

Ατμοσφαιρικές παράμετροι που επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία και την παραγωγή ηλιακής ενέργειας – το ερευνητικό έργο ASPIRE

Συντελεστές: Αναπληρωτής Καθηγητής Κωνσταντίνος Ελευθεράτος και ερευνητική ομάδα ASPIRE

Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια προς αξιοποίηση από τα φωτοβολταϊκά εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος. Ενώ η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην κορυφή της ατμόσφαιρας της Γης είναι σχετικά σταθερή, η ακτινοβολία που φτάνει σε έναν τόπο στην επιφάνεια της Γης ποικίλει σημαντικά, α) λόγω της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο (που σχετίζεται με τις συντεταγμένες του τόπου και το υψόμετρο), και β) λόγω των διάφορων ατμοσφαιρικών διεργασιών όπως είναι η απορρόφηση και η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας. Οι τελευταίες διεργασίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες που σχετίζονται με τα σύννεφα, τα αερολύματα, τους υδρατμούς και τα απορροφητικά αέρια σε ίχνη (όπως το όζον, το διοξείδιο του αζώτου και το διοξείδιο του θείου). Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογα με την ενέργεια που έχουν, αλληλοεπιδρούν διαφορετικά με τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας, κάτι που περιπλέκει σημαντικά την εκτίμηση της επίδρασης καθενός συστατικού στην ηλιακή ακτινοβολία. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ακτινοβολία που προέρχεται από διαφορετικές περιοχές του ηλιακού φάσματος έχει διαφορετική συμβολή σε διάφορες βιολογικές διεργασίες και στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας.

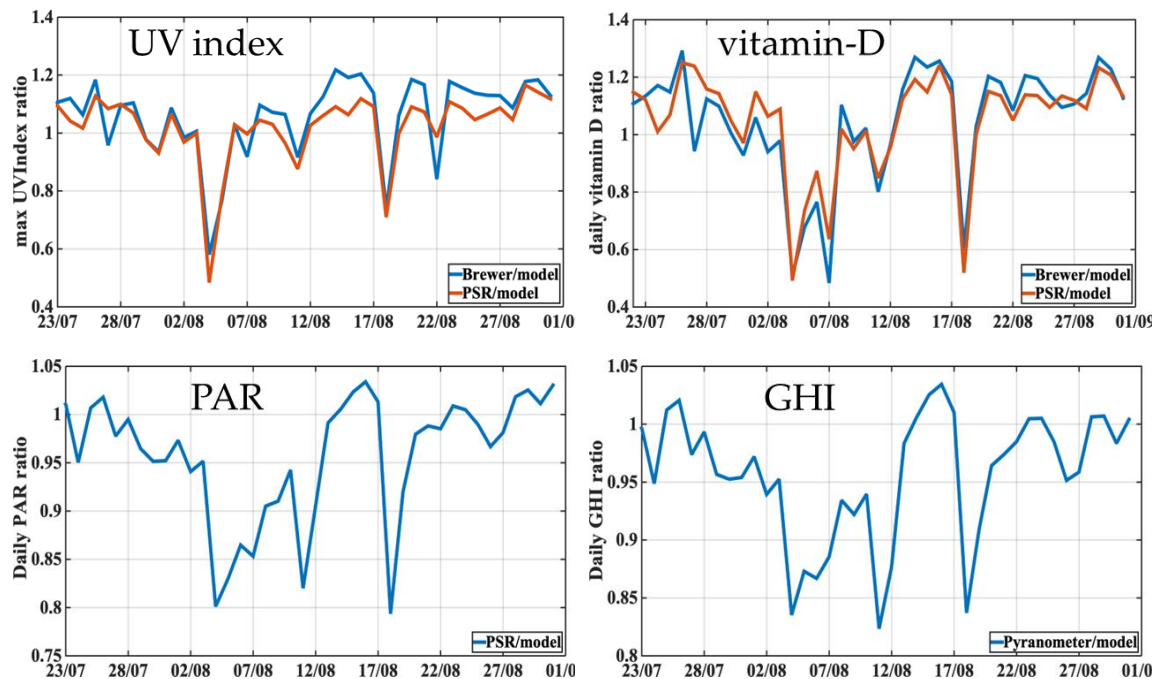
Το ερευνητικό έργο με τίτλο «Atmospheric parameters affecting spectral solar irradiance and solar energy (ASPIRE)» που συντονίστηκε από το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ) κατά την περίοδο Μάιος 2020 – Νοέμβριος 2023, συνέβαλε στην επιστημονική γνώση σχετικά με διάφορες εφαρμογές που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία, όπως εφαρμογές για την τεχνολογία εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκά συστήματα), καθώς και εφαρμογές που σχετίζονται με την υγεία (μελάνωμα, καρκίνος του δέρματος και σύνθεση της βιταμίνης D) και τη γεωργία (φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία για την παραγωγή των καλλιεργειών). Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιήθηκε μια σύγχρονη πειραματική εκστρατεία μέτρησης των ατμοσφαιρικών μεταβλητών για 12 μήνες στην πόλη των Αθηνών, χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό σύνολο οργάνων και εφαρμόζοντας μια συνεργατική ανάλυση των επιστημονικών δεδομένων που αποκτήθηκαν. Για την πειραματική εκστρατεία του προγράμματος ASPIRE συνεργάστηκαν το ΕΚΠΑ, το Παγκόσμιο Κέντρο Ακτινοβολίας του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (PMOD/WRC), το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, η Γερμανική Αεροδιαστημική Υπηρεσία (DLR), το Πανεπιστήμιο της Βρέμης (UB), το Ίδρυμα Ιατροβιολογικών Ερευνών της Ακαδημίας Αθηνών και το Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της πειραματικής εκστρατείας οργανώθηκαν και συντονίστηκαν εντατικές μετρήσεις από υψηλής ποιότητας όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας (φασματοφωτόμετρο τύπου Brewer, φασματικό ραδιόμετρο ακριβείας PSR, φωτόμετρα Pandora, MAX-DOAS, CIMEL, κάμερα παρακολούθησης νεφών), τα οποία παρακολουθούσαν και κατέγραφαν τα φάσματα της ολικής και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος στην περιοχή της Αθήνας για έναν χρόνο (από Δεκέμβριο 2020 έως Νοέμβριο 2021). Οι μετρήσεις των επιστημονικών οργάνων χρησιμοποιήθηκαν για τους εξής ερευνητικούς σκοπούς:

- α) Να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών παραμέτρων σε εφαρμογές που σχετίζονται με δραστικές δόσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως ο δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας, η σύνθεση της βιταμίνης D, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία.
- β) Να διερευνηθούν οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με βάση με τα φασματικά τους χαρακτηριστικά.
- γ) Να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας SENSE χρησιμοποιώντας καταγεγραμμένα ηλιακά φάσματα και να μελετηθεί η επίδραση των αερολυμάτων και της νεφοκάλυψης στους υπολογισμούς του μοντέλου.

Κυριότερα αποτελέσματα από την ανάλυση των μετρήσεων της πειραματικής εκστρατείας

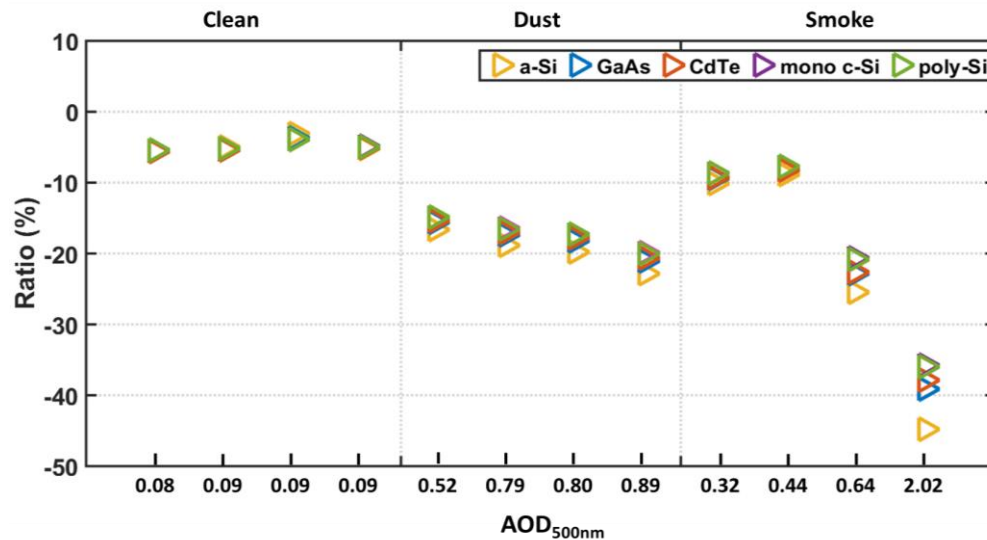
α) Επιπτώσεις ατμοσφαιρικών παραμέτρων σε εφαρμογές που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία: Ο ιστορικός καύσωνας που συνέβαλε στις καταστροφικές πυρκαγιές του Αυγούστου 2021 στην Ελλάδα και τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα λόγω των νότιων ανέμων που επικρατούσαν, επηρέασαν έντονα την ποιότητα του αέρα πάνω από την Αθήνα. Μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των ακραίων πυρκαγιών και της μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος και στην ηλιακή ακτινοβολία στην Αθήνα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των αερολυμάτων κατά τη διάρκεια των δασικών πυρκαγιών είχαν ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των επιπέδων της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος. Η μείωση της ακτινοβολίας ήταν πολύ διαφορετική σε κάθε περιοχή του ηλιακού φάσματος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις ποσότητες της ακτινοβολίας που σχετίζονται με διαφορετικές εφαρμογές. Ο δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας (UV index) μειώθηκε έως και 53%, η ημερήσια δόση της δραστικής ακτινοβολίας για τη σύνθεση της βιταμίνης D μειώθηκε έως 50%, η ημερήσια ποσότητα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) έως 21%, και η ημερήσια ποσότητα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (GHI) έως 17%, με επιδράσεις στην υγεία, τη γεωργία και τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια (Σχήμα 1). Η γνώση που αποκτήθηκε από τον υπολογισμό των δραστικών ποσοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των δασικών πυρκαγιών είναι ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μέρος του ευρύτερου προβλήματος των Μεσογειακών χωρών και των οποίων η συχνότητα αναμένεται να αυξηθεί ως συνέπεια της προβλεπόμενης αυξανόμενης εμφάνισης των καλοκαιρινών κυμάτων καύσωνα εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.



Σχήμα 1. Επίδραση της ατμοσφαιρικής σύστασης στις δραστικές δόσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στην Αθήνα, κατά τη διάρκεια των δασικών πυρκαγιών του Αυγούστου 2021. Οι μεγαλύτερες επιπτώσεις παρατηρήθηκαν τις ημέρες με αερολύματα καπνού και με ανάμεικτα αερολύματα σκόνης-καπνού. Τέτοιες καταστάσεις αναμένεται να συμβαίνουν συχνότερα στο μέλλον (Masoom et al., 2023).

β) Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην απόδοση των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών:

Οι επιπτώσεις των αεροζόλ στην απόδοση των φωτοβολταϊκών ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους. Φωτοβολταϊκά που είναι κατασκευασμένα από διαφορετικές τεχνολογίες είναι περισσότερο ή λιγότερο ευαίσθητα στις διάφορες περιοχές του ηλιακού φάσματος και ανταποκρίνονται διαφορετικά στην ηλιακή ακτινοβολία. Μεταξύ των τεχνολογιών που μελετήθηκαν ήταν το άμορφο Πυρίτιο (a-Si), το αρσενίδιο του Γαλλίου (GaAs), το τελλουρίδιο του Καδμίου (CdTe), το μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο (mono c-Si) και το πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο (poly c-Si). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σωματίδια του καπνού από τις δασικές πυρκαγιές έχουν γενικά πιο σημαντική επίδραση από τη σκόνη, η οποία ποικίλλει ανάλογα με το υλικό κατασκευής των πάνελ. Η μεγαλύτερη μείωση από τις θεωρητικές συνθήκες παρατηρήθηκε στην περίπτωση του άμορφου Πυριτίου (a-Si), φτάνοντας το 45% στην περίπτωση των σωματιδίων καπνού, ενώ η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών έφτασε το 7% (Σχήμα 2). Η γνώση που αποκτήθηκε από τον υπολογισμό της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στην απόδοση των φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή εκτίμηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας προς αξιοποίηση από τα φωτοβολταϊκά ενόψει της κλιματικής αλλαγής.

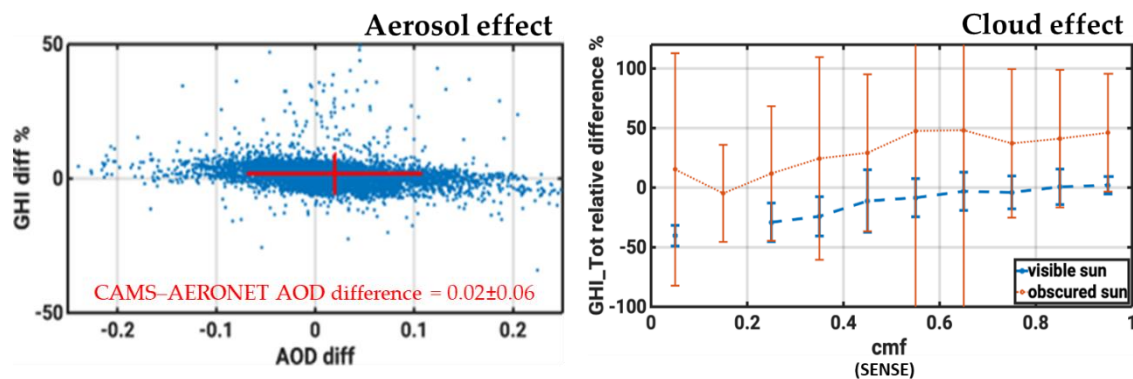


Σχήμα 2. Μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, π.χ. άμορφο Πυρίτιο (a-Si), αρσενίδιο του Γαλλίου (GaAs), τελλουρίδιο του Καδμίου (CdTe), μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο (mono c-Si) και το πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο (poly c-Si), λόγω της επίδρασης του οπτικού βάθους των αιωρούμενων σωματιδίων (σκόνη, καπνός) (Πηγή: Kouklaki et al., 2023).

γ) Απόδοση του συστήματος πρόγνωσης της ηλιακής ενέργειας (SENSE) για διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες: Το σύστημα εκτίμησης των επιπέδων της ηλιακής ακτινοβολίας και ενέργειας SENSE έχει αναπτυχθεί από κοινού από το Κέντρο Αριστείας Beyond του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και από το Παγκόσμιο Κέντρο για την Ακτινοβολία (PMOD/WRC) και χρησιμοποιείται διεθνώς τόσο από εταιρίες όσο και από κρατικούς φορείς. Το σύστημα αξιοποιεί την πληροφορία που δίνεται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο από δορυφόρους καθώς και προγνώσεις ατμοσφαιρικών παραμέτρων για να εκτιμηθεί η ηλιακή ακτινοβολία και ενέργεια. Αξιολογήθηκε η ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου SENSE χρησιμοποιώντας επίγειες μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που ελήφθησαν κατά την 12-μηνιαία πειραματική εκστρατεία του έργου ASPIRE και διαπιστώθηκε ότι ο μεγαλύτερος παράγοντας σφαλμάτων είναι η εκτίμηση της επίδρασης των νεφών. Κάτω από ανέφελες συνθήκες, η συμφωνία του μοντέλου με τις παρατηρήσεις ήταν καλύτερη από 5%.

Για τις ανάγκες της εκστρατείας, λειτούργησαν πολλά επίγεια όργανα, μεταξύ των οποίων δύο πυρανόμετρα, ένα πυρηλιόμετρο, μια κάμερα ανίχνευσης νεφών, ένα ηλιακό φωτόμετρο CIMEL και ένα φασματικό ραδιόμετρο ακριβείας (PSR). Οι υπολογισμοί του μοντέλου για την ολική ηλιακή ακτινοβολία ήταν πιο ακριβείς από τους αντίστοιχους υπολογισμούς για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης των αερολυμάτων και των νεφών στην τελευταία. Επίσης, αξιολογήθηκαν τα στοιχεία εισόδου στο μοντέλο SENSE από τις επίγειες μετρήσεις νεφοκάλυψης (από την κάμερα παρακολούθησης του ουρανού), και από τις επίγειες μετρήσεις του οπτικού βάθους των αιωρούμενων σωματιδίων και της ποσότητας των υδρατμών

από τη βάση δεδομένων του παγκόσμιου δικτύου AERONET. Ο παράγοντας που καθόρισε τα μεγαλύτερα σφάλματα ήταν η ορατότητα του ηλιακού δίσκου, η οποία δεν μπορεί να καθοριστεί στο μοντέλο από τα διαθέσιμα στοιχεία εισόδου (Σχήμα 3). Επιπλέον, υπήρχαν αποκλίσεις μεταξύ των δορυφορικών εκτιμήσεων των νεφών και των εικόνων από την κάμερα στο έδαφος, γεγονός που προκάλεσε αποκλίσεις στα αποτελέσματα, ενώ βρέθηκε ότι οι διαφορές στο οπτικό βάθος των αερολυμάτων μεταξύ των δορυφορικών και των επίγειων μετρήσεων επηρέασαν περισσότερο την άμεση παρά την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Η καλύτερη απόδοση του συστήματος SENSE βρέθηκε να είναι στο ορατό φάσμα του ηλιακού φωτός, όπου τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο είναι πιο λεπτομερή.



Σχήμα 3. Η επίδραση των αερολυμάτων και του ποσοστού νεφοκάλυψης στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας από το σύστημα ηλιακής ενέργειας SENSE (Raptis et al., 2023).

Δεδομένα πειραματικής εκστρατείας

Τα δεδομένα από την 12-μηνη πειραματική εκστρατεία, που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα κατά το διάστημα Δεκέμβριος 2020 – Νοέμβριος 2021, περιλαμβάνουν υψηλής ποιότητας μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και των ατμοσφαιρικών παραμέτρων που την επηρεάζουν, όπως σύννεφα, ιδιότητες αερολυμάτων, όζον, διοξείδιο του αζώτου και υδρατμοί. Τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες επιστημονικές μελέτες (πανεπιστημιακές, ερευνητικές μελέτες, διδακτορικές διατριβές, διπλωματικές εργασίες) που απαιτούν υψηλής ποιότητας μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και των ατμοσφαιρικών παραμέτρων, και είναι διαθέσιμα σε επιστήμονες και χρήστες από διάφορες επιστημονικές κοινότητες (ενέργεια, υγεία, γεωργία, βιολογία, θαλάσσιες επιστήμες, ατμοσφαιρική χημεία) μέσα από την ιστοσελίδα του προγράμματος <https://aspire.geol.uoa.gr/>.

Ευχαριστίες

Το πρόγραμμα ASPIRE έλαβε χρηματοδότηση από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας στην επιστημονική περιοχή «Περιβάλλον και Ενέργεια» στο πλαίσιο της «1ης Προκήρυξης ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας». Πληροφορίες για τα δεδομένα του προγράμματος μπορούν να αναζητηθούν στην επίσημη ιστοσελίδα του έργου <https://aspire.geol.uoa.gr/> καθώς και από τον Επιστημονικό Υπεύθυνο του έργου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Ελευθεράτο (kelef@geol.uoa.gr). Ο συντονισμός του ερευνητικού έργου ASPIRE έγινε από το Εργαστήριο Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, ενώ συμμετείχαν φορείς από την Ελλάδα και το εξωτερικό, όπως το Παγκόσμιο Κέντρο Ακτινοβολίας του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (PMOD/WRC), το Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, το Ινστιτούτο Φυσικής της Ατμόσφαιρας της Γερμανικής Αεροδιαστημικής Υπηρεσίας (DLR-IPA), το Ινστιτούτο Φυσικής Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου της Βρέμης, το Ίδρυμα Ιατροβιολογικών Ερευνών της Ακαδημίας Αθηνών και το Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών.

Βιβλιογραφία

1. Masoom, A., Fountoulakis, I., Kazadzis, S., Raptis, I.-P., Kampouri, A., Psiloglou, B. E., Kouklaki, D., Papachristopoulou, K., Marinou, E., Solomos, S., Gialitaki, A., Founda, D., Salamalikis, V., Kaskaoutis, D., Kouremeti, N., Mihalopoulos, N., Amiridis, V., Kazantzidis, A., Papayannis, A., Zerefos, C. S., and Eleftheratos, K.: **Investigation of the effects of the Greek extreme wildfires of August 2021 on air quality and spectral solar irradiance**, Atmos. Chem. Phys., 23, 8487–8514, <https://doi.org/10.5194/acp-23-8487-2023>, 2023.
2. Kouklaki, D., Kazadzis, S., Raptis, I.-P., Papachristopoulou, K., Fountoulakis, I., and Eleftheratos, K.: **Photovoltaic spectral responsivity and efficiency under different aerosol conditions**, Energies, 16, 6644, <https://doi.org/10.3390/en16186644>, 2023.
3. Raptis, I.-P., Kazadzis, S., Fountoulakis, I., Papachristopoulou, K., Kouklaki, D., Psiloglou, B. E., Kazantzidis, A., Benetatos, C., Papadimitriou, N., Eleftheratos, K.: **Evaluation of the Solar Energy Nowcasting System (SENSE) during a 12-Months Intensive Measurement Campaign in Athens, Greece**, Energies, 16, 5361, <https://doi.org/10.3390/en16145361>, 2023.