



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού

Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Έργων Υποδομής

Διπλωματική Εργασία

Εκτίμηση και Ενίσχυση της Κλιματικής Ανθεκτικότητας Έργου
ΑΠΕ

Σοφία Δραμαλιώτη

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Σέμπος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Εκτίμηση και Ενίσχυση της Κλιματικής Ανθεκτικότητας Έργου
ΑΠΕ.

Σοφία Δραμαλιώτη

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δρ. Ιωάννης Σέμπος

Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό
(ΕΔΙΠ), ΕΜΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Δήμητρα Καϊκα

Μέλος ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

«Ευχαριστίες»

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Σέμπο για την καθοδήγησή και την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και συνολικά στο διδακτικό προσωπικό του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών "Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός (ΠΣΧ)" στη ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΩΝ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου για τα πολύτιμες γνώσεις τους και την εμπειρία τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου για την κατανόηση και την ψυχολογική μου ενίσχυση κατά τη διάρκεια της μακράς αυτής εκπαιδευτικής διαδρομής, έως την υποβολή της παρούσας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει την ανάγκη εκτίμησης και ενίσχυσης της κλιματικής ανθεκτικότητας έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, προτείνοντας συγκεκριμένη μεθοδολογία. Υπό το πρίσμα της αλματωδώς εξελισσόμενης κλιματικής αλλαγής και της αδήριτης προς τούτο ανάγκης άμεσης αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), η εργασία διερευνά τις κυρίαρχες ευπάθειες των έργων ΑΠΕ έναντι βασικών κλιματικών παραμέτρων σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αναδεικνύοντας τη σοβαρή επίδραση των κινδύνων αυτών στην ομαλή και αποδοτική λειτουργία τους και κατ' επέκταση στην οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητά τους. Μέσα από τη μελέτη περίπτωσης ενός φωτοβολταϊκού έργου με συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, η εργασία επιχειρεί έχοντας ως οδηγό το «Προσωρινό Πλαίσιο αξιολόγησης της Κλιματικής Ανθεκτικότητας», να χαρτογραφήσει τη διαδικασία εκτίμησης της κλιματικής ανθεκτικότητας του έργου αυτού, αναλύοντας την ευαισθησία και την έκθεσή του σε επιλεγμένους κλιματικούς κινδύνους, βάσει ποικίλων δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Στόχος είναι η δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων μέτρων και στρατηγικών, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση και αποτελεσματικότητα του έργου υπό το πρίσμα της ομαλής προσαρμογής του στους διαπιστωμένους, από την ανάλυση της τρωτότητας, εγγενείς κινδύνους. Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ορθή εκτίμηση της ανθεκτικότητας των έργων ΑΠΕ έναντι σημαντικών κλιματικών απειλών συνιστά τη βασική αρτηρία για τον μεθοδικό σχεδιασμό στοχευμένων μέτρων και δράσεων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους και επομένως για την ουσιαστική προσαρμογή των έργων αυτών στην κλιματική αλλαγή. Τέλος η εργασία συσχετίζει την ορθή εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας με την ποιότητα των αντλούμενων κάθε φορά δεδομένων, υπογραμμίζοντας την ανάγκη συνεχούς αξιολόγησης και επικαιροποίησής τους, θεωρώντας εκ των ων ουκ άνευ την πολυεπίπεδη συνεργασία των διαφορετικών εμπλεκόμενων μερών σε θέματα άσκησης πολιτικής προσαρμογής.

Λέξεις – Κλειδιά

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Κλιματικός κίνδυνος, Ευπάθεια, Κλιματικά σενάρια, Κλιματική ανθεκτικότητα, Προσαρμογή, Στρατηγικές

Abstract

This thesis examines the need to assess and enhance the climate resilience of Renewable Energy (RE) projects by proposing a dedicated assessment methodology. Against the backdrop of rapidly accelerating climate change and the pressing need to expedite the deployment of renewable energy sources, the study investigates the principal vulnerabilities of renewable energy projects to key climatic parameters, as identified in the literature. It highlights the significant impact of these climate-related risks on the reliable and efficient operation of such projects and, consequently, on their economic, social, and environmental sustainability. Through a case study of a photovoltaic (PV) project at a specific geographical location, the thesis applies the *Temporary Framework for Climate Resilience Assessment* as a guiding methodology to map the climate resilience assessment process. It analyses the project's sensitivity and exposure to selected climate hazards using a variety of data obtained from multiple sources. The objective is to facilitate the selection of appropriate adaptation measures and strategies that maximize the project's performance and operational effectiveness by ensuring its effective adaptation to the inherent climate risks identified through the vulnerability assessment. The study concludes that a robust assessment of the resilience of renewable energy projects to significant climate threats constitutes the cornerstone of the systematic design of targeted measures and actions aimed at strengthening their resilience and, consequently, enabling their effective adaptation to climate change. Finally, the thesis emphasizes that the successful implementation of the proposed methodology depends fundamentally on the quality of the underlying data, highlighting the need for their continuous evaluation and updating. It further underlines that effective, multi-level collaboration among all relevant stakeholders involved in climate adaptation policymaking is an indispensable prerequisite for achieving resilient renewable energy infrastructure.

Keywords: Renewable Energy Sources (RES), Climate Risk, Vulnerability, Climate Scenarios, Climate Resilience, Climate Change Adaptation, Adaptation Strategies.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract	3
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος Εικόνων/Σχημάτων	7
Κατάλογος Πινάκων	12
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	13
Σημαντικότερα Σημεία της Εργασίας.....	14
Συνεισφορά της Εργασίας.....	15
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 Γενικά.....	16
1.2 Αντικείμενο και Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας	17
1.3 Δομή Διπλωματικής	18
2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	20
2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες της κλιματικής αλλαγής	20
2.2 Αίτια και μηχανισμοί της κλιματικής αλλαγής	20
2.3 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε φυσικά και ανθρωπογενή συστήματα..	22
2.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	25
2.5 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε υποδομές ΑΠΕ.....	27
2.6 Μετριασμός και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ 28	
2.6.1 Κλιματικά Σενάρια.....	28
3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29

3.2	Κύριες κλιματικές απειλές για έργα ΑΠΕ.....	30
3.3	Ευπάθειες ανά Τεχνολογία ΑΠΕ	31
3.3.1	Φωτοβολταϊκά (PV)	31
3.3.2	Αιολικά Συστήματα.....	34
3.3.3	Υδροηλεκτρικά Συστήματα	37
3.3.4	Μονάδες Βιομάζας και Βιοαερίου	38
3.3.5	Γεωθερμικά συστήματα	39
3.4	Μεθοδολογίες Εκτίμησης Κλιματικού Κινδύνου	40
3.4.1	Ευρωπαϊκά Πολιτικά Πλαίσια	40
3.4.2	Διεθνή Πρότυπα & Οδηγίες.....	43
3.4.3	Πλαίσιο Αξιολόγησης στην Ελλάδα	45
3.4.4	Ερευνητικά & Επιστημονικά Πλαίσια	46
3.5	Εντοπισμός ερευνητικών κενών.....	49
4	ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	50
4.1	Νόμος για την Αδειοδότηση Έργων	50
4.2	Κλιματικός Νόμος.....	51
4.2.1	Ευρώπη.....	51
4.2.2	Ελλάδα	54
5	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	55
5.1	Μεθοδολογική Προσέγγιση	56
5.2	Βασική Μεθοδολογική Διαδικασία.....	57
5.3	Αποτίμηση μεθοδολογίας.....	59
6	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ	60
6.1	Περιγραφή έργου	61

6.2	Προέλεγχος	63
6.2.1	Ανάλυση Ευαισθησίας	63
6.2.2	Ανάλυση Έκθεσης.....	66
6.3	Λεπτομερής Ανάλυση Διακινδύνευσης	108
6.4	Μέτρα για την ενίσχυση της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή.....	109
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	112
7.1	Βασικός στόχος της εργασίας	113
7.2	Αδυναμίες Εφαρμογής των αποτελεσμάτων.....	114
7.3	Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	114
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	116

Κατάλογος Εικόνων/Σχημάτων

Εικόνα 2-1 Ισπανοί περπατούν στις λάσπες που προκάλεσε η κακοκαιρία «Dana» στην Βαλένθια (Πηγή: ΑΠΕ - ΜΠΕ / ΕΡΑ/MIGUEL ANGEL POLO)	23
Εικόνα 2-2 Χαρτογραφημένη έκταση της μεγαλύτερης πυρκαγιάς στην Ελλάδα το 2023 (Πηγή: San-Miguel-Ayanz et al., 2023)	24
Εικόνα 2-3 Εικόνες πριν και μετά τη μεγαλύτερη πυρκαγιά που έπληξε την Ελλάδα το 2023 (Πηγή: San-Miguel-Ayanz et al., 2023)	25
Εικόνα 6-1 Χάρτης χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών (Πηγή: ΠΑΑΕΥ)	61
Εικόνα 6-2 Εποχική διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την περίοδο	67
Εικόνα 6-3 Εποχική διακύμανση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την	68
Εικόνα 6-4 Εποχική διακύμανση της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την	68
Εικόνα 6-5 Εποχική διακύμανση της σχετικής υγρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την περίοδο 1980-	69
Εικόνα 6-6 Χάρτης Αριθμός ημερών με ακραίο κίνδυνο εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς (FWI > 50) RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	70
Εικόνα 6-7 Χάρτης Αριθμός ημερών με ακραίο κίνδυνο εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς (FWI > 50) RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	71
Εικόνα 6-8 Χάρτης Μέση σχετική υγρασία - RH (%) RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	72
Εικόνα 6-9 Χάρτης Μέση σχετική υγρασία - RH (%) RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060)(Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	72
Εικόνα 6-10 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) Ετήσιο (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	73
Εικόνα 6-11 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) Ετήσιο (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	74

Εικόνα 6-12 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG RCP 4.5 Μεταβολές Εγγύς μέλλον (2031-2060) Καλοκαίρι (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	75
Εικόνα 6-13 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG RCP 8.5 Μεταβολές Εγγύς μέλλον (2031-2060) Καλοκαίρι (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	76
Εικόνα 6-14 Χάρτης Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C) - TX RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	77
Εικόνα 6-15 Χάρτης Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C) - TX RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	78
Εικόνα 6-16 Χάρτης Μέσο ετήσιο κλάσμα νεφοκάλυψης (%) RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	79
Εικόνα 6-17 Χάρτης Μέσο ετήσιο κλάσμα νεφοκάλυψης (%) RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	80
Εικόνα 6-18 Χάρτης Ολική βροχόπτωση (mm) - PR RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) Ετήσιο (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	81
Εικόνα 6-19 Χάρτης Ολική βροχόπτωση (mm) - PR RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) Ετήσιο (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	82
Εικόνα 6-20 Χάρτης Αριθμός ημερών με δείκτη δυσφορίας (humidex) > 46°C RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	83
Εικόνα 6-21 Χάρτης Αριθμός ημερών με δείκτη δυσφορίας (humidex) > 46°C RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	84
Εικόνα 6-22 Χάρτης Αριθμός ημερών με TN > 20°C - τροπικές νύχτες RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	85
Εικόνα 6-23 Χάρτης Αριθμός ημερών με TN > 20°C - τροπικές νύχτες RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	86
Εικόνα 6-24 Χάρτης Μέση ετήσια εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (Watt/m ²) RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	87
Εικόνα 6-25 Χάρτης Μέση ετήσια εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (Watt/m ²) RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	88

Εικόνα 6-26 Χάρτης Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) Ετήσιο(Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/).....	89
Εικόνα 6-27 Χάρτης Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) Ετήσιο(Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/).....	90
Εικόνα 6-28 Χάρτης Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) Περίοδος αναφοράς (1971-2000) Ετήσιο (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	91
Εικόνα 6-29 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN < 0^{\circ}C$ - νυχτερινός παγετός RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	92
Εικόνα 6-30 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN < 0^{\circ}C$ - νυχτερινός παγετός RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	93
Εικόνα 6-31 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN < 0^{\circ}C$ - νυχτερινός παγετός Περίοδος αναφοράς (1971-2000) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/).....	94
Εικόνα 6-32 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TX > 35^{\circ}C$ - πολύ θερμές ημέρες RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	95
Εικόνα 6-33 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TX > 35^{\circ}C$ - πολύ θερμές ημέρες RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	96
Εικόνα 6-34 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TX > 35^{\circ}C$ - πολύ θερμές ημέρες Περίοδος αναφοράς (1971-2000) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	97
Εικόνα 6-35 Χάρτης Μέγιστη διάρκεια διαδοχικών ημερών με $PR < 1mm$ - μέγιστη διάρκεια ξηρασίας σε ημέρες Περίοδος αναφοράς (1971-2000) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/)	98
Εικόνα 6-36 Χάρτης Μέγιστη διάρκεια διαδοχικών ημερών με $PR < 1mm$ - μέγιστη διάρκεια ξηρασίας σε ημέρες RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/).....	99
Εικόνα 6-37 Χάρτης Μέγιστη διάρκεια διαδοχικών ημερών με $PR < 1mm$ - μέγιστη διάρκεια ξηρασίας σε ημέρες RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: https://geo.adaptivegreecehub.gr/).....	100
Εικόνα 6-38 Αριθμός ημερών με $PR > 10mm$ - ημέρες ισχυρής βροχόπτωσης RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060).....	101
Εικόνα 6-39 Αριθμός ημερών με $PR > 10mm$ - ημέρες ισχυρής βροχόπτωσης RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) Εγγύς μέλλον (2031-2060).....	102

Εικόνα 6-40 Ζώνες Δυνητικού Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας για το ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2024).....	103
Εικόνα 6-41 Ζώνες Δυνητικού Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας για το ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2025).....	104
Εικόνα 6-42 Χάρτης ετήσιας εδαφικής απώλειας (ΕΑ) από βροχοπτώσεις στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδος σε t/ha (λευκό=0, ανοικτό πράσινο= 0<ΕΑ<5, βαθύ πράσινο=5<ΕΑ<10, κίτρινο=10<ΕΑ<20, πορτοκαλί=20<ΕΑ<50 και κόκκινο=>50) (Ειδική Υπηρεσία Υδάτων 2018β, όπως εμφανίζεται στο Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, 2018). ..	105
Σχήμα 2-1 Το παγκόσμιο μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα πρέπει να αυξηθεί στα δύο τρίτα, ενώ η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας (TPES) θα πρέπει να παραμείνει σταθερή έως το 2050 (Πηγή: IRENA, 2018)	27
Σχήμα 3-1 Παράγοντες μείωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ (Πηγή: Hasan, K. Et al. 2022)	33
Σχήμα 3-2 Οι μελλοντικές αλλαγές στην (Α) χερσαία και (Β) υπεράκτια αιολική ενέργεια σε σύγκριση με την ιστορική περίοδο αναφοράς (1981–2000) για (αριστερά) ολόκληρο το έτος και (δεξιά) ανά εποχή (Doddy Clarke et al., 2021)	36
Σχήμα 3-3 Επίπεδα εκτίμησης κινδύνου από την κλιματική αλλαγή για τους τύπους βιοενέργειας και ενέργειας από βιομάζα. (Πηγή: Girgibo et al., 2024).....	38
Σχήμα 3-4 Διάγραμμα απεικόνισης του επιπέδου εκτίμησης των κινδύνων που ενέχει η κλιματική αλλαγή για τους διάφορους τύπους γεωθερμικής ενέργειας (Πηγή: Girgibo et al., 2024)	40
Σχήμα 3-5 Συνδεσιμότητα μεταξύ των παραγόντων κινδύνου και ομάδων κλιματικών κινδύνων (Πηγή: EEA, 2024)	42
Σχήμα 3-6 Ορισμός του κινδύνου στην Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (Πηγή: IPCC, 2014, όπως αναφέρεται σε IRENA, 2025)	44
Σχήμα 3-7 Η δομή της αλυσίδας επιπτώσεων (Πηγή: (GIZ et al., 2014, όπως αναφέρεται σε IRENA, 2025)	45
Σχήμα 3-8 Ταξινόμηση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που βασίζονται στον κίνδυνο και εφαρμόζονται στον τομέα του βιώσιμου ενεργειακού σχεδιασμού (Πηγή: Ioannou et al., 2017)	46
Σχήμα 3-9 Προτεινόμενη πλατφόρμα μοντελοποίησης και συν-προσομοίωσης που βασίζεται σε πράκτορες. Οι ενότητες αξιοποιούν δεδομένα από το Επίπεδο Πηγής Δεδομένων. Τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικά λειτουργικά επίπεδα που επισημαίνονται με διαφορετικά χρώματα.. (Πηγή: Schiera et al. 2019).....	48

Σχήμα 3-10 Σχήμα ροής δεδομένων της πλατφόρμας συν-προσομοίωσης (Πηγή: Schiera et al. 2019).....	48
Σχήμα 4-1 Στρατηγική προσαρμογής της ΕΕ, 2021 (Πηγή: European Court of Auditors, 2024)	53
Σχήμα 6-1 Χαρακτηριστικά Φ/Β Πάρκων Έργου (Πηγή: ΗΠΜ).....	62

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση τους (Panwar et al., 2011, όπως αναφέρεται σε Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016).....	26
Πίνακας 3-1 Πρόσφατες εργασίες σχετικά με την ενεργειακή μετεωρολογία και τον δείκτη κινδύνου. (Πηγή: Sánchez-Pozo et al., 2025)	47
Πίνακας 4-1 Σημαντικές Οδηγίες ΕΕ για το κλίμα.....	51
Πίνακας 6-1 Βασικές Κλιματικές Παράμετροι ευαισθησίας Φ/Β	64
Πίνακας 6-2 Ανάλυση ευαισθησίας Φ/Β έργου μελέτης περίπτωσης σε οξείς και χρόνιους κινδύνους.....	66
Πίνακας 6-3 Εκτίμηση ανόδου (μέσος όρος και εύρος) της της μέσης παγκόσμιας στάθμης	103
Πίνακας 6-4 Ανάλυση έκθεσης σε οξείς κινδύνους Φ/Β έργου μελέτης περίπτωσης.....	107
Πίνακας 6-5 Ανάλυση Διακινδύνευσης για το ΦΒ έργο.....	109

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

TPES Total Primary Energy Supply

ΑΠΕ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

CO₂ Διοξείδιο του άνθρακα

APE Average Photon Energy

EFFIS European Forest Fire Information System

IRENA Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

SSP Shared Socioeconomic Pathways

RCP Representative Concentration Pathways

EVT Extreme Value Theory

SVM Support Vector Machine

SRO Stochastic Robust Optimization

GMMs Gaussian Mixture Models

ABM Agent-Based Modeling

ΡΑΑΕΥ Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας & Υδάτων

ΗΠΜ Ηλεκτρικό Περιβαλλοντικό Μητρώο

ΣΔΚΠ Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας

ΠΕΣΠΚΑ Περιφερειακό Σχέδιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή

Σημαντικότερα Σημεία της Εργασίας

- Απαραίτητη η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη μετάβαση στην πράσινη ενέργεια.
- Η κλιματική αλλαγή δύναται να επηρεάζει σημαντικά τις υποδομές των έργων ΑΠΕ.
- Η εκτίμηση της κλιματικής ανθεκτικότητας έργων ΑΠΕ είναι απαραίτητη για την μέγιστη αποδοτικότητα.
- Το πλαίσιο αξιολόγησης οδηγεί σε ορθά μέτρα ενίσχυσης της κλιματικής ανθεκτικότητας του έργου.
- Ορθά μέτρα προσαρμογής αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα του έργου.

Συνεισφορά της Εργασίας

Η εργασία αυτή φιλοδοξεί να αναδείξει την σπουδαιότητα της εκτίμησης της κλιματικής ανθεκτικότητας έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), ώστε να είναι δυνατή η ολιστική τους λειτουργία με περιορισμό του κόστους και αύξηση της αποδοτικότητάς τους. Η μέθοδος που προτείνεται, μέσα από την πιστή εφαρμογή του «Προσωρινού Πλαισίου για την αξιολόγηση των προτάσεων έργων υποδομής που υποβάλλονται προς συγχρηματοδότηση σε Προγράμματα του ΕΣΠΑ 2021 – 2027, όσον αφορά στην κλιματική ανθεκτικότητα», σκιαγραφεί την δυνατότητα που μπορεί να προσδώσει στους διαχειριστές τέτοιων έργων, ώστε να ενισχύσουν την κλιματική ανθεκτικότητά τους μέσα από την ποσοτικοποίηση των κλιματικών απειλών και την συνδεδεμένη με αυτήν πρόταση στοχευμένων αντίμετρων. Έτσι, ανοίγει ο δρόμος για την ουσιαστική προσαρμογή των έργων ΑΠΕ στην κλιματική αλλαγή και την ελπίδα της βιωσιμότερης λειτουργίας τους μέσα στην κλιματική κρίση που μαστιάζει τα κράτη.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Χαρακτηριστικό της σημερινής εποχής είναι αναμφισβήτητα η επιτακτική ανάγκη της επιβίωσης του πλανήτη μας και η άμεση προς τούτο αποκατάσταση της οικοσυστημικής ισορροπίας.

Η κλιματική αλλαγή ως απόρροια της καταχρηστικής εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων και της αλόγιστης συμπεριφοράς του ανθρώπου απέναντι στη φύση, με φόντο την ικανοποίηση των υπεράριθμων και πλασματικών εν πολλοίς αναγκών του, αποτελεί σήμερα μία από τις μεγαλύτερες αν όχι τη μεγαλύτερη απειλή για το ανθρώπινο είδος.

Στρατηγικός στόχος των κυβερνήσεων σε τοπικό και σε διεθνές επίπεδο καθίσταται πλέον η επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας του πλανήτη, δηλαδή ένα μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών έως το 2050, ώστε να μετριαστούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα στην περίπτωση που δεν μπορεί να είναι εφικτός ο μετριασμός λαμβάνονται μέτρα και συντάσσονται πρωτόκολλα για την προσαρμογή των κρατών στην κλιματική αλλαγή.

Η σύγκλιση με τους κανόνες της βιώσιμης ανάπτυξης για τη διατήρηση των φυσικών πόρων και για τις επόμενες γενεές και την εφαρμογή κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων κυρίως, αποτελεί την προμετωπίδα της συντονισμένης προσπάθειας παγκοσμίως να ευθυγραμμιστεί η ανάπτυξη σε όλους τους παραγωγικούς τομείς με την ομαλή και ασφαλή διαβίωση του ανθρώπινου είδους στο σήμερα και στο άμεσο, αλλά και απώτερο μέλλον.

Βασικό πεδίο εφαρμογής των διαχειριστικών σχεδίων και στρατηγικών για τον μετριασμό και την προσαρμογή αποτελεί ο ενεργειακός τομέας καθώς οι χρησιμοποιούμενοι έως σήμερα ενεργειακοί πόροι εξαλείφονται. Υπό το καθεστώς της αναδύομενης σε πολλά κράτη ενεργειακής φτώχειας, η ανάγκη μετάβασης στην πράσινη ενέργεια και η αναστροφή της ενεργειακής ένδειας μέσα από την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κρίνεται επιτακτική.

1.2 Αντικείμενο και Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναδειχθούν οι ευπάθειες των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και να υπερθεματιστεί η αναγκαιότητα της εκτίμησης και ενίσχυσης της κλιματικής ανθεκτικότητάς τους, με γνώμονα την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητά τους.

Η εργασία εξετάζει αρχικά το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλύοντας την έννοια της, τα αίτια και τους μηχανισμούς της αλλά και τις συνέπειες, σε ανθρωπογενή και μη συστήματα, εστιάζοντας κυρίως σε αυτές που αφορούν στα ενεργειακά συστήματα και ειδικότερα στα έργα ΑΠΕ.

Μέσα από την ανασκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας αναφορικά με τις ευπάθειες των ενεργειακών έργων ΑΠΕ αλλά και με τα εφαρμοζόμενα πλαίσια ή/και πρωτόκολλα εκτίμησης κλιματικής τρωτότητας, γίνεται προσπάθεια να αναδειχθούν τα κενά που υπάρχουν ως προς:

- ❖ τη συνεκτικότητα και την ακρίβεια των δεδομένων σχετικά με τα έργα ΑΠΕ και τις απειλές στις οποίες υπόκεινται
- ❖ τη σύνδεση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης κλιματικού κινδύνου με συγκεκριμένα μέτρα προσαρμογής των εφαρμοστέων πλαισίων
- ❖ την ορθή και συνεπή εφαρμογή των προτεινόμενων μέτρων για την μείωση του κλιματικού κινδύνου και την ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των κρίσιμων κλιματικών απειλών που αντιμετωπίζουν τα έργα ΑΠΕ και η ανάγκη εκτίμησης της τρωτότητας τους με σαφή και μετρήσιμο τρόπο, ώστε να προκύπτει ξεκάθαρη σύνδεση μεταξύ του εκτιμώμενου κινδύνου και της προτεινόμενης δράσης για την μείωση του.

Προς τούτο γίνεται μελέτη περίπτωσης φωτοβολταϊκού έργου και εφαρμογή του «Προσωρινού Πλαισίου για την αξιολόγηση των προτάσεων έργων υποδομής που υποβάλλονται προς συγχρηματοδότηση σε Προγράμματα του ΕΣΠΑ 2021 – 2027, όσον αφορά στην κλιματική ανθεκτικότητα», ώστε να αναδειχθεί η δυνατότητα ποσοτικοποίησης

της τρωτότητας έργου ΑΠΕ και στοχευμένου σχεδιασμού αντίμετρων για την περαιτέρω ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας.

1.3 Δομή Διπλωματικής

Η εργασία δομείται σε (8) επτά κεφάλαια.

Στο 1^ο κεφάλαιο το οποίο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στο αντικείμενο, τον στόχο και τη βασική δομή της.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές έννοιες της κλιματικής αλλαγής καθώς και τα αίτια και οι κύριοι μηχανισμοί της. Γίνεται εκτενής αναφορά στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε φυσικά και ανθρωπογενή συστήματα και ειδικότερα σε υποδομές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ενώ υπογραμμίζεται ο ρόλος των τελευταίων για την προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή. Τέλος αναλύονται οι ΑΠΕ καθώς και τα κλιματικά σενάρια από τα οποία προκύπτουν αναλυτικά δεδομένα για την ανάλυση και πρόβλεψη των μελλοντικών συνεπειών του κλίματος και την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς των υποδομών, με τα κατάλληλα εξειδικευμένα μέτρα προσαρμογής.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις σημαντικότερες απειλές ανά τεχνολογία ΑΠΕ, ήτοι φωτοβολταϊκά, αιολικά, γεωθερμικά και υδροηλεκτρικά συστήματα, μονάδες βιομάζας και βιοαερίου. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στις μεθοδολογίες που εφαρμόζονται διεθνώς για την εκτίμηση του κλιματικού κινδύνου με εκτενή αναφορά στα διεθνή, ευρωπαϊκά και εθνικά πρότυπα πλαίσια και οδηγίες αξιολόγησης και εκτίμησης κλιματικής τρωτότητας έργων ΑΠΕ. Στο τέλος του 3^{ου} κεφαλαίου υπογραμμίζονται τα εντοπισμένα ερευνητικά κενά.

Στο 4^ο κεφάλαιο ερευνάται το ισχύον θεσμικό πλαίσιο που διέπει την κλιματική ανθεκτικότητα στην Ελλάδα και την Ευρώπη. Γίνεται αναφορά στις πιο κομβικές ευρωπαϊκές οδηγίες καθώς και στον νέο Κλιματικό Νόμο 4936/2022, που αποτέλεσαν καθεμία το λιθαράκι για τη συγκρότηση νομικού πλαισίου για το κλίμα και την προσαρμογή σε αυτό και εν τέλει την προστατευτική ασπίδα των Ευρωπαϊκών χωρών στο σύνολό τους έναντι της κλιματικής αλλαγής.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση της κλιματικής ανθεκτικότητας και την ενίσχυσή της με σειρά προτεινόμενων μέτρων, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου. Στο τέλος γίνεται συνολική αποτίμησή της υπογραμμίζοντας τη μεγάλη σημασία της ορθής εφαρμογής της μεθοδολογίας για την εκτίμηση και ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας έργων ΑΠΕ.

Στο 6ο κεφάλαιο γίνεται η ενδελεχής περιγραφή του έργου που επιλέχθηκε ως μελέτη περίπτωσης και εφαρμόζεται η παραπάνω μεθοδολογία βήμα προς βήμα. Αναλύεται η ευαισθησία και η έκθεση του έργου σε συγκεκριμένους κλιματικούς κινδύνους με περιγραφή όλων των διαθέσιμων δεδομένων και συνολική αναλυτική επεξεργασία τους, ώστε να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση της κλιματικής τρωτότητάς του. Ακολουθώς πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση διακινδύνευσης λόγω της υψηλής τρωτότητας του έργου σε ορισμένους κινδύνους και ο προσδιορισμός των εγγενών κινδύνων του λόγω κλιματικής αλλαγής. Στο τέλος του κεφαλαίου προτείνονται τα κατάλληλα μέτρα για την απομείωση κάθε εγγενούς κινδύνου και ενθαρρύνεται η σχολαστική εφαρμογή τους για την ενίσχυση της βιωσιμότητας του έργου.

Η εργασία καταλήγει στο 7^ο κεφάλαιο με τα βασικά συμπεράσματα της. Πιο συγκεκριμένα εξειδικεύεται ο βασικός στόχος της εργασίας που δεν είναι άλλος παρά η ανάδειξη της σπουδαιότητας της συστηματικής και μεθοδευμένης εκτίμησης του κλιματικού κινδύνου των έργων υποδομής και πιο συγκεκριμένα των έργων ΑΠΕ, με απώτερο στόχο τον σχεδιασμό απτών και στοχευμένων μέτρων μείωσης του κινδύνου. Παράλληλα αναφέρονται οι βασικές αδυναμίες στην εφαρμογή των πορισμάτων της παρούσης, καθώς και η δυνητική μελλοντική συνεισφορά της.

Στο 8^ο κεφάλαιο παρατίθεται σχετική βιβλιογραφία.

2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες της κλιματικής αλλαγής

Το κλίμα αλλάζει και η αλλαγή αυτή ορίζεται πλέον με σαφή και ρητό τρόπο. Επιλέγεται να αναφερθούν 2 βασικοί ορισμοί της κλιματικής αλλαγής οι οποίοι έχουν συγκεκριμένη διάκριση μεταξύ τους.

Στο παράρτημα I: Γλωσσάριο της Διακυβερνητικής Επιτροπής για το Κλίμα η κλιματική, αλλαγή ορίζεται ως εξής: «Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε μια αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί (π.χ. με τη χρήση στατιστικών δοκιμών) από αλλαγές στη μέση τιμή και/ή τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του και που παραμένει για μια παρατεταμένη περίοδο, συνήθως δεκαετίες ή περισσότερο».

«Κλιματική αλλαγή σημαίνει μια αλλαγή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα που μεταβάλλει τη σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας και η οποία προστίθεται στη φυσική κλιματική μεταβλητότητα που παρατηρείται σε συγκρίσιμες χρονικές περιόδους» (United Nations, 1992).

Είναι εύκολα διακριτό ότι ο δεύτερος ορισμός συσχετίζει το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αποκλειστικά με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Πράγματι, σήμερα είναι όσο ποτέ άλλοτε συμβατός ο ορισμός αυτός με την πραγματική διάσταση της κλιματικής κρίσης, φράση που αρχικά αποδόθηκε στον πρώην Αντιπρόεδρο των ΗΠΑ (1993-2001) Al Gore (Τράπεζα της Ελλάδος, 2022) και που ευρέως πια χρησιμοποιείται για την εύληπτη απόδοση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.

2.2 Αίτια και μηχανισμοί της κλιματικής αλλαγής

Τα τελευταία χρόνια ολόκληρη η ανθρωπότητα γίνεται κοινωνός μιας μαζικής αλλοίωσης των αρχέτυπων χαρακτηριστικών του πλανήτη. Η αστική ανάπτυξη λόγω της εκβιομηχανοποίησης των αστικών κέντρων και της ανάδυσης περισσότερων εργασιακών ευκαιριών, οδήγησε στην πληθυσμιακή έκρηξη στις μεγάλες πόλεις. Κατά συνέπεια, η

μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων, κυρίως για τις πολλαπλάσιες ανάγκες στον τομέα των μεταφορών και της θέρμανσης, και η επακόλουθη υποβάθμιση των πόρων στις περιοχές αυτές δημιούργησε ένα εκρηκτικό μίγμα ικανό να κλυδωνίσει την ευρύτερη οικοσυστημική ισορροπία.

Ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η αποψίλωση των τροπικών δασών, η γεωργία, η κτηνοτροφία και η καύση ορυκτών καυσίμων, συγκλίνουν στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου (European Commission, n.d.). Η αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, πέρα από τις προβλέψεις των επιστημόνων, βάσει των ευνοϊκότερων σεναρίων γίνεται αντιληπτή σε άλλους περισσότερο και σε άλλους λιγότερο. Για παράδειγμα οι κάτοικοι των Μεσογειακών χωρών και γενικότερα του νοτίου ημισφαιρίου μαστίζονται από όλο και συχνότερους και κυρίως μεγαλύτερης έντασης και διάρκειας καύσωνες, ενώ από την άλλη πλευρά οι κάτοικοι των Βορειότερων χωρών «χάνουν» τους βαρείς χειμώνες τους και βιώνουν ένα πιο ήπιο κλίμα σε σχέση με ό,τι συνηθιζόταν στο παρελθόν.

Οι παράκτιες περιοχές έρχονται αντιμέτωπες με την αύξηση της στάθμης της θάλασσας ως απόρροια της τήξης των πάγων των ημισφαιρίων, λόγω της θερμοκρασιακής αυτής μεταβολής. Φαινόμενα όπως τυφώνες, χαλαζοπτώσεις ή και ανεμοστρόβιλοι όπως έγινε πολύ πρόσφατα στον Ν. Ηλείας για παράδειγμα στην Ελλάδα, κάνουν την εμφάνισή τους συχνότερα και με μεγαλύτερη σφοδρότητα καθρεφτίζοντας την ευαλωτότητα του ανθρώπου απέναντι στη φύση και προκρίνοντας την άμεση ανάγκη θωράκισής του απέναντι στα φαινόμενα αυτά.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον ορισμό της κλιματικής αλλαγής ως δομικό χαρακτηριστικό του σημερινού κλίματος με προοπτική ακόμη μεγαλύτερης επίδρασης στην βιωσιμότητα του πλανήτη. Οι επιστήμονες που εξειδικεύονται στην επιστήμη της Φυσικής της Ατμόσφαιρας και της Μετεωρολογίας μελετούν και εξελίσσουν τα υπάρχοντα κλιματικά μοντέλα, ώστε να επιταχυνθεί η εξαγωγή συμπερασμάτων για την πορεία της εξελισσόμενης αυτής αλλαγής του κλίματος, αλλά και για να διαμορφωθεί η χάραξη νέων κατευθύνσεων στην εφαρμογή στοχευμένων πολιτικών και στρατηγικών για τον μετριασμό των αρνητικών συνεπειών και την προσαρμογή των κρατών και των πολιτών τους στην κλιματική αλλαγή.

2.3 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε φυσικά και ανθρωπογενή συστήματα

Υπό το πρίσμα της δυναμικής σχέσης μεταξύ κλίματος, έκθεσης και ευπάθειας οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής βαρύνουν ως επί το πλείστον τις περιοχές για τις οποίες τεκμαίρεται μεγαλύτερη έκθεση σε κλιματικό κίνδυνο και μεγαλύτερη εκτιμώμενη ευπάθεια αντίστοιχα σε αυτόν (Handmer et al., 2012).

Φαινόμενα όπως η βροχή ή η ταχύτητα του ανέμου, εμφανίζονται με πολλή μεγάλη σφοδρότητα και πολύ πιο συχνά απ' ό, τι στο παρελθόν. Η σύνδεση της νέας αυτής πραγματικότητας με την κλιματική αλλαγή γίνεται με εντονότερο τρόπο από την επιστημονική κοινότητα η οποία προωθεί την ανάγκη λήψης μέτρων. Πολλοί μελετητές έχουν προσπαθήσει να εξηγήσουν τη μεταβολή της δριμύτητας των βροχοπτώσεων και τη σύνδεσή της με την κλιματική αλλαγή, χωρίς κάτι τέτοιο να προκύπτει με απόλυτο τρόπο.

Ωστόσο, προκύπτει ένα βασικό συμπέρασμα από την αξιοποίηση μετεωρολογικών δεδομένων και την εφαρμογή της εξίσωσης Clausius-Clapeyron από τους μετεωρολόγους για την πρόγνωση ακραίων βροχοπτώσεων στην προσπάθειά τους να προβλέψουν πότε οι υδρατμοί θα συμπυκνωθούν σε υγρό. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι ο θερμός αέρας εν γένει μπορεί να συγκρατήσει περισσότερους υδρατμούς, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται και η πίεση των υδρατμών έως ότου φθάσει αυτή στο σημείο κορεσμού της και επομένως θα μπορούσε και να απελευθερώσει περισσότερο υγρό νερό ως βροχή (Adam, 2023).

Είναι χαρακτηριστικές οι εικόνες των πλημμυρισμένων πόλεων της Ισπανίας όπου οι άνθρωποι μετά από λίγα λεπτά βροχής γίνονται θύματα της μανίας της φύσης που δε συγχωρεί την αλόγιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Μπαζωμένα ή λάθος διευθετημένα ρέματα ή και κοίτες ποταμών που χρησιμοποιούνται ως χωματερές, λειτουργούν ως πεδίο φονικής δράσης για τα κατακρημνίσματα που το ύψος τους είναι πολύ υψηλό ακόμη και σε λίγα λεπτά. (Εικόνα 2-1)



**Εικόνα 2-1 Ισπανοί περπατούν στις λάσπες που προκάλεσε η κακοκαιρία «Dana» στην Βαλένθια
(Πηγή: ΑΠΕ - ΜΠΕ / ΕΡΑ/MIGUEL ANGEL POLO)**

Η επίδραση των επίμονων βροχοπτώσεων με μεγάλα ύψη σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα σε συνδυασμό με τις μεγάλες ταχύτητες ανέμων φαίνεται να είναι μεγαλύτερης κλίμακας στις παράκτιες περιοχές οι οποίες μαστιζονται από μεγάλα κύματα που πολλές φορές παρασύρουν όγκους θαλασσινού νερού στην ξηρά με αποτέλεσμα την καταστροφή των υποδομών και εγκαταστάσεων, και ασφαλώς την απειλή της ανθρώπινης ζωής. Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας στις περιοχές αυτές προκαλεί αλλαγές στον πυθμένα και διάβρωση των παράκτιων μετώπων, καθιστώντας απαραίτητα τα μέτρα προσαρμογής για τη διατήρηση του παραλιακού μετώπου και τη διασφάλισή του από πλημμυρικά φαινόμενα.

Παράλληλα η διαρκής αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου που ακολούθησε την αλματώδη ανάπτυξη των πόλεων και την εκβιομηχανοποίηση τους, συνέτεινε στην ολοένα και μεγαλύτερη θερμοκρασιακή άνοδο αποτελώντας θρυαλλίδα για την εκδήλωση ισχυρών καυσώνων, ιδιαίτερα στις Μεσογειακές χώρες. Οι θερμοκρασίες ρεκόρ, όπως χαρακτηρίζονται αγγίζουν τιμές της τάξης των 48°C και 49°C δυσχεραίνοντας την ανθρώπινη δραστηριότητα, την εργασία, τις μετακινήσεις και απειλώντας την υγεία, κυρίως των πιο ευάλωτων ατόμων λόγω ηλικίας ή και προβλημάτων υγείας αλλά και των ζώων.

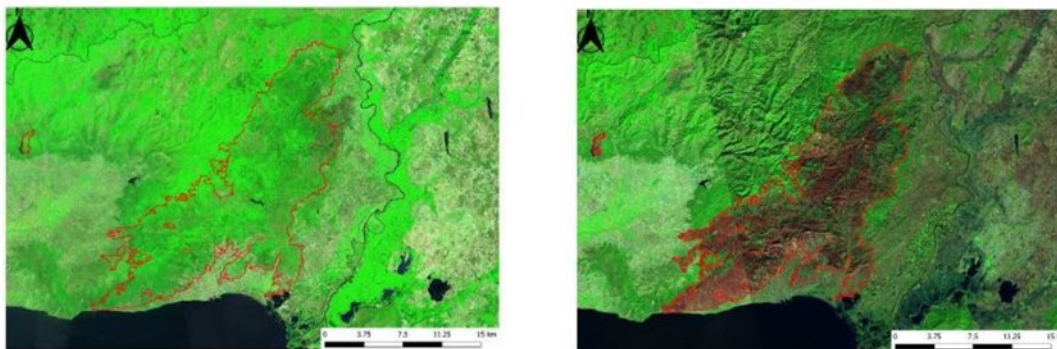
Τέτοιες θερμοκρασίες είναι λογικό να αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την εκδήλωση πυρκαγιών. Οι λεγόμενες megafires λόγω της τεράστιας έκτασής τους και της δυναμικής τους να επεκτείνονται αστραπιαία κατακαίοντας ξηρή φυτοκάλυψη και πυκνά δάση απειλούν ακόμη και την ανθρώπινη ζωή οικιστικών περιοχών λόγω της πρότερης μεγάλης συνήθως διάρκειας καύσωνα που ευθύνεται για την έντονη ξηρασία και την έλλειψη υγρασίας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκτεταμένης πυρκαγιάς η οποία διήρκεσε μέρες και έκαψε πάνω από 96.000ha, καταλαμβάνοντας έτσι τη θέση της μεγαλύτερης πυρκαγιάς που έχει καταγραφεί ποτέ στο Ευρωπαϊκό σύστημα πληροφοριών για τις δασικές πυρκαγιές (EFFIS-European Forest Fire Information System), αποτελεί η πυρκαγιά στην Αλεξανδρούπολη και πιο συγκεκριμένα στο τεράστιας περιβαλλοντικής σπουδαιότητας δάσος της Δαδιάς, λόγω του μοναδικού ενδιαιτήματος του Μαυρόγυπα, ένα σπάνιο είδος γύπα. (εικόνα 2-2)



Εικόνα 2-2 Χαρτογραφημένη έκταση της μεγαλύτερης πυρκαγιάς στην Ελλάδα το 2023 (Πηγή: San-Miguel-Ayanz et al., 2023)

Στην εικόνα 2-3 αποτυπώνεται το μέγεθος της καταστροφής λόγω του μεγάλου εμβαδού κάλυψης της δασικής πυρκαγιάς.



Εικόνα 2-3 Εικόνες πριν και μετά τη μεγαλύτερη πυρκαγιά που έπληξε την Ελλάδα το 2023 (Πηγή: San-Miguel-Ayanz et al., 2023)

Οι μεταβολές και αλλοιώσεις που προκαλούνται στα φυσικά οικοσυστήματα προκαλούν υποβάθμιση της ποιότητας της ανθρώπινης ζωής, καθώς η απειλητική διάσταση της κλιματικής αλλαγής στις παθούσες περιοχές οδηγεί σε κλιματική μετανάστευση και συνεπώς στην ερημοποίηση των πολύπαθων περιοχών.

Ως συνέπεια της εσωτερικής αυτής πληθυσμιακής μετακίνησης ανακύπτουν κοινωνικοοικονομικοί κλυδωνισμοί και ανακατατάξεις με σημαντική ψυχολογική ανθρώπινη επιβάρυνση. Τα κράτη έρχονται αντιμέτωπα με τεράστιες οικονομικές προκλήσεις που δυστυχώς, χωρίς πολιτικές μετριασμού και προσαρμοστικά μέτρα είναι καταστροφικές για τη βιωσιμότητα των προϋπολογισμών τους και των κυβερνητικών σχεδίων δράσης τους, προεξοφλώντας πολιτικές κρίσεις στο εσωτερικό τους.

2.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι βασικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνοψίζονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση τους (Panwar et al., 2011, όπως αναφέρεται σε Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016)

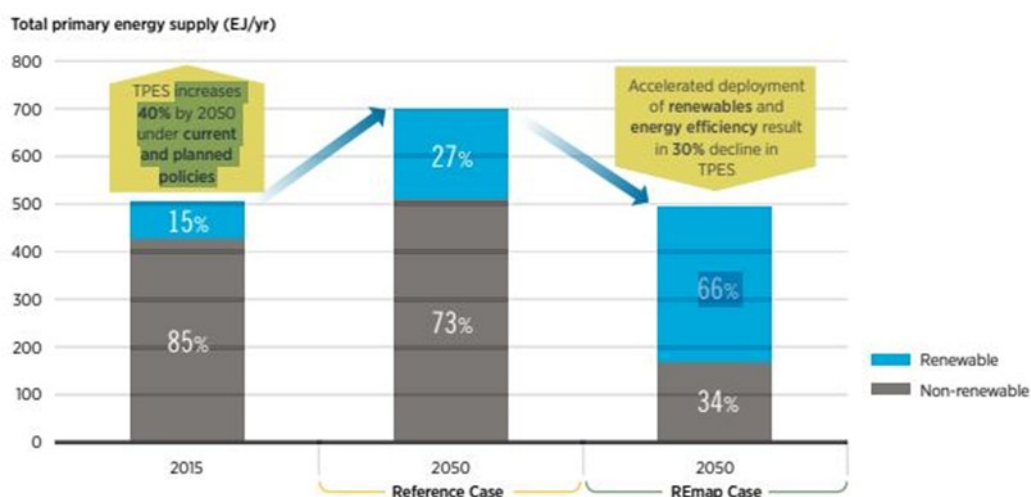
Πηγές ενέργειας	Επιλογές μετατροπής και χρήσης ενέργειας
Υδροηλεκτρική ενέργεια	Παραγωγή ενέργειας
Βιομάζα Morden	Παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, πυρόλυση, αεριοποίηση, χώνευση
Γεωθερμική	Θέρμανση πόλεων, παραγωγή ενέργειας, υδροθερμική, θερμό ξηρό πέτρωμα
Ηλιακή	Ηλιακά οικιακά συστήματα, ηλιακοί ξηραντήρες, ηλιακοί φούρνοι
Άμεση ηλιακή ενέργεια	Φωτοβολταϊκά, παραγωγή θερμικής ενέργειας, θερμοσίφωνες
Άνεμος	Παραγωγή ενέργειας, ανεμογεννήτριες, ανεμόμυλοι, αντλία νερού
Κύμα και παλίρροια	Πολυάριθμος σχεδιασμός, φράγμα, παλιρροιακό ρεύμα

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως φυσικές και ανεξάντλητες ενεργειακές πρώτες ύλες έχουν το βασικό πλεονέκτημα της αφθονίας τους στη φύση, ειδικά στην χώρα μας όπου το ηλιακό αλλά και αιολικό δυναμικό είναι αρκετά υψηλό, σχεδόν όλο τον χρόνο. Η εξάλειψη λοιπόν του στρες, αναφορικά με την ανάγκη διατήρησης του πόρου, όπως συμβαίνει με τα κοιτάσματα ορυκτών υδρογονανθράκων, δίνει θετικό πρόσημο στην επιλογή τους για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών πόλεων, επιχειρήσεων και εγκαταστάσεων. Παράλληλα σε μια εποχή όπου η ενεργειακή φτώχεια συνιστά μείζον ζήτημα που ταλανίζει τις περισσότερες πόλεις του κόσμου και δη των αναπτυσσόμενων χωρών ή και των περιοχών γενικά με χαμηλό εισόδημα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν πανάκεια για την έξοδο από την ενεργειακή κρίση και την ευθυγράμμιση των κοινοτήτων στον κοινό στόχο της ισότιμης κα δίκαιης ενεργειακής πρόσβασης.

Πέραν όμως και πάνω από τα παραπάνω, η αξιοποίησή τους αποτελεί την βασική αρτηρία για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας του πλανήτη με τον περιορισμό της υπερθέρμανσής του, λόγω της καθαρής ενέργειας που προσφέρουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ικανοποιώντας τα κριτήρια της πράσινης μετάβασης που ευαγγελίζεται η Συμφωνία του Παρισιού.

Συμπερασματικά, η ανάπτυξη των ενεργειακών συστημάτων και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι απολύτως απαραίτητη για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας και την ομαλή μετάβαση σε πράσινη ενέργεια. Σύμφωνα με την έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA) για το 2018, αναφορικά με τη παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση με στόχο έτος το 2050, το μερίδιο των ανανεώσιμων

πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην τελική κατανάλωση ενέργειας έπρεπε να είχε αυξηθεί από ~15% (το 2015) σε περίπου δύο τρίτα (~66%) έως το 2050 (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2-1 Το παγκόσμιο μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα πρέπει να αυξηθεί στα δύο τρίτα, ενώ η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας (Total Primary Energy Supply -TPES) θα πρέπει να παραμείνει σταθερή έως το 2050 (Πηγή: IRENA, 2018)

2.5 Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε υποδομές ΑΠΕ

Η προστασία των Κρίσιμων Υποδομών αποτελεί, εξ ορισμού, υψηλή προτεραιότητα για την ευημερία των πολιτών κάθε χώρας (διαΝΕΟσις, 2016). Ειδικότερα οι υποδομές παραγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας παραγόμενη από ΑΠΕ, λόγω της ανάγκης ταχύτατης ενσωμάτωσής τους στη συνολική παραγόμενη ενέργεια και διατήρησης της συνολικής ενεργειακής προσφοράς παγκοσμίως σε επίπεδα του 2015, αποτελούν Κρίσιμες Υποδομές για τις οποίες κρίνεται αδήριτη η ανάγκη διασφάλισης της καλής λειτουργίας τους, αλλά και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσής τους στο μέγιστο δυνατό βαθμό.

Υπό το πρίσμα αυτό, πρωταρχικό στόχο των υπευθύνων για την εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων ΑΠΕ αποτελεί η ενίσχυση της απρόσκοπτης λειτουργίας τους και η πρόληψη της πιθανής υποβάθμισης τους από φαινόμενα που άπτονται της κλιματικής κρίσης.

Η κλιματική αλλαγή με την εκδήλωση συχνά έντονων ακραίων καιρικών φαινομένων μπορεί να επηρεάσει την εύρυθμη λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ ανάλογα με την τεχνολογία του εκάστοτε συστήματος, τον τρόπο λειτουργίας του, τα υλικά των εξαρτημάτων του αλλά και από την τοπογραφία της θέσης εγκατάστασης. Οι ευπάθειες των ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.6 Μετριασμός και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ

Η εκτίμηση του κλιματικού κινδύνου και επομένως η αξιολόγηση της κλιματικής ανθεκτικότητας, είναι αναγκαίο να υλοποιηθεί μετά από ενδελεχή εξέταση των διαθέσιμων δεδομένων. Τέτοια δεδομένα σε διάφορες κλίμακες υπάρχουν διαθέσιμα και έχουν ενσωματωθεί σε συγκεκριμένα σενάρια.

2.6.1 Κλιματικά Σενάρια

Ένα από τα εργαλεία λοιπόν στη φαρέτρα των επιστημόνων που ερευνούν τις κλιματικές μεταβολές και των υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία υποδομών, είναι κατά βάση τα τρέχοντα κλιματικά μοντέλα των λεγόμενων Κοινών Κοινωνικοοικονομικών Διαδρομών (SSP) – Αντιπροσωπευτικών Διαδρομών Συγκέντρωσης (RCP): ένα σύνολο εναλλακτικών κοινωνικοοικονομικών διαδρομών ανάπτυξης (SSP) και διαδρομών συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα (RCP) (O'Neill et al., 2020). Η συνάρθρωση των αποτελεσμάτων των μοντέλων και η συνδυαστική θεώρηση των δεδομένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κοινωνικοοικονομικών συνεπειών, κυρίως δε των πολύ έντονων σπανιότερα εκδηλωμένων καιρικών φαινομένων, είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε ασφαλέστερα και ορθότερα συμπεράσματα αναφορικά με τις μελλοντικές συνέπειες του κλίματος και της ενίσχυσης της ανθεκτικότητάς τους με τα κατάλληλα εξειδικευμένα μέτρα προσαρμογής.

3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή, με τη δριμύτητα και την έντονη συχνότητα των φαινομένων που τη συνοδεύουν, επηρεάζει τις υποδομές των έργων ΑΠΕ περισσότερο ή λιγότερο ανάλογα με το είδος και τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι βασικές παράμετροι του κλίματος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ή το ύψος βροχής και λοιπών κατακρημνισμάτων, διέπουν τη λειτουργία τέτοιων δομών καθορίζοντας το βαθμό απόδοσής τους και συνεπώς το κόστος λειτουργίας τους.

Η μεταβλητότητα των παραμέτρων αυτών λόγω της αλλαγής του κλίματος αλλά και η διαφοροποίησή τους ανάλογα με τη γεωγραφική θέση του έργου και την τοπογραφία της ευρύτερης περιοχής χωροθέτησής του, οδηγούν στην ανάγκη διαμόρφωσης κατάλληλου χωροταξικού σχεδιασμού για την εγκατάσταση συγκεκριμένων ΑΠΕ σε γεωγραφικές θέσεις με δεδομένες κλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες για την ορθή και αποδοτική λειτουργία τους μέσα από την πρόβλεψη της κλιματικής ανθεκτικότητάς τους.

Στην παρούσα ανασκόπηση εξετάζονται: (α) οι κύριες κλιματικές απειλές για τις ΑΠΕ, (β) τα πλαίσια αξιολόγησης της ανθεκτικότητας, (γ) οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της κλιματικής ευπάθειας και (δ) τα υπάρχοντα προσαρμοστικά μέτρα, καθώς και (ε) τα κενά στη βιβλιογραφία και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

3.2 Κύριες κλιματικές απειλές για έργα ΑΠΕ

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι υποδομές ενέργειας υφίστανται μεγάλη πίεση υπό τις κρατούσες κλιματολογικές συνθήκες και αν και θεωρούνται περιβαλλοντικά ωφέλιμες, εντούτοις η μη υιοθέτηση ενός ορθού σχεδιασμού για τη λειτουργία και εγκατάστασή τους απομακρύνει το σενάριο της ολιστικής και βιώσιμης πρακτικής τους.

Δε θα πρέπει άλλωστε να ξεχνάει κανείς ότι τα έργα ΑΠΕ θεωρούνται ουσιαστικά αυτοσκοπός και ύστατη λύση για την προσαρμογή των κρατών στην κλιματική αλλαγή και την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας, η οποία στον ενεργειακό τομέα επιτάσσει την χρήση τους και πιο συγκεκριμένα τον διπλασιασμό τους έως το 2050.

Η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία και ο άνεμος φαίνεται να αποτελούν τη ναυαρχίδα των παραμέτρων που επηρεάζουν σε πρωταρχικό βαθμό την ανθεκτικότητα των έργων ΑΠΕ και κυρίως των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων. Το χαλάζι, οι πλημμύρες, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές αλλά και οι πυρκαγιές (megafires), όλα γνώριμα πια σημεία του σημερινού «καιρού» λειτουργούν ως απειλή για την δομή των έργων ΑΠΕ, τόσο κατά τη φάση κατασκευής τους, όσο και κατά τη φάση λειτουργίας τους.

Παρακάτω θα εξειδικευθούν οι απειλές αυτές ανάλογα με το είδος του έργου ΑΠΕ.

3.3 Ευπάθειες ανά Τεχνολογία ΑΠΕ

Στην ενότητα αυτή γίνεται περιγραφή των ευπαθειών ανά κατηγορία ΑΠΕ, όπως προκύπτει από μελέτη σχετικής βιβλιογραφίας.

3.3.1 Φωτοβολταϊκά (PV)

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας καθίσταται κρίσιμη για την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η απόλυτη ανάγκη όχι μόνο για την μέτρηση αλλά και την ασφαλέστερη πρόβλεψη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας περιγράφεται από τους Burnett et al. (2014). Στη μελέτη τους σε επίπεδο Ηνωμένου Βασιλείου και με βάση ένα μέτριο κλιματικό σενάριο προβλέπεται αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στις νοτιότερες περιοχές και ειδικότερα κατά τη θερινή περίοδο, ενώ για τη χειμερινή περίοδο παρατηρούν μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας, ειδικότερα στον Βορρά. Καταδεικνύεται έτσι η έντονη εποχική μεταβλητότητα στην ηλιοφάνεια μεταξύ διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών αλλά και του επιλεγμένου κάθε φορά κλιματικού σεναρίου, δεδομένου ότι οι αλλαγές στην ηλιοφάνεια προβλέπονται διαφορετικές για κάθε σενάριο. Αυτή ακριβώς η μεταβλητότητα επηρεάζει και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, με την απόδοσή τους να αυξάνεται στις νοτιότερες περιοχές λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας και να μειώνεται στις βορειότερες, όπου επικρατεί περισσότερη συννεφιά.

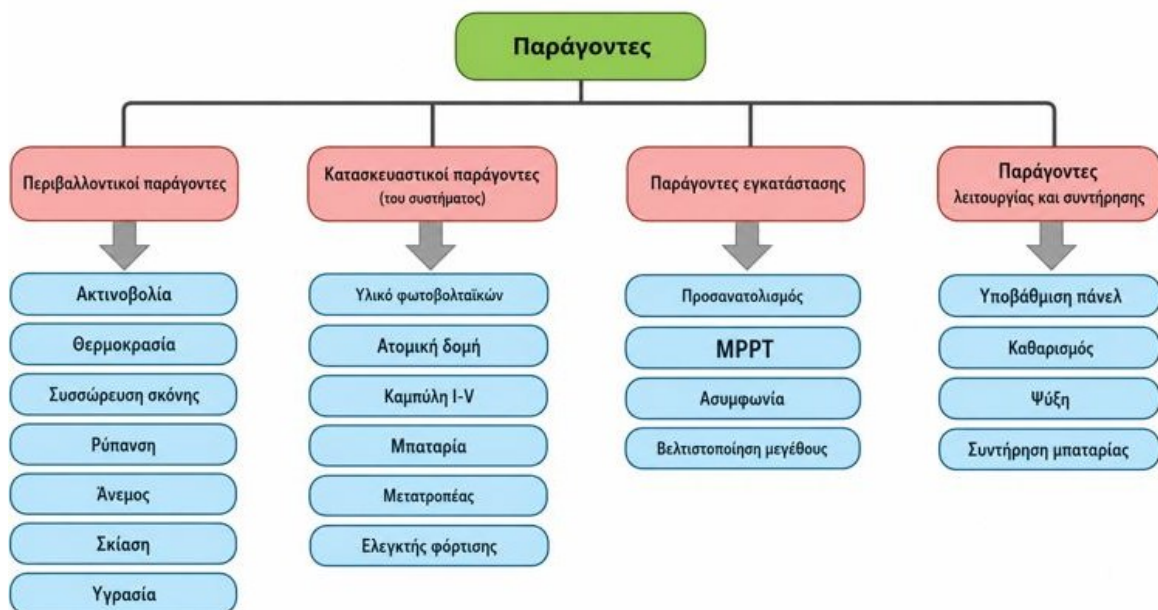
Η σπουδαιότητα επιλογής κλιματικού σεναρίου σχετικά με την πρόβλεψη στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας υπογραμμίζεται και μέσα από την μελέτη των Pan et al. (2004) στην οποία διαφαίνεται ότι η ηλιοφάνεια προβλέπεται μειωμένη στις ΗΠΑ για δεδομένα κλιματικού σεναρίου με υψηλά επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Έτσι καταλήγει ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών μειώνεται για όλη σχεδόν την επικράτεια έως και 30% με εξαίρεση μικρές περιοχές για τις οποίες διαπιστώνεται αύξηση έως και 30%.

Ο συντελεστής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου στον οποίο πραγματικά λειτουργεί ένα τέτοιο έργο κοντά στην ονομαστική του ισχύ, διαμορφώνεται διαφορετικά ανάλογα με την ηλιοφάνεια. Παράγοντες που την περιορίζουν όπως η ύπαρξη αυξημένων αερολυμάτων (Huang, X. et al., 2025) αποδεικνύεται ότι μειώνουν τη συνολική απόδοσή τους. Αλλά και η ύπαρξη καπνού λόγω φαινομένων όπως οι πυρκαγιές, απόρροια της κλιματικής αλλαγής όλο και συχνότερα τα τελευταία χρόνια σε πολλές χώρες κυρίως της Ανατολικής Μεσογείου και της Κεντρικής Αμερικής, φαίνεται ότι

μειώνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών λόγω της προκύπτουσας αυξημένης νεφοκάλυψης περιορίζοντας την ηλιοφάνεια και επομένως και την απορρόφηση του ηλιακού φωτός από τα ηλιακά πάνελ. (Bošnjaković et al., 2023). Η πολυπαραγοντική φύση της πρόβλεψης της ηλιοφάνειας άρα και της μελλοντικής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων καθιστά την πρόβλεψη της ανθεκτικότητά στους ένα δισεπίλυτο πρόβλημα για γερούς λύτες.

Παράλληλα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ευαίσθητα στην φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. (Lindsay et al., 2020). Ο δείκτης μέσης ενέργειας φωτονίων (APE) εκφράζει την επίδραση της κατανομής του ηλιακού φάσματος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε εξωτερικούς χώρους. Σε κάποιες μελέτες, για την αναγνώριση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιείται η τιμή της προς τα κάτω ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (DSR) ως εκτίμηση της συνολικής ποσότητας ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (τόσο άμεσης όσο και διάχυτης) που φτάνει στην επιφάνεια της Γης (GOES, 2018), η εντατική διαφοροποίηση της οποίας προκαλεί αστάθειες στη λειτουργία ενός ηλιακού συστήματος. (Long et al, 2024).

Και άλλοι μελετητές όπως οι Hasan et al. (2022) μελετούν τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1 Παράγοντες μείωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ (Πηγή: Hasan, K. Et al. 2022)

Καθώς το φωτοβολταϊκό στοιχείο απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, η παρουσία σκόνης, χρώματος, χιονιού που μειώνει την επιφάνεια έκθεσης στην ακτινοβολία, οδηγεί σε μείωση της απορρόφησής της και επομένως μειωμένη απόδοση του στοιχείου. Ειδικότερα η σκόνη σε υγρά περιβάλλοντα δημιουργεί, λόγω της απορρόφησης υγρασίας, ένα στρώμα λάσπης με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται ακόμη περισσότερο η δυνατότητα ικανοποιητικής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας (Yilbas BS, όπως αναφέρεται στους Hasan et al., 2022)

Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει την αποδοτική λειτουργία των PV, όπως καταδεικνύεται μέσα από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα οι Bošnjaković et al, 2023 αναφέρουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του πλαισίου του πάνελ να αγγίζει περίπου τους 70 °C, η θερμοκρασία του πάνελ τους 85 °C και η θερμοκρασία της μόνωσης του καλωδίου τους 60 °C. Πράγματι η θερμότητα που απορροφά το φωτοβολταϊκό στοιχείο, εκτός από τα πάνελ, μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανσή του και επομένως σε μειωμένη απόδοση. (Hasan et al. 2022)

Οι ισχυροί άνεμοι δύνανται να προκαλέσουν ζημιά στις κατασκευές, εκτός από τις διακοπές ρεύματος που προκαλούνται από τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, οδηγώντας σε μείωση της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας και των γεωθερμικών συστημάτων (Rahman T. 2025). Η φθορά μπορεί να αφορά αποκόλληση των πάνελ από τις βάσεις τους

ή τραυματισμό του στοιχείου από μεταφορά αντικειμένων λόγω της έντασης και κατεύθυνσης του ανέμου. Το χαλάζι μπορεί να φθείρει την επιφάνεια των πάνελ είτε με την άμεση πρόσκρουση είτε με την απόθεση υπολειμμάτων που εμποδίζουν το φως του ήλιου και προκαλούν συσσώρευση νερού στα πάνελ (Okonkwo, P. C. et al., 2025)

Τα συνοδά αποτελέσματα σφοδρών καιρικών φαινομένων είναι λογικό να προκαλούν ζημιές σε έργα υποδομής όπως και σε έργα ΑΠΕ, καταστρέφοντας τα ηλιακά πάνελ ή τους έλικες των αιολικών έργων προκαλώντας διάβρωση ή και ολοκληρωτική καταστροφή με την αντικατάσταση των τμημάτων που υπέστησαν την φθορά να οδηγεί σε επιπλέον κόστος. Το χαλάζι μπορεί να φθείρει την επιφάνεια των πάνελ είτε με την άμεση πρόσκρουση είτε με την απόθεση υπολειμμάτων που εμποδίζουν το φως του ήλιου και προκαλούν συσσώρευση νερού στα πάνελ. Αν σκεφτεί κανείς πόσο συχνά είναι πλέον τα παραπάνω, και πόσο ανίσχυρες φαίνεται πως εμφανίζονται οι διάφορες υποδομές κτηριακές, ενέργειας κτλ. γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η συνάρτηση του κόστους αποκατάστασης τέτοιων ζημιών με το κόστος υλοποίησης ενός ορθού περιβαλλοντικού σχεδιασμού, στην προκειμένη περίπτωση των έργων ΑΠΕ, είναι κρίσιμη καθώς χωρίς αυτόν φαίνεται ότι είναι αναπόφευκτες και δυνητικά απαγορευτικές για τους κατασκευαστές τους.

3.3.2 Αιολικά Συστήματα

Τα αιολικά συστήματα παίζουν και θα παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση παγκοσμίως. Η κατασκευή και η λειτουργία τους επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή κυρίως σε ό,τι έχει να κάνει με τη μεταβολή ανεμολογικών χαρακτηριστικών καθώς ο άνεμος είναι η ενεργειακή πηγή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους.

Στη βιβλιογραφία συνολικά αναφέρεται ως πιο σημαντική κλιματική επίπτωση στα αιολικά συστήματα η μείωση στην παραγωγικότητα, αλλά και σε δείκτες όπως, η μέση και ακραία ταχύτητα ανέμου, πυκνότητα αιολικής ενέργειας, ώρες λειτουργίας, συνολική παραγωγή και συντελεστής χωρητικότητας (Osman, 2023).

Όπως παρατηρούν οι Martinez & Iglesias (2022) ανακύπτουν σημαντικές μειώσεις στην πυκνότητα της παραγόμενης αιολικής ενέργειας σε διαφορετικές περιοχές και βάσει

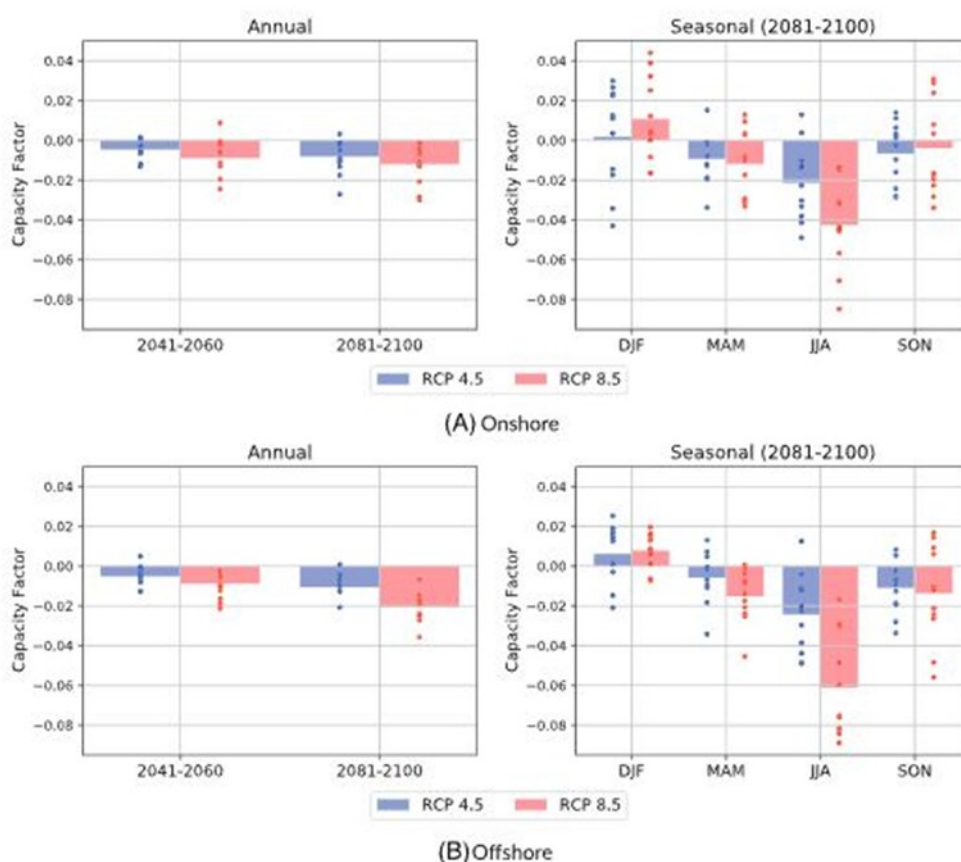
διαφορετικών κλιματικών σεναρίων SSPs ¹(SSP4.5 & SSP8.5) όπως της τάξης των 15% στις ΗΠΑ και τον Καναδά ή της τάξης του 10% η πολιτεία του Τέξας και το βορειοανατολικό Μεξικό (>10%), ο Κόλπος του Χάντσον (~30%) και οι περιοχές του νότιου Μεξικού και της Κεντρικής Αμερικής (έως 40%).

Είναι χαρακτηριστικό ότι μικρότερου βεληνεκούς μειώσεις ή αυξήσεις παρατηρούνται στο σενάριο SSP2-4.5 σε σχέση με το SSP2-8.5 για τις ίδιες περιοχές και κυρίως μέσα στο ίδιο έτος. Στην ίδια μελέτη αναλύεται η πρόβλεψη για την εξέλιξη της χρονικής μεταβλητότητας του αιολικού πόρου, η οποία επίσης διαφοροποιείται ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και το θεωρούμενο κλιματικό σενάριο.

Στη μελέτη των Doddy Clarke et al. (2021) οι οποίοι βασίζονται σε δεδομένα δυο βασικών (RCP)² (RCP 4.5 και 8.5) αναλύονται οι επιπτώσεις στην αιολική ενέργεια για το μεσοπρόθεσμο (2041–2060) και το μακροπρόθεσμο (2081–2100) μέλλον στην Ιρλανδία. Η αιολική ενέργεια προβλέπεται να μειωθεί ($\leq 2\%$) συνολικά στο μελλοντικό σενάριο κλιματικής αλλαγής. Ειδικότερα προκύπτει ότι η αιολική παραγόμενη ενέργεια θα μειωθεί ελαφρώς κατά τους καλοκαιρινούς μήνες κυρίως στις παράκτιες περιοχές, ενώ θα αυξηθεί κατά τους χειμερινούς. (Σχήμα 3-2)

¹ Shared Socioeconomic Pathways (SSPs- Κοινές Κοινωνικοοικονομικές Διαδρομές) είναι πέντε σενάρια που έχουν αναπτυχθεί από την επιστημονική κοινότητα με σκοπό να προβάλουν τον τρόπο με τον οποίο ενδέχεται να εξελιχθούν η παγκόσμια κοινωνία, η δημογραφία και η οικονομία έως το 2100.

² Representative Concentration Pathways (RCPs - Αντιπροσωπευτικές Διαδρομές Συγκέντρωσης) είναι σενάρια που χρησιμοποιούνται από την IPCC για την προβολή των μελλοντικών επιπέδων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, των συγκεντρώσεων στην ατμόσφαιρα και της ακτινοβολικής πίεσης έως το 2100.



Σχήμα 3-2 Οι μελλοντικές αλλαγές στην (Α) χερσαία και (Β) υπεράκτια αιολική ενέργεια σε σύγκριση με την ιστορική περίοδο αναφοράς (1981–2000) για (αριστερά) ολόκληρο το έτος και (δεξιά) ανά εποχή (Doddy Clarke et al., 2021)

Συμπερασματικά, κύριοι παράγοντες που φαίνεται να απειλούν την μελλοντική παραγωγικότητα των αιολικών συστημάτων ενέργειας είναι η παρουσία ακραίων ταχυτήτων ανέμου και ριπών, γεγονός που ενδέχεται να αλλάξει και τις προδιαγραφές κατασκευής τους αλλά και τον χωροθετικό τους προγραμματισμό, οι παγετοί ιδίως σε μεγάλα υψόμετρα όπου εκτός από την αλλοίωση στην κίνηση των πτερυγίων θα δυσκολεύεται η πρόσβαση σε αυτά για την συντήρηση ή την εγκατάστασή τους αν πρόκειται για νέα, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας η οποία θα θέσει σε άμεση απειλή τα παράκτια αιολικά πάρκα αλλά και η αύξηση της θερμοκρασίας η οποία μειώνοντας την πυκνότητα του αέρα, επηρεάζει αρνητικά την ισχύ του εκπεμπόμενου αέρα και επομένως τη συνολική απόδοση του συστήματος (Pryor & Barthelmie, 2010).

3.3.3 Υδροηλεκτρικά Συστήματα

Η υδραυλική ενέργεια στηρίζεται στην δυναμική ενέργεια του νερού κατά την πτώση του από ψηλότερο σε χαμηλότερο υψομετρικό σημείο.

Όπως είναι εύκολα κατανοητό τα υδροηλεκτρικά έργα για την παραγωγή ενέργειας βασίζουν την λειτουργία τους στην παρουσία κατακρημνισμάτων, καθώς η ενέργειά τους χρειάζεται το νερό για να παραχθεί.

Τα υδροηλεκτρικά έργα περιλαμβάνουν έργα φραγμάτων με δεξαμενές, έργα σε ποτάμια και ρέματα καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα έργων (Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016). Η φύση των έργων αυτών απαιτεί την επιλογή φυσικών οικοσυστημάτων για την κατασκευή τους, καθιστώντας την κόκκινο πανί για τις αρχές προστασίας και διαχείρισης περιβαλλοντικών ζητημάτων. Έτσι ενώ πρόκειται για μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας χαμηλού κόστους και σε μεγάλη διαθεσιμότητα σε πολλές χώρες με πλούσια υδάτινα συστήματα όπως και στην Ελλάδα, από την άλλη πλευρά η κατασκευή τους εγείρει κινδύνους υποβάθμισης της τοπικής βιοποικιλότητας.

Αναφορικά με την ευπάθεια των υδροηλεκτρικών συστημάτων λόγω της κλιματικής αλλαγής, αυτή εξειδικεύεται κυρίως στην αλλαγή των διαθέσιμων απορροών σε ποταμούς και ρέματα, όπως αυτή προκύπτει από δυνητικές αλλαγές στο pattern των συνολικών κατακρημνισμάτων.

Σύμφωνα με τους Munoz & Sailor (1998) η επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη ως μια από τις βασικότερες μεταβλητές της κλιματικής αλλαγής, επηρεάζει την καλή απόδοση υδροηλεκτρικών έργων. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της άμεσης σύνδεσής τους με τον υδρολογικό κύκλο, μια παρατεταμένη ξηρασία ή αντίστροφα η ραγδιότητα κατακρημνισμάτων δύνανται να προκαλέσουν προβλήματα στη μέση παροχή και επομένως και στη διατήρηση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο.

Όπως παρατηρούν οι Lehner et al. (2005) στη μελέτη τους σχετικά με τους ανάλυση των πιθανών επιπτώσεων της παγκόσμιας αλλαγής στο υδροηλεκτρικό δυναμικό της Ευρώπης σε εθνικό επίπεδο, θα πρέπει να αναμένονται σημαντικές μελλοντικές αλλαγές στα καθεστώτα απορροής κάθε χώρας, ανάλογα με τις μεταξύ τους εισροές ή εκροές απορροών, που θα οδηγήσουν ίσως σε διαφοροποιήσεις στο υδροηλεκτρικό δυναμικό της Ευρώπης.

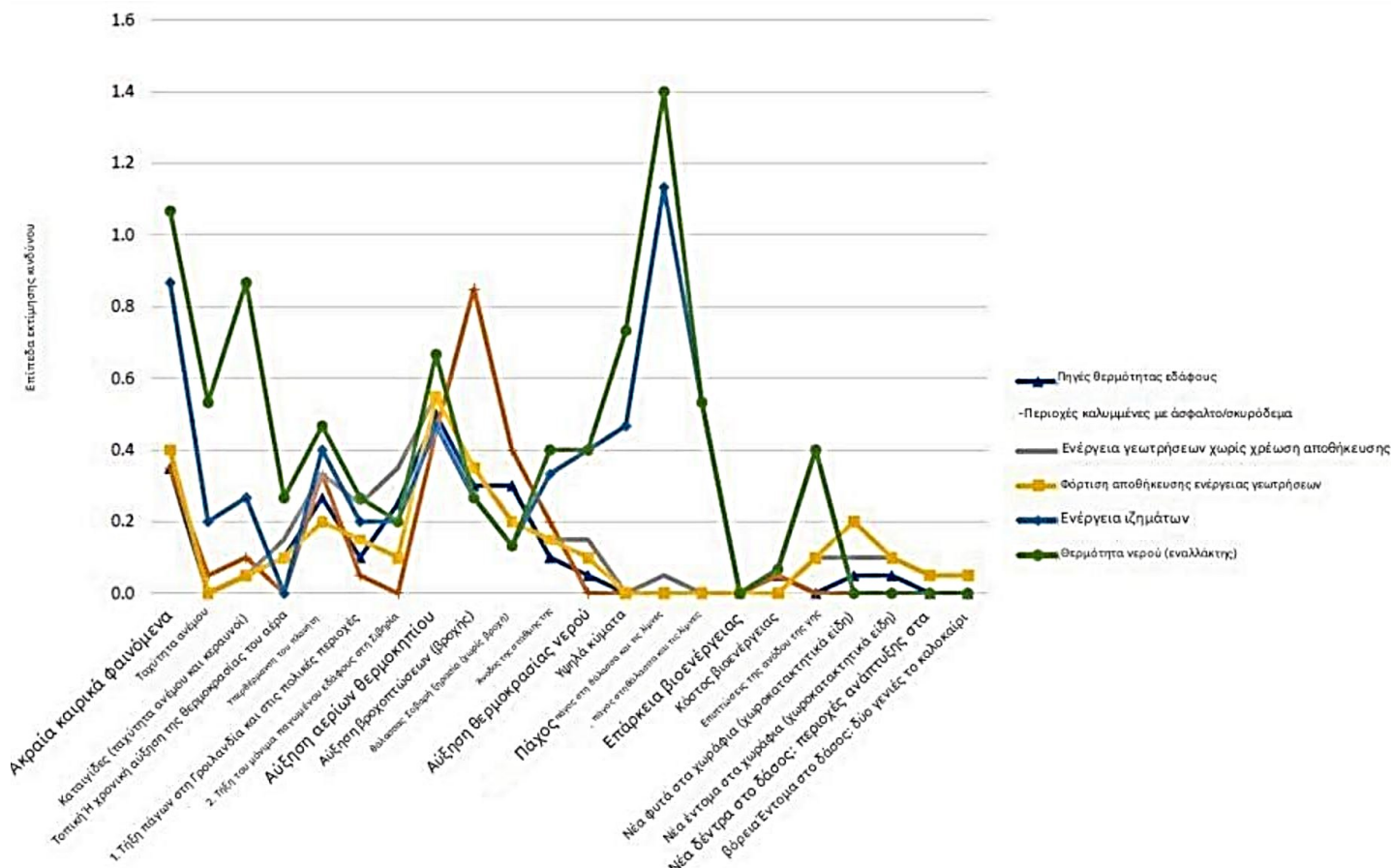
Όπως παρατηρούν οι Gutsch et al. (2015) μελετώντας την ευπάθεια της συνολικής παραγωγής βιομάζας για το διάστημα 2031-2060 σε διάφορες πολιτείες της Αμερικής, οι αρνητικές επιδράσεις στις ενεργειακές καλλιέργειες βιομάζας λόγω της κλιματικής αλλαγής και υπό την πίεση ακραίων κλιματικών φαινομένων προβλέπονται πιο συχνές, κυρίως σε καλλιέργειες καλαμποκιού και άχυρου από εκείνες που προβλέπονται για τα δάση. Και εδώ λοιπόν η ευπάθεια εξαρτάται πρωτίστως από την πρώτη ύλη βιομάζας, γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στα σχέδια δράσης για την παραγωγή βιομάζας για τα επόμενα έτη και με γνώμονα την διατήρηση διαθεσιμότητας αυτής της καθαρής «πράσινης» μορφής ενέργειας, ικανής να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες σε θέρμανση, κίνηση κ.α.

3.3.5 Γεωθερμικά συστήματα

Η γεωθερμική ενέργεια προκύπτει από την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στον φλοιό της γης μέσω γεωτρήσεων. Παρόλο που είναι εξαιρετικά ωφέλιμη ως προς την απόδοση ενέργειας που μπορεί να προσφέρει κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις αναφορικά με υψηλά κόστη και κενά στην τεχνογνωσία λόγω της δυσκολίας συλλογής γεωλογικών δεδομένων. (European Commision, n.d.)

Στον αντίποδα των παραπάνω προκλήσεων βρίσκεται η πολύ καλή ανοχή των συστημάτων γεωθερμικής ενέργειας στους κινδύνους που απορρέουν από την κλιματική αλλαγή και κυρίως των συστημάτων ηλιακών συλλεκτών ασφάλτου (ASC) τεχνολογία που ενσωματώνει σωλήνες στην βάση του ασφαλτοστρωμένου οδοστρώματος για την αξιοποίηση της ανανεώσιμης ηλιακής ενέργειας (Ghalandari et al., 2025, Girgibo et al., 2024).

Οι βασικοί κίνδυνοι ανάλογα με τον τύπο τους εμφανίζονται στο Σχήμα 3-4. Σύμφωνα με τους Girgibo et al. (2024) οι ανταλλάκτες θερμότητας νερού και οι ιζηματογενείς λεκάνες εμφανίζονται περισσότερο ευπαθείς σε κλιματικούς κινδύνους, κυρίως αναφορικά με το πάχος του πάγου των θαλασσών και λιμνών, ραγδαία καιρικά φαινόμενα, καταιγίδες, μεγάλα ύψη κυμάτων αλλά και από την αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου με συνεπαγόμενη την αύξηση της θερμοκρασίας. Η τελευταία επιδρά αρνητικά στα συστήματα ψύξης.



Σχήμα 3-4 Διάγραμμα απεικόνισης του επιπέδου εκτίμησης των κινδύνων που ενέχει η κλιματική αλλαγή για τους διάφορους τύπους γεωθερμικής ενέργειας (Πηγή: Girgibo et al., 2024)

3.4 Μεθοδολογίες Εκτίμησης Κλιματικού Κινδύνου

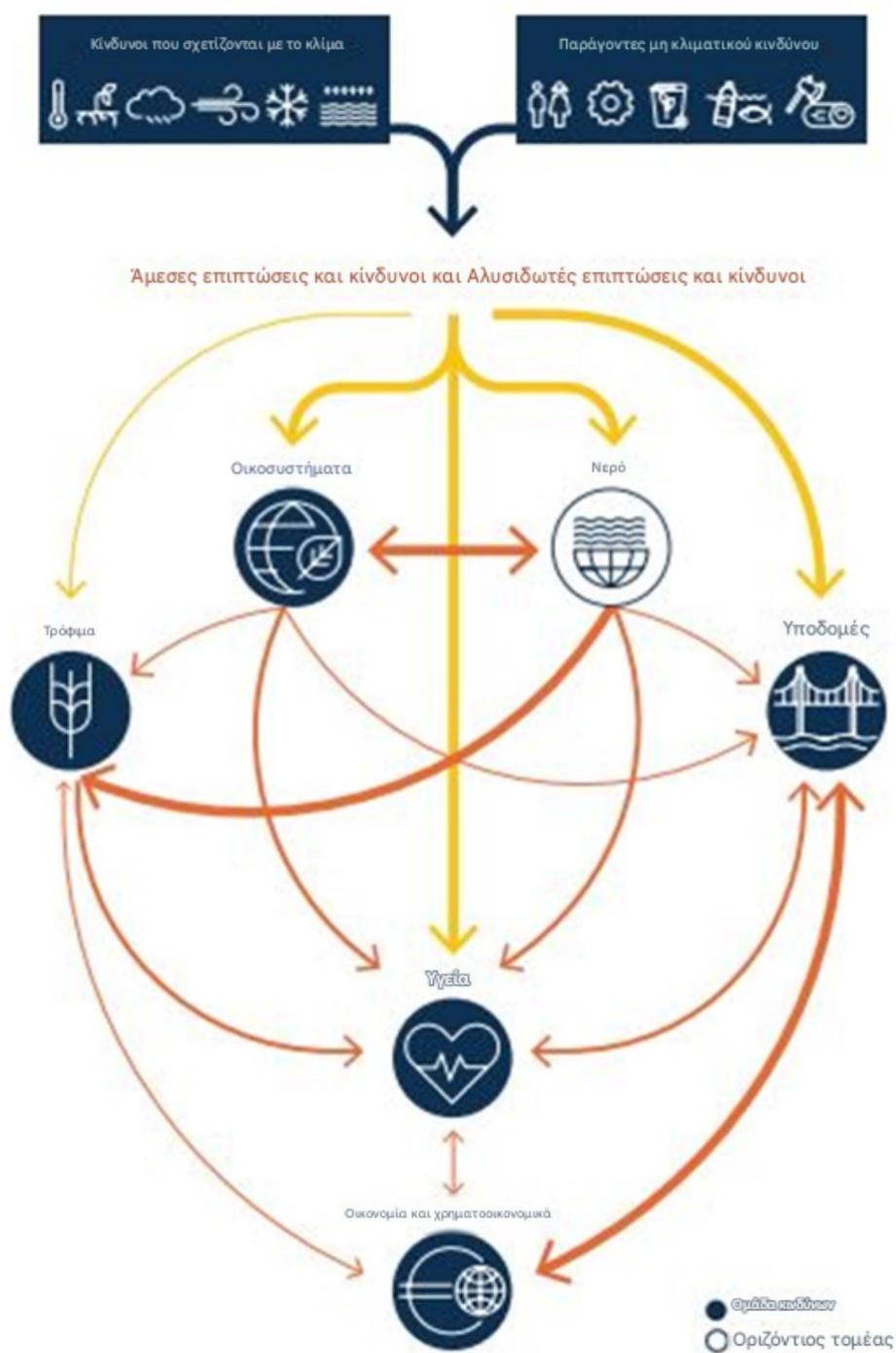
Η Πλαίσια Αξιολόγησης Κλιματικού Κινδύνου για Έργα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ)

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία και την ασφάλεια των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), καθιστώντας την εκτίμηση κλιματικού κινδύνου αναγκαία για τον σχεδιασμό, την αδειοδότηση και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων.

3.4.1 Ευρωπαϊκά Πολιτικά Πλαίσια

Η European Climate Risk Assessment (EUCRA) αποτελεί βασικό και καινοτόμο πανευρωπαϊκό πλαίσιο αξιολόγησης κινδύνου έναντι της κλιματικής αλλαγής στηριζόμενο στην έκτη έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για το Κλίμα (IPCC). Με την χρήση των

πιο τελειοποιημένων και επιστημονικά τεκμηριωμένων μεθοδολογιών, αλλά και ενημερωμένων βάσεων δεδομένων, υψηλής επιστημονικής αξιοπιστίας, προσφέρει όσο πιο αναλυτική και επικαιροποιημένη πληροφορία είναι εφικτό σχετικά με τους κλιματικούς κινδύνους είτε πρόκειται για απλούς, σύνθετους, συστημικούς ή αλυσιδωτούς κινδύνους (EEA & European Commission, 2024). Οι τελευταίοι είναι ίσως και το πιο κρίσιμο σημείο για την οργάνωση πλάνου μετριασμού, καθώς προϋποθέτει την αναγνώριση των αλυσιδωτών αντιδράσεων μεταξύ των διαφορετικών κινδύνων (Σχήμα 3-5).



Σχήμα 3-5 Συνδεσιμότητα μεταξύ των παραγόντων κινδύνου και ομάδων κλιματικών κινδύνων (Πηγή: ΕΕΑ, 2024)

Στόχος είναι η αποτελεσματική αντιμετώπιση των κινδύνων αυτών μέσα από ενδεδειγμένη ανάλυση των συνιστωσών τους και τον ορθό σχεδιασμό εργαλείων και μεθόδων που θα μπορούσαν να συγκλίνουν στον μετριασμό και την προσαρμογή υποδομών και

ανθρωπογενών παραγόντων στην κλιματική αλλαγή όσο γίνεται αρκετά νωρίς πριν οι πρώτες επιπτώσεις κάνουν εμφανή τα αποτυπώματά τους καθιστώντας δυσχερέστερη ή πολλές φορές και αδύνατη την πλήρη αναστροφή της ζημίας.

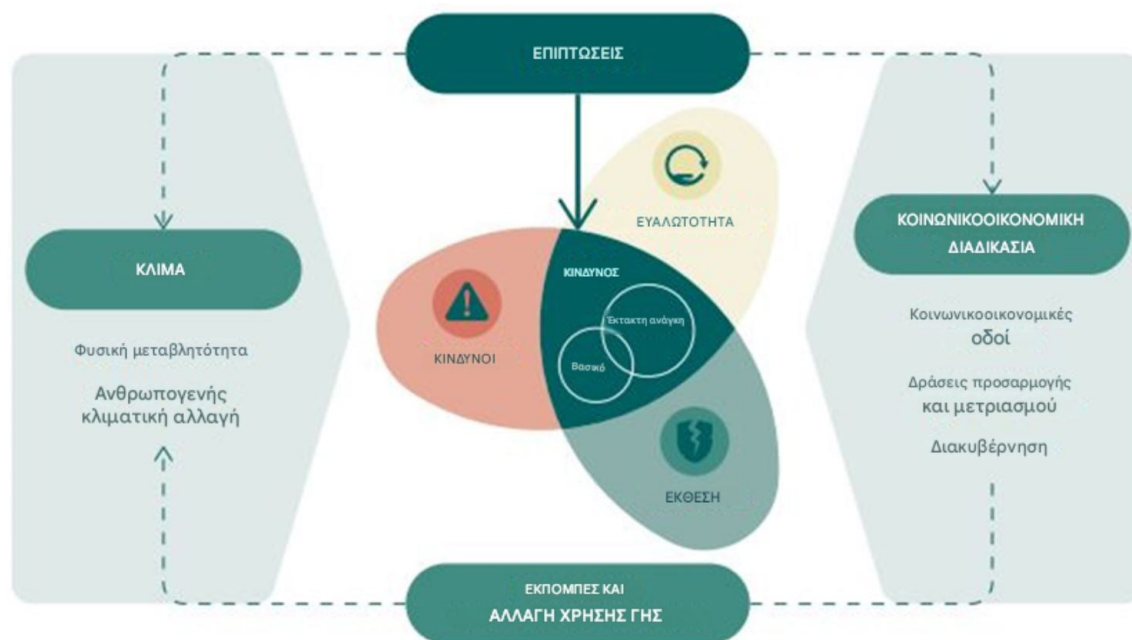
Το EUCRA είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ιεράρχηση κινδύνων και τον στρατηγικό σχεδιασμό υποδομών ΑΠΕ, όπως ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά έργα και ηλιοθερμικά συστήματα (EEA, 2024).

Το CLIMAAX Framework & Toolbox προσφέρει ένα πρακτικό εργαλείο για την εκτίμηση της ευπάθειας και των κινδύνων σε έργα ΑΠΕ, συνδυάζοντας δεδομένα έκθεσης, ευαισθησίας και πιθανοτήτων ακραίων γεγονότων. Παρέχει workflows για την αξιολόγηση κινδύνων σε τοπικό ή περιφερειακό επίπεδο, διευκολύνοντας την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής (Climate ADAPT, 2024).

Ο EU Mission on Adaptation Guide προσφέρει πρακτική καθοδήγηση για τον εντοπισμό κινδύνων, την ποσοτικοποίηση της ευπάθειας και την επιλογή μέτρων προσαρμογής σε έργα ΑΠΕ, ενώ υποστηρίζει την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων στον ενεργειακό σχεδιασμό και τις διαδικασίες αδειοδότησης (EU Mission on Adaptation, 2023).

3.4.2 Διεθνή Πρότυπα & Οδηγίες

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για το Κλίμα (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) παρέχοντας τακτικές επιστημονικές αξιολογήσεις σχετικά με την κλιματική αλλαγή αποτελεί βασικό εργαλείο για όσους σε επιστημονικό ή επαγγελματικό επίπεδο χρειάζεται να κρίνουν και να αποφασίσουν σχετικά με ζητήματα που άπτονται της εφαρμογής υποδομών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη χάραξη πολιτικών επί αυτών και τον ορθό σχεδιασμό στρατηγικής προσαρμογής στους κλιματικούς κινδύνους. Πιο συγκεκριμένα στην Πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της διακυβερνητικής επιτροπής για το κλίμα (IPCC) αναφέρεται: «Οι κίνδυνοι είναι πιθανές εκδηλώσεις ενός φυσικού φαινομένου (π.χ. ακραία καιρικά φαινόμενα), τάσης (π.χ. θέρμανση) ή φυσικής επίδρασης (π.χ. ξηρασία) που μπορεί να επηρεάσουν τη ζωή, την υγεία, την περιουσία, τις υποδομές, τα μέσα διαβίωσης, τις υπηρεσίες, τα οικοσυστήματα και τους περιβαλλοντικούς πόρους. Οι κίνδυνοι δεν μπορούν να επηρεαστούν από την προσαρμογή· εξαρτώνται από την κατάσταση της κλιματικής αλλαγής και ανταποκρίνονται στις διαφορές στα επίπεδα εκπομπών και σε άλλες κλιματικές μεταβλητές» (Σχήμα 3-6).

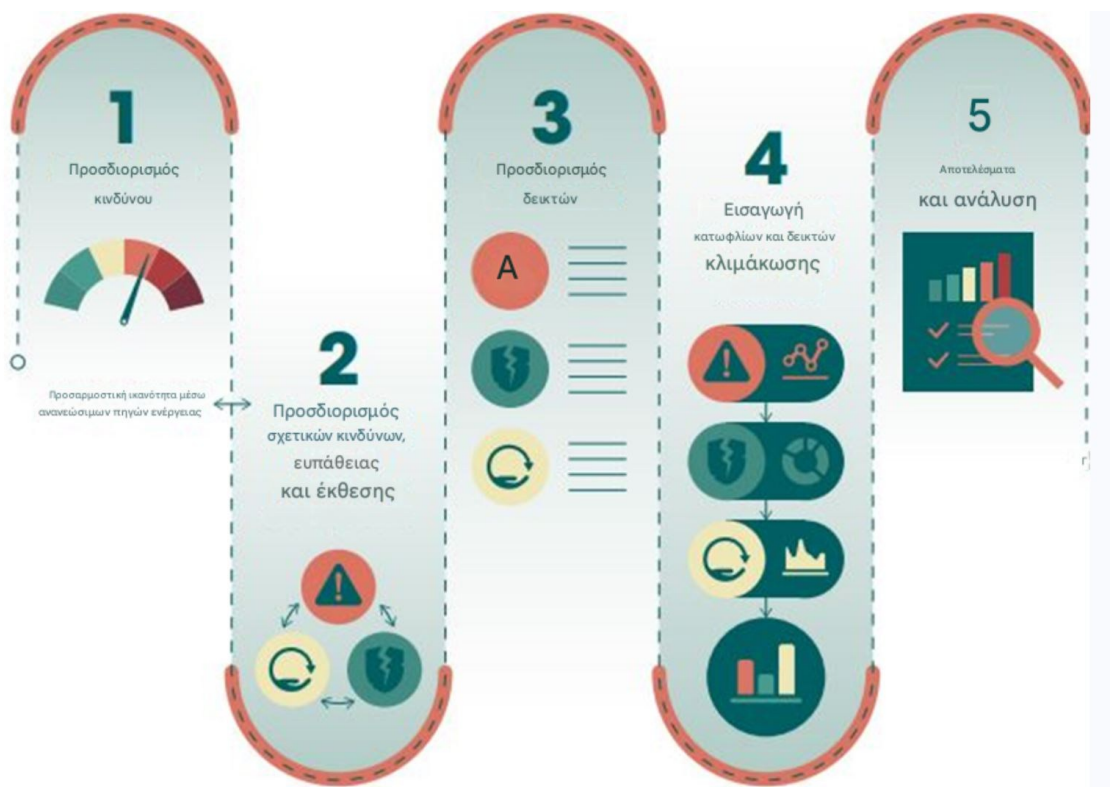


Σχήμα 3-6 Ορισμός του κινδύνου στην Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (Πηγή: IPCC, 2014, όπως αναφέρεται σε IRENA, 2025)

Σε δεύτερο επίπεδο η αναγνώριση του βαθμού έκθεσης μιας υποδομής στους κινδύνους λόγω της τοπογραφίας και της γεωγραφίας της περιοχής είναι επίσης αλλά και η ευπάθεια της δηλαδή πόσο ευάλωτη είναι στους κλιματικούς κινδύνους, ώστε μέσα από τη συσχέτιση του πρώτου και δεύτερου επιπέδου ανάλυσης, να προκριθούν κατάλληλοι δείκτες για την ενδυνάμωση της υποδομής και τη θωράκισή της ώστε να αμβλυνθεί η έκθεση και η ευπάθεια της, όπως ορίστηκαν παραπάνω και να καθιερωθούν συγκεκριμένα κριτήρια χωροθέτησης και ανθεκτικότητας του έργου/υποδομής.

Σε διεθνές επίπεδο επίσης ο Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA) είναι ένας διακυβερνητικός οργανισμός (πλατφόρμα) λειτουργεί ως υποστηρικτικό εργαλείο για την βιωσιμότητα και την εύρυθμη λειτουργία όλων των ενεργειακών συστημάτων και την καθοδήγηση των χωρών για την όσο το δυνατόν ασφαλέστερη και ευρύτερη ενσωμάτωση όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αυτά παρέχοντας πρακτικό πλαίσιο αξιολόγησης κινδύνων με συγκεκριμένες εφαρμογές για την καλύτερη κατανόηση και αποτελεσματικότερη διάχυση γνώσης. Για την ανάλυση κινδύνων και τρωτότητας των υποδομών ΑΠΕ προτείνεται η δομή της αλυσίδας επιπτώσεων (Impact chain method) όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στην Πέμπτη έκθεση Αξιολόγησης

(Σχήμα 3-7), συμβάλλοντας στην εξεύρεση των ορθών πρακτικών για την επίτευξη της ανθεκτικότητάς τους στην κλιματική αλλαγή.



Σχήμα 3-7 Η δομή της αλυσίδας επιπτώσεων (Πηγή: (GIZ et al., 2014, όπως αναφέρεται σε IRENA, 2025)

Τα ISO 31000 και ISO 14091 παρέχουν διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα για την αξιολόγηση κινδύνου και την προσαρμογή σε κλιματικές αλλαγές. Το ISO 31000 επικεντρώνεται στη δομημένη διαχείριση κινδύνου και την αξιολόγηση πιθανών απωλειών, ενώ το ISO 14091 προσαρμόζει τα πλαίσια αυτά για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθιστώντας τα ιδανικά για έργα ΑΠΕ (ISO, 2018; ISO, 2023).

3.4.3 Πλαίσιο Αξιολόγησης στην Ελλάδα

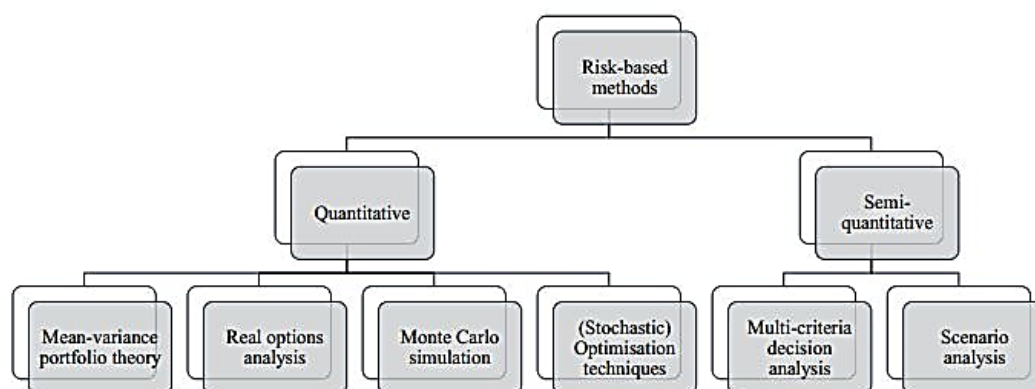
Κατόπιν της συνεργασίας της Εθνικής Αρχής Συντονισμού, του Υπουργείου Ανάπτυξης και Επενδύσεων με την ομάδα Jaspers (Joint Assistance to Support projects in European Regions), και με την υποστήριξη των Υπουργείων Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΠΕΝ) και Υποδομών –Μεταφορών (ΥΠΥΜΕ) εφαρμόζεται σήμερα στην χώρα μας συγκεκριμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της κλιματικής ανθεκτικότητας των έργων υποδομής, με αναμενόμενη διάρκεια ζωής τουλάχιστον 5 ετών (παράγραφο 2.1 του άρθρου 73 του

Κανονισμού (ΕΕ) 2021/1060), που υποβάλλονται για χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ 2021-2027 βασισμένη κυρίως στο κείμενο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με τίτλο «Τεχνικές κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών στην κλιματική αλλαγή για την περίοδο 2021-2027» (2021/C 373/01)», αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση του Προσωρινού Πλαισίου αξιολόγησης της Κλιματικής Ανθεκτικότητας.

3.4.4 Ερευνητικά & Επιστημονικά Πλαίσια

Οι ποσοτικές μέθοδοι που προσδιορίζονται στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν την προσομοίωση Monte Carlo (MCS), την ανάλυση ευαισθησίας (SA) σε συνδυασμό με την τεχνοοικονομική (TE)/ανάλυση ταμειακών ροών και τη μοντελοποίηση βάσει παραγόντων (ABM) (Abba, Z. Y. I. et al., 2022).

Πιο συγκεκριμένα οι διάφορες μέθοδοι εκτίμησης κινδύνων σε έργα ΑΠΕ αναλύονται παρακάτω (Σχήμα 3-8).



Σχήμα 3-8 Ταξινόμηση των μεθοδολογικών προσεγγίσεων που βασίζονται στον κίνδυνο και εφαρμόζονται στον τομέα του βιώσιμου ενεργειακού σχεδιασμού (Πηγή: Ioannou et al., 2017)

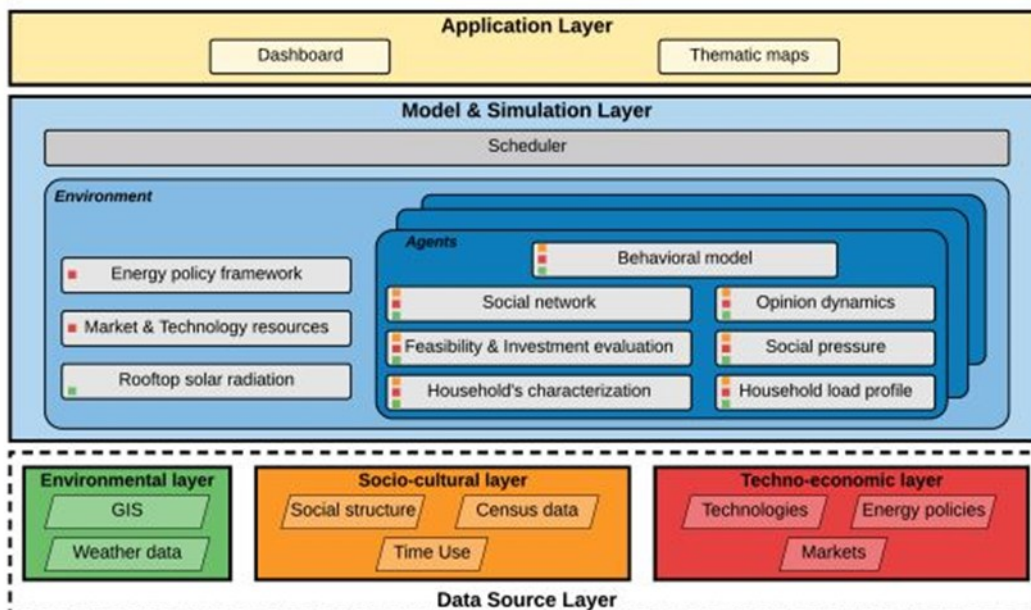
Στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί η διαδοχική μέθοδος Monte Carlo (n-sMC) για την αξιολόγηση του κινδύνου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε ακραίους τυφώνες, η οποία παρουσιάζεται περισσότερη αποτελεσματική από τη κλασσική μέθοδο Monte Carlo (s-MC) (Zhou & He, 2023, όπως αναφέρεται σε Sánchez-Pozo et al., 2025).

Σε διάφορες μελέτες έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές μέθοδοι για την εκτίμηση κλιματικών κινδύνων σε εγκαταστάσεις αιολικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων (Πίνακας 3-1).

Πίνακας 3-1 Πρόσφατες εργασίες σχετικά με την ενεργειακή μετεωρολογία και τον δείκτη κινδύνου.
(Πηγή: Sánchez-Pozo et al., 2025)

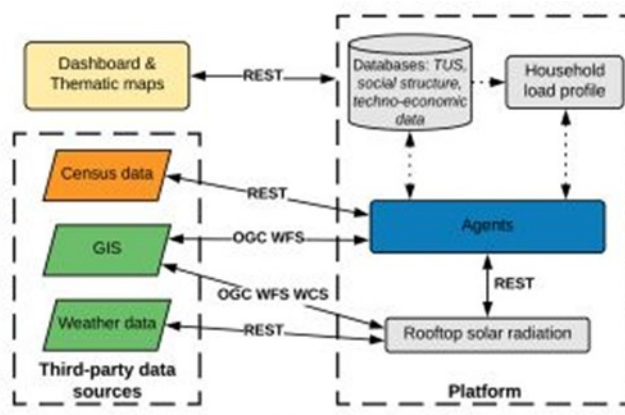
AYTHORS	EXTREMES	METHODS
B. H.C. et al (2023)	WIND	COPULAS
Vanem (2023)	WIND, WAVE	EVT
Wei et al (2023)	WIND	SVM
Perera et al (2020)	PV	SRO
Khuntia et al. (2019)	WIND	COPULAS
Sakki et al. (2022)	WIND	COPULAS
Chen et al. (2019)	Wind, PV	GMMs
Sánchez-Pozo et al., 2025	Wind, PV	COPULAS

Στη μελέτη τους οι Schiera et al (2019) χρησιμοποιούν πλαίσιο μοντελοποίησης βάσει παραγόντων (ABM) για την αναγνώριση των κρίσιμων παραγόντων που επιδρούν στη διάδοση της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών στέγης σε μια αστική περιοχή με πολλές πολυκατοικίες. Με την χρήση γεωαναφερμένων ετερογενών δεδομένων είναι δυνατή η συμπερίληψη πολλών δυνητικών παραγόντων/κινδύνων που επιδρούν στην απόφαση/επιλογή επένδυσης σε τέτοια φωτοβολταϊκά. (Σχήμα 3-9).



Σχήμα 3-9 Προτεινόμενη πλατφόρμα μοντελοποίησης και συν-προσομοίωσης που βασίζεται σε πράκτορες. Οι ενότητες αξιοποιούν δεδομένα από το Επίπεδο Πηγής Δεδομένων. Τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικά λειτουργικά επίπεδα που επισημαίνονται με διαφορετικά χρώματα.. (Πηγή: Schiera et al. 2019)

Η πλατφόρμα ενός τέτοιου μεθοδολογικού πλαισίου περιλαμβάνει πηγές δεδομένων κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών (ABM) συνδυαστικά με GIS τεχνολογία που καθιστά εφικτή την εισαγωγή και επεξεργασία λεπτομερών χωροχρονικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης σε επίπεδο κτηρίου (Σχήμα 3-10).



Σχήμα 3-10 Σχήμα ροής δεδομένων της πλατφόρμας συν-προσομοίωσης (Πηγή: Schiera et al. 2019)

Μεθοδολογίες όπως probabilistic risk assessment και holistic risk management frameworks έχουν αναπτυχθεί για την ποσοτικοποίηση και ιεράρχηση κινδύνων σε υποδομές ΑΠΕ. Τέτοιες μελέτες ενσωματώνουν:

- Πιθανοκρατικά μοντέλα (Monte Carlo, Bayesian networks) για αιολικά και ηλιακά έργα.
- Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) για επιλογή στρατηγικών προσαρμογής σε βιομάζα και CSP.
- GIS-based vulnerability mapping για την ανάλυση γεωχωρικής έκθεσης και ευπάθειας.

Οι εν λόγω μεθοδολογίες επιτρέπουν τη συνδυαστική ανάλυση τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας και μεταβλητότητας κλίματος.

3.5 Εντοπισμός ερευνητικών κενών

Οι κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι ενεργειακές υποδομές είναι εν πολλοίς κοινοί, αλλά ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, το μέγεθος του αντικτύπου και η αποτελεσματικότητα της αντιμετώπισης, ποικίλλουν.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μελέτες που επικεντρώνονται σε συγκεκριμένους κινδύνους περισσότερο στην άνοδο της θερμοκρασίας και την ταχύτητα του ανέμου και λιγότερο στον συνδυασμό πολλών παραμέτρων ταυτόχρονα. Είναι δύσκολο να συγκεραστούν τα δεδομένα ανά τον κόσμο, καθώς τα κλιματικά μοντέλα που εφαρμόζονται δεν είναι κοινά. Σε άλλες μελέτες ακολουθούνται οι προδιαγραφές των SPP (Shared Socioeconomic Pathways) μοντέλων τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις κοινωνικοοικονομικές διαστάσεις της κλιματικής αλλαγής ως το 2100, και σε άλλες τα στοιχεία βασίζονται σε RCP (Representative Concentration Pathways) σενάρια δηλαδή που κατά βάση προβλέπουν τις εκπομπές CO₂ ως το 2100.

Επίσης στη βιβλιογραφία φαίνεται να απουσιάζει η σύνδεση του επακριβώς τεκμηριωμένου, ποσοτικοποιημένου ρίσκου με το κατάλληλο μέτρο προσαρμογής, ώστε να αμβλυνθεί τελικά ο κίνδυνος για την εκάστοτε ενεργειακή υποδομή.

Ακριβώς αυτή η τελευταία πολύ σημαντική ένδεια στη συνάφεια μεταξύ του κλιματικού κινδύνου που ελλοχεύει για τη βιωσιμότητα του έργου κατά την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία του και του κατάλληλου για απομείωση της απειλής διαχειριστικού μέτρου, αποτέλεσε τη θρυαλλίδα για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Υπό το καθεστώς λοιπόν ενός όγκου συγκεχυμένων δεδομένων αναφορικά με πλαίσια και μετρικές για την εκτίμηση της κλιματικής τρωτότητας έργων ΑΠΕ, διάσπαρτων και συχνά ατεκμηρίωτων, τα οποία δεν καταλήγουν σε παραμετροποιημένα συμπεράσματα, αλλά σε μια γενική πρόταση μέτρων χωρίς την απαραίτητη εξειδίκευσή τους με ποσοτικά κριτήρια για κάθε μια απειλή, η πρόταση της εφαρμογής ενός συμπαγούς και αναλυτικού πλαισίου και η τελική εκτίμηση κλιματικής τρωτότητας έργου ΑΠΕ μέσα από έναν αλγόριθμο βημάτων με τελική εκροή ένα σύνολο από συγκεκριμένα και στοχευμένα διαχειριστικά μέτρα προσαρμογής για την απομείωση του αποτιμημένου κλιματικού κινδύνου, φιλοδοξεί να καλύψει το βιβλιογραφικό κενό όπως προαναφέρθηκε.

4 ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

4.1 Νόμος για την Αδειοδότηση Έργων

Η πραγματοποίηση ενός ενεργειακού έργου διέπεται από τις διατάξεις του ν.4014/2011³ (ΦΕΚ 209/21.09.2011), όπως και τα υπόλοιπα δημόσια ή ιδιωτικά έργα. Σύμφωνα με τον νόμο αυτόν η κατασκευή ή λειτουργία των έργων που δύναται να έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον, κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες (Α και Β) ανάλογα με τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο, όπως αυτός ελέγχεται και αξιολογείται από τις αρμόδιες Αδειοδοτούσες Αρχές, καθώς και σε κοινές ομάδες μεταξύ των κατηγοριών.

³ «Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος».

Στην περίπτωση που οι επιπτώσεις του εκάστοτε έργου στο περιβάλλον είναι σημαντικές το έργο κατατάσσεται στην κατηγορία Α, ενώ όταν θεωρούνται τοπικής, και μικρότερης εμβέλειας, άρα μη απειλητικές για την περιβαλλοντική ασφάλεια, τότε το έργο κατατάσσεται στην κατηγορία Β (Νόμος [Ν.] 4014/2011).

Ειδικότερα τα έργα ΑΠΕ κατατάσσονται στην 10η Ομάδα έργων «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Μεμονωμένοι Σταθμοί Αποθήκευσης Ενέργειας», σύμφωνα με το άρθρο 4 της Υπουργικής Απόφασης ΔΙΠΑ/οικ.37674/2016 (ΦΕΚ 841/Β'/2022)⁴. Σε κάθε περίπτωση για την πραγματοποίηση νέων έργων ή δραστηριοτήτων κατηγορίας Α ή τη μετεγκατάσταση ήδη υφισταμένων απαιτείται διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης με τη διεξαγωγή ΜΠΕ και έκδοση Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ), ενώ ο φορέας του έργου δύναται να ζητά τη γνωμοδότηση από αρμόδιες Διευθύνσεις ανάλογα με τη χωροθέτηση του έργου (πχ ΟΦΥΠΕΚΑ για την περίπτωση χωροθέτησης του έργου σε Προστατευόμενη Περιοχή Natura2000).

4.2 Κλιματικός Νόμος

4.2.1 Ευρώπη

Η Ευρώπη έχει θεσπίσει τα τελευταία χρόνια πολλές οδηγίες σχετικά με το κλίμα και την ενεργειακή πράσινη μετάβαση, μερικές από τις οποίες παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-1).

Πίνακας 4-1 Σημαντικές Οδηγίες ΕΕ για το κλίμα

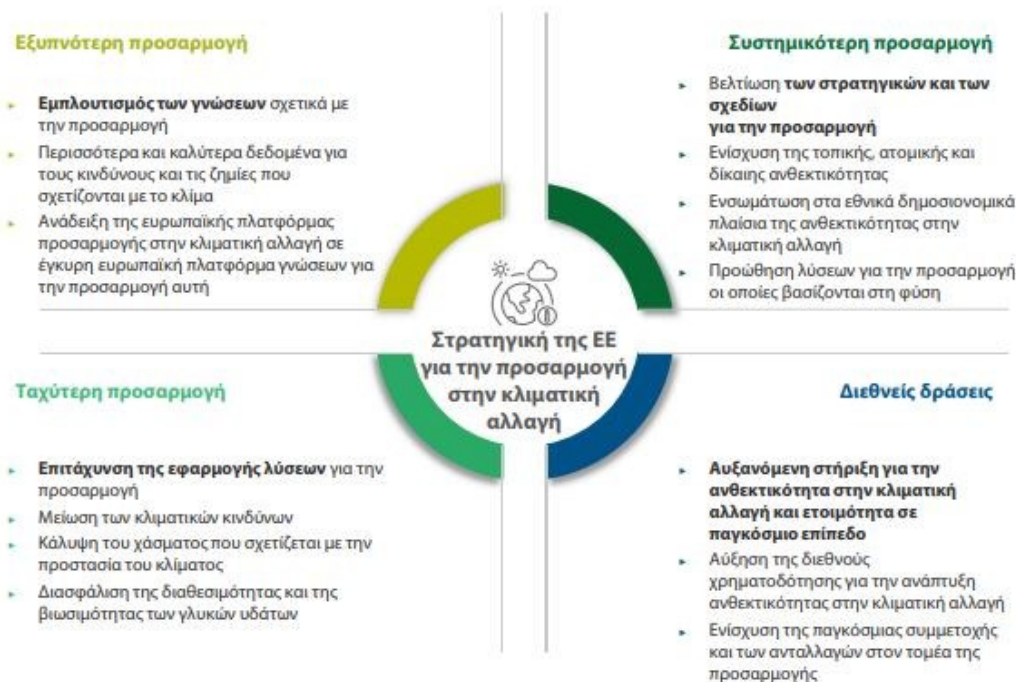
A/A	Τύπος πράξης	Αριθμός	Έτος	Τίτλος	Θεματική
1	Οδηγία	(ΕΕ) 2015/2193	2015	Περιορισμός των εκπομπών ορισμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα	Ατμοσφαιρική ρύπανση / Βιομηχανικές εκπομπές

⁴ Τροποποίηση και κωδικοποίηση της υπό στοιχεία ΔΙΠΑ/οικ.37674/27-7-2016 υπουργικής απόφασης «Τροποποίηση και κωδικοποίηση της υπουργικής απόφασης 1958/2012-Κατάταξη δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με την παρ. 4 του άρθρου 1 του ν. 4014/21.9.2011 (Α' 209), όπως αυτή έχει τροποποιηθεί και ισχύει» (Β' 2471).

				από μεσαίου μεγέθους μονάδες καύσης	
2	Οδηγία	(ΕΕ) 2018/2001	2018	Προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
3	Κανονισμός	(ΕΕ) 2018/841	2018	Συμπερίληψη εκπομπών και απορροφήσεων από χρήση γης, αλλαγή χρήσης γης και δασοπονία στο πλαίσιο για το κλίμα και την ενέργεια έως το 2030	Κλίμα
4	Κανονισμός	(ΕΕ) 2018/842	2018	Δεσμευτικές ετήσιες μειώσεις εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τα κράτη μέλη (2021–2030)	Κατανομή προσπαθειών / Κλίμα
5	Κανονισμός	(ΕΕ) 2021/783	2021	Θέσπιση Προγράμματος για το Περιβάλλον και τη Δράση για το Κλίμα (LIFE)	Περιβάλλον / Χρηματοδότηση
6	Κανονισμός	(ΕΕ) 2023/955	2023	Σύσταση Κοινωνικού Ταμείου για το Κλίμα και τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2021/1060	Κοινωνική πολιτική / Κλιματική μετάβαση

Το επιστέγασμα των προσπαθειών αυτών με, βασικό αφήγημα πλέον την θωράκιση της ΕΕ απέναντι στους κινδύνους της Κλιματικής αλλαγής και τη σφυρηλάτηση μιας ουσιαστικής προσαρμογής, είναι η νέα Στρατηγική που εγκρίθηκε στις 24 Φεβρουαρίου 2021 και η οποία συναρθρώνεται σε 4 βασικούς πυλώνες (Σχήμα 4-1), όπως και μετέπειτα το νέο Ευρωπαϊκό

νομοθέτημα για το Κλίμα⁵ με το οποίο η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενισχύει τη δέσμευση των ευρωπαϊκών κρατών για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και την κλιματική ανθεκτικότητα.



Σχήμα 4-1 Στρατηγική προσαρμογής της ΕΕ, 2021 (Πηγή: European Court of Auditors, 2024)

Ειδικότερα για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή στο Ευρωπαϊκό Νομοθέτημα ορίζονται τα εξής σύμφωνα με το κείμενο του κανονισμού (European Parliament and Council, 2021):

- Τα θεσμικά όργανα και τα κράτη μέλη της ΕΕ πρέπει:
 - ❖ να βελτιώσουν την προσαρμοστική τους ικανότητα, να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα και να μειώσουν την ευπάθεια στην κλιματική αλλαγή·
 - ❖ να διασφαλίσουν οι πολιτικές για την προσαρμογή είναι συνεκτικές, αλληλοϋποστηρίζονται, παρέχουν παράλληλα οφέλη για τις τομεακές πολιτικές,

⁵ Κανονισμός (ΕΕ) 2021/1119 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ής Ιουνίου 2021 για τη θέσπιση πλαισίου με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και για την τροποποίηση των κανονισμών (ΕΚ) αριθ. 401/2009 και (ΕΕ) 2018/1999 («ευρωπαϊκό νομοθέτημα για το κλίμα»)

- συμβάλλουν στην καλύτερη ενσωμάτωση των εν λόγω μέτρων σε όλους τους τομείς πολιτικής και επικεντρώνονται ειδικά στους πιο ευάλωτους ανθρώπους και τομείς.
- Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρέπει να εκδώσει:
 - ❖ μια στρατηγική για την προσαρμογή της ΕΕ·
 - ❖ κατευθυντήριες γραμμές, μέχρι τις 30 Ιουλίου 2022, που καθορίζουν κοινές αρχές και πρακτικές για τον εντοπισμό, την ταξινόμηση και την προληπτική διαχείριση των σημαντικών φυσικών κλιματικών κινδύνων κατά τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη, την εκτέλεση και την παρακολούθηση έργων και προγραμμάτων για έργα.
 - Τα κράτη μέλη πρέπει να εκδώσουν και να εφαρμόσουν εθνικές στρατηγικές και σχέδια προσαρμογής, λαμβάνοντας υπόψη ιδιαίτερα ευπαθείς τομείς όπως η γεωργία, τα συστήματα υδάτων και τροφίμων και την επισιτιστική ασφάλεια, παράλληλα με την ανάγκη προώθησης λύσεων με βάση τη φύση και τα οικοσυστήματα.

4.2.2 Ελλάδα

Η Ελλάδα προχώρησε το 2022 στη θέσπιση του νέου κλιματικού νόμου ν.4936/2022 (ΦΕΚ/Α'105)⁶, ενσωματώνοντας ουσιαστικά τα οριζόμενα στη συμφωνία του Παρισιού για την επίτευξη των άμεσων στόχων της, δηλαδή τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, βαδίζοντας έτσι προσανατολισμένη προς την κλιματική ουδετερότητα με έτος στόχο το 2050 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, χ.η.), νομοθετώντας για τις υποχρεώσεις των εταιρειών με γνώμονα την κλιματική ουδετερότητα της χώρας. Πιο συγκεκριμένα με το άρθρο 18 του νέου κλιματικού νόμου επιδιώκεται η ενδυνάμωση της περιβαλλοντικής διάστασης κατά την αδειοδότηση των δημόσιων και ιδιωτικών έργων με την αξιολόγηση και αναφορά πλέον στις Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου αλλά και της προσθήκης σε αυτή έκθεσης κλιματικής ανθεκτικότητας των έργων έναντι των απειλών, όπως αυτές διαμορφώνονται λόγω της αλλαγής του κλίματος. Ο νόμος εισάγει επίσης

⁶ Άρθρο 18. Ενδυνάμωση της διάστασης της κλιματικής αλλαγής στην περιβαλλοντική αδειοδότηση - Τροποποίηση Παραρτήματος II του ν. 4014/2011

συγκεκριμένες απαγορεύσεις, περιορισμούς και σαφείς υποχρεώσεις των φορέων των έργων προκειμένου η εγκατάσταση και λειτουργία τους να συγκλίνει με τους στόχους κλιματικής ουδετερότητας της Ευρωπαϊκής Συμφωνίας.

5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, μετά από σχετική έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες ή και μοντέλα για την εκτίμηση

της κλιματικής ανθεκτικότητας υποδομών προκειμένου για τον σχεδιασμό, την αδειοδότηση και την αποδοτικότερη και περιβαλλοντικά ορθότερη λειτουργία τους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η πρώτη Ευρωπαϊκή Εκτίμηση Κλιματικού Κινδύνου (EUCRA), που δημοσιεύτηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (EEA) το 2024, εντοπίζει 36 καίριους κλιματικούς κινδύνους που απειλούν την ενέργεια, τα τρόφιμα, τις υποδομές, την υγεία και τη χρηματοπιστωτική σταθερότητα της Ευρώπης (EEA, 2024). Ιδιαίτερα σημαντικό έργο προς την κατεύθυνση της εκτίμησης τρωτότητας έργων και υποδομών παράγει και το εργαλείο CLIMAAX Framework & Toolbox, με τον συγκερασμό και την οργάνωση και διάθεση ποικίλων δεδομένων αναφορικά με τους κινδύνους με αποτέλεσμα την αναβάθμιση των υπολοίπων εργαλείων και υπηρεσιών και την ανάπτυξη της προσβασιμότητας, της καθοδήγησης, της προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες, της ερμηνείας και της υιοθέτησής τους από τις αρμόδιες αρχές διαχείρισης κινδύνων καταστροφών και πολιτικής προστασίας. (CLIMAAX, n.d.)

5.1 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται προσπάθεια να αξιολογηθεί η κλιματική ανθεκτικότητα ενός φωτοβολταϊκού έργου ως μελέτη περίπτωσης, μέσα από την εφαρμογή του Προσωρινού Πλαισίου αξιολόγησης της Κλιματικής Ανθεκτικότητας. Το πλαίσιο αυτό αφορά σε έργα υποδομής, με αναμενόμενη διάρκεια ζωής τουλάχιστον 5 ετών (παράγραφο 2.1 του άρθρου 73 του Κανονισμού (ΕΕ) 2021/1060), που υποβάλλονται για χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ 2021-2027 ως σύνοψη του κειμένου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με τίτλο «Τεχνικές κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών στην κλιματική αλλαγή για την περίοδο 2021-2027» (Adaptive Greece Hub, 2022).

Επιλέγεται φωτοβολταϊκό έργο εντός Προστατευόμενης Περιοχής του Δικτύου Natura2000 μέσα από περιήγηση στον γεωπληροφορικό χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Αποβλήτων και Ενέργειας (ΡΑΕΥ) (<https://geo.rae.gr/>) όπου γίνεται ο ακριβής γεωγραφικός εντοπισμός του έργου και βασικά τεχνικά στοιχεία του.

Παράλληλα κατόπιν έρευνας στο Ηλεκτρονικό Περιβαλλοντικό Μητρώο (ΗΠΜ) και βάσει της Περιβαλλοντικής Ταυτότητας του έργου συλλέγονται όλα τα απαραίτητα τεχνικά στοιχεία για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους και της τεχνικής του αρτιότητας.

5.2 Βασική Μεθοδολογική Διαδικασία

Κατόπιν της συλλογής των απαραίτητων στοιχείων του έργου ως προς τη βασική του τεχνολογία και την τοπογραφία του, είναι πλέον γνωστό το είδος του έργου και η θέση του και με βασικό εγχειρίδιο εργασίας το Προσωρινό Πλαίσιο αξιολόγησης της Κλιματικής Ανθεκτικότητας (Adaptive Greece Hub, 2022) ακολουθεί ανάλυση της ευαισθησίας και της έκθεσης του έργου σε κλιματικούς κινδύνους και απειλές όπως αναλύεται παρακάτω.

Αναφορικά με το είδος και την τεχνολογία του έργου, ακολουθεί ανάλυση της ευαισθησίας του βάσει δυνητικών κλιματικών κινδύνων. Πιο αναλυτικά μέσα από τα μεθοδολογικά κείμενα και τις οδηγίες που διατίθενται στον Εθνικό Κόμβο Για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή, γίνεται χρήση του αρχείου excel για τον υπολογισμό της κλιματικής ανθεκτικότητας για τη συμπλήρωση του οποίου επιλέγονται οι κλιματικές παράμετροι που μπορεί να επηρεάσουν την κατασκευή και τη λειτουργία του έργου ανάλογα με την ευαισθησία του σε αυτές. Ειδικότερα για το συγκεκριμένο έργο, ήτοι φωτοβολταϊκό πάρκο, επιλέγονται ως κίνδυνοι στους οποίους ενδέχεται να είναι τρωτό ή ευαίσθητο το έργο, οι παράμετροι όπως: Θερμοκρασία, ξηρασία, άνεμος, καύσωνας, παγετός, βροχοπτώσεις/χιονοπτώσεις/χαλάζι, άνοδος στάθμης της θάλασσας, πλημμύρες, πυρκαγιές κ.α. οι οποίοι είναι διαχωρισμένοι χρόνιους και οξείς κινδύνους στο σχετικό αρχείο excel. Αφού γίνει η βασική επιλογή των κλιματικών απειλών, βαθμολογείται η ευαισθησία του έργου σε αυτές με τον χαρακτηρισμό «χαμηλή», «μέτρια» ή «υψηλή».

Στο ίδιο αρχείο και με κριτήριο τη θέση του έργου, γίνεται ανάλυση της έκθεσης του έργου για τις ίδιες επιλεχθείσες, όπως περιγράφηκε παραπάνω, κλιματικές απειλές. Στο στάδιο αυτό η συμπλήρωση του αρχείου excel και η παραμετροποίηση του μεγέθους της απειλής είναι φανερά πιο σύνθετες, καθώς είναι απαραίτητος ο συγκερασμός δεδομένων από διαφορετικές πηγές και η επακόλουθη ανάλυσή τους με κριτική και συνδυαστική ματιά.

Για την περίπτωση του φωτοβολταϊκού πάρκου η οποία μελετάται στην παρούσα εργασία, και με γνωστή τη γεωγραφική θέση του έργου και επομένως και την οικεία περιφέρεια και δημοτική ενότητα, γίνεται έρευνα σε τυχόν διαχειριστικά σχέδια της περιοχής καθώς και στο εργαλείο απεικόνισης γεωγραφικών δεδομένων όπου μέσω χαρτών αποτυπώνονται οι προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή σύμφωνα με τις κλιματικές παραμέτρους ενδιαφέροντος.

Αρχικά συλλέγονται στοιχεία ως προς την ιστορικότητα του κλίματος από το Περιφερειακό Σχέδιο Για Την Προσαρμογή Στην Κλιματική Αλλαγή (ΠΕΣΠΚΑ) της Στερεάς Ελλάδας καθώς και δεδομένα από σταθμούς, αν τυχόν αναφέρονται σε αυτό.

Επιπλέον ερευνάται η επικινδυνότητα πλημμυρών στην ευρύτερη περιοχή χωροθέτησης του έργου μέσα από το «ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ (ΣΔΚΠ) των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07) και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), όπως προκύπτει από την ακριβή τοποθεσία του έργου.

Σε τελικό στάδιο, υλοποιείται διεξοδική μελέτη των χαρτών γεωχωρικών δεδομένων με τις προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή, για κάθε κλιματική παράμετρο ενδιαφέροντος και για 2 μελλοντικές περιόδους 2031-2060 (εγγύς μέλλον) και 2071-2100 (απώτερο μέλλον) με περίοδο αναφοράς την περίοδο 1971-2000 (παρόν κλίμα).

Μέσα από τον συνδυασμό όλων των παραπάνω δεδομένων γίνεται και η παραμετροποίηση/συμπλήρωση του αρχείου excel για την ανάλυση της έκθεσης του έργου σε χρόνιους και οξείς κινδύνους όπως επιλέχθηκαν και κατά την ανάλυση της ευαισθησίας του και βαθμολογείται η έκθεση του έργου σε αυτές με τον χαρακτηρισμό «χαμηλή», «μέτρια» ή «υψηλή».

Μετά την ολοκλήρωση της συμπλήρωσης των πεδίων της ευαισθησίας και της έκθεσης του έργου, προκύπτει αυτόματα η παραμετροποίηση του αρχείου excel αναφορικά με την τρωτότητα του έργου. Από την ανάλυση τρωτότητας και για τις κλιματικές απειλές για τις οποίες το έργο εμφανίζει μέτρια έως και υψηλή τρωτότητα ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση λεπτομερής ανάλυση διακινδύνευσης (risk assessment) για καθεμία από αυτές, προκειμένου να υπολογιστεί ο εγγενής κίνδυνος και, εφόσον απαιτείται, να ληφθούν πρόσθετα μέτρα έτσι ώστε να μειωθεί ο υπολειπόμενος κίνδυνος (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022).

Κατά τη διενέργεια της ανάλυσης διακινδύνευσης και για τιμές μέτριας και υψηλής τρωτότητας του έργου σε συγκεκριμένους κινδύνους, συμπληρώνεται στο σχετικό αρχείο excel για αυτούς και μόνον, η πιθανότητα εμφάνισής τους και προσδιορίζεται αυτόματα ο βαθμός της αναμενόμενης επιβάρυνσης στο έργο. Προκύπτει λοιπόν συστηματικά ο εγγενής

κίνδυνος που διέπει το έργο έναντι δεδομένων κλιματικών απειλών, βαθμονομημένος με την κλίμακα: χαμηλός, μέτριος, σημαντικός, πολύ σημαντικός.

5.3 Αποτίμηση μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία της εκτίμησης της κλιματικής τρωτότητας ενός έργου και συγκεκριμένα ενός έργου ΑΠΕ για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, μέσα από την πιστή εφαρμογή του πλαισίου αξιολόγησης όπως αναλύθηκε παραπάνω, συνιστά μια σύνθετη και απαιτητική διαδικασία με την ανάλυση και τον συγκερασμό πολλών ειδών δεδομένων από διαφορετικές πηγές.

Βασική στόχευση της διαδικασίας δεν αποτελεί απλώς η εκτίμηση της κλιματικής τρωτότητας του έργου αλλά η ορθή πρόβλεψη, ο στοχευμένος σχεδιασμός, η πρόκριση και τελικά η θέσπιση των κατάλληλων μέτρων προσαρμογής, ώστε να επιτευχθεί η ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας του έργου και να καταστεί η λειτουργία του ολιστική και πρακτικά βιώσιμη, εκπληρώνοντας κριτήρια μέγιστης δυνατής αποδοτικότητας.

6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Είναι γεγονός ότι σήμερα επικυριαρχεί η ισχυρή δέσμευση όλων των Ευρωπαϊκών χωρών, όπως και της Ελλάδας, για βιώσιμη ανάπτυξη με κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Για την επιτάχυνση του στόχου αυτού, απαιτείται ο προγραμματισμός και η υλοποίηση κατάλληλων επενδυτικών αποφάσεων και η εφαρμογή στοχευμένων μέτρων προσαρμογής από την πλευρά των ιθυνόντων των προγραμμάτων ενεργειακού σχεδιασμού. Βασική παράμετρος για την επίτευξη αυτών είναι η θεώρηση της τρωτότητας των έργων υποδομής απέναντι σε δυνητικούς κινδύνους από άπτονται της κλιματικής αλλαγής.

Ειδικότερα η αξιολόγηση της κλιματικής ανθεκτικότητας έργου ΑΠΕ είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του έργου υπό όρους βέλτιστης ενεργειακής αποδοτικότητας με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Προς τούτο βασική προϋπόθεση είναι η πιστή τήρηση των τεχνικών οδηγιών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, οι οποίες βασίστηκαν στην εμπειρική μελέτη σε δείγμα έργων για το χρονικό διάστημα 2014-2020 και πλέον ενσωματώνουν την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στην κλιματική αλλαγή στη διαχείριση κύκλου έργου (ΔΚΕ), στις εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΕΠΕ) και στη στρατηγική εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΣΕΠΕ) με τις απαραίτητες συστάσεις για τη στήριξη των εθνικών διαδικασιών ενίσχυσης της ανθεκτικότητας στην κλιματική αλλαγή στα κράτη μέλη (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2021).

Ο Εθνικός Κόμβος Για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (<https://adaptivegreecehub.gr/>)⁷ συγκεντρώνει και διαχέει τις παραπάνω οδηγίες για την ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας των διαφόρων υποδομών, καθώς και το πλαίσιο αξιολόγησης της κλιματικής ανθεκτικότητας, στο οποίο βασίζεται η εργασία στο κεφάλαιο αυτό για την εξαγωγή πορισμάτων στην περίπτωση φωτοβολταϊκού έργου ΑΠΕ.

⁷ Ο Εθνικός Κόμβος Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του έργου «LIFE-IP AdaptInGR» από τον Οργανισμό Φυσικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (Ο.ΦΥ.ΠΕ.Κ.Α.).

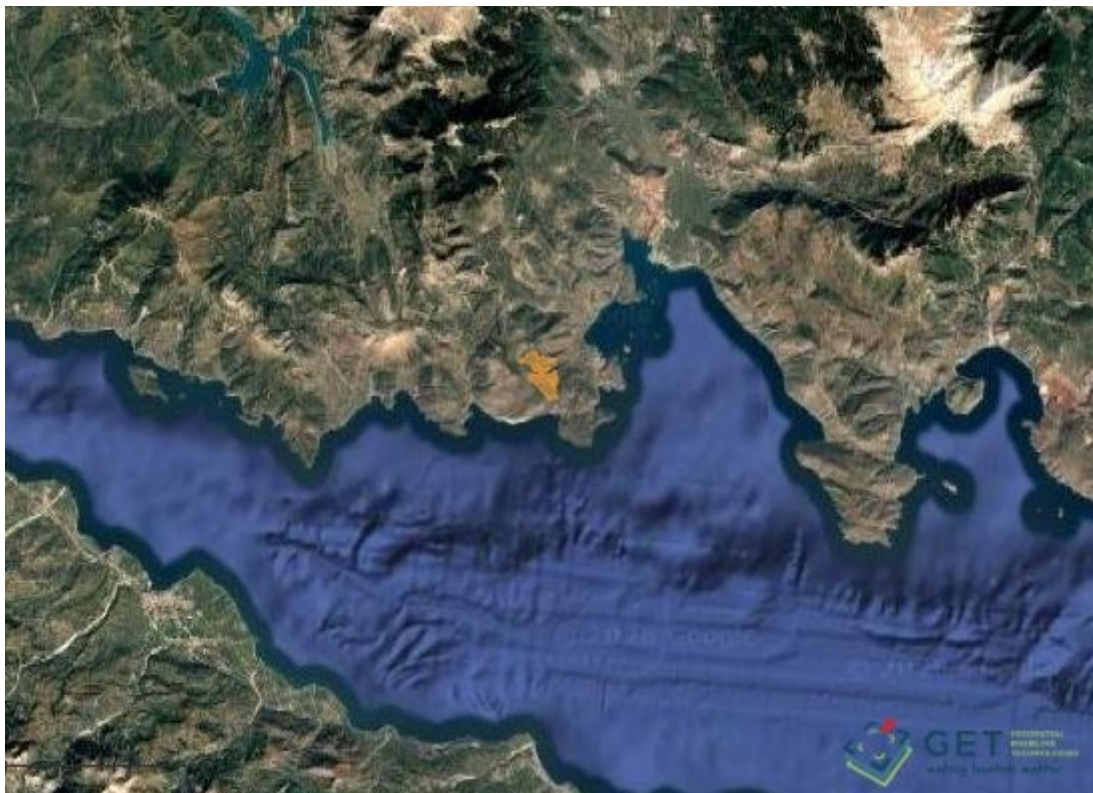
6.1 Περιγραφή έργου

Για την εκπόνηση της έκθεσης κλιματικής ανθεκτικότητας στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας, ενδεικτικά θεωρείται ένα έργο που αφορά σε δυο φωτοβολταϊκούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ενσωματωμένη διάταξη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα:

Ο ένας σταθμός περιλαμβάνει 281.600 φωτοβολταϊκά πάνελ με συνολική ισχύ 176 MW, ενώ ο δεύτερος περιλαμβάνει 225.600 πάνελ με συνολική ισχύ 141 MW. Τα πάνελ είναι από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο τελευταίας τεχνολογίας και τοποθετούνται σε βάσεις από μέταλλο.

Και οι δύο σταθμοί ενσωματώνουν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, με χωρητικότητα 240 MWh και 50 MWh αντίστοιχα, που επιτρέπουν τη σταθεροποίηση της παραγωγής και τη διοχέτευση ενέργειας στο δίκτυο όταν απαιτείται.

Το έργο χωροθετείται στην περιοχή της Στερεάς Ελλάδας και συγκεκριμένα στον Δ Δελφών και ειδικότερα σε περιοχή Natura2000 (Εικόνα 6-1).



Εικόνα 6-1 Χάρτης χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών (Πηγή: ΡΑΑΕΥ)

Στο σχήμα 6-1 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου.

66HL4M-BDV 605-630 Watt

Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Τύπος Κυψέλης	Μονοκρυσταλλικό τύπου N
Αριθμός κυψελών	132 (66×2)
Διαστάσεις	2382×1134×30 mm
Βάρος	32,4 kg
Μπροστινό Τζάμι	2,0 mm, Αντιανακλαστική Επίστρωση
Πίσω Τζάμι	2,0 mm, Θερμικά Ενισχυμένο Τζάμι
Πλαίσιο	Ανοδιωμένο Κράμα Αλουμινίου
Κουτί Διακλάδωσης	Βαθμός IP68
Κατηγορία Προστασίας	Κλάση II
Τύπος Πυρασφάλειας IEC	Κλάση C
Τύπος Συνδετήρα	JK03M/JK03M2 / Άλλα*
Καλώδια Εξόδου (Συμπεριλαμβανομένου του Συνδετήρα)	4,0 mm ² (+): 400 mm, (-): 200 mm ή Προσαρμοσμένο Μήκος

* Το MC4 και MC4-EVO2 διατίθενται κατόπιν αιτήματος και ανάλογα με τη διαθεσιμότητα

Διαμόρφωση Συσκευασίας

Διαστάσεις Παλέτας	2396×1110×1251 mm
Λεπτομέρειες Συσκευασίας (Δύο παλέτες = Μία στοίβα)	36 τεμάχια/παλέτες, 72 τεμάχια/στοίβα, 720 τεμάχια/Δοχείο 40'HQ

Προδιαγραφές (STC)

Μέγιστη Ισχύς - P _{max} [W]	605	610	615	620	625	630
Μέγιστη Τάση Ισχύος - V _{mp} [V]	40.31	40.46	40.60	40.74	40.88	41.02
Μέγιστο Ρεύμα Ισχύος - I _{mp} [A]	15.01	15.08	15.15	15.22	15.29	15.36
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος - V _{oc} [V]	48.48	48.68	48.88	49.08	49.28	49.48
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I _{sc} [A]	15.90	15.96	16.02	16.08	16.14	16.20
Απόδοση Μονάδας STC [%]	22.40	22.58	22.77	22.95	23.14	23.32
Ανοχή Ισχύος	0 ~ + 3 %					
Συντελεστής Θερμοκρασίας P _{max}	-0,29%/°C					
Συντελεστής Θερμοκρασίας V _{oc}	-0,25%/°C					
Συντελεστής Θερμοκρασίας I _{sc}	0,045%/°C					

STC: Ακτινοβολία 1000W/m², Θερμοκρασία Κελιού 25°C, AM=1,5

Προδιαγραφές (BNPI)

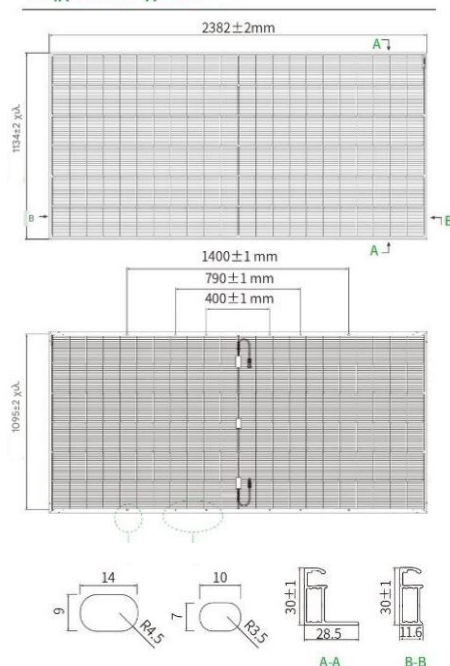
Μέγιστη Ισχύς - P _{max} [Wp]	668	674	679	685	690	696
Μέγιστη Τάση Ισχύος - V _{mp} [V]	40.29	40.46	40.59	40.75	40.88	41.04
Μέγιστο Ρεύμα Ισχύος - I _{mp} [A]	16.58	16.66	16.73	16.81	16.88	16.95
Τάση Ανοικτού Κυκλώματος - V _{oc} [V]	48.46	48.66	48.86	49.06	49.26	49.46
Ρεύμα Βραχυκυκλώματος - I _{sc} [A]	17.56	17.64	17.70	17.77	17.83	17.90

BNPI: Ακτινοβολία: εμπρός 1000W/m², πίσω 135W/m², Θερμοκρασία Κελιού 25°C, AM=1,5

Συνθήκες Εφαρμογής

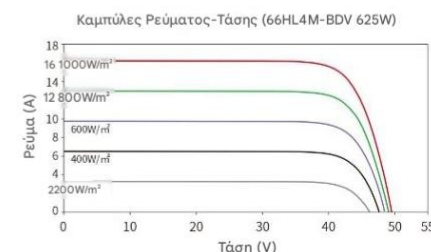
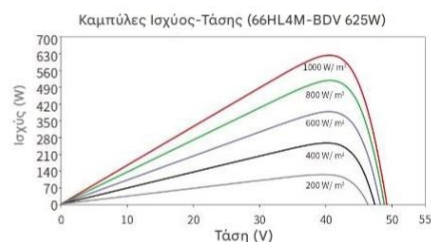
Θερμοκρασία Λειτουργίας	-40 °C ~ +70 °C
Μέγιστη Τάση Συστήματος	1500 VDC (IEC)
Μέγιστη Ονομαστική Ασφάλεια Σειράς	35 A
Συντελεστής Διπλότητας	φVoc: 98±5%, φIsc: 80±5%, φP _{max} : 80±5%

Μηχανικά Σχέδια



Σημείωση: Για συγκεκριμένες διαστάσεις και εύρη ανοχής, ανατρέξτε στα αντίστοιχα λεπτομερή σχέδια των μονάδων.

Ηλεκτρική Απόδοση



Σχήμα 6-1 Χαρακτηριστικά Φ/Β Πάρκων Έργου (Πηγή: ΗΠΜ)

6.2 Προέλεγχος

Για την αξιολόγηση της κλιματικής τρωτότητας ενός έργου ενεργειακής υποδομής, όπως το παραπάνω έργο θα πρέπει να αναλυθούν:

- η ευαισθησία του έργου σε κλιματικούς κινδύνους που μπορεί να επηρεάσουν τον συγκεκριμένο τύπο έργου
- η έκθεση του σχετικού έργου λόγω της γεωγραφικής θέσης του στους παραπάνω κλιματικούς κινδύνους,

ώστε να διακριβωθούν οι «απειλές» του κλίματος σε βάρος του φωτοβολταϊκού πάρκου καθώς και να σκιαγραφηθούν οι επιπτώσεις αυτών με τελικό στόχο την πρόκριση των δεόντων μέτρων προσαρμογής.

6.2.1 Ανάλυση Ευαισθησίας

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 3) σχετικά με τις κλιματικές ευπάθειες φωτοβολταϊκών έργων, κρίσιμοι κλιματικοί παράγοντες οι οποίοι τείνουν να επηρεάζουν την αποδοτική λειτουργία και την βιωσιμότητά τέτοιων έργων είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, τα έντονα καιρικά φαινόμενα όπως χαλάζι, χιονοπτώσεις, ραγδαίες βροχοπτώσεις, η ξηρασία αλλά και οι πυρκαγιές.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ακολουθήσει η ανάλυση ευαισθησίας του παραπάνω σχετικού φωτοβολταϊκού πάρκου για τις κλιματικές παραμέτρους, όπως αυτές εμφανίζονται στον πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1 Βασικές Κλιματικές Παράμετροι ευαισθησίας Φ/Β

Κλιματικές Παράμετροι
Θερμοκρασία
Ξηρασία
Άνεμος
Καύσωνας
Παγετός
Βροχοπτώσεις/Χιονοπτώσεις/Χαλάζι
Ανοδος στάθμης της θάλασσας
Πλημμύρες
Πυρκαγιές

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί βασικό κλιματικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού (pv). Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του πλαισίου του πάνελ να αγγίξει περίπου τους 70 °C, η θερμοκρασία του πάνελ τους 85 °C και η θερμοκρασία της μόνωσης του καλωδίου τους 60 °C (Bošnjaković et al., 2023).

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συσχετίζεται με εκείνη των ηλιακών κυψελών. Η απόδοση των τελευταίων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, κυρίως λόγω των αυξημένων ρυθμών επανασύνδεσης των εσωτερικών φορέων που προκαλούνται από την αύξηση των συγκεντρώσεων των φορέων (Dubey et al., 2013) όπως των inverter αλλά και των καλωδίων. Οι Amalu & Fabunmi, (2022) μελετώντας φωτοβολταϊκά στη μέση Ανατολή υπό ακραίες θερμοκρασίες παρατήρησαν διαχρονικά μείωση της ισχύος εξόδου

των φωτοβολταϊκών με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και μειωμένη ισχύ στο 30% της αρχικής σε πάνω από το 1/3 των στοιχείων του φωτοβολταϊκού.

Άνεμος

Ο άνεμος θεωρείται κρίσιμη κλιματική παράμετρος για τον αρχικό σχεδιασμό και την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού.

Οι δυνατοί άνεμοι είναι δυνατόν να παρασύρουν τα πάνελ ή και τις βάσεις στήριξης αν υπάρχουν ή και να προκαλέσουν καταστροφή τους με ό,τι αυτό συνεπάγεται για το κόστος συντήρησης και επισκευής τους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ένα σημαντικό πρόβλημα για την αποδοτική λειτουργία του φωτοβολταϊκού μπορεί να αποτελέσει η σκόνη από τυχόν μεγάλες εντάσεις ανέμων προκαλώντας σε υγρά περιβάλλοντα, λόγω της απορρόφησης υγρασίας, ένα στρώμα λάσπης με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται ακόμη περισσότερο η δυνατότητα ικανοποιητικής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας (Yilbas BS, όπως αναφέρεται στους Hasan et al., 2022)

Χαλάζι/Κεραυνοί/Βροχοπτώσεις

Ισχυρές χαλαζοπτώσεις και έντονες βροχοπτώσεις με παράλληλη κεραυνική δραστηριότητα, ήτοι καιρικά φαινόμενα υψηλής ραγδαιότητας, είναι δυνατόν να προκαλέσουν θραύση των υαλοπινάκων των πάνελ και διάβρωση των μεταλλικών τμημάτων των πλαισίων και των βάσεων στήριξης.

Νεφοκάλυψη

Σε περιοχές με έντονη νεφοκάλυψη παρατηρείται μειωμένη απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας από τα πάνελ των φωτοβολταϊκών, ακριβώς λόγω της περιορισμένης προσπίπτουσας ακτινοβολίας όπως προκύπτει από την παρεμπόδιση της από τα νέφη, με αποτέλεσμα την πτώση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και την ελλειμματική απόδοση των φωτοβολταϊκών εν γένει.

Ακολουθεί πίνακας (Πίν. 6-2) για την ανάλυση ευαισθησίας όπως εξάγεται το εργαλείο excel που αναπτύχθηκε από την Γ.Γ. Δημοσίων Επενδύσεων & ΕΣΠΑ.

Πίνακας 6-2 Ανάλυση ευαισθησίας Φ/Β έργου μελέτης περίπτωσης σε οξείς και χρόνιους κινδύνους

Ανάλυση τρωτότητας για το Έργο:						
Ομάδα	Πηγή Κινδύνου	Ευαισθησία				
		Κατασκευή	Λειτουργία	Προϊόντα Υπηρεσίες	Ένταξη στην περιοχή	Σύνολο Ευαισθησίας
Οξείς κίνδυνοι	Καύσιννας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια
	Κύμα ψύχους	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια
	Παγετός (Αριθμός Ημερών με TN<0)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Δασική πυρκαγιά	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Κυκλώνες, Ισχυρές Καταιγίδες, τυφώνας	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή
	Θύελλα (περιλαμβάνονται χιονοθύελλες, θύελλες σκόνης)	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή
	Ανεμοστρόβιλος/Θυελλώδεις Άνεμοι	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή
	Ξηρασία	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Ισχυρός υετός (βροχή, χαλάζι, χιόνι/πάγος)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Πλημμύρα (σε παράκτιες περιοχές, ποτάμια, λόγω βροχής, υπόγεια ύδατα)	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Κατολίσθηση/Διάβρωση του εδάφους	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Καθίζηση	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Χρόνιοι κίνδυνοι	Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του αέρα	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Αστική θερμομονή					Χαμηλή
	Θερμική καταπόνηση	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια
	Μεταβλητότητα της θερμοκρασίας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Μεταβολή χαρακτηριστικών των ανέμων	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια
	Μεταβολή χαρακτηριστικών και τύπων υετού (βροχή, χαλάζι, χιόνι/πάγος)					Χαμηλή
	Μεταβλητότητα υετού ή υδρολογική μεταβλητότητα					Χαμηλή
	Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του νερού σε υδάτινα σώματα					Χαμηλή
	Οξίνιση/αλατότητα του θαλάσσιου ύδατος					Χαμηλή
	Διεσίδωση αλμυρού νερού, υφαλμύριση επιφανειακών & υπόγειων υδάτων					Χαμηλή
	Άνοδος της στάθμης της θάλασσας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια

6.2.2 Ανάλυση Έκθεσης

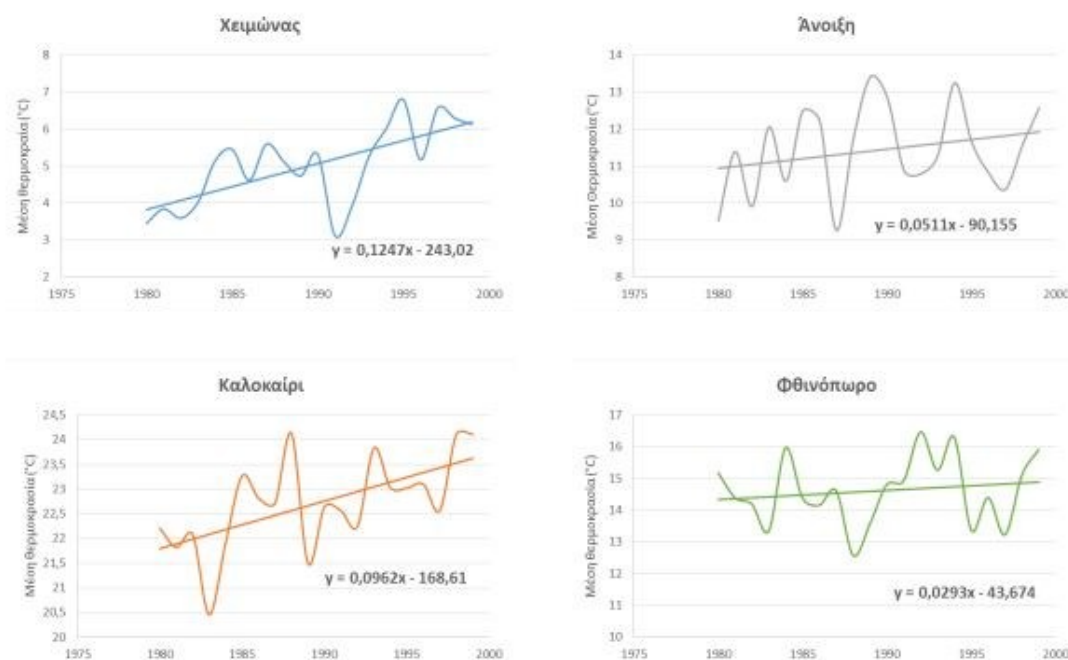
Με βάση την περιοχή χωροθέτησης του έργου, ήτοι στην περιοχή της Δημοτικής Ενότητας Γαλαξιδίου, και σύμφωνα με τη μελέτη των σχετικών κλιματολογικών δεικτών που άπτονται της συγκεκριμένης περιοχής του Δ. Δελφών, όπως αναλύονται στο Περιφερειακό Σχέδιο Για Την Προσαρμογή Στην Κλιματική Αλλαγή (ΠΕΣΠΚΑ) της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας⁸ αλλά και με οδηγό τα στοιχεία του «Εθνικού Κόμβου για την Κλιματική Αλλαγή (adaptivegreecehub), υπολογίστηκαν οι τιμές για τους κινδύνους στους οποίους εκτίθεται η υποδομή σε παρόντικό και μέλλοντα χρόνο βάσει των σεναρίων RCP 4.5 και 8.5. Λόγω του παράκτιου χαρακτήρα της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το «ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ (ΣΔΚΠ) των Λεκανών Απορροής

⁸ <https://pste.gov.gr/perifereiako-schedio-prosarmogis-stin-klimatiki-allagi-pestpka-gia-tin-perifereia-stereas-elladas/>

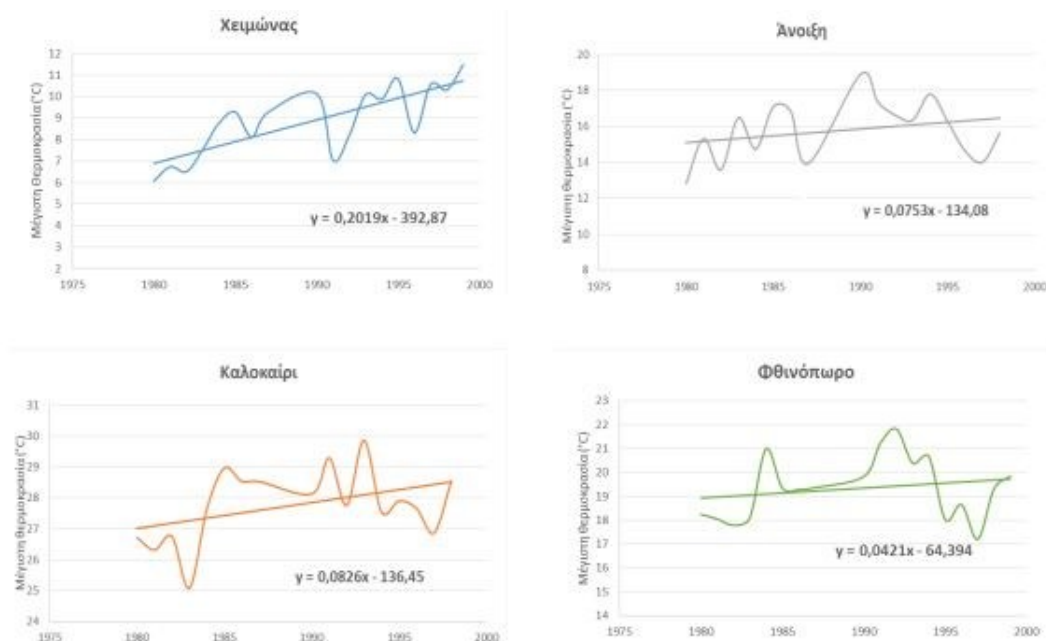
Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07) και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04).

Ιστορικό κλίμα

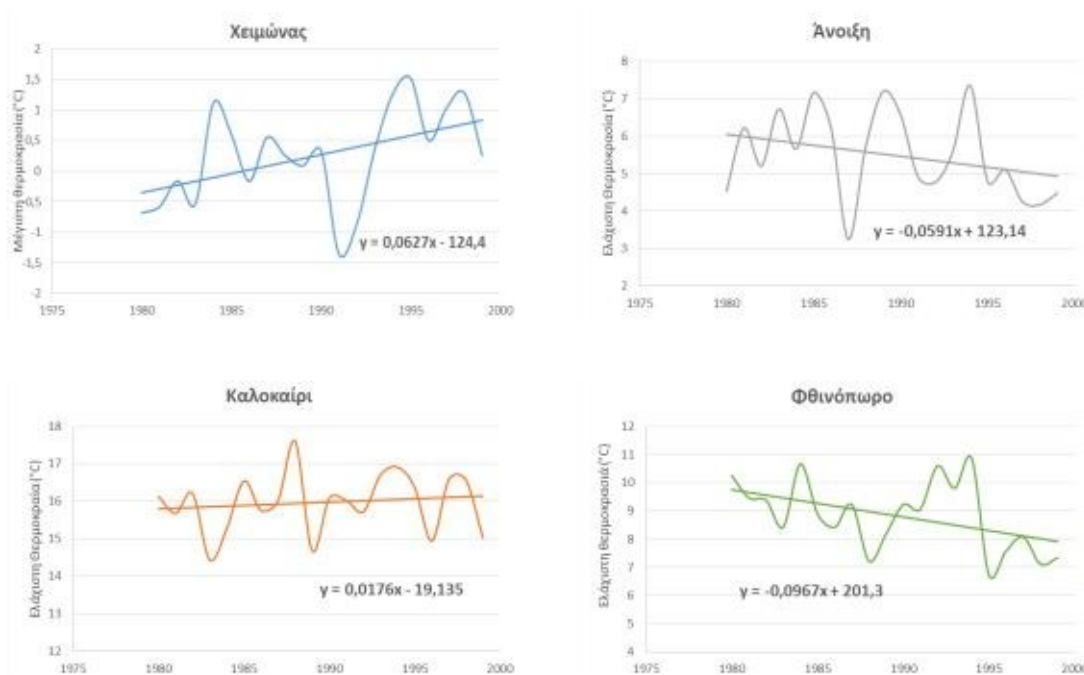
Σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα του Μετεωρολογικού Σταθμού Αραχώβης, ο οποίος γειτνιάζει με την υπόψη περιοχή, όπως ρητά αναφέρεται στο ΠΕΣΠΚΑ της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας (2025) σχετικά με τη μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία διαπιστώνεται διακριτή αυξητική τάση για τα έτη 1975-2000, ενώ για τη σχετική υγρασία αντίθετα τα δεδομένα καταδεικνύουν πτωτική τάση (Εικόνες 6-2 έως 6-5).



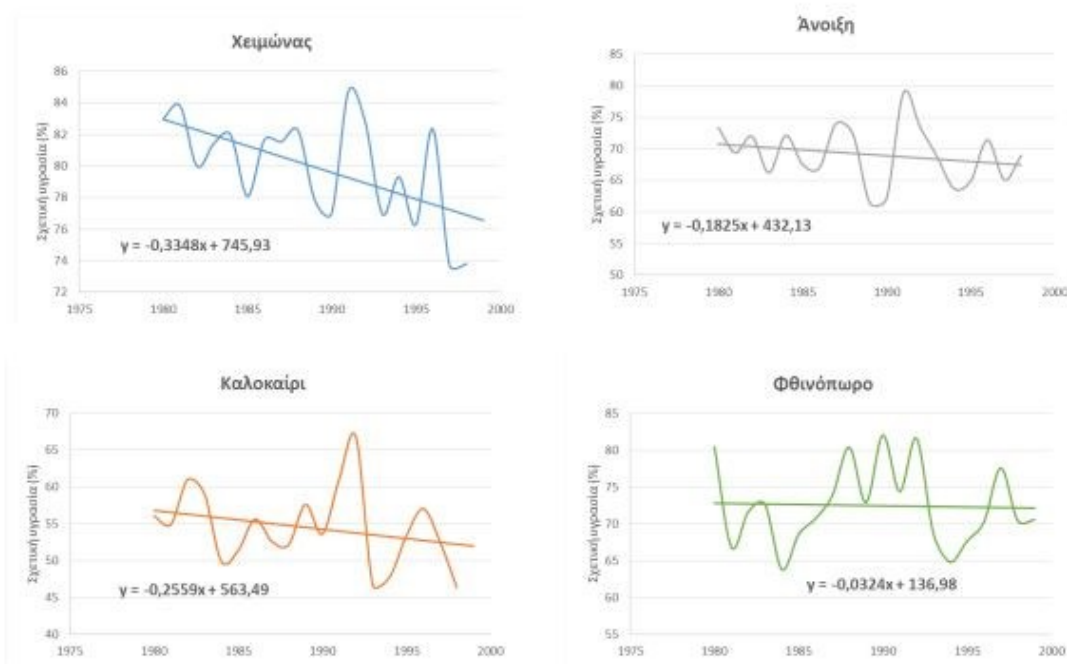
Εικόνα 6-2 Εποχική διακύμανση της μέσης θερμοκρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την περίοδο 1980-1999 τον χειμώνα (δεξιά πάνω), την άνοιξη (αριστερά πάνω), το καλοκαίρι (δεξιά κάτω) και το φθινόπωρο (αριστερά κάτω) (Πηγή: Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, 2025)



Εικόνα 6-3 Εποχική διακύμανση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την περίοδο 1980-1999 τον χειμώνα (δεξιά πάνω), την άνοιξη (αριστερά πάνω), το καλοκαίρι (δεξιά κάτω) και το φθινόπωρο (αριστερά κάτω) (Πηγή: Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, 2025)



Εικόνα 6-4 Εποχική διακύμανση της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την περίοδο 1980-1999 τον χειμώνα (δεξιά πάνω), την άνοιξη (αριστερά πάνω), το καλοκαίρι (δεξιά κάτω) και το φθινόπωρο (αριστερά κάτω) (Πηγή: Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, 2025)



Εικόνα 6-5 Εποχική διακύμανση της σχετικής υγρασίας στο σταθμό Αράχωβα για την περίοδο 1980-1999 τον χειμώνα (δεξιά πάνω), την άνοιξη (αριστερά πάνω), το καλοκαίρι (δεξιά κάτω) και το φθινόπωρο (αριστερά κάτω) (Πηγή: Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, 2025)

Μακροχρόνια Κλιματική Μεταβλητότητα

Για την εκτίμηση κινδύνου λόγω των μελλοντικών κλιματικών μεταβολών αξιοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία όπως και στο ΠΕΣΠΚΑ της Στερεάς Ελλάδας (2018) δύο από τα τελευταία σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή του ΟΗΕ (IPCC) που αποτέλεσαν την βάση για την τελευταία Έκθεση Εκτίμησης της Κλιματικής Αλλαγής (5th Assessment Report – AR5) ήτοι:

- Το RCP4.5 (ενδιάμεσο),
- Το RCP8.5 (δυσμενές)

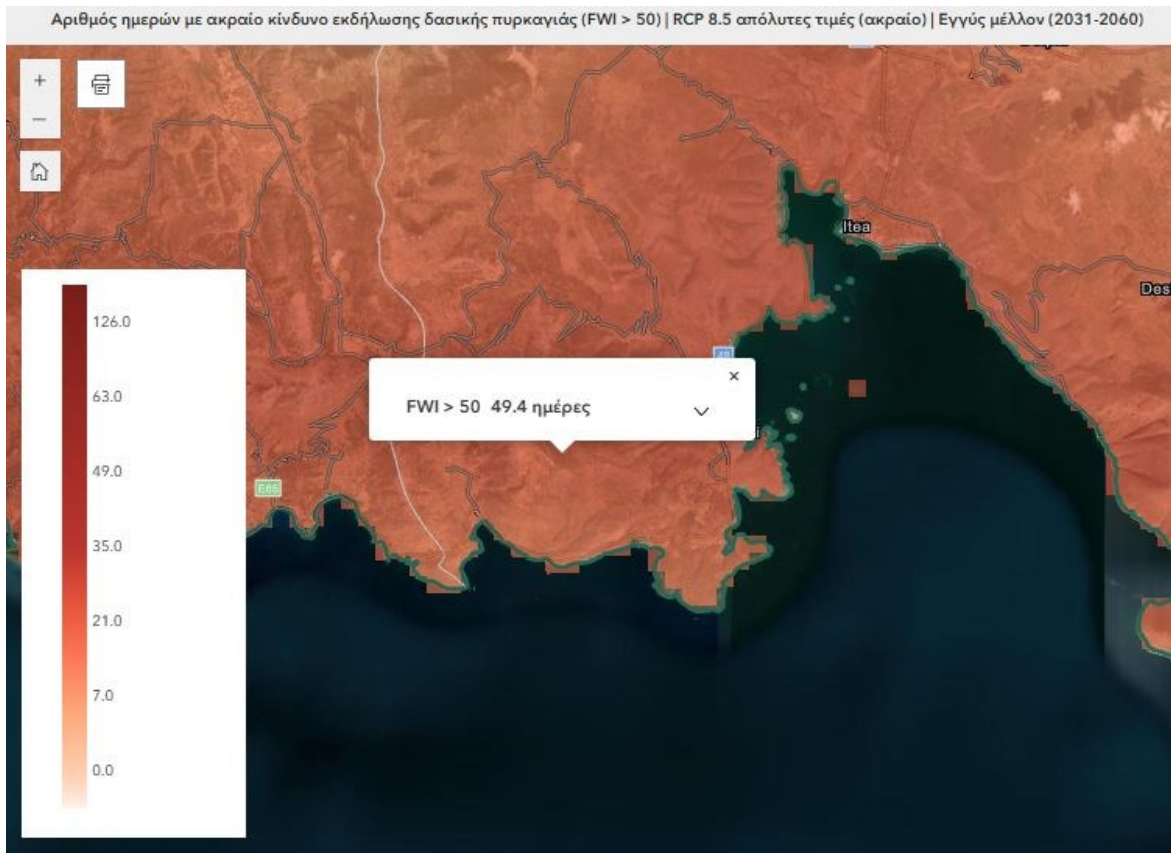
Ακολουθούν αποσπάσματα από το εργαλείο οπτικοποίησης γεωχωρικών δεδομένων του Εθνικού Κόμβου Για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (<https://geo.adaptivegreecehub.gr/>) (βλ. εικ. 6-6 έως 6-39), για τις κάτωθι κλιματικές παραμέτρους και βάσει των παραπάνω σεναρίων, όπως προαναφέρθηκαν αναφορικά με την περιοχή χωροθέτησης του έργου :

- Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C) – TG
- Μέση ετήσια μέγιστη θερμοκρασία (°C) – TX

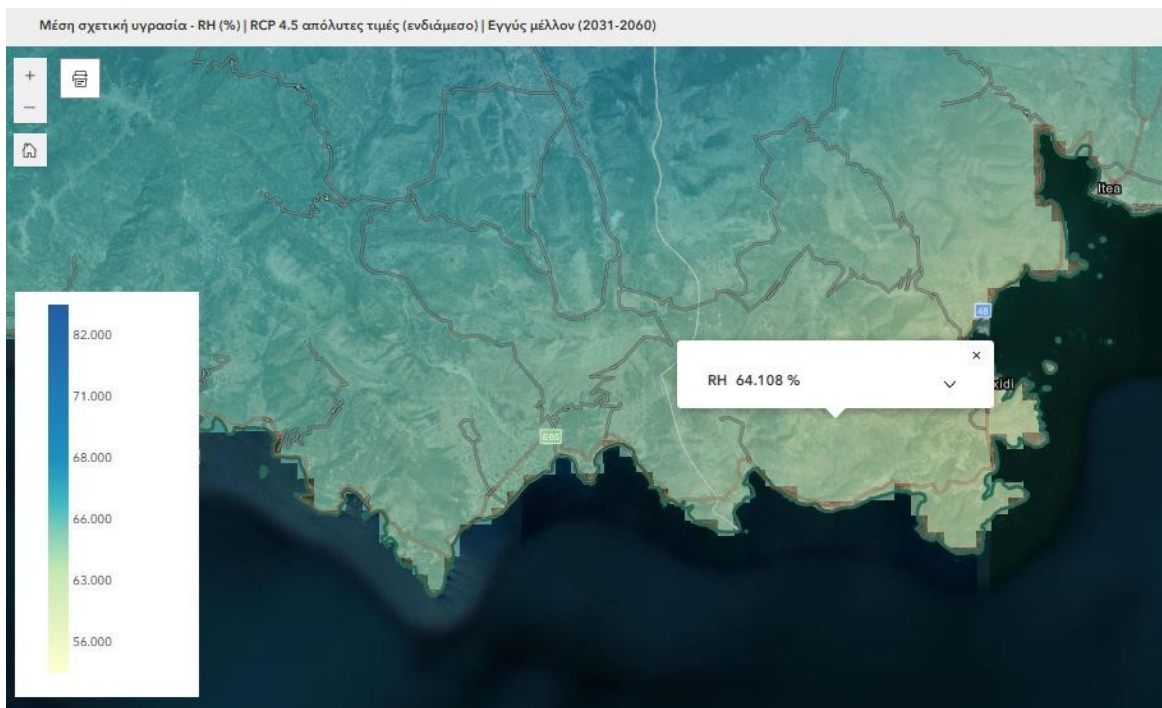
- Μέση ετήσια μέγιστη θερμοκρασία (°C) - TX
- Αριθμός ημερών με $TN > 20^{\circ}\text{C}$ -τροπικές νύχτες
- Ολική ετήσια βροχόπτωση (mm) - PR *
- Μέση ετήσια σχετική υγρασία (%)
- Μέση ετήσια ταχύτητα άνεμου (m/sec)
- Μέσο ετήσιο κλάσμα Νεφοκάλυψης (%)
- Μέση ετήσια εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (Watt/m²)
- Αριθμός ημερών ανά έτος με ακραίο κίνδυνο εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς (FWI > 50)
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας (από ΠΕΣΠΚΑ, 2018)



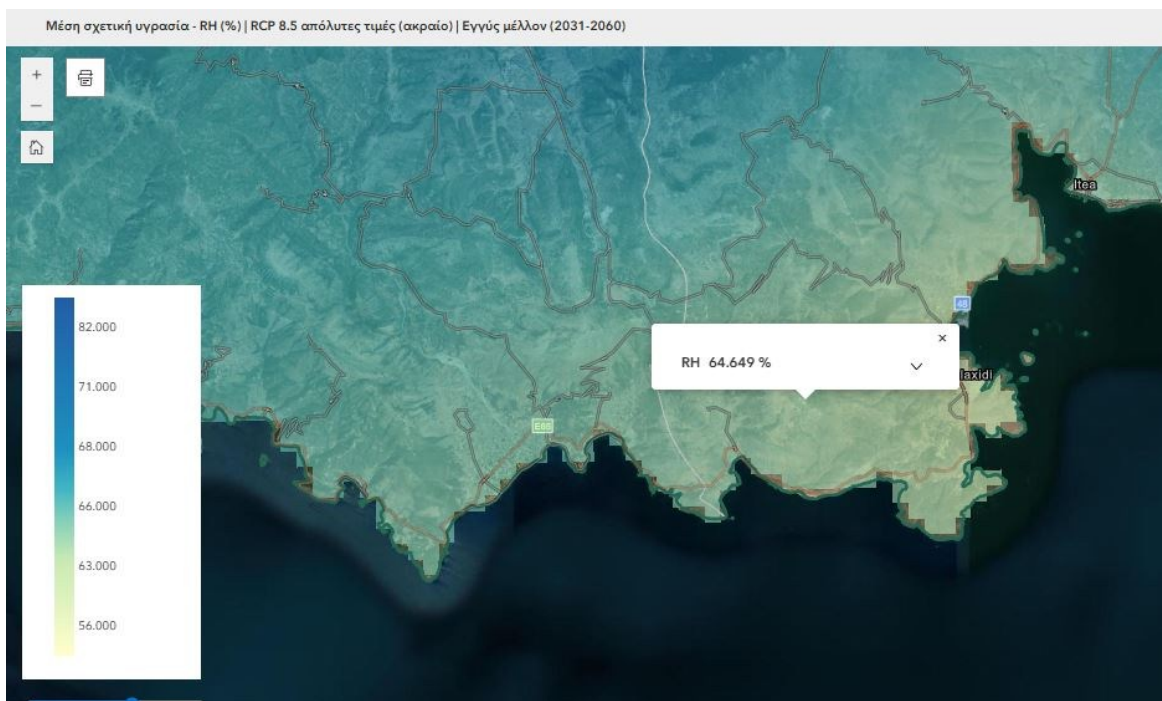
Εικόνα 6-6 Χάρτης Αριθμός ημερών με ακραίο κίνδυνο εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς (FWI > 50) | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



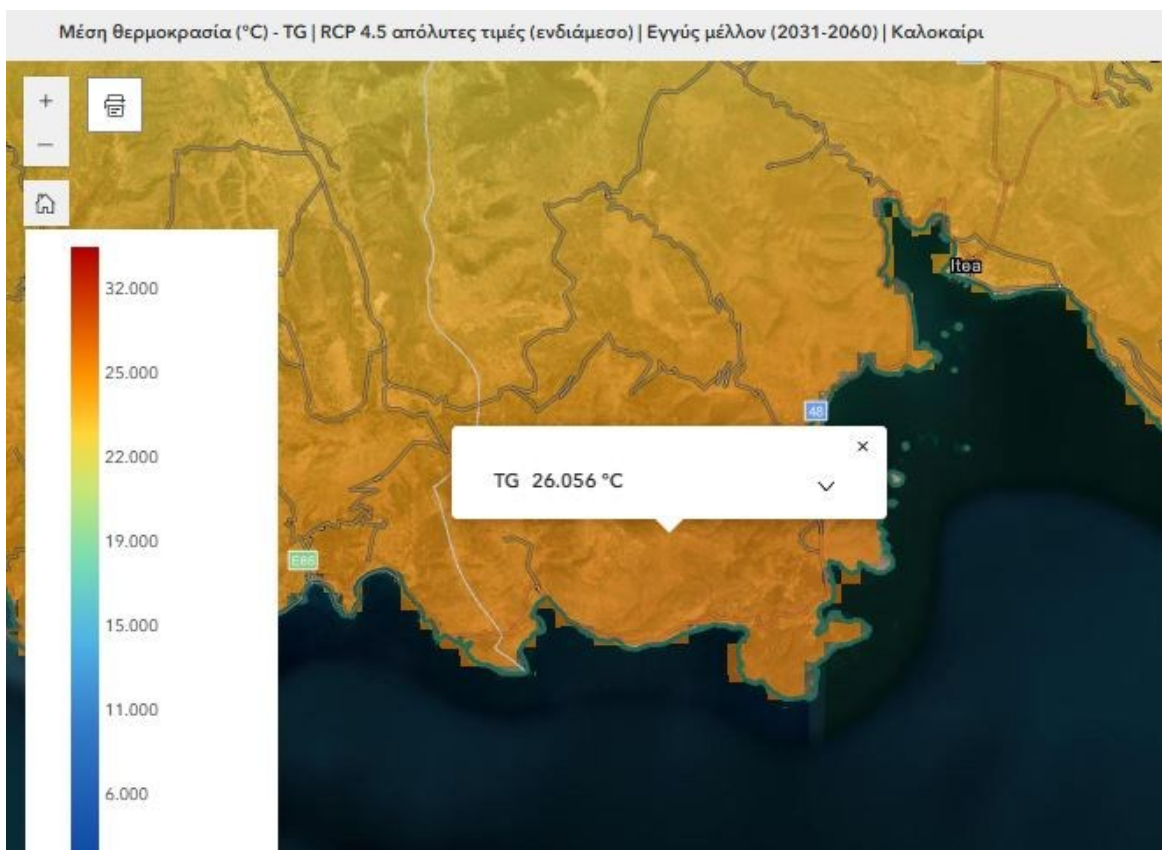
Εικόνα 6-7 Χάρτης Αριθμός ημερών με ακραίο κίνδυνο εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς (FWI > 50) | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



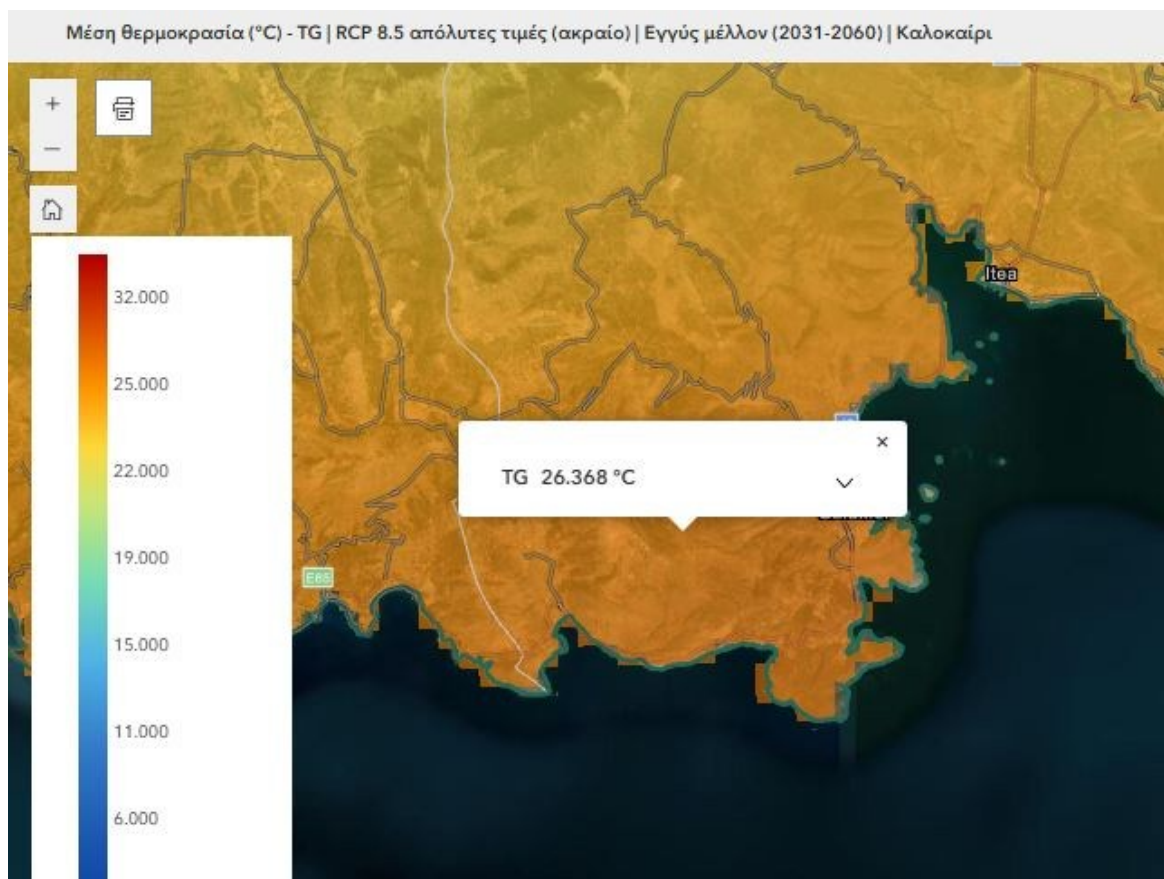
Εικόνα 6-8 Χάρτης Μέση σχετική υγρασία - RH (%) | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



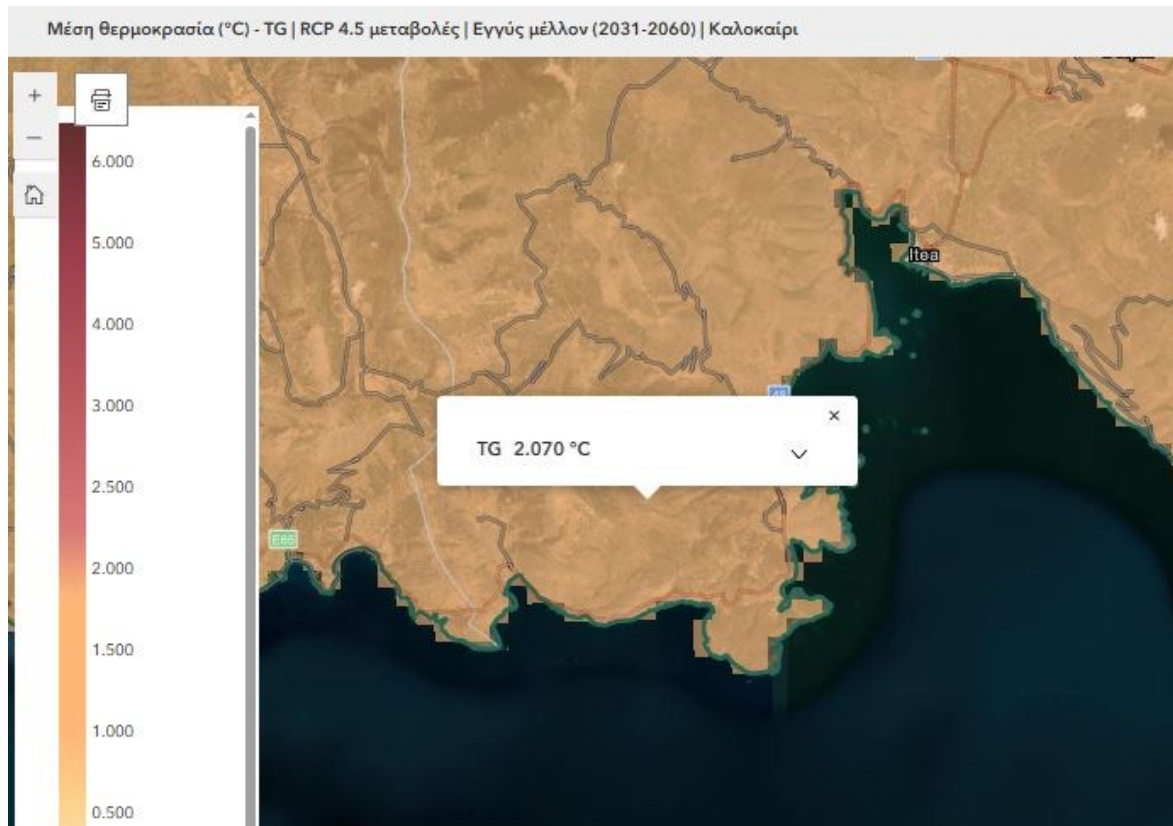
Εικόνα 6-9 Χάρτης Μέση σχετική υγρασία - RH (%) | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060)(Πηγή:<https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



Εικόνα 6-10 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Ετήσιο (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

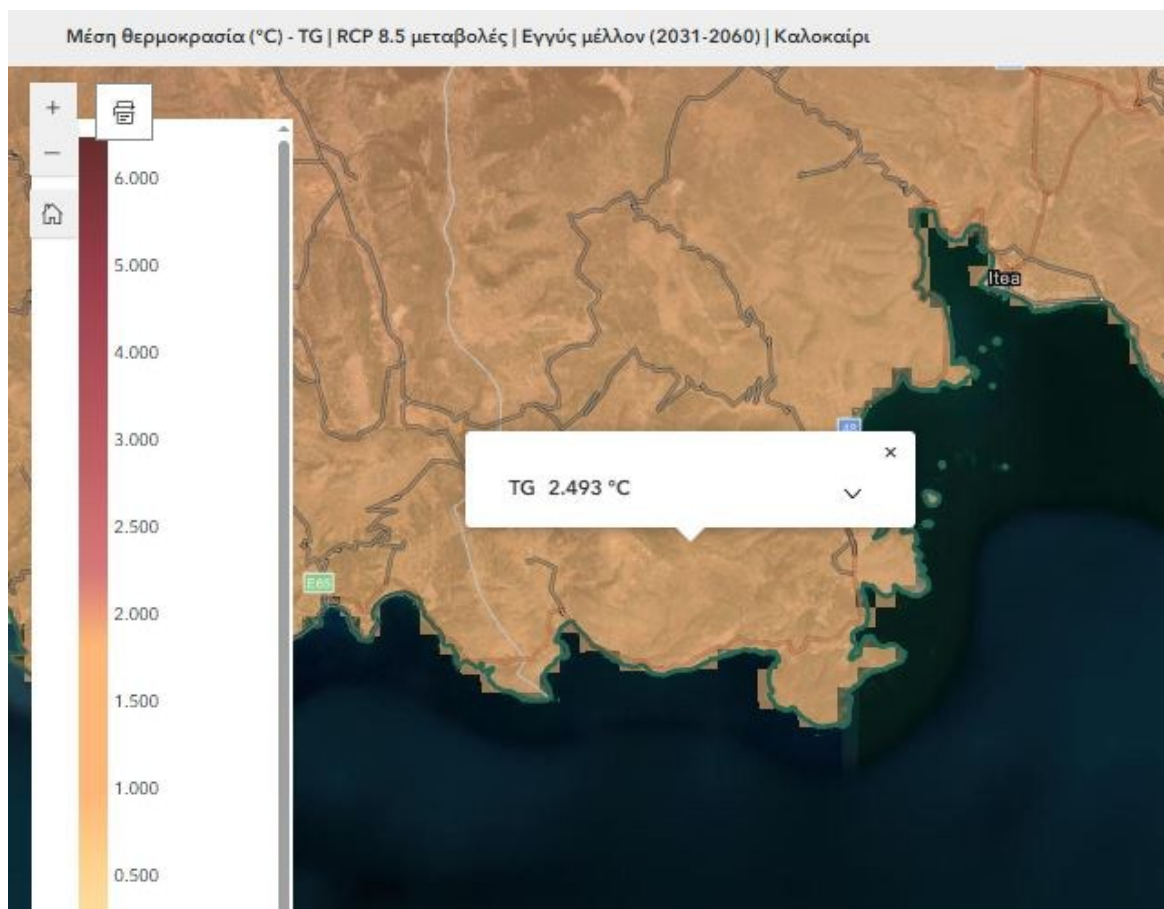


Εικόνα 6-11 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Ετήσιο (Πηγή:

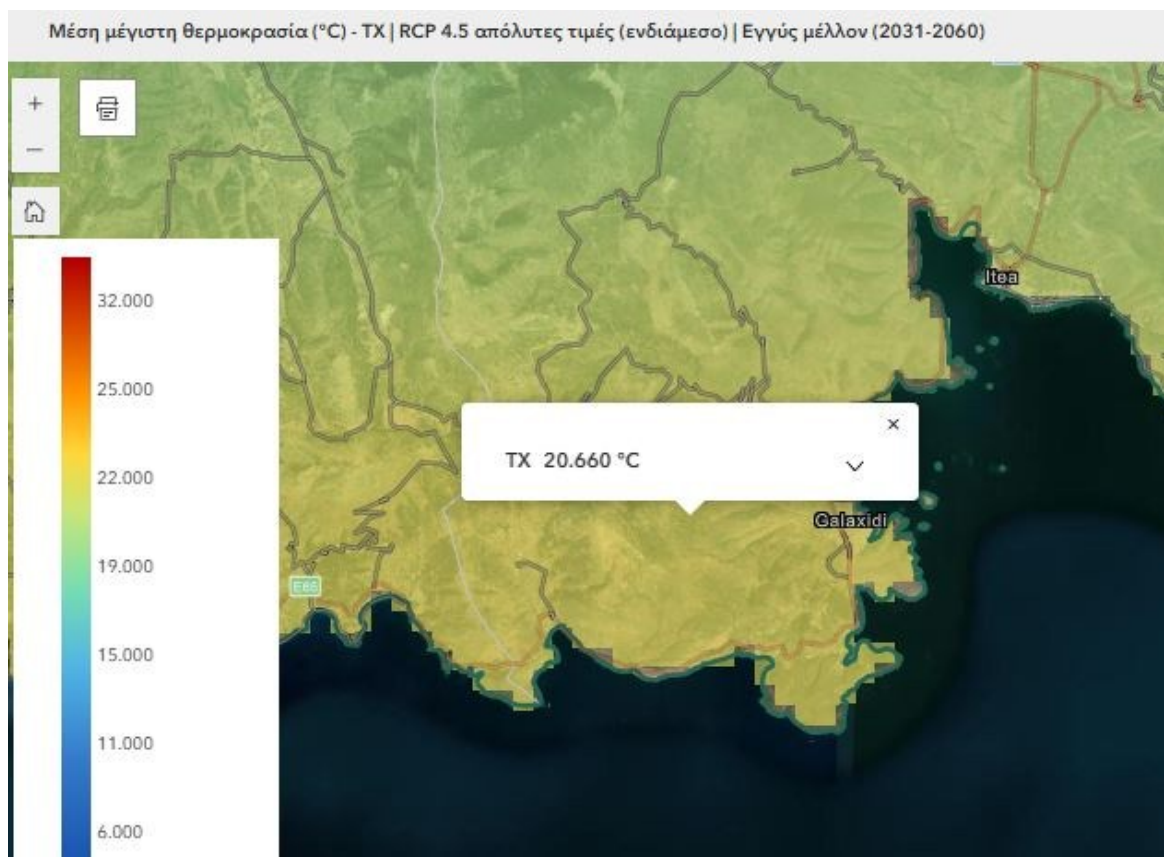


<https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

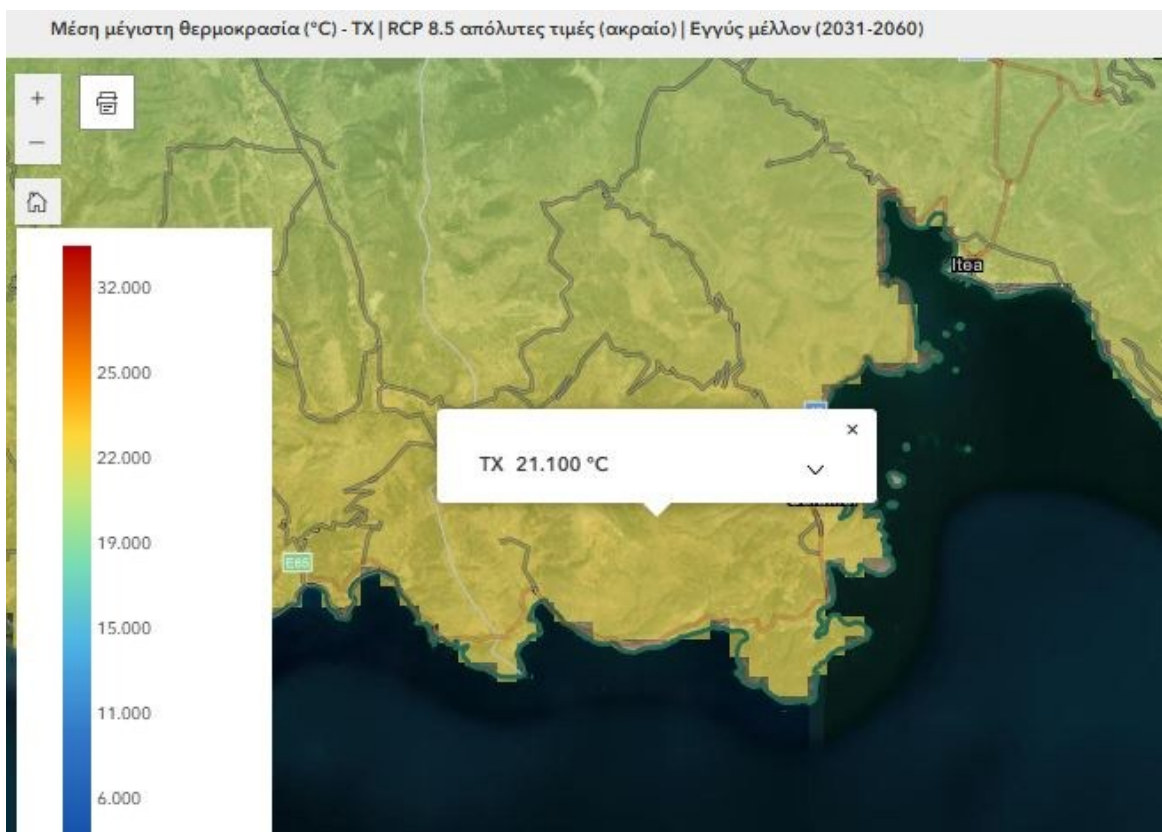
Εικόνα 6-12 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG | RCP 4.5 Μεταβολές | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Καλοκαίρι (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



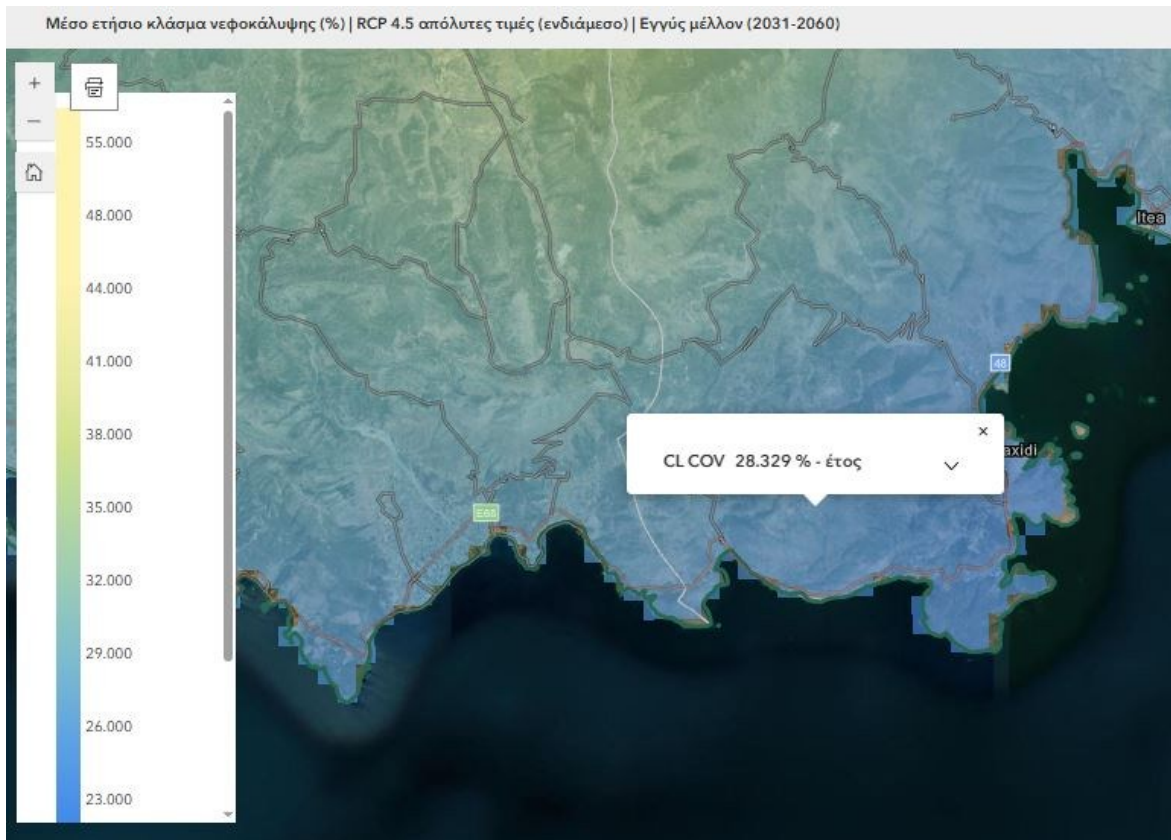
Εικόνα 6-13 Χάρτης Μέση θερμοκρασία (°C) - TG | RCP 8.5 Μεταβολές | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Καλοκαίρι (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



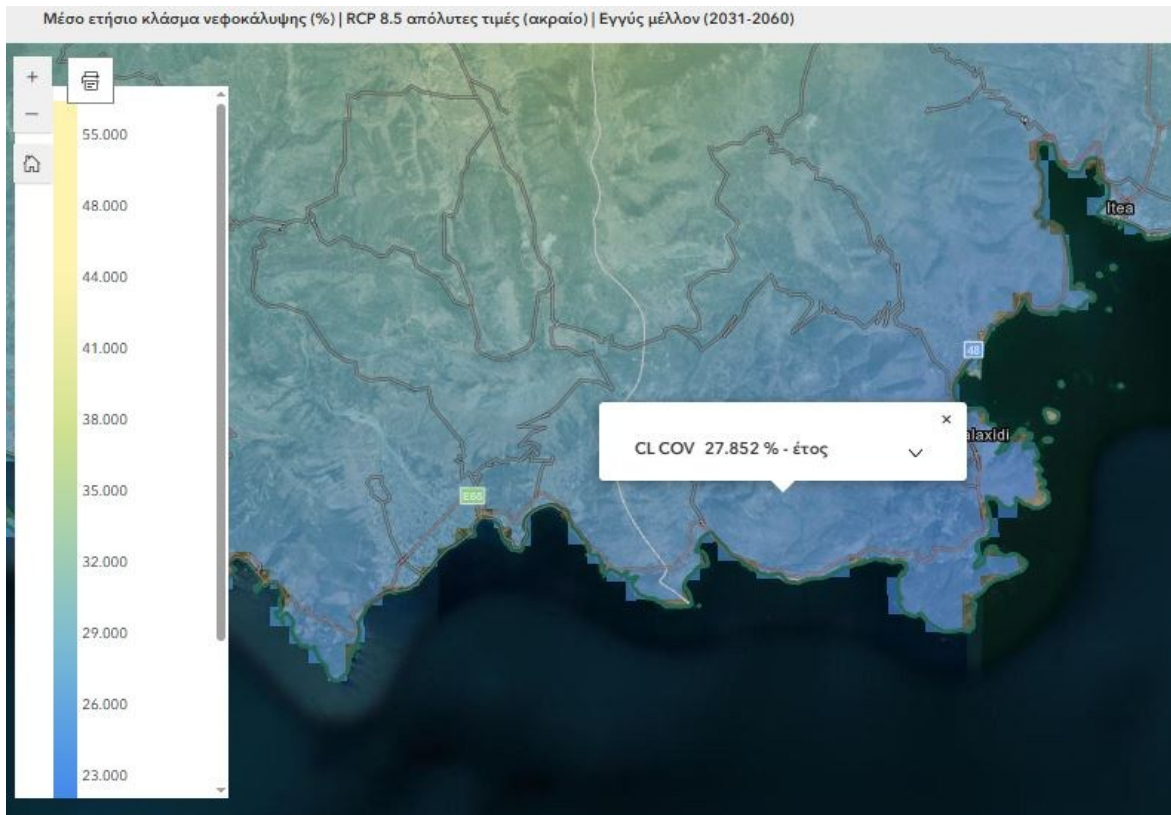
Εικόνα 6-14 Χάρτης Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C) - TX | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) |
Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



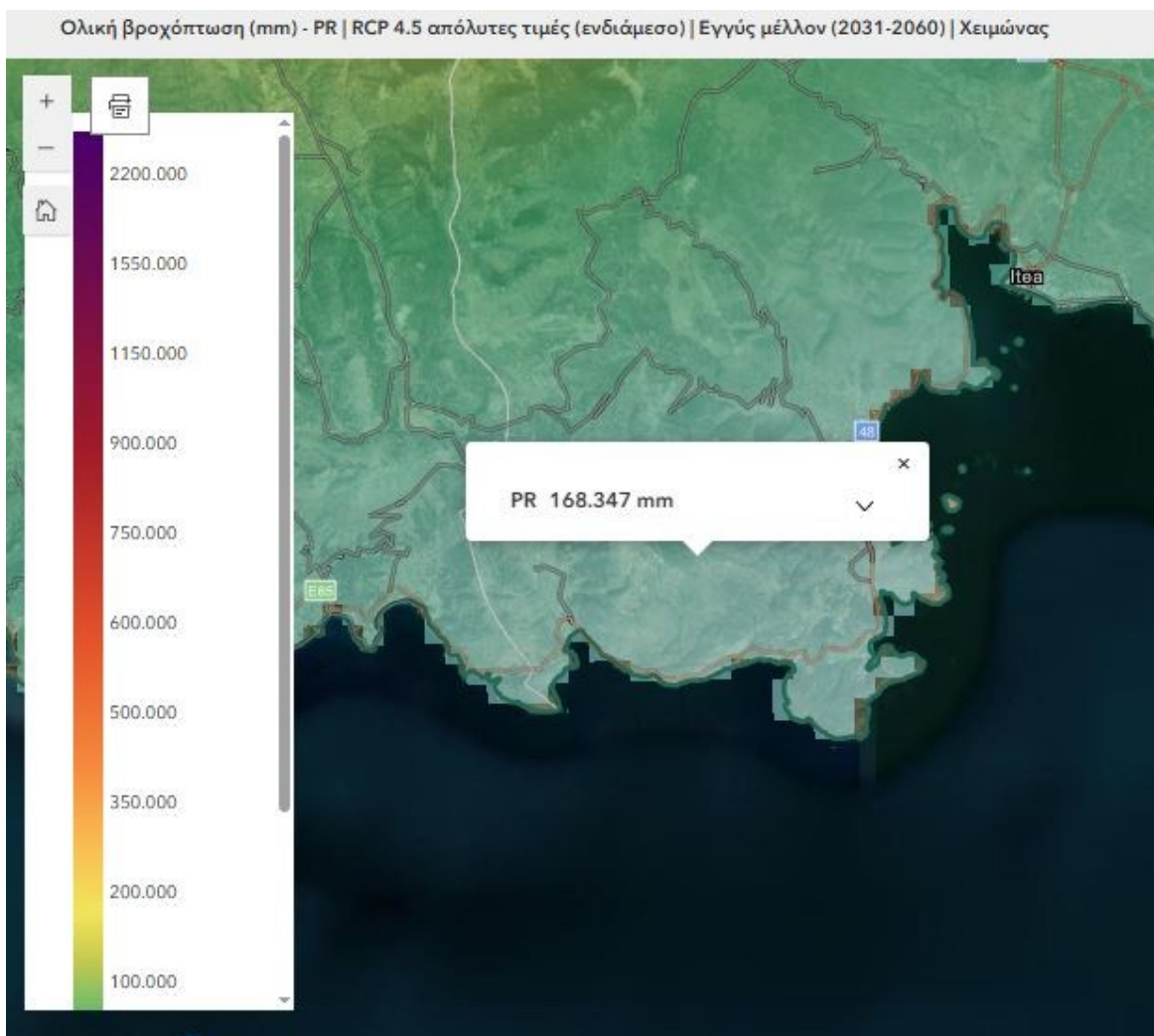
Εικόνα 6-15 Χάρτης Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C) - TX | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



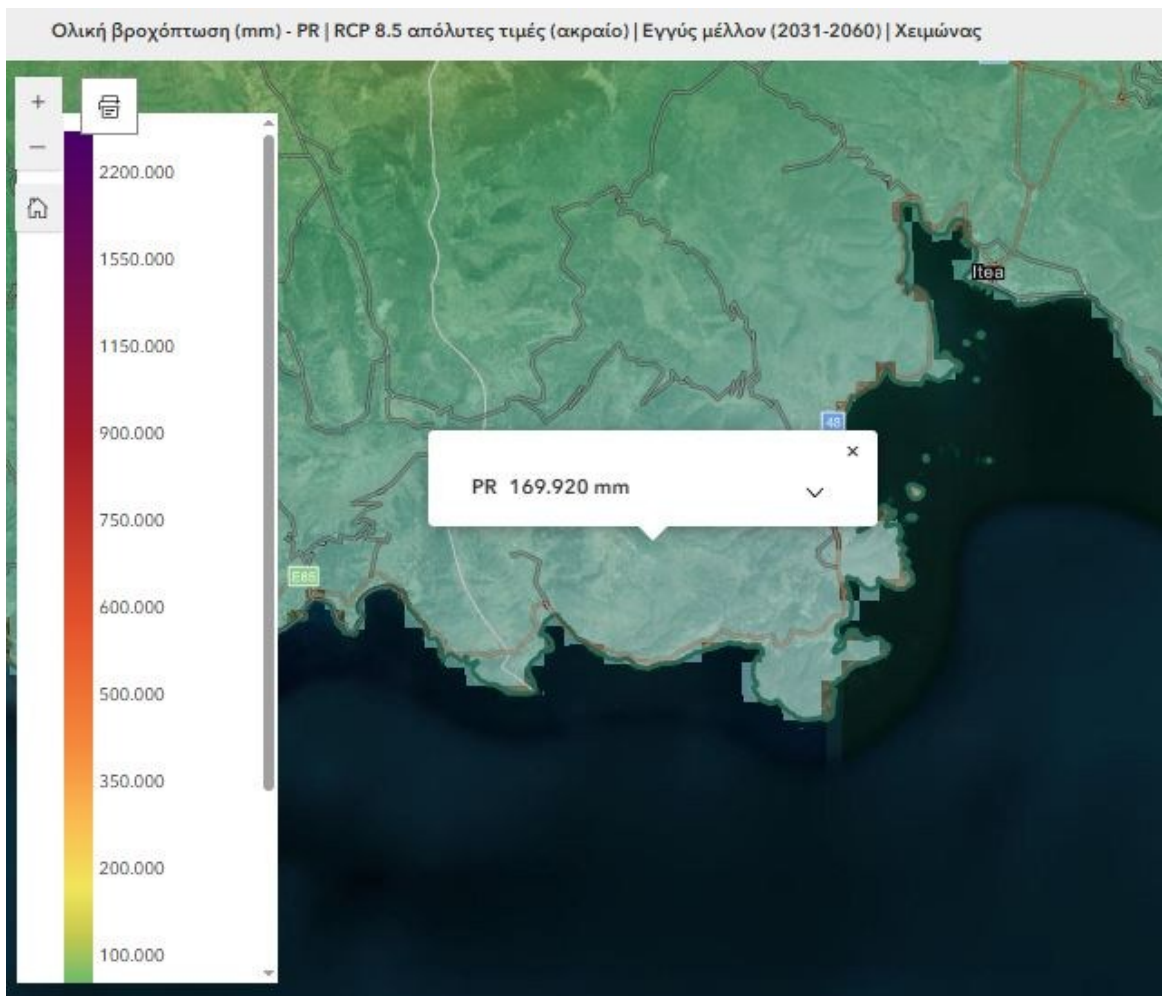
Εικόνα 6-16 Χάρτης Μέσο ετήσιο κλάσμα νεφοκάλυψης (%) | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



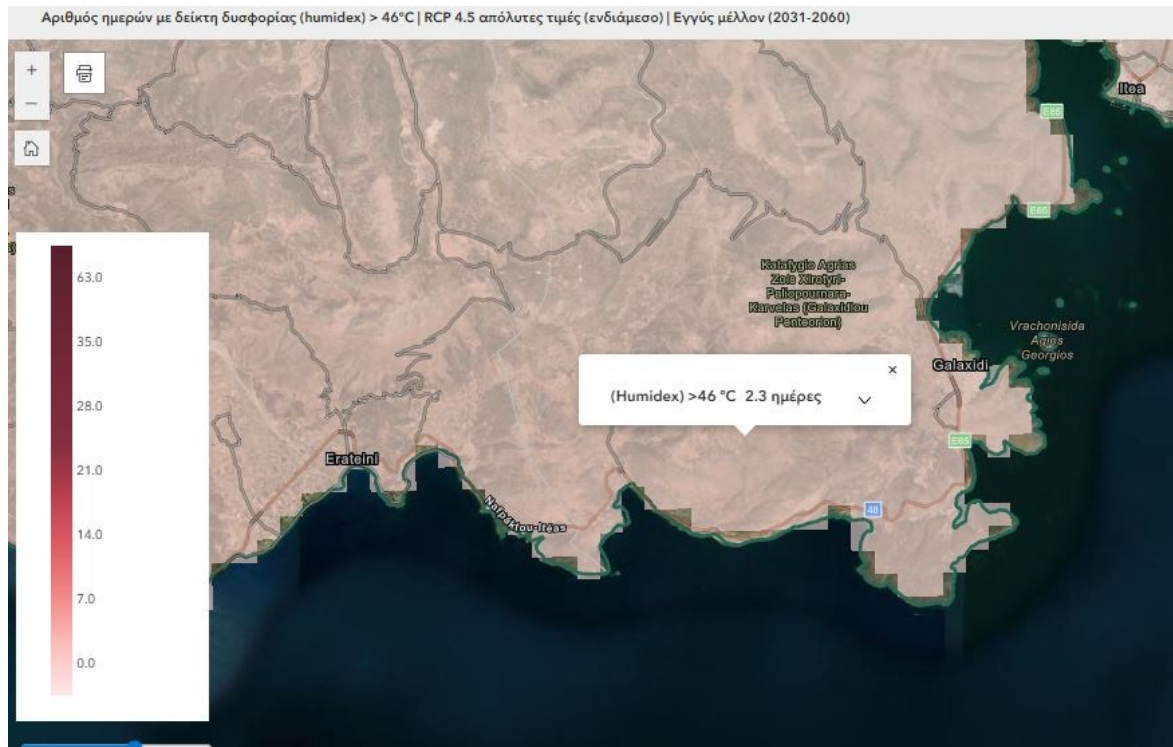
Εικόνα 6-17 Χάρτης Μέσο ετήσιο κλάσμα νεφοκάλυψης (%) | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



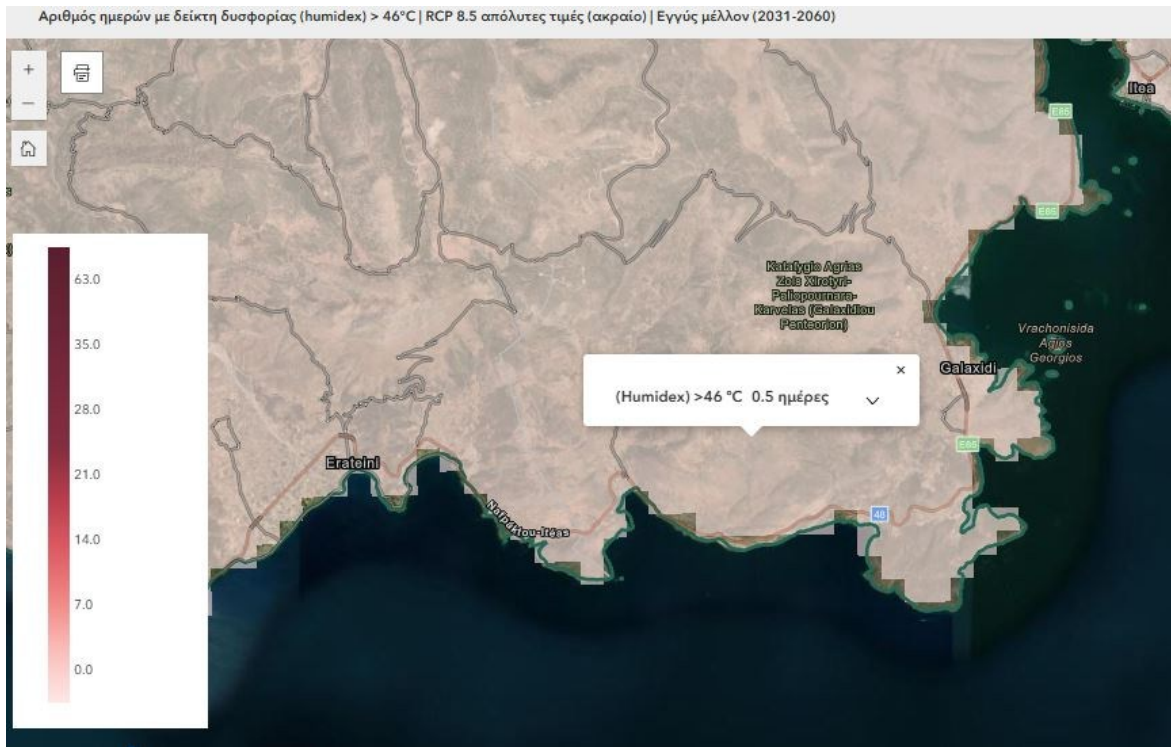
Εικόνα 6-18 Χάρτης Ολική βροχόπτωση (mm) - PR | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Ετήσιο (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



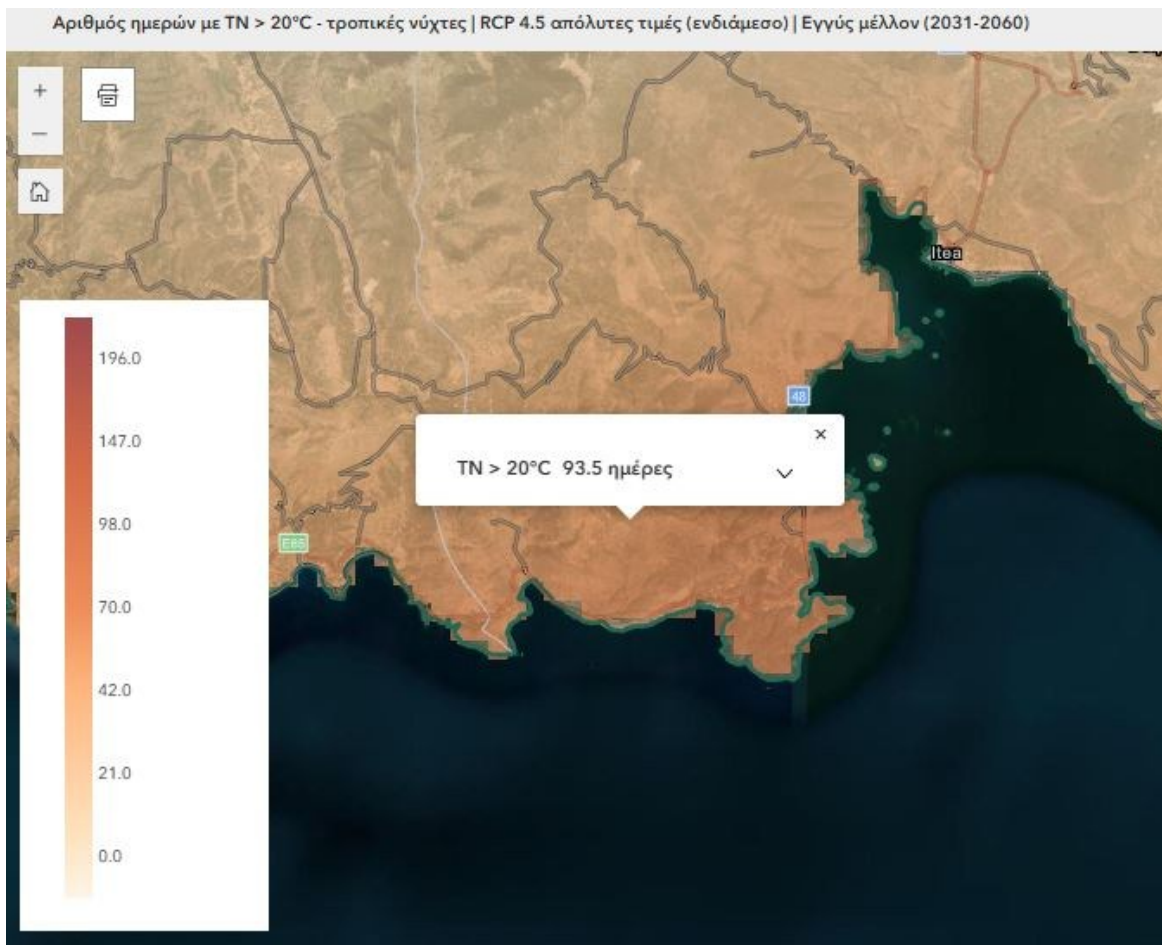
Εικόνα 6-19 Χάρτης Ολική βροχοπτώση (mm) - PR | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Ετήσιο (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



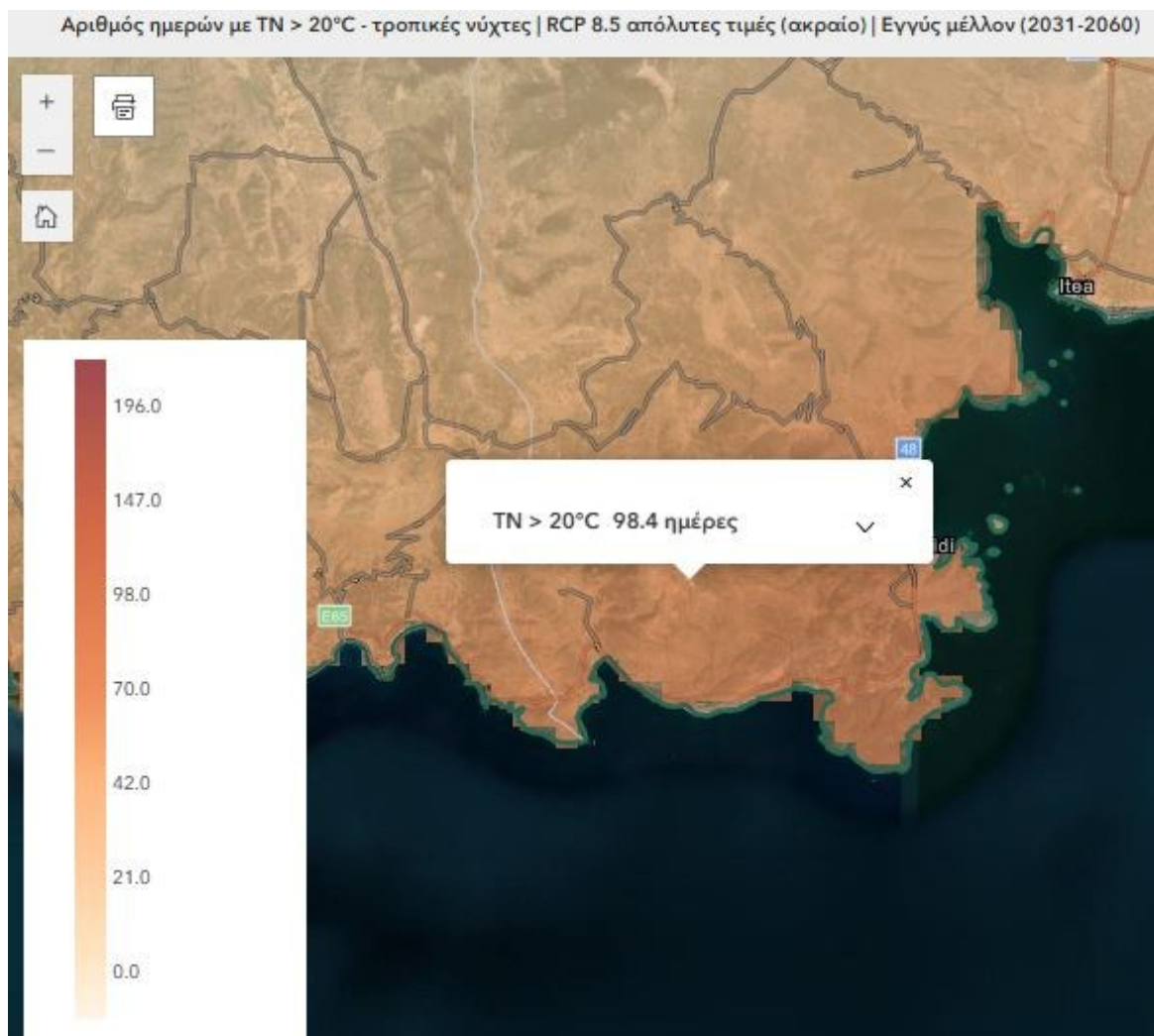
Εικόνα 6-20 Χάρτης Αριθμός ημερών με δείκτη δυσφορίας (humidex) > 46°C | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



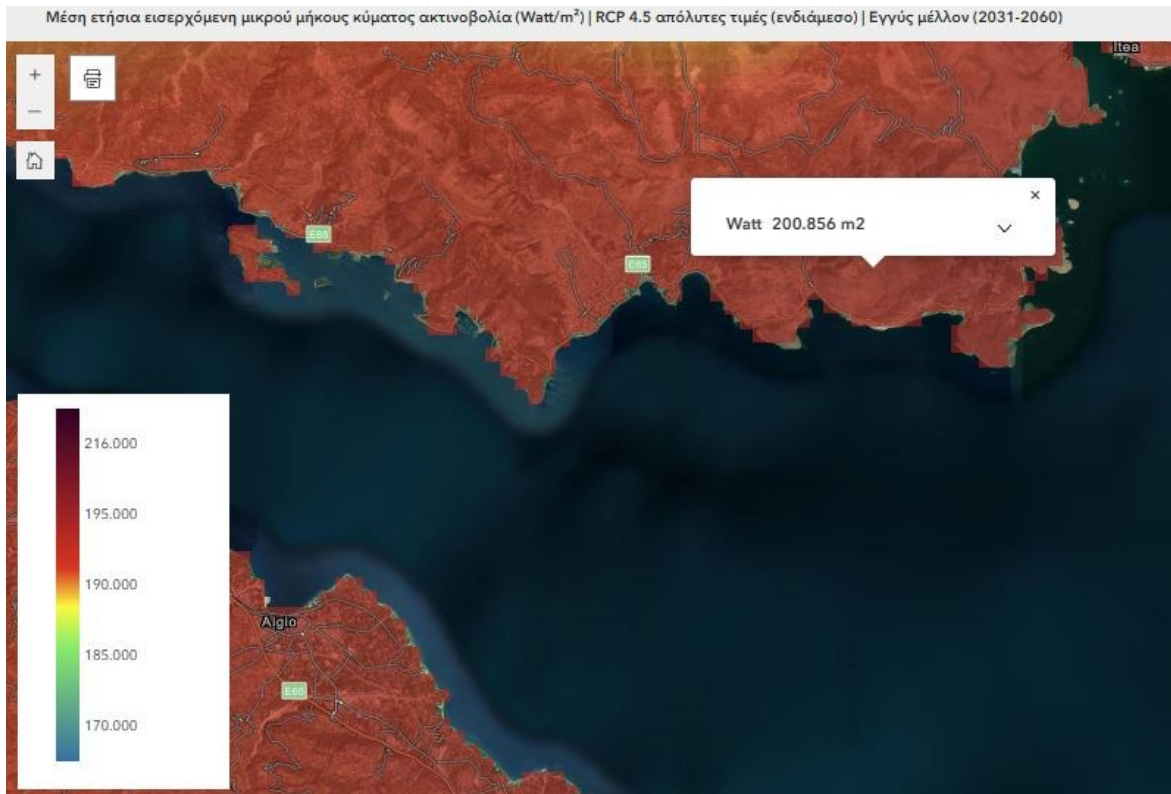
Εικόνα 6-21 Χάρτης Αριθμός ημερών με δείκτη δυσφορίας (humidex) > 46°C | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



Εικόνα 6-22 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN > 20^{\circ}\text{C}$ - τροπικές νύχτες | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



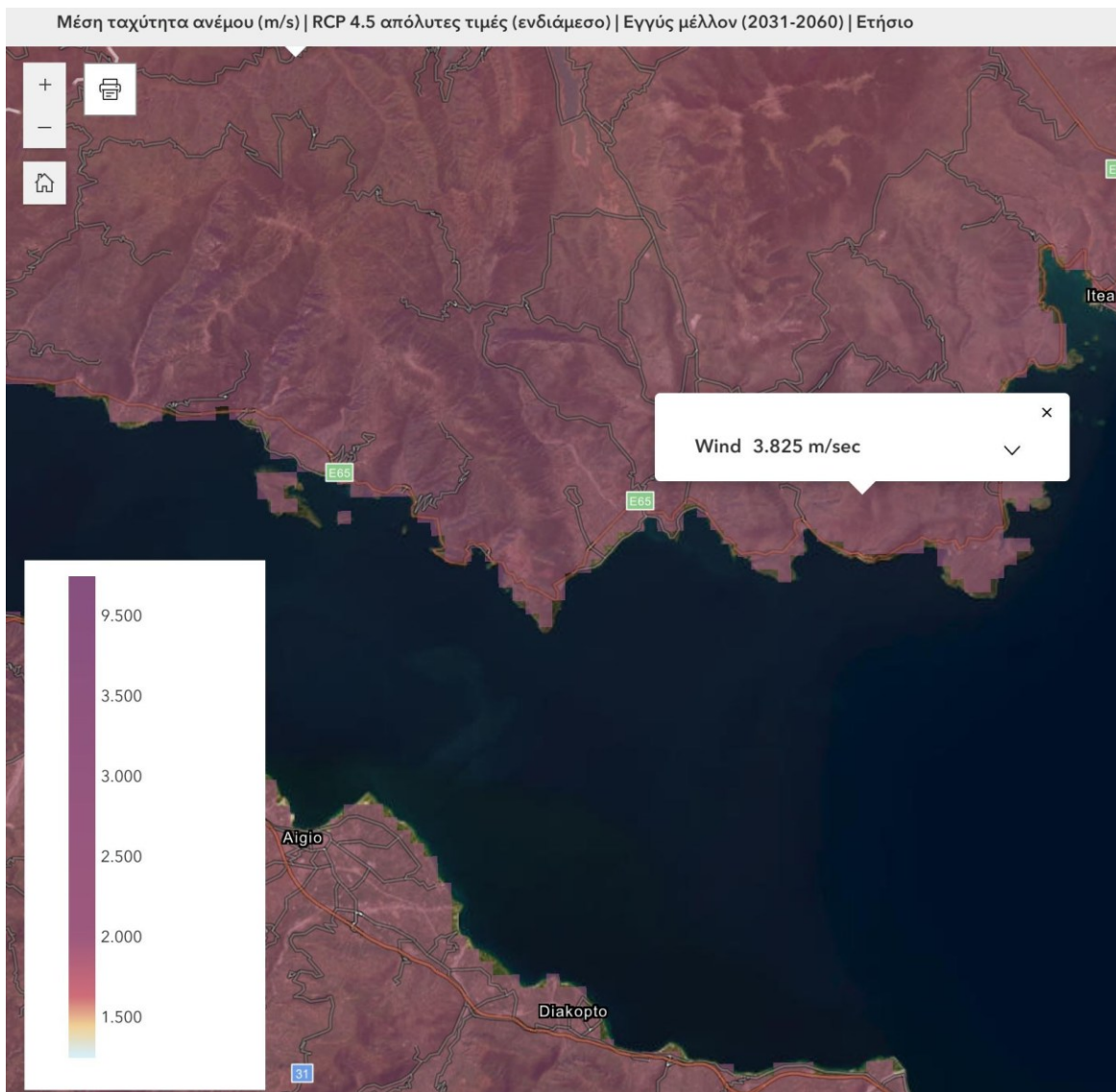
Εικόνα 6-23 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN > 20^{\circ}\text{C}$ - τροπικές νύχτες | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



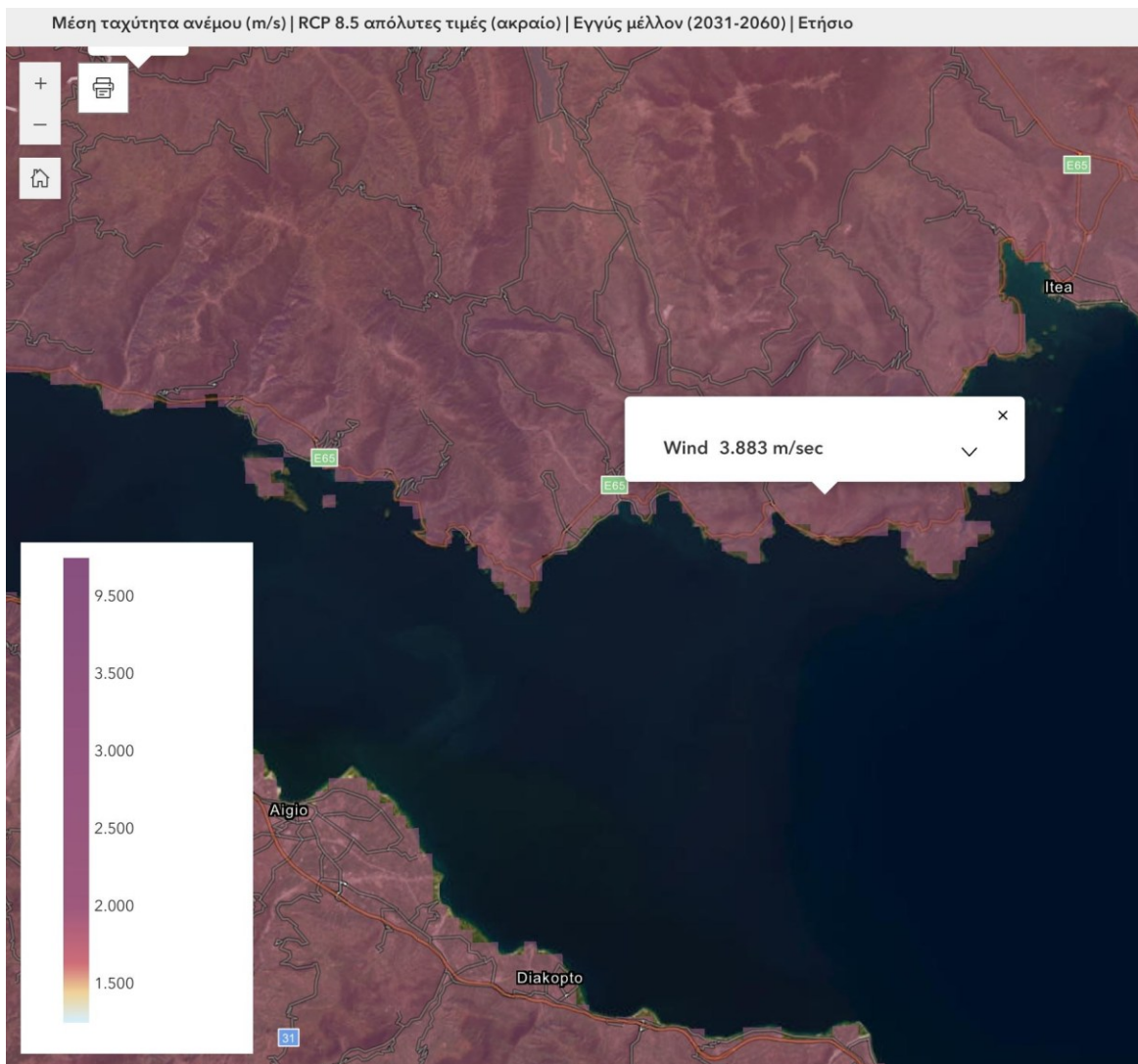
Εικόνα 6-24 Χάρτης Μέση ετήσια εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (Watt/m²) | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



Εικόνα 6-25 Χάρτης Μέση ετήσια εισερχόμενη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (Watt/m²) | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

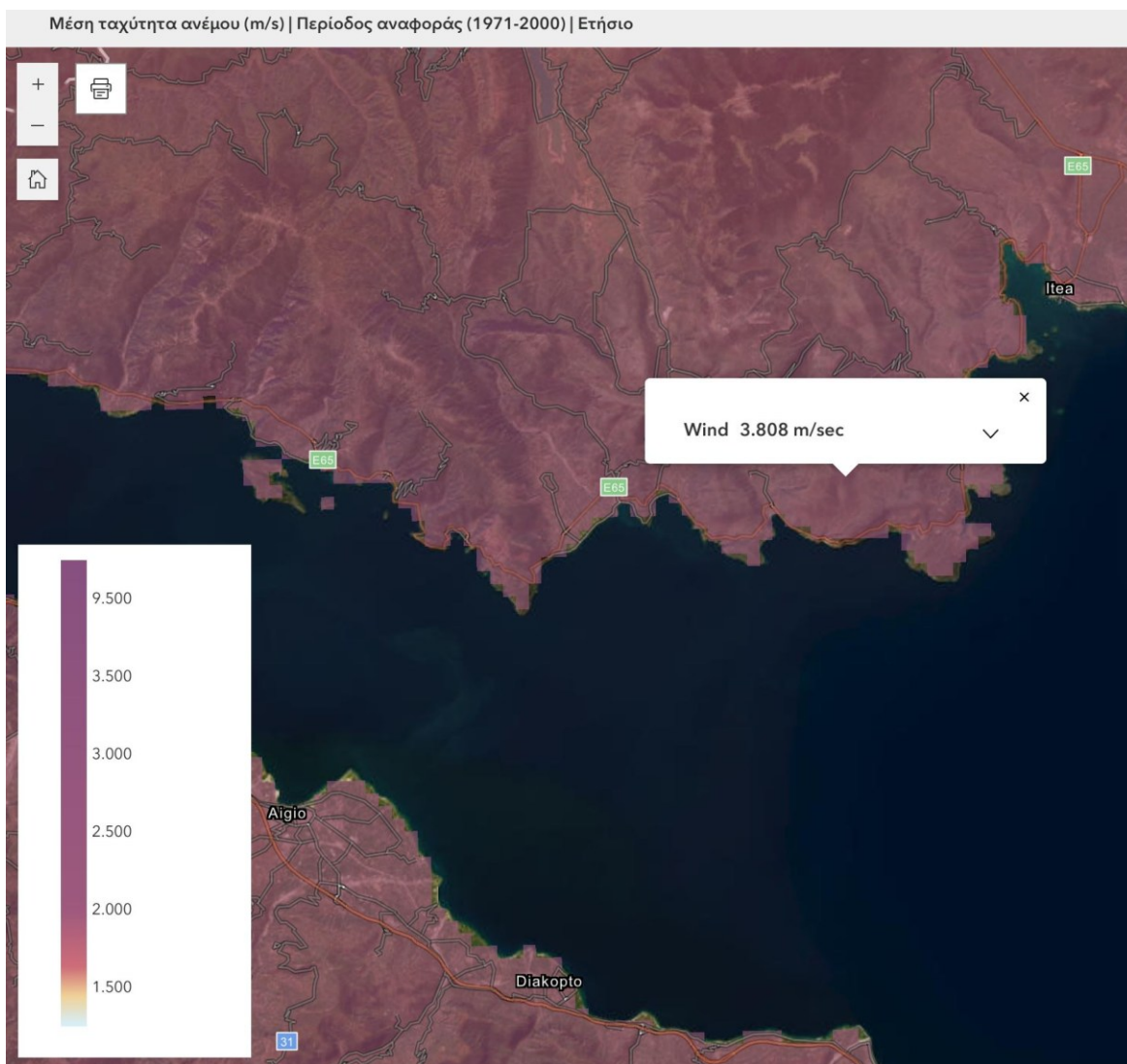


Εικόνα 6-26 Χάρτης Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Ετήσιο(Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

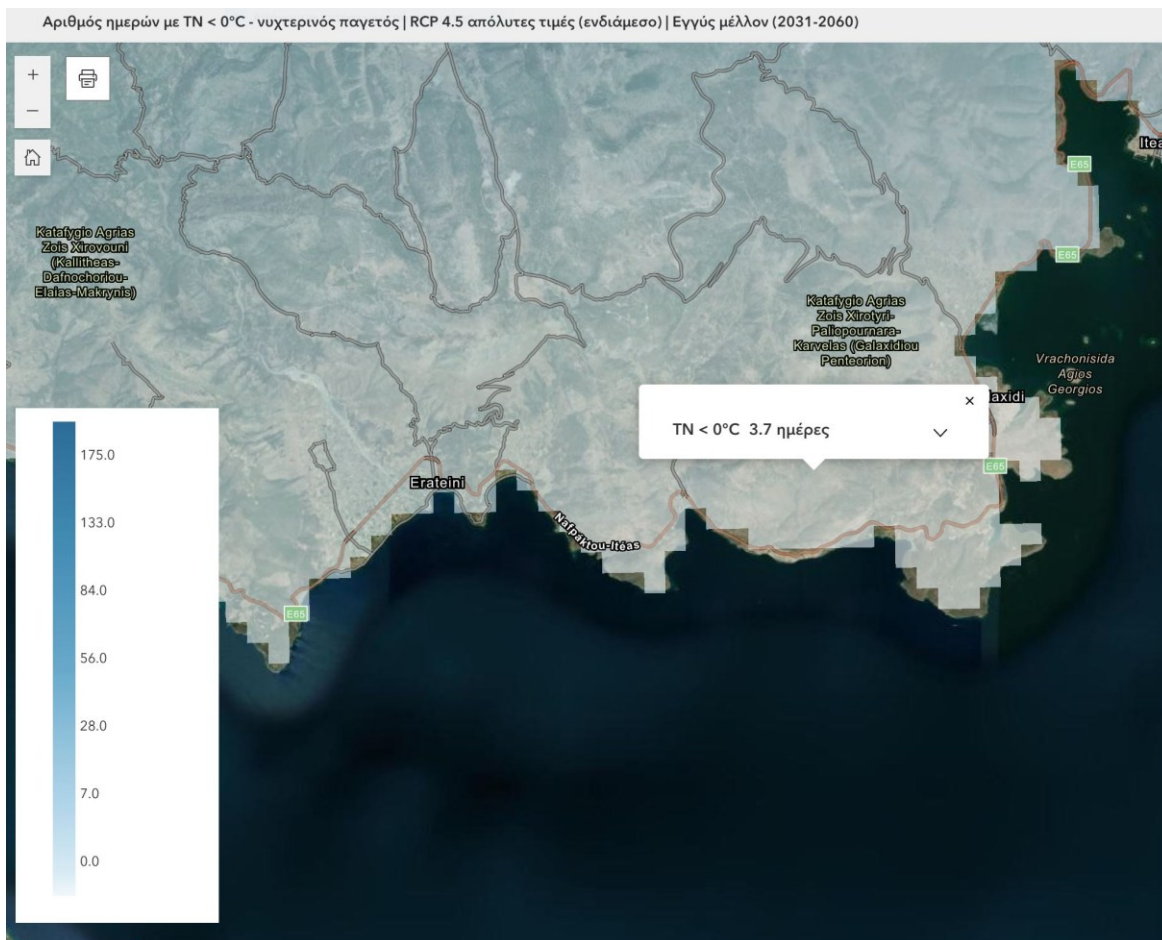


Εικόνα 6-27 Χάρτης Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) | Ετήσιο(Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

Για τις κλιματικές παραμέτρους της ταχύτητας του ανέμου, του παγετού/καύσωνα και της ξηρασίας και λόγω του ότι δεν υπάρχουν δεδομένα για την περιοχή του έργου στο ΠΕΣΚΠΑ Στερεάς Ελλάδας, διερευνάται η τιμή της μέσω του εργαλείου οπτικοποίησης γεωχωρικών δεδομένων του κόμβου (<https://geo.adaptivegreecehub.gr/>) και για την περίοδο αναφοράς 1971-2000. (Εικόνα 6-28, 6-31, 6-34 και 6-35).



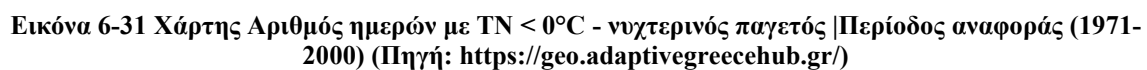
Εικόνα 6-28 Χάρτης Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) | Περίοδος αναφοράς (1971-2000) | Ετήσιο (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

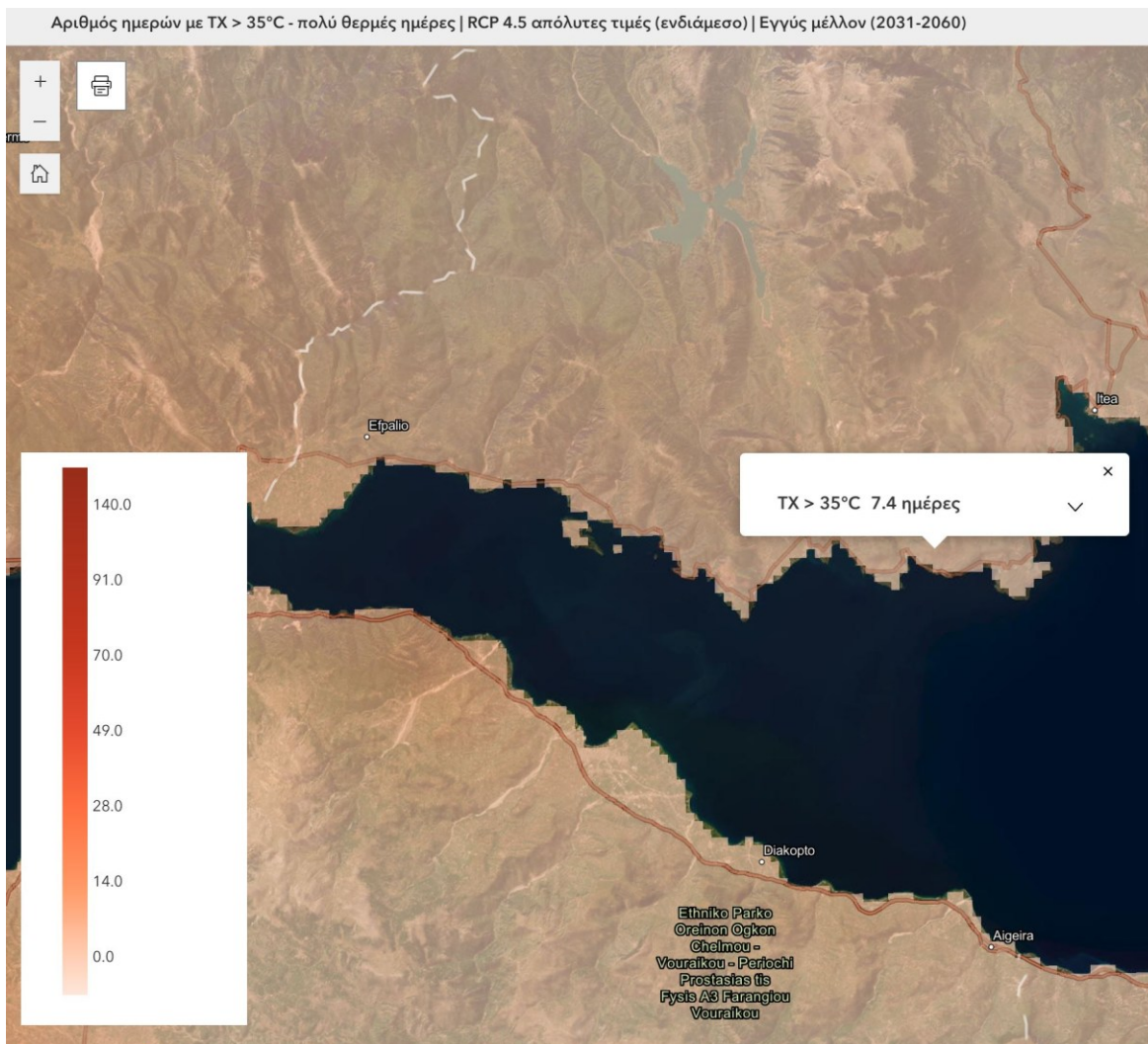


Εικόνα 6-29 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN < 0^{\circ}C$ - νυχτερινός παγετός | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

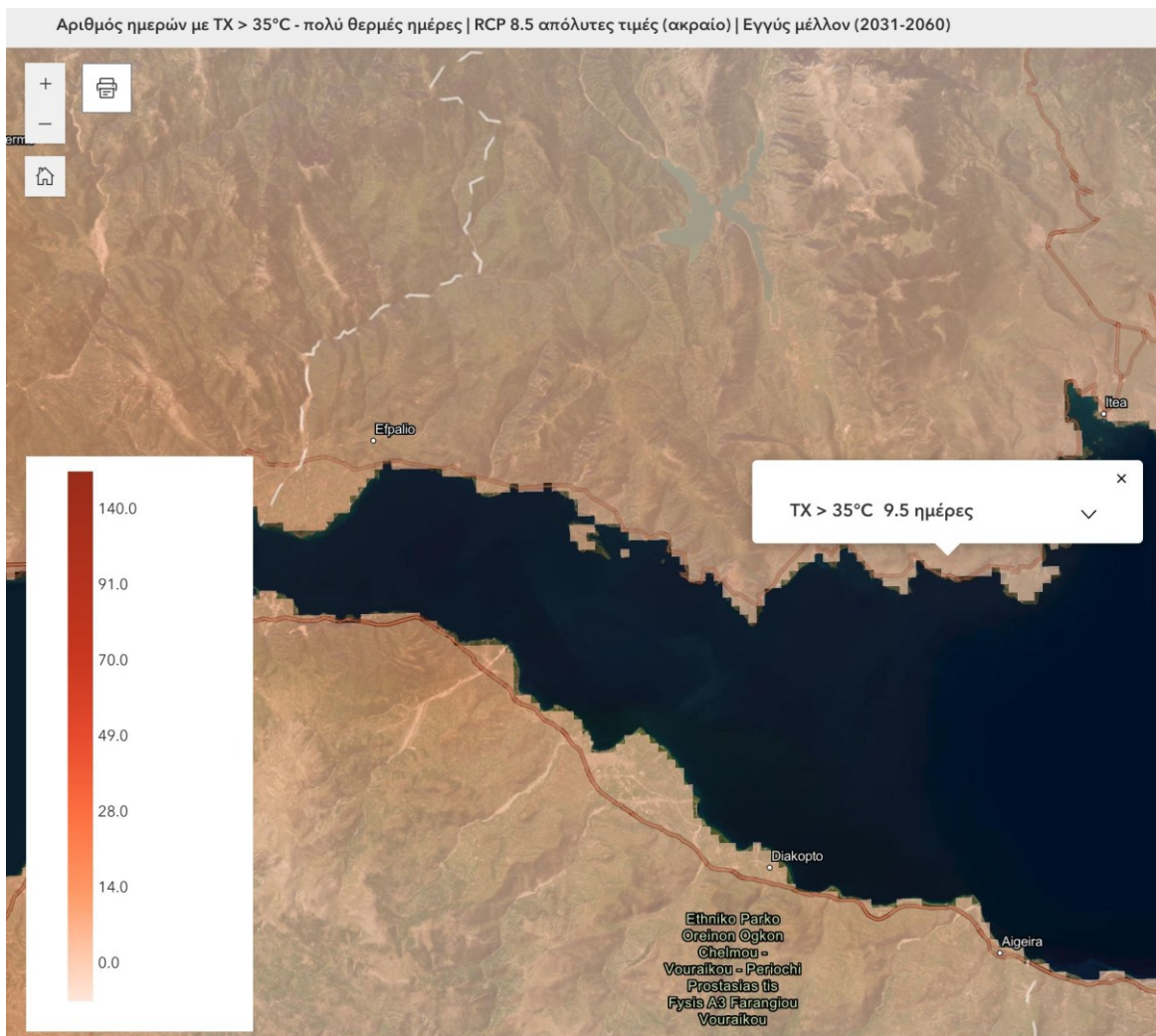


Εικόνα 6-30 Χάρτης Αριθμός ημερών με $TN < 0^{\circ}C$ - νυχτερινός παγετός | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)

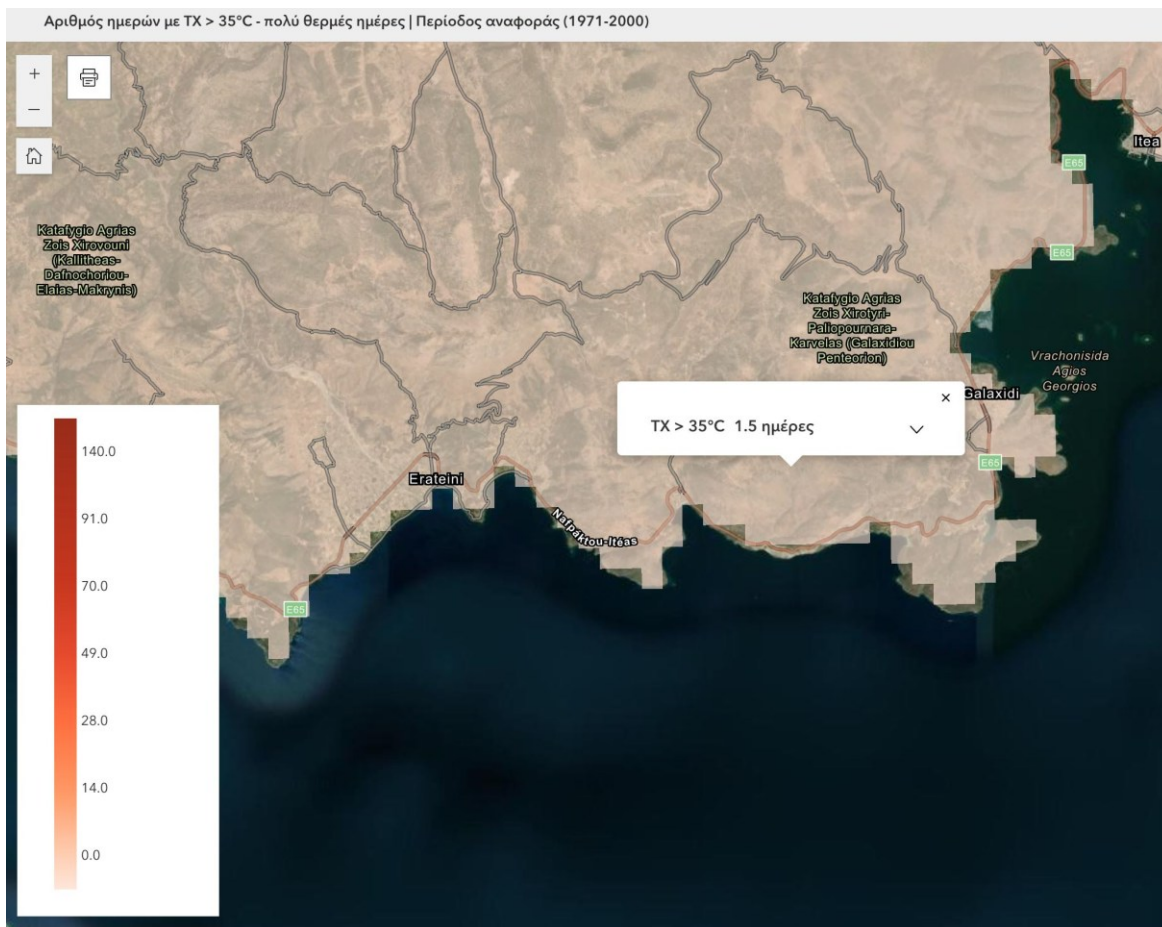




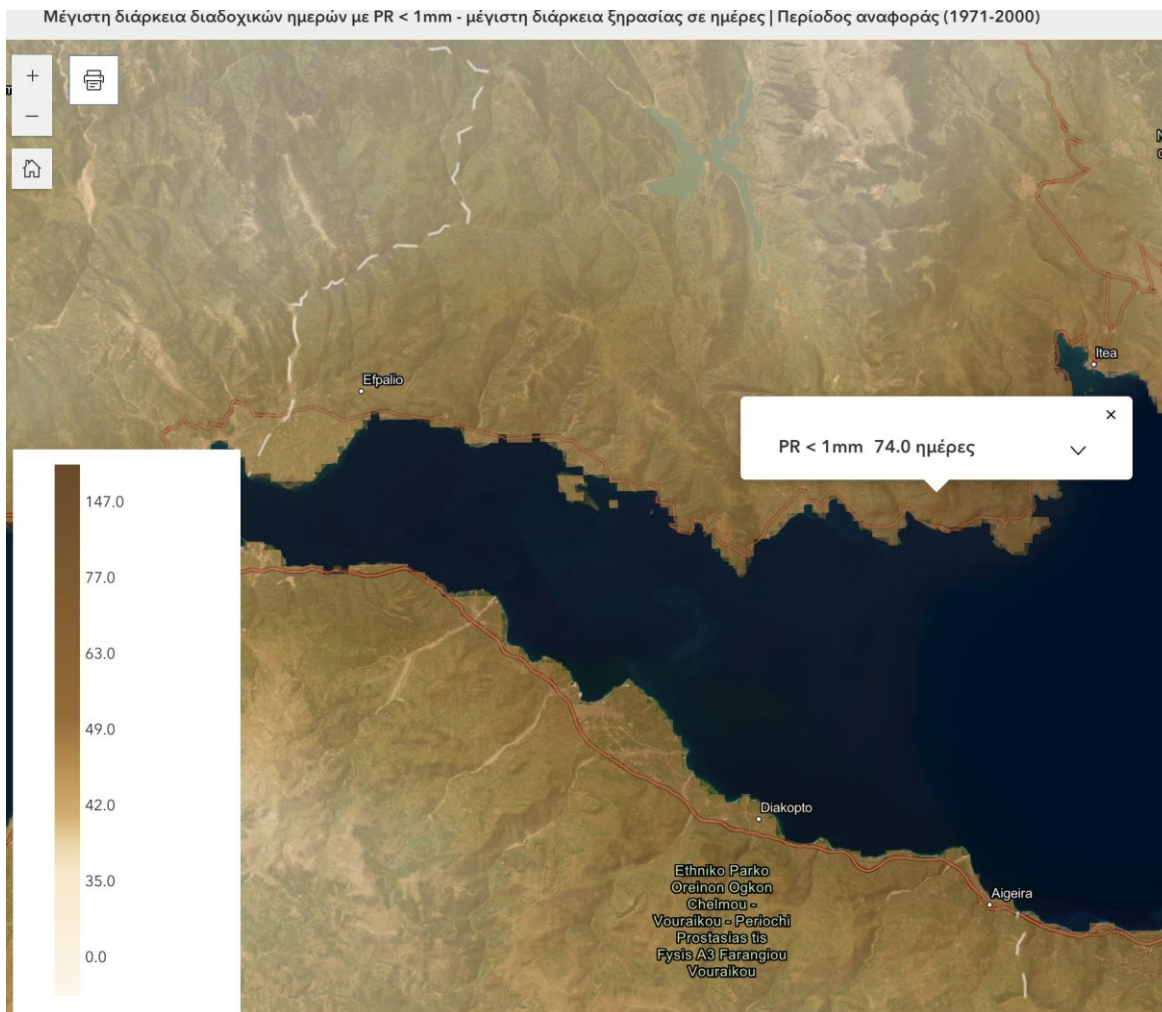
Εικόνα 6-32 Χάρτης Αριθμός ημερών με TX > 35°C - πολύ θερμές ημέρες | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



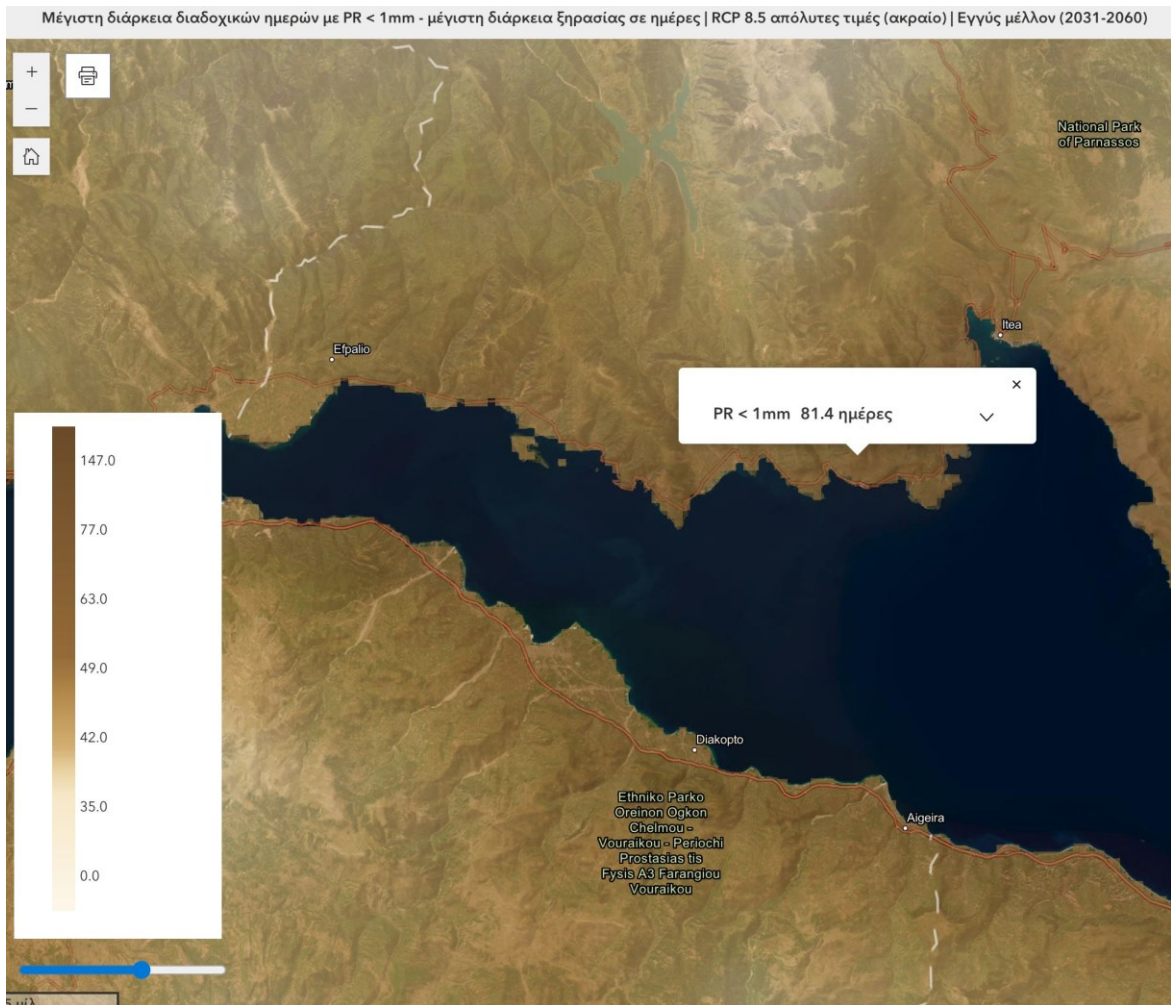
Εικόνα 6-33 Χάρτης Αριθμός ημερών με TX > 35°C - πολύ θερμές ημέρες | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



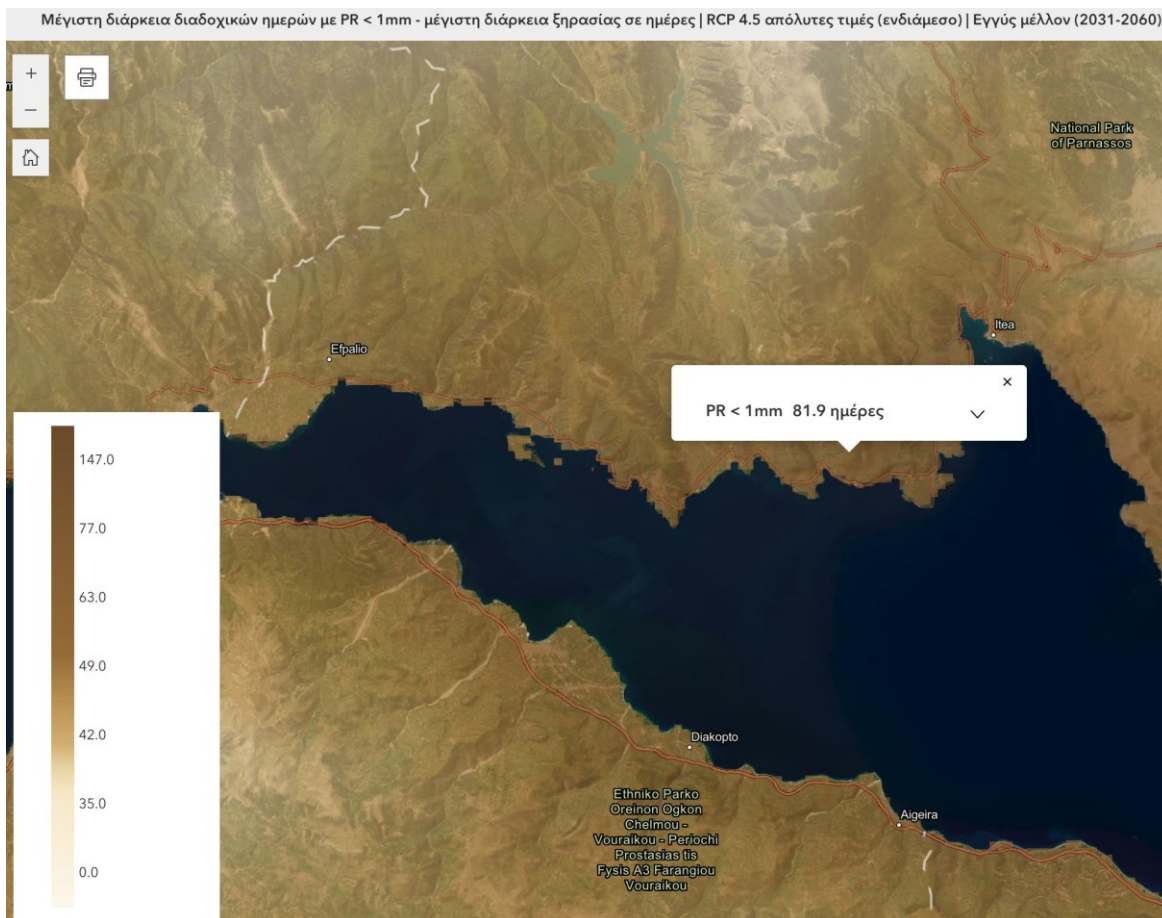
Εικόνα 6-34 Χάρτης Αριθμός ημερών με TX > 35°C - πολύ θερμές ημέρες | Περίοδος αναφοράς (1971-2000) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



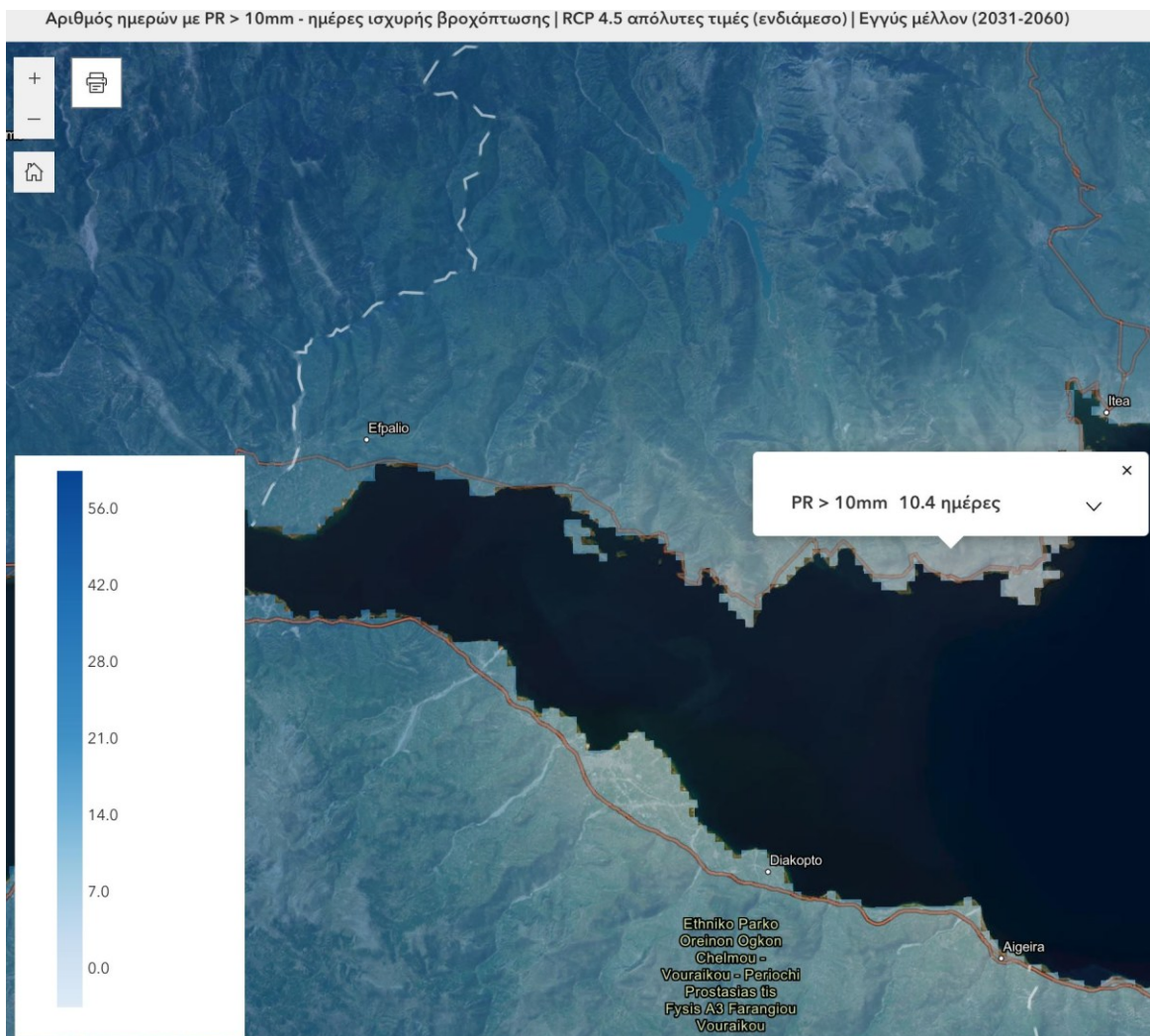
Εικόνα 6-35 Χάρτης Μέγιστη διάρκεια διαδοχικών ημερών με PR < 1mm - μέγιστη διάρκεια
ξηρασίας σε ημέρες | Περίοδος αναφοράς (1971-2000) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



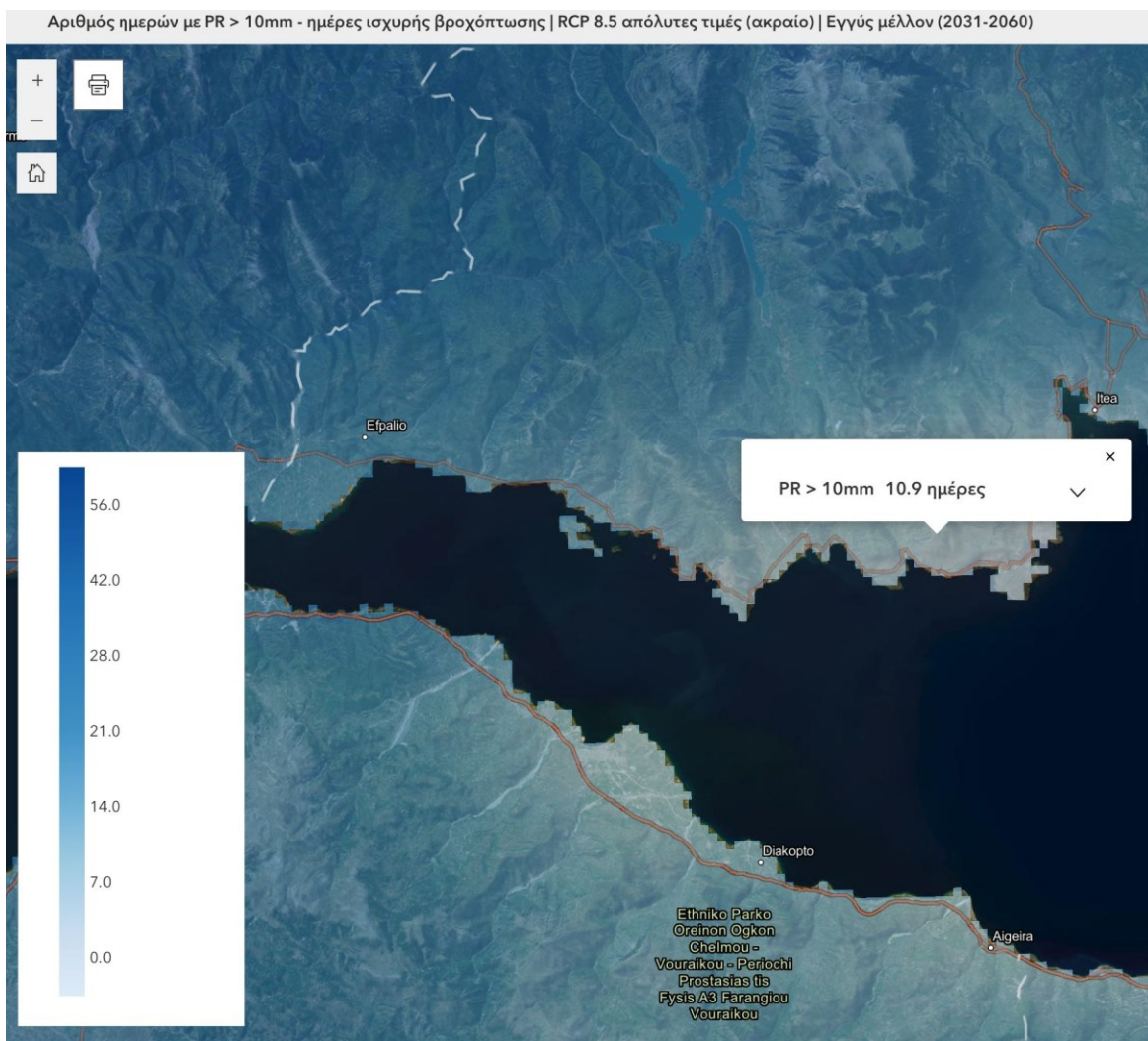
Εικόνα 6-36 Χάρτης Μέγιστη διάρκεια διαδοχικών ημερών με PR < 1mm - μέγιστη διάρκεια ξηρασίας σε ημέρες | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



Εικόνα 6-37 Χάρτης Μέγιστη διάρκεια διαδοχικών ημερών με PR < 1mm - μέγιστη διάρκεια ξηρασίας σε ημέρες | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ακραίο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060) (Πηγή: <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>)



Εικόνα 6-38 Αριθμός ημερών με PR > 10mm - ημέρες ισχυρής βροχόπτωσης | RCP 4.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060)



Εικόνα 6-39 Αριθμός ημερών με PR > 10mm - ημέρες ισχυρής βροχόπτωσης | RCP 8.5 απόλυτες τιμές (ενδιάμεσο) | Εγγύς μέλλον (2031-2060)

Στο πλαίσιο ελέγχου της έκθεσης του έργου σε πλημμυρικά φαινόμενα ελέγχονται δεδομένα αναφορικά με τη στάθμη της θάλασσας από το ΠΕΣΚΠΑ Στερεάς Ελλάδας καθώς και από τα ΣΔΚΠ των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07) και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04).

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα στο ΠΕΣΠΚΑ Στερεάς Ελλάδας σχετικά με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, οι διαφορές μεταξύ των δύο σεναρίων είναι σημαντικές κυρίως μεταξύ των σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5, για τα οποία προκύπτει αντίστοιχα

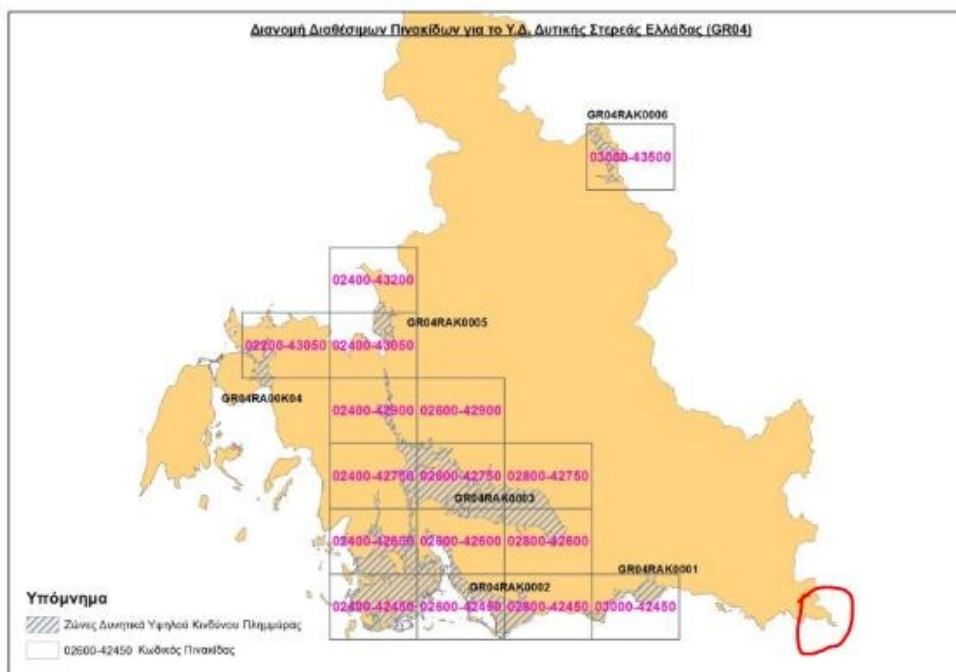
άνοδος κατά μέσο όρο 54cm και κατά 74cm με μέγιστη τιμή εύρους τα 98cm το 2100 (Πίνακας 6-3).

Πίνακας 6-3 Εκτίμηση ανόδου (μέσος όρος και εύρος) της της μέσης παγκόσμιας στάθμης θάλασσας σε cm για τα έτη 2020, 2050, 2080 και τις περιόδους 2021-2050 από το 2000 (Πηγή: ΠΕΣΠΚΑ, 2018)

Σενάριο	2020	2021-2050	2050	2080	2081-2100	2100
RCP4.5	7 +/- 2	15 +/- 3	23 +/- 4	40 +/- 8	48 +/-14	54 +/- 17
RCP8.5	7 +/- 2	15 +/- 4	25 +/- 6	50 +/- 13	63 +/- 18	74 +/- 24

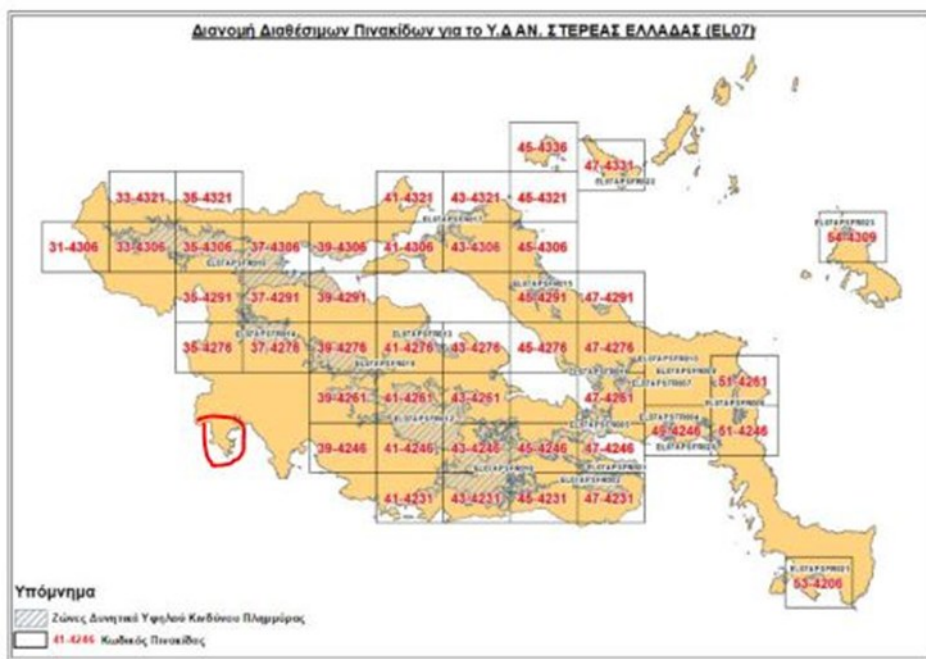
Η συγκεκριμένη περιοχή ελέγχου του έργου παράλληλα φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται άμεσα από δυνητικά πλημμυρικά φαινόμενα, όπως προκύπτει από τα ΣΔΚΠ των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07) και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04) (Εικόνες 6-40, 6-42).

ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04)



Εικόνα 6-40 Ζώνες Δυνητικού Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας για το ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2024)

ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07)





Εικόνα 6-42 Χάρτης ετήσιας εδαφικής απώλειας (ΕΑ) από βροχοπτώσεις στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδος σε t/ha (λευκό=0, ανοικτό πράσινο= $0 < EA < 5$, βαθύ πράσινο= $5 < EA < 10$, κίτρινο= $10 < EA < 20$, πορτοκαλί= $20 < EA < 50$ και κόκκινο= ≥ 50) (Ειδική Υπηρεσία Υδάτων 2018β, όπως εμφανίζεται στο Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας, 2018).

Με τη μελέτη και παρατήρηση των παραπάνω αποσπασμάτων σχετικά με την κλιματική μεταβλητότητα της περιοχής ελέγχου του έργου ως προς τις συγκεκριμένες κλιματικές παραμέτρους και για τη μελλοντική περίοδο 2031-2060 (εγγύς μέλλον), προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Προβλέπεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στους 26.4°C για το ενδιάμεσο σενάριο RCP4.5 και στους 26.1 για το ακραίο σενάριο RCP8.5, της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας στους 20.6°C και 21.1°C για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 αντίστοιχα και πιο συγκεκριμένα για την καλοκαιρινή περίοδο προβλέπεται

μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας κατά 2.1 °C και κατά 2.5°C αντίστοιχα. Γενικά η θερμοκρασία κινείται σε υψηλά επίπεδα.

- Προβλέπεται σημαντική αύξηση των πολύ θερμών ημερών (ημερών με TX > 35°C) κατά 6 και 8 ημέρες για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 αντίστοιχα.
- Προβλέπεται μικρή αύξηση της σχετικής υγρασίας από 64.1% σε 64.6% σε χαμηλές γενικά τιμές όπως και της ολικής βροχόπτωσης από 168.5mm σε 169.9mm για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5.
- Δεν προβλέπεται σημαντική αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου.
- Δεν προβλέπεται αύξηση των ημερών ισχυρής βροχόπτωσης με PR > 10mm μεταξύ των δυο σεναρίων και οι τιμές έως το 2000 θεωρούνται χαμηλές.
- Προβλέπεται αύξηση των τροπικών νυκτών μεταξύ των δυο σεναρίων κατά 5 σχεδόν τον αριθμό και μείωση των ημερών δυσφορίας, οι τιμές των οποίων είναι υψηλές και για τα δυο σενάρια.
- Προβλέπεται χαμηλή νεφοκάλυψη το ποσοστό της οποίας μειώνεται μεταξύ των δυο σεναρίων.
- Προβλέπεται σημαντική αύξηση της τάξης των 5 σχεδόν ημερών μεταξύ των δύο σεναρίων αναφορικά με τον αριθμό ημερών με ακραίο κίνδυνο εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς (FWI > 50⁹), δείκτης που είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα.
- Προβλέπεται αύξηση των ημερών ξηρασίας από 74ημέρες (περίοδος αναφοράς) σε 81ημέρες (και για τα δύο μελλοντικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5).
- Προβλέπεται αύξηση της μέσης ετήσιας εισερχόμενης μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας (Watt/m²) ενώ οι τιμές θεωρούνται πολύ υψηλές για την περιοχή.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται και στο ΠΕΣΚΠΑ Στερεάς Ελλάδας οι πιθανές επιδράσεις στην απόδοση των ΦΒ τα οποία αποτελούν τη δεύτερη σε ισχύ τεχνολογία ΑΠΕ προέρχονται «από την αύξηση της ηλιοφάνειας που αυξάνει της απόδοσή τους και την αύξηση της θερμοκρασίας που την μειώνει... Η μείωση της απόδοσης των Φ/Β είναι σχεδόν γραμμική

⁹ Fire Weather Index: a meteorologically based index used worldwide to estimate fire danger. It consists of different components that account for the effects of fuel moisture and wind on fire behaviour and spread. The higher the FWI is, the more favourable the meteorological conditions to trigger a wildfire are. This indicator can help shape long-term tourist strategy and to plan future investments under a changing climate.(Πηγή: <https://climate.copernicus.eu/>)

με την θερμοκρασία με τιμή της τάξεως του 0,50% /ο C. Η παραγόμενη ενέργεια είναι επίσης γραμμική συνάρτηση της ηλιοφάνειας.

Ο συνδυασμός των 2 επιπτώσεων καταλήγει σε μία ελαφρά θετική τιμή της τάξεως του 1 – 2% που σημαίνει πολύ χαμηλή θετική επίπτωση της Κλιματικής Αλλαγής».

Ακολουθεί πίνακας (Πίν. 6-4) για την Ανάλυση Έκθεσης όπως εξάγεται από το εργαλείο excel που αναπτύχθηκε από την Γ.Γ. Δημοσίων Επενδύσεων & ΕΣΠΑ.

Πίνακας 6-4 Ανάλυση έκθεσης σε οξείς κινδύνους Φ/Β έργου μελέτης περίπτωσης

Ανάλυση τρωτότητας για το Έργο:					
Ομάδα	Πηγή Κινδύνου	Έκθεση			Τρωτότητα
		Υφιστάμενες συνθήκες	Μελλοντικές συνθήκες	Σύνολο Έκθεσης	
Οξείς κίνδυνοι	Καύσωνας	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Κύμα ψύχους	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Παγετός (Αριθμός Ημερών με TN<0)	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Δασική πυρκαγιά	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Κυκλώνας, Ισχυρές Καταιγίδες, τυφώνας	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Θύελλα (περιλαμβάνονται χιονοθύελλες, θύελλες σκόνης)	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Ανεμοστρόβιλος/Θυελλώδεις Άνεμοι	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Ξηρασία	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή
	Ισχυρός υετός (βροχή, χαλάζι, χιόνι/πάγος)	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Πλημμύρα (σε παράκτιες περιοχές, ποτάμια, λόγω βροχής, υπόγεια ύδατα)	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Κατολίσθηση/Διάβρωση του εδάφους	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Καθίζηση	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Χρόνιοι κίνδυνοι	Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του αέρα	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Αστική θερμονησίδα			Χαμηλή	Χαμηλή
	Θερμική καταπόνηση	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Μεταβλητότητα της θερμοκρασίας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Μεταβολή χαρακτηριστικών των ανέμων	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβολή χαρακτηριστικών και τύπων υετού (βροχή, χαλάζι, χιόνι/πάγος)			Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβλητότητα υετού ή υδρολογική μεταβλητότητα			Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του νερού σε υδάτινα σώματα			Χαμηλή	Χαμηλή
	Οξίνιση/αλατότητα του θαλάσσιου ύδατος			Χαμηλή	Χαμηλή
	Διείσδυση αλμυρού νερού, υφαλμύριση επιφανειακών & υπόγειων υδάτων			Χαμηλή	Χαμηλή
	Άνοδος της στάθμης της θάλασσας	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή

Από την ανάλυση τρωτότητας προκύπτει ότι το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό έργο παρουσιάζει **υψηλή** τρωτότητα στους κάτωθι κινδύνους:

Οξείς

Καύσωνας

Δασική Πυρκαγιά

Χρόνιοι

Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας

Παράλληλα το παρόν έργο χαρακτηρίζεται από **μέτρια** τρωτότητα στους κάτωθι κινδύνους:

Οξείς

Ακραία Καιρικά Φαινόμενα όπως θύελλες, κυκλώνες, ισχυρές βροχοπτώσεις, καταιγίδες.

Χρόνιοι

Θερμική καταπόνηση

Μεταβλητότητα θερμοκρασίας

Εφόσον εμφανίζεται υψηλή και μέτρια τρωτότητα του έργου για ορισμένες πηγές κινδύνου, θα πρέπει να διενεργηθεί λεπτομερής ανάλυση διακινδύνευσης (risk assessment) για καθεμία από αυτές, προκειμένου να υπολογιστεί ο εγγενής κίνδυνος και, εφόσον απαιτείται, να ληφθούν πρόσθετα μέτρα έτσι ώστε να μειωθεί ο υπολειπόμενος κίνδυνος. (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022)

6.3 Λεπτομερής Ανάλυση Διακινδύνευσης

Σύμφωνα με το Προσωρινό Πλαίσιο Αξιολόγησης Κλιματικής Ανθεκτικότητας, η ανάλυση διακινδύνευσης (risk assessment) ορίζεται ως «ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης κάθε πηγής κινδύνου που προσδιορίζεται στο στάδιο προελέγχου της τρωτότητας και της αναμενόμενης έντασης των επιπτώσεων αυτής της πηγής κινδύνου (hazard). (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022).

Με τη βοήθεια του σχετικού αρχείου excel το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον αρχικό υπολογισμό της τρωτότητας, για κάθε κίνδυνο για τον οποίο εμφανίστηκε υψηλού ή μετρίου επιπέδου τρωτότητας, επιλέγεται η πιθανότητα εμφάνισής του και προσδιορίζεται το μέγεθος της αναμενόμενης επίπτωσης στο έργο.

Ακολουθεί πίνακας για την Ανάλυση Διακινδύνευσης για το έργο, όπως εξάγεται από το εργαλείο excel που αναπτύχθηκε από την Γ.Γ. Δημοσίων Επενδύσεων & ΕΣΠΑ. (Πίνακας 6-5)

Πίνακας 6-5 Ανάλυση Διακινδύνευσης για το ΦΒ έργο

Πηγή Κινδύνου	Τρωτότητα	Πιθανότητα εμφάνισης	Κλίμακα συνεπειών	Εγγενής κίνδυνος	
				Βαθμολογία	Περιγραφή
Καύσωνας	Υψηλή	Σχεδόν βέβαιο	Μέτριες	15	Σημαντικός
Δασική πυρκαγιά	Υψηλή	Σχεδόν βέβαιο	Σημαντικές	20	Πολύ σημαντικός
Κυκλώνας, Ισχυρές Καταιγίδες, τυφώνας	Μέτρια	Μέτριο	Μέτριες	9	Μέτριος
Θύελλα (περιλαμβάνονται χιονοθύελλες, θύελλες σκόνης)	Μέτρια	Απίθανο	Μέτριες	6	Χαμηλός
Ανεμοστρόβιλος/Θυελλώδεις Άνεμοι	Μέτρια	Απίθανο	Σημαντικές	8	Μέτριος
Πλημμύρα (σε παράκτιες περιοχές, ποτάμια, λόγω βροχής, υπόγεια ύδατα)	Μέτρια	Μέτριο	Μέτριες	9	Μέτριος
Θερμική καταπόνηση	Μέτρια	Πιθανό	Σημαντικές	16	Σημαντικός
Μεταβλητότητα της θερμοκρασίας	Μέτρια	Πιθανό	Σημαντικές	16	Σημαντικός
Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας	Υψηλή	Σχεδόν βέβαιο	Σημαντικές	20	Πολύ σημαντικός

Χαρακτηριστικά προκύπτει πολύ σημαντικός εγγενής κίνδυνος για το έργο από δασική πυρκαγιά και από τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, σημαντικός εγγενής κίνδυνος από καύσωνα, θερμική καταπόνηση και μεταβλητότητα της θερμοκρασίας και μέτριος εγγενής κίνδυνος από πλημμύρες, θύελλες, ανεμοστρόβιλους, κυκλώνες και ισχυρές βροχοπτώσεις.

6.4 Μέτρα για την ενίσχυση της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Ο βασικός στόχος της διαδικασίας αποτίμησης της κλιματικής τρωτότητας ενός έργου και εν προκειμένω του φωτοβολταϊκού πάρκου όπως αναλύθηκε παραπάνω, δεν είναι άλλος από την επιλογή των κατάλληλων μέτρων τα οποία επιβάλλεται να ληφθούν, τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τους διαχειριστές και εν γένει εμπλεκόμενους στη περαιτέρω λειτουργία του έργου, για τη μέγιστη δυνατή απόδοση και αποτελεσματικότητά του υπό το πρίσμα της ομαλής προσαρμογής του στους προκριθέντες εγγενείς κινδύνους από την ανάλυση τρωτότητας του έργου. Ο σχεδιασμός των κατάλληλων μέτρων και η επιτυχής εφαρμογή τους αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα του έργου.

Σύμφωνα λοιπόν με την ανάλυση τρωτότητας της προηγούμενης ενότητας προκύπτουν συγκεκριμένοι κίνδυνοι για τους οποίους μπορούν να προταθούν στοχευμένα μέτρα προσαρμογής.

Δασική πυρκαγιά

- ❖ Χρήση αντικεραυνικής προστασίας καθώς και η γείωση μεταλλικών μερών του εξοπλισμού.
- ❖ Η δημιουργία αντιπυρικής ζώνης και/ή αποφυγή φύτευσης πυριγενών φυτών κοντά στα όρια του έργου.
- ❖ Εγκατάσταση συστήματος ανίχνευσης καπνού και συστήματα αντιπυρικής προστασίας
- ❖ Δυνατότητα χρήσης ασυρμάτων για τον συντονισμό ενεργειών ένα προκύψει κίνδυνος.
- ❖ Τακτικός έλεγχος της γύρω περιοχής και καθαρισμός της από απορρίμματα και τυχόν ξηρή βλάστηση.

Ηλιακή ακτινοβολία

- ❖ Για τη βέλτιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού απαιτείται σταθεροποίηση της επιφανειακής θερμότητας παρά την αύξηση λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό στρώμα του φωτοβολταϊκού, και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση συστημάτων ψύξης (Harmailil et al., 2024)
- ❖ Χρήση στηρίξεων με δυνατότητα περιστροφής των πάνελ ad hoc.

Καύσωνας-Θερμική καταπόνηση-Μεταβλητότητα Θερμοκρασίας

Σύμφωνα με τις δράσεις όπως αναφέρονται στην Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (2016), προτείνονται τα κάτωθι μέτρα προσαρμογής :

- ❖ Εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών ψύξης των θερμικών μονάδων ή χρήση οικισκών με κλιματιστικές μονάδες για τον καλό αερισμό του εξοπλισμού, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση.
- ❖ Εφαρμογή μεθόδων για διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας.

- ❖ Όπως αναφέρουν ειδικότερα σε μελέτη τους οι Okonkwo et al (2025) η χρήση πολυστρωματικών οπίσθιων φύλλων από φθοροπολυμερή που διατηρούν την ευκαμψία και τις μονωτικές τους ιδιότητες μπορούν να διασφαλίσουν την ηλεκτρική απόδοση εμποδίζοντας τη δημιουργία ρωγμών.

Θύελλες, ανεμοστρόβιλους, κυκλώνες και ισχυρές βροχοπτώσεις

- ❖ Χρήση ανθεκτικών συστημάτων στήριξης στον άνεμο που δύνανται να χρησιμοποιούν προηγμένα αεροδυναμικά σχέδια ώστε να μειώνονται αποτελεσματικά τα φορτία από δυνατούς ανέμους (Okonkwo et al., 2025)
- ❖ Τακτικός καθαρισμός των πάνελ από υπολείμματα σκόνης ή και άλλων σωματιδίων λόγω των ανέμων (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2016).
- ❖ Εναλλακτική χρήση σύγχρονων τεχνολογικά φωτοβολταϊκών όπως διπλής όψης φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα διαφανή πάνελ, τα συστήματα παρακολούθησης που ακολουθούν την πορεία του ήλιου και τα εύκαμπτα φωτοβολταϊκά υλικά ώστε να αντισταθμίζονται καλύτερα οι παρενέργειες των ακραίων καιρικών φαινομένων (Ahemd et al., 2025).

Πλημμύρες

- ❖ Διαμόρφωση ανάγλυφου στο γήπεδο χωροθέτησης με την πρόβλεψη κατάλληλης κλίσης για τη φυσική αποστράγγιση της ευρύτερης περιοχής του έργου.
- ❖ Ενίσχυση κατάλληλης φυτοκάλυψης πέριξ του γηπέδου του έργου για τη μείωση του χρόνου απορροής σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης και την αύξηση της υδατοπερατότητας.
- ❖ Δημιουργία αναχωμάτων ή πρόβλεψη άλλων υδραυλικών έργων για την ανάσχεση πλημμυρικών φαινομένων.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από την πιστή εφαρμογή του Προσωρινού Πλαισίου Αξιολόγησης Κλιματικής Ανθεκτικότητας για φωτοβολταϊκό έργο σύγχρονης τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού πυριτίου με ενσωματωμένη αποθήκευση στην περιοχή της Δ. Ενότητας Γαλαξιδίου του Δ. Δελφών, σε Προστατευόμενη Περιοχή εντός του Δικτύου Natura 2000, προκύπτει χαρακτηριστικά α.πολύ σημαντικός εγγενής κίνδυνος για το έργο από δασική πυρκαγιά και από τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, β.σημαντικός εγγενής κίνδυνος από καύσιμα, θερμική καταπόνηση και μεταβλητότητα της θερμοκρασίας και τέλος γ.μέτριος εγγενής κίνδυνος από πλημμύρες, θύελλες, ανεμοστρόβιλους, κυκλώνες και ισχυρές βροχοπτώσεις.

Για την προσαρμογή του έργου στις παραπάνω απειλές και την αποτελεσματική απομείωση του πολύ σημαντικού, σημαντικού και μέτριου κινδύνου η εργασία καταλήγει σε στοχευμένα μέτρα προσαρμογής.

Πιο συγκεκριμένα για τη μείωση του πολύ σημαντικού εγγενούς κινδύνου σε δασική πυρκαγιά προτείνονται η χρήση αντικεραυνικής προστασίας καθώς και η γείωση μεταλλικών μερών του εξοπλισμού, η δημιουργία αντιπυρικής ζώνης και/ή αποφυγή φύτευσης πυριγενών φυτών κοντά στα όρια του έργου, η εγκατάσταση συστήματος ανίχνευσης καπνού και συστήματα αντιπυρικής προστασίας, η χρήση ασυρμάτων για τον συντονισμό ενεργειών, ο τακτικός έλεγχος της γύρω περιοχής, όπως και ο καθαρισμός της από απορρίμματα και τυχόν ξηρή βλάστηση. Για τη μείωση του αντίστοιχου κινδύνου στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας τα προτεινόμενα μέτρα είναι η χρήση συστημάτων ψύξης και στηρίξεων με δυνατότητα περιστροφής των πάνελ ad hoc. Επιπλέον για τη μείωση του σημαντικού εγγενούς κινδύνου σε καύσιμα, θερμική καταπόνηση, και μεταβλητότητα θερμοκρασίας ενδεδειγμένα θεωρούνται μέτρα όπως, η εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών ψύξης των θερμικών μονάδων ή χρήση οικισκών με κλιματιστικές μονάδες για τον καλό αερισμό του εξοπλισμού, η εφαρμογή μεθόδων για διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας αλλά και η χρήση πολυστρωματικών οπίσθιων φύλλων από φθοροπολυμερή που διατηρούν την ευκαμψία και τις μονωτικές τους ιδιότητες μπορούν να διασφαλίσουν την ηλεκτρική απόδοση εμποδίζοντας τη δημιουργία ρωγμών. Τέλος ο μέτριος εγγενής κίνδυνος από πλημμύρες, θύελλες, ανεμοστρόβιλους, κυκλώνες και ισχυρές βροχοπτώσεις δύναται να μετριαστεί με

χρήση ανθεκτικών συστημάτων στήριξης στον άνεμο, τακτικό καθαρισμό των πάνελ από υπολείμματα σκόνης ή και άλλων σωματιδίων λόγω των ανέμων, εναλλακτική χρήση σύγχρονων τεχνολογικά φωτοβολταϊκών, όπως διπλής όψης φωτοβολταϊκά στοιχεία, διαφανή πάνελ, συστήματα παρακολούθησης που ακολουθούν την πορεία του ήλιου και εύκαμπτα φωτοβολταϊκά υλικά, διαμόρφωση ανάγλυφου στο γήπεδο χωροθέτησης με την πρόβλεψη κατάλληλης κλίσης για τη φυσική αποστράγγιση της ευρύτερης περιοχής του έργου, ενίσχυση κατάλληλης φυτοκάλυψης πέριξ του γηπέδου του έργου και δημιουργία αναχωμάτων ή πρόβλεψη άλλων υδραυλικών έργων για την ανάσχεση πλημμυρικών φαινομένων.

Εν κατακλείδι η εργασία με την προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει στην αδήριτη ανάγκη υιοθέτησης των παραπάνω μέτρων για την ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας του υπο μελετη έργου και την επίτευξη της βιώσιμης αλλά και ασφαλούς λειτουργίας του δεδομένης και της χωροθέτησής του σε ένα περιβαλλοντικά ευαίσθητο οικοσύστημα για το οποίο οποιαδήποτε αστοχία θα λειτουργούσε επιβαρυντικά.

7.1 Βασικός στόχος της εργασίας

Ύστερα από την παραπάνω εκτενή αναφορά στην κυριαρχούσα κλιματική αλλαγή, όπως νοείται σήμερα συνολικά, στη σπουδαιότητα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας λόγω και της προαναφερθείσας κλιματικής κρίσης, στις βασικές ευπάθειες των έργων ΑΠΕ, τα οποία καλούνται να αποτελέσουν την προμετωπίδα στην προσπάθεια εξισορρόπησης του ενεργειακού ισοζυγίου υπό το πρίσμα της επίτευξης της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, στη μελέτη περίπτωσης εκτίμησης κλιματικής τρωτότητας φωτοβολταϊκού έργου και την παρουσίαση των βασικών μέτρων προσαρμογής του για την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς του, η κατακλείδα της εργασίας εστιάζεται βασικά στο να υπερθεματίσει τη σπουδαιότητα όλων των παραπάνω.

Θρυαλλίδα για την εξέταση της δυνατότητας εκτίμησης του κινδύνου για το φωτοβολταϊκό πάρκο που μελετήθηκε, αποτέλεσε η προσωπική εμπειρία και επαφή με πληθώρα έργων που κατακλύζουν τον Ελλαδικό χώρο, ακόμη και σε Προστατευόμενες περιοχές ή περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος, για τα οποία δε φαίνεται να έχει υπάρξει μέριμνα ως προς την εκτίμηση της κλιματικής ανθεκτικότητας μέχρι και την πρόσφατη θέσπιση του Κλιματικού Νόμου (Νόμος 4936/2022).

Βασικό πόνημα της παρούσας εργασίας, όπως δομείται και αναπτύσσεται ανά κεφάλαιο (βλ. κεφάλαιο 1.3), είναι η ανάδειξη της σπουδαιότητας της συστηματικής και μεθοδευμένης εκτίμησης του κλιματικού κινδύνου των έργων υποδομής και πιο συγκεκριμένα των έργων ΑΠΕ, με στόχο τον σχεδιασμό απτών και στοχευμένων μέτρων μείωσης του κινδύνου.

7.2 Αδυναμίες Εφαρμογής των αποτελεσμάτων

Παρόλο που η εργασία με την εφαρμογή του προσωρινού πλαισίου αξιολόγησης για την εκτίμηση της κλιματικής τρωτότητας του φωτοβολταϊκού έργου καταλήγει σε ποσοτικοποίηση των κλιματικών κινδύνων που ελλοχεύουν στα διάφορα στάδια κατασκευής και λειτουργίας και για διάφορες συνιστώσες του έργου, παραμένει θολό το κατά πόσο τα προτεινόμενα μέτρα είναι αυτά που θα μπορούσαν να θεωρηθούν τα απολύτως ενδεδειγμένα, καθώς προέρχονται από την ανάλυση Περιφερειακών Σχεδίων για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή ή και άλλων σχεδίων και πλαισίων, όπως για παράδειγμα των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής.

Είναι εύκολα κατανοητό ότι κακής ποιότητας, παρωχημένα και μη αξιολογημένα δεδομένα δε μπορεί παρά να οδηγήσουν σε στρεβλή πολιτική πρόβλεψης μέτρων και σχεδίων. Δεν αρκεί η ποσοτικοποίηση ενός κινδύνου αλλά η εκτίμηση βάσει ορθών, επικαιροποιημένων και επιστημονικά τεκμηριωμένων δεδομένων. Η δια τομεακή δε και πολυεπίπεδη άσκηση πολιτικής στα ζητήματα που άπτονται της κλιματικής κρίσης, όπως και η ουσιαστική αξιολόγηση σε κάθε επίπεδο όλων των αποφάσεων και πολιτικών προς σχεδιασμό, είναι αδήριτης ανάγκης.

Σε κάθε περίπτωση λοιπόν, η αξιοπιστία και η ποιότητα των αντλούμενων δεδομένων, η οποία εν πολλοίς εξαρτάται από την αξιολόγηση και επικαιροποίηση των διαφόρων σχεδίων, πλαισίων ή εκθέσεων αλλά και από τις μεθόδους συλλογής τους και την ποιότητα συνεργασίας μεταξύ των βασικών μερών, αποτελεί βασική συνιστώσα για την ορθή διεκπεραίωση της διαδικασίας εκτίμησης κινδύνου, όπως προτείνεται στην παρούσα εργασία.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Η κατακλυσμιαία επικυριαρχία των έργων ΑΠΕ χωρίς, μέχρι και τη συγγραφή της παρούσας να έχει προηγηθεί χωροταξικός σχεδιασμός για τέτοια έργα, ο οποίος θα

υπαγόρευε τις δυνητικά απαγορευτικές περιοχές για την κατασκευή και λειτουργία τους, αποτέλεσε και αποτελεί πρόκληση για τη μελλοντική εφαρμογή ενός οργανωμένου πλαισίου χωροθέτησής τους, λαμβανομένης υπόψη και της κλιματικής τους ανθεκτικότητας ως βασική παράμετρο.

Η ορθή και αποτελεσματική εκτίμηση της κλιματικής τρωτότητας των έργων δύναται να συντείνει στην συμπερίληψη, εντός του κειμένου της Εθνικής Στρατηγικής για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή και των Περιφερειακών Σχεδίων για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή, μέτρων και δράσεων που θα αποτελέσουν ορόσημο για την ουσιαστική προσαρμογή των έργων ΑΠΕ και την τροχοδρόμηση του κλάδου της ενέργειας και ειδικότερα της πράσινης ενέργειας σε βιωσιμότερη και πιο ολιστική πορεία. Καθώς το «Εθνικό Παρατηρητήριο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή» που συστήνεται στο Υπουργείο Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας θα εξετάζει τα μέτρα που θα προτείνονται και θα υλοποιούνται σε όλους τους τομείς, μια πρόταση που απορρέει από την παρούσα εργασία είναι ακριβώς αυτή η εφαρμογή του ενιαίου πλαισίου αξιολόγησης για τα έργα ΑΠΕ, όπως εφαρμόστηκε και αναλύθηκε παραπάνω, να αποτελεί βασικό εργαλείο για την εκτίμηση της κλιματικής τρωτότητας και τα προκρινόμενα μέτρα να ελέγχονται και να αξιολογούνται από το Παρατηρητήριο με στόχο την βελτιστοποίησή τους.

Άλλωστε σύμφωνα με τον Νόμο 4936/2022 στην τελική έκθεση προόδου που θα εκπονείται από τη Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας της Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, σε συνεργασία με το αρμόδιο όργανο του Υπουργείου Κλιματικής Κρίσης και Πολιτικής Προστασίας και τον Οργανισμό Φυσικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΟΦΥΠΕΚΑ), θα εμπεριέχεται ανά τομέα περιγραφή των δράσεων και της προόδου σε σχέση με την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ξενόγλωσσες

Abba, Z. Y. I., Balta-Ozkan, N., & Hart, P. (2022). A holistic risk management framework for renewable energy investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112305>

Adam, D. (2023). What a 190-year-old equation says about rainstorms in a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(14), e2304077120.

Adaptive Greece Hub. (2022). Έλεγχος Κλιματικής Ανθεκτικότητας. <https://adaptivegreecehub.gr/en/>

Ahemd, R., Izaz, M. H. B., Manik, K. H., Khatun, H., Nath, A., Mim, J. J., & Hossain, N. (2025). Advancements in Agrivoltaic Systems for Enhanced Sustainable Energy Utilization-A Review. *Environmental Challenges*, 101299.

Amalu, E. H., & Fabunmi, O. A. (2022). Thermal control of crystalline silicon photovoltaic (c-Si PV) module using Docosane phase change material (PCM) for improved performance. *Solar Energy*, 234, 203-221.

Bošnjaković, M., Stojkov, M., Katinić, M., & Lacković, I. (2023). Effects of Extreme Weather Conditions on PV Systems. *Sustainability*, 15(22), 16044.

Burnett, D., Barbour, E., & Harrison, G. P. (2014). The UK solar energy resource and the impact of climate change. *Renewable Energy*, 71, 333-343.

Climate ADAPT (2025, 6 Απριλίου). Σφυρηλατώντας μια Ευρώπη ανθεκτική στην κλιματική αλλαγή — η νέα στρατηγική της ΕΕ για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Ανακτήθηκε 28 Φεβρουαρίου, 2026 από <https://climate-adapt.eea.europa.eu/el/metadata/publications/eu-strategy-on-adaptation-to-climate-change>

Climate ADAPT. (2024). CLIMAAX: Climate Risk & Vulnerability Assessment Framework and Toolbox. European Climate Adaptation Platform. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/projects/climate-risk-and-vulnerability-assessment-framework-and-toolbox>

CLIMAAX. (n.d.). *The project. In a nutshell.* Ανακτήθηκε από, <https://www.climaax.eu/project/>

Doddy Clarke E, Sweeney C, McDermott F, Griffin S, Correia JM, Nolan P, Cooke L (2021) Climate change impacts on wind energy generation in Ireland. <https://doi.org/10.1002/we.2673>

Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy procedia*, 33, 311-321.

EEA & European Commission. (2024). European Climate Risk Assessment (EUCRA). European Environment Agency. https://climate-adapt.eea.europa.eu/el/eu-adaptation-policy/key-eu-actions/climate_risk_assessment/index_html

EU Mission on Adaptation. (2023). A Guide to Assessing Climate Change Risks and Vulnerabilities. EU Climate Pact. https://climate-pact.europa.eu/eu-climate-action-academy/resources/guide-assessing-climate-change-risks-and-vulnerabilities-climate-risk-assessment_en

European Commision (n.d.). *Causes of climate change.* Ανακτήθηκε 21 Φεβρουαρίου, 2026 από https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en

European Commision. (n.d.). Geothermal energy. Ανακτήθηκε 26 Φεβρουαρίου, 2026 από https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/geothermal-energy_en

European Commission. (n.d.). About the Pact. European Climate PactEuropean Climate Pact (χ.χ.). Τι είναι η κλιματική αλλαγή; Ανακτήθηκε 02. Φεβρουαρίου, 2026 από https://climate-pact.europa.eu/about/climate-change_el

European Court of Auditors. (2024). Special report 15/2024: Climate adaptation in the EU – Action not keeping up with ambition (SR-2024-15) [in Greek]. European Court of Auditors. https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-15/SR-2024-15_EL.pdf

European Parliament and Council. (2021). Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing a framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No. 401/2009 and (EU) 2018/1999

(European Climate Law). Official Journal of the European Union, L 243, 1–17. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>

Ghalandari, T., Maleki, A., Golmohammadi, A., Verhaert, I., & Vuye, C. (2025). Thermal and economic analysis of asphalt solar collectors using a field-scale experimental setup. *Applied Thermal Engineering*, 129426.

Girgibo, N., Hiltunen, E., Lü, X., Mäkiranta, A., & Tuomi, V. (2024). Risks of climate change effects on renewable energy resources and the effects of their utilisation on the environment. *Energy Reports*, 11, 1517-1534.

Gutsch, M., Lasch-Born, P., LÜTTGER, A. B., SUCkOw, F. E. L. I. C. I. T. A. S., MURAwSkI, A. L. I. N. E., & PILz, T. O. B. I. A. S. (2015). Uncertainty of biomass contributions from agriculture and forestry to renewable energy resources under climate change. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(2), 213-223.

Handmer, J., Honda, Y., Kundzewicz, Z. W., Arnell, N., Benito, G., Hatfield, J., ... & Yamano, H. (2012). Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation special report of the intergovernmental panel on climate change, 231-290.

Harmailil, I. O., Sultan, S. M., Tso, C. P., Fudholi, A., Mohammad, M., & Ibrahim, A. (2024). A review on recent photovoltaic module cooling techniques: types and assessment methods. *Results in Engineering*, 22, 102225.

Hasan, K., Yousuf, S. B., Tushar, M. S. H. K., Das, B. K., Das, P., & Islam, M. S. (2022). Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review. *Energy Science & Engineering*, 10(2), 656-675.

Huang, X., Pan, G., Gu, W., & Gu, Z. (2025). Risk analysis and responses of PV output extreme in China's whole county PV program. *Renewable Energy*, 125079.

Ioannou, A., Angus, A., & Brennan, F. (2017). Risk-based methods for sustainable energy system planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 602-615.

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:10.1017/9781009157940.008.

IRENA. (2018). Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA. (2025). Renewable energy in climate change adaptation: Metrics and risk assessment framework. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Apr/IRENA_COU_RE_climate_adaptation_2025.pdf

ISO. (2018). ISO 31000: Risk management — Guidelines. International Organization for Standardization. https://climate-adapt.eea.europa.eu/el/eu-adaptation-policy/key-eu-actions/climate_risk_assessment/index_html

ISO. (2023). ISO 14091: Adaptation to climate change — Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. International Organization for Standardization. https://climate-adapt.eea.europa.eu/el/eu-adaptation-policy/key-eu-actions/climate_risk_assessment/index_html

Lehner, B., Czisch, G., & Vassolo, S. (2005). The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energy policy*, 33(7), 839-855.

Lindsay, N., Libois, Q., Badosa, J., Migan-Dubois, A., & Bourdin, V. (2020). Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs. *Solar Energy*, 197, 266-278.

- Long, J., Lu, Z., Miller, P. A., Pongratz, J., Guan, D., Smith, B., ... & Zhang, Q. (2024). Large-scale photovoltaic solar farms in the Sahara affect solar power generation potential globally. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 11.
- Martinez, A., & Iglesias, G. (2022). Climate change impacts on wind energy resources in North America based on the CMIP6 projections. *Science of the Total Environment*, 806, 150580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150580>
- Munoz, J. R., & Sailor, D. J. (1998). A modelling methodology for assessing the impact of climate variability and climatic change on hydroelectric generation. *Energy Conversion and Management*, 39(14), 1459-1469.
- O'Neill, B. C., Carter, T. R., Ebi, K., Harrison, P. A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., ... & Pichs-Madruga, R. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature climate change*, 10(12), 1074-1084.
- Okonkwo, P. C., Nwokolo, S. C., Udo, S. O., Obiwulu, A. U., Onnoghen, U. N., Alarifi, S. S., ... & Akpan, A. E. (2025). Solar PV systems under weather extremes: Case studies, classification, vulnerability assessment, and adaptation pathways. *Energy Reports*, 13, 929-959.
- Osman, A. I., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., ... & Yap, P. S. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental chemistry letters*, 21(2), 741-764.
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1-14. Article 1167990. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990.
- Pan, Z., Segal, M., Arritt, R. W., & Takle, E. S. (2004). On the potential change in solar radiation over the US due to increases of atmospheric greenhouse gases. *Renewable Energy*, 29(11), 1923-1928.

- Pryor, S. C., & Barthelmie, R. J. (2010). Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 430–437.
- Rahman, T. (2025). Unveiling the impacts of climate change on the resilience of renewable energy transitions. *Journal of Cleaner Production*
- Sánchez-Pozo, N. N., Vanem, E., Bloomfield, H., & Aizpurua, J. I. (2025). A probabilistic risk assessment framework for the impact assessment of extreme events on renewable power plant components. *Renewable Energy*, 240, 122168.
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Maianti, P., Libertà, G., Jacome Felix Oom, D., Branco, A., de Rigo, D., Suarez-Moreno, M., Ferrari, D., Roglia, E., Scionti, N. and Broglia, M. (2024). Advance report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2023. Publications Office of the European Union, Luxembourg. doi:10.2760/74873, JRC135375.
- Schiera, D. S., Minuto, F. D., Bottaccioli, L., Borchellini, R., & Lanzini, A. (2019). Analysis of rooftop photovoltaics diffusion in energy community buildings by a novel GIS- and agent-based modeling co-simulation platform. *Ieee Access*, 7, 93404-93432.
- United Nations. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Zhou, J., & He, C. (2023, March). Risk assessment of power system under extreme typhoon events. In 2023 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES) (pp. 724-728). IEEE.

Ελληνικές

- ΔΙΑΝΕΟΣΙΣ (2016). Ολιστική Προστασία Κρίσιμων Υποδομών: Ανθεκτικότητα και Προστασία Διασυνδέσεων. Ενδεδειγμένη Επιτελική Σύνοψη. Εργαστήριο Ασφάλειας Πληροφοριών και Προστασίας Κρίσιμων Υποδομών, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ (2021, 16 Σεπτεμβρίου.). ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ Τεχνικές κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών στην κλιματική αλλαγή κατά την περίοδο 2021-2027 (2021/C 373/01). Επίσημη

Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ανακτήθηκε 13 Φεβρουαρίου, 2026, από <https://eur-lex.europa.eu/>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή (χ.η.). Υλοποίηση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Στον δρόμο για μια κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη έως το 2050. Ανακτήθηκε 17 Φεβρουαρίου, 2026 από https://commission.europa.eu/topics/climate-action/delivering-european-green-deal_el

Νόμος 4014/2011 – Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος. ΦΕΚ Α' 209/21.09.2011.

Νόμος 4936/2022- Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος. ΦΕΚ/Α'105

Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. (2018). Περιφερειακό Σχέδιο Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) για την Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. Ανακτήθηκε από <https://pste.gov.gr/perifereiako-schedio-prosarmogis-stin-klimatiki-allagi-pespka-gia-tin-perifereia-stereas-elladas/>

Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας. (2025). Έγκριση του Περιφερειακού Σχεδίου για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας.

Τράπεζα της Ελλάδος. (2022). Έκθεση του Διοικητή για το έτος 2021. Ανακτήθηκε 02, Φεβρουαρίου, 2026 από www.bankofgreece.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2016). ΕΘΝΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ. Ανακτήθηκε από https://ypen.gov.gr/wpcontent/uploads/legacy/Files/Klimatiki%20Allagi/Prosarmogi/2016_0406_ESPKA_teliko.pdf

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2022). Προσωρινό πλαίσιο αξιολόγησης της κλιματικής ανθεκτικότητας για έργα υποδομών. Ανακτήθηκε από <https://adaptivegreecehub.gr/eleghos-klimatikis-anthektikotitas/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2024). *1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04)*. Ανακτήθηκε από https://floods.ypeka.gr/wp-content/uploads/2025/09/EL04_P12_T1.pdf

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). *1η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07)*. Ανακτήθηκε από https://floods.ypeka.gr/wp-content/uploads/2025/05/EL07_SDKP_1st_REV.pdf

Υπουργική Απόφαση ΔΠΙΑ/οικ.37674/2016 – Τροποποίηση και κωδικοποίηση της υπουργικής απόφασης 1958/2012 - Κατάταξη δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με την παρ. 4 του άρθρου 1 του ν. 4014/21.9.2011 (Α' 209), όπως αυτή έχει τροποποιηθεί και ισχύει. ΦΕΚ Β' 2471/10.08.2016

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

Εκτίμηση και Ενίσχυση της Κλιματικής Ανθεκτικότητας Έργου ΑΠΕ

Σοφία Δραμαλιώτη¹, Ιωάννης Σέμπος^{1,2}

¹Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο,
Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα

² Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15772 Ζωγράφου

email: std166675@ac.eap.gr, isebos@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει την ανάγκη εκτίμησης και ενίσχυσης της κλιματικής ανθεκτικότητας έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, προτείνοντας συγκεκριμένη μεθοδολογία. Η εργασία επιχειρεί, έχοντας ως οδηγό το Προσωρινό Πλαίσιο αξιολόγησης της Κλιματικής Ανθεκτικότητας, να χαρτογραφήσει τη διαδικασία εκτίμησης της κλιματικής ανθεκτικότητας του φωτοβολταϊκού έργου, αναλύοντας την ευαισθησία και την έκθεσή του σε επιλεγμένους κλιματικούς κινδύνους βάσει ποικίλων δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Στόχος είναι η δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων μέτρων και στρατηγικών, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση και αποτελεσματικότητά του έργου υπό το πρίσμα της ομαλής προσαρμογής του στους τελικούς, όπως προέκυψε από την ανάλυση της τρωτότητας, εγγενείς κινδύνους. Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ορθή εκτίμηση της ανθεκτικότητας των έργων ΑΠΕ έναντι σημαντικών κλιματικών απειλών συνιστά τη βασική αρτηρία για τον μεθοδικό σχεδιασμό στοχευμένων μέτρων και δράσεων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους και συσχετίζει την ορθή εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας με την ποιότητα των αντλούμενων κάθε φορά δεδομένων, υπογραμμίζοντας την ανάγκη συνεχούς αξιολόγησης και επικαιροποίησής τους, θεωρώντας εκ των ων ουκ άνευ την πολυεπίπεδη συνεργασία των διαφορετικών εμπλεκόμενων μερών σε θέματα άσκησης πολιτικής προσαρμογής.

Λέξεις κλειδιά: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Κλιματικός κίνδυνος, Ευπάθεια, Κλιματικά σενάρια, Κλιματική ανθεκτικότητα, Προσαρμογή, Στρατηγικές

ABSTRACT

This paper examines the need to assess and enhance the climate resilience of Renewable Energy Sources projects, proposing a specific methodology. The paper attempts, guided by the Provisional Framework for the assessment of Climate Resilience, to map the process of assessing the climate resilience, analyzing its sensitivity and exposure to selected climate risks based on a variety of data from different sources. The aim is to be able to select the appropriate measures and strategies, in order to achieve the maximum possible performance and effectiveness of the project in the light of its smooth adaptation to the final, as derived from the vulnerability analysis, inherent risks. The paper concludes that the correct assessment of the resilience of RES projects against significant climate threats constitutes the main artery for the methodical design of targeted measures and actions to enhance their resilience and correlates the correct application of the proposed methodology with the quality of the data obtained each time.

Keywords: Renewable energy sources, Climate risk, Vulnerability, Climate scenarios, Climate resilience, Adaptation, Strategies

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στρατηγικός στόχος των κυβερνήσεων σε τοπικό και σε διεθνές επίπεδο καθίσταται πλέον η επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας του πλανήτη, δηλαδή ένα μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών έως το 2050, ώστε να μετριαστούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, στην περίπτωση που δε μπορεί να είναι εφικτός ο μετριασμός, λαμβάνονται μέτρα και συντάσσονται πρωτόκολλα για την προσαρμογή των κρατών στην κλιματική αλλαγή.

Η σύγκλιση με τους κανόνες της βιώσιμης ανάπτυξης για τη διατήρηση των φυσικών πόρων για τις επόμενες γενεές και την εφαρμογή κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων κυρίως, αποτελεί την προμετωπίδα της συντονισμένης προσπάθειας παγκοσμίως να ευθυγραμμιστεί η ανάπτυξη σε όλους τους παραγωγικούς τομείς με την ομαλή και ασφαλή διαβίωση του ανθρώπινου είδους στο σήμερα, στο άμεσο αλλά και απώτερο μέλλον.

Βασικό πεδίο εφαρμογής των διαχειριστικών σχεδίων και στρατηγικών για τον μετριασμό και την προσαρμογή, αποτελεί ο ενεργειακός τομέας, καθώς οι χρησιμοποιούμενοι έως σήμερα ενεργειακοί πόροι εξαλείφονται διαρκώς. Υπό το καθεστώς της αναδυόμενης σε πολλά κράτη ενεργειακής φτώχειας, η ανάγκη μετάβασης στην πράσινη ενέργεια και αναστροφής της ενεργειακής ένδειας μέσα από την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κρίνεται επιτακτική.

Πεδίο του παρόντος άρθρου αποτελεί η εξειδίκευση της εκτίμησης και ενίσχυσης της κλιματικής ανθεκτικότητάς των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), με γνώμονα την περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική βιωσιμότητά τους, και με δεδομένο ότι τα περισσότερα έργα αυτού του είδους είναι ιδιαίτερα ευπαθή στην κλιματική αλλαγή.

Η τελευταία, με τη δριμύτητα και την έντονη συχνότητα των φαινομένων που τη συνοδεύουν, επηρεάζει τις υποδομές των έργων ΑΠΕ, περισσότερο ή λιγότερο, ανάλογα με το είδος και

τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι βασικές παράμετροι του κλίματος, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ή το ύψος βροχής και λοιπών κατακρημνισμάτων, διέπουν τη λειτουργία τέτοιων δομών καθορίζοντας το βαθμό απόδοσής τους, και συνεπώς το κόστος λειτουργίας τους.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ο συντελεστής χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου στον οποίο πραγματικά λειτουργεί ένα τέτοιο έργο κοντά στην ονομαστική του ισχύ, διαμορφώνεται διαφορετικά ανάλογα με την ηλιοφάνεια. Παράγοντες που την περιορίζουν, όπως η ύπαρξη αυξημένων αερολυμάτων (Huang, X. et al., 2025), αποδεικνύεται ότι μειώνουν τη συνολική απόδοσή τους.

Επιπλέον παρουσιάζουν ευαισθησία στην φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας (Lindsay et al., 2020), αλλά και στη θερμοκρασία όπως καταδεικνύεται μέσα από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα οι Bošnjaković et al, (2023) αναφέρουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του πλαισίου του πάνελ να αγγίξει περίπου τους 70 °C, η θερμοκρασία του πάνελ τους 85 °C και η θερμοκρασία της μόνωσης του καλωδίου τους 60 °C. Πράγματι η θερμότητα που απορροφά το φωτοβολταϊκό στοιχείο, εκτός από τα πάνελ, μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανσή του και επομένως σε μειωμένη απόδοση. (Hasan et al. 2022)

Παράλληλα, οι ισχυροί άνεμοι δύνανται να προκαλέσουν ζημιά στις κατασκευές, όπως αποκόλληση των πάνελ από τις βάσεις τους ή τραυματισμό του στοιχείου από μεταφορά αντικειμένων λόγω της έντασης και κατεύθυνσης του ανέμου. Το χαλάζι μπορεί να φθείρει την επιφάνεια των πάνελ είτε με την άμεση πρόσκρουση είτε με την απόθεση υπολειμμάτων που εμποδίζουν το φως του ήλιου και προκαλούν συσσώρευση νερού στα πάνελ (Okonkwo, P. C. et al., 2025)

ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Κύριοι παράγοντες που φαίνεται να απειλούν την μελλοντική παραγωγικότητα των αιολικών

συστημάτων ενέργειας, είναι η παρουσία ακραίων ταχυτήτων ανέμου και ριπών, γεγονός που ενδέχεται να αλλάξει και τις προδιαγραφές κατασκευής τους αλλά και τον χωροθετικό τους προγραμματισμό, οι παγετοί ιδίως σε μεγάλα υψόμετρα όπου εκτός από την αλλοίωση στην κίνηση των πτερυγίων θα δυσκολεύεται η πρόσβαση σε αυτά για την συντήρηση ή την εγκατάστασή τους αν πρόκειται για νέα, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας η οποία θα θέσει σε άμεση απειλή τα παράκτια αιολικά πάρκα αλλά και η αύξηση της θερμοκρασίας η οποία, μειώνοντας την πυκνότητα του αέρα, επηρεάζει αρνητικά την ισχύ του εκπεμπόμενου αέρα και επομένως τη συνολική απόδοση του συστήματος (Pryor & Barthelmie, 2010).

ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τους Munoz & Sailor (1998), η επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη ως μια από τις βασικότερες μεταβλητές της κλιματικής αλλαγής, επηρεάζει την καλή απόδοση υδροηλεκτρικών έργων. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της άμεσης σύνδεσής τους με τον υδρολογικό κύκλο, μια παρατεταμένη ξηρασία ή αντίστροφα η ραγδαιότητα κατακρημνισμάτων δύνανται να προκαλέσουν προβλήματα στη μέση παροχή και επομένως και στη διατήρηση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά μέσο όρο.

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι Girgibo et al. (2024) καταλήγουν σε έρευνά τους ότι οι ανταλλάκτες θερμότητας νερού και οι ιζηματογενείς λεκάνες εμφανίζονται περισσότερο ευπαθείς σε κλιματικούς κινδύνους, κυρίως αναφορικά με το πάχος του πάγου των θαλασσών και λιμνών, ραγδαία καιρικά φαινόμενα, καταιγίδες, μεγάλα ύψη κυμάτων αλλά και την αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου με συνεπαγόμενη την αύξηση της θερμοκρασίας. Η τελευταία επιδρά αρνητικά στα συστήματα ψύξης.

Μέσα από την ανασκόπηση λοιπόν της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφορικά με τις ευπάθειες των ενεργειακών έργων ΑΠΕ, γίνεται προσπάθεια να αναδειχθούν τα κενά που υπάρχουν ως προς:

- τη συνεκτικότητα και την ακρίβεια των δεδομένων σχετικά με τα έργα ΑΠΕ και τις απειλές στις οποίες υπόκεινται

- τη σύνδεση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης κλιματικού κινδύνου με συγκεκριμένα μέτρα προσαρμογής των εφαρμοστέων πλαισίων
- την ορθή και συνεπή εφαρμογή των προτεινόμενων μέτρων για την μείωση του κλιματικού κινδύνου και την ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των κρίσιμων κλιματικών απειλών που αντιμετωπίζουν τα έργα ΑΠΕ και η ανάγκη εκτίμηση της τρωτότητας τους με σαφή και μετρήσιμο τρόπο, ώστε να προκύπτει ξεκάθαρη σύνδεση μεταξύ του εκτιμώμενου κινδύνου και της προτεινόμενης δράσης για την μείωση του.

Προς τούτο, γίνεται μελέτη περίπτωσης φωτοβολταϊκού έργου και εφαρμογή του «Προσωρινού Πλαισίου για την αξιολόγηση των προτάσεων έργων υποδομής που υποβάλλονται προς συγχρηματοδότηση σε Προγράμματα του ΕΣΠΑ 2021 – 2027, όσον αφορά στην κλιματική ανθεκτικότητα», ώστε να αναδειχθεί η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της τρωτότητας έργου ΑΠΕ και στοχευμένου σχεδιασμού αντίμετρων για την περαιτέρω ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το παρόν άρθρο φιλοδοξεί να αναδείξει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της κλιματικής ανθεκτικότητας φωτοβολταϊκού έργου ως μελέτη περίπτωσης, μέσα από την εφαρμογή του Προσωρινού Πλαισίου αξιολόγησης της Κλιματικής Ανθεκτικότητας. Το πλαίσιο αυτό αφορά σε έργα υποδομής, με αναμενόμενη διάρκεια ζωής τουλάχιστον 5 ετών (παράγραφο 2.1 του άρθρου 73 του Κανονισμού (ΕΕ) 2021/1060), που υποβάλλονται για χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ 2021-2027 ως σύνοψη του κειμένου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με τίτλο «Τεχνικές κατευθυντήριες οδηγίες σχετικά με την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των υποδομών στην κλιματική αλλαγή για την περίοδο 2021-2027» (Adaptive Greece Hub, 2022).

Επιλέχθηκε φωτοβολταϊκό έργο μέσα από περιήγηση στον γεωπληροφορικό χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Αποβλήτων και Ενέργειας (ΡΑΕΥ) (<https://geo.rae.gr/>), όπου προέκυψε ο ακριβής γεωγραφικός εντοπισμός του έργου και βασικών τεχνικών στοιχείων του.

Παράλληλα, κατόπιν σχετικής έρευνας στο Ηλεκτρονικό Περιβαλλοντικό Μητρώο (ΗΠΜ) και βάσει της Περιβαλλοντικής Ταυτότητας (ΠΕΤ) του έργου, συλλέχθηκαν όλα τα απαραίτητα τεχνικά στοιχεία για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους και της τεχνικής του αρτιότητας.

Αναφορικά με το είδος και την τεχνολογία του έργου, ακολούθησε ανάλυση της ευαισθησίας του βάσει δυνητικών κλιματικών κινδύνων. Πιο αναλυτικά, μέσα από τα μεθοδολογικά κείμενα και τις οδηγίες που διατίθενται στον Εθνικό Κόμβο Για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή, έγινε χρήση του αρχείου Excel για τον υπολογισμό της κλιματικής ανθεκτικότητας, για τη συμπλήρωση του οποίου επιλέχθηκαν οι κλιματικές παράμετροι που μπορεί να επηρεάσουν την κατασκευή και τη λειτουργία του έργου, ανάλογα με την ευαισθησία του σε αυτές. Ειδικότερα για το συγκεκριμένο έργο, ήτοι φωτοβολταϊκό πάρκο, επιλέχθηκαν ως κίνδυνοι στους οποίους ενδέχεται να είναι τρωτό ή ευαίσθητο το έργο, παράμετροι όπως: Θερμοκρασία, ξηρασία, άνεμος, καύσωνας, παγετός, βροχοπτώσεις/χιονοπτώσεις/ χαλάζι, άνοδος στάθμης της θάλασσας, πλημμύρες, πυρκαγιές κ.α. οι οποίοι είναι διαχωρισμένοι σε χρόνιους και οξείς κινδύνους στο σχετικό αρχείο Excel. Αφού έγινε η βασική επιλογή των κλιματικών απειλών, βαθμολογήθηκε η ευαισθησία του έργου σε αυτές, με τον χαρακτηρισμό «χαμηλή», «μέτρια» ή «υψηλή».

Στο ίδιο αρχείο και με κριτήριο τη θέση του έργου, έγινε ανάλυση της έκθεσής του για τις ίδιες επιλεχθείσες, όπως περιγράφηκε παραπάνω, κλιματικές απειλές.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σχετική έρευνα σε τυχόν διαχειριστικά σχέδια της περιοχής, καθώς

και στο εργαλείο απεικόνισης γεωγραφικών δεδομένων¹⁰ όπου μέσω χαρτών αποτυπώνονται οι προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή, σύμφωνα με τις κλιματικές παραμέτρους ενδιαφέροντος.

Αρχικά συλλέχθηκαν στοιχεία ως προς την ιστορικότητα του κλίματος από το Περιφερειακό Σχέδιο Για Την Προσαρμογή Στην Κλιματική Αλλαγή (ΠΕΣΠΚΑ) της Στερεάς Ελλάδας, καθώς και δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς, αν τυχόν αναφέρονται σε αυτό.

Επιπλέον ερευνήθηκε η επικινδυνότητα πλημμυρών στην ευρύτερη περιοχή χωροθέτησης του έργου μέσα από το «ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ (ΣΔΚΠ) των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΕΛ07) και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (ΕΛ04), όπως προκύπτει από την ακριβή τοποθεσία του έργου.

Σε τελικό στάδιο, υλοποιήθηκε διεξοδική μελέτη των χαρτών γεωχωρικών δεδομένων με τις προβλέψεις για την κλιματική αλλαγή, για κάθε κλιματική παράμετρο ενδιαφέροντος και για 2 μελλοντικές περιόδους 2031-2060 (εγγύς μέλλον) και 2071-2100 (απώτερο μέλλον) με περίοδο αναφοράς την περίοδο 1971-2000 (παρόν κλίμα). Μέσα από τον συνδυασμό όλων των παραπάνω δεδομένων έγινε και η παραμετροποίηση/συμπλήρωση του αρχείου Excel για την ανάλυση της έκθεσης του έργου σε χρόνιους και οξείς κινδύνους, όπως επιλέχθηκαν και κατά την φάση ανάλυσης της ευαισθησίας του και βαθμολογείται η έκθεση του έργου σε αυτές με τον χαρακτηρισμό «χαμηλή», «μέτρια» ή «υψηλή».

Μετά την ολοκλήρωση της συμπλήρωσης των πεδίων της ευαισθησίας και της έκθεσης του έργου, προέκυψε αυτόματα η παραμετροποίηση του αρχείου Excel, αναφορικά με την τρωτότητα του έργου (Πίνακας 1).

¹⁰ <https://geo.adaptivegreecehub.gr/>

Σοφία Δραμαλιώτη, Ιωάννης Σέμπος, Εκτίμηση και Ενίσχυση της Κλιματικής Ανθεκτικότητας Έργου ΑΠΕ

Ανάλυση τρωτότητας για το Έργο:										
Ομάδα	Πηγή Κινδύνου	Ευαισθησία					Έκθεση			Τρωτότητα
		Κατασκευή	Λειτουργία	Προϊόντα Υπηρεσίες	Ένταξη στην περιοχή	Σύνολο Ευαισθησίας	Υφιστάμενες συνθήκες	Μελλοντικές συνθήκες	Σύνολο Έκθεσης	
Οξείες κίνδυνοι	Καύσιννας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Κύμα ψύχους	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Παγετός (Αριθμός Ημερών με TN<0)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Δασική πυρκαγιά	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Κυκλώνας, Ισχυρές Καταιγίδες, τυφώνας	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Θύελλα (περιλαμβάνονται χιονοθύελλες, Θύελλες σκόνης)	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Άνεμο στο όβελος /Θυελλώδεις Άνεμοι	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Ξηρασία	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή
	Ισχυρός υετός (βροχή, χαλάζι, χιόνι/πάγος)	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Πλημμύρα (σε παράκτιες περιοχές, ποτάμια, λόγια βροχής, υπόγεια ύδατα)	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
	Κατολισθηση/διάβρωση του εδάφους	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Καθίζηση	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του αέρα	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Αστική θερμομνησίδα					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Θερμική καταπόνηση	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Χρόνιαι κίνδυνοι	Μεταβλητότητα της θερμοκρασίας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
	Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
	Μεταβολή χαρακτηριστικών των ανέμων	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβολή χαρακτηριστικών και τύπων υετού (βροχή, χαλάζι, χιόνι/πάγος)					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβλητότητα υετού ή υδρολογική μεταβλητότητα					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του νερού σε υδάτινα σώματα					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Οξίνιση/αλκαλότητα του θαλάσσιου ύδατος					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Διεσύσση αλμυρού νερού, υπακτινιστή επιφανειακών & υπόγειων υδάτων					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Κίνδυνος της στάθμης της θάλασσας	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
	Διαθεσιμότητα και καταπόνηση υδάτινων πόρων					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
	Διάβρωση των ακτών					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή
Υποβάθμιση του εδάφους, μεταβολή της περιεκτικότητας αλάτων, ερημοποίηση					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή	
Αλλαγές στη διάρκεια των καλλιεργητικών περιόδων					Χαμηλή			Χαμηλή	Χαμηλή	

Πίνακας 1 Ανάλυση Τρωτότητας Φωτοβολταϊκού έργου

Μετά από την ανάλυση τρωτότητας και συγκεκριμένα για τις κλιματικές απειλές στις οποίες το έργο εμφανίζει μέτρια έως και υψηλή τρωτότητα, ακολούθησε λεπτομερής ανάλυση διακινδύνευσης (risk assessment) για καθεμία από αυτές, προκειμένου να υπολογιστεί ο εγγενής κίνδυνος και, εφόσον απαιτείται, να ληφθούν πρόσθετα μέτρα έτσι ώστε να μειωθεί ο υπολειπόμενος

κίνδυνος (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2022).

Κατά τη διενέργεια της ανάλυσης διακινδύνευσης και για τιμές μέτριας και υψηλής τρωτότητας του έργου σε συγκεκριμένους κινδύνους, συμπληρώθηκε στο σχετικό αρχείο Excel για αυτούς και μόνον, η πιθανότητα εμφάνισής τους και προσδιορίστηκε αυτόματα ο βαθμός της αναμενόμενης επιβάρυνσης στο έργο (Πίνακας 2).

Πηγή Κινδύνου	Τρωτότητα	Πιθανότητα εμφάνισης	Κλίμακα συνεπειών	Εγγενής κίνδυνος	
				Βαθμολογία	Περιγραφή
Καύσωνας	Υψηλή	Σχεδόν βέβαιο	Μέτριες	15	Σημαντικός
Δασική πυρκαγιά	Υψηλή	Σχεδόν βέβαιο	Σημαντικές	20	Πολύ σημαντικός
Κυκλώνας, Ισχυρές Καταιγίδες, τυφώνας	Μέτρια	Μέτριο	Μέτριες	9	Μέτριος
Θύελλα (περιλαμβάνονται χιονοθύελλες, θύελλες σκόνης)	Μέτρια	Απίθανο	Μέτριες	6	Χαμηλός
Ανεμοστρόβιλος/Θυελλώδεις Άνεμοι	Μέτρια	Απίθανο	Σημαντικές	8	Μέτριος
Πλημμύρα (σε παράκτιες περιοχές, ποτάμια, λόγω βροχής, υπόγεια ύδατα)	Μέτρια	Μέτριο	Μέτριες	9	Μέτριος
Θερμική καταπόνηση	Μέτρια	Πιθανό	Σημαντικές	16	Σημαντικός
Μεταβλητότητα της θερμοκρασίας	Μέτρια	Πιθανό	Σημαντικές	16	Σημαντικός
Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας	Υψηλή	Σχεδόν βέβαιο	Σημαντικές	20	Πολύ σημαντικός

Πίνακας 2 Ανάλυση Διακινδύνευσης για το Φωτοβολταϊκό έργο

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. Μέτρα Προσαρμογής

Ο βασικός στόχος της διαδικασίας αποτίμησης της κλιματικής τρωτότητας ενός έργου και εν προκειμένω του φωτοβολταϊκού πάρκου, όπως αναλύθηκε παραπάνω, δεν είναι άλλος από την επιλογή των κατάλληλων μέτρων τα οποία επιβάλλεται να ληφθούν, τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τους διαχειριστές και εν γένει εμπλεκόμενους στη περαιτέρω λειτουργία του έργου, για τη μέγιστη δυνατή απόδοση και αποτελεσματικότητά του, υπό το πρίσμα της ομαλής προσαρμογής του στους διαπιστωμένους, από την ανάλυση τρωτότητας του έργου, εγγενείς κινδύνους. Ο σχεδιασμός των κατάλληλων μέτρων και η επιτυχής εφαρμογή τους αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα του έργου. Σύμφωνα λοιπόν με την ανάλυση τρωτότητας προκύπτουν συγκεκριμένοι κίνδυνοι για τους οποίους μπορούν να προταθούν στοχευμένα μέτρα προσαρμογής.

Δασική πυρκαγιά

- Χρήση αντικεραυνικής προστασίας καθώς και η γείωση μεταλλικών μερών του εξοπλισμού.

- Δημιουργία αντιπυρικής ζώνης και/ή αποφυγή φύτευσης πυριγενών φυτών κοντά στα όρια του έργου.
- Εγκατάσταση συστήματος ανίχνευσης καπνού και συστήματα αντιπυρικής προστασίας
- Δυνατότητα χρήσης ασυρμάτων για τον συντονισμό ενεργειών εάν προκύψει κίνδυνος.
- Τακτικός έλεγχος της γύρω περιοχής και καθαρισμός της από απορρίμματα και τυχόν ξηρή βλάστηση.

Ηλιακή ακτινοβολία

- Για τη βέλτιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού απαιτείται σταθεροποίηση της επιφανειακής θερμότητας παρά την αύξηση λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό στρώμα του φωτοβολταϊκού, και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση συστημάτων ψύξης (Harmailil et al 2024)
- Χρήση στηρίξεων με δυνατότητα περιστροφής των πάνελ ad hoc.

Καύσωνας-Θερμική καταπόνηση-Μεταβλητότητα Θερμοκρασίας

Σύμφωνα με τις δράσεις όπως αναφέρονται στην Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή

στην Κλιματική Αλλαγή (2016), προτείνονται τα κάτωθι μέτρα προσαρμογής :

- Εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών ψύξης των θερμικών μονάδων ή χρήση οικίσκων με κλιματιστικές μονάδες για τον καλό αερισμό του εξοπλισμού, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση.
- Εφαρμογή μεθόδων για διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας.
- Όπως αναφέρουν ειδικότερα σε μελέτη τους οι Okonkwo et al (2025) η χρήση πολυστρωματικών οπίσθιων φύλλων από φθοροπολυμερή που διατηρούν την ευκαμψία και τις μονωτικές τους ιδιότητες μπορούν να διασφαλίσουν την ηλεκτρική απόδοση εμποδίζοντας τη δημιουργία ρωγμών.

Θύελλες, ανεμοστρόβιλους, κυκλώνες και ισχυρές βροχοπτώσεις

- Χρήση ανθεκτικών συστημάτων στήριξης στον άνεμο που δύνανται να χρησιμοποιούν προηγμένα αεροδυναμικά σχέδια ώστε να μειώνονται αποτελεσματικά τα φορτία από δυνατούς ανέμους (Okonkwo et al., 2025)
- Τακτικός καθαρισμός των πάνελ από υπολείμματα σκόνης ή και άλλων σωματιδίων λόγω των ανέμων (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2016).
- Εναλλακτική χρήση σύγχρονων τεχνολογικά φωτοβολταϊκών, όπως διπλής όψης φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα διαφανή πάνελ, τα συστήματα παρακολούθησης που ακολουθούν την πορεία του ήλιου και τα εύκαμπτα φωτοβολταϊκά υλικά ώστε να αντισταθμίζονται καλύτερα οι παρενέργειες των ακραίων καιρικών φαινομένων (Ahemd et al., 2025).

Πλημμύρες

- Διαμόρφωση ανάγλυφου στο γήπεδο χωροθέτησης με την πρόβλεψη κατάλληλης

κλίσης για τη φυσική αποστράγγιση της ευρύτερης περιοχής του έργου.

- Ενίσχυση κατάλληλης φυτοκάλυψης πέριξ του γηπέδου του έργου για τη μείωση του χρόνου απορροής σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης και την αύξηση της υδατοπερατότητας.
- Δημιουργία αναχωμάτων ή πρόβλεψη άλλων υδραυλικών έργων για την ανάσχεση πλημμυρικών φαινομένων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικό πόνημα της παρούσας εργασίας, είναι η ανάδειξη της σπουδαιότητας της συστηματικής και μεθοδευμένης εκτίμησης του κλιματικού κινδύνου των ΑΠΕ, με στόχο τον σχεδιασμό απτών και στοχευμένων μέτρων μείωσης του κινδύνου. Σε κάθε περίπτωση, η αξιοπιστία και η ποιότητα των αντλούμενων δεδομένων, η οποία εν πολλοίς εξαρτάται από την αξιολόγηση και επικαιροποίηση των διαφόρων σχεδίων, πλαισίων ή εκθέσεων αλλά και από τις μεθόδους συλλογής τους και την ποιότητα συνεργασίας μεταξύ των βασικών μερών, αποτελεί βασική συνιστώσα για την ορθή διεκπεραίωση της διαδικασίας εκτίμησης κινδύνου, όπως προτείνεται στην παρούσα εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahemd, R., Izaz, M. H. B., Manik, K. H., Khatun, H., Nath, A., Mim, J. J., & Hossain, N. (2025). Advancements in Agrivoltaic Systems for Enhanced Sustainable Energy Utilization-A Review. *Environmental Challenges*, 101299.
- Bošnjaković, M., Stojkov, M., Katinić, M., & Lacković, I. (2023). Effects of Extreme Weather Conditions on PV Systems. *Sustainability*, 15(22), 16044.
- Girgibo, N., Hiltunen, E., Lü, X., Mäkiranta, A., & Tuomi, V. (2024). Risks of climate change effects on renewable energy resources and the effects of their utilisation on the environment. *Energy Reports*, 11, 1517-1534.
- Harmailil, I. O., Sultan, S. M., Tso, C. P., Fudholi, A., Mohammad, M., & Ibrahim, A. (2024). A review on recent photovoltaic module cooling techniques: types and assessment methods. *Results in Engineering*, 22, 102225.

- Hasan, K., Yousuf, S. B., Tushar, M. S. H. K., Das, B. K., Das, P., & Islam, M. S. (2022). Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review. *Energy Science & Engineering*, 10(2), 656-675.
- Huang, X., Pan, G., Gu, W., & Gu, Z. (2025). Risk analysis and responses of PV output extreme in China's whole county PV program. *Renewable Energy*, 125079.
- Lindsay, N., Libois, Q., Badosa, J., Migan-Dubois, A., & Bourdin, V. (2020). Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs. *Solar Energy*, 197, 266-278.
- Munoz, J. R., & Sailor, D. J. (1998). A modelling methodology for assessing the impact of climate variability and climatic change on hydroelectric generation. *Energy Conversion and Management*, 39(14), 1459-1469.
- Okonkwo, P. C., Nwokolo, S. C., Udo, S. O., Obiwulu, A. U., Onnoghen, U. N., Alarifi, S. S., ... & Akpan, A. E. (2025). Solar PV systems under weather extremes: Case studies, classification, vulnerability assessment, and adaptation pathways. *Energy Reports*, 13, 929-959.
- Pryor, S. C., & Barthelmie, R. J. (2010). Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 430-437.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2022). Προσωρινό πλαίσιο αξιολόγησης της κλιματικής ανθεκτικότητας για έργα υποδομών. <https://adaptivegreecehub.gr/eleghos-klimatikis-anthektikotitas/> retrieved 15.05.2026
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). 1η ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07), https://floods.ypeka.gr/wp-content/uploads/2025/05/EL07_SDKP_1st_REV.pdf retrieved 12.05.2026
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2024). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04). https://floods.ypeka.gr/wp-content/uploads/2025/09/EL04_P12_T1.pdf retrieved 12.05.2026
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2016). Εθνική Στρατηγική Για Την Προσαρμογή Στην Κλιματική Αλλαγή. https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Klimatiki%20Allagi/Prosarmogi/20160406_ESPKA_teliko.pdf retrieved 15.05.2026
- Adaptive Greece Hub. (2022). Έλεγχος Κλιματικής Ανθεκτικότητας. <https://adaptivegreecehub.gr/en/> retrieved 15.05.2026

«Εκτίμηση και Ενίσχυση της Κλιματικής Ανθεκτικότητας Έργου ΑΠΕ»

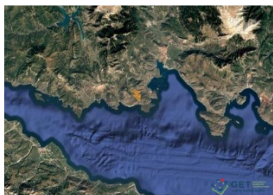
Σοφία Δραμαλιώτη, Επιβλέπων: Ιωάννης Σέμπος
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού, Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναδειχθούν οι ευπάθειες των έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και να υπερθεματιστεί η αναγκαιότητα της εκτίμησης και ενίσχυσης της κλιματικής ανθεκτικότητάς τους, με γνώμονα την περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική βιωσιμότητά τους. Η εργασία εξετάζει αρχικά το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αναλύοντας την έννοια της, τα αίτια και τους μηχανισμούς της αλλά και τις συνέπειες σε ανθρωπογενή και μη συστήματα, εστιάζοντας κυρίως σε αυτές που αφορούν στα ενεργειακά συστήματα και ειδικότερα στα έργα ΑΠΕ. Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των κρίσιμων κλιματικών απειλών που αντιμετωπίζουν τα έργα ΑΠΕ και η ανάγκη εκτίμησης της τρωτότητας τους με σαφή και μετρήσιμο τρόπο, ώστε να προκύπτει ξεκάθαρη σύνδεση μεταξύ του εκτιμώμενου κινδύνου και της προτεινόμενης δράσης για την μείωση του.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η αξιολόγηση της κλιματικής ανθεκτικότητας έργου ΑΠΕ είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του έργου υπό όρους βέλτιστης ενεργειακής αποδοτικότητας με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Για την περίπτωση φωτοβολταϊκού έργου γίνεται εφαρμογή του «Προσωρινού Πλαισίου για την αξιολόγηση των προτάσεων έργων υποδομής που υποβάλλονται προς συγχρηματοδότηση σε Προγράμματα του ΕΣΠΑ 2021 – 2027, όσον αφορά στην κλιματική ανθεκτικότητα», ώστε να αναδειχθεί η δυνατότητα ποσοτικοποίησης της τρωτότητας έργου ΑΠΕ και στοχευμένου σχεδιασμού αντίμετρων για την περαιτέρω ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας. Βασική λοιπόν στόχευση της διαδικασίας δεν αποτελεί απλώς η εκτίμηση της κλιματικής τρωτότητας του έργου αλλά η ορθή πρόβλεψη, ο στοχευμένος σχεδιασμός, η πρόκριση και τελικά η θέσπιση των κατάλληλων μέτρων προσαρμογής, ώστε να επιτευχθεί η ενίσχυση της κλιματικής ανθεκτικότητας του έργου και να καταστεί η λειτουργία του ολιστική και πρακτικά βιώσιμη, εκπληρώνοντας κριτήρια μέγιστης δυνατής αποδοτικότητας.

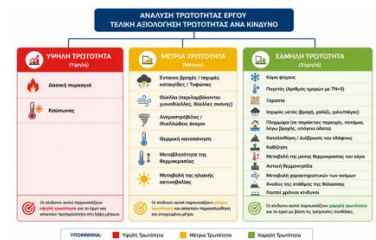


Εικόνα 1. Χάρτης χωροθέτησης φωτοβολταϊκών σταθμών (Πηγή: ΡΑΑΕΥ)

Α. Αναφορικά με το είδος και την τεχνολογία του έργου, διενεργείται ανάλυση της ευαισθησίας του βάσει δυνητικών κλιματικών κινδύνων.

Β. Με κριτήριο τη θέση του έργου, γίνεται ανάλυση της έκθεσης του έργου για τις ίδιες επιλεχθείσες κλιματικές παραμέτρους.

Γ.. Από την ανάλυση τρωτότητας προκύπτει ότι το εξεταζόμενο φωτοβολταϊκό έργο παρουσιάζει υψηλή τρωτότητα σε καύσωνες, δασική πυρκαγιά (Οξείς κίνδυνοι), μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας (Χρόνιοι κίνδυνοι). Παράλληλα το παρόν έργο χαρακτηρίζεται από μέτρια τρωτότητα σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως θύελλες, κυκλώνες, ισχυρές βροχοπτώσεις, καταγίδες(Οξείς κίνδυνοι) και σε θερμική καταπόνηση, μεταβλητότητα θερμοκρασίας (Χρόνιοι κίνδυνοι).



Σχίσμα 1 Ανάλυση Τρωτότητας Φωτοβολταϊκού έργου

Δ. Λόγω της μέτριας / υψηλής τρωτότητας του έργου διενεργείται λεπτομερής ανάλυση διακινδύνευσης (risk assessment) για κάθε σχετική κλιματική παράμετρο, προκειμένου να υπολογιστεί ο εγγενής κίνδυνος. Χαρακτηριστικά προκύπτει πολύ σημαντικός εγγενής κίνδυνος για το έργο από δασική πυρκαγιά και από τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας, σημαντικός εγγενής κίνδυνος από καύσωνα, θερμική καταπόνηση και μεταβλητότητα της θερμοκρασίας και μέτριος εγγενής κίνδυνος από πλημμύρες, θύελλες, ανεμοστρόβιλους, κυκλώνες και ισχυρές βροχοπτώσεις.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	
ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	ΕΠΙΧΡΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ
ΥΠΟΧΡΕΩΤΙΚΟ	Διαρκής Παρακολούθηση και Ανταπόκριση
ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ	Καθορισμός Στρατηγικής Καταπόνησης
ΜΕΤΡΙΟ	Ανάλυση Κινδύνου και Προστασία

Σχίσμα 2 Ανάλυση Διακινδύνευσης για το Φωτοβολταϊκό έργο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός των κατάλληλων μέτρων και η επιτυχής εφαρμογή τους τόσο από τους κατασκευαστές / διαχειριστές του έργου και εν γένει εμπλεκόμενους στη περαιτέρω λειτουργία του, αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη μέγιστη δυνατή απόδοση, αποτελεσματικότητα και βιωσιμότητα του έργου υπό το πρίσμα της ομαλής προσαρμογής του στους διαπιστωμένους, από την ανάλυση τρωτότητας, εγγενείς κινδύνους. Για τις απειλές αυτές μπορούν να προταθούν στοχευμένα μέτρα προσαρμογής.

Πυρκαγιές

Αντικεραυνική προστασία
Αντιπυρικές ζώνες
Καθαρισμός περιοχής
Συστήματα ανίχνευσης καπνού
Χρήση ασυρμάτων για συντονισμό ενεργειών

Καύσωνες - Θερμική καταπόνηση - Μεταβλητότητα θερμοκρασίας

Εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών ψύξης
Αερισμός εξοπλισμού
Διαχείριση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Ηλιακή ακτινοβολία

Συστήματα ψύξης
Περιστευόμενα πάνελ

Πλημμύρες

Κλίσεις απορροής
Ενίσχυση φυτοκαλύψης
Αναχώματα/Υδραυλικά έργα
Χρήση πολυστρωματικών οπίσθιων φύλλων

Άνεμοι/θύελλες

Αεροδυναμικά/ανθεκτικά συστήματα στήριξης
Τακτικός καθαρισμός πάνελ
Σύγχρονης τεχνολογίας φωτοβολταϊκά

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συστηματική και μεθοδευμένη εκτίμηση του κλιματικού κινδύνου των ΑΠΕ, αποτελεί προτεραιότητα για τον σχεδιασμό στοχευμένων μέτρων μείωσης του εγγενούς κινδύνου στους οποίους εμφανίζουν τρωτότητα. Βασική συνιστώσα για την ορθή διεκπεραίωση της διαδικασίας εκτίμησης κινδύνου, όπως προτείνεται στην παρούσα εργασία, και την επιτυχή έκβαση στο σχεδιασμό των προτεινόμενων μέτρων αποτελεί η αξιοπιστία και η καλή ποιότητα των αντλούμενων δεδομένων, η οποία εν πολλοίς εξαρτάται από την αξιολόγηση και επικαιροποίηση των διαφόρων σχεδίων, πλαισίων ή εκθέσεων αλλά και από τις μεθόδους συλλογής τους και την ποιότητα συνεργασίας μεταξύ των βασικών μερών. Η διατομεακή και πολυεπίπεδη άσκηση πολιτικής στα ζητήματα που άπτονται της κλιματικής κρίσης, όπως και η ουσιαστική αξιολόγηση σε κάθε επίπεδο όλων των αποφάσεων και πολιτικών προς σχεδιασμό, είναι αδήριτη ανάγκη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahemd, R. et al. (2025). Advancements in Agrivoltaic Systems for Enhanced Sustainable Energy Utilization-A Review. Environmental Challenges, 101299.
- Harmailil, I. O. et al. (2024). A review on recent photovoltaic module cooling techniques: types and assessment methods. Results in Engineering, 22, 102225.
- Okonkwo, P. C. et al. (2025). Solar PV systems under weather extremes: Case studies, classification, vulnerability assessment, and adaptation pathways. Energy Reports, 13, 929-959.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2016). ΕΘΝΙΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ