

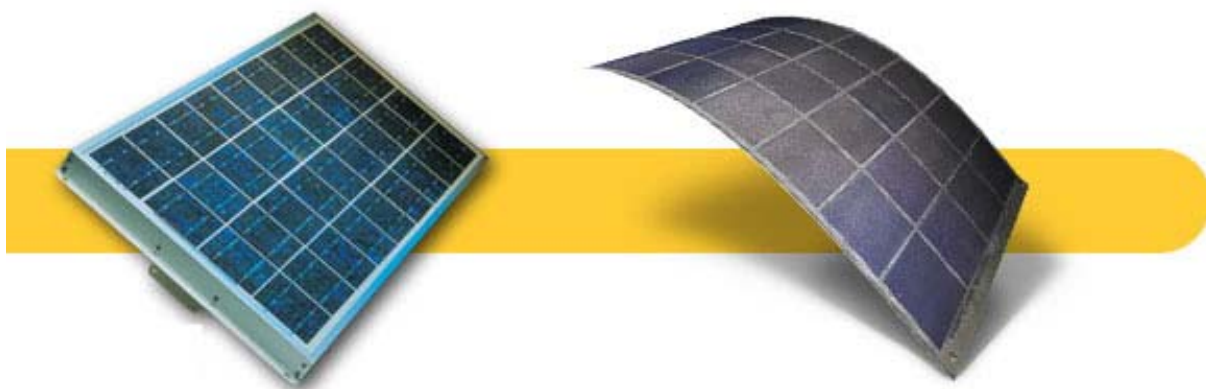


ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

## Η ανακλαστικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων



Γ' Έκδοση  
Ιανουάριος 2009



Το παρόν κείμενο αποτελεί αναδημοσίευση των βασικών σημείων από τη **“Μελέτη για την Αντανακλαστικότητα Φωτοβολταϊκών Πλαισίων Τεχνολογίας Κρυσταλλικού Πυριτίου”**, η οποία εκπονήθηκε από τους **Δρ. Χρήστο Πρωτογερόπουλο** και **Δρ. Αλέξανδρο Ζαχαρίου** για λογαριασμό του **Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας** (ΚΑΠΕ, Αριθ. Μελέτης: CRES-PV-002/2002, Σεπ. 2002).

Ο ΣΕΦ ευχαριστεί το ΚΑΠΕ για τη δυνατότητα αναδημοσίευσης, δεδομένου ότι είναι από τις ελάχιστες πειραματικές εργασίες που πραγματεύονται το θέμα διεθνώς και ως εκ τούτου συμβάλλει σημαντικά στην προώθηση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών.

Γ' Έκδοση: Ιανουάριος 2009



ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Λ. Συγγρού 224, 176 72 Καλλιθέα, τηλ. 210 9577470, fax. 210 9581018, info@helapco.gr, www.helapco.gr

## Η ανακλαστικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Κάθε αντικείμενο ανακλά την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Αυτό γίνεται είτε “κατοπτρικά”, δηλαδή συνολικά προς μια διεύθυνση όπως από ένα τέλειο κάτοπτρο, είτε ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις του ημισφαιρίου. Αυτές είναι δύο ακραίες περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα η ανάκλαση γίνεται και με τους δύο τρόπους σε κάποιο ποσοστό, ανάλογα με τη φύση του υλικού της επιφάνειας του αντικειμένου.

Έχει σημασία να δούμε λοιπόν αν τα φωτοβολταϊκά ανακλούν το φως περισσότερο ή λιγότερο από άλλα υλικά. Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να υπάρξει εν δυνάμει πρόβλημα, στη δεύτερη προφανώς δεν έχει νόημα ο περιορισμός της χρήσης των φωτοβολταϊκών σε κάποιες περιοχές, αφού τότε θα έπρεπε να απαγορεύσουμε και αντικείμενα, υλικά ή χρήσεις με μεγαλύτερη ανακλαστικότητα.

Το ερώτημα αυτό ετέθη για πρώτη φορά επί της ουσίας στην περίπτωση των αεροδρομίων. Στα αεροδρόμια ή κοντά σ’ αυτά, ενδιαφέρει η ελαχιστοποίηση της κατοπτρικής ανάκλασης προς οποιαδήποτε γωνία ανύψωσης και ειδικότερα προς τον πύργο ελέγχου και τους διαδρόμους προσέγγισης των αεροπλάνων, ώστε να μη δημιουργούνται παρεμβολές στο οπτικό πεδίο των χειριστών και ελεγκτών.



Φωτοβολταϊκά ισχύος 900 KWp στο αεροδρόμιο του Oakland στην Καλιφόρνια

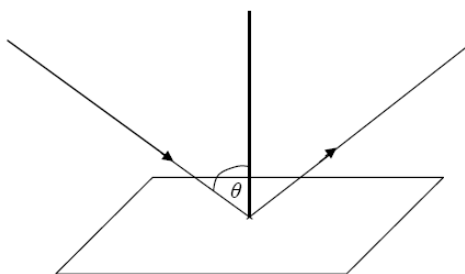
Παρά το γεγονός ότι φωτοβολταϊκά συστήματα (και μάλιστα ισχύος έως 1-2 MWp) έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πολλά αεροδρόμια του κόσμου, (όπως το αεροδρόμιο Ναρίτα του Τόκιο, της Βαρκελώνης, του Μονάχου, του Πίτσμπουργκ, του Φρέσνο, αλλά και το Ελευθέριος Βενιζέλος στην Αθήνα), για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος σε χώρο ενός αεροδρομίου ή σε άλλο χώρο εγγύς αυτού, θα πρέπει κανείς να βεβαιώσει ότι οι ανακλάσεις που προκαλούνται από την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι μικρότερες σε

ένταση από τις ήδη υπάρχουσες ανακλάσεις που προκαλούνται από κτίρια, οχήματα, εξοπλισμό κ.λπ.

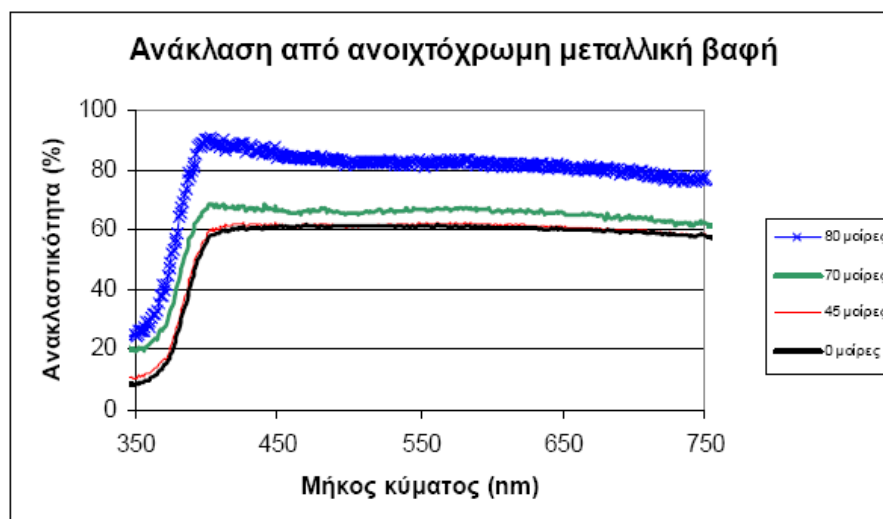
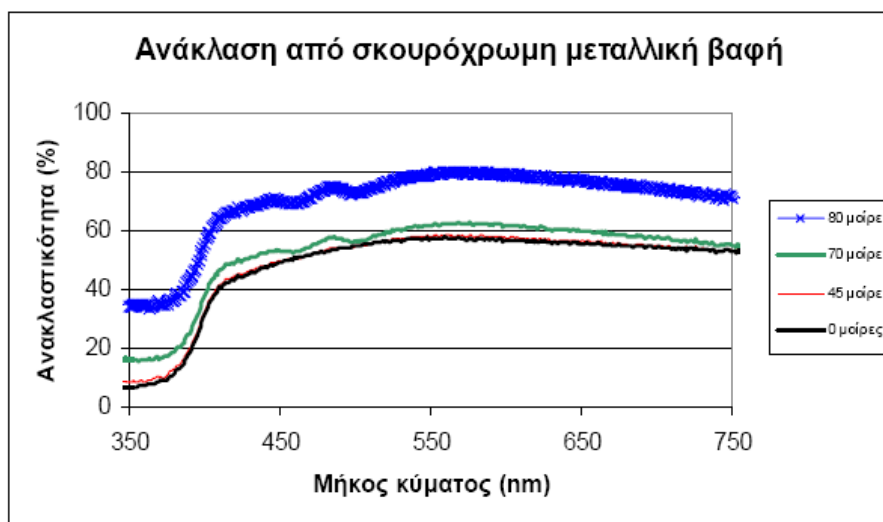
Για να διαπιστωθεί αν θα μπορούσαν να εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά στο χώρο του αεροδρομίου Ελευθέριος Βενιζέλος, το 2001, σχεδιάστηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) μια πειραματική διάταξη που συγκρίνει την ανάκλαση που προκαλεί η επιφάνεια ενός κλασικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, με αυτές από βαφή και παρμπρίζ αυτοκινήτου. Η σύγκριση με τις επιφάνειες ενός αυτοκινήτου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οχήματα βρίσκονται πρακτικά παντού. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μετρήσεις ανάκλασης από την επιφάνεια φωτοβολταϊκών πλαισίων, που δεν ξεπερνούν το 14% ακόμα κι όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σε γωνία  $70^\circ$ , ενώ για κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας ο συντελεστής κυμαίνεται από 3,7% έως 8,5%.

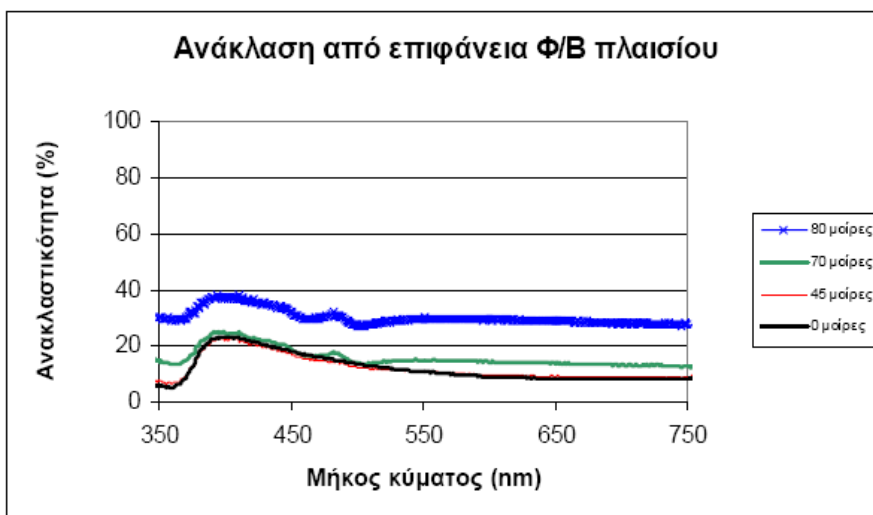
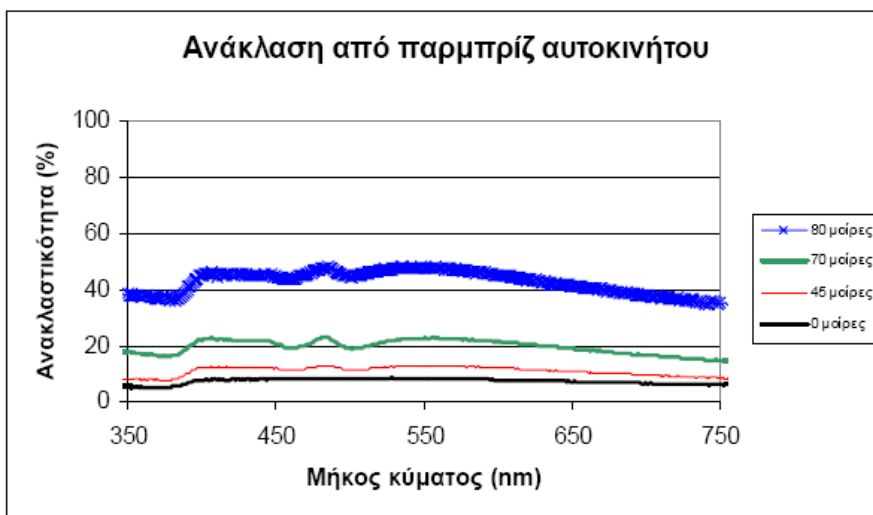
Υλικό	Μέσος συντελεστής ανακλαστικότητας
Νερό	0,05-0,10
Χιόνι	0,50-0,80
Έδαφος	0,20
Φύλλα δέντρων	0,05-0,25
Δάσος	0,05-0,10
Γρασίδι	0,30
Σύννεφα	0,50-0,55
Άσφαλτος	0,05-0,10
Μεταλλική στέγη	0,61
Φωτοβολταϊκά	0,037-0,14

Το ηλιακό φως μπορεί να φτάσει σε μια επιφάνεια από όλες τις διευθύνσεις του ημισφαιρίου. Οι πιθανές λοιπόν γωνίες πρόσπτωσης ( $\theta$ ) από την κάθετο είναι από  $0^\circ$  έως  $\pm 90^\circ$ . Στη συνέχεια η ακτινοβολία μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό της επιφάνειας, να το διαπεράσει ή να ανακλαστεί. Όσο αυξάνεται η γωνία  $\theta$ , τόσο αυξάνεται το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια οι γωνίες πρόσπτωσης που πλησιάζουν τις  $90^\circ$  παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον.



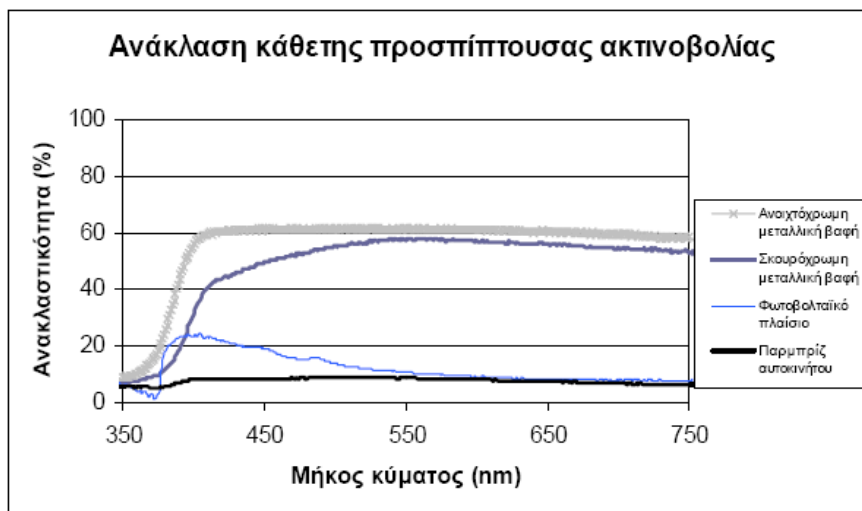
Ανακλάσεις ακτινοβολίας, ανάλογα με το υλικό, γίνονται σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση η περιοχή που ενδιαφέρει είναι αυτή της ορατής ακτινοβολίας, δηλαδή με μήκη κύματος από 380 nm (ιώδες) έως 700 nm (κόκκινο), περίπου. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα κομμάτι φωτοβολταϊκού πλαισίου, τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου, δύο μεταλλικές βαφές αυτοκινήτου (μια σκουρόχρωμη [ανθρακί] και μια ανοιχτόχρωμη [ασημί]) και ένα κομμάτι από παρμπρίζ αυτοκινήτου. Το υψηλότερο ποσοστό ανάκλασης το έχει, όπως είναι αναμενόμενο, η βαφή του αυτοκινήτου και ειδικότερα η ανοιχτόχρωμη. Μέχρι τις 70° η ένταση της ανάκλασης δε διαφοροποιείται σημαντικά από αυτήν της κάθετης ακτινοβολίας ( $\theta=0^\circ$ ), ενώ στις 80° για την ανοιχτόχρωμη βαφή πλησιάζει, σε κάποια μήκη κύματος, το 85%.





Αν συγκριθούν οι ανακλάσεις που μετρήθηκαν από τα διάφορα υλικά μεταξύ τους, στο ίδιο διάγραμμα, φαίνεται καθαρά στην ανάκλαση της κάθετης ακτινοβολίας ότι το παρμπρίζ και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχουν παρόμοια ποσοστά ανάκλασης και μάλιστα κάτω από 10% στην μεγαλύτερη περιοχή του ορατού φάσματος. Παρότι το φωτοβολταϊκό δεν είναι διαφανές, όπως το παρμπρίζ και στην ανάκλαση προστίθεται η ανάκλαση που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που βρίσκονται κάτω από το προστατευτικό τζάμι, οι ειδικές προδιαγραφές του γυαλιού που χρησιμοποιείται διατηρούν τη συνολική ανακλαστικότητα σε χαμηλά επίπεδα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ειδικά επεξεργασμένα για να ελαχιστοποιείται η ανάκλαση της ακτινοβολίας καθώς στόχος είναι η μέγιστη απορρόφηση για τη μετατροπή της ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η συμβολή στην ανακλώμενη ακτινοβολία, που προέρχεται από το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, είναι εντονότερη στην περιοχή των 400-450nm, με αποτέλεσμα η συνολική ανακλαστικότητα να αγγίζει το 20% σε αυτή την περιοχή. Αυτό είναι χαρακτηριστικό του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και του προσδίδει το μπλε χρώμα. Σε φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου ή

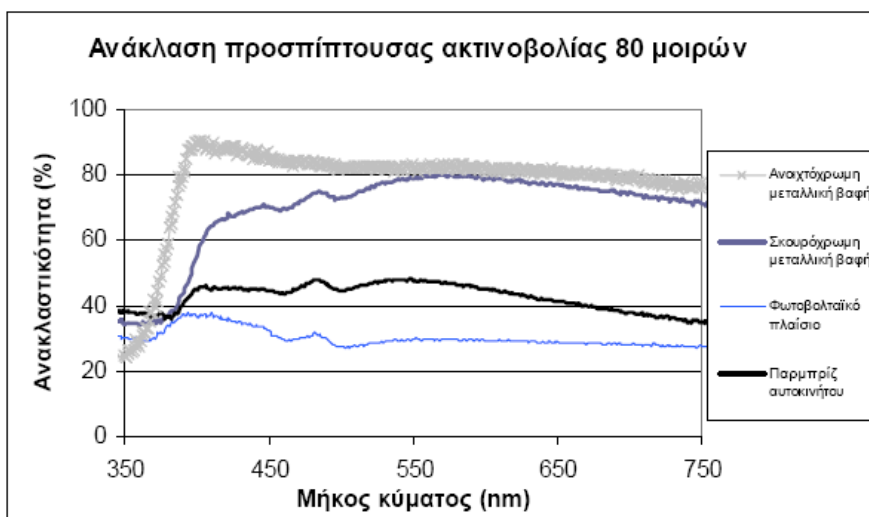
τεχνολογιών λεπτού υμενίου (thin film) αυτή η ανακλαστικότητα είναι μικρότερη καθώς το χρώμα τους φαίνεται μαύρο.



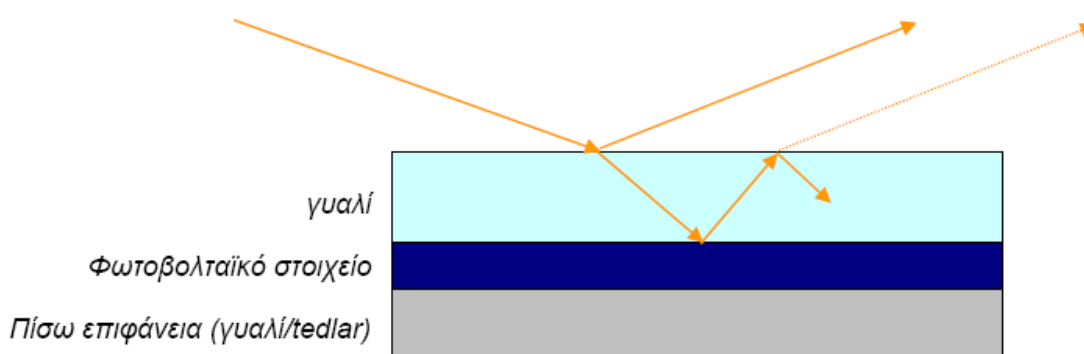
Σύγκριση ανάκλασης ακτινοβολίας από επιφάνεια φωτοβολταϊκού πλαισίου, μεταλλικών βαφών και παρμπρίζ για κάθετη ακτινοβολία ορατού φάσματος

Οι μεταλλικές βαφές έχουν σαφώς μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από τις επιφάνειες του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του παρμπρίζ.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της ανάκλασης σε μεγαλύτερες γωνίες. Όπως προαναφέρθηκε, η ανακλαστικότητα αυξάνει με αυξανόμενη γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ). Έτσι, για όλα τα υλικά στις  $80^\circ$  η ανακλαστικότητα αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την κάθετη ακτινοβολία και συγκεκριμένα για τις μεταλλικές βαφές αγγίζει ή ξεπερνάει το 80%, ενώ το παρμπρίζ κυμαίνεται μεταξύ 40-50% στη μεγαλύτερη περιοχή του ορατού φάσματος. Στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο η αύξηση της ανάκλασης είναι επίσης αισθητή, αλλά είναι μικρότερη από ότι για τα υπόλοιπα υλικά. Αυτό οφείλεται στις ειδικές προδιαγραφές του γυαλιού που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια (χαμηλή περιεκτικότητα σιδήρου για μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατεργασμένη επιφάνεια [texture] για μείωση ανακλαστικότητας), που του μειώνει την ανακλαστικότητα ενώ η ανακλαστικότητα που προστίθεται από το πυρίτιο ελαχιστοποιείται σε αυτές τις γωνίες λόγω εσωτερικής ανάκλασης και παγίδευσης του φωτός. Χαρακτηριστικό της έλλειψης της συνιστώσας που προέρχεται από το πυρίτιο είναι η σχετικά επίπεδη μορφή του φάσματος του ανακλώμενου φωτός σε αντίθεση με την αύξηση της ανακλαστικότητας στην περιοχή των 400-450nm που παρατηρείται στην κάθετη ακτινοβολία και προσδίδει τη μπλε απόχρωση του πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



Σύγκριση ανάκλασης ακτινοβολίας από επιφάνεια φωτοβολταϊκού πλαισίου, μεταλλικών βαφών και παρμπρίζ για ακτινοβολία ορατού φάσματος με γωνία πρόσπτωσης 80°



Σχηματική παράσταση μηχανισμού εσωτερικής ανάκλασης από φωτοβολταϊκό πλαίσιο (εγκάρσια τομή πλαισίου).

## Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα είναι ξεκάθαρο ότι η ανάκλαση της ορατής ακτινοβολίας από την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν είναι σε επίπεδα που θα μπορούσε να προκαλέσει οπτική όχληση, τουλάχιστον όχι μεγαλύτερη απ' αυτή που προκαλούν τα αυτοκίνητα!

## Βιβλιογραφία

- [1]. N Martin and J M Ruiz “*Optical losses analysis of PV modules in real operating conditions*” 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 6–10 July 1998, pp. 2380–2383
- [2]. A Parretta, H Yakubu, F Ferrazza “*Method for measurement of the hemispherical/hemispherical reflectance of photovoltaic devices*” *Optical Communications* 194 (2001), pp. 17–32
- [3]. A Parretta, A Sarno, P Tortora, H Yakubu, P Maddalena, J Zhao, A Wang “*Angle-dependent reflectance measurements on photovoltaic materials and solar cells*” *Optical Communications* 172 (1999), pp. 139–151
- [4]. A Parretta, A Samo, H Yakubu. “*A novel apparatus for the optical characterisation of solar cells and PV modules*” 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 6–10 July 1998, pp. 2306–2311.