασκευή εύκαμπτων DSSCs ακολουθώντας το μεγάλο ενδιαφέρον που υπάρχει διεθνώς για την ανάπτυξη εύκαμπτων ηλιακών κυττάρων με ένα ευρύ φάσμα νέων και αναδυόμενων εφαρμογών. Η κατασκευή εύκαμπτων DSSCs, ειδικότερα, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον λόγω και του χαμηλού κόστους κατασκευής. Αντικαθιστώντας λοιπόν το γυάλινο αγώγιμο υπόστρωμα, που το κόστος του ανέρχεται στο 60% του συνολικού κόστους των υλικών ενός DSSC, καθώς χαρακτηρίζεται και ως εύθραυστο, στη θέση του μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πλαστικό αγώγιμο υπόστρωμα, πολύ μικρότερου κόστους, προσθέτοντας ταυτόχρονα και άλλα πλεονεκτήματα στην κατασκευή, όπως μικρότερο βάρος, ευκαμψία και διάρκεια στον χρόνο ζωής [6]. Σε αυτή την κατεύθυνση κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο DSSCs χρησιμοποιώντας πλαστικά αγώγιμα υποστρώματα στα ηλεκτρόδια και μελετήθηκαν ως προς την απόδοσή τους, συγκρίνοντάς τα στη συνέχεια με συμβατικά DSSCs αποτελούμενα από ηλεκτρόδια γυάλινων αγώγιμων υποστρωμάτων.

Τέλος, όσον αφορά στη διαδικασία κατασκευής ενός DSSC, αναδεικνύεται πόσο σημαντική είναι η διαδικασία της όπτησης και της ευαισθητοποίησης του ημιαγωγού από τη χρωστική για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης, αλλάζοντας κάθε φορά διάφορες παραμέτρους στη διαδικασία κατασκευής. Τονίζεται επίσης η σημασία του εμβαδού της ενεργού επιφάνειας των DSSCs στην απόδοσή τους, καθώς και η μεταβολή των εσωτερικών αντιστάσεων του κυττάρου με την μεταβολή του μεγέθους της ενεργούς επιφάνειας [7-9]. Όλα τα κύτταρα μετρούνται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενώ παρουσιάζεται και η λειτουργία τους για διαφορετικές τιμές έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. ΥΛΙΚΑ

Fluorine doped Tin Oxide glasses (8 Ω/sq, 2.2mm πάχος, Dyesol); Indium Tin Oxide PET (60 Ω/sq, 0.127mm πάχος, Sigma Aldrich); Platinum counter-electrodes (3.2mm πάχος, Dyesol); P25 Titanium dioxide nano-powder (21nm, Sigma Aldrich); N-719 dye (Dyesol); Polyvinylpyrrolidone (40000 mol wt, Sigma Aldrich); Potassium iodide (ACS reagent, Sigma Aldrich); Iodine (ACS reagent, στερεάς μορφής, Sigma Aldrich); High Stability Electrolyte (Dyesol); Carbon nanotubes (MWCNTs NTX1, Nanothinx); Graphite (σπρέι, N-77);

### 2.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙ-ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Στην παρούσα μελέτη κατασκευάστηκε  $\text{TiO}_2$  πάστα προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρόδια φωτοβολταϊκών DSSCs. Η πάστα κατασκευάστηκε με απλή χημική τεχνική με σκοπό κατά την επίστρωση και την όπτησή της αργότερα να μην παρουσιάσει συσσωματώματα και να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα στην κατασκευή ηλεκτροδίων. Η αποφυγή συσσωματωμάτων έγινε εφικτή με την απορρόφηση (με χημειορρόφηση) κατάλληλης ποσότητας οξικού οξέος στην επιφάνεια του  $\text{TiO}_2$ . Για να γίνει εφικτό αυτό αναμείχθηκαν κατάλληλες ποσότητες νάνο-σκόνης  $\text{TiO}_2$ , αιθανόλης ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) και οξικού οξέος ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ), ενώ παρέμειναν σε κλειστό δοχείο στους  $80^\circ\text{C}$  για 12 ώρες για να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Στη συνέχεια το μείγμα ξηράνθηκε στους  $60^\circ\text{C}$  για 6 ώρες προκειμένου να εξατμιστεί η περίσσεια  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  και  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$  και λήφθηκε η σκόνη  $\text{CH}_3\text{COO/TiO}_2$ . Αυτός ο τύπος σκόνης δημιουργείται κατά τη θερμική διαδικασία όπου το  $\text{OH}^-$  στην επιφάνεια του  $\text{TiO}_2$  δημιουργεί δεσμό εστέρα με το  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ . Η αιθανόλη διευκολύνει αυτή τη διαδικασία κατά τη θέρμανση και εμποδίζει τη συσσωμάτωση κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Στη συνέχεια

προστέθηκε νερό και λόγω της υδροφιλικής ομάδας της σκόνης δημιουργήθηκε κολλοειδές μείγμα. Με μικρή ποσότητα υδροχλωρικού οξέος πλέον ήταν εφικτή η μετατροπή του κολλοειδούς μίγματος σε παχύρευστο με τη διαδικασία της κροκίδωσης, όπου η πάστα είναι έτοιμη για επίστρωση [3].

Το αγώγιμο υπόστρωμα, γυάλινο ή πλαστικό, έχει ήδη σταθεροποιηθεί σε μια επίπεδη επιφάνεια με αυτοκόλλητες ταινίες. Οι ταινίες αυτές τοποθετούνται παράλληλα με το υπόστρωμα, αφήνοντας ένα κενό ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που στη συνέχεια θα αποτελέσει την επιθυμητή ενεργό επιφάνεια του φωτοβολταϊκού, ενώ καθορίζουν και το πάχος του υμενίου. Στη συνέχεια μεταφέρεται στο υπόστρωμα συγκεκριμένη ποσότητα πάστας όπου απλώνεται στην επιφάνεια με ελαφρά πίεση. Η συγκεκριμένη τεχνική επίστρωσης είναι γνωστή και ως "doctor blade". Το ηλεκτρόδιο είναι πλέον έτοιμο για τη διαδικασία της όπτησης όπου το  $\text{TiO}_2$  αποκτά καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα, επιτυγχάνεται η καύση των οργανικών συστατικών της πάστας, ενώ και η μερική πυροσυσσωμάτωση των κρυστάλλων του ημιαγωγού. Τα υμένια είναι λευκά, ημι-διαφανή, ενώ η επιφάνειά τους είναι μακροσκοπικά ομοιογενής και χωρίς ρωγμές. Η μελέτη περιελάμβανε την όπτηση των γυάλινων ηλεκτροδίων για 0, 30, ή 90 λεπτά στους  $500^\circ\text{C}$ , ενώ των πλαστικών αντίστοιχα στους  $80^\circ\text{C}$ , καθώς επίσης τον τρόπο μεταβολής της απόδοσης των κυττάρων ανάλογα με το εμβαδόν της ενεργού επιφανείας τους. Όσον αφορά στην ευαισθητοποίησή τους από τη χρωστική, στην συγκεκριμένη περίπτωση την εμπορικά διαθέσιμη χρωστική N-719, αφού επιβεβαιώθηκε η αναγκαιότητα ύπαρξης χρόνου ευαισθητοποίησης πριν τα DSSCs σφραγιστούν, κατασκευάστηκαν κύτταρα με χρόνο ευαισθητοποίησης του ηλεκτροδίου 24 ώρες βυθισμένο ή μη σε διάλυμα χρωστικής σε θερμοκρασία δωματίου για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της απορρόφησης.

Όσον αφορά στη μελέτη της επίδρασης των αντι-ηλεκτροδίων στην απόδοση των DSSCs, κατασκευάστηκαν αντι-ηλεκτρόδια από MWCNTs ή γραφίτη τύπου N-77, γυάλινων ή πλαστικών αγώγιμων υποστρωμάτων που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σε ηλιακά κύτταρα, των οποίων μετρήθηκε η απόδοσή τους. Για την ομοιόμορφη εναπόθεσή των νανοσωλήνων άνθρακα στο αγώγιμο υπόστρωμα είχε κατασκευαστεί με υπερήχους ομογενές διάλυμα περιεκτικότητας 0.5% w/w MWCNTs σε αιθανόλη, χωρίς κάποια επιπλέον επεξεργασία, το οποίο στη συνέχεια απλώθηκε στο αγώγιμο υπόστρωμα με τη βοήθεια βαθμονομημένης πιπέτας. Η κατασκευή αντι-ηλεκτροδίων γραφίτη έγινε με την τεχνική "spray deposition technique". Και εδώ αναπτύχθηκε η ίδια μελέτη της επίδρασης της διαδικασίας της όπτησης στην απόδοση των κυττάρων.

### 2.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΩΝ

Με στόχο την κατασκευή στερεάς κατάστασης DSSCs, κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο πολυμερικοί ηλεκτρολύτες διαφορετικών συνθέσεων που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σε κύτταρα που υπολογίστηκε η μέγιστη απόδοσή τους. Οι συγκεκριμένοι στερεοί ηλεκτρολύτες επιλέχθηκαν λόγω της σχετικά απλής διαδικασίας κατασκευής τους και του χαμηλού κόστους τους. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη πολυμερικός ηλεκτρολύτης από πολυβινυλοπυρρολιδόνη (PVP), ιωδιούχο κάλιο (KI), ιώδιο ( $\text{I}_2$ ) και αιθανόλη ως διαλύτη, ο οποίος συγκρίθηκε στη χρήση του σε DSSCs με εργοστασιακά διαθέσιμο ηλεκτρολύτη υψηλής σταθερότητας (High Stability Electrolyte) της εταιρίας Dyesol. Συγκεκριμένη ποσότητα PVP διαλύθηκε σε αιθανόλη με συνεχή ανάδευση μέχρι να επέλθει η πλήρης διάλυση της ουσίας PVP. Τότε προστέθηκε ποσότητα KI σε αναλογία PVP:KI (wt%) 70:30. Αμέσως μετά προστέθηκε και  $\text{I}_2$  και το μείγμα αναδεύτηκε τόσο ώστε να γίνει μακροσκοπικά ομογενές, ενώ στη συνέχεια αποθηκεύονταν σε κλειστό δοχείο μέχρι τη χρήση του για να διατηρήσει την υγρή του μορφή. Στη συνέχεια της μελέτης, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των στερεάς κατάστασης DSSCs και την κατανόηση της επίδρασης της σύστασης του ηλεκτρολύτη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, κατασκευάστηκαν πολυμερικοί ηλεκτρολύτες αντίστοιχου τύπου και διαδικασίας κατασκευής, αλλά διαφορετικών συνθέσεων αλλάζοντας την αναλογία PVP:KI (wt%) ενώ ως διαλύτης χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την περίπτωση μεθανόλη. Οι αναλογίες που μελετήθηκαν ήταν 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40 [4].

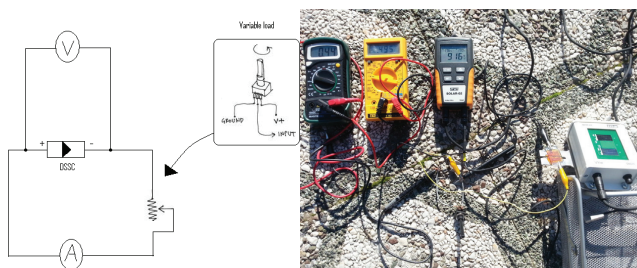
## 2.4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟ-ΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Αφότου κατασκευάστηκαν τα ηλεκτρόδια και αντι-ηλεκτρόδια, στα συμβατικά υγρού ηλεκτρολύτη DSSCs, τα φωτο-ευαίσθητα  $\text{TiO}_2$  ηλεκτρόδια συγκολλήθηκαν στην περιφέρεια με ισχυρή κόλλα στιγμής ημι-στερεάς κατάστασης με τα θετικά αντι-ηλεκτρόδια. Το πάχος της στρώσης της κόλλας έγινε προσπάθεια να είναι σταθερό και συγκεκριμένο για όλα τα κύτταρα, ενώ όριζε και το πάχος του υγρού ηλεκτρολύτη. Πετυχαίνοντας σχεδόν απόλυτη στεγανότητα, ήταν εύκολο πλέον να εισαχθεί στο κενό ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια που όριζε η κόλλα ο υγρός ηλεκτρολύτης με την βοήθεια ειδικής σύριγγας. Στη συνέχεια σφραγιζόταν και το σημείο που δεν είχε συγκολλητική ουσία και είχε αφαιρεθεί για την εισαγωγή του ηλεκτρολύτη. Το ηλιακό κύτταρο ήταν πλέον έτοιμο για μετρήσεις, ενώ οι διαρροές και ανεπιθύμητες εξατμίσεις του ηλεκτρολύτη είχαν μειωθεί πλέον στο ελάχιστο δυνατό.

Όσον αφορά στα στερεάς κατάστασης DSSCs, η επιπρόσθετη κόλλα στεγανοποίησης της κυψέλης εξέλειπε, καθώς ο πολυμερικός ηλεκτρολύτης αποτελούσε και τη συγκολλητική ουσία. Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι ο πολυμερικός ηλεκτρολύτης απλωνόταν στο φωτο-ευαίσθητο ηλεκτρόδιο όσο ήταν ακόμα σε υγρή μορφή, καθώς με χαμηλό ιξώδες ήταν πιο εύκολο να εισχωρήσει στους πόρους του ημιαγωγού, φτάνοντας σχεδόν και στο αγωγίμο υπόστρωμα. Έτσι είναι ικανός να αναγεννήσει περισσότερη από την προσροφημένη ποσότητα της χρωστικής στον ημιαγωγό κατά την λειτουργία του κυττάρου και να οδηγήσει το κύτταρο σε υψηλότερες αποδόσεις. Στη συνέχεια παρέμεινε ακάλυπτο το ηλεκτρόδιο ώστε να εξατμιστεί ο περισσότερος από τον διαλύτη του ηλεκτρολύτη και ύστερα τοποθετήθηκε το αντι-ηλεκτρόδιο. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η ποσότητα του στερεού ηλεκτρολύτη ήταν σχεδόν η ίδια και συγκρίσιμη με αυτή του υγρού ηλεκτρολύτη σε όλα τα DSSCs.

## 2.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών I-V έγιναν με τη χρήση διάταξης μεταβλητού φορτίου σε πραγματικές συνθήκες δοκιμής συνδέοντας το κύτταρο με δύο μεταβλητές αντιστάσεις (ποτενσιόμετρα), διαφορετικής τάξεως μέγιστου φορτίου μαζί με ένα μικροαμπερόμετρο εν σειρά και ένα βολτόμετρο παράλληλα (Εικόνα 1). Η επιλογή των δύο ποτενσιομέτρων έγινε μετά από υπολογισμούς για το δυνατό μηδενισμό του παραγόμενου φωτο-ρεύματος του κυττάρου ώστε να ληφθεί το σημείο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, ενώ το μικρότερης τάξεως μέγιστου φορτίου ποτενσιόμετρο ήταν υπεύθυνο για την προσέγγιση του σημείου της μέγιστης παραγόμενης ισχύος από το φωτοβολταϊκό. Η ένταση της προσπίπτουσας προς την κυψελίδα ακτινοβολίας μετρήθηκε με ένα πυρανόμετρο που λειτουργεί με έναν ανιχνευτή πολύ-κρυσταλλικού πυριτίου. Η ενεργός επιφάνεια των κυττάρων ήταν  $2,25 \text{ cm}^2$ , ενώ μελετήθηκε η διακύμανση της μέγιστης απόδοσής τους ανάλογα με το εμβαδόν της ενεργούς επιφάνειάς τους. Εν συνέχεια έγιναν μετρήσεις του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος των κυττάρων υπό διαφορετικές εντάσεις προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



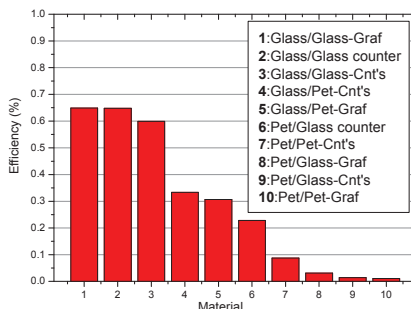
Εικόνα 1: Διάταξη μεταβλητού φορτίου και μέτρηση των DSSCs σε πραγματικές συνθήκες δοκιμής

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙ-ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ DSSCs

Η παρούσα μελέτη αναφέρεται στην κατασκευή και τον χαρακτηρισμό διαφόρων τύπων DSSCs των οποίων τα ηλεκτρόδια και αντι-ηλεκτρόδια είχαν υποστεί διαφορετικό χρόνο όπτησης, ενώ η υπόλοιπη διαδικασία κατασκευής των κυττάρων παρέμεινε ίδια. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε ο εργοστασιακά διαθέσιμος ηλεκτρολύτης υψηλής σταθερότητας (High Stability Electrolyte) της εταιρίας Dyesol για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων DSSCs συγκρίνονταν μεταξύ τους και για κάθε διαδικασία όπτησης προκειμένου να διαπιστωθεί η όποια μεταβολή. Η μελέτη όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω περιελάμβανε την όπτηση των γυάλινων ηλεκτροδίων και αντι-ηλεκτροδίων για 0, 30, ή 90 λεπτά στους 500°C, ενώ των πλαστικών αντίστοιχα στο 80°C.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτή την ομάδα πειραμάτων διαπιστώθηκε πως ο χρόνος όπτησης που οδηγούσε στις υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής ενέργειας ήταν 90 λεπτά για τα ηλεκτρόδια και 30 λεπτά για τα αντι-ηλεκτρόδια. Γενικά για κάθε πείραμα στη διαδικασία της όπτησης η απόδοση των κυττάρων όπου στην άνοδο χρησιμοποιήθηκε PET αντί για γυαλί φάνηκε μειωμένη κατά 2/3 τουλάχιστον, ενώ στα κύτταρα τα οποία χαρακτηρίζονται εύκαμπτα, δηλαδή με τη χρήση PET στο ηλεκτρόδιο και στο αντι-ηλεκτρόδιο, παρουσίασαν 6 με 8 φορές τουλάχιστον μικρότερες αποδόσεις από τις αντίστοιχες εκείνων στα οποία είχε χρησιμοποιηθεί γυαλί. Η βελτίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των κυττάρων ήταν κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη και ακόμα πιο αισθητή στα DSSCs με πλαστικά αγώγιμα υποστρώματα, αν συγκρίνονταν τα κύτταρα των οποίων τα ηλεκτρόδια και αντι-ηλεκτρόδια είχαν υποστεί 30 λεπτά όπτηση με κύτταρα των οποίων τα ηλεκτρόδια δεν είχαν υποστεί προηγούμενη όπτηση. Αυξάνοντας το χρόνο όπτησης στα 90 λεπτά για τα ηλεκτρόδια παρατηρήθηκε μια επιπλέον σημαντική αύξηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των κυττάρων, ενώ όσων τα αντι-ηλεκτρόδια υποβλήθηκαν σε αντίστοιχο χρόνο όπτησης η μείωση ήταν εμφανής. Έτσι προέκυψε το συμπέρασμα ότι για τα συγκεκριμένα υλικά και τεχνική κατασκευής των DSSCs, η διάρκεια όπτησης που οδηγούσε στις υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής ενέργειας ήταν 90 λεπτά για τα ηλεκτρόδια και 30 λεπτά για τα αντι-ηλεκτρόδια, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και πειραματικά. Ενδεικτικό γράφημα όπου παρουσιάζεται η διαφορά στην απόδοση των διαφόρων τύπων DSSCs φαίνεται στην Εικόνα 2. Οι αποδόσεις έχουν υπολογιστεί για την ίδια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Οι ονομασίες υποδεικνύουν το υλικό του αγώγιμου υποστρώματος που έχει χρησιμοποιηθεί στο ηλεκτρόδιο και αντι-ηλεκτρόδιο, καθώς το δεύτερο φέρει και το όνομα του υλικού καθόδου που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 2: Συγκριτικό γράφημα στήλης αποδόσεων DSSCs για διάφορου τύπου ηλεκτρόδια με όπτηση 90 λεπτών και αντι-ηλεκτρόδια με όπτηση 30 λεπτών

Τουλάχιστον σε αυτής της τάξης αποδόσεις των DSSCs φαίνεται ότι ο γραφίτης και οι νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούν ικανά υποψήφια υλικά για την κατασκευή χαμηλού κόστους, χωρίς πλατίνα, αντι-ηλεκτροδίων των DSSCs. Ενθαρρυντικά είναι τα αποτελέσματα αν ληφθεί υπ' όψιν ακόμα το γεγονός ότι τα αντι-ηλεκτρόδια πλατίνας ήταν εργοστασιακά κατασκευασμένα ενώ τα αντι-ηλεκτρόδια από γραφίτη ή νανοσωλήνων άνθρακα κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο και χρήζουν περαιτέρω εκτεταμένης έρευνας. Φανερό ήταν επίσης η υπεροχή της χρήσης γυάλινου αγώγιμου υποστρώματος στο ηλεκτρόδιο με τις αποδόσεις των αντίστοιχων κυττάρων να κυμαίνονται σε διπλάσιες τουλάχιστον τιμές σε σύγκριση με κύτταρα πλαστικών αγώγιμων υποστρωμάτων στα ηλεκτρόδια. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι παρόμοια αποτελέσματα, αλλά χαμηλότερων αποδόσεων παρατηρήθηκαν με τη χρήση πολυμερικού ηλεκτρολύτη που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο.

Ερμηνεύοντας τα παραπάνω και αρχικά αναφερόμενοι στο γεγονός ότι η απόδοση των DSSCs στα οποία έχει γίνει χρήση γυάλινου αγώγιμου υποστρώματος στα ηλεκτρόδια είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα πλαστικού τύπου ηλεκτροδίων κυττάρων, το φαινόμενο αυτό δικαιολογείται σχεδόν απόλυτα από τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά του FTO glass σε σύγκριση με το ITO PET σε αυτή του την εφαρμογή, ενώ ταυτόχρονα ακατάλληλη κρίνεται η τεχνική της όπτησης των πλαστικών ηλεκτροδίων για τη συγκεκριμένη σύσταση της πάστας του ημιαγωγού. Το ITO PET που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη αυτή παρουσίαζε αυξημένη κατά 7.5 φορές επιφανειακή αντίσταση σε σύγκριση με το FTO glass, ενώ μειωμένη ήταν και η διαφάνειά του, μειώνοντας δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φωτο-ευαίσθητο στρώμα του φωτοβολταϊκού. Η όπτηση των πλαστικών ηλεκτροδίων επίσης λόγω χαμηλής θερμοκρασίας τήξης του υλικού του υποστρώματος γινόταν σε ακατάλληλη θερμοκρασία για τη συγκεκριμένη σύσταση της πάστας, καθώς δεν ήταν εφικτή στους 80°C η καύση των οργανικών συστατικών της, η κρυσταλλοποίηση του υμενίου και η απόκτηση μεγάλου πορώδους που θα οδηγούσε σε αυξημένη ποσότητα απορροφούμενης χρωστικής από το υμένιο κατά την ευαισθητοποίηση, ενώ μειωμένη φάνηκε και η πρόσφυση του υμενίου με το υπόστρωμα. Όλα αυτά οδηγούν, με βάση τη θεωρία, σε υψηλότερες σε σειρά παρασιτικές αντιστάσεις, γεγονός που επιβεβαιώθηκε πειραματικά με το κατά πολύ μικρότερο συλλεγόμενο φωτορεύμα, ιδίως σε κατάσταση βραχυκύκλωσης ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος παρέμενε περίπου στα ίδια επίπεδα. Με την αύξηση του χρόνου όπτησης παρατηρήθηκε μια αισθητή αύξηση των τιμών των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των κυττάρων, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα 30 λεπτά δεν ήταν αρκετά για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Όσον αφορά στα αντι-ηλεκτρόδια φανερό ήταν η μείωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των κυττάρων με διάρκεια όπτησης αντι-ηλεκτροδίων 90 λεπτά, προκαλούμενη μάλλον από την καταστροφή του υλικού καθόδου και της καταλυτικής του δράσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κυρίως στα αντι-ηλεκτρόδια των DSSCs με γυάλινα υποστρώματα, όπου η θερμοκρασία όπτησης ήταν πολύ υψηλή, και ειδικά πιο έντονα παρουσιάστηκε στα αντι-ηλεκτρόδια με υλικό καθόδου τον γραφίτη.

### **3.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ DSSCS**

Όσον αφορά στην τεχνική ευαισθητοποίησης των ηλεκτροδίων από τη χρωστική, στην συγκεκριμένη περίπτωση την εμπορικά διαθέσιμη χρωστική N-719, σε αυτό το σημείο της μελέτης επιβεβαιώθηκε η αναγκαιότητα ύπαρξης χρόνου για ολοκλήρωση της διαδικασίας ευαισθητοποίησης του ημιαγωγού πριν τα DSSCs σφραγιστούν, ενώ μεγάλη αύξηση στην απόδοση παρατηρήθηκε στα κύτταρα των οποίων τα ηλεκτρόδια παρέμειναν βυθισμένα σε κλειστό δοχείο για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου σε διάλυμα χρωστικής εν συγκρίσει με αυτά που η ευαισθητοποίηση είχε γίνει απλά με τη ρίψη χρωστικής στο υμένιο με τη βοήθεια βαθμονομημένης πιπέτας. Η βελτίωση ήταν αναμενόμενη, ενώ οπτικά εμφανής ακόμα ήταν η αυξημένη ποσότητα της χρωστικής που είχε απορροφηθεί στο ηλεκτρόδιο παρατηρώντας τα διαφορετικής τεχνικής ευαισθητοποίησης ηλεκτρόδια. Η απόδοση σχεδόν τριπλασιάστηκε με την μεγαλύτερη αύξηση να παρουσιάζεται στο συλλεγόμενο φωτορεύμα, ενώ αύξηση παρουσίασε και η παραγόμενη φωτόταση.

### 3.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΜΒΑΔΟΥ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ DSSCs

Μια ακόμη μελέτη που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο αφορούσε στην επίδραση του εμβαδού της ενεργού επιφάνειας των ηλεκτροδίων στο παραγόμενο φωτορεύμα και την τάση, ενώ προσδιορίστηκε και η ταυτόχρονη μεταβολή του συντελεστή πληρώσεως των DSSCs. Σε αυτή την κατεύθυνση κατασκευάστηκαν DSSCs διαφορετικού εμβαδού ενεργού επιφάνειας ενώ η υπόλοιπη διαδικασία κατασκευής των κυτάρων παρέμεινε η ίδια. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε ο εργοστασιακά διαθέσιμος ηλεκτρολύτης υψηλής σταθερότητας για την διεξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Το εμβαδόν της ενεργού επιφάνειας των φωτο-ευαίσθητων ηλιακών κυτάρων έχει επιπτώσεις στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους και οδηγεί στη μεταβολή της απόδοσης των DSSCs με την μεταβολή του. Όσο το εμβαδόν αυξάνει η απόδοση γενικά μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των εσωτερικών αντιστάσεων των DSSCs, οι οποίες σχετίζονται με το μεταφερόμενο φορτίο στα επιμέρους υλικά του φωτοβολταϊκού. Πολλές μελέτες αποδεικνύουν αυτό το φαινόμενο και εκτεταμένη έρευνα πραγματοποιείται πάνω σε αυτό το αντικείμενο προκειμένου τα DSSCs να γίνουν εμπορικά εκμεταλλεύσιμα, εμφανίζοντας υψηλές αποδόσεις ακόμα και σε μεγάλο εμβαδού μονάδες. Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν διατυπωθεί πολλές προτάσεις μετά από έρευνες ακόμα και η διαίρεση της ενεργού επιφάνειας των DSSCs σε επιμέρους τμήματα με σκοπό την βελτίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους. Σε αυτή τη μελέτη έγινε προσπάθεια για την αύξηση του συντελεστή πληρώσεως, αναπτύσσοντας το θεωρητικό υπόβαθρο στο παραπάνω αναφερόμενο αντικείμενο, ενώ μικρή αύξηση προβλεπόταν και στην παραγόμενη πυκνότητα φωτορεύματος.

Στα πλαίσια της παραπάνω έρευνας κατασκευάστηκαν και χαρακτηρίστηκαν DSSCs εμβαδού ενεργού επιφάνειας 0,25, 1, 1,44, 2,25 cm<sup>2</sup> των οποίων τα αποτελέσματα στη συνέχεια συγκρίθηκαν και μεταξύ τους (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των DSSCs με το εμβαδόν της ενεργού επιφάνειάς τους				
Εμβαδόν (cm <sup>2</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	FF	η (%)
0,25	5.54	797	0.53	2.34
1	5.62	806	0.47	2.13
1,44	5.24	803	0.46	1.94
2,25	5.18	800	0.38	1.57

Από τον Πίνακα 1 παρατηρείται και πειραματικά η βελτίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των κυτάρων με τη μείωση του εμβαδού της ενεργού επιφάνειας των DSSCs. Αύξηση παρατηρείται στον παράγοντα πληρώσεως αλλά και στην παραγόμενη πυκνότητα φωτορεύματος, ενώ η παραγόμενη φωτιότητα, παραμένει περίπου στα ίδια επίπεδα. Από τις καμπύλες I-V θα μπορούσε να διαπιστωθεί ότι αυτή η αύξηση του Fill Factor, FF έχει προέλθει κυρίως από την μείωση των σε σειρά παρασιτικών αντιστάσεων το οποίο μπορεί να αποδοθεί κατά κύριο λόγο στην μικρότερη επιφανειακή αντίσταση λόγω της μικρότερης ενεργού επιφάνειας, ενώ η μεταβολή των εν παραλλήλω παρασιτικών αντιστάσεων είναι αρκετά μικρή. Η παρασιτική αντίσταση σειράς δεν επηρεάζει μία ηλιακή κυψέλη σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, καθώς η συνολική ροή του ρεύματος μέσω του κυτάρου είναι μηδέν, και ως εκ τούτου μέσω της αντίστασης σειράς μηδέν. Έτσι μπορεί να δικαιολογηθεί και το γεγονός ότι η V<sub>oc</sub> στα συγκεκριμένα πειράματα παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Ωστόσο, κοντά στην V<sub>oc</sub> η επίδραση είναι μεγάλη. Μία εύκολη μέθοδος για την εκτίμηση των σε σειρά παρασιτικών αντιστάσεων ενός κυτάρου είναι να βρεθεί η κλίση της καμπύλης I-V κοντά στο σημείο της V<sub>oc</sub>. Αντίστοιχα αναφερόμενοι στις εν παραλλήλω παρασιτικές αντιστάσεις, αυτές προκύπτουν από την κλίση της καμπύλης κοντά στο I<sub>sc</sub>.

### 3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ DSSCs

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο εργαστήριο κατασκευάστηκαν πολυμερικοί ηλεκτρολύτες διαφορετικών συνθέσεων με σκοπό τη χρήση τους σε στερεάς κατάστασης DSSCs. Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των αντίστοιχων κυττάρων που χρησιμοποιήθηκαν συγκρίθηκαν μεταξύ τους ενώ σύγκριση πραγματοποιήθηκε και με αντίστοιχης τεχνικής κατασκευής DSSC όπου ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε ο υγρός εργασιασικά διαθέσιμος ηλεκτρολύτης υψηλής σταθερότητας (High Stability Electrolyte) της εταιρίας Dyesol.

Η διαδικασία κατασκευής των ηλεκτρολυτών έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 2.3. Αυτό που τους διαφοροποιούσε ήταν ο διαλύτης που χρησιμοποιήθηκε και η αναλογία PVP:KI στη σύσταση του ηλεκτρολύτη. Το όνομα των ηλεκτρολυτών που αναγράφεται στον Πίνακα 2 παραπέμπει στις εξής αναλογίες PVP:KI: PVP1 70:30, PVP2 80:20, PVP3 75:25, PVP4 70:30, PVP5: 65:35, PVP6 60:40. Σε όλους τους ηλεκτρολύτες χρησιμοποιήθηκε μεθανόλη ως διαλύτης ενώ στον PVP1 αιθανόλη.

Πίνακας 2: Μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των DSSCs για διάφορους τύπους ηλεκτρολυτών				
Ηλεκτρολύτης	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	FF	n (%)
PVP1	4.02	580	0.43	1
PVP2	5.59	663	0.46	1.7
PVP3	5.45	583	0.55	1.75
PVP4	6.4	578	0.54	2
PVP5	5.08	530	0.59	1.59
PVP6	4.65	495	0.54	1.24
DYESOL	5.54	797	0.53	2.34

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των DSSCs που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας διαφόρων τύπων ηλεκτρολύτες. Όπως φαίνεται τα στερεάς κατάστασης DSSCs δείχνουν να ανταπεξέρχονται εξίσου καλά σε κατάσταση βραχυκύκλωσης, ενώ παρουσιάζουν μειωμένη τάση ανοιχτού κυκλώματος, σε σύγκριση πάντα με τον εργασιασικά διαθέσιμο υψηλής σταθερότητας ηλεκτρολύτη. Γεγονός ακόμα είναι ότι αλλάζοντας την αναλογία PVP:KI στη σύσταση του ηλεκτρολύτη αλλάζει και η ιοντική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να συνδεθεί με την αντίστοιχη αύξηση ή μείωση των ελεύθερων ιόντων. Η ιοντική αγωγιμότητα εξαρτάται άμεσα και από την πυκνότητα των ιόντων στον ηλεκτρολύτη, καθώς ακόμα πέρα από ένα όριο ποσότητας η κινητικότητα των ιόντων μειώνεται και αντίστοιχα μειώνεται η αγωγιμότητα. Με τη μεταβολή της αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη αλλάζει και το παραγόμενο φωτορεύμα από τα DSSCs, καθώς αλλάζει ο ρυθμός με τον οποίο αναγεννάται η χρωστική. Η ποσότητα του ιωδίου ήταν μεταβαλλόμενη, 10 wt% του ιωδιούχου άλατος, στα πλαίσια όμως της αποτελεσματικής διαδικασίας οξειδοαναγωγής, χωρίς δηλαδή ταυτόχρονα να αυξάνει το ρεύμα σκότους και η αναγωγή του  $I_3$  να γίνεται από την κάθοδο και όχι από τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού γεγονός που μειώνει το  $V_{oc}$ . Η πολυβινυλπυρρολιδόνη χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή στερεάς κατάστασης DSSCs καθώς χαρακτηρίζεται από τη σταθερότητά της σε συνήθεις περιβαλλοντικές καταστάσεις, επεξεργάζεται εύκολα, έχει μέτρια ηλεκτρική αγωγιμότητα, ενώ αντιδρά με το  $I_2$  και δημιουργεί PVP- $I_2$ . Επίσης το PVP είναι ένα ετεροκυκλικό πολυμερές που περιέχει άζωτο, γεγονός που αυξάνει την τάση του κυττάρου σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος.

Τέλος να αναφερθεί ότι αναπτύχθηκε μελέτη της λειτουργίας όλων των DSSCs, μετρώντας τη μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, σε διάφορες εντάσεις προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος βραχυκύκλωσης με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός ήταν σχεδόν γραμμική για

ορισμένα κύτταρα, κυρίως με χρήση του υγρού εργοστασιακά διαθέσιμου ηλεκτρολύτη, ενώ μείωση του ρυθμού αύξησης του φωτορεύματος παρατηρήθηκε στα περισσότερα στερεάς κατάστασης DSSCs για υψηλές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που αποδίδεται σε κάποια αστάθεια του κυττάρου.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω φωτο-ευαίσθητων ηλιακών κυττάρων με χρωστική ουσία. Η μέγιστη απόδοση μετατροπής που επιτεύχθηκε ήταν 2.34% με πάρα πολλά περιθώρια βελτίωσης ακόμα, ενώ όλη η μελέτη πραγματοποιήθηκε με κατεύθυνση την αύξηση της απόδοσης, της σταθερότητας στο χρόνο και της ευελιξίας των εφαρμογών των κυττάρων, με ταυτόχρονη μείωση του κόστους. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η διαφάνεια των κυττάρων στην ηλιακή ακτινοβολία ξεπερνούσε σε πολλές περιπτώσεις το 50%, χαρακτηριστικό που τους προσδίδει ακόμα μεγαλύτερο φάσμα εφαρμογών, ενώ δυνατή έχει βρεθεί η λειτουργία τους, μειωμένης απόδοσης βέβαια, υπό προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην πλευρά της καθόδου. Τα αποτελέσματα σε όλες τις κατευθύνσεις ήταν ενθαρρυντικά και με συνεχή άνοδο των τιμών, ενώ πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα κύτταρα κατασκευάστηκαν με πολύ απλό και χαμηλού κόστους εργαστηριακό εξοπλισμό. Γνωρίζοντας όμως ότι το επιστημονικό υπόβαθρο του συγκεκριμένου θέματος είναι πολυσύνθετο, αφού καλύπτει πολλούς θεμελιώδεις τομείς της επιστήμης, αλλά κατέχοντας και αρκετές γνώσεις στο συγκεκριμένο θέμα που είναι δυνατόν να εκτοξεύσουν στη συνέχεια τα αποτελέσματα σε υψηλές τιμές, το συγκεκριμένο αντικείμενο θα αποτελέσει αντικείμενο έρευνας, για να υπάρξει η δυνατότητα στο μέλλον για επιπλέον εξέλιξη και ανάπτυξη.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] O'Regan, B., and Grätzel, M., 1991, "A low cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films," *Nature*, 353, pp. 737-740.
- [2] Yamamoto, Y., Kawaraya, M., Segawa, H., Uchida, S., Kano, J., Saito, F., Tsujimoto, K., Saito, T., and Ito, S., 2011, "10% efficiency dye-sensitized solar cells using P25 TiO<sub>2</sub> nanocrystalline electrode prepared by a Bead-milling method," *Chemistry Letters*, 40 (11), pp. 1220-1222.
- [3] Yan, Y., Wang, J., Chang, Q., Babikier, M., Wang, H., Li, H., Yu, Q., Gao, S., and Jiao, S., 2013, "Fabrication of mesoporous TiO<sub>2</sub> electrodes by chemical technique for dye-sensitized solar cells," *Electrochimica Acta*, 94, pp. 277-284.
- [4] Singh, M., Singh, V. K., Surana, K., Bhattacharya, B., Singh, P. K., and Rhee, H.-W., 2013, "New polymer electrolyte for electrochemical application," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, pp. 819-822.
- [5] Pak, H., and Yoo, Y. R., 2012, "Surface Treatment Effect of Carbon Fiber Fabric Counter Electrode in Dye Sensitized Solar Cell," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12 (2), pp. 1679-1683.
- [6] Brown, T. M., De Rossi, F., Di Giacomo, F., Mincuzzi, G., Zardetto, V., Reale, A., and Di Carlo, A., 2014, "Progress in flexible dye solar cell materials, processes and devices," *Journal of Materials Chemistry A*, 2 (28), pp. 10788-10817.
- [7] Kyaw, H. H., Bora, T., and Dutta, J., 2012, "One-diode model equivalent circuit analysis for ZnO nanorod-based dye-sensitized solar cells: Effects of annealing and active area," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 11(4), pp. 763-768.
- [8] Son, M. K., Seo, H., Lee, K. J., Kim, M., Lee, D. G., and Kim, H. J., 2008, "The effect of dividing the active area of dye-sensitized solar cell," 37rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, United States, Article number 4922664.
- [9] Jo, Y., Jung, C.-L., Lim, J., Kim, B. H., Han, C.-H., Kim, J., Kim, S., Kim, D., and Jun, Y., 2012, "A novel dye coating method for N719 dye-sensitized solar cells," *Electrochimica Acta*, 66, pp. 121-125.



## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΠΙΜΕΤΑΛΛΩΣΕΩΝ

Κ. Δερμεντζής<sup>1\*</sup>, Ε. Αποστολίδου<sup>1</sup>, Α. Μουμτζάκης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Μηχανικών Τεχνολογίας Πετρελαίου & Φυσικού Αερίου και Μηχανολόγων Μηχανικών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, 65404 Άγιος Λουκάς, Καβάλα, email: [demerz@otenet.gr](mailto:demerz@otenet.gr)

<sup>2</sup>Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 67100 Ξάνθη, email: [amountza@env.duth.gr](mailto:amountza@env.duth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νικέλιο είναι από τα πλέον τοξικά βαρέα μέταλλα και ευρέως χρησιμοποιούμενο στις γαλβανικές επιμεταλλώσεις. Υγρά απόβλητα επιμεταλλώσεων νικελίου περιέχουν έως και 500 mg/L ιόντα Ni<sup>2+</sup> τα οποία πρέπει να ελέγχονται και να επεξεργάζονται ως τα επιτρεπτά όρια (2 mg/L) προτού απορριφθούν στο περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διεργασία φωτοβολταϊκής ηλεκτροκροκίδωσης που συνδυάζει την αυτόνομη και φιλική προς το περιβάλλον φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια και την διεργασία ηλεκτροκροκίδωσης με στόχο την αποτελεσματική απομάκρυνση του νικελίου από υγρά απόβλητα επιμεταλλωτηρίων. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί απ' ευθείας με τον ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα χωρίς συσσωρευτές αυξάνοντας, με τον τρόπο αυτό, την ανθεκτικότητα του συστήματος και περιορίζοντας το περιβαλλοντικό πρόβλημα διάθεσης των συσσωρευτών. Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος φωτοβολταϊκού συλλέκτη ECOLINE 72/185-200W από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (γεωγραφικό πλάτος 40° 55', γεωγραφικό μήκος 24° 22' και ύψος 138m από την επιφάνεια της θάλασσας). Το σύστημα φωτοβολταϊκής ηλεκτροκροκίδωσης καθίσταται προσαρμόσιμο προς την στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία με κατάλληλη ρύθμιση της παροχής του επεξεργαζόμενου υδατικού αποβλήτου και της πυκνότητας ρεύματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Προσδιορίζονται όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της διεργασίας, όπως το pH, η αγωγιμότητα και η παροχή του αποβλήτου, η πυκνότητα ρεύματος, ο χρόνος επεξεργασίας και η ηλιακή ακτινοβολία. Η απομάκρυνση του νικελίου είναι πολύ υψηλή στη περιοχή pH 4-10 και ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, με εφαρμογή πυκνότητας ρεύματος 30 mA/cm<sup>2</sup> η συγκέντρωση των ιόντων του νικελίου μειώνεται αποτελεσματικά από την αρχική τιμή 96 mg/L στα επιτρεπτά όρια, σημειώνοντας μείωση κατά >99%. Η αντίστοιχη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι 12.5 kWh ανά m<sup>3</sup> επεξεργαζόμενου αποβλήτου. Η προτεινόμενη διεργασία είναι κατάλληλη για την διαχείριση υγρών βιομηχανικών αποβλήτων επιβαρυσμένων με βαρέα μέταλλα, όπως το νικέλιο και ειδικότερα για εφαρμογές σε απομακρυσμένες και απομονωμένες περιοχές χωρίς σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Λέξεις Κλειδιά: ηλεκτροχημική κροκίδωση, απόβλητα επιμεταλλώσεων, νικέλιο, φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το βαρύ μέταλλο νικέλιο είναι τοξικό και μη αποδομήσιμο. Διαχέεται στο περιβάλλον από μονάδες επιμεταλλώσεων, κατεργασίας μετάλλων, βαφείων. Απορροές επιμεταλλωτηρίων περιέχουν έως και 500 mg/L ιόντα  $Ni^{2+}$  τα οποία, σύμφωνα με διεθνείς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται στα επιτρεπτά όρια προτού απορριφθούν στο περιβάλλον. Το ανώτερο επιτρεπτό όριο των ιόντων  $Ni^{2+}$  στα υγρά απόβλητα είναι 2 mg/L.

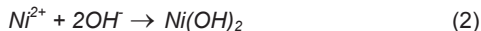
Διάφορες διεργασίες διαχείρισης έχουν προταθεί για την απομάκρυνση του νικελίου από υγρά απόβλητα, όπως προσρόφηση [1], βιορρόφηση [2], υπερδιήθηση [3], ιοντοεναλλαγή [4], χημική καθίζηση [5] και ηλεκτροχημικές μέθοδοι: ηλεκτροαπόθεση [6], ηλεκτροδιαπίδυση και ηλεκτροαπιονισμός με μεμβράνες [7], ηλεκτροδιαπίδυση και ηλεκτροαπιονισμός με ηλεκτροστατική θωράκιση [8], και ηλεκτροκροκίδωση [9-12].

Η χημική κροκίδωση είναι μια αποτελεσματική μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων βαρέων μετάλλων, η οποία, όμως μπορεί να οδηγήσει σε δευτερεύουσα μόλυνση με τη προσθήκη των απαραίτητων κροκιδωτικών ουσιών. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη διεργασία παρουσιάζει αυξημένη παραγωγή λάσπης.

Η ηλεκτροχημική κροκίδωση ή ηλεκτροκροκίδωση είναι μια διεργασία βασιζόμενη στη δημιουργία συσσωμάτων υδροξειδίων μετάλλων με ηλεκτροδιάλυση διαλυτών ανόδων από αργίλιο ή σίδηρο. Τα ανοδικά παραγόμενα ιόντα  $Al^{3+}$  ενώνονται με τα καθοδικά παραγόμενα ιόντα  $OH^-$  σχηματίζοντας το κροκιδωτικό  $Al(OH)_3$ , σύμφωνα με την αντίδραση (1):



Το κροκιδωτικό  $Al(OH)_3$  δρα ως ισχυρό προσροφητικό για τα ιόντα  $Ni^{2+}$ . Τα ιόντα  $Ni^{2+}$  μπορούν να απομακρύνονται με προσρόφηση στο κροκιδωτικό  $Al(OH)_3$ , αλλά και ως αδιάλυτο  $Ni(OH)_2$  με συνένωσή τους με τα ιόντα  $OH^-$  σύμφωνα με την αντίδραση (2):



Και τα δύο φαινόμενα δρουν συνεργικά με αποτέλεσμα την γρήγορη και αποτελεσματική απομάκρυνση του νικελίου από το επεξεργαζόμενο απόβλητο.

Η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης  $A$  είναι πολύ υψηλή (>99%) και υπολογίζεται από την εξίσωση (3):

$$A = \frac{C_o - C}{C_o} \times 100 \quad (3)$$

Όπου  $C_o$  και  $C$  είναι η αρχική και η τελική συγκέντρωση του νικελίου στο επεξεργαζόμενο δείγμα αποβλήτου σε mg/L.

Η αυξημένη περιβαλλοντική μόλυνση και η κοινωνική μέριμνα για το περιβάλλον οδήγησαν τις τελευταίες δεκαετίες στην ανάπτυξη νέων ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Η φωτοβολταϊκή (ΦΒ) ηλιακή ενέργεια αποτελεί την πλέον δημοφιλή και επαρκώς μελετημένη πηγή ενέργειας [12], που ως αυτόνομη και φιλική προς το περιβάλλον, είναι κατάλληλη για μικρές εφαρμογές και ειδικότερα σε απομονωμένες περιοχές χωρίς τη δυνατότητα σύνδεσης με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης [13].

Ηλεκτροχημικές διεργασίες απευθείας κινούμενες με φωτοβολταϊκή ενέργεια έχουν πρόσφατα προταθεί στην βιβλιογραφία [14-18]. Πάντως, καμία από αυτές δεν αναφέρονται στην απομάκρυνση του νικελίου. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη δυνατότητα αναγέννησης υγρών αποβλήτων επιμεταλλώσεων νικελίου με χρήση ηλεκτροκροκίδωσης με

ηλεκτρόδια αργιλίου που λειτουργεί με ΦΒ διάταξη απ' ευθείας χωρίς συσσωρευτές. Το σύστημα φωτοβολταϊκής ηλεκτροκροκίδωσης (ΦΒ-ΗΚ) καθίσταται ευέλικτο με ρύθμιση της παροχής του αποβλήτου προς τη πυκνότητα ρεύματος της ΦΒ διάταξης. Προσδιορίζονται όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της διεργασίας, όπως το pH, η αγωγιμότητα και ο ρυθμός παροχής του αποβλήτου, η πυκνότητα του ρεύματος, ο χρόνος επεξεργασίας και η ηλιακή ακτινοβολία.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το δείγμα πραγματικού υγρού αποβλήτου παραλήφθηκε από μονάδα επιμεταλλώσεων της Βόρειας Ελλάδας. Τα κύρια χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 1:

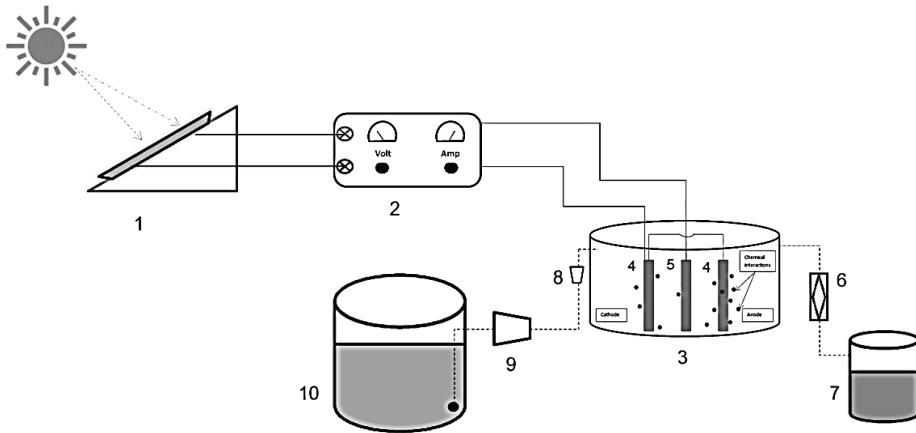
Πίνακας 1: Κύρια χαρακτηριστικά του επεξεργαζόμενου αποβλήτου	
<b>Παράμετρος:</b>	<b>Τιμή:</b>
pH	4.5
Αγωγιμότητα (μS/cm)	4000 (με προσθήκη KCl)
COD (mg/L)	355
Ni <sup>2+</sup> (mg/L)	96
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	24
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	138

Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος φωτοβολταϊκού συλλέκτη ECOLINE 72/185-200W από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, ισχύος 200 W. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης (γεωγραφικό πλάτος 40° 55', γεωγραφικό μήκος 24° 22' και ύψος 138m από την επιφάνεια της θάλασσας).

Η τάση και η ένταση του ρεύματος μετρούνται με πολύμετρο (PHYWE), η αγωγιμότητα με αγωγιμόμετρο (WTW). Το pH και η θερμοκρασία παρακολουθούνται με πεχάμετρο Hanna. Το επεξεργαζόμενο απόβλητο τίθεται σε κυκλοφορία με περιστατική αντλία.

Οι ηλεκτρολύσεις διεξάγονται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε κυλινδρική γυάλινη κυψέλη όγκου 400 ml με όγκο επεξεργαζόμενου συνθετικού διαλύματος νικελίου και πραγματικού αποβλήτου 200 ml και μαγνητική ανάδευση 500 rpm. Ως ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται τρεις πλάκες αργιλίου με διαστάσεις 10cm x 5cm x 0.2cm βυθισμένες κατά 6cm στο διάλυμα με δραστική επιφάνεια 30 cm<sup>2</sup> έκαστη. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 0.5 cm. Για αποφυγή παθητικοποίησης και αύξηση της αγωγιμότητας του διαλύματος προστίθεται ανάλογη ποσότητα ηλεκτρολύτη KCl σε κάθε επεξεργαζόμενο διάλυμα. Δείγματα λαμβάνονται κάθε 5 min., διηθούνται με χαρτί διήθησης Whatman (Grade 40). Η υπολειμματική συγκέντρωση του νικελίου προσδιορίζεται με Φασματοσκοπία Ατομικής Απορρόφησης AAS (Perkin Elmer 5100).

Στην εικόνα 1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης διεργασίας ΦΒ-ΗΚ.



Εικόνα 1: Διάγραμμα πειραματικής διάταξης. 1. ΦΒ ηλιακός συλλέκτης, 2. Ρυθμιστής, 3. Αντιδραστήρας ηλεκτροκροκίδωσης, 4. Ηλεκτρόδιο (α) 5. Ηλεκτρόδιο (β), 6. Ηθμός, 7. Επεξεργαζόμενο διάλυμα, 8. Ροόμετρο, 9. Περισταλτική αντλία, 10. Δοχείο αποβλήτου.

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η διεργασία ΦΒ-ΗΚ επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως το αρχικό pH του διαλύματος, η πυκνότητα ρεύματος, η αγωγιμότητα, η παροχή του αποβλήτου και ο χρόνος επεξεργασίας. Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκαν όλες αυτές οι παράμετροι για να αξιολογηθεί η διεργασία απομάκρυνσης του νικελίου από πραγματικά υγρά απόβλητα επιμεταλλώσεων.

##### 3.1.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ pH

Πειραματικές μετρήσεις διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας συνθετικά υδατικά διαλύματα  $\text{Ni}^{2+}$  συγκέντρωσης 50 mg/L στην περιοχή pH 2-10. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του νικελίου μετά από 20 min χρόνου ηλεκτρόλυσης με πυκνότητα ρεύματος 20 mA/cm<sup>2</sup> λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές (>97%) στην περιοχή pH 4-10. Η εκατοστιαία απομάκρυνση είναι πολύ χαμηλή στη περιοχή pH<2. Αυτή αυξάνεται σημαντικά στη τιμή pH=4, παραμένει υψηλή και σχεδόν σταθερή στη περιοχή pH 4-10 και αρχίζει να ελαττώνεται βαθμιαία για τιμές pH>10. Η ελάττωση της αποτελεσματικότητας της ηλεκτροκροκίδωσης σε ισχυρά όξινα και ισχυρά αλκαλικά διαλύματα περιγράφεται και από άλλους ερευνητές [9,12]. Σε αλκαλικό περιβάλλον (pH>8) η απομάκρυνση του νικελίου, πέραν της ηλεκτροκροκίδωσης, συμβαίνει εν μέρει και λόγω καθίζησης του μετάλλου ως αδιάλυτο υδροξείδιο, όπως προαναφέρθηκε (Αντίδραση 2). Οι επιτρεπόμενες τιμές του pH στις απορροές αποβλήτων είναι 5.5 έως 9. Επιπρόσθετα, η αυξημένη διαλυτότητα του σχηματιζόμενου κροκιδωτικού  $\text{Al}(\text{OH})_3$  σε ισχυρότερα όξινα και αλκαλικά διαλύματα μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη από την επιτρεπτή συγκέντρωση του Al στο επεξεργαζόμενο διάλυμα. Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους η διεργασία της ηλεκτροκροκίδωσης διενεργείται με τιμές pH διαλύματος μεταξύ 5.5 και 9. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτροκροκίδωσης η τιμή του pH αυξάνεται από την αρχική τιμή 4 στην τελική 8 δηλαδή εντός των επιτρεπόμενων ορίων και επομένως δεν χρειάζεται ρύθμιση.

Πίνακας 2: Επίδραση του αρχικού pH στην απομάκρυνση του νικελίου. Αρχική συγκέντρωση νικελίου = 96 mg/L, πυκνότητα ρεύματος = 20 mA/cm <sup>2</sup> , χρόνος ηλεκτρόλυσης = 15 min., ενεργός επιφάνεια ηλεκτροδίου = 60 cm <sup>2</sup>									
Αρχικό pH	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Απομάκρυνση %	28.1	84.4	97.5	98.4	97.4	98.8	99.6	98.5	99.2

### 3.1.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι Khosla *et al.* [19] αναφέρουν ότι η πυκνότητα ρεύματος προσδιορίζει το ρυθμό δόσης του κροκιδωτικού, το ρυθμό σχηματισμού, το μέγεθος των φυσαλίδων και των συσσωμάτων και κατά συνέπεια το ρυθμό απομάκρυνσης των ρύπων. Μετρήσεις διεξήχθησαν με διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος 10, 20 και 30 mA/cm<sup>2</sup> και αρχική τιμή pH=4.5, σε συνθετικό υδατικό διάλυμα με σταθερή αρχική συγκέντρωση νικελίου 100 mg/L και πραγματικό δείγμα αποβλήτου με σταθερή αρχική συγκέντρωση νικελίου 96 mg/L. Σύμφωνα με τον Πίνακα 3, ο ρυθμός απομάκρυνσης του νικελίου αυξάνεται, όπως είναι αναμενόμενο, με αυξανόμενη πυκνότητα ρεύματος. Για τις τρεις δεδομένες πυκνότητες ρεύματος με απαιτούμενους χρόνους ηλεκτροχημικής επεξεργασίας 35, 20 και 10 min. για το συνθετικό διάλυμα και 45, 25 και 15 min. αντίστοιχα για το πραγματικό απόβλητο, τα ιόντα Ni<sup>2+</sup> απομακρύνονται ποσοτικά (>99%) και η συγκέντρωσή τους πέφτει κάτω από το ανώτερο επιτρεπτό όριο των 2 mg/L. Τα πραγματικά απόβλητα περιέχουν, ως γνωστό, πέραν του νικελίου και άλλα ανόργανα και οργανικά πρόσθετα, όπως ρυθμιστικά του pH, και διάφορες βελτιωτικές, επιτεδοποιητικές και αντιπολικές ουσίες οι οποίες ανταγωνίζονται τα ιόντα νικελίου για προσρόφηση στο κροκιδωτικό Al(OH)<sub>3</sub> και συνεπώς για τον καθαρισμό τους απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ηλεκτροχημικής επεξεργασίας.

Πίνακας 3: Μεταβολή συγκέντρωσης του νικελίου συναρτήσει του χρόνου για διάφορες πυκνότητες ρεύματος						
Χρόνος (min)	Συνθετικό διάλυμα (συγκέντρωση Ni <sup>2+</sup> σε mg/L)			Δείγμα αποβλήτου (συγκέντρωση Ni <sup>2+</sup> σε mg/L)		
	10 mA/cm <sup>2</sup>	20 mA/cm <sup>2</sup>	30 mA/cm <sup>2</sup>	10 mA/cm <sup>2</sup>	20 mA/cm <sup>2</sup>	30 mA/cm <sup>2</sup>
0	100.0	100.0	100.0	96.0	96.0	96.0
5	42.5	26.2	8.3	78.2	39.5	24.4
10	21.3	9.4	0.7	57.8	12.4	3.1
15	14.4	2.8		46.3	4.7	0.4
20	9.1	0.6		36.4	1.9	
25	3.6			27.1	0.6	
30	1.2			15.8		
35	0.4			8.3		
40				2.4		
45				0.9		

### 3.1.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Η αγωγιμότητα του αποβλήτου επηρεάζει άμεσα την εφαρμοζόμενη τάση και επομένως την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκατοστιαία απομάκρυνση του νικελίου δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου και διατηρείται σταθερή >99 % για τις τρεις εξεταζόμενες αγωγιμότητες των 1000, 2000 και 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Πίνακας 2).

Αγωγιμότητα ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Τάση (V)	Κατανάλωση ενέργειας ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ )	Απομάκρυνση Ni (%)
1000	25.8	36.9	99.2
2000	12.6	18.6	99.6
4000	5.9	8.5	99.3

### 3.1.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ

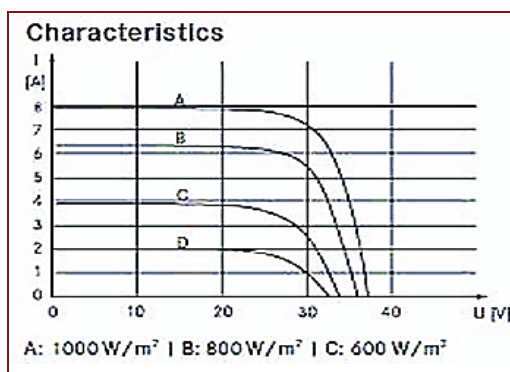
Η πυκνότητα ρεύματος που παράγεται από την ΦΒ διάταξη εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία της ΦΒ διάταξης. Αυτές οι παράμετροι δεν μπορούν να ελεγχθούν και αλλάζουν βαθμιαία κατά τη διάρκεια της ημέρας ή ξαφνικά λόγω διασταύρωσης των νεφών ή αλλαγής της ταχύτητας των ανέμων. Οι Valero *et al.* [17] προτείνουν έναν έξυπνο τρόπο λειτουργίας για να καταστεί το σύστημα ΦΒ-ΗΚ ευέλικτο και προσαρμόσιμο στη στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία με διατήρηση σταθερού του λόγου της πυκνότητας ρεύματος προς την παροχή του αποβλήτου. Έτσι, όταν μεταβάλλεται η πυκνότητα του ρεύματος της ΦΒ διάταξης πρέπει ανάλογα να μεταβάλλεται και ο ρυθμός παροχής του αποβλήτου για να διατηρείται ο παραπάνω λόγος σταθερός. Η λειτουργία αυτή υπονοεί ότι η ποσότητα του επεξεργαζόμενου αποβλήτου σχετίζεται άμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία.

Τα πειράματα με σταθερή πυκνότητα ρεύματος και ρυθμό παροχής του αποβλήτου πραγματοποιήθηκαν σε ηλιόλουστο μεσημέρι και σε σύντομες περιόδους για διατήρηση σταθερής κατά προσέγγιση ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5, αυξανόμενη της πυκνότητας ρεύματος αυξάνεται ανάλογα η τάση και ο ρυθμός παροχής του αποβλήτου, ενώ ο χρόνος παραμονής μειώνεται. Η εκατοστιαία απομάκρυνση του νικελίου δεν επηρεάζεται και παραμένει υψηλή >99 % σε όλα τα πειράματα.

Πυκνότητα ρεύματος ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	Ρυθμός παροχής (L/h)	Τάση (V)	Χρόνος παραμονής (min)	Απομάκρυνση Ni (%)
10	0.5	6.8	24	99.7
20	1.0	12.6	12	99.6
30	1.5	18.5	8	99.3

### 3.2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της καμπύλης τάσης-έντασης της ΦΒ διάταξης για ηλιακή ακτινοβολία  $1000 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$  δίνονται στην εικόνα 2. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  είναι το μέγιστο παραγόμενο ρεύμα από την ΦΒ διάταξη για μηδενική τάση μεταξύ των ακροδεκτών. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία και ανέρχεται στα 5.89 Ampere. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι η μέγιστη λαμβανόμενη τάση απουσία φορτίου. Αυτή εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία και ανέρχεται στα 44.27 Volt.



Εικόνα 2: Καμπύλη/-V της ΦΒ διάταξης

### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτροκροκίδωση συνδυάζει την αυτόνομη και φιλική προς στο περιβάλλον φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια και την αποτελεσματικότητα της διεργασίας ηλεκτροκροκίδωσης επιτυγχάνοντας ασφαλή, γρήγορη και αποτελεσματική απομάκρυνση του νικελίου από υγρά απόβλητα επιμεταλλωτηρίων. Βέλτιστη απομάκρυνση παρατηρείται στη περιοχή pH 4-10. Ο ρυθμός απομάκρυνσης αυξάνεται με αυξανόμενη πυκνότητα ρεύματος. Η αρχική συγκέντρωση των  $96 \text{ mg/L}$  του νικελίου στο απόβλητο νερό πέφτει κάτω από το ανώτερο επιτρεπτό όριο σε 30 min ηλεκτροχημικής επεξεργασίας με πυκνότητα ρεύματος  $20 \text{ mA/cm}^2$ . Σε σύγκριση με την χημική κροκίδωση, όπου απαιτείται αυξημένη δόση κροκιδωτικού και διάρκεια αρκετών ωρών, η ηλεκτροκροκίδωση αποτελεί γρηγορότερη και οικονομικότερη μέθοδο για την απομάκρυνση των μεταλλικών ρύπων από το νερό και τα υδατικά βιομηχανικά απόβλητα. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα η προτεινόμενη διεργασία φωτοβολταϊκής ηλεκτροκροκίδωσης μπορεί να προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα στην διαχείριση βιομηχανικών αποβλήτων επιμεταλλωτηρίων και ειδικότερα σε απομακρυσμένες και απομονωμένες περιοχές χωρίς σύνδεση με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης. Επιπρόσθετα, λόγω της μη χρήσης συσσωρευτών αυξάνεται η ανθεκτικότητα του συστήματος και περιορίζεται το περιβαλλοντικό πρόβλημα διάθεσης των συσσωρευτών.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mubarak N. M., Sahu J. N., Abdullah E. C. and Jayakumar N. S., 2014, "Removal of Heavy Metals from Wastewater Using Carbon Nanotubes", Sep. Purif. Rev. 43, pp. 311-338.
- [2] Rawat A.P., Giri K., and Rai J.P.N., 2014, "Biosorption kinetics of heavy metals by leaf biomass of *Jatropha curcas* in single and multi-metal system", Environ. Monit. Assess. 186, pp. 1679-1687.

- [3] Balaska F., Bencheikh-Lehocine M., Chikhi M., Meniai A.H., and Bouledjoudja A., 2012, "Experimental Study and Simulation of Complexation Reaction of Chromium by EDTA for its Recovery by Ultrafiltration", *Energy Procedia* 19, pp. 249-258.
- [4] Liang Feng-Bing, Song Yan-Lei, Huang Chong-Pin, Li Ying-Xia, and Chen Biao-Hua, 2013, "Synthesis of Novel Lignin-Based Ion-Exchange Resin and Its Utilization in Heavy Metals Removal", *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, pp. 1267–1274.
- [5] Tünay, O. and Kabdaşlı, N. I., 1994, "Hydroxide precipitation of complexed metals" *Water Res.*, 28, pp. 2117-2125.
- [6] Bolger P.T. and Szlag D.C. 2004, "Electrochemical treatment and reuse of nickel plating rinse waters", *Environ. Progr.* 21, pp. 203-208.
- [7] Wang Lu H., Yan J and Bu B.S. (2010), Recovery of nickel ions from simulated electroplating rinse water by electrodeionization process, *Water Science and Technology*, 61, pp. 729-35.
- [8] Dermentzis K., 2010, "Removal of nickel from electroplating rinse waters using electrostatic shielding electro dialysis / electrodeionization", *J. Hazard. Mater.* 173, pp. 647-652.
- [9] Adhoum N., Monser L., Bellakhal N., and Belgaied J-E. 2004, "Treatment of electroplating wastewater containing  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Cr(VI)}$  by electrocoagulation", *J. Hazard. Mater.* B112, pp. 207-213.
- [10] Dermentzis K., Valsamidou E. and Lazaridou A. 2011, "Removal of Nickel from wastewater by electrocoagulation with aluminum electrodes", *J. Engin. Sci. Technol. Rev.*, 4, pp. 188-192.
- [11] Kobya M., Demirbas E., Parlak N.U. and Yigit S, 2010, "Treatment of cadmium and nickel electroplating rinse water by electrocoagulation", *Environ Technol.* 13, pp. 1471-1481.
- [12] Vasudevan S. and Oturan M.A., 2013, "Electrochemistry: as cause and cure in water pollution—an overview", *Environ. Chem. Lett.* 12, pp. 97-108.
- [13] Irfan A.A., 1997, "Photovoltaic Application in Remote Areas", *Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.*
- [14] Alvarez-Guerra E., Dominguez-Ramos A., and rabien A., 2011, "Design of the Photovoltaic Solar Electro-oxidation (PSEO) process for wastewater treatment", *Chem. Engin. Res. Des.* 89, pp. 2679-2685.
- [15] Dermentzis K., Marmanis D., Christoforidis A. and Moutzakis A. 2014, "Photovoltaic electrocoagulation process for remediation of chromium plating wastewaters", *Desal. Water Treat.*, DOI:10.1080/19443994.2014.950992.
- [16] Ortiz J.M., Exposito E., Gallud F., Garcia-Garcia V., Montiel V., and Aldaz A., 2007, "Electrodialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behavior", *Desalination* 208, pp. 89-100.
- [17] Valero D., Ortiz J.M., Exposito E., Montiel V. and Aldaz A., 2008, "Electrocoagulation of a synthetic textile effluent powered by photovoltaic energy without batteries: Direct connection behavior", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92, pp. 291-297.
- [18] Zhang S., Zhang J., Wang W., Li F. and Cheng X., 2013, "Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 117, pp. 73-80.
- [19] Khosla N.K., Venkachalam S. and Sonrasundaram P., 1991, Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation, *J. Appl. Electrochem.* 21, pp. 986-990.



**ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΓΙΑ ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ**

**Γεωργία Ε. Γιοβρή- Σκόδρα<sup>1</sup>, Αθανάσιος Π. Χασιακός<sup>2</sup>  
και Θεοφάνης Α. Γέμπτος<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός MSc, Τμήμα Φυσικών Πόρων, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Πελοποννήσου, Δυτικής Ελλάδος & Ιονίου, Αθηνών 105, 26500, Πάτρα

<sup>2</sup> Αν. Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, Πανεπιστήμιο Πατρών 26500, Πάτρα

<sup>3</sup> Αν. Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 384 46 Βόλος

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σε αγροτικές περιοχές με υψηλά ποσοστά ηλιοφάνειας στις οποίες δεν υπάρχει διαθέσιμη υποδομή για διασύνδεση με το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτροδότησης, μία από τις περισσότερο δημοφιλείς εφαρμογές είναι η χρήση της ηλιακής ενέργειας για άντληση νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση των υφισταμένων καλλιεργειών, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σήμερα, η άρδευση των καλλιεργειών αυτών, πραγματοποιείται με αυτόνομες αντλίες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα (κυρίως πετρέλαιο).

Στην εργασία αυτή μελετώνται οι τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές παράμετροι ενός αυτόνομου Φωτοβολταϊκού συστήματος για την άρδευση καλλιεργειών και παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για την αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιασμών και την επιλογή βέλτιστων λύσεων. Η αξιολόγηση γίνεται σε συνδυασμό με υφιστάμενα συστήματα άντλησης τα οποία μελετώνται να λειτουργούν με χρήση Φωτοβολταϊκών συστημάτων και λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες άρδευσης της εκάστοτε καλλιέργειας.

Η μελέτη εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγινε σε μία εκτεταμένη καλλιέργεια βαμβακιού στη περιοχή της Θεσσαλίας και παρουσιάζονται συγκριτικά στοιχεία των οικονομικών και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της αντικατάστασης ορυκτών καυσίμων (κυρίως πετρελαίου) με Φωτοβολταϊκά συστήματα.

Λέξεις-Κλειδιά: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, φωτοβολταϊκά συστήματα άρδευσης, στάγδην άρδευση

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρείται σήμερα ως η πλέον συμφέρουσα λύση στο ενεργειακό πρόβλημα. Το ενδιαφέρον για ευρύτερη χρήση των ΑΠΕ αυξάνεται σταθερά και ενθαρρύνεται η ανάπτυξη νέων καινοτόμων τεχνολογιών. Ιδιαίτερα, τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Φ/Β) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και για ποικίλους σκοπούς [1], [2].

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και οι λοιπές εκπομπές αερίων έχουν αυξηθεί σημαντικά κατά τα τελευταία έτη [3]. Το 2009 οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) μετρήθηκαν στους 107.6 Mtons, εκ των οποίων ποσοστό 89% προέρχεται από τον τομέα παραγωγής ενέργειας. Χρησιμοποιώντας το έτος 1990 ως έτος αναφοράς, υπάρχει μία ραγδαία αύξηση σε ρύπους, ιδιαίτερα σε CO<sub>2</sub>, σε ποσοστό 23,4% ανά έτος. Η κύρια αιτία της αλλαγής αυτής είναι η αύξηση των εκπομπών από τη χρήση της ενέργειας. Η χρήση ηλιακών συλλεκτών για ηλεκτροπαραγωγή, οδηγεί στα κάτωθι περιβαλλοντικά οφέλη:

- Εξοικονόμηση καυσίμου ισοδύναμο με 50-70 kg πετρελαίου για κάθε m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη ανά έτος
- Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> πάνω από 750 kg ανά m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη ανά έτος (όταν υποκαθιστά ηλεκτρισμό)
- Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> πάνω από 250 kg ανά m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη ανά έτος (όταν υποκαθιστά πετρέλαιο)

Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η χρήση ηλιακών συλλεκτών δεν εφαρμόζεται χωρίς επιπτώσεις. Ειδικότερα, τα Φ/Β επηρεάζουν το περιβάλλον με τρεις τρόπους:

- Η κατασκευή τους απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας
- Μετά το πέρας της λειτουργίας τους βλαβερά υλικά (ιδιαίτερα διοξείδιο του πυριτίου) εμπεριέχονται στους διατιθέμενους συλλέκτες τους
- Από την μη ορθολογική απομάκρυνση σπασμένων ή ελαττωματικών συλλεκτών βλαβερά υλικά που εμπεριέχονται σε αυτούς διαχέονται στο περιβάλλον

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στη Γεωργία χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια κατά κόρον σε περιοχές όπου δεν υπάρχει ή είναι οικονομικά ασύμφορο να υπάρξει, δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Η χρήση Φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων για την εξυπηρέτηση αντλητικών εγκαταστάσεων, κυρίως αρδευτικών, αποτελεί στοχευμένη εφαρμογή με την έννοια ότι οι απαιτήσεις σε ενέργεια υφίστανται κυρίως τους θερινούς μήνες του έτους τότε δηλαδή που έχουμε και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα σε ηλιακή ενέργεια. Ταυτόχρονα, το σύστημα μπορεί να είναι εντελώς αυτόνομο εφόσον η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας μπορεί να μετατοπισθεί σε ανάγκη αποθήκευσης νερού, κάτι που σε τέτοιες εγκαταστάσεις είναι αυτονόητο. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιούμε απευθείας την διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια αντλώντας νερό και αποθηκευόντάς το για την διάρκεια που δεν θα υπάρχει ηλιοφάνεια. Αυτού του είδους τα συστήματα εφαρμόζονται σε καλλιέργειες στην Ισπανία και στην Ιταλία [4].

Επίσης Φ/Β συστήματα για την άντληση νερού για οικιακή χρήση ή για άρδευση χρησιμοποιούνται κυρίως σε χώρες αναπτυσσόμενες, όπως η Ινδία και χώρες της Αφρικής.

Στα σύγχρονα συστήματα άρδευσης χρησιμοποιείται πίεση για να αυξηθεί η διανομή του νερού μέσα από σωλήνες ή εύκαμπτους σωλήνες από καουτσούκ, απευθείας στις ρίζες των καλλιεργειών ή για το πότισμα των φυτών σε επιλεγμένες περιοχές (με ψεκασμό ή στάγδην).

Ο συνδυασμός αντλιών με φωτοβολταϊκά σε συστήματα στάγδην άρδευσης, είναι ιδανικός σε περιοχές που δεν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρισμού.

Η παροχή του νερού γίνεται απευθείας με χρήση αντλίας ή με τη χρήση υπερυψωμένης δεξαμενής ή και με το συνδυασμό των δύο: αντλείται νερό στη δεξαμενή και στη συνέχεια διοχετεύεται από αυτή στα σημεία ποτίσματος (σε επίπεδους αγρούς).

Σε ένα σύστημα, άμεσα συνδεδεμένο με Φ/Β, απαιτείται η χρήση ενός ελεγκτή για σταθερότερη πίεση και ροή. Κάθε σύστημα στάγδην άρδευσης χαμηλής πίεσης μπορεί να χρησιμοποιήσει αντλίες με Φ/Β για καλύτερη άντληση καθώς και για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής [5].

Στην παρούσα εργασία μελετάται η εγκατάσταση συστήματος ηλεκτροδότησης για άρδευση γεωργικών καλλιέργειών με χρήση Φ/Β, σε μία περιοχή στην οποία δεν υφίσταται υποδομή της ΔΕΗ (μελέτη εφαρμογής στο Θεσσαλικό κάμπιο). Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τον υπολογισμό του βέλτιστου τρόπου ηλεκτροδότησης του συστήματος άρδευσης. Η χρήση Φ/Β στην περίπτωση αυτή προσφέρει μία περιβαλλοντικά φιλική λύση, η οποία για διασυνδεδεμένο σύστημα μπορεί να αποδειχθεί και οικονομικά συμφέρουσα.

Η εργασία αυτή δομείται ως εξής: Στην ενότητα 2 αναφέρονται οι υπολογισμοί για την επιλογή της αντλίας και γίνεται μία προσέγγιση για την επιλογή του καταλληλότερου Φ/Β συστήματος. Στην ενότητα 3 αναλύονται τρία διαφορετικά Φ/Β αντλητικά συστήματα και παρουσιάζεται μία μελέτη περίπτωσης σχεδιασμού ενός αυτόνομου συστήματος στάγδην άρδευσης. Τα συμπεράσματα παρουσιάζονται στην ενότητα 4.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε περιοχή και για κάθε είδους καλλιέργεια, εισάγοντας τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης [6], [7].

Η μεθοδολογία αυτή συνίσταται από τα εξής βασικά στάδια:

- Καθορισμός των αναγκών άρδευσης της καλλιέργειας, με βάση κλιματολογικά στοιχεία από βάση δεδομένων.
- Υπολογισμός του μεγέθους του απαιτούμενου Φ/Β συστήματος.
- Σχεδιασμός του αυτόνομου Φ/Β συστήματος άρδευσης εξετάζοντας τρεις (3) διαφορετικές περιπτώσεις.

Η εγκατάσταση συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, δεν είναι μία απλή επένδυση. Πρόκειται για ένα σημαντικό τεχνικό έργο, για το οποίο θα πρέπει να εκπονηθεί λεπτομερής τεχνική και οικονομική μελέτη και να συνεκτιμηθούν διαφορετικοί παράγοντες (οικονομικοί, τεχνικοί, περιβαλλοντικοί, σκοπιμότητας κ.λπ.) για την τελική απόφαση, την σκοπιμότητα και τον τρόπο υλοποίησης του έργου [8].

### 2.1 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

Για κάθε καλλιέργεια θα πρέπει να είναι δεδομένες οι απαιτήσεις υδροδότησης, δηλαδή, η διάρκεια, η πίεση και η συχνότητα ποτίσματος. Με βάση τα στοιχεία αυτά, την απαιτούμενη παροχή  $Q$  της αντλίας ( $m^3/στρέμμα$ ) και την πίεση του νερού  $P(at)$  για την καλλιέργεια, επιλέγεται το σύστημα υδροδότησης. Η παροχή υπολογίζεται με βάση τις απαιτήσεις άρδευσης ανά αγροτεμάχιο και τις ώρες και ημέρες ποτίσματος. Η πίεση είναι διαφορετική για κάθε σύστημα ποτίσματος. Για την περίπτωση της στάγδην άρδευσης, απαιτείται χαμηλή πίεση. Η ηλεκτρική ισχύς σε KW για την κίνηση της αντλίας είναι:

$$P_e = P * Q \quad (1)$$

όπου  $P$  είναι η πίεση της αντλίας σε kPa και  $Q$  είναι η παροχή του νερού σε  $m^3/s$ .

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος για τη λειτουργία της αντλίας σε KW είναι το πρώτο στάδιο το οποίο απαιτείται για την εκτίμηση των ετησίων αναγκών της καλλιέργειας σε νερό. Για συντελεστή απόδοσης κινητήρα  $e_m$  και συντελεστή απόδοσης αντλίας  $e_p$  η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς σε KW για την κίνηση της αντλίας δίδεται από την εξίσωση [4]:

$$P_R = P_e / e_m * e_p \quad (2)$$

## 2.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Όταν μεταξύ των διαδοχικών ποτίσμάτων ενός αγροτεμαχίου μεσολαβεί χρόνος μεγαλύτερος της χρονικής διάρκειας ενός ποτίσματος, τότε είναι δυνατόν να μειώσουμε το συνολικό κόστος της επένδυσης, χρησιμοποιώντας μικρότερο εξοπλισμό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι για μια συγκεκριμένη καλλιέργεια σε αγροτεμάχιο συνολικής έκτασης  $S_i$ , ο χρόνος ποτίσματος είναι  $t_i$  και ο χρόνος που μεσολαβεί (νεκρός χρόνος) μεταξύ δύο διαδοχικών ποτίσμάτων του ίδιου αγροτεμαχίου είναι  $t_D$ . Αν  $t_i \leq t_D$  γίνεται φανερό ότι ο εξοπλισμός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τουλάχιστον ένα (1) ακόμη πότισμα ενός αγροτεμαχίου ίδιας έκτασης. Ο αριθμός των (όμοιων) αγροτεμαχίων που μπορούν να ποτιστούν, εξαρτάται από το χρόνο ποτίσματος  $t_i$  και το νεκρό χρόνο  $t_D$ . Συγκεκριμένα το πλήθος  $\tau$  των όμοιων αγροτεμαχίων που μπορούν να ποτίζονται σε ένα κύκλο ποτίσματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$\tau = \left\lfloor \frac{t_i + t_D}{t_D} \right\rfloor \quad (3)$$

όπου  $\lfloor x \rfloor$  το ακέραιο μέρος του  $x$ .

Εναλλακτικά, ο παραπάνω υπολογισμός θα μπορούσε να βοηθήσει στο τμηματικό πότισμα ενός συγκεκριμένου αγροτεμαχίου, καθορίζοντας σε πόσα (νοητά) τμήματα θα πρέπει να χωριστεί το αγροτεμάχιο. Αυτό προκύπτει από το πηλίκο της έκτασης  $S_i$  προς το πλήθος  $\tau$  μέσω της σχέσης

$$S = \left\lfloor \frac{S_i}{\tau} \right\rfloor \quad (4)$$

όπου  $\lfloor x \rfloor$  ο μικρότερος ακέραιος που είναι μεγαλύτερος του  $x$ .

Σημειώνεται ότι με αυτό τον τρόπο όλοι οι υπολογισμοί ισχύος γίνονται για την νέα (μικρότερη) έκταση  $S$ , καταλήγοντας σε μειωμένες απαιτήσεις Φ/Β εγκαταστάσεων και κατά συνέπεια κόστους εγκατάστασης.

## 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Στην εργασία αυτή θα εξεταστούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις υλοποίησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος για στάγδην άρδευση:

- Περίπτωση 1: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου που θα τροφοδοτεί τριφασικό AC κινητήρα συνδεδεμένο σε τυπική αντλία παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα [2], [9].
- Περίπτωση 2: Πολλαπλά σημεία άντλησης αποτελούμενα από αυτοτελή συγκροτήματα που θα περιλαμβάνουν μικρό φωτοβολταϊκό πεδίο, συμπαγή αντλία συνεχούς ρεύματος (DC) και ελεγκτή λειτουργίας (controller) [5].
- Περίπτωση 3: Εγκατάσταση υπερυψωμένης δεξαμενής, αντλητικού συγκροτήματος για την τροφοδοσία της δεξαμενής και πιεστικού συγκροτήματος για την τροφοδοσία του δικτύου ποτίσματος από τη δεξαμενή, τα οποία θα τροφοδοτούνται από μικρό Φ/Β πάρκο [5].

Ακολουθεί σύγκριση των προαναφερθεισών τριών περιπτώσεων που αφορά στην υλοποίηση αυτόνομου Φ/Β συστήματος για στάγδην άρδευση.

Περίπτωση 1*Πλεονεκτήματα*

- Αποτελεί μία εγκατάσταση
- Υπάρχει δυνατότητα συνιδιοκτησίας – παράλληλης χρήσης
- Πιθανή αξιοποίηση και σε άλλη εφαρμογή (π.χ. στις ηλεκτροβάνες)

*Μειονεκτήματα*

- Αυξημένο μέγεθος
- Μικρός βαθμός απόδοσης
- Μικρή ευελιξία για χρήση σε μικρότερα ή μεγαλύτερα μη γειτονικά αγροτεμάχια
- Απαιτεί σημαντικό κόστος συντήρησης και ασφάλειας.

Περίπτωση 2*Πλεονεκτήματα*

- Εύκολη προσαρμογή για κάθε μέγεθος αγροτεμαχίου
- Υψηλός βαθμός απόδοσης
- Πιο εργονομική διαχείριση του χώρου που θα καταλαμβάνει (λόγω του μικρού μεγέθους του Φ/Β πεδίου)
- Υψηλή διαθεσιμότητα (λειτουργία και με μειωμένη ηλιοφάνεια)
- Απουσία κόστους συντήρησης και διατήρησης συσσωρευτών
- Δυνατότητα λειτουργίας και με εναλλασσόμενη τάση AC

*Μειονεκτήματα:*

- Απαιτεί κατακερματισμό του δικτύου άρδευσης
- Δύσκολη η χρήση σε άλλες εφαρμογές
- Πολλαπλότητα αντλιών
- Μη σταθερές συνθήκες λειτουργίας (Q,P) στη διάρκεια της ημέρας
- Ενδεχομένη δυσκολία εφαρμογής σε ιδιόμορφα αγροτεμάχια

Περίπτωση 3*Πλεονεκτήματα*

- Υψηλός βαθμός απόδοσης
- Υψηλή διαθεσιμότητα
- Σταθερές συνθήκες λειτουργίας

*Μειονεκτήματα*

- Απαιτεί κατακερματισμό του δικτύου άρδευσης
- Δύσκολη η χρήση σε άλλες εφαρμογές
- Ενδεχομένη δυσκολία εφαρμογής σε ιδιόμορφα αγροτεμάχια
- Απαιτούνται επιπλέον αδειοδοτήσεις για την εγκατάσταση της δεξαμενής.

**3.1 ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕ ΣΤΑΓΟΝΕΣ (ΣΤΑΓΔΗΝ ΑΡΔΕΥΣΗ)**

Το πότισμα γίνεται μέσω σωληνωτού δικτύου ποτίσματος στο οποίο ο σταλακτηφόρος

σωλήνας δικτυώνεται σε όλη την επιφάνεια του χλοοτάπητα ή των φυτών. Οι ενσωματωμένοι σταλάκτες έχουν απόσταση μεταξύ τους από 0.25 έως 0.40 μέτρα και οι γραμμές των σωλήνων απέχουν από 0.30 ως 0.50 μέτρα. Οι σταλακτηφόροι είναι επιφανειακοί ή υπόγειοι.

Με τη μέθοδο αυτή το αρδευτικό νερό χορηγείται φιλτραρισμένο κατ' ευθείαν στις ρίζες των φυτών με έναν προκαθορισμένο ρυθμό, σε μικρές ποσότητες και σε μικρά χρονικά διαστήματα, με τη μορφή σταγόνων.

Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου αυτής είναι:

1. Μικρή παροχή.
2. Μερική διαβροχή του εδάφους.
3. Μεγάλη συχνότητα και διάρκεια της άρδευσης.
4. Υψηλό ποσοστό υγρασίας στο έδαφος και συνεπώς χαμηλή εδαφική τάση.
5. Κίνηση του νερού στο έδαφος σε δύο ή τρεις διευθύνσεις σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους που η κίνηση γίνεται μόνο κατά την κατακόρυφη έννοια.

### 3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Η περιοχή ενδιαφέροντός μας είναι η θέση «Μύρινα» της περιοχής «Κάμπος» του Δήμου Καρδίτσας του Νομού Καρδίτσας [1],[3]. Τα κύρια χαρακτηριστικά της περιοχής είναι:

- Καλλιεργείται βαμβάκι.
- Η εκμετάλλευση έχει περισσότερα από 40 αγροτεμάχια έκτασης από 10-50 στρέμματα (1-5 εκτάρια) σε ακτίνα 8 χιλιομέτρων.
- Αρδύεται από συλλογικό δίκτυο (ΤΟΕΒ Ταυρωπού).
- Δεν υπάρχει διαθέσιμη υποδομή της ΔΕΗ.
- Η άρδευση γίνεται είτε με χρήση πετρελαίου (σύνδεση με τα τρακτέρ), είτε με κατάκλιση.
- Καταβάλλεται προσπάθεια η άρδευση να γίνεται με τη μέθοδο στάγδην.

*Δεδομένα της περιοχής:*

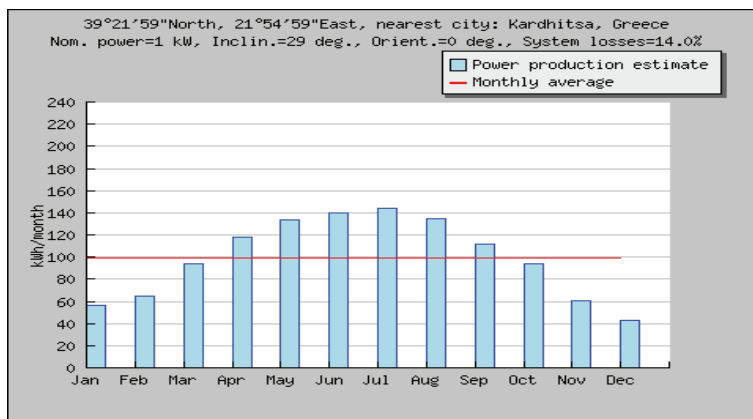
Υψόμετρο (m)	106 m a.s.l.
Γεωγραφικό Πλάτος (°)	39°21'59" Βόρεια
Γεωγραφικό Μήκος (°)	21°54'59" Ανατολικά

*Υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας:*

Η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα για τη συγκεκριμένη τοποθεσία απεικονίζεται στην εικόνα 1 [9].

*Εκτίμηση κόστους επένδυσης:*

- Κόστος Φ/Β αυτόνομου πάρκου με AC μετατροπέα τάσης, με βάσεις στήριξης και ηλιοστάτες και συσσωρευτές για την εκκίνηση (για σταθερή στήριξη)
- Κόστος αντλίας AC/DC
- Κόστος διαμόρφωσης περιβάλλοντος χώρου (περίφραξη, διαμόρφωση, βοηθητικές εργασίες)



Εικόνα 1: Προβλεπόμενη παραγωγή για την τοποθεσία «Μύρινα» ανά μήνα [9].

#### Εκτίμηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης της επένδυσης:

- Κόστος παραγωγής KWh για αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα (πχ έξοδα συντήρησης και ασφάλειας λειτουργίας)

#### Εκτίμηση ωφελειών της επένδυσης:

- Εξοικονόμηση καυσίμου (πετρελαίου)/m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη
- Μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά έτος όταν υποκαθίσταται η χρήση πετρελαίου εκφρασμένη ανά m<sup>2</sup> ηλιακού συλλέκτη

#### Παρόν κόστος λειτουργίας:

- Κατανάλωση γεωργικού ελκυστήρα (πετρέλαιο, λάδια), συντήρηση
- Καλλιεργητική περίοδος
- Τιμή πετρελαίου

#### Απαιτήσεις νερού άρδευσης και μέγεθος δεξαμενής

Για τυπική στάγδην άρδευση σε μία περιοχή 10 στρεμμάτων (1 εκταρίου-ha) χρειάζονται περίπου 25-50 m<sup>3</sup> νερού / ημέρα (είναι κοινώς παραδεκτό ότι το 70% της περιοχής είναι υγρή και το 30% παραμένει στεγνή, συμπεριλαμβανομένων και των μεσοδιαστημάτων πρόσβασης). Η διακύμανση εξαρτάται από την καλλιέργεια και τον τύπο του εδάφους. Επομένως και η χωρητικότητα της δεξαμενής θα κυμαίνεται μεταξύ 25 και 50 m<sup>3</sup>.

#### Πίεση

Η πίεση στο σχεδιασμό είναι 1 bar (ισοδύναμο με 10m υδροστατικής κεφαλής). Συνήθως μετράται στο σημείο που ευρίσκεται στο 1/3 του μήκους του σωλήνα ποτίσματος. Στην πραγματικότητα κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 2,5 bar και εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους και την επιφάνεια. Η διακύμανση της απαιτούμενης πίεσης στο αγροτεμάχιο σαν σταθερά σχεδιασμού θα πρέπει να είναι +/- 10%. Οι σταλακτήρες και τα σημεία εκτόξευσης σχεδιάζονται για σταθερή πίεση 1 bar. Θα πρέπει να γίνεται φιλτράρισμα του νερού που εισέρχεται στους σωλήνες για να διασφαλίζεται σωστή πίεση.

### 3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η προτεινόμενη μέθοδος υπολογισμού μπορεί να χαρακτηριστεί ως απλή και αποτελεσματική. Ειδικότερα, οι υπολογισμοί αναγκών άρδευσης και μεγέθους Φ/Β αντλίας, γίνονται με ένα τρόπο εύκολο, που μπορεί να εφαρμοστεί τόσο από τους σχεδιαστές του έργου των Φ/Β όσο και από τους γεωργούς, χωρίς κάποια εξειδίκευση. Τα συνολικά δεδομένα περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την περιοχή εγκατάστασης, την αρδευόμενη έκταση και τις τιμές άρδευσης που επιλέχθηκαν ή υπολογίστηκαν, όπως αυτά απεικονίζονται στους πίνακες 1 και 2 [10], [11]. Το ετήσιο κόστος έχει υπολογιστεί με την παραδοχή τετράμηνης χρήσης Φ/Β για άρδευση ανά έτος.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι, κάποιες πληροφορίες/δεδομένα μπορεί να μεταβληθούν και να υπολογισθούν νέες τιμές. Αφού καθοριστεί η απαιτούμενη ισχύς, υπολογίζεται ο αριθμός των αναγκαίων Φ/Β που θα εγκατασταθούν και επιλέγεται η κατάλληλη αντλία [12].

Πίνακας 1: Υπολογισμός κόστους Φ/Β		
Υπολογισμός κόστους (ανά kWh)		
Ονομαστική ισχύς Φ/Β πάρκου	4,33	kW
Παραγόμενες kWh/ημέρα	16,22	kWh
Παραγόμενες kWh/μήνα	486,2	kWh
Κόστος/kWh	0,3	€/kWh
<b>Κόστος kWh/έτος</b>	<b>584</b>	<b>€/kWh</b>

Πίνακας 2: Υπολογισμός κόστους λειτουργίας αντλίας		
Υπολογισμός κόστους λειτουργίας αντλίας		
Έκταση καλλιέργειας	5	ha
Χρόνος ποτίσματος	1	ημέρες
Ωρες λειτουργίας / ημέρα	10	h
Κατανάλωση καυσίμου για κινητήρα	8	Lit/ha
Τιμή πετρελαίου	1.6	€/lit
Μήνες λειτουργίας	4	
Κόστος συντήρησης ελκυστήρα	25	€/h
Ετήσιο Κόστος συντήρησης ελκυστήρα	1200	€
Ετήσιο κόστος πετρελαίου	256	€
Κόστος λιπαντικών για κινητήρα πετρελαίου	10	€
<b>Συνολικό ετήσιο κόστος</b>	<b>1466</b>	<b>€</b>

Στον πίνακα 3 απεικονίζονται οι οικονομικοί δείκτες για ένα έργο με χρόνο ζωής 20 έτη, για τις τρεις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν [12]. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε δεδομένα κατασκευαστών Φ/Β, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες αποδοτικότητας και για ένα μέσο ρυθμό απόδοσης 5%. Τα έσοδα υπολογίζονται σύμφωνα με τον αναπτυξιακό Νόμο 3851/2012.



	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3
Έκταση καλλιέργειας (ha)	5	5	Η περίπτωση αυτή έχει εφαρμογή για έκταση μέχρι 1 ha και έχει κόστος 10725,70 €.
Κόστος επένδυσης (€)	11050	3800	
Λειτουργικό κόστος με χρήση πετρελαίου (€)	1466	1466	
Λειτουργικό κόστος με χρήση Φ/Β (€)	584	610	
Εσωτερικός ρυθμός απόδοσης (IRR) (%)	4,9	22	
Παρούσα Αξία (€)	-61	6845	
Ανάκτηση Κεφαλαίου (έτη)	20	5	

Με αμιγώς οικονομικά κριτήρια, η περίπτωση του φωτοβολταϊκού πάρκου κρίνεται ως οριακά αποδεκτή ενώ πλέον αποδοτικότερη περίπτωση είναι αυτή στην οποία χρησιμοποιούνται Φ/Β στοιχεία σε αντλίες. Στα πλαίσια μιας πιο ολοκληρωμένης αξιολόγησης πάντως, πρέπει να συνεκτιμηθούν τα περιβαλλοντικά οφέλη και τα οφέλη από τον περιορισμό της εξάντλησης των συμβατικών πηγών ενέργειας (π.χ., ορυκτά καύσιμα). Από την άλλη πλευρά, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας που οδηγεί σε αύξηση των αποδόσεων και μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθιστά περισσότερο βιώσιμες τέτοιες εγκαταστάσεις στο μέλλον. Η δυνατότητα χρήσης των Φ/Β για κάλυψη διαφορετικών αναγκών για τους μήνες που δεν απαιτούνται για άρδευση θα καθιστούσε την επένδυση περισσότερο συμφέρουσα.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνιστώσες που αφορούν στην εγκατάσταση ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος για άρδευση και προτάθηκε μία προσέγγιση για την επιλογή της βέλτιστης λύσης σχεδιασμού του συστήματος. Αυτό επιτεύχθηκε συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά Φ/Β συστήματος άντλησης με τις ανάγκες σε άρδευση της καλλιέργειας. Στην μελέτη εφαρμογής επιλέχθηκε μία περιοχή στην οποία καλλιεργείται βαμβάκι, στην περιφέρεια της Θεσσαλίας και αξιολογήθηκε η χρήση φωτοβολταϊκών για τη λειτουργία αντλιών σε αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων.

Για την περίπτωση εγκατάστασης ενός αυτόνομου Φ/Β σταθμού διαπιστώθηκε ότι:

- Το κόστος εγκατάστασης αυτόνομου Φ/Β σταθμού που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι υψηλό και έχει μεγάλο χρόνο ανάκτησης κεφαλαίου.
- Ο Φ/Β σταθμός είναι περισσότερο αποδοτικός σε μικρότερα αγροτεμάχια, καθώς σε αυτά η απαιτούμενη ονομαστική ισχύς του σταθμού είναι μικρή.

Αντίθετα, η περίπτωση στην οποία χρησιμοποιούνται Φ/Β στοιχεία σε αντλίες είναι οικονομικά βιώσιμη ως αποτέλεσμα κυρίως του σημαντικά χαμηλότερου κόστους επένδυσης.

Πέραν της αμιγώς οικονομικής βιωσιμότητας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες εναλλακτικής παραγωγής ενέργειας σε εφαρμογές όπως η εξεταζόμενη σε μια εποχή που τα περιβαλλοντικά προβλήματα εντείνονται και οι συμβατικές πηγές ενέργειας έχουν αρχίσει να εξαντλούνται.

Σημειώνεται τέλος ότι η δυνατότητα χρήσης των Φ/Β για κάλυψη άλλων αναγκών κατά τους λοιπούς μήνες τους έτους (πλην των καλοκαιρινών) θα καθιστούσε την επένδυση περισσότερο συμφέρουσα.

## 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21th Century, «RENEWABLES 2009 UPDATE, Global Status Report», <http://www.ren21.net>
- [2] Centre for Renewable Energy Sources, 2010, [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [3] European Commission, JRC, PVGIS Home, 2010, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php?lang=en&map=europe>
- [4] Moral F.J., Lopez-Rodriguez F., Cuados F., Ruiz-Celma A. "Computer- Assisted Sizing of Photovoltaic Systems For Drip Irrigation of Olive Orchards In Semi-Arid Climate, Spanish Journal of Agricultural Research 2009, 503-512, 2009.
- [5] Technical Characteristics of Water Pumps, 2011, <http://www.lorentz.de>.
- [6] Kaldellis J. K., Spyropoulos G.C., Kavadias K.A., Kovouaki I.P., "Experimental Validation Of Autonomous PV-Based Water System Optimum Sizing", Renew Energy 34 (4), 1106-1113, 2009.
- [7] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Newsletter No 2609, 2010.
- [8] Hamidat A., Benyoucef B. "Mathematic Models Of Photovoltaic Motor Pump Systems", Renew Energy 33 (5), 933-942, 2008.
- [9] Zekry A., Elgendy M. "Estimated Performance of Photovoltaic Irrigation Systems Under Different Operating Conditions", 24<sup>th</sup> National Radio Science Conference, 2004.
- [10] Allen R., Pereira L.S., Raes D., Smith M., "Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements", FAO Irrigation and Drainage, Rome, paper 56, 1998.
- [11] Kaldellis J. "[Optimum Technoeconomic Energy Autonomous Photovoltaic Solution For Remote Consumers Throughout Greece](#)", Energy Conversion and Management, Vol 45 (17), 2745-2760, Oct 2004.
- [12] Γιοβρή-Σκόδρα Γ. «Μεθοδολογία Οικονομικής Αξιολόγησης της χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Άρδευση Γεωργικών Εκτάσεων», Μ.Δ.Ε., Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο 2012.