

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΗΡΑ

Σ. Χ. Αλεξόπουλος^{1*}, Ο. Παναγόπουλος^{2*}, Α. Α. Αργυρίου²

^{1*} Fachbereich Energietechnik, Aachen University of Applied Sciences, Solar-Institut Jülich (SIJ), Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sj.fh-aachen.de,

^{2*} Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα. email: orestis.panagorou@upatras.gr, athanarg@upatras.gr,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κτιριακός τομέας συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, επηρεάζοντας αρνητικά το περιβάλλον μέσω της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Για την αντιμετώπιση αυτού του σημαντικού προβλήματος αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες βελτίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων, μεταξύ των οποίων συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Ελάχιστα θερμικά ηλιακά συστήματα καλύπτουν εφαρμογές ενδιάμεσων ή μέσων θερμοκρασιών και όσα από αυτά είναι εμπορικά διαθέσιμα, έχουν υψηλό κόστος.

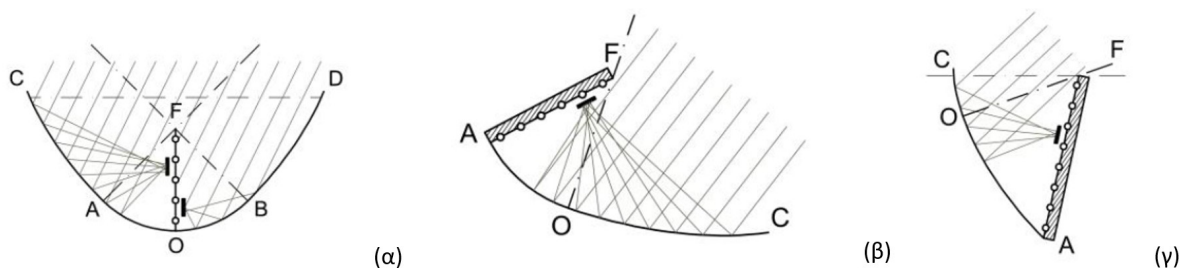
Στα πλαίσια του Ελληνο-Γερμανικού ερευνητικού προγράμματος "SCoSCo" αναπτύσσονται και μελετώνται καινοτόμα συστήματα συλλεκτών ηλιακής ακτινοβολίας. Μεταξύ αυτών μελετήθηκαν στατικοί συγκεντρωτήρες, συνδυαζόμενοι με κατάλληλους κινούμενους απορροφητές με στόχο την ανάπτυξη ενός ηλιακού θερμικού συλλέκτη χαμηλού κόστους και αποδοτικής λειτουργίας σε εφαρμογές ενδιάμεσων έως μέσων θερμοκρασιών, όπως η παραγωγή βιομηχανικής θερμότητας και η ενσωμάτωση σε κτίρια. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της οπτικής προσομοίωσης τέτοιων συστημάτων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά λογισμικά και έγιναν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων.

Λέξεις Κλειδιά: ηλιακή ενέργεια, ηλιακός συλλέκτης, προσομοίωση, κάτοπτρα, στατικός συγκεντρωτήρας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα ένας σημαντικός τομέας αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι όπως αναφέρεται και στο [1] η απευθείας μετατροπή της σε θερμότητα. Η θερμική μετατροπή πραγματοποιείται μέσω ηλιακών διατάξεων, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο μέρος των αναγκών για θέρμανση νερού, θέρμανση και ψύξη χώρων και στην βιομηχανία. Τέτοια, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες, είναι τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραγωγής θερμότητας.

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από το συγκεντρωτήρα και τον απορροφητή. Για λόγο συγκέντρωσης μεγαλύτερο του 2,5, απαιτείται παρακολούθηση του ήλιου. Η μέση ροή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για δεδομένη γωνία πρόσπτωσης ισούται με το γινόμενο του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης επί την οπτική απόδοση. Όμως, η κατανομή της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή δεν είναι ομοιόμορφη. Ανάλογα με τη γεωμετρία του συγκεντρωτήρα, το σχήμα του απορροφητή και την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχουν περιοχές του απορροφητή που δεν δέχονται ακτινοβολία, ενώ άλλες δέχονται μεγαλύτερη ροή ενέργειας από το άνοιγμα του συγκεντρωτήρα. Οπτικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι κάποιες περιοχές του απορροφητή δέχονται ροή ενέργειας αρκετές φορές μεγαλύτερη από αυτή στο άνοιγμα του συγκεντρωτήρα [2]. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η άνιση κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στον απορροφητή, καθώς και η εξάρτηση από τη γωνία πρόσπτωσης. Με τη χρήση απορροφητή με επιλεκτική επίστρωση σε σωλήνα κενού, τοποθετημένο στην κατάλληλη θέση, είναι δυνατή η αύξηση της απόδοσης σε μέσες θερμοκρασίες. Η προτεινόμενη διάταξη μπορεί να διαθέτει συμμετρικό (Εικόνα 1.α) ή μη συμμετρικό συγκεντρωτήρα (Εικόνα 1.β,γ). Ο σωλήνας κενού μπορεί να μετακινείται στις περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση ακτινοβολίας, ενώ ο συγκεντρωτήρας παραμένει ακίνητος.



Εικόνα 1: Συμμετρικό (α) και μη συμμετρικά (β), (γ) κυλινδρο-παραβολικά κάτοπτρα.

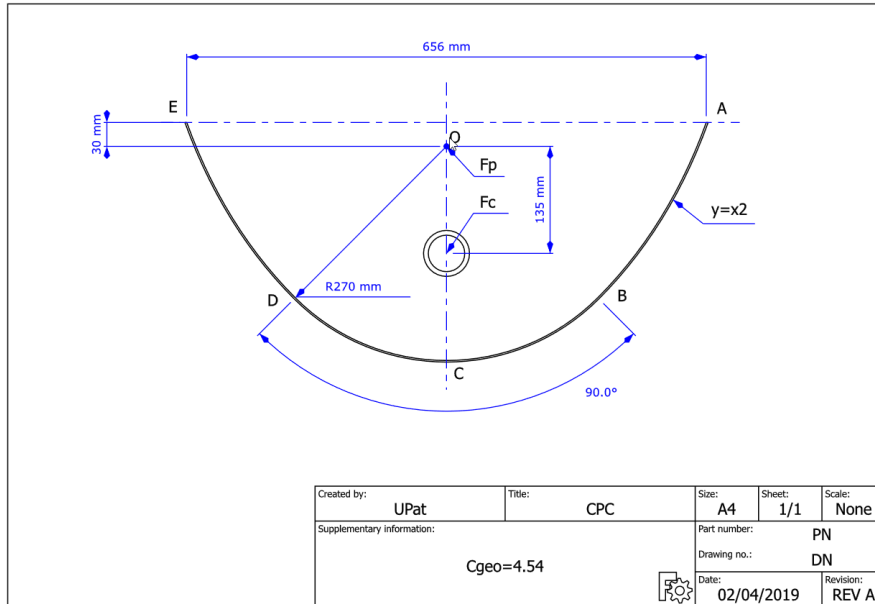
Ανάλογα με τη γεωμετρία του κατόπτρου, με το σχήμα του απορροφητή και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, περιοχές στον απορροφητή μπορούν είτε να μην έχουν προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλες περιοχές μπορούν να λάβουν πολλαπλές εντάσεις ακτινοβολίας από αυτές στο άνοιγμα του συμπυκνωτή [3]. Οπτικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι οι περιοχές στο επίπεδο του απορροφητή μπορεί να έχουν προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με εντάσεις αρκετές φορές μεγαλύτερη από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο άνοιγμα του συμπυκνωτή [2] [4].

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν αρκετές γεωμετρίες κατόπτρων ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη. Κριτήριο για την επιλογή ήταν το κλάσμα συλλογής (intercept factor) που ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας προς την απορροφώμενη για τις πιθανές γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [5].

Χαρακτηριστική εργασία στην οποία αναλύονται λεπτομερώς τα βήματα και η διαδικασία ανάπτυξης υπολογιστικών μοντέλων ανάλυσης πορείας ακτίνων είναι η [6].

Για τις οπτικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα “Tonatiuh” [7] και το Comsol [8]. Η γεωμετρία που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα οπτικών προσομοιώσεων (SCO1) φαίνεται στην Εικόνα 2.

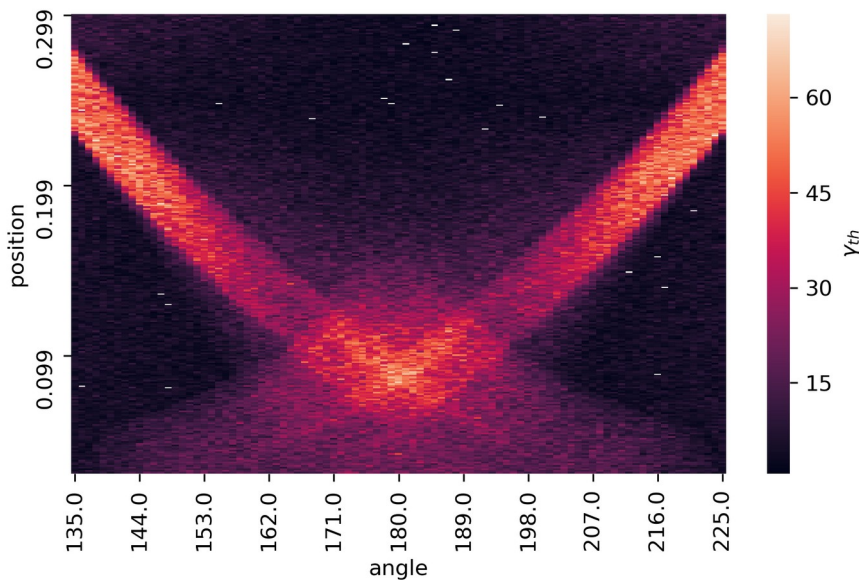


Εικόνα 2: Διάταξη SCO1.

Ο συγκεντρωτήρας αποτελείται από κυλινδρικό τομέα 90° (BD, κέντρο O) και δυο παραβολικά τμήμα (AB, ED, εστία O) στραμμένα κατά 45°. Το κέντρο του απορροφητή σωλήνα κενού βρίσκεται στο σημείο Fc.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

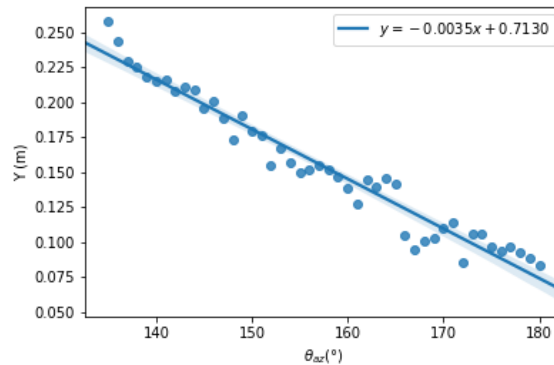
Ο απορροφητής κινείται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κατόπτρου. Σε κάθε θέση του απορροφητή υπολογίζεται ο intercept factor για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης από 135°-225° με βήμα 1° και κάθετη πρόσπτωση στις 180°. Το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



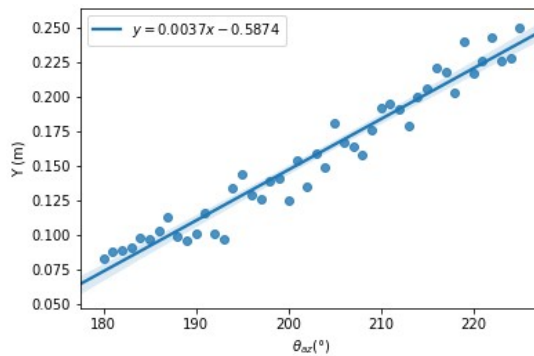
Εικόνα 3: Κλάσμα συλλογής για γραμμική τροχιά απορροφητή.

Η μέγιστη τιμή του κλάσματος συλλογής είναι περίπου 70% και παρατηρείται τόσο για κάθετη πρόσπτωση, όσο και στις ακραίες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης.

Στη συνέχεια, επιλέγονται οι μέγιστες τιμές του κλάσματος συλλογής για κάθε θέση του απορροφητή και παρίστανται γραφικά στην Εικόνα 4 για γωνίες 135° έως 180° και στην Εικόνα 5 για γωνίες 180° έως 225°.



Εικόνα 4: Κλάσμα συλλογής – γωνία πρόσπτωσης 135° έως 180°.



Εικόνα 5: Κλάσμα συλλογής - γωνία πρόσπτωσης 180° έως 225°.

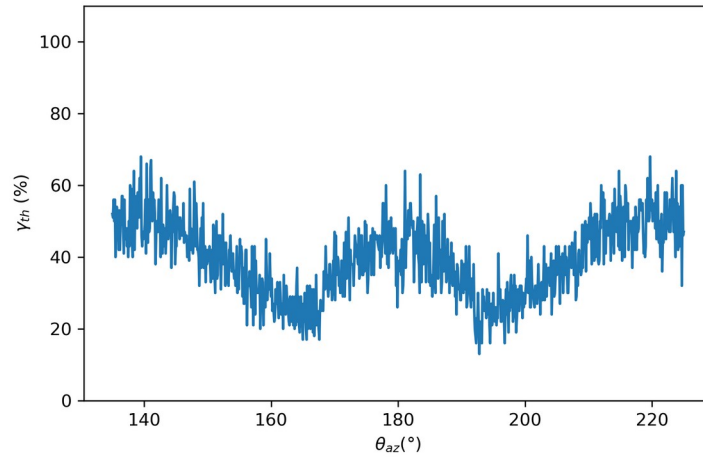
Οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης έχουν ως εξής:

$$y = -0.0035 (\pm 0.0001) \times x + 0.71 (\pm 0.02), \quad 135^\circ \leq x \leq 180^\circ \quad (1)$$

$$y = 0.0037 (\pm 0.0001) \times x - 0.59 (\pm 0.02), \quad 180^\circ < x \leq 225^\circ \quad (2)$$

Οι εξισώσεις (1) και (2) δίνουν τη θέση του απορροφητή κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κατόπτρου με σημείο αναφοράς το σημείο C στην Εικόνα 2, για μέγιστο intercept factor. Και στις δυο σχέσεις, οι τιμές της κλίσης και της τεταγμένης επί την αρχή είναι στατιστικά σημαντικές ($p\text{-value} < 10^{-26}$).

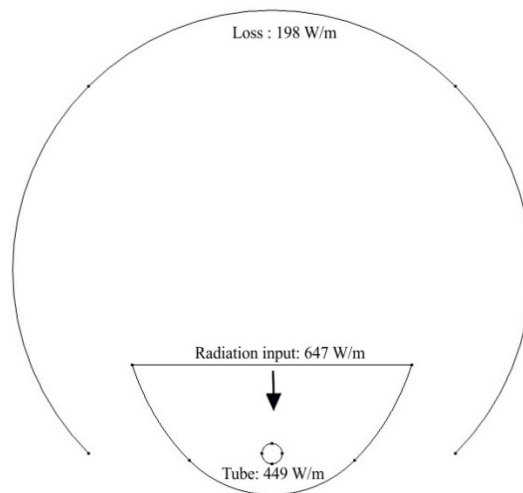
Ο απορροφητής τοποθετείται στις θέσεις που προκύπτουν από τις εξισώσεις (1) και (2) και το κλάσμα συλλογής υπολογίζεται εκ νέου για κάθε θέση.



Εικόνα 6: Κλάσμα συλλογής - γωνία πρόσπτωσης.

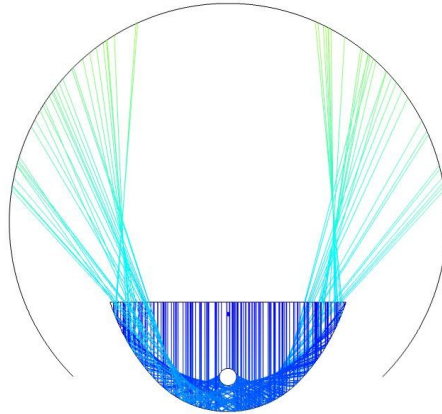
Παράλληλα με το Tonatiuh χρησιμοποιήθηκε και το Comsol.

Τα γεωμετρικά μοντέλα αποτελούνται από τέσσερις διαφορετικές γραμμές. Η πρώτη γραμμή είναι μια μικρή κλειστή κυκλική που αντιπροσωπεύει το σωλήνα. Η παραβολική σκάφη διαμορφώνεται μέσω κυκλικού τόξου και δύο παραβολικών κομματιών. Η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την πηγή ακτινοβολίας με ακτίνες κάθετες προς την κατεύθυνση της γραμμής. Εφαρμόζεται πηγή ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε 1000 W/m^2 . Τέλος, δημιουργείται ένα περίβλημα με μορφή κυκλικού τόξου για να υπολογιστεί η διαφυγή της ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για γωνία πρόσπτωσης 0° στην Εικόνα 7 και στην Εικόνα 8.



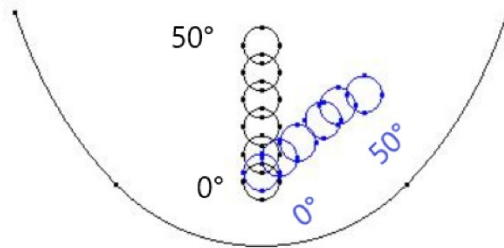
Εικόνα 7: Γεωμετρία και πρώτα αποτελέσματα.

Η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι 647 W/m^2 ενώ ο σωλήνας δέχεται 447 W/m^2 . Η απώλεια μέσω του περιβλήματος είναι 198 W/m^2 .



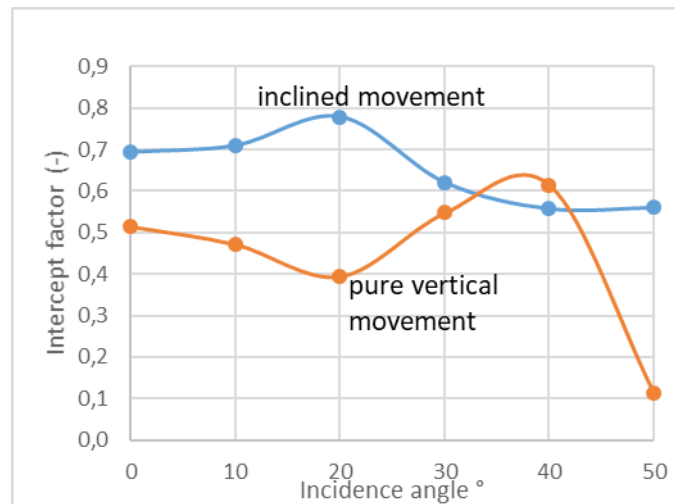
Εικόνα 8: Υπόδειγμα ακτίνων.

Στην Εικόνα 9 οι θέσεις του σωλήνα φαίνονται για τις δύο διευθετήσεις: με κεκλιμένη κίνηση (inclined movement) και με καθαρή κάθετη κίνηση (pure vertical movement) των σωλήνων. Ο κύκλος (σωλήνας) στο κάτω μέρος έχει γωνία πρόσπτωσης 0° και ο κορυφαίος κύκλος έχει γωνία πρόσπτωσης 50° .



Εικόνα 9: Διατάξεις σωλήνων με γωνία πρόσπτωσης 0° και 50° .

Η Εικόνα 10 δείχνει τα συγκριτικά αποτελέσματα του κλάσματος συλλογής για τις δύο μεθόδους μετατόπισης. Το κλάσμα συλλογής κυμαίνεται μεταξύ 56% και 78% για γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 0° και 50° .



Εικόνα 10: Σύγκριση του κλάσματος συλλογής για τις δύο μεθόδους μετατόπισης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλάσμα συλλογής βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 56% και 78% για γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ 0° και 50°. Η κίνηση του απορροφητή σε ευθεία γραμμή φέρνει λογικά αποτελέσματα. Το COMSOL και το Tonatiuh είναι κατάλληλα εργαλεία για συστηματικές έρευνες για την εφαρμογή που παρουσιάστηκε.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτείται από το ερευνητικό έργο “SCoSCo” της δράσης «Διμερής Ε & Τ Συνεργασία Ελλάδα – Γερμανίας». Οι συγγραφείς ευχαριστούν το Υπουργείο Παιδείας και Έρευνας της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας της Ελλάδας για την χρηματοδότησή του. Ευχαριστούν επίσης τους ερευνητές του Solar-Institut Jülich και του Πανεπιστημίου Πατρών για τις εργασίες τους σε αυτόν τον τομέα των ΑΠΕ.

Η παρούσα εργασία στηρίχτηκε σε προηγούμενες μελέτες και έρευνες αείμνηστου Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πατρών Ιωάννη Τρυπαναγνωστόπουλου. Οι συγγραφείς επιθυμούν να τονίσουν την πολύ σημαντική του συνδρομή κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας και υποβολής της ερευνητικής πρότασης SCoSco.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μ. Σουλιώτης, Ι Τρυπαναγνωστόπουλος: Οπτική ανάλυση ηλιακών συσκευών θέρμανσης νερού με καμπύλα κάτοπτρα και κυλινδρικούς απορροφητές Πρακτικά 8^ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας σελ. 418-425 Θεσσαλονίκη 2006
- [2] Y. Tripanagnostopoulos, P. Yianoulis: “CPC solar collectors with multi-channel absorber”. Solar Energy 58 (1-3), pp. 49-61, 1996.
- [3] Y. Tripanagnostopoulos: New designs of building integrated solar energy systems Energy Procedia 57 (2014) 2186 – 2194
- [4] Y. Tripanagnostopoulos and A. Iliopoulou. “Improved designs for low concentration photovoltaics” Int Conf. 22nd PVSEC, Milan, Italy, 3-7 Sep 2007
- [5] William A. Beckman John A. Duffie. “Solar Engineering of Thermal Processes”. 4th ed. Wiley, 2013.
- [6] M. Souliotis, Y. Tripanagnostopoulos: “Study of the distribution of the absorbed solar radiation on the performance of a CPC type ICS water heater”. Renewable Energy 2008; 33: 846-858.
- [7] Tonatiuh software: <https://iat-cener.github.io/tonatiuh/>
- [8] Comsol software: <https://www.comsol.com/>
- [9] J. Goettsche, S. Alexopoulos, A. Dümmler, G. Breitbach: The efficiency of a specular trough arrangement collecting solar radiation Comsol Conference 2020

SIMULATION OF THE OPTICAL PERFORMANCE OF STATIC CONCENTRATOR SOLAR COLLECTORS

S. C. Alexopoulos^{1*}, O. Panagopoulos^{2*}, A. A. Argiriou²

^{1*} Fachbereich Energietechnik, Aachen University of Applied Sciences, Solar-Institut Jülich (SIJ), Heinrich-Mußmann-Str. 5, D-52428 Jülich, e-mail: alexopoulos@sj.fh-aachen.de

² Laboratory of Atmospheric Physics, Department of Physics, University of Patras, GR-265 00 Patras, email: orestis.panagopou@upatras.gr, athanarg@upatras.gr

ABSTRACT

The building sector contributes significantly to the world energy consumption, impacting negatively the environment via the related greenhouse gas emission. In order to face this problem, new technologies for the improvement of the energy performance of buildings are under development. These technologies include new solar energy systems. There are few solar systems covering intermediate and medium temperature applications while the commercially available ones are very expensive.

In the frame of the Hellenic – German cooperation project "SCoSCo" innovative solar thermal systems are developed and studied. Static concentrators combined with movable absorbers have been studied, with the aim to develop a high efficiency but low-cost thermal solar collector for intermediate and medium temperature applications, e.g. for industrial heat production or integration in buildings. The aim of this work is to present the optical simulation results of those concentrators obtained by two different software packages. The methodologies are described, and the results are compared.

Keywords: *solar energy, solar collector, simulation, mirrors, static concentrators*