



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΣΤΗ
ΖΩΝΗ ΑΠΟΛΙΓΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΖΑΝΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΧΩΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ»

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΚΟΚΜΟΤΟΣ
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ: TMS2408

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. ΧΡΗΣΤΟΣ ΡΟΥΜΠΟΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2026

ΔΗΛΩΣΗ

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου.

Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού της ΜΔΕ ανήκουν στον/στη μεταπτυχιακό/ή φοιτητή/τρια και στο επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους της ΜΔΕ ανήκουν στον/στη μεταπτυχιακό/ή φοιτητή/τρια και στον/στην επιβλέποντα/ουσα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα/ουσας) ως συν-συγγραφών. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του/της μη συμμετέχοντα/ουσας στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

Ο Φοιτητής

Αλέξανδρος Κοκμοτός

Ο Επιβλέπων

Δρ. Χρήστος Ρούμπος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις κλιματικές μεταβολές και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις που συνδέονται με την ενεργειακή μετάβαση και τη διαδικασία απολιγνιτοποίησης στη ζώνη Κοζάνης–Πτολεμαΐδας κατά την περίοδο 1980–2025. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων και στην αξιολόγηση των μεταβολών που έχουν επέλθει λόγω της σταδιακής μείωσης της λιγνιτικής δραστηριότητας και της παράλληλης ανάπτυξης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε στην ανάλυση χρονοσειρών και γεωχωρικών δεδομένων, αξιοποιώντας ιστορικά μετεωρολογικά στοιχεία από δίκτυα παρακολούθησης και αξιόπιστες βάσεις δεδομένων, καθώς και δεδομένα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνιτικές μονάδες και φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε χωρική διερεύνηση μικροκλιματικών χαρακτηριστικών με τη χρήση στοιχείων από μετεωρολογικούς σταθμούς της Περιφερειακής Ενότητας (Π.Ε.) Κοζάνης, ενώ εξετάστηκαν συσχετίσεις μεταξύ υψομέτρου, θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και ενεργειακής παραγωγής.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντική χωρική και χρονική διαφοροποίηση των κλιματικών παραμέτρων στην περιοχή μελέτης, η οποία συνδέεται τόσο με τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής όσο και με τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης της Δυτικής Μακεδονίας. Επιπλέον, διαπιστώθηκαν διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους σταθμών, ενώ η ανάλυση των ενεργειακών δεδομένων κατέδειξε τη σταδιακή υποχώρηση της λιγνιτικής παραγωγής και την αυξανόμενη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα. Οι συσχετίσεις μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των μετεωρολογικών μεταβλητών ανέδειξαν την ύπαρξη αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλιματικών και ενεργειακών διεργασιών, οι οποίες απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση.

Συνολικά, η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλιματικής αλλαγής, χρήσεων γης και ενεργειακής μετάβασης στη Δυτική Μακεδονία, παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα για τον σχεδιασμό πολιτικών βιώσιμης ανάπτυξης και τη διαχείριση περιοχών που βρίσκονται σε καθεστώς μεταλιγνιτικής μετάβασης.

Λέξεις-κλειδιά:

Απανθρακοποίηση, Δυτική Μακεδονία, Ενεργειακή μετάβαση, Κλιματικές μεταβολές, Μικροκλίμα

ABSTRACT

This MSc thesis investigates climate change and environmental effects associated with the energy transition and the lignite phase-out process in the Kozani–Ptolemaida region during the period 1980–2025. Particular emphasis is placed on the long-term evolution of key meteorological parameters and on assessing changes resulting from the gradual decline in lignite activities and the parallel development of Renewable Energy Sources (RES).

The methodological approach was based on the analysis of time-series and geospatial data, using historical meteorological records from monitoring networks and reliable databases, as well as electricity generation data from lignite-fired power plants and photovoltaic stations. In addition, a spatial analysis of microclimatic characteristics was carried out using data from meteorological stations located within the Regional Unit of Kozani. Correlations between altitude, temperature, precipitation and energy production were also investigated.

The results revealed significant spatial and temporal variability of climatic parameters across the study area, reflecting both the effects of climate change and the influence of the distinct geomorphological characteristics of the Western Macedonia basin. Furthermore, differences among the individual meteorological stations were identified, while the analysis of energy data highlighted a gradual decline in lignite-based electricity generation and an increasing contribution of RES to the energy mix. The relationships between energy production and meteorological variables indicate interactions between climatic and energy processes that require further investigation.

Overall, the study contributes to a better understanding of the interactions among climate change, land-use changes and energy transition in Western Macedonia, providing useful insights for sustainable development policies and the management of regions undergoing post-lignite transition.

Keywords:

Decarbonization, Western Macedonia, Energy Transition, Climate Variability, Microclimate

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα Δρ. Χρήστο Ρούμπο για την καθοδήγηση, την υποστήριξή του και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική από την έναρξη έως την ολοκλήρωση της μελέτης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα Μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την καθηγήτρια Χριστίνα Σιοντόρου και τον καθηγητή Κωνσταντίνο Κωστόπουλο για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και προτάσεις τους.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνω επίσης στην κυρία Ελένη Μερτήρη υπεύθυνη υδρογεωλογικών μελετών της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ Α.Ε.), για την ουσιαστική συμβολή της στην εκπόνηση της εργασίας, μέσω των εύστοχων παρατηρήσεων της, των χρήσιμων υποδείξεων της, της διάθεσης δεδομένων και την υποστήριξη της στην επεξεργασία και διαμόρφωση χαρτογραφικού υλικού.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του προγράμματος σπουδών για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου και στους κοντινούς μου ανθρώπους για τη αδιάλειπτη υποστήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	v
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xi
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xiv
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xv
1. Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο.....	1
1.2 Παγκόσμιο Πλαίσιο Κλιματικής Αλλαγής (1980–2025).....	2
1.3 Ευρωπαϊκό Πλαίσιο Κλιματικής Αλλαγής.....	4
1.4 Ελληνικό Πλαίσιο Κλιματικής και Ενεργειακής Μετάβασης (1980–2025).....	8
1.5 Σύνδεση Ελληνικού Πλαισίου με την Ενεργειακή Μετάβαση στην Ηλεκτροπαραγωγή.....	13
1.6 Σκοπός.....	14
1.7 Ερευνητικό Κενό.....	15
2.Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό, Περιβαλλοντικό και Θεσμικό Πλαίσιο Απολιγνιτοποίησης.....	18
2.1 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λιγνιτικής δραστηριότητας.....	18
2.2 Μικροκλίμα και παράγοντες που το επηρεάζουν.....	22
2.3 Η μετάβαση από τον λιγνίτη στην πράσινη ενέργεια.....	26
2.4 Πολιτικές και εργαλεία για τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή.....	29
2.5 Κοινωνικοοικονομικές και χωρικές επιδράσεις της απολιγνιτοποίησης.....	32
3. Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία και Δεδομένα.....	35
3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης (γεωγραφικά, πληθυσμιακά, μορφολογικά).....	35
3.1.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης.....	35
3.1.2 Πληθυσμιακά χαρακτηριστικά της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης.....	36
3.1.3 Μορφολογικά χαρακτηριστικά της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης.....	39

3.2 Χρήσεις Γης στην ευρύτερη Περιοχή Μελέτης	44
3.3 Πηγές και συλλογή δεδομένων.....	47
3.4 Θεωρητικό πλαίσιο επιλογής και αξιολόγησης δεδομένων	48
3.5 Περιορισμοί και αβεβαιότητες των δεδομένων.....	50
3.6 Προεπεξεργασία και έλεγχος ποιότητας δεδομένων	51
4. Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	55
4.1 Διαχρονικές τάσεις θερμοκρασίας, υετού και λοιπών παραμέτρων	55
4.1.1 Συγκριτική ανάλυση των μετεωρολογικών σταθμών	55
4.1.2 Κλιματικά Δεδομένα της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης (Σταθμός Κοζάνης)	56
4.1.2.1 Βροχόπτωση	61
4.1.2.2 Μέση μέγιστη θερμοκρασία	63
4.1.2.3 Μέση ελάχιστη θερμοκρασία	64
4.1.2.4 Μέση μέγιστη σχετική υγρασία (RH).....	65
4.1.2.5 Μέση ελάχιστη σχετική υγρασία (RH).....	67
4.1.2.6 Μέσος όρος ταχύτητας ανέμου (m/s)	68
4.1.2.7 Κατανομή διευθύνσεων ανέμου.....	69
4.2 Χωρικές διαφοροποιήσεις μικροκλιματικών μεταβολών	71
4.2.1 Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης ετήσιας βροχόπτωσης	71
4.2.2 Συσχέτιση υψομέτρου και μέγιστης θερμοκρασίας	73
4.2.3 Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας.....	75
4.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε σχέση με την απολιγνιτοποίηση	76
4.3.1 Διαχρονική εξέλιξη της λιγνιτικής παραγωγής στην περιοχή Κοζάνης-Πτολεμαΐδας	76
4.3.2 Μεθοδολογική προσέγγιση για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ενεργειακής παραγωγής και μετεωρολογικών παραμέτρων.....	80
4.3.3 Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμοκρασιακών συνθηκών	82
4.3.3.1 Συσχέτιση παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και θερμοκρασίας	82
4.3.3.2 Συσχέτιση λιγνιτικής παραγωγής και θερμοκρασίας	84
4.3.3.3 Συσχέτιση μεταξύ παραγωγής από ΑΠΕ και λιγνιτικής παραγωγής.....	86

4.3.4 Συγκριτική αξιολόγηση της συμμετοχής του λιγνίτη και των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της περιοχής και της θερμοκρασίας	88
4.4 Σύγκριση με βιβλιογραφικά δεδομένα και διεθνείς μελέτες	89
4.5 Περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιδράσεις.....	92
4.6 Κριτική αποτίμηση και όρια της έρευνας.....	94
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προτάσεις	97
5.1 Κύρια συμπεράσματα της έρευνας.....	97
5.2 Επιστημονική και πρακτική συμβολή της μελέτης	98
5.3 Προτάσεις για πολιτικές προσαρμογής και βιώσιμη ανάπτυξη	100
5.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	102
Βιβλιογραφία	105

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας (anomaly) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1850–1900, βάσει πολλαπλών κλιματικών βάσεων δεδομένων για την περίοδο 1850–2025.....	3
Σχήμα 1.2: Διαχρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του καλοκαιριού (Ιούνιος-Αύγουστος) στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1960-2024.....	9
Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των κύριων μηχανισμών μέσω των οποίων η επιφανειακή μεταλλευτική δραστηριότητα επηρεάζει τα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά συστήματα.....	20
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας μεταξύ αγροτικών και αστικών περιοχών (φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας).....	23
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση των βασικών μηχανισμών και επιδράσεων που συνδέουν την επιφανειακή λιγνιτική δραστηριότητα με μεταβολές στο μικροκλίμα και στην ποιότητα του αέρα.....	24
Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της μετάβασης από τα ορυκτά καύσιμα σε ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο σε ΑΠΕ.....	28
Σχήμα 3.1: Διοικητική και γεωγραφική απεικόνιση της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης	35
Σχήμα 3.2: Εξέλιξη πληθυσμού Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης (1951-2021).....	37
Σχήμα 3.3: Τοπογραφική Απεικόνιση της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης.	39
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής μεθοδολογικής προσέγγιση της έρευνας.....	54
Σχήμα 4.1: Χάρτης Μετεωρολογικών Σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (μπλε χρώμα) και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (πράσινο χρώμα) της ευρύτερης περιοχής.	55
Σχήμα 4.2: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και μέσο μηνιαίο ύψος υετού στον σταθμό Κοζάνης (1955–2024).....	58
Σχήμα 4.3: Ετήσια κατανομή της σχετικής υγρασίας στον σταθμό της Κοζάνης.....	59
Σχήμα 4.4: Μηνιαίες ανωμαλίες θερμοκρασίας στην Κοζάνη από το 1979 έως το 2024.	60

Σχήμα 4.5: Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, της Πτολεμαΐδας Va, της Άδρασσας και της Κοιλιάδας για την περίοδο 2010–2025.	62
Σχήμα 4.6: Μέσες μέγιστες μηνιαίες θερμοκρασίες στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, της Πτολεμαΐδας Va, της Άδρασσας και της Κοιλιάδας.	63
Σχήμα 4.7: Μέσες ελάχιστες μηνιαίες θερμοκρασίες στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, της Πτολεμαΐδας Va, της Άδρασσας και της Κοιλιάδας.	64
Σχήμα 4.8: Μέση μέγιστη μηνιαία σχετική υγρασία στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, και της Άδρασσας.	66
Σχήμα 4.9: Μέση ελάχιστη μηνιαία σχετική υγρασία στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, και της Άδρασσας.	67
Σχήμα 4.10: Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s) στους μετεωρολογικούς σταθμούς Νοτίου Πεδίου, Μαυροπηγής, Πτολεμαΐδας Va, Άδρασσας και Κοιλιάδας.	68
Σχήμα 4.11: Κατανομή των επικρατουσών διευθύνσεων ανέμου στους μετεωρολογικούς σταθμούς της μελέτης.	70
Σχήμα 4.12: Συσχέτιση υψομέτρου και συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για το έτος 2025.	72
Σχήμα 4.13: Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης μέγιστης θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Αύγουστος). Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία. συγγραφέα.	73
Σχήμα 4.14: Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας κατά την χειμερινή περίοδο (Δεκέμβριος–Φεβρουάριος),	75
Σχήμα 4.15: Διαχρονική εξέλιξη της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία κατά την περίοδο 1957–2025.	77
Σχήμα 4.16: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη κατά την περίοδο 1957–2025.	78
Σχήμα 4.17: Συγκριτική απεικόνιση της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη και της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη για την περίοδο 1957–2025.	79

Σχήμα 4.18: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη και της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία κατά την περίοδο 1957–2025.	80
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς ως προς τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον Ιανουάριο του 2025.	82
Σχήμα 4.21: Απεικόνιση της μεταβολής της ημερήσιας φωτοβολταϊκής παραγωγής σε σχέση με τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον μήνα Ιούλιο 2025.....	83
Σχήμα 4.22: Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας λιγνιτικής παραγωγής ως προς τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον Ιανουάριο του 2025.	84
Σχήμα 4.23: Απεικόνιση της μεταβολής της ημερήσιας λιγνιτικής παραγωγής σε σχέση με τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον μήνα Ιούλιο 2025.	85
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και λιγνιτικές μονάδες κατά τον Ιανουάριο του 2025.	86
Σχήμα 4.25: Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και της αντίστοιχης λιγνιτικής παραγωγής για τον μήνα Ιούλιο 2025.	87

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Βασικές περιβαλλοντικές επιδράσεις λιγνιτικής δραστηριότητας.....	19
Πίνακας 2.2: Συγκριτική αποτίμηση λιγνίτη και ΑΠΕ.....	27
Πίνακας 2.3: Επιδράσεις, προκλήσεις και ευκαιρίες της απολιγνιτοποίησης.	34
Πίνακας 3.1: Εξέλιξη πληθυσμού Π.Ε. Κοζάνης (1951-2021).....	37
Πίνακας 3.2: Χρήσεις γης στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας στο τέλος του έτους 2025.....	45
Πίνακας 4.1: Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών Δικτύου Κοζάνης.	56
Πίνακας 4.2: Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων 1955-2024 του Σταθμού Κοζάνης της ΕΜΥ.....	57
Πίνακας 4.4: Ενεργειακές εγκαταστάσεις και μετεωρολογικοί σταθμοί της Περιοχής Κοζάνης-Πτολεμαΐδας	81

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Θερμοκρασιακές ανωμαλίες της επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη το 2024.....	6
Εικόνα 1.2: Εναέρια απεικόνιση λιγνιτικού ορυχείου στην περιοχή Πτολεμαΐδας, όπου αποτυπώνεται η εκτεταμένη τοπογραφική μεταβολή του εδάφους και η κλίμακα των εξορυκτικών δραστηριοτήτων.	12
Εικόνα 3.1: Γεωλογικός – υδρολιθολογικός χάρτης Λεκάνης Σαριγκιόλ (οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν ψηφιοποιηθεί από τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ 1:50.000). Οι περιοχές εκσκαφών – αποθέσεων έχουν προκύψει βάσει του stand 06.2025 των ορυχείων.	41
Εικόνα 3.2: Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου της περιοχής μελέτης και χωρική κατανομή των κύριων λιγνιτικών πεδίων (stand ορυχείων 02.2026).	42
Εικόνα 3.3: Χωρική κατανομή κλίσεων στην περιοχή μελέτης και στα κύρια λιγνιτικά πεδία (stand ορυχείων 02.2026).	43

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ, ΣΥΜΒΟΛΩΝ & ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ

Συντομογραφία /Σύμβολο	Επεξήγηση στα ελληνικά	Αγγλικός όρος
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρ. Ενέργειας	Independent Power Transmission Operator
ΑΗΣ	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός	Steam/Thermal Power Plant
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Renewable Energy Sources
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού	Public Power Corporation
ΔΛΚΔΜ	Διεύθυνση Λιγνιτικού Κέντρου Δυτ. Μακεδονίας	Department of the Western Macedonia Lignite Centre
ΕΑΑ	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών	National Observatory of Athens (NOA)
ΕΕ/EU	Ευρωπαϊκή Ένωση	European Union
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή	Hellenic Statistical Authority
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία	Hellenic National Meteorological Service
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα	National Energy and Climate Plan (NECP)
ΙΓΜΕ	Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών	Institute of Geology and Mineral Exploration
ΚΠ&ΧΓ	Κλάδος Περιβάλλοντος και Χρήσεων Γης	Environmental and Land Use Division
ΚΥΤ	Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης	Extra High Voltage Substation
ΜΠΕ	Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	Environmental Impact Assessment (EIA)
ΜΣ	Μετεωρολογικός Σταθμός	Meteorological Station
Π.Ε.	Περιφερειακή Ενότητα	Regional Unit
ΣΔΑΜ	Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης	Territorial Just Transition Plan (TJTP)
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας	Ministry of Environment and Energy
CLC	Κάλυψη Γης CORINE	CORINE Land Cover

CORINE	Συντονισμός Πληροφοριών για το Περιβάλλον	Coordination of Information on the Environment
C3S	Υπηρεσία Κλιματικής Αλλαγής Copernicus	Copernicus Climate Change Service
DEM	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	Digital Elevation Model
EEA	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος	European Environment Agency
ECMWF	Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	Βάση δεδομένων επανανάλυσης ERA5	ERA5 Reanalysis Dataset
EU ETS	Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της ΕΕ	European Union Emissions Trading System
EUCRA	Ευρωπαϊκή Αξιολόγηση Κλιματικού Κινδύνου	European Climate Risk Assessment
EURO-CORDEX	Ευρωπαϊκό πρόγραμμα περιφερειακών κλιματικών προσομοιώσεων	European Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
GIS	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	Geographic Information Systems
IEA	Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας	International Energy Agency
IPCC	Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή	Intergovernmental Panel on Climate Change
JTF	Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης	Just Transition Fund
LST	Θερμοκρασία Επιφάνειας Εδάφους	Land Surface Temperature
NASA POWER	Βάση Μετεωρολογικών και ενεργειακών δεδομένων της NASA	NASA Prediction of Worldwide Energy Resources
OHC	Θερμικό Περιεχόμενο Ωκεανών	Ocean Heat Content
PV	Φωτοβολταϊκός Σταθμός	Photovoltaic Station
REPowerEU	Σχέδιο ενεργειακής απεξάρτησης της ΕΕ	Plan of European Energy Independence
VRES	Μεταβλητές Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Variable Renewable Energy Sources
WMO	Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός	World Meteorological Organization

Σύμβολο/ Μονάδα	Επεξήγηση στα ελληνικά	Αγγλικός όρος
°C	Βαθμοί Κελσίου	Degrees Celsius
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα	Carbon Dioxide
SO ₂	Διοξείδιο του θείου	Sulphur Dioxide
NO _x	Οξείδια του αζώτου	Nitrogen Oxides
PM10	Αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 10 μm	Particulate Matter <10 μm
PM2.5	Αιωρούμενα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 2,5 μm	Particulate Matter <2.5 μm
Ppm	Μέρη ανά εκατομμύριο	Parts per million
m/s	Μέτρα ανά δευτερόλεπτο	Metres per second
Mt	Εκατομμύρια τόνοι (Μεγατόνοι)	Megatonnes (million tonnes)
MWh	Μεγαβατώρα	Megawatt-hour
RH	Σχετική υγρασία	Relative Humidity

1. Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις κλιματικές μεταβολές που έχουν καταγραφεί στην ευρύτερη ζώνη απολιγνιτοποίησης της Περιφερειακής Ενότητας (Π.Ε.) Κοζάνης, αξιοποιώντας χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων και γεωχωρικές μεθόδους ανάλυσης. Η περιοχή μελέτης, η οποία επί πολλές δεκαετίες αποτέλεσε το σημαντικότερο κέντρο λιγνιτικής δραστηριότητας της χώρας, βρίσκεται σήμερα σε περίοδο έντονου περιβαλλοντικού, ενεργειακού και χωρικού μετασχηματισμού. Η σταδιακή παύση της εξορυκτικής δραστηριότητας και η μετάβαση σε ένα νέο παραγωγικό μοντέλο δημιουργούν την ανάγκη για τη διερεύνηση της εξέλιξης των τοπικών κλιματικών χαρακτηριστικών και της πιθανής σύνδεσής τους με τις αλλαγές που συντελούνται στην περιοχή.

Η μελέτη εστιάζει κυρίως στην περίοδο 1980–2025, ένα χρονικό εύρος ικανό να αποτυπώσει μακροχρόνιες κλιματικές τάσεις, τον εντοπισμό σημαντικών αποκλίσεων ή πιθανών σημείων καμπής, καθώς και την αποτίμηση των πιθανών επιδράσεων των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, κυρίως των εξορυκτικών και ενεργειακών λειτουργιών, στο μικροκλίμα της περιοχής. Μέσω της χρήσης χρονοσειρών θερμοκρασίας, υετού και άλλων βασικών μετεωρολογικών μεταβλητών, η εργασία επιδιώκει να προσφέρει μια αναλυτική και επιστημονικά τεκμηριωμένη εικόνα της κλιματικής εξέλιξης.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση γεωχωρικών δεδομένων και τεχνικών GIS επιτρέπει όχι μόνο την παρακολούθηση των κλιματικών παραμέτρων, αλλά και τη χωρική τους αποτύπωση, ώστε να καταστεί δυνατός ο εντοπισμός περιοχών με ιδιαίτερες κλιματικές συμπεριφορές, καθώς και η συσχέτισή τους με τις αλλαγές στις χρήσεις γης, την εξέλιξη της έκτασης και της μορφολογίας των ορυχείων και τις περιβαλλοντικές παρεμβάσεις των τελευταίων ετών.

Η εργασία δεν περιορίζεται στην απλή περιγραφή κλιματικών μεταβολών, αλλά εξετάζει τη δυναμική σχέση μεταξύ ενεργειακών δραστηριοτήτων, μεταβολών χρήσεων γης και τοπικού μικροκλίματος. Με τον τρόπο αυτό, συμβάλλει στη σύνδεση της κλιματικής ανάλυσης με ζητήματα ενεργειακού και χωρικού σχεδιασμού σε περιφερειακό επίπεδο.

1.2 Παγκόσμιο Πλαίσιο Κλιματικής Αλλαγής (1980–2025)

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις του 21ου αιώνα, επηρεάζοντας τη λειτουργία των φυσικών οικοσυστημάτων, την ενεργειακή ασφάλεια, την οικονομική δραστηριότητα και τη βιωσιμότητα των κοινωνιών σε παγκόσμια κλίμακα. Σύμφωνα με την Έκτη Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), η ανθρώπινη επίδραση στο κλιματικό σύστημα είναι πλέον αδιαμφισβήτητη, κυρίως λόγω της συνεχούς αύξησης της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου από την καύση ορυκτών καυσίμων, τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τις αλλαγές χρήσεων γης (IPCC, 2023).

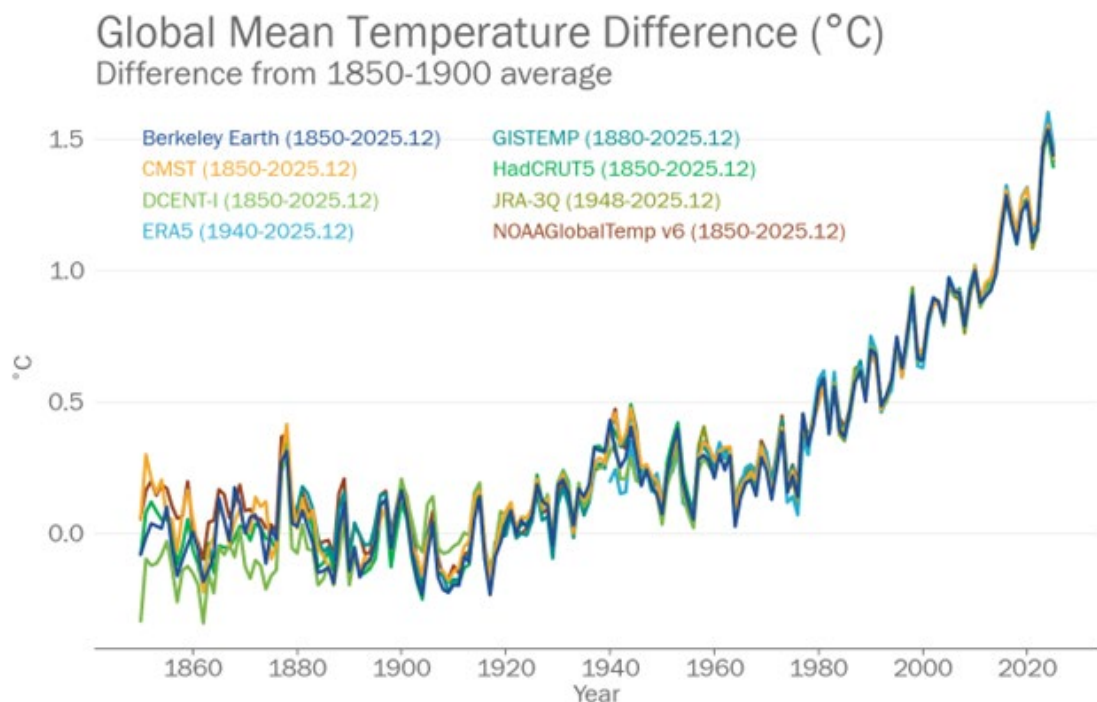
Η περίοδος 1980–2025 χαρακτηρίζεται από έντονη επιτάχυνση της παγκόσμιας θέρμανσης, αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων, ενίσχυση της ενεργειακής ανισορροπίας της Γης και σημαντικές μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα ακολούθησε σταθερά ανοδική πορεία, αυξανόμενη από περίπου 338 ppm το 1980 σε περισσότερα από 420 ppm το 2024. Σύμφωνα με το Global Carbon Budget 2024, η μέση ατμοσφαιρική συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ανήλθε σε 422,5 ppm το 2024, τιμή που αντιστοιχεί σε αύξηση άνω του 50% σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα των περίπου 278 ppm (Friedlingstein et al., 2025).

Η αύξηση αυτή προκαλεί θετικό ακτινοβολιακό εξαναγκασμό (positive radiative forcing), διαταράσσοντας το ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη. Ως αποτέλεσμα, το κλιματικό σύστημα απορροφά περισσότερη ενέργεια από όση αποβάλλει στο διάστημα, οδηγώντας σε σταδιακή θέρμανση της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και της χερσαίας επιφάνειας (Forster et al., 2021). Η ενεργειακή αυτή ανισορροπία αποτελεί βασικό μηχανισμό επιτάχυνσης της σύγχρονης κλιματικής αλλαγής και συνδέεται άμεσα με την ενίσχυση φαινομένων όπως οι καύσωνες, οι έντονες βροχοπτώσεις, οι ξηρασίες και οι μεταβολές στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία.

Η τελευταία δεκαετία αναγνωρίζεται ως η θερμότερη περίοδος που έχει καταγραφεί παγκοσμίως. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO), τα έτη 2015–2024 κατατάσσονται ως τα θερμότερα στο ιστορικό αρχείο παρατηρήσεων, ενώ το 2024 αναδείχθηκε το θερμότερο έτος παγκοσμίως (WMO, 2025). Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία για το 2024 εκτιμάται ότι ήταν περίπου $+1,55^\circ\text{C}$

υψηλότερη σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο 1850–1900. Η υπηρεσία Copernicus Climate Change Service επιβεβαίωσε ότι το 2024 αποτέλεσε το πρώτο ημερολογιακό έτος κατά το οποίο η μέση παγκόσμια θερμοκρασία υπερέβη προσωρινά το όριο του +1,5°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα (Copernicus Climate Change Service, 2025).

Στο παρακάτω Σχήμα 1.1, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία εμφανίζει σαφή ανοδική τάση, με ιδιαίτερα έντονη αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες.



Σχήμα 1.1: Μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας (anomaly) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1850–1900, βάσει πολλαπλών κλιματικών βάσεων δεδομένων για την περίοδο 1850–2025

Πηγή: WMO, 2025

Η μεταβολή αυτή δεν σημαίνει απαραίτητα μόνιμη υπέρβαση του στόχου της Συμφωνίας του Παρισιού, καθώς ο συγκεκριμένος στόχος αναφέρεται σε μακροχρόνιο μέσο όρο θερμοκρασίας. Ωστόσο, η συνεχιζόμενη άνοδος της θερμοκρασίας αποτελεί ένδειξη ότι το κλιματικό σύστημα προσεγγίζει κρίσιμα σημεία μεταβολής, αυξάνοντας την πιθανότητα εκδήλωσης σημαντικών επιπτώσεων στα φυσικά και ανθρωπογενή συστήματα (IPCC, 2023). Παρά την ισχυρή επιστημονική τεκμηρίωση των παγκόσμιων

τάσεων, οι περισσότερες αναλύσεις επικεντρώνονται κυρίως σε αναλύσεις μεγάλης χωρικής κλίμακας, χωρίς να αποτυπώνουν επαρκώς τις τοπικές διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Η ανάγκη κάλυψης αυτού του ερευνητικού κενού καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, όπως οι ζώνες εξόρυξης λιγνίτη και παραγωγής ενέργειας από θερμικούς ανθρακικούς σταθμούς.

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η θέρμανση των ωκεανών, οι οποίοι απορροφούν περισσότερο από το 90% της πλεονάζουσας θερμότητας που συσσωρεύεται στο κλιματικό σύστημα λόγω των αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τους Cheng et al. (2025), το θερμικό περιεχόμενο των ωκεανών (Ocean Heat Content – OHC) κατέγραψε νέο ιστορικό υψηλό το 2024, επιβεβαιώνοντας τη συνεχιζόμενη συσσώρευση ενέργειας στο παγκόσμιο κλιματικό σύστημα. Η διαδικασία αυτή συνδέεται άμεσα με τη θερμική διαστολή των θαλάσσιων υδάτων, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, την ενίσχυση των θαλάσσιων καυσώνων και τη διατάραξη της θαλάσσιας βιοποικιλότητας.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δεν εμφανίζονται ομοιόμορφα σε όλες τις περιοχές του πλανήτη. Οι χερσαίες περιοχές παρουσιάζουν ταχύτερους ρυθμούς θέρμανσης, ενώ η Μεσόγειος αναγνωρίζεται ως μια από τις πλέον ευάλωτες περιοχές της Ευρώπης, με αυξημένη συχνότητα καυσώνων, ενίσχυση των περιόδων ξηρασίας και αυξημένο κίνδυνο περιβαλλοντικών πιέσεων (Lionello et al., 2022).

Οι παραπάνω κλιματικές εξελίξεις οδηγούν τον παγκόσμιο ενεργειακό τομέα σε μια περίοδο δομικών αλλαγών, οι οποίες δεν προκύπτουν μόνο από την τεχνολογική πρόοδο, αλλά και από την ανάγκη προσαρμογής στις νέες κλιματικές συνθήκες. Η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και η ενίσχυση των επενδύσεων σε καθαρές τεχνολογίες αντανακλούν τη μακροχρόνια προσπάθεια περιορισμού των CO₂ και μετάβασης σε ενεργειακά συστήματα χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος, διαμορφώνοντας ένα νέο πλαίσιο για την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (IEA, 2024).

1.3 Ευρωπαϊκό Πλαίσιο Κλιματικής Αλλαγής

Η Ευρώπη αναγνωρίζεται ως την ταχύτερα θερμαινόμενη ήπειρο παγκοσμίως, με τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας να είναι σχεδόν διπλάσιος σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο όρο. Σύμφωνα με την έκθεση European State of the Climate 2024, η ευρωπαϊκή

ήπειρος παρουσιάζει συνεχώς επιταχυνόμενη άνοδο της θερμοκρασίας, αύξηση της συχνότητας και έντασης ακραίων καιρικών φαινομένων και σημαντικές μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τα φυσικά οικοσυστήματα, την αγροτική παραγωγή, την ενεργειακή ασφάλεια και τις υποδομές (Copernicus Climate Change Service and WMO, 2025). Οι εξελίξεις αυτές συνδέονται με τη συνεχιζόμενη ενίσχυση της ενεργειακής ανισορροπίας του κλιματικού συστήματος, καθώς και με την αυξημένη συχνότητα ακραίων θερμικών επεισοδίων, ξηρασιών και πλημμυρικών φαινομένων που καταγράφονται σε ολόκληρη την ευρωπαϊκή επικράτεια.

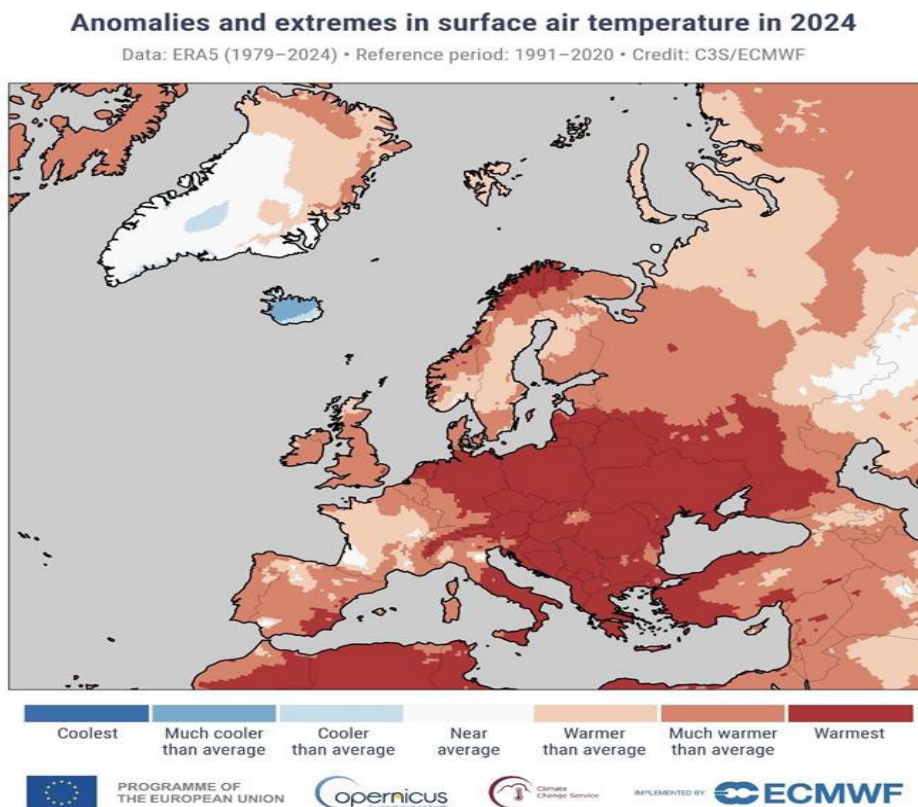
Κατά την περίοδο 1980–2025, η ευρωπαϊκή ήπειρος βίωσε σημαντικές κλιματικές μεταβολές, με τις υψηλότερες θερμοκρασιακές ανωμαλίες να καταγράφονται κυρίως στη Νότια και Ανατολική Ευρώπη. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EEA), οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής εμφανίζονται πλέον με συστημικό χαρακτήρα, επηρεάζοντας ταυτόχρονα τομείς όπως οι υδατικοί πόροι, η δημόσια υγεία, η ενεργειακή επάρκεια, τα δίκτυα μεταφορών και η επισιτιστική ασφάλεια (EEA, 2024). Η πρώτη Ευρωπαϊκή Αξιολόγηση Κλιματικού Κινδύνου (European Climate Risk Assessment – EUCRA, 2024) υπογραμμίζει ότι πολλές περιοχές της Ευρώπης βρίσκονται ήδη αντιμέτωπες με κρίσιμα επίπεδα κλιματικού κινδύνου, απαιτώντας άμεση επιτάχυνση των πολιτικών προσαρμογής και μετριασμού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή της Μεσογείου, η οποία αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα από τα σημαντικότερα “*climate hotspots*” παγκοσμίως. Η λεκάνη της Μεσογείου καταγράφει υψηλότερους ρυθμούς θέρμανσης σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο όρο, αυξημένη συχνότητα καυσώνων, μείωση των κατακρημνίσεων και ενίσχυση των φαινομένων ξηρασίας και ερημοποίησης (Lionello et al., 2022). Οι εξελίξεις αυτές δημιουργούν αυξανόμενες πιέσεις στους υδατικούς πόρους, στη γεωργική παραγωγή και στα φυσικά οικοσυστήματα της Νότιας Ευρώπης, επηρεάζοντας παράλληλα την οικονομική και κοινωνική σταθερότητα των μεσογειακών περιοχών.

Σύγχρονες έρευνες για τη Μεσόγειο δείχνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας επιταχύνθηκε σημαντικά κατά τα τελευταία έτη, με το 2024 να χαρακτηρίζεται από θαλάσσιους καύσωνες πρωτοφανούς έντασης και εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες επιφανειακών υδάτων (Napolitano et al., 2025). Η συσσώρευση θερμότητας στη Μεσόγειο Θάλασσα επηρεάζει άμεσα τη δυναμική της ατμόσφαιρας και ενισχύει την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων, παρατεταμένων καυσώνων και περιόδων ξηρασίας στις γειτονικές χερσαίες περιοχές. Επιπλέον, η άνοδος της

θερμοκρασίας των θαλάσσιων υδάτων επιδρά αρνητικά στη θαλάσσια βιοποικιλότητα και στη λειτουργία των παράκτιων οικοσυστημάτων, αυξάνοντας τη συνολική περιβαλλοντική τρωτότητα της περιοχής.

Η χωρική κατανομή των θερμοκρασιακών ανωμαλιών της επιφανειακής θερμοκρασίας του αέρα στην Ευρώπη κατά το 2024 αποτυπώνεται στην Εικόνα 1.1, όπου αποτυπώνεται η επικράτηση θετικών θερμοκρασιακών αποκλίσεων στο μεγαλύτερο μέρος της ηπείρου, με μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις στις περιοχές της Νότιας και Ανατολικής Ευρώπης. Η εικόνα επιβεβαιώνει τη γενικευμένη τάση θέρμανσης που καταγράφεται τις τελευταίες δεκαετίες και αναδεικνύει τη γεωγραφική έκταση του φαινομένου (Copernicus Climate Change Service and WMO, 2025).



Εικόνα 1.1: Θερμοκρασιακές ανωμαλίες της επιφανειακής θερμοκρασίας αέρα στην Ευρώπη το 2024.

Πηγή: Copernicus Climate Change Service (C3S) and World Meteorological Organization (WMO), 2025, based on ERA5 data (ECMWF).

Η επιδείνωση των κλιματικών συνθηκών οδήγησε την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου θεσμικού και πολιτικού πλαισίου για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης.

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), η οποία παρουσιάστηκε το 2019, αποτέλεσε σημείο καμπής για την ευρωπαϊκή περιβαλλοντική πολιτική, θέτοντας ως στρατηγικό στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 (European Commission, 2025). Το νέο αυτό πλαίσιο δεν περιορίζεται αποκλειστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά επεκτείνεται στον συνολικό μετασχηματισμό του παραγωγικού και ενεργειακού μοντέλου της Ευρώπης.

Στο πλαίσιο αυτό, η ΕΕ προχώρησε στη δημιουργία του πακέτου πολιτικών “Fit-for-55”, το οποίο θέτει ως στόχο τη μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Οι μεταρρυθμίσεις αυτές συνοδεύτηκαν από σημαντική αναθεώρηση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), αυστηρότερους στόχους ενεργειακής απόδοσης, ενίσχυση της διείσδυσης των ΑΠΕ και χρηματοδοτικά εργαλεία για τις περιοχές που επηρεάζονται από την απολιγνιτοποίηση και την απανθρακοποίηση (European Commission, 2022; European Commission, 2024).

Η γεωπολιτική κρίση του 2022 και η ενεργειακή αστάθεια που ακολούθησε επιτάχυναν περαιτέρω τις διαδικασίες ενεργειακού μετασχηματισμού στην Ευρώπη. Το Σχέδιο REPowerEU, που υιοθετήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2022 ως απάντηση στην ενεργειακή κρίση και με στόχο τη μείωση της εξάρτησης της Ευρωπαϊκής Ένωσης από τα ορυκτά καύσιμα, ανέδειξε την ενεργειακή ασφάλεια και τη στρατηγική αυτονομία σε βασικές προτεραιότητες της ευρωπαϊκής πολιτικής. Παράλληλα, προώθησε την επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ, την αποθήκευση ενέργειας, τις υποδομές πράσινου υδρογόνου και τον εκσυγχρονισμό των ενεργειακών δικτύων (European Commission, 2022). Η μετάβαση αυτή αντιμετωπίζεται πλέον όχι μόνο ως περιβαλλοντική αναγκαιότητα, αλλά και ως κρίσιμο ζήτημα οικονομικής ανθεκτικότητας και γεωπολιτικής σταθερότητας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η έννοια της «Δίκαιης Μετάβασης» (Just Transition) απέκτησε κεντρικό ρόλο στην ευρωπαϊκή πολιτική για το κλίμα και την ενέργεια. Η μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα επηρεάζει άμεσα τις περιφέρειες με υψηλή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, ιδιαίτερα τις λιγνιτικές περιοχές της Κεντρικής και Νότιας Ευρώπης. Για τον λόγο αυτό, η ΕΕ δημιούργησε ειδικούς μηχανισμούς χρηματοδότησης και αναπτυξιακής στήριξης, όπως το Just Transition Fund, με στόχο τη μείωση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων της απολιγνιτοποίησης (European Commission, 2024).

Στο πλαίσιο αυτό, η Δυτική Μακεδονία αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση ευρωπαϊκής περιφέρειας που βρίσκεται σε φάση ταχείας ενεργειακής μετάβασης, δηλαδή μετάβασης από ένα παραγωγικό πρότυπο που βασιζόταν επί δεκαετίες στην εξόρυξη και αξιοποίηση του λιγνίτη προς ένα νέο μοντέλο που στηρίζεται στις ΑΠΕ. Η σταδιακή απόσυρση των λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής επηρεάζει άμεσα τη δομή της τοπικής οικονομίας, τις χρήσεις γης, την απασχόληση και τη χωρική οργάνωση της περιοχής, δημιουργώντας νέες προκλήσεις αλλά και ευκαιρίες ανάπτυξης (Boulogiorgou and Kaldellis, 2025). Η ανάγκη συνδυασμού πολιτικών ενεργειακής μετάβασης, περιβαλλοντικής αποκατάστασης και κλιματικής προσαρμογής αναδεικνύει τις λιγνιτικές/ανθρακικές περιοχές της Ευρώπης σημαντικά πεδία μελέτης για τη σύγχρονη κλιματική πολιτική και τη βιώσιμη περιφερειακή ανάπτυξη.

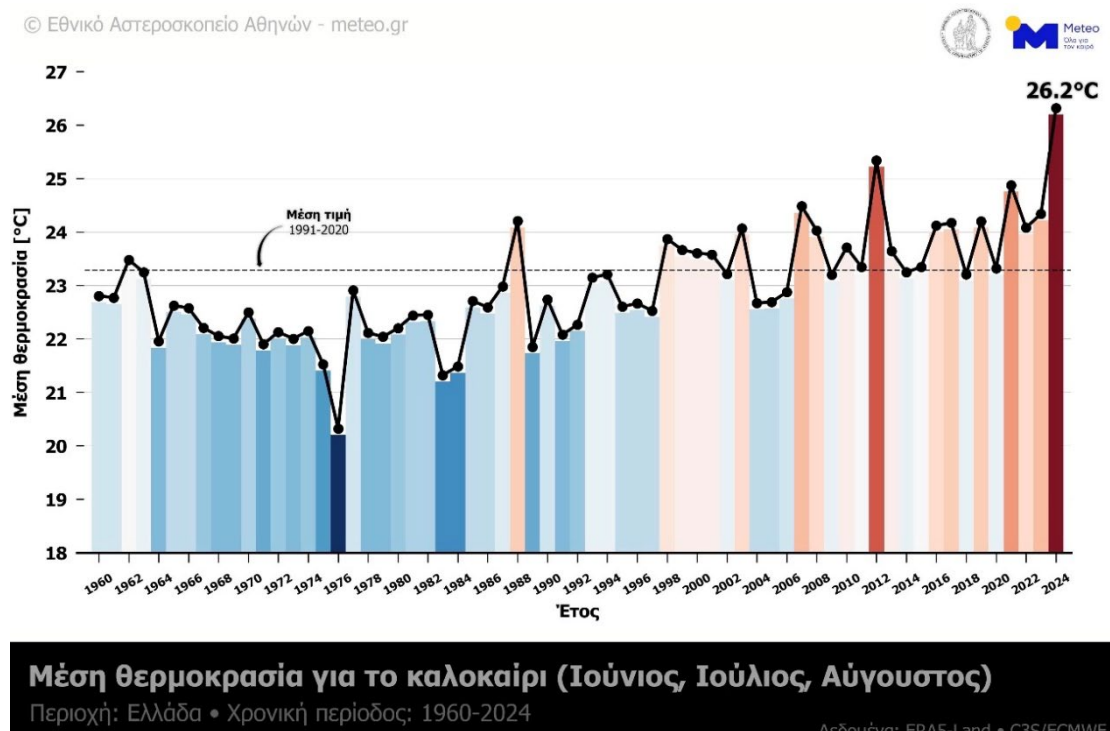
1.4 Ελληνικό Πλαίσιο Κλιματικής και Ενεργειακής Μετάβασης (1980–2025)

Η Ελλάδα, ως τμήμα της Ανατολικής Μεσογείου, συγκαταλέγεται στις πλέον ευάλωτες περιοχές της Ευρώπης απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η Μεσογειακή λεκάνη αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα από τα σημαντικότερα “*climate change hotspots*”, παρουσιάζοντας ταχύτερους ρυθμούς θέρμανσης σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο όρο, αυξημένη συχνότητα ακραίων θερμικών επεισοδίων, ενίσχυση των περιόδων ξηρασίας και εκτεταμένες μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο (Lionello et al., 2022; IPCC, 2023). Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας, η έντονη τοπογραφική διαφοροποίηση και η εξάρτηση κρίσιμων παραγωγικών τομέων από τις κλιματικές συνθήκες καθιστούν τη χώρα ιδιαίτερα εκτεθειμένη σε περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς κινδύνους που σχετίζονται με τη μεταβολή του κλίματος.

Κατά την περίοδο 1980–2025, η ελληνική επικράτεια παρουσιάζει συστηματικές μεταβολές των βασικών κλιματικών παραμέτρων. Σύγχρονες επιστημονικές μελέτες τεκμηριώνουν αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, συνοδευόμενη από μείωση της χιονοκάλυψης, μεγαλύτερη διάρκεια θερμών περιόδων και μεταβολές στη συχνότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων (Lagouvardos et al., 2024; Ioannidis et al., 2025). Η άνοδος αυτή της θερμοκρασίας επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία των φυσικών οικοσυστημάτων, τη γεωργική παραγωγή, τη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων και τη ζήτηση ενέργειας, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες.

Την ίδια στιγμή, οι προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης του προγράμματος EURO-CORDEX δείχνουν ότι η Ελλάδα θα συνεχίσει να θερμαίνεται κατά τις επόμενες δεκαετίες, με τις υψηλότερες αυξήσεις να καταγράφονται κατά τη θερινή περίοδο και κυρίως στις ηπειρωτικές περιοχές της χώρας (Georgoulas et al., 2022). Οι προβλέψεις αυτές συνδέονται με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης ακραίων θερμικών επεισοδίων, μεγαλύτερη συχνότητα “τροπικών νυχτών” και ενίσχυση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, ιδιαίτερα στα μεγάλα πολεοδομικά συγκροτήματα (Pantavou et al., 2024). Οι θερμοκρασιακές μεταβολές αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τόσο τη βιοκλιματική άνεση του πληθυσμού όσο και την ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη, επιβαρύνοντας περαιτέρω τα ενεργειακά συστήματα της χώρας.

Η τάση της μέσης θερμοκρασίας του καλοκαιριού στην Ελλάδα αποτυπώνει τη σταδιακή άνοδο των θερινών θερμοκρασιών κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Η διαχρονική αυτή τάση υποδηλώνει ότι οι θερμές περιόδους αποκτούν μεγαλύτερη ένταση και διάρκεια, με αναμενόμενες επιπτώσεις στη λειτουργία των φυσικών οικοσυστημάτων, στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων και στις ενεργειακές ανάγκες κατά τους θερινούς μήνες. Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει τη διαχρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας κατά τους μήνες Ιούνιο-Αύγουστο στην Ελλάδα για την περίοδο 1960–2024.



Σχήμα 1.2: Διαχρονική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του καλοκαιριού (Ιούνιος-Αύγουστος) στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1960-2024.

Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (meteo.gr), 2025.

Η αύξηση της θερμοκρασίας και η επιμήκυνση των ξηρών περιόδων έχουν συμβάλλει σημαντικά στην ενίσχυση του κινδύνου δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα. Τα ακραία θερμικά γεγονότα των τελευταίων ετών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον καύσωνα του 2021, ανέδειξαν τη στενή σύνδεση μεταξύ της κλιματικής αλλαγής, των παρατεταμένων καυσώνων και της θερμικής επιβάρυνσης των οικοσυστημάτων, προκαλώντας εκτεταμένες περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις (IPCC, 2023; Giannaros et al., 2024). Η αυξημένη καύσιμη ύλη, οι παρατεταμένοι καύσωνες και οι μεταβολές της εδαφικής υγρασίας δημιουργούν πλέον συνθήκες υψηλής επικινδυνότητας για μεγάλο μέρος της ελληνικής επικράτειας.

Στο πλαίσιο των παραπάνω κλιματικών εξελίξεων, η ελληνική ενεργειακή πολιτική εισήλθε μετά το 2010 σε περίοδο ριζικού μετασχηματισμού, επηρεαζόμενη τόσο από τις ευρωπαϊκές πολιτικές απανθρακοποίησης όσο και από την αυξανόμενη οικονομική και περιβαλλοντική πίεση στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η σταδιακή απεξάρτηση από τον λιγνίτη συνδέεται άμεσα με τη μεταρρύθμιση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), την αύξηση του κόστους άνθρακα, τους νέους στόχους του πακέτου “Fit-for-55” και την επιτάχυνση της ευρωπαϊκής πολιτικής απανθρακοποίησης (European Commission, 2025). Οι πρόσφατες μεταρρυθμίσεις του EU ETS ενίσχυσαν περαιτέρω τη μείωση των εκπομπών, επεκτείνοντας το σύστημα σε νέους τομείς και αυξάνοντας τους στόχους περιορισμού των εκπομπών έως το 2030.

Καθοριστικό ρόλο στη νέα ενεργειακή στρατηγική της χώρας διαδραματίζουν ο Κλιματικός Νόμος Ν.4936/2022 και το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) του 2024, το οποίο θέτει πιο φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τη διείσδυση των ΑΠΕ, την αποθήκευση ενέργειας και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 (ΥΠΕΝ, 2024). Η νέα αυτή στρατηγική περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενεργειακών υποδομών όπως αποθηκευτικά συστήματα, δίκτυα μεταφοράς, έργα πράσινου υδρογόνου και παρεμβάσεις αποκατάστασης μεταλλευτικών περιοχών, διαμορφώνοντας ένα νέο ενεργειακό και χωρικό μοντέλο για τη χώρα.

Η Δυτική Μακεδονία αποτελεί τη σημαντικότερη ιστορικά λιγνιτική περιοχή της Ελλάδας και μια από τις περιοχές όπου οι επιδράσεις της κλιματικής και ενεργειακής

μετάβασης εμφανίζονται εντονότερα. Η εξορυκτική δραστηριότητα πολλών δεκαετιών έχει επιφέρει εκτεταμένες μεταβολές στις χρήσεις γης, στο ανάγλυφο, στα εδαφικά χαρακτηριστικά και στο τοπικό μικροκλίμα, δημιουργώντας ένα ιδιαίτερα μετασχηματισμένο περιβάλλον (Paraskevis et al., 2021, Henselowsky et al., 2021). Οι εκτεταμένες εκσκαφές, οι αποθέσεις στείρων υλικών και η μεταβολή της επιφανειακής κάλυψης έχουν επηρεάσει διαχρονικά τη θερμική συμπεριφορά του εδάφους και τη χωρική κατανομή της θερμότητας, ευνοώντας την εμφάνιση τοπικών μικροκλιματικών μεταβολών και φαινομένων θερμικής νησίδας (Amani-Beni et al., 2021).

Οι Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων των λιγνιτικών πεδίων Κοζάνης και Πτολεμαΐδας καταγράφουν σημαντικές χωρικές μεταβολές παραμέτρων των φυσικών οικοσυστημάτων (ΔΕΗ/ADENS, 2020). Η διαχρονική αποκατάσταση των ορυχείων και ο επανασχεδιασμός των χρήσεων γης αποκτά ιδιαίτερη σημασία υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, καθώς οι μελλοντικές χρήσεις καλούνται να προσαρμοστούν σε συνθήκες υψηλότερων θερμοκρασιών, μειωμένων βροχοπτώσεων και αυξημένων περιβαλλοντικών πιέσεων.

Η Εικόνα 1.2 παρουσιάζει τη μορφή και την έκταση ενός λιγνιτικού ορυχείου στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, αποτυπώνοντας τον τρόπο με τον οποίο οι εξορυκτικές δραστηριότητες έχουν διαμορφώσει το τοπίο. Η εικόνα αποτυπώνει τη χωρική κλίμακα των παρεμβάσεων και συμβάλλει στην κατανόηση των προκλήσεων αλλά και των δυνατοτήτων που συνοδεύουν τη διαδικασία αποκατάστασης και μελλοντικής αξιοποίησης των εκτάσεων.



Εικόνα 1.2: Εναέρια απεικόνιση λιγνιτικού ορυχείου στην περιοχή Πτολεμαΐδας, όπου αποτυπώνεται η εκτεταμένη τοπογραφική μεταβολή του εδάφους και η κλίμακα των εξορυκτικών δραστηριοτήτων.

Πηγή: Eurokinissi(2022), μέσω Powergame.gr

Η μετάβαση της Δυτικής Μακεδονίας προς ένα μεταλιγνιτικό αναπτυξιακό πρότυπο συνιστά μια πολυδιάστατη διαδικασία, η οποία υπερβαίνει τα στενά όρια της ενεργειακής αναδιάρθρωσης. Η σταδιακή παύση της λιγνιτικής δραστηριότητας επηρεάζει άμεσα τη χωρική οργάνωση, τις χρήσεις γης, τη λειτουργία των τοπικών οικοσυστημάτων και τη δομή της περιφερειακής οικονομίας, δημιουργώντας νέες περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις. Ταυτόχρονα, η ανάγκη προσαρμογής στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής καθιστά κρίσιμο τον συνδυασμό πολιτικών αποκατάστασης ορυχείων, βιώσιμου χωρικού σχεδιασμού και ανάπτυξης υποδομών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος. Υπό το πρίσμα αυτό, η Δυτική Μακεδονία συγκαταλέγεται στα χαρακτηριστικά παραδείγματα περιοχών όπου η ενεργειακή μετάβαση, η περιβαλλοντική αποκατάσταση και η κλιματική προσαρμογή αλληλεπιδρούν δυναμικά, διαμορφώνοντας ένα νέο μεταλιγνιτικό τοπίο.

1.5 Σύνδεση Ελληνικού Πλαισίου με την Ενεργειακή Μετάβαση στην Ηλεκτροπαραγωγή

Η ενεργειακή μετάβαση στην Ελλάδα δεν αποτελεί μεμονωμένη τεχνική επιλογή, αλλά διαμορφώνεται μέσα σε ένα ευρύτερο πλαίσιο κλιματικών μεταβολών, θεσμικών δεσμεύσεων και χωρικών αλλαγών. Οι παρατηρούμενες αυξήσεις της θερμοκρασίας, η ενίσχυση των περιόδων ξηρασίας και οι μεταβολές του υδρολογικού κύκλου επηρεάζουν άμεσα τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζεται και λειτουργεί το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής στη χώρα.

Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν ουσιαστικά την αποδοτικότητα των θερμικών μονάδων, καθώς υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ψύξης και αυξάνουν τις απαιτήσεις σε υδατικούς πόρους, αναδεικνύοντας την αμφίδρομη σχέση μεταξύ ενεργειακού τομέα και κλιματικής αλλαγής.

Σε αυτό το πλαίσιο, η ηλεκτροπαραγωγή συνδέεται άμεσα τόσο με τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής όσο και με την ανάγκη προσαρμογής στις νέες κλιματικές συνθήκες. Η σταδιακή υποχώρηση των συμβατικών θερμικών μονάδων δεν σχετίζεται μόνο με τις ευρωπαϊκές πολιτικές για τη μείωση των εκπομπών, αλλά και με τη μειωμένη λειτουργική αποδοτικότητά τους σε συνθήκες αυξημένων θερμοκρασιών και περιορισμένων υδατικών πόρων (EEA, 2024).

Κεντρική διάσταση της ενεργειακής μετάβασης αποτελεί η χωρική της διάσταση, ειδικά στη Δυτική Μακεδονία όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέθηκε για δεκαετίες με την εξόρυξη λιγνίτη. Η παύση των εξορυκτικών δραστηριοτήτων και η αποκατάσταση των εδαφών συνοδεύεται από αλλαγές στο τοπίο, στο έδαφος και στο μικροκλίμα. Οι αλλαγές αυτές δημιουργούν νέες δυνατότητες, αλλά και περιορισμούς, για την ανάπτυξη έργων ανανεώσιμης ενέργειας και άλλων δραστηριοτήτων στις αποκατεστημένες μεταλιγνιτικές εκτάσεις (Pavloudakis et al., 2020).

Η διαδικασία αυτή δεν εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις περιοχές της χώρας. Στην περιοχή της Κοζάνης και της Πτολεμαΐδας, η απομάκρυνση από τον λιγνίτη συνοδεύεται από αλλαγές στις χρήσεις γης, στην επιφανειακή θερμοκρασία και στις υδρολογικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν το τοπικό μικροκλίμα. Οι μεταβολές αυτές συνδέονται τόσο με τη σταδιακή παύση των εξορυκτικών δραστηριοτήτων όσο και με την ανάπτυξη νέων ενεργειακών υποδομών.

Στο νέο πλαίσιο, η ηλεκτροπαραγωγή αποκτά διευρυνόμενο ρόλο, καθώς επηρεάζει τη χωρική οργάνωση, την περιβαλλοντική αποκατάσταση και τις μελλοντικές αναπτυξιακές επιλογές της περιοχής. Η κατανόηση των κλιματικών μεταβολών δεν συνιστά απλώς αντικείμενο περιβαλλοντικής ανάλυσης, αλλά βασικό εργαλείο για τον σχεδιασμό της μεταλινιτικής περιόδου και τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη βιώσιμη αξιοποίηση του χώρου.

1.6 Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει με συστηματικό και πολυδιάστατο τρόπο τις κλιματικές μεταβολές που έχουν συντελεστεί στη ζώνη απολιγνιτοποίησης της Π.Ε. Κοζάνης κατά την περίοδο 1980–2025, αξιοποιώντας χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων και μεθόδους γεωχωρικής ανάλυσης. Η έρευνα επιδιώκει να εξετάσει κατά πόσο η μακροχρόνια λιγνιτική δραστηριότητα και οι συναφείς ενεργειακές διεργασίες έχουν επηρεάσει, άμεσα ή έμμεσα, τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και αν οι μεταβολές αυτές συνδέονται με τον ευρύτερο μετασχηματισμό του ελληνικού ενεργειακού τοπίου.

Σε αντίθεση με τις περισσότερες υφιστάμενες μελέτες, οι οποίες εξετάζουν είτε τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της απολιγνιτοποίησης είτε γενικά τις κλιματικές μεταβολές σε εθνικό επίπεδο, η μελέτη υιοθετεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, συνδυάζοντας την ανάλυση κλιματικών δεδομένων, τη χωρική τεκμηρίωση και τον ενεργειακό σχεδιασμό. Η προσέγγιση αυτή προσδίδει στη μελέτη στοιχεία πρωτοτυπίας, καθώς διερευνά με ποιον τρόπο οι ιστορικές αλλαγές στις χρήσεις γης, οι εξορυκτικές δραστηριότητες μεγάλης κλίμακας και η σταδιακή παύση τους διαμορφώνουν τις τοπικές κλιματικές παραμέτρους και τη δυναμική του μικροκλίματος.

Επίσης, η έρευνα εξετάζει τη σχέση των παρατηρούμενων κλιματικών μεταβολών με τις διαδικασίες ενεργειακής μετάβασης της χώρας. Η Δυτική Μακεδονία αποτελεί μια emblematicή περίπτωση περιφέρειας που μετασχηματίζεται από χώρο συγκέντρωσης βιομηχανικών δραστηριοτήτων υψηλού ανθρακικού αποτυπώματος σε κόμβο ανανεώσιμων τεχνολογιών, περιβαλλοντικής αποκατάστασης και νέων αναπτυξιακών χρήσεων γης. Η κατανόηση των κλιματικών τάσεων δεν είναι απλώς μια περιβαλλοντική άσκηση, αλλά θεμελιώδης παράμετρος για τον σχεδιασμό της μεταλινιτικής περιόδου, την ορθολογική κατανομή νέων υποδομών ΑΠΕ και τη διασφάλιση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Επομένως, η εργασία δεν περιορίζεται σε μια στατική αποτύπωση δεδομένων, αλλά στοχεύει στη δημιουργία ενός επιστημονικά τεκμηριωμένου πλαισίου κατανόησης των κλιματικών μεταβολών σε μια περιοχή που μετασχηματίζεται ριζικά. Με αυτόν τον τρόπο, η μελέτη επιδιώκει να ενισχύσει την ερευνητική συζήτηση γύρω από τα αποτελέσματα της απολιγνιτοποίησης, να προσφέρει εργαλεία για τη λήψη αποφάσεων και να εμπλουτίσει την επιστημονική γνώση σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις κλιματικών, γεωχωρικών και ενεργειακών διεργασιών.

1.7 Ερευνητικό Κενό

Παρά τη σημαντική πρόοδο της διεθνούς βιβλιογραφίας σε ζητήματα κλιματικής αλλαγής, ενεργειακής μετάβασης και μεταβολών χρήσεων γης, εξακολουθεί να υφίσταται ουσιαστικό ερευνητικό κενό ως προς τη συνδυαστική διερεύνηση των μακροχρόνιων κλιματικών μεταβολών και των ανθρωπογενών παρεμβάσεων σε περιοχές έντονης εξορυκτικής δραστηριότητας. Η Δυτική Μακεδονία και ειδικότερα η ζώνη απολιγνιτοποίησης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας συνιστούν χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής όπου οι επιπτώσεις της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής συνυπάρχουν με ραγδαίες μεταβολές του ανθρωπογενούς και φυσικού περιβάλλοντος, λόγω της μακροχρόνιας λιγνιτικής δραστηριότητας και της ταχείας ενεργειακής αναδιάρθρωσης που βρίσκεται σήμερα σε εξέλιξη (Ziouzios et al., 2021; Pavloudakis, Karloropoulos & Roumpos, 2023a.)

Η μέχρι σήμερα βιβλιογραφία εξετάζει κυρίως επιμέρους διαστάσεις του προβλήματος. Αφενός, σημαντικός αριθμός μελετών επικεντρώνεται στις κλιματικές τάσεις και στις προβολές μελλοντικής κλιματικής μεταβολής σε εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο (Georgoulas et al., 2022; Zanis et al., 2024; Ioannidis et al., 2025), αφετέρου ερευνητικές προσεγγίσεις αναλύουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξόρυξης λιγνίτη και τις διαδικασίες αποκατάστασης μεταλλευτικών τοπίων (Pavloudakis et al., 2020; Liu et al., 2023).

Παράλληλα, αυξανόμενο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κοινωνικοοικονομικές διαστάσεις της «Δίκαιης Μετάβασης» και οι επιδράσεις της απολιγνιτοποίησης στις τοπικές κοινωνίες και οικονομίες (Boulogiorgou and Kaldellis, 2025; Pavloudakis, Karloropoulos & Roumpos, 2023a). Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υφίσταται ολοκληρωμένη μελέτη που να εξετάζει ενιαία τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ κλιματικής

μεταβολής, αλλαγών χρήσεων γης, εξορυκτικής δραστηριότητας και ενεργειακής μετάβασης στη ζώνη Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

Επιπλέον, η πλειονότητα των υφιστάμενων ερευνών καλύπτει σχετικά περιορισμένες χρονικές περιόδους, στοιχείο που δυσχεραίνει την ανίχνευση βαθύτερων κλιματικών τάσεων και τη διάκριση μεταξύ φυσικής κλιματικής μεταβλητότητας και ανθρωπογενούς επιβάρυνσης. Η ανάγκη μακροχρόνιων χρονοσειρών καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική υπό το πρίσμα της επιταχυνόμενης παγκόσμιας θέρμανσης και των ακραίων θερμοκρασιακών αποκλίσεων που καταγράφηκαν κατά τα έτη 2023 και 2024 σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο (IPCC, 2023; Copernicus Climate Change Service and WMO, 2025). Η παρούσα μελέτη διαφοροποιείται ουσιαστικά, καθώς εξετάζει ένα ευρύ χρονικό διάστημα κυρίως από το 1980 έως το 2025, αξιοποιώντας όπου απαιτείται δεδομένα και από προγενέστερα έτη, επιτρέποντας τη συστηματική αποτύπωση των μακροχρόνιων κλιματικών μεταβολών και την αξιολόγηση της σχέσης τους με τη μεταβολή του ενεργειακού και χωρικού μοντέλου της περιοχής.

Ένα ακόμη σημαντικό ερευνητικό κενό αφορά την περιορισμένη αξιοποίηση γεωχωρικών και τηλεπισκοπικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης για την ανάλυση των μικροκλιματικών επιπτώσεων της απολιγνιτοποίησης. Παρότι τα σύγχρονα εργαλεία GIS, οι δορυφορικές παρατηρήσεις και οι ανοιχτές βάσεις δεδομένων, όπως τα Copernicus, ERA5 και Landsat, παρέχουν πλέον τη δυνατότητα λεπτομερούς παρακολούθησης των μεταβολών του τοπίου, η εφαρμογή τους στη Δυτική Μακεδονία παραμένει περιορισμένη. Στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, οι εκτεταμένες εκσκαφές, οι αποθέσεις εξορυκτικών υλικών, οι τεχνητές λίμνες και οι εκτεταμένες αλλαγές κάλυψης γης έχουν μεταβάλει σημαντικά τις φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας και τη θερμική συμπεριφορά του τοπίου, επηρεάζοντας δυνητικά το τοπικό μικροκλίμα (Amani-Beni et al., 2021; Liu et al., 2023). Παρά ταύτα, απουσιάζει μέχρι σήμερα μια ολοκληρωμένη χωρική αξιολόγηση που να συνδέει τις μεταβολές αυτές με τις σύγχρονες στρατηγικές ενεργειακής μετάβασης και τις νέες χρήσεις γης, όπως η ανάπτυξη μεγάλων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Επιπλέον, οι πρόσφατες ευρωπαϊκές και διεθνείς εκθέσεις υπογραμμίζουν ότι οι περιοχές που βρίσκονται σε ενεργειακή μετάβαση αποτελούν σημαντικά πεδία μελέτης για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ κλιματικής αλλαγής, περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας και ενεργειακών πολιτικών (European Commission, 2025; IEA, 2024). Ωστόσο, η Δυτική Μακεδονία εξακολουθεί να παρουσιάζει έλλειμμα ολοκληρωμένων

επιστημονικών μελετών που να προσεγγίζουν το σύστημα «κλίμα–ενέργεια–χρήσεις γης» ως ενιαίο και αλληλεξαρτώμενο πεδίο μελέτης.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να καλύψει το υφιστάμενο ερευνητικό κενό μέσω μιας ολοκληρωμένης αναλυτικής προσέγγισης που συνδυάζει:

- τη μελέτη της ιστορικής κλιματικής εξέλιξης της περιοχής κυρίως κατά την περίοδο 1980–2025,
- τη χωρική ανάλυση των μεταβολών χρήσεων γης και τοπίου μέσω εργαλείων GIS και τηλεπισκόπησης,
- την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και μικροκλιματικών επιπτώσεων της απολιγνιτοποίησης,
- τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενεργειακής μετάβασης, τοπικού κλίματος και μεταβολών του τοπίου.

Με τον τρόπο αυτό, η έρευνα προσφέρει μια ουσιαστικά συμβολή στην επιστημονική κατανόηση των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλιματικών, γεωχωρικών και ενεργειακών διεργασιών σε μία περιοχή που μετασχηματίζεται με ολοένα αυξανόμενο ρυθμό τα τελευταία χρόνια, παρέχοντας επιπροσθέτως χρήσιμα δεδομένα για τον βιώσιμο χωρικό και ενεργειακό σχεδιασμό της μεταλιγνιτικής περιόδου στη Δυτική Μακεδονία.

2. Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό, Περιβαλλοντικό και Θεσμικό Πλαίσιο Απολιγνιτοποίησης

2.1 Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λιγνιτικής δραστηριότητας

Η λιγνιτική δραστηριότητα συγκαταλέγεται μεταξύ των πλέον περιβαλλοντικά επιβαρυντικών μορφών ενεργειακής εκμετάλλευσης, καθώς συνδυάζει υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και εκτεταμένες χωρικές παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η εξόρυξη και αξιοποίηση λιγνίτη πραγματοποιείται κυρίως με τη μέθοδο των επιφανειακών ορυχείων μεγάλης κλίμακας (surface mining), τα οποία επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στη μορφολογία του τοπίου, στη δομή των εδαφών και στη λειτουργία των οικοσυστημάτων (Ballesteros et al., 2025). Παράλληλα, η καύση λιγνίτη συνδέεται με ιδιαίτερα υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), συμβάλλοντας σημαντικά στην επιτάχυνση της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής και στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου (IPCC, 2023).

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λιγνιτικής δραστηριότητας εκδηλώνεται κυρίως μέσω τεσσάρων αλληλένδετων διαστάσεων, της γεωμορφολογικής και εδαφικής μεταβολής, των υδρολογικών μεταβολών, της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης και των επαγόμενων μικροκλιματικών αλλαγών. Οι διαστάσεις αυτές δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά συγκροτούν ένα σύνθετο πλέγμα φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών που επηρεάζουν ταυτόχρονα πολλαπλά περιβαλλοντικά συστήματα και μεταβάλλουν τη συνολική περιβαλλοντική ισορροπία των εξορυκτικών περιοχών.

Οι κυριότερες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων της λιγνιτικής δραστηριότητας, και οι βασικοί μηχανισμοί μέσω των οποίων αυτές εκδηλώνονται, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Βασικές περιβαλλοντικές επιδράσεις λιγνιτικής δραστηριότητας

Πηγή: Ballesteros et al. (2025), ίδια επεξεργασία συγγραφέα

Διάσταση	Επιδράσεις	Μηχανισμός
Έδαφος	Χωρικές μεταβολές εδαφολογικών παραμέτρων	Εξόρυξη-απόθεση πετρωμάτων
Υδατα	Βραχυχρόνια επίδραση στο υδατικό ισοζύγιο	Αντλήσεις, απορροές
Ατμόσφαιρα	CO ₂ , PM, SO ₂	Καύση λιγνίτη
Μικροκλίμα	Επίδραση στις μετεωρολογικές παραμέτρους	Μεταβολή ενεργειακού ισοζυγίου

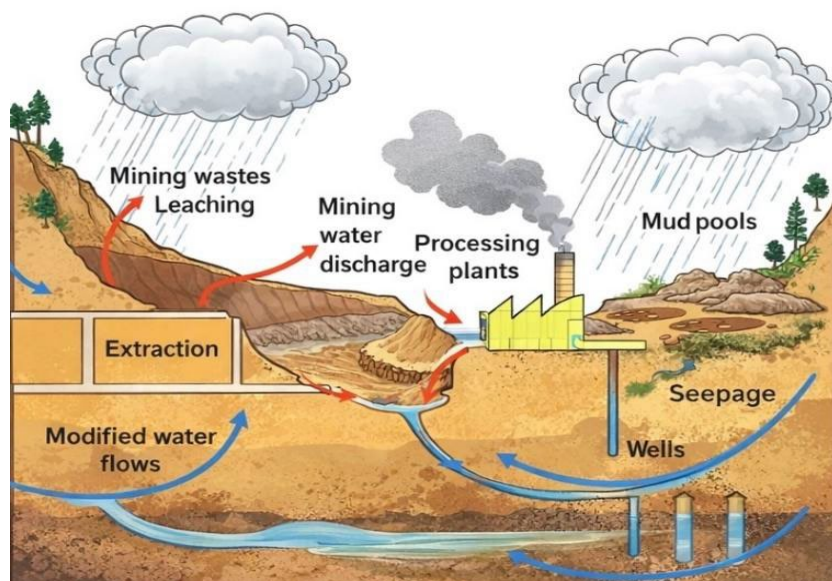
Όπως προκύπτει από τον παραπάνω Πίνακα 2.1, οι επιδράσεις της λιγνιτικής δραστηριότητας δεν περιορίζονται σε επιμέρους περιβαλλοντικές μεταβολές, αλλά συνδέονται με τη διαρκή αλληλεπίδραση γεωμορφολογικών, υδρολογικών, ατμοσφαιρικών και κλιματικών διεργασιών. Οι διεργασίες αυτές επηρεάζουν όχι μόνο τη λειτουργία των φυσικών οικοσυστημάτων αλλά και τη μακροχρόνια περιβαλλοντική ανθεκτικότητα των περιοχών εξόρυξης.

Σύγχρονες μελέτες αναδεικνύουν ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λιγνιτικής δραστηριότητας δεν περιορίζεται μόνο στη φάση της καύσης, αλλά διαμορφώνεται ήδη από το στάδιο της εξόρυξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η απομάκρυνση της φυσικής βλάστησης και των ανώτερων εδαφικών στρωμάτων οδηγεί σε απώλεια οργανικής ύλης, αποδόμηση της εδαφικής δομής και σημαντική μείωση της φυσικής ικανότητας των εδαφών να υποστηρίζουν βιολογικές και υδρολογικές διεργασίες (Álvarez-Ayuso et al., 2020). Η υποβάθμιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τα μεταλλευτικά τοπία να γίνονται ιδιαίτερα ευάλωτα στη διάβρωση και να περιορίζονται σημαντικά οι δυνατότητες φυσικής αποκατάστασης χωρίς εκτεταμένες ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Η εκτεταμένη αναδιαμόρφωση της γήινης επιφάνειας που συνοδεύει την επιφανειακή εξόρυξη μεταβάλλει ουσιαδώς τη γεωμορφολογία της περιοχής.

Δημιουργούνται βαθιές εκσκαφές, τεχνητά πρανή και αποθέσεις στείων υλικών, τα οποία λειτουργούν ως νέες μορφές ανάγλυφου, επηρεάζοντας τη ροή του αέρα, την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας και τις τοπικές ενεργειακές ανταλλαγές μεταξύ ατμόσφαιρας και επιφάνειας. Πρόσφατες γεωμορφολογικές μελέτες επισημαίνουν ότι οι αλλαγές αυτές συνιστούν «μακροχρόνια τοπιακή κληρονομιά» (landscape legacy), η οποία παραμένει ενεργή ακόμη και δεκαετίες μετά την παύση της εξορυκτικής δραστηριότητας (Martins et al., 2021).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η επίδραση της λιγνιτικής/ανθρακικής δραστηριότητας στους υδατικούς πόρους. Η ανάγκη διατήρησης των ορυχείων σε ξηρή κατάσταση επιβάλλει αντλήσεις υπόγειων υδάτων σε τοπικό επίπεδο, οδηγώντας σε τοπική, βραχυχρόνια πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και σε μεταβολές των φυσικών υδρολογικών ροών. Επιπλέον, η έκθεση γεωλογικών σχηματισμών και εξορυκτικών αποθέσεων στο νερό μπορεί να προκαλέσει χημική υποβάθμιση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μέσω διεργασιών έκπλυσης, διήθησης και ανεξέλεγκτης απορροής (Wolkersdorfer, 2022). Οι διεργασίες αυτές διαμορφώνουν ένα σύνθετο σύστημα αλληλεπίδρασης μεταξύ εξορυκτικών δραστηριοτήτων και υδρολογικού κύκλου, οι οποίες ενδέχεται να έχουν σημαντικές συνέπειες για τη μακροχρόνια περιβαλλοντική σταθερότητα των περιοχών εξόρυξης αν δεν αντιμετωπιστούν σωστά.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των κύριων μηχανισμών μέσω των οποίων η επιφανειακή μεταλλευτική δραστηριότητα επηρεάζει τα επιφανειακά και υπόγεια υδατικά συστήματα

Πέραν των γεωμορφολογικών και υδρολογικών επιδράσεων, η λιγνιτική δραστηριότητα συνδέεται άμεσα με ατμοσφαιρική επιβάρυνση. Η εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων, διοξειδίου του θείου (SO_2), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) από τα ορυχεία και τις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής επηρεάζει την ποιότητα του αέρα και ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Nanaki et al., 2016). Στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας, ιστορικές μετρήσεις κατέγραψαν υπερβάσεις στις συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , η ορυκτολογική σύσταση των οποίων συνδέεται και με τις λιγνιτικές εκμεταλλεύσεις, τα αποτιθέμενα υλικά και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής (Nikolaidou et al., 2017). Ωστόσο, η σταδιακή απολιγνιτοποίηση και ο περιορισμός της λιγνιτικής παραγωγής έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στη σημαντική μείωση των εκπομπών και στη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας στη Δυτική Μακεδονία (Βούρας et al., 2021).

Οι χωρικές μεταβολές που προκαλεί η εξορυκτική δραστηριότητα επεκτείνονται και στο πεδίο των τοπικών κλιματικών συνθηκών. Αν δεν ακολουθήσει κατάλληλη αποκατάσταση, η αντικατάσταση φυσικών ή αγροτικών καλύψεων από άλλου τύπου εδαφικές επιφάνειες μπορεί να μεταβάλλει κρίσιμες επιφανειακές ιδιότητες, όπως η ανακλαστικότητα (albedo), η επιφανειακή τραχύτητα, η θερμοχωρητικότητα και η εξατμισοδιαπνοή. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να επηρεάζουν το επιφανειακό ενεργειακό ισοζύγιο και την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας, οδηγώντας σε διαφοροποιήσεις της επιφανειακής θερμοκρασίας και των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών (Burakowski et al., 2018).

Σύγχρονες αναλύσεις τηλεπισκόπησης, αξιοποιώντας δορυφορικά δεδομένα Landsat και Copernicus, δείχνουν σαφείς διαφοροποιήσεις στις θερμοκρασίες επιφάνειας μεταξύ εξορυκτικών περιοχών και γειτονικών φυσικών εκτάσεων, επιβεβαιώνοντας τον ρόλο της εξόρυξης ως παράγοντα μικροκλιματικής διαταραχής (Liu et al., 2023).

Στην Ελλάδα, ο περιβαλλοντικός μετασχηματισμός του τοπίου λόγω της λιγνιτικής δραστηριότητας είναι έντονος στη Δυτική Μακεδονία και ειδικότερα στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας. Οι χωρικές μεταβολές συνιστούν ένα σύνθετο περιβαλλοντικό υπόβαθρο, το οποίο σχετίζεται με τη λειτουργία των οικοσυστημάτων και μετά την παύση της εξόρυξης.

Η κατανόηση του περιβαλλοντικού μετασχηματισμού της λιγνιτικής δραστηριότητας συνιστά βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό της μεταλιγνιτικής περιόδου. Η ανάλυση των γεωμορφολογικών, υδρολογικών και ατμοσφαιρικών μεταβολών παρέχει το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο για την ορθολογική αποκατάσταση των εκτάσεων και τη βιώσιμη διαχείρισή τους, ενώ παράλληλα αναδεικνύει τη σύνδεσή τους με τις μικροκλιματικές διεργασίες που εξετάζονται στην επόμενη ενότητα.

2.2 Μικροκλίμα και παράγοντες που το επηρεάζουν

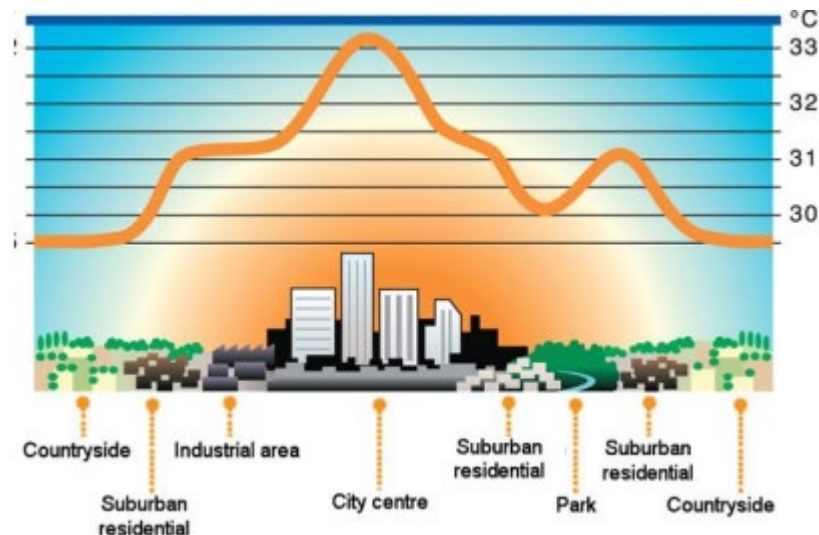
Το μικροκλίμα αναφέρεται στις τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μικρή χωρική κλίμακα και διαφοροποιούνται από τις ευρύτερες κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής. Σε αντίθεση με το μακροκλίμα, το οποίο καθορίζεται από γεωγραφικούς και πλανητικούς παράγοντες, το μικροκλίμα επηρεάζεται έντονα από τις τοπικές ιδιότητες της επιφάνειας, τη χρήση γης και τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (Oke, 1987). Η κατανόηση των μικροκλιματικών διεργασιών είναι κρίσιμη, καθώς αυτές επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή ισορροπία της επιφάνειας, τη θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία και τη δυναμική της ατμόσφαιρας.

Το μικροκλίμα διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, με κυριότερους τη μορφολογία του εδάφους, τη φυτοκάλυψη, τις ιδιότητες του εδάφους και την ηλιακή ακτινοβολία. Η τοπογραφία καθορίζει τη ροή του αέρα και τη συσσώρευση ψυχρών ή θερμών αερίων μαζών, ενώ η παρουσία ή απουσία βλάστησης επηρεάζει τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής και την αποθήκευση θερμότητας. Οι ιδιότητες της επιφάνειας, όπως η ανακλαστικότητα (albedo), δηλαδή το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από μια επιφάνεια, καθώς και η θερμοχωρητικότητα καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια απορροφάται, αποθηκεύεται ή ανακλάται από την επιφάνεια (Geiger et al., 2009).

Σημαντικός παράγοντας διαμόρφωσης του μικροκλίματος είναι το ενεργειακό ισοζύγιο της επιφάνειας, το οποίο εκφράζει την κατανομή της εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας. Οι μεταβολές στο ισοζύγιο αυτό επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία της επιφάνειας και τη ροή θερμότητας προς την ατμόσφαιρα. Σε φυσικά οικοσυστήματα, η παρουσία βλάστησης οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας μέσω της σκίασης και της εξατμισοδιαπνοής. Αντίθετα, η απογύμνωση της επιφάνειας οδηγεί σε

αύξηση της απορρόφησης θερμότητας και σε εντονότερες θερμικές διακυμάνσεις (Bonan, 2015).

Στο παρακάτω Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας μεταξύ αγροτικών και αστικών περιοχών, αναδεικνύοντας το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας.



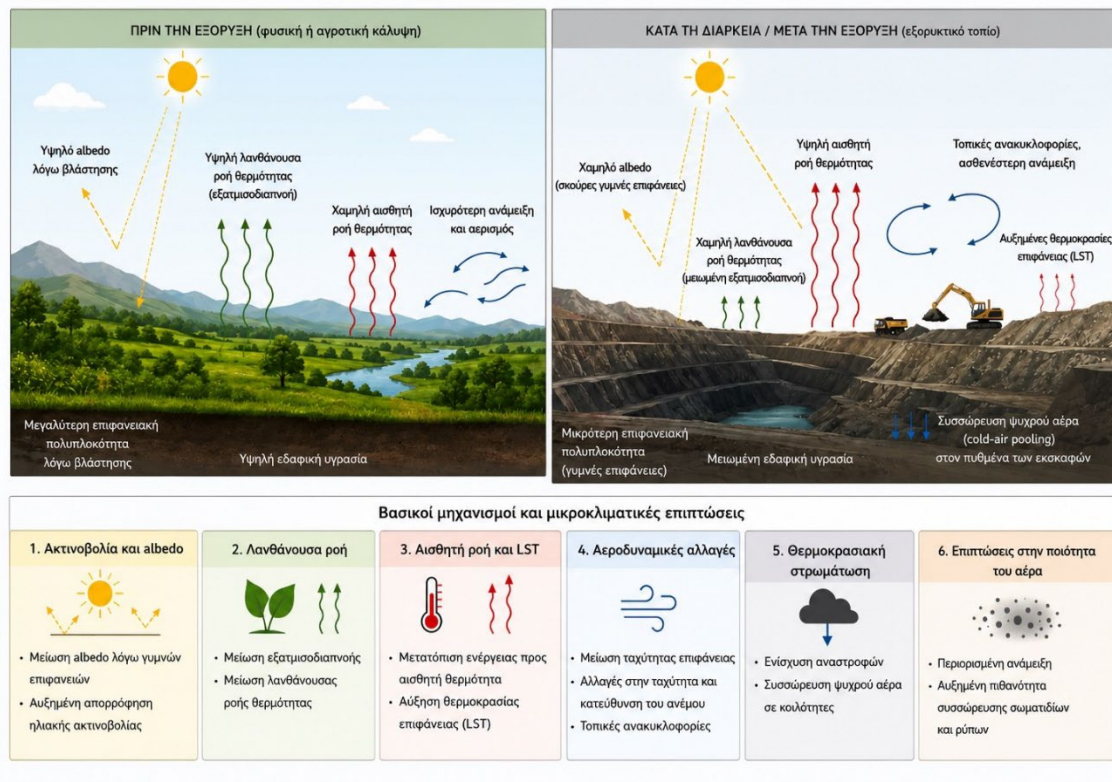
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας μεταξύ αγροτικών και αστικών περιοχών (φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας)

Πηγή: <https://buddiess.weebly.com/>

Όπως παρατηρείται, οι υψηλότερες θερμοκρασίες εντοπίζονται στο κέντρο της πόλης, ενώ τα προάστια και οι αγροτικές περιοχές παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές λόγω της παρουσίας βλάστησης και της μειωμένης πυκνότητας δόμησης. Το φαινόμενο εντείνεται κυρίως τους θερινούς μήνες, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυξημένη και η απορρόφηση θερμότητας από τις τεχνητές επιφάνειες, όπως η άσφαλτος και το σκυρόδεμα, μεγιστοποιείται.

Η επίδραση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο μικροκλίμα είναι ιδιαίτερα έντονη σε περιοχές εκτεταμένων παρεμβάσεων, όπως οι εξορυστικές περιοχές. Η μεταβολή της χρήσης γης και η δημιουργία τεχνητών επιφανειών μεταβάλλουν ριζικά τις ενεργειακές ανταλλαγές μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας. Οι αλλαγές αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε φαινόμενα τοπικής υπερθέρμανσης, αυξημένων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και μεταβολών στην υγρασία του αέρα (Firozjaei et al., 2020).

Μικροκλιματικές μεταβολές σε επιφανειακά λιγνιτωρυχεία



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση των βασικών μηχανισμών και επιδράσεων που συνδέουν την επιφανειακή λιγνιτική δραστηριότητα με μεταβολές στο μικροκλίμα και στην ποιότητα του αέρα

Πηγή: Ιδία σύνθεση και επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Loksa (2007), Burakowski et al. (2018) και Cao et al. (2020)

Η μικροκλιματική επίδραση των επιφανειακών ορυχείων δεν περιορίζεται μόνο στην απλή αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας, αλλά σχετίζεται και με τη συνολική αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και ατμόσφαιρας. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3, οι μικροκλιματικές μεταβολές στα επιφανειακά λιγνιτωρυχεία οφείλονται από τη συνδυασμένη δράση θερμικών, βιοφυσικών και αεροδυναμικών μηχανισμών. Η μείωση της φυτοκάλυψης περιορίζει τη λανθάνουσα ροή θερμότητας μέσω της εξατμισοδιαπνοής, ενώ η απουσία φυτοκαλυμμένων επιφανειών και οι γυμνές επιφάνειες του ορυχείου αυξάνουν την αισθητή ροή θερμότητας και τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Την ίδια στιγμή, οι διαφοροποιήσεις στο albedo, στη θερμοχωρητικότητα και στην τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται, ανακλάται και επανεκπέμπεται προς την ατμόσφαιρα. Ταυτόχρονα, οι αλλαγές στη γεωμετρία του αναγλύφου και στην τραχύτητα της επιφάνειας τροποποιούν την τοπική κυκλοφορία του αέρα, ευνοώντας σε ορισμένες περιπτώσεις την ανάπτυξη

θερμοκρασιακών αναστροφών, περιορισμένης ανάμιξης και τοπικής συγκράτησης αέριων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων.

Στην περίπτωση των λιγνιτικών πεδίων της Δυτικής Μακεδονίας, οι παραπάνω μικροκλιματικοί μηχανισμοί έχουν σημασία λόγω της μεγάλης χωρικής έκτασης των επιφανειακών ορυχείων και της έντονης τροποποίησης του φυσικού αναγλύφου. Οι εκτεταμένες εκσκαφές, οι αποθέσεις στείρων υλικών (χώμα, άργιλο, πετρώματα κ.λπ.) και οι αποκατεστημένες επιφάνειες μεταβάλλουν το τοπικό ενεργειακό ισοζύγιο και τη θερμική συμπεριφορά του τοπίου, ενώ οι αλλαγές στη γεωμετρία της επιφάνειας επηρεάζουν την τοπική κυκλοφορία του αέρα και τις συνθήκες αερισμού της περιοχής. Επιπλέον, οι συνθήκες ασθενούς ανέμου και θερμοκρασιακών αναστροφών που εμφανίζονται συχνά στο λεκανοπέδιο Κοζάνης–Πτολεμαΐδας μπορούν να ευνοήσουν φαινόμενα στασιμότητας της ατμόσφαιρας και τη συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων, ενισχύοντας τη σημασία του μικροκλίματος στη συνολική περιβαλλοντική λειτουργία της περιοχής.

Μελέτες τηλεπισκόπησης έχουν δείξει ότι οι εξορυκτικές περιοχές εμφανίζουν υψηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες σε σχέση με γειτονικές φυσικές ή αγροτικές εκτάσεις, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη μικροκλιματικών μεταβολών (Liu et al., 2023). Η χρήση δορυφορικών δεδομένων, όπως τα Landsat και Copernicus, επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση αυτών των διαφορών, παρέχοντας πολύτιμα εργαλεία για τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εξόρυξης.

Στην περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας, οι εκτεταμένες λιγνιτικές δραστηριότητες έχουν δημιουργήσει ένα ιδιαίτερο μικροκλιματικό περιβάλλον, το οποίο, σύμφωνα με την παρούσα ανάλυση, δεν διαφοροποιείται αισθητά από τις γειτονικές περιοχές.

Η ανάλυση του μικροκλίματος, επομένως, δεν αποτελεί απομονωμένο αντικείμενο μελέτης, αλλά συνδέεται άμεσα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της λιγνιτικής δραστηριότητας και τις προοπτικές της ενεργειακής μετάβασης. Η διερεύνηση των τοπικών κλιματικών μεταβολών παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ανθρώπινων δραστηριοτήτων και φυσικού περιβάλλοντος, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση ολοκληρωμένων στρατηγικών βιώσιμης ανάπτυξης.

2.3 Η μετάβαση από τον λιγνίτη στην πράσινη ενέργεια

Η μετάβαση από τον λιγνίτη σε ένα ενεργειακό σύστημα που βασίζεται σε καθαρές μορφές ενέργειας θεωρείται μία από τις σημαντικότερες διαρθρωτικές αλλαγές στον ευρωπαϊκό και ελληνικό ενεργειακό τομέα. Σε αντίθεση με προηγούμενες ενεργειακές μεταβολές, οι οποίες καθοδηγούνταν κυρίως από τεχνολογικούς ή οικονομικούς παράγοντες, η σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση διαμορφώνεται ως κεντρικός άξονας της κλιματικής κρίσης, της ανάγκης περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των διεθνών δεσμεύσεων για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας (IPCC, 2023). Στο πλαίσιο αυτό, η σταδιακή απομάκρυνση από τον λιγνίτη και γενικότερα από τα ορυκτά καύσιμα λογίζεται ως κεντρικός άξονας της ευρωπαϊκής και διεθνούς ενεργειακής πολιτικής.

Η ΕΕ έχει θέσει ως στρατηγικό στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, μέσω ενός πλαισίου πολιτικών που περιλαμβάνει την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (Green Deal), το πακέτο “Fit for 55” και την πρωτοβουλία REPowerEU (European Commission, 2019; European Commission 2021; European Commission 2022). Οι πολιτικές αυτές στοχεύουν στη δραστική μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και στην ενίσχυση των ΑΠΕ, της ενεργειακής αποδοτικότητας και των τεχνολογιών αποθήκευσης.

Η γεωπολιτική κρίση του 2022 και η ενεργειακή αστάθεια που ακολούθησε ενίσχυσαν περαιτέρω αυτή τη στρατηγική κατεύθυνση. Η πρωτοβουλία REPowerEU επιτάχυνε την προσπάθεια ενεργειακής απεξάρτησης της Ευρώπης από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα και ιδιαίτερα από το ρωσικό φυσικό αέριο, αναδεικνύοντας την ενεργειακή ασφάλεια ως κρίσιμο παράγοντα της ενεργειακής μετάβασης (European Commission, 2022). Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη των ΑΠΕ και των τεχνολογιών ευέλικτης αποθήκευσης αντιμετωπίζεται πλέον όχι μόνο ως περιβαλλοντική αναγκαιότητα αλλά και ως στρατηγικό ζήτημα γεωπολιτικής και οικονομικής ανθεκτικότητας.

Στο νέο πλαίσιο αυτό, ο λιγνίτης, ως καύσιμο υψηλής έντασης άνθρακα, καθίσταται ολοένα και λιγότερο βιώσιμος τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά. Η συνεχής αύξηση του κόστους των δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ στο πλαίσιο του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS) έχει επιβαρύνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος των λιγνιτικών μονάδων, μειώνοντας την ανταγωνιστικότητά έναντι

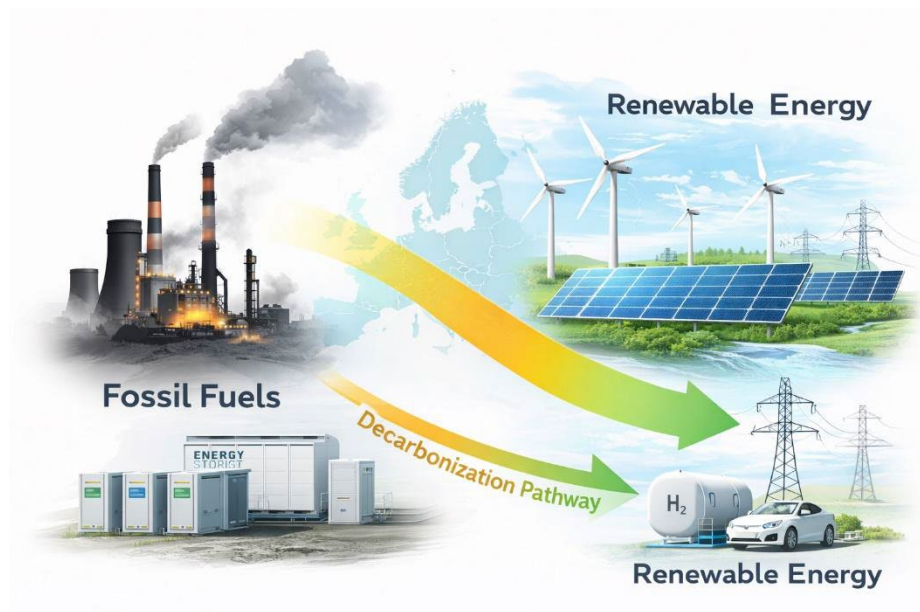
των τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα (IEA, 2024). Παράλληλα, η γήρανση των παλαιότερων μονάδων και οι αυξημένες απαιτήσεις περιβαλλοντικής συμμόρφωσης ενισχύουν περαιτέρω την τάση για σταδιακή απόσυρσή τους.

Πίνακας 2.2: Συγκριτική αποτίμηση λιγνίτη και ΑΠΕ.

Πηγή: Ιδία σύνθεση συγγραφέα, βασισμένη σε IEA, 2022 και European Commission, 2021)

Παράμετρος	Λιγνίτης	ΑΠΕ
Εκπομπές CO ₂	Πολύ υψηλές	Πολύ χαμηλές
Κόστος λειτουργίας	Αυξανόμενο	Μειούμενο
Ενεργειακή απόδοση	Μέτρια	Υψηλή (ανά τεχνολογία)
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Πολύ υψηλό	Χαμηλό
Ευελιξία συστήματος	Χαμηλή	Υψηλή (με αποθήκευση)

Η ενεργειακή μετάβαση, ωστόσο, δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική αντικατάσταση ενός καυσίμου από ένα άλλο. Πρόκειται για μια σύνθετη και πολυεπίπεδη διαδικασία που περιλαμβάνει μεταβολές στο ενεργειακό μίγμα, στις υποδομές, στις αγορές ενέργειας και στο θεσμικό πλαίσιο. Η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, εισάγει νέες απαιτήσεις και χαρακτηριστικά στο ενεργειακό σύστημα, όπως η στοχαστικότητα της παραγωγής και η ανάγκη για ευέλικτες λύσεις αποθήκευσης και διαχείρισης της ζήτησης (REN21, 2023).



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της μετάβασης από τα ορυκτά καύσιμα σε ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο σε ΑΠΕ.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει IEA (2023)

Στην Ελλάδα, η απολιγνιτοποίηση εξελίσσεται ως μία από τις πλέον ταχείες ενεργειακές μεταβάσεις στην Ευρώπη. Η σταδιακή απόσυρση των λιγνιτικών μονάδων και η ενίσχυση των επενδύσεων σε ΑΠΕ έχουν ήδη μεταβάλει σημαντικά τη δομή της ηλεκτροπαραγωγής. Σύμφωνα με το επικαιροποιημένο ΕΣΕΚ, η συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή προβλέπεται να υπερβεί το 80% έως το 2030, ενώ παράλληλα προωθείται η ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, πράσινου υδρογόνου και ευφών ενεργειακών δικτύων (ΥΠΕΝ, 2024).

Παρά τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, η ενεργειακή μετάβαση συνοδεύεται από σημαντικές κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις, ιδιαίτερα σε περιοχές με ισχυρή εξάρτηση από τη λιγνιτική δραστηριότητα, όπως η περιοχή μελέτης, δηλαδή η Δυτική Μακεδονία. Η απώλεια θέσεων εργασίας, η αναδιάρθρωση της τοπικής οικονομίας και η ανάγκη επανακατάρτισης του ανθρώπινου δυναμικού αποτελούν κρίσιμες διαστάσεις της μεταλιγνιτικής περιόδου (Boulogiorgou and Kaldellis, 2025). Η ενεργειακή μετάβαση συνδέεται επομένως άμεσα με ζητήματα ενεργειακής δικαιοσύνης, κοινωνικής συνοχής και χωρικών ανισοτήτων, καθιστώντας αναγκαία την εφαρμογή πολιτικών που θα διασφαλίζουν τη βιώσιμη και κοινωνικά ισορροπημένη αναδιάρθρωση των περιοχών υπό μετάβαση.

Η έννοια της «Δίκαιης Μετάβασης» (Just Transition) αναδεικνύεται ως βασικός μηχανισμός διαχείρισης αυτών των προκλήσεων. Μέσω του Ευρωπαϊκού Μηχανισμού Δίκαιης Μετάβασης και των αντίστοιχων εθνικών προγραμμάτων χρηματοδότησης, επιδιώκεται η στήριξη των τοπικών κοινωνιών, η ανάπτυξη πράσινης επιχειρηματικότητας, η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και η προώθηση βιώσιμων παραγωγικών δραστηριοτήτων (Kilintzis et al., 2023; Pavloudakis, Karloropoulos & Roumpou, 2023a). Η επιτυχία της μετάβασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων σε ένα συνεκτικό αναπτυξιακό πλαίσιο για τη μεταλιγνιτική εποχή.

Η ενεργειακή μετάβαση στη Δυτική Μακεδονία συνοδεύεται από σημαντικές μεταβολές στις χρήσεις γης και στο ενεργειακό τοπίο της περιοχής. Πρώην εξορυκτικές εκτάσεις αξιοποιούνται πλέον για την εγκατάσταση μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων, ενεργειακών υποδομών και νέων παραγωγικών δραστηριοτήτων, μετασχηματίζοντας ουσιαστικά τον χωρικό χαρακτήρα της περιοχής. Οι εξελίξεις αυτές επηρεάζουν όχι μόνο την οικονομική και ενεργειακή φυσιογνωμία της Δυτικής Μακεδονίας, αλλά και τις επιφανειακές θερμικές ιδιότητες, το μικροκλίμα και τη λειτουργία των τοπικών οικοσυστημάτων. Ως εκ τούτου, η απολιγνιτοποίηση δεν συνιστά αποκλειστικά ενεργειακό μετασχηματισμό, αλλά και διαδικασία ευρείας περιβαλλοντικής και χωρικής αναδιάρθρωσης.

Συνεπώς, η μετάβαση από τον λιγνίτη στην πράσινη ενέργεια δεν αποτελεί απλώς ενεργειακή αναδιάρθρωση, αλλά έναν ευρύτερο μετασχηματισμό του παραγωγικού και κοινωνικού μοντέλου. Η κατανόηση των προκλήσεων και των ευκαιριών που προκύπτουν είναι κρίσιμο στοιχείο για τον σχεδιασμό πολιτικών που θα διασφαλίζουν τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος και την κοινωνική συνοχή.

2.4 Πολιτικές και εργαλεία για τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή

Η μετάβαση από ένα ενεργειακό σύστημα που βασίζεται στον λιγνίτη σε ένα σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα συνιστά μία σύνθετη διαδικασία θεσμικού, κοινωνικοοικονομικού και χωρικού μετασχηματισμού. Η ενεργειακή μετάβαση δεν περιορίζεται στην τεχνολογική αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ΑΠΕ, αλλά επηρεάζει συνολικά το παραγωγικό μοντέλο, τις ενεργειακές υποδομές, τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και τη λειτουργία των τοπικών κοινωνιών. Ως εκ τούτου, η επιτυχής υλοποίηση της απολιγνιτοποίησης προϋποθέτει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων

πολιτικών εργαλείων και μηχανισμών διακυβέρνησης που να συνδυάζουν περιβαλλοντικούς στόχους με οικονομική βιωσιμότητα, κοινωνική συνοχή και περιφερειακή ανθεκτικότητα (European Commission, 2021).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η μετάβαση υποστηρίζεται από ένα συνεκτικό πλαίσιο πολιτικών που περιλαμβάνει την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (Green Deal), το πακέτο “Fit for 55” και τον μηχανισμό REPowerEU. Τα εργαλεία αυτά λειτουργούν συμπληρωματικά, θέτοντας δεσμευτικούς στόχους για τη μείωση των εκπομπών, ενισχύοντας τη διείσδυση των ΑΠΕ και προωθώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση των οικονομικών κινήτρων διαδραματίζει το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU ETS). Το σύστημα αυτό λειτουργεί ως μηχανισμός τιμολόγησης του άνθρακα, ενσωματώνοντας το περιβαλλοντικό κόστος στις δραστηριότητες ηλεκτροπαραγωγής και ενισχύοντας την οικονομική πίεση προς την απολιγνιτοποίηση. Η συνεχής αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έχει επιβαρύνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος των λιγνιτικών μονάδων, μειώνοντας τη σχετική ανταγωνιστικότητά τους έναντι τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα και επιταχύνοντας τη μετάβαση προς καθαρότερες μορφές ενέργειας (IEA, 2024).

Επιπλέον, αναπτύσσονται νέα θεσμικά και οικονομικά εργαλεία που ενισχύουν τη βιώσιμη ανάπτυξη και την πράσινη επιχειρηματικότητα. Οι Πράσινες Δημόσιες Συμβάσεις (Green Public Procurement) αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα πολιτικής που προωθεί την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στις δημόσιες προμήθειες και επενδύσεις, ενισχύοντας την υιοθέτηση πράσινων τεχνολογιών και τη βιώσιμη περιφερειακή ανάπτυξη (Kilintzis et al., 2023).

Σε εθνικό επίπεδο, η Ελλάδα έχει υιοθετήσει ένα από τα πλέον φιλόδοξα χρονοδιαγράμματα απολιγνιτοποίησης στην Ευρώπη. Κεντρικό εργαλείο ενεργειακού σχεδιασμού αποτελεί το ΕΣΕΚ, το οποίο καθορίζει τους στρατηγικούς στόχους για τη μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα (ΥΠΕΝ, 2024). Το επικαιροποιημένο ΕΣΕΚ προβλέπει τη σημαντική αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ανάπτυξη νέων ενεργειακών τεχνολογιών, όπως η αποθήκευση ενέργειας, τα ευφυή δίκτυα και οι τεχνολογίες πράσινου υδρογόνου.

Η αυξημένη διείσδυση μεταβλητών ΑΠΕ (Variable Renewable Energy Sources – VRES), όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, δημιουργεί νέες απαιτήσεις για την ευστάθεια και την ευελιξία του ηλεκτρικού συστήματος. Για τον λόγο αυτόν, ο εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός δίνει έμφαση στην ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης και τεχνολογιών διαχείρισης φορτίου, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η στοχαστικότητα της παραγωγής από ΑΠΕ και να διασφαλιστεί η ενεργειακή ασφάλεια της χώρας (IEA, 2024).

Η μετάβαση, ωστόσο, δεν είναι ουδέτερη ως προς τις τοπικές κοινωνίες. Οι περιοχές που εξαρτώνται από τη λιγνιτική δραστηριότητα αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις, όπως η απώλεια θέσεων εργασίας και η ανάγκη αναδιάρθρωσης της οικονομικής τους βάσης. Για τον λόγο αυτό, έχει αναπτυχθεί η έννοια της «δίκαιης μετάβασης», η οποία στοχεύει στην άμβλυνση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων της απολιγνιτοποίησης.

Η έννοια της «Δίκαιης Μετάβασης» (Just Transition) έχει αναδειχθεί ως βασικός μηχανισμός διαχείρισης αυτών των προκλήσεων. Το Ταμείο Δίκαιης Μετάβασης (Just Transition Fund) λειτουργεί ως βασικός χρηματοδοτικός μηχανισμός για τη στήριξη της απασχόλησης, της επιχειρηματικής διαφοροποίησης και της κοινωνικής συνοχής στις περιοχές υπό μετάβαση. Μέσω ευρωπαϊκών και εθνικών χρηματοδοτικών εργαλείων επιδιώκεται η επανακατάρτιση του ανθρώπινου δυναμικού, η ενίσχυση νέων μορφών επιχειρηματικότητας και η προσέλκυση βιώσιμων επενδύσεων σε τομείς χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Pavloudakis et al., 2023a).

Στη Δυτική Μακεδονία, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα Εδαφικά Σχέδια Δίκαιης Μετάβασης, τα οποία καθορίζουν τις προτεραιότητες για τον παραγωγικό μετασχηματισμό της περιοχής. Η σταδιακή αποκατάσταση των εξορυκτικών εκτάσεων βασίζεται ολοένα και περισσότερο στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης γης. Πρώην λιγνιτικές περιοχές αξιοποιούνται πλέον για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων, ενεργειακών υποδομών και νέων παραγωγικών δραστηριοτήτων, μεταβάλλοντας ουσιαστικά τη χωρική και περιβαλλοντική φυσιογνωμία της περιοχής (Pavloudakis et al., 2023b).

Οι πολιτικές της μεταλιγνιτικής περιόδου επηρεάζουν άμεσα και τη χωρική αναδιάρθρωση της Δυτικής Μακεδονίας, καθώς οι αλλαγές στις χρήσεις γης και στις ενεργειακές υποδομές μετασχηματίζουν το ενεργειακό τοπίο της περιοχής. Οι μεταβολές

αυτές επηρεάζουν όχι μόνο την οικονομική ανάπτυξη αλλά και τις τοπικές περιβαλλοντικές και μικροκλιματικές συνθήκες, συνδέοντας άμεσα την ενεργειακή πολιτική με τις κλιματικές και γεωχωρικές διεργασίες που εξετάζονται στη μελέτη.

Η αποτελεσματικότητα των πολιτικών αυτών εξαρτάται από τον βαθμό συντονισμού μεταξύ ευρωπαϊκών, εθνικών και τοπικών φορέων, καθώς και από τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε περιοχής στον σχεδιασμό των παρεμβάσεων. Η ενεργειακή μετάβαση, επομένως, δεν αποτελεί μόνο τεχνικό ή οικονομικό ζήτημα, αλλά και διαδικασία πολυεπίπεδης διακυβέρνησης. Στο πλαίσιο αυτό, τα πολιτικά και θεσμικά εργαλεία που αναπτύσσονται σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο διαμορφώνουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο υλοποιείται η ενεργειακή μετάβαση. Η κατανόηση της λειτουργίας και της αλληλεπίδρασής τους είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των πολιτικών και τη διαμόρφωση βιώσιμων στρατηγικών για τη μεταλινιτική εποχή.

2.5 Κοινωνικοοικονομικές και χωρικές επιδράσεις της απολιγνιτοποίησης

Η διαδικασία της απολιγνιτοποίησης δεν αποτελεί απλώς μια ενεργειακή μετάβαση, αλλά μια σύνθετη αναδιάρθρωση με έντονες κοινωνικοοικονομικές, χωρικές και αναπτυξιακές προεκτάσεις. Στις λιγνιτικές περιοχές της Ελλάδας, και ιδίως στη Δυτική Μακεδονία, η μακροχρόνια εξάρτηση από τη λιγνιτική δραστηριότητα διαμόρφωσε ένα συγκεντρωτικό παραγωγικό μοντέλο, στο οποίο η ενέργεια αποτέλεσε τον βασικό πυλώνα απασχόλησης και τοπικής οικονομικής δραστηριότητας.

Η σταδιακή παύση των λιγνιτικών μονάδων επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην αγορά εργασίας, καθώς μεγάλος αριθμός άμεσων και έμμεσων θέσεων εργασίας συνδέεται με την εξόρυξη και αξιοποίηση του λιγνίτη. Η απώλεια αυτών των δραστηριοτήτων οδηγεί σε αύξηση της ανεργίας, με έμφαση σε περιοχές με περιορισμένη οικονομική διαφοροποίηση. Την ίδια στιγμή, προκύπτει η ανάγκη επανακατάρτισης του ανθρώπινου δυναμικού, ώστε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των νέων κλάδων, όπως οι ΑΠΕ και οι πράσινες τεχνολογίες.

Σε χωρικό επίπεδο, η απολιγνιτοποίηση συνοδεύεται από σημαντικές μεταβολές στις χρήσεις γης και στη λειτουργία του τοπίου. Οι εκτεταμένες μεταλλευτικές εκτάσεις, μετά την παύση της δραστηριότητας, αποτελούν πεδία αποκατάστασης αλλά και

επαναξιοποίησης. Η μετατροπή τους σε ενεργειακά πάρκα, γεωργικές εκτάσεις ή περιοχές οικότουριστικής ανάπτυξης δημιουργεί νέες προοπτικές, οι οποίες ωστόσο, εξαρτώνται από τον βαθμό σχεδιασμού και τις επενδύσεις που θα πραγματοποιηθούν μελλοντικά.

Πέραν των επιπτώσεων, η απολιγνιτοποίηση συνοδεύεται από ένα σύνολο προκλήσεων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα της μετάβασης. Μία από τις βασικότερες προκλήσεις αφορά τη χρονική ασυμμετρία μεταξύ της ταχείας παύσης της λιγνιτικής δραστηριότητας και της αργής ανάπτυξης εναλλακτικών οικονομικών δραστηριοτήτων. Η διαφορά αυτή δημιουργεί ένα μεταβατικό κενό, το οποίο εκδηλώνεται μέσω αυξημένης ανεργίας, οικονομικής αβεβαιότητας και επιτάχυνσης γήρανσης του πληθυσμού.

Επιπλέον, σημαντική πρόκληση είναι η εξασφάλιση επαρκών επενδύσεων για την αναδιάρθρωση των τοπικών οικονομιών. Η επιτυχία της μετάβασης εξαρτάται από την προσέλκυση ιδιωτικών κεφαλαίων, τη σωστή αξιοποίηση ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών εργαλείων και τη δημιουργία ενός σταθερού θεσμικού πλαισίου. Η περιορισμένη επενδυτική δραστηριότητα ενδέχεται να οδηγήσει σε στασιμότητα και περαιτέρω περιφερειακές ανισότητες.

Παράλληλα, η αντικατάσταση των θερμικών μονάδων από ΑΠΕ απαιτεί την ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης και ευέλικτων συστημάτων διαχείρισης της ενέργειας. Η μεταβλητότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ καθιστά αναγκαία την ενίσχυση της ευστάθειας του συστήματος, γεγονός που προσθέτει τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις.

Στο πλαίσιο αυτό, η έννοια της δίκαιης μετάβασης (Just Transition) αποκτά καθοριστική σημασία, καθώς επιδιώκει την εξισορρόπηση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων. Η εφαρμογή ολοκληρωμένων πολιτικών που ενισχύουν την απασχόληση, την εκπαίδευση και την τοπική ανάπτυξη αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή προσαρμογή των λιγνιτικών περιοχών σε ένα νέο, βιώσιμο αναπτυξιακό μοντέλο.

Οι βασικές κοινωνικοοικονομικές και χωρικές επιπτώσεις της απολιγνιτοποίησης, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες προκλήσεις και ευκαιρίες, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Επιδράσεις, προκλήσεις και ευκαιρίες της απολιγνιτοποίησης.

Πηγή: Ιδία σύνθεση συγγραφέα

Κατηγορία	Επιδράσεις	Προκλήσεις	Ευκαιρίες
Απασχόληση	Απώλεια θέσεων εργασίας	Ανάγκη επανακατάρτισης	Δημιουργία πράσινων θέσεων
Οικονομία	Μείωση τοπικού εισοδήματος	Περιορισμένες επενδύσεις	Οικονομική διαφοροποίηση
Χώρος	Υποβαθμισμένες εκτάσεις	Κόστος αποκατάστασης	Νέες χρήσεις γης
Ενέργεια	Απώλεια βάσης ισχύος	Αστάθεια λόγω ΑΠΕ	Καινοτομία & Αποθήκευση

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω Πίνακα 2.3, η απολιγνιτοποίηση δεν συνιστά μονοδιάστατη διαδικασία, αλλά έναν σύνθετο μετασχηματισμό που επηρεάζει ταυτόχρονα την οικονομία, την απασχόληση, τον χώρο και το ενεργειακό σύστημα. Η επιτυχής διαχείριση των προκλήσεων προϋποθέτει τον συνδυασμό επενδύσεων, θεσμικού σχεδιασμού και κοινωνικής προσαρμογής, ώστε οι αναδυόμενες ευκαιρίες να μετατραπούν σε βιώσιμη αναπτυξιακή δυναμική.

3. Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία και Δεδομένα

3.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης (γεωγραφικά, πληθυσμιακά, μορφολογικά)

3.1.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στην Π.Ε. Κοζάνης, η οποία είναι μία από τις τέσσερις περιφερειακές ενότητες της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας και βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της ηπειρωτικής Ελλάδας. Η γεωγραφική θέση της περιοχής είναι ιδιαίτερης στρατηγικής σημασίας, καθώς αποτελεί γεωγραφική ζώνη μεταξύ της βόρειας και της νότιας Ελλάδας, ενώ συνδέεται χωρικά με τα δυτικά Βαλκάνια και τον ευρύτερο άξονα της Εγνατίας Οδού.



Σχήμα 3.1: Διοικητική και γεωγραφική απεικόνιση της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης

Πηγή: Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, Παρουσίαση Περιφέρειας, διαθέσιμο στο:
<https://www.pdm.gov.gr/periferia/parousiasi-periferias/>

Η περιοχή συνορεύει βόρεια με την Π.Ε. Φλώρινας, ανατολικά με τις Π.Ε. Πέλλας και Π.Ε. Ημαθίας, νότια με την Π.Ε. Γρεβενών και δυτικά με την Π.Ε. Καστοριάς. Η

γεωγραφική αυτή διάταξη καθιστά την Κοζάνη σημαντικό διοικητικό και ενεργειακό κέντρο της ευρύτερης περιοχής.

Η συνολική έκταση της Π.Ε. ανέρχεται σε περίπου 3.500 km², ενώ το ανάγλυφο της περιοχής εμφανίζει σημαντικές μορφολογικές διαφοροποιήσεις. Η πόλη της Κοζάνης, που αποτελεί διοικητικό και οικονομικό κέντρο, βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 710 μέτρων, χαρακτηριστικό που επηρεάζει άμεσα τις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

Η γεωγραφική φυσιογνωμία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την παρουσία εκτεταμένων λεκανοπεδίων, όπως αυτό της Πτολεμαΐδας, καθώς και σημαντικών ορεινών όγκων, όπως το Όρος Βέρμιο και τα Καμβούνια Όρη. Η γεωμορφολογία της περιοχής επηρεάζει άμεσα τη χωρική κατανομή των ενεργειακών δραστηριοτήτων, ιδίως όσον αφορά την ανάπτυξη και εκμετάλλευση των λιγνιτικών πεδίων, η οποία διαμόρφωσε σε σημαντικό βαθμό τη χωρική και οικονομική οργάνωση της περιοχής.

Η ύπαρξη των λιγνιτικών κοιτασμάτων στη λεκάνη Πτολεμαΐδας–Κοζάνης καθιστά την περιοχή ιδιαίτερης γεωστρατηγικής σημασίας, καθώς τα κοιτάσματα αυτά συγκαταλέγονται στα σημαντικότερα ενεργειακά αποθέματα της χώρας. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων αυτών οδήγησε στη δημιουργία εκτεταμένων ενεργειακών υποδομών και στη διαμόρφωση ενός ισχυρού βιομηχανικού τοπίου.

Η υδρογραφία της περιοχής επηρεάζεται κυρίως από τον Αλιάκμονα, τον μεγαλύτερο ποταμό της Ελλάδας, ο οποίος διασχίζει τμήμα της Π.Ε. και συμβάλλει τόσο στην υδροδότηση όσο και στη διαμόρφωση του φυσικού περιβάλλοντος. Στην περιοχή εντοπίζονται επίσης τεχνητές λίμνες και υδατικά σώματα που σχετίζονται με ενεργειακά έργα και υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Π.Ε. Κοζάνης συνθέτουν ένα πολυσύνθετο χωρικό σύστημα, στο οποίο συνυπάρχουν φυσικά οικοσυστήματα και έντονες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Η γεωγραφική αυτή ιδιαιτερότητα καθιστά την περιοχή ιδανική για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσικού περιβάλλοντος και ενεργειακής δραστηριότητας.

3.1.2 Πληθυσμικά χαρακτηριστικά της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης

Η Π.Ε. Κοζάνης χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα δημογραφικά χαρακτηριστικά που συνδέονται άμεσα με τη γεωμορφολογία και την οικονομική δραστηριότητα της περιοχής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της απογραφής πληθυσμού–κατοικιών του

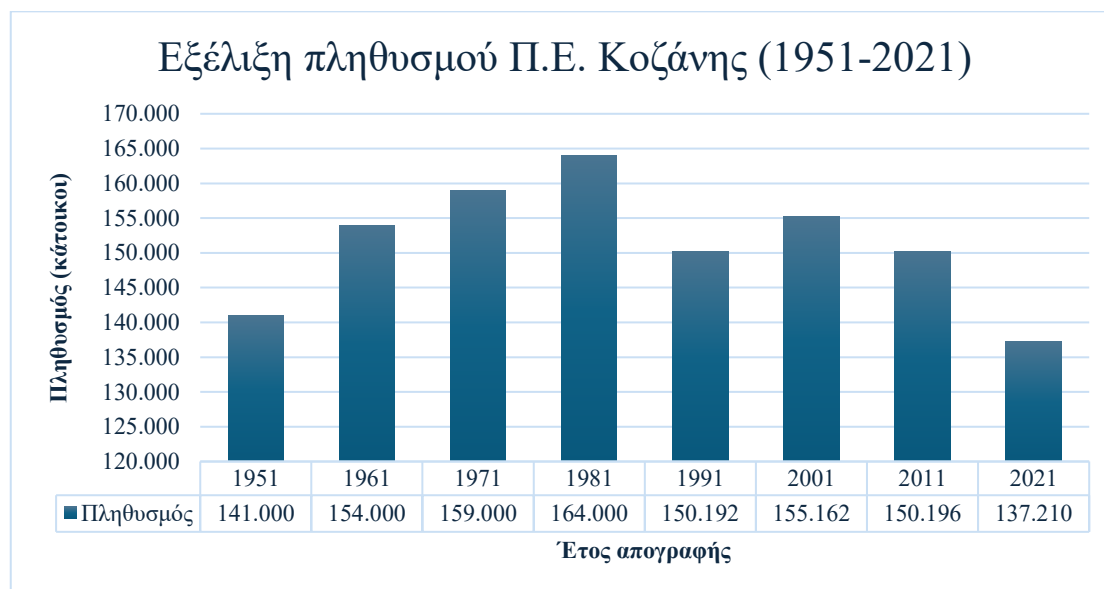
2021, ο συνολικός πληθυσμός της Π.Ε. ανέρχεται σε 137.210 κατοίκους, καταγράφοντας μείωση σε σχέση με τις προηγούμενες απογραφές (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

Η εξέλιξη του πληθυσμού παρουσιάζει σαφή πτωτική τάση, όπως αποτυπώνεται στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Εξέλιξη πληθυσμού Π.Ε. Κοζάνης (1951-2021).

Πηγή: Ίδια επεξεργασία δεδομένων βάσει ΕΛΣΤΑΤ, Απογραφές Πληθυσμού 1951–2021

Έτος Απογραφής	Πληθυσμός	Μεταβολή (%)
1951	141.000	-
1961	154.000	+9,2%
1971	159.000	+3,2%
1981	164.000	+3,1%
1991	150.192	-8,4%
2001	155.162	+3,3%
2011	150.196	-3,2%
2021	137.210	-8,6%



Σχήμα 3.2: Εξέλιξη πληθυσμού Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης (1951-2021).

Πηγή: Ίδια επεξεργασία δεδομένων βάσει ΕΛΣΤΑΤ, Απογραφές Πληθυσμού 1951–2021

Η εξέλιξη του πληθυσμού της Π.Ε. Κοζάνης κατά την περίοδο 1951–2021 χαρακτηρίζεται από σημαντικές μεταβολές, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις κοινωνικές, οικονομικές και παραγωγικές αλλαγές που έλαβαν χώρα στην περιοχή. Όπως

φαίνεται στον Πίνακα 3.1, ο πληθυσμός ακολούθησε ανοδική πορεία από το 1951 έως το 1981, αυξανόμενος από περίπου 141.000 σε 164.000 κατοίκους. Η αύξηση αυτή συμπίπτει χρονικά με την έντονη ανάπτυξη της λιγνιτικής δραστηριότητας και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Δυτική Μακεδονία, η οποία προσέλκυσε εργατικό δυναμικό από άλλες περιοχές της χώρας και δημιούργησε σημαντικές ευκαιρίες απασχόλησης.

Η λειτουργία των ορυχείων και των ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ) της ΔΕΗ αποτέλεσε για πολλές δεκαετίες τον βασικό αναπτυξιακό πυλώνα της περιοχής, ενισχύοντας την οικονομική δραστηριότητα, την αστικοποίηση και τη συγκέντρωση πληθυσμού στα μεγάλα αστικά κέντρα της Κοζάνης και της Πτολεμαΐδας. Παράλληλα, η ανάπτυξη υποδομών, υπηρεσιών και εμπορικών δραστηριοτήτων συνέβαλε στη διατήρηση θετικών δημογραφικών τάσεων έως τις αρχές της δεκαετίας του 1980.

Από το 1981 και έπειτα παρατηρείται αντιστροφή της τάσης και σταδιακή μείωση του πληθυσμού. Ειδικότερα, μεταξύ 1981 και 1991 καταγράφεται μείωση περίπου 8,4%, ενώ η πληθυσμιακή συρρίκνωση συνεχίζεται και κατά τις επόμενες δεκαετίες. Η περίοδος αυτή συμπίπτει με ευρύτερες δημογραφικές μεταβολές που παρατηρούνται στην Ελλάδα, όπως η μείωση της γεννητικότητας, η γήρανση του πληθυσμού και η μετακίνηση νεότερων ηλικιακών ομάδων προς μεγαλύτερα αστικά κέντρα ή προς το εξωτερικό.

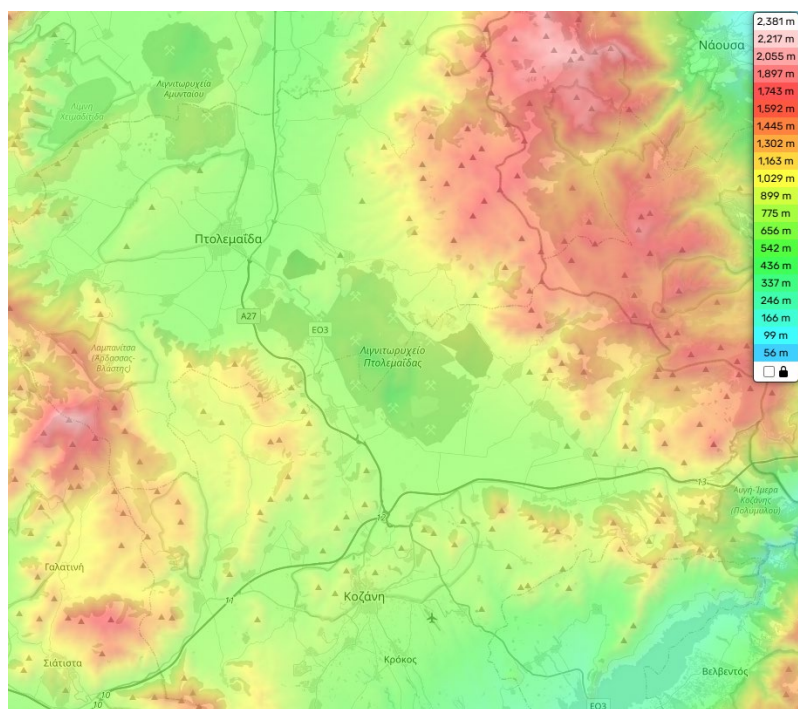
Κατά την περίοδο 2001–2021 η μείωση γίνεται εντονότερη, καθώς ο πληθυσμός υποχώρησε από 155.162 σε 137.210 κατοίκους, καταγράφοντας συνολική μείωση της τάξης του 11,6%. Ιδιαίτερα κατά τη δεκαετία 2011–2021 καταγράφεται πτώση περίπου 8,6%, γεγονός που υποδηλώνει επιτάχυνση των δημογραφικών πιέσεων στην περιοχή. Η εξέλιξη αυτή συμπίπτει με την οικονομική κρίση της χώρας, αλλά και με τη σταδιακή μετάβαση της περιοχής σε μεταλιγνιτική περίοδο, η οποία επηρέασε την τοπική αγορά εργασίας και τις προοπτικές απασχόλησης.

Παράλληλα με τις παραπάνω εξελίξεις, η πληθυσμιακή πυκνότητα παραμένει σχετικά χαμηλή λόγω του έντονου ορεινού και ημιορεινού χαρακτήρα της Π.Ε. Ο πληθυσμός συγκεντρώνεται κυρίως στους δήμους Κοζάνης και Εορδαίας, ενώ αρκετοί μικρότεροι οικισμοί εμφανίζουν μακροχρόνια τάση πληθυσμιακής αποδυνάμωσης. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τη συνεχιζόμενη αστικοποίηση, τη μεταβολή του παραγωγικού προτύπου και τη σταδιακή μείωση των παραδοσιακών οικονομικών δραστηριοτήτων.

Η δημογραφική εξέλιξη της Π.Ε. Κοζάνης αντανακλά τη στενή σχέση μεταξύ πληθυσμιακών μεταβολών και ενεργειακής δραστηριότητας. Η περίοδος ανάπτυξης του λιγνιτικού τομέα συνοδεύτηκε από αύξηση του πληθυσμού και οικονομική ευημερία, ενώ η σταδιακή απολιγνιτοποίηση και οι σύγχρονες δημογραφικές τάσεις συνδέονται με τη μείωση του πληθυσμού και την επιτάχυνση της δημογραφικής γήρανσης. Η κατανόηση των μεταβολών αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων της ενεργειακής μετάβασης στη Δυτική Μακεδονία.

3.1.3 Μορφολογικά χαρακτηριστικά της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης

Η Π.Ε. Κοζάνης παρουσιάζει ιδιαίτερα σύνθετη μορφολογική και γεωμορφολογική δομή, η οποία διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση φυσικών γεωλογικών διεργασιών και εκτεταμένων ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονες υψομετρικές διαφοροποιήσεις και από την εναλλαγή ορεινών, ημιορεινών και πεδινών εκτάσεων, δημιουργώντας ένα σύνθετο τοπογραφικό σύστημα, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες της Δυτικής Μακεδονίας. Η μορφολογία της περιοχής συνδέεται άμεσα με τη γεωτεκτονική εξέλιξη της λεκάνης Πτολεμαΐδας–Αμυνταίου και με τη διαχρονική ανάπτυξη της λιγνιτικής δραστηριότητας, η οποία μετασχημάτισε σημαντικά το φυσικό τοπίο.

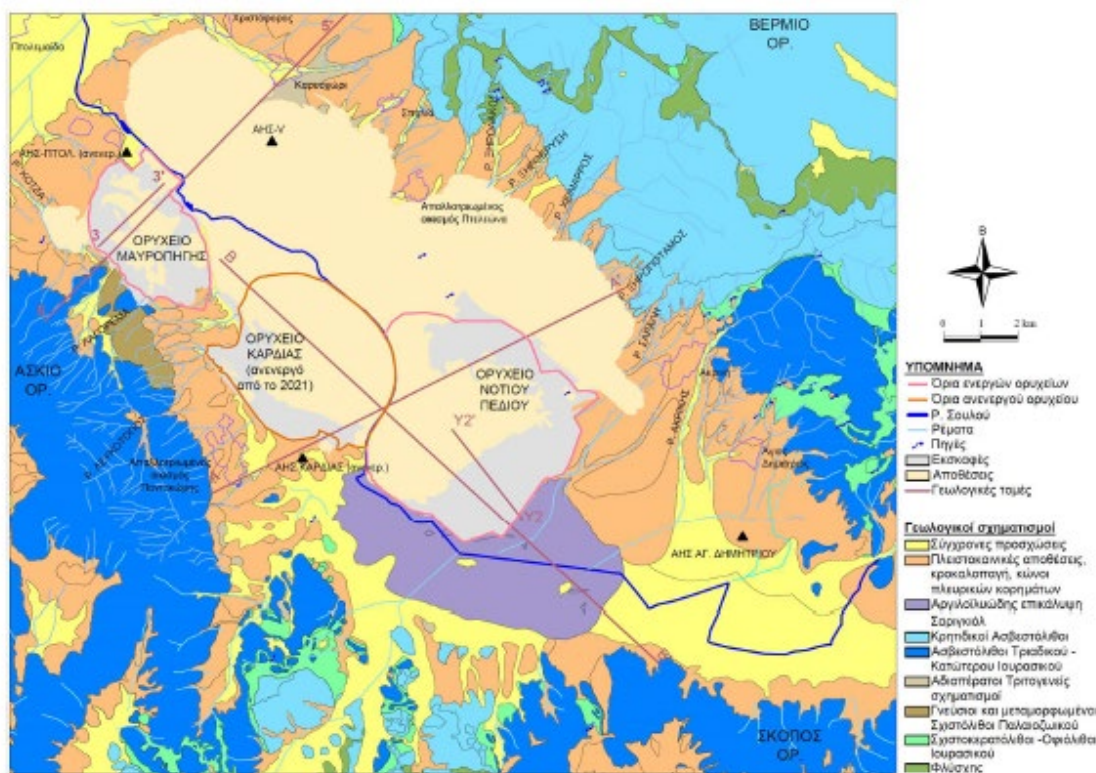


Σχήμα 3.3: Τοπογραφική Απεικόνιση της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης.

Η ευρύτερη περιοχή περιβάλλεται από σημαντικούς ορεινούς όγκους, όπως το Βέρμιο, το Άσκιο (Σινιάτσικο), το Βόιο και τα Πιέρια Όρη, οι οποίοι λειτουργούν ως φυσικά γεωμορφολογικά όρια και επηρεάζουν τη χωρική κατανομή των λεκανών και των επιφανειακών απορροών. Τα υψόμετρα μεταβάλλονται σημαντικά, από περίπου 450 m στις χαμηλότερες περιοχές της λιγνιτοφόρου λεκάνης έως και άνω των 2.000 m στα περιμετρικά ορεινά συγκροτήματα. Οι χαμηλότερες υψομετρικές τιμές εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές εξόρυξης και στις πεδινές εκτάσεις της λεκάνης Πτολεμαΐδας, ενώ τα υψηλότερα τμήματα αναπτύσσονται στις ορεινές περιοχές του Βερμίου και του Ασκίου, επηρεάζοντας σημαντικά το μικροκλίμα, την κατανομή των κατακρημνισμάτων και τις διαδικασίες φυσικής αποστράγγισης.

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται γεωτεκτονικά στη λεκάνη Φλώρινας–Πτολεμαΐδας–Αμυνταίου, η οποία θεωρείται τμήμα ενός ευρύτερου νεοτεκτονικού βυθίσματος της Δυτικής Μακεδονίας. Ειδικότερα, η λεκάνη Σαριγκιόλ συνιστά σημαντική υπολεκάνη του συστήματος αυτού και διαμορφώθηκε στο πλαίσιο τεκτονικών διεργασιών που έλαβαν χώρα από το Μέσο–Άνω Μειόκαινο έως και το Πλειστόκαινο. Οι νεοτεκτονικές κινήσεις συνέβαλαν στη δημιουργία επιμέρους βυθισμάτων και εξαρμάτων, μέσα στα οποία αναπτύχθηκαν τα κύρια λιγνιτικά κοιτάσματα της περιοχής.

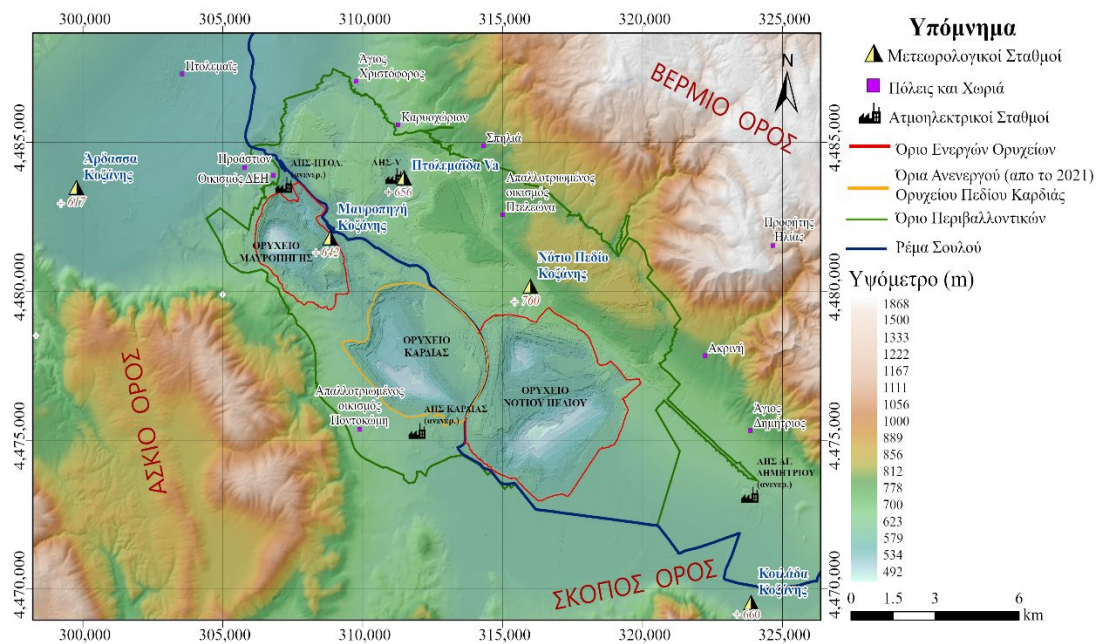
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης αποτελούνται κυρίως από νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις, όπως άργιλοι, μάργες, άμμοι, κροκαλοπαγή και λιγνιτικά στρώματα, τα οποία αποτέθηκαν σε λιμναία και ποταμολιμναία περιβάλλοντα. Η γεωλογική αυτή δομή επηρεάζει άμεσα τη μορφολογική διάρθρωση της περιοχής, τη σταθερότητα των επικλινών επιφανειών και τη λειτουργία των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών συστημάτων. Επίσης, η χωρική εναλλαγή διαφορετικών λιθολογικών σχηματισμών δημιουργεί σημαντική μορφολογική ανομοιογένεια, καθώς και διαφοροποιήσεις στις χρήσεις γης και στις διαδικασίες διάβρωσης και απορροής.



Εικόνα 3.1: Γεωλογικός – υδρολιθολογικός χάρτης Λεκάνης Σαριγκιόλ (οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν ψηφιοποιηθεί από τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ 1:50.000). Οι περιοχές εκσκαφών – αποθέσεων έχουν προκύψει βάσει του stand 06.2025 των ορυχείων.

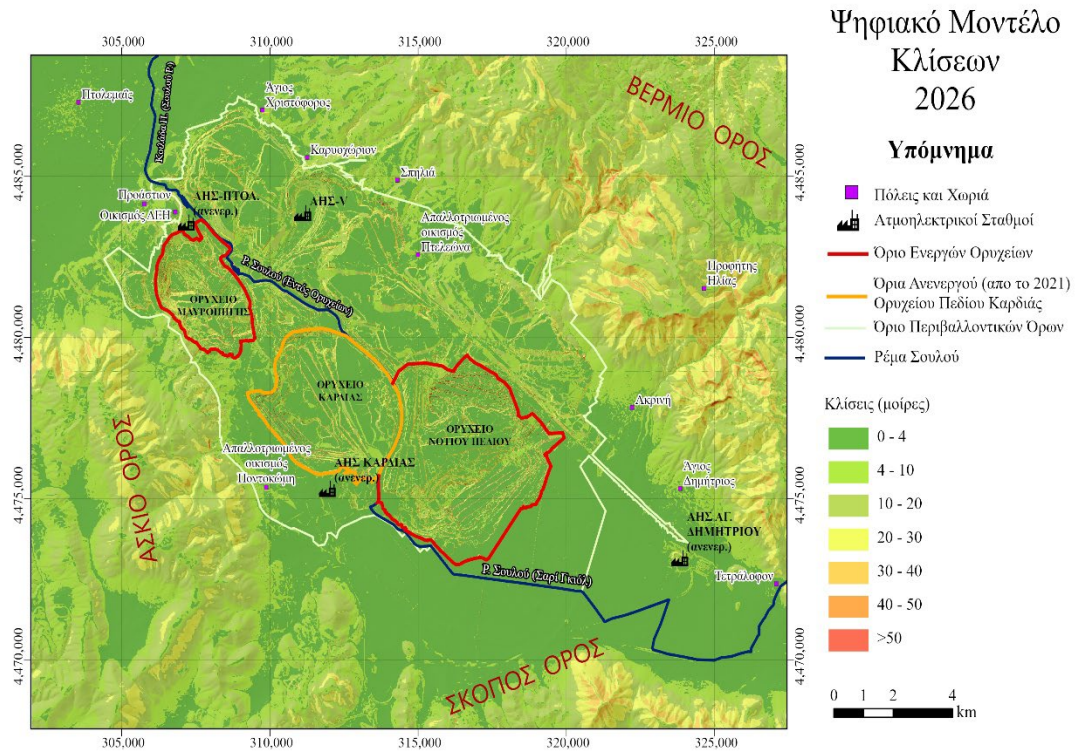
Πηγή: ΔΕΗ (2025)

Η μορφολογική διάρθρωση της περιοχής αποτυπώνεται και στο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, όπου διακρίνεται η έντονη υψομετρική διαφοροποίηση μεταξύ των πεδινών εκτάσεων της λεκάνης και των περιμετρικών ορεινών συγκροτημάτων. Οι περιοχές των ορυχείων αναπτύσσονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, όπου κυριαρχούν ήπιες μορφολογικές κλίσεις και χαμηλότερα υψόμετρα, στοιχεία που ευνόησαν την ανάπτυξη της επιφανειακής εξόρυξης λιγνίτη. Αντίθετα, οι μεγαλύτερες κλίσεις εντοπίζονται στα περιμετρικά ορεινά τμήματα και στις περιοχές έντονης τεκτονικής διαφοροποίησης.



Εικόνα 3.2: Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου της περιοχής μελέτης και χωρική κατανομή των κύριων λιγνιτικών πεδίων (stand ορυχείων 02.2026).

Πηγή: ΔΕΗ (2026), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα.



Εικόνα 3.3: Χωρική κατανομή κλίσεων στην περιοχή μελέτης και στα κύρια λιγνιτικά πεδία (stand ορυχείων 02.2026).

Πηγή: ΔΕΗ (2026), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα.

Η ανάπτυξη των επιφανειακών ορυχείων επέφερε σημαντικές μεταβολές στο φυσικό ανάγλυφο και στη γεωμορφολογική φυσιогνωμία της περιοχής. Οι εκτεταμένες εκσκαφές, οι αποθέσεις στείρων υλικών, οι τεχνητές επιχώσεις, η διαμόρφωση κεκλιμένων επιφανειών και οι αποκαταστάσεις που ακολούθησαν, δημιούργησαν νέες ανθρωπογενείς γεωμορφές, μετασχηματίζοντας σημαντικά το τοπίο. Την ίδια στιγμή, η ανάπτυξη ενεργειακών εγκαταστάσεων, οδικών αξόνων, αποθεσιοθαλάμων και τεχνικών έργων οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στις χρήσεις γης και στη διαμόρφωση νέων εδαφικών εκτάσεων.

Οι ανθρωπογενείς αυτές παρεμβάσεις επηρεάζουν όχι μόνο τη μορφολογία της περιοχής, αλλά και τις τοπικές περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι μεταβολές των χρήσεων γης που προκαλούνται από την εντατική εξορυκτική δραστηριότητα μπορούν να επηρεάσουν την επιφανειακή θερμοκρασία, την εδαφική υγρασία και τις μικροκλιματικές συνθήκες, μεταβάλλοντας τη

θερμική συμπεριφορά της επιφάνειας και τη χωρική κατανομή περιβαλλοντικών παραμέτρων (Cao et al., 2020; Firozjaei et al., 2020).

Η περιοχή της Πτολεμαΐδας–Κοζάνης αποτελεί επομένως χαρακτηριστικό παράδειγμα ενεργειακού τοπίου σε περιβαλλοντική μετάβαση, όπου η αλληλεπίδραση φυσικών γεωλογικών διεργασιών και ανθρώπινης δραστηριότητας έχει διαμορφώσει ένα σύνθετο γεωμορφολογικό και περιβαλλοντικό σύστημα. Οι εκτεταμένες μεταβολές του αναγλύφου και των χρήσεων γης αποτυπώνονται πλέον έντονα σε γεωχωρικά και δορυφορικά δεδομένα, καθιστώντας δυνατή τη διαχρονική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών μεταβολών μέσω τεχνικών GIS και τηλεπισκόπησης. Η αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων διευκολύνει ουσιαστικά την κατανόηση των χωρικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων της μακροχρόνιας λιγνιτικής δραστηριότητας, καθώς και στην αποτίμηση των μεταβολών που συνοδεύουν τη σύγχρονη διαδικασία απολιγνιτοποίησης στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας.

3.2 Χρήσεις Γης στην ευρύτερη Περιοχή Μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή της λεκάνης Πτολεμαΐδας–Κοζάνης διακρίνεται για τη σύνθετη χωρική διάρθρωση των χρήσεων γης, η οποία έχει διαμορφωθεί διαχρονικά υπό την επίδραση της λιγνιτικής δραστηριότητας και της ενεργειακής ανάπτυξης της Δυτικής Μακεδονίας. Η έντονη εξορυκτική και βιομηχανική δραστηριότητα οδήγησε σε σημαντικές μεταβολές του φυσικού και αγροτικού τοπίου, δημιουργώντας ένα ανθρωπογενώς τροποποιημένο περιβάλλον, όπου συνυπάρχουν ενεργά και ανενεργά ορυχεία, αποθεσιοθάλαμοι, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αγροτικές εκτάσεις, αποκατεστημένες περιοχές και νέες ενεργειακές χρήσεις γης.

Η ανάλυση των χρήσεων γης πραγματοποιείται συνήθως μέσω γεωχωρικών δεδομένων και ταξινομήσεων τύπου Corine Land Cover (CLC), οι οποίες επιτρέπουν τη διαχρονική παρακολούθηση των μεταβολών του τοπίου και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών συστημάτων. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η λεκάνη Πτολεμαΐδας θεωρείται μία από τις πλέον δυναμικές περιοχές μεταβολής χρήσεων γης στην Ελλάδα, εξαιτίας της συνεχούς επέκτασης των εξορυκτικών δραστηριοτήτων και της σταδιακής μετάβασης προς τη μεταλιγνιτική εποχή (Paraskevis et al., 2021).

Οι τεχνητές επιφάνειες και οι εξορυκτικές ζώνες αποτελούν την κυρίαρχη κατηγορία χρήσεων γης στο εσωτερικό της λιγνιτοφόρου λεκάνης.

Ακόμη, ιδιαίτερα εκτεταμένες είναι και οι περιοχές αποθέσεων αγόνων υλικών, δηλαδή πετρωμάτων και άλλων εδαφικών υλικών που απομακρύνονται κατά την εξόρυξη του λιγνίτη, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί από τη μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα. Οι αποθέσεις αυτές μεταβάλλουν σημαντικά το φυσικό ανάγλυφο, επηρεάζοντας τις επιφανειακές απορροές, τη διάβρωση και τη σταθερότητα των επικλινών επιφανειών. Επιπλέον, στο εσωτερικό της περιοχής αναπτύσσονται εκτεταμένες βιομηχανικές και ενεργειακές υποδομές, όπως ΑΗΣ, ταινιόδρομοι μεταφοράς υλικών, δίκτυα μεταφοράς ενέργειας και λοιπές υποστηρικτικές εγκαταστάσεις της ΔΕΗ, οι οποίες ενισχύουν τον βιομηχανικό χαρακτήρα του τοπίου.

Πίνακας 3.2: Χρήσεις γης στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας στο τέλος του έτους 2025

Πηγή δεδομένων: ΔΑΚΔΜ, ΚΠΕ&ΣΤ, Τεχνική Έκθεση για την εξέλιξη των έργων εκμετάλλευσης και αποκατάστασης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας, ΔΕΗ (2025).

Χρήσεις Γης	Έκταση (στρέμματα)
Εκσκαφές	16.056
Αποθέσεις	42.413
Αποκατεστημένες Εκτάσεις*	31.906
Χώροι με Ειδικές Χρήσεις**	33.058
Σύνολο	123.433

*Οι αποκατεστημένες εκτάσεις αναφέρονται σε δασικές/θαμνώδεις και γεωργικές εκτάσεις, λίμνες, καθώς και σε διαστρωμένες εκτάσεις.

** Οι χώροι με ειδικές χρήσεις αναφέρονται σε κτιριακές και βοηθητικές εγκαταστάσεις, σε εγκαταστάσεις των ΑΗΣ, καθώς και σε αποκατεστημένες εκτάσεις που προορίζονται για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων.

Η κατανομή των χρήσεων γης στην περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας αποτυπώνει τη σημαντική έκταση που εξακολουθούν να καταλαμβάνουν οι αποθέσεις και οι ενεργές εκσκαφές, αλλά και τη σταδιακή αύξηση των αποκατεστημένων εκτάσεων.

Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ, στο τέλος του έτους 2025 οι αποκατεστημένες εκτάσεις ανέρχονταν σε 31.906 στρέμματα, ενώ η συνολική περιοχή επέμβασης ανερχόταν σε 123.433 στρέμματα. Οι αποκατεστημένες εκτάσεις περιλαμβάνουν κυρίως δασικές και θαμνώδεις εκτάσεις, γεωργικές χρήσεις, διαστρωμένες επιφάνειες και μικρές υδάτινες επιφάνειες και αποτελούν βασικό στοιχείο της μεταλιγνιτικής μετάβασης και της περιβαλλοντικής επανένταξης των περιοχών που επηρεάστηκαν από τη μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα.

Παρά τη διαχρονική εξορυκτική δραστηριότητα, στην ευρύτερη λεκάνη εξακολουθούν να αναπτύσσονται αγροτικές, δασικές και ημιφυσικές εκτάσεις. Οι γεωργικές χρήσεις περιλαμβάνουν κυρίως αροτραίες καλλιέργειες και δενδρώδεις φυτείες, ενώ οι δασικές και ημιφυσικές περιοχές εντοπίζονται κυρίως στα περιφερειακά τμήματα της περιοχής μελέτης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των φυσικών εκτάσεων και των θερμικά επιβαρυνμένων εξορυκτικών επιφανειών δημιουργεί έντονες χωρικές διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία και στην επιφανειακή υγρασία, επηρεάζοντας το τοπικό μικροκλίμα (Chen et al., 2006; Paraskevis et al., 2021).

Κατά τη σύγχρονη περίοδο απολιγνιτοποίησης, παρατηρείται σταδιακή μεταβολή του χωρικού προτύπου των χρήσεων γης, με την ανάπτυξη νέων μορφών αξιοποίησης των πρώην εξορυκτικών εκτάσεων. Οι αποκατεστημένες περιοχές χρησιμοποιούνται πλέον για γεωργικές δραστηριότητες, δασικές αναδασώσεις, εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων και άλλες ενεργειακές ή αναπτυξιακές χρήσεις. Η μετατροπή πρώην λιγνιτικών πεδίων σε περιοχές εγκατάστασης ΑΠΕ αποτελεί μία από τις σημαντικότερες χωρικές μεταβολές της μεταλιγνιτικής περιόδου, αναδιαμορφώνοντας εκ νέου τα χαρακτηριστικά του τοπίου και τη λειτουργία της επιφάνειας (Pavloudakis et al., 2023b; Sokratidou et al., 2023).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελλοντική δημιουργία τεχνητών λιμνών στα τελικά ορύγματα των ορυχείων, ως μέρος των σχεδίων αποκατάστασης και περιβαλλοντικής επαναχρησιμοποίησης των εκτάσεων. Τα νέα αυτά υδάτινα σώματα αναμένεται να επηρεάσουν θετικά το μικροκλίμα της περιοχής, λειτουργώντας ως ρυθμιστικοί παράγοντες της θερμοκρασίας και της τοπικής υγρασίας, ενώ ενδέχεται να δημιουργήσουν νέες οικολογικές και αναπτυξιακές δυνατότητες για τη μεταλιγνιτική Δυτική Μακεδονία (Gerwin et al., 2023).

Οι αλλαγές στις χρήσεις γης της λεκάνης Πτολεμαΐδας αποτυπώνονται έντονα σε δορυφορικά και γεωχωρικά δεδομένα των τελευταίων δεκαετιών, αναδεικνύοντας τον δυναμικό χαρακτήρα της περιοχής και τη στενή σύνδεση μεταξύ εξορυκτικής δραστηριότητας, περιβαλλοντικών μεταβολών και ενεργειακής μετάβασης. Η αξιοποίηση τεχνικών GIS και τηλεπισκόπησης καθίσταται, επομένως, ιδιαίτερα σημαντική για τη διαχρονική παρακολούθηση της εξέλιξης των χρήσεων γης και την αξιολόγηση των επιπτώσεων της απολιγνιτοποίησης στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.

3.3 Πηγές και συλλογή δεδομένων

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε συνδυασμό πρωτογενών και δευτερογενών δεδομένων, τα οποία προέρχονται από αξιόπιστες εθνικές και διεθνείς βάσεις δεδομένων, με στόχο την ολοκληρωμένη ανάλυση των κλιματικών, γεωγραφικών και ενεργειακών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.

Για την καταγραφή και ανάλυση των κλιματικών συνθηκών της Π.Ε. Κοζάνης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), τα οποία αφορούν τη χρονική περίοδο 1955–2010. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία, το ύψος υετού και ο αριθμός ημερών βροχόπτωσης, και αξιοποιήθηκαν για την αποτύπωση των βασικών κλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής.

Για την ανάλυση των θερμοκρασιακών μεταβολών αξιοποιήθηκαν δεδομένα από την πλατφόρμα Meteoblue, τα οποία καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1979–2024 και επιτρέπουν την εκτίμηση των θερμοκρασιακών ανωμαλιών (Meteoblue, n.d.). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της κλιματικής μεταβολής και της εξέλιξης των ακραίων φαινομένων στην περιοχή.

Επιπλέον, για την ανάλυση των χωρικών διαφοροποιήσεων του μικροκλίματος χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το δίκτυο αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών της πλατφόρμας Meteo.gr του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ). Τα δεδομένα περιλάμβαναν χρονοσειρές θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, βροχόπτωσης και ανέμου από σταθμούς που βρίσκονται εντός και πέριξ της λιγνιτικής ζώνης της Π.Ε. Κοζάνης. Μέσω της επεξεργασίας των στοιχείων αυτών διερευνήθηκαν οι χωρικές διαφοροποιήσεις των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων και η επίδραση

γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, όπως το υψόμετρο, στις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

Για τη διερεύνηση πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλιματικών και ενεργειακών παραμέτρων συλλέχθηκαν στοιχεία ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνιτικές μονάδες και φωτοβολταϊκούς σταθμούς της περιοχής, τα οποία προήλθαν από τα διαθέσιμα δεδομένα του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ). Με βάση τα στοιχεία αυτά δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικοί πίνακες και πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις συσχέτισης μεταξύ της λιγνιτικής και της φωτοβολταϊκής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των αντίστοιχων θερμοκρασιακών μεταβλητών, με στόχο την αποτύπωση πιθανών σχέσεων μεταξύ της ενεργειακής δραστηριότητας και των κλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής.

Για τη μελέτη των χρήσεων γης και της χωρικής οργάνωσης της περιοχής αξιοποιήθηκαν δεδομένα του προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service και ειδικότερα το σύνολο δεδομένων CORINE Land Cover, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη χαρτογράφηση των βασικών κατηγοριών κάλυψης και χρήσεων γης στην Π.Ε. Κοζάνης. Τα δεδομένα αυτά συνέβαλαν στην αποτύπωση της χωρικής διάρθρωσης της περιοχής και στην αξιολόγηση των μεταβολών που σχετίζονται με την εξορυκτική δραστηριότητα και τη διαδικασία της απολιγνιτοποίησης.

Η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω εξειδικευμένων βάσεων δεδομένων και λογισμικών ανάλυσης, με στόχο τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην επιλογή δεδομένων με επαρκή χρονική διάρκεια και χωρική αντιπροσωπευτικότητα, ώστε να καταστεί δυνατή η εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις κλιματικές και περιβαλλοντικές μεταβολές στη ζώνη απολιγνιτοποίησης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

3.4 Θεωρητικό πλαίσιο επιλογής και αξιολόγησης δεδομένων

Η διερεύνηση των κλιματικών και περιβαλλοντικών μεταβολών στη ζώνη Κοζάνης–Πτολεμαΐδας απαιτεί τη συνδυαστική αξιοποίηση δεδομένων διαφορετικής χωρικής και χρονικής κλίμακας. Η πολυπαραγοντική φύση της απολιγνιτοποίησης, σε συνδυασμό με τις μεταβολές των χρήσεων γης και τη σταδιακή αναδιάρθρωση του ενεργειακού συστήματος, καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση ετερογενών συνόλων δεδομένων, ώστε

να καθίσταται δυνατή η ολοκληρωμένη ανάλυση των φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών που διαμορφώνουν την περιοχή μελέτης.

Η επιλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με βάση κριτήρια όπως η χρονική συνέχεια, η χωρική αντιπροσωπευτικότητα, η επιστημονική αξιοπιστία και η δυνατότητα συνδυαστικής αξιοποίησης διαφορετικών μεταβλητών. Η έμφαση δόθηκε στη χρήση χρονοσειρών επαρκούς χρονικού βάθους, οι οποίες επιτρέπουν την αποτύπωση των μακροχρόνιων τάσεων και την αξιολόγηση των χωρικών διαφοροποιήσεων των κλιματικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της περιοχής.

Η αξιοποίηση γεωχωρικών δεδομένων κρίθηκε απαραίτητη για την αποτύπωση της χωρικής οργάνωσης της περιοχής και των μεταβολών των χρήσεων γης που συνδέονται με τη μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα και τη σύγχρονη διαδικασία απολιγνιτοποίησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη διερεύνηση πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της χωρικής διάρθρωσης της περιοχής και των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών, διευκολύνοντας την κατανόηση των μεταβολών που παρατηρούνται στο φυσικό περιβάλλον.

Ταυτόχρονα, η αξιοποίηση ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Digital Elevation Models – DEM) και γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS) επέτρεψε την ανάλυση μορφολογικών χαρακτηριστικών, όπως το υψόμετρο και η χωρική διαφοροποίηση του αναγλύφου. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν σημαντικά τις τοπικές κλιματικές συνθήκες και συμβάλλουν στις χωρικές διαφοροποιήσεις των μετεωρολογικών μεταβλητών, καθιστώντας αναγκαία τη συνεκτίμησή τους κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, ο συνδυασμός των κλιματικών και ενεργειακών δεδομένων κατέστησε δυνατή τη διερεύνηση πιθανών σχέσεων μεταξύ των μεταβολών των μετεωρολογικών παραμέτρων και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνιτικές μονάδες και φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Η προσέγγιση αυτή συνέβαλε στην ανάδειξη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενεργειακής δραστηριότητας και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών, επιτρέποντας την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τον ρόλο της ενεργειακής μετάβασης στις σύγχρονες συνθήκες της περιοχής.

Η συνδυαστική αξιοποίηση κλιματικών, γεωγραφικών και ενεργειακών δεδομένων συνέβαλε στη διαμόρφωση ενός συνεκτικού πλαισίου ανάλυσης, το οποίο επιτρέπει τη συσχέτιση των περιβαλλοντικών μεταβολών με τη διαχρονική εξέλιξη της

λιγνιτικής δραστηριότητας και τη σύγχρονη διαδικασία απολιγνιτοποίησης στη Δυτική Μακεδονία. Η προσέγγιση αυτή καθιστά δυνατή την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις επιδράσεις της ενεργειακής μετάβασης στις κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

3.5 Περιορισμοί και αβεβαιότητες των δεδομένων

Παρά την αξιοποίηση αξιόπιστων και ευρέως χρησιμοποιούμενων πηγών δεδομένων, η μελέτη υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς και αβεβαιότητες, οι οποίοι σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων δεδομένων όσο και με την πολυπλοκότητα των φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών που εξελίσσονται στη ζώνη απολιγνιτοποίησης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας. Η αναγνώριση των περιορισμών αυτών θεωρείται απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων της έρευνας.

Σημαντική πηγή αβεβαιότητας σχετίζεται με την ετερογένεια των πηγών δεδομένων και τις διαφορετικές χρονικές περιόδους στις οποίες αυτές αναφέρονται. Τα μετεωρολογικά, γεωχωρικά και ενεργειακά δεδομένα προέρχονται από διαφορετικούς φορείς και παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς τη χρονική κάλυψη, τη χωρική ανάλυση και τη μεθοδολογία συλλογής τους. Ως εκ τούτου, η συνδυαστική αξιοποίησή τους προϋποθέτει τη συνεκτίμηση ενός βαθμού αβεβαιότητας κατά τη συγκριτική ανάλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Οι διαθέσιμες μετεωρολογικές χρονοσειρές ενδέχεται να περιλαμβάνουν διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με τη μεταβολή της θέσης των σταθμών, τη χρήση διαφορετικών οργάνων μέτρησης, καθώς και τυχόν ελλείψεις ή ασυνέχειες στις καταγραφές. Για τον λόγο αυτόν πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ποιότητας και αξιολόγηση της πληρότητας των δεδομένων πριν από την επεξεργασία τους, με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης πιθανών σφαλμάτων.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονες γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις, σημαντικές υψομετρικές μεταβολές και εκτεταμένες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που συνδέονται με τη μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τη χωρική κατανομή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της βροχόπτωσης και της κυκλοφορίας του αέρα, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση τοπικών

μικροκλιματικών συνθηκών, οι οποίες δεν είναι πάντοτε δυνατόν να αποτυπωθούν πλήρως από το διαθέσιμο δίκτυο σταθμών παρατήρησης.

Τα δεδομένα χρήσεων γης του CORINE Land Cover, παρότι αποτελούν ένα ευρέως αποδεκτό εργαλείο χωρικής ανάλυσης σε ευρωπαϊκό επίπεδο, παρουσιάζουν περιορισμένη δυνατότητα αποτύπωσης μεταβολών μικρής κλίμακας και ταχέως εξελισσόμενων αλλαγών που σχετίζονται με τις εξορυκτικές δραστηριότητες και τα έργα αποκατάστασης. Κατά συνέπεια, οι σχετικές αναλύσεις αντανακλούν κυρίως τις γενικές τάσεις μεταβολής των χρήσεων γης και όχι λεπτομερείς τοπικές διαφοροποιήσεις.

Η αξιοποίηση ψηφιακών μοντέλων εδάφους και γεωχωρικών τεχνικών συνοδεύεται από αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη χωρική ανάλυση των δεδομένων και την ακρίβεια της μορφολογικής αποτύπωσης. Οι αβεβαιότητες αυτές ενδέχεται να επηρεάζουν σε περιορισμένο βαθμό την εκτίμηση τοπικών χαρακτηριστικών του αναγλύφου, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η έντονη εξορυκτική δραστηριότητα έχει επιφέρει σημαντικές μεταβολές στη μορφολογία του εδάφους.

Οι αναλύσεις συσχέτισης που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ ενεργειακών και μετεωρολογικών παραμέτρων επιτρέπουν την ανάδειξη πιθανών σχέσεων και τάσεων, χωρίς όμως να τεκμηριώνουν σχέση αιτίου και αποτελέσματος. Η συμπεριφορά των εξεταζόμενων μεταβλητών ενδέχεται να επηρεάζεται και από παράγοντες που δεν συμπεριλήφθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των συσχετίσεων θα πρέπει να αξιολογούνται στο πλαίσιο των περιορισμών της διαθέσιμης πληροφορίας.

Οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν δεν υποβαθμίζουν την αξιοπιστία της μελέτης, καθώς η αξιοποίηση πολλαπλών πηγών δεδομένων και η εφαρμογή διαφορετικών προσεγγίσεων ανάλυσης ενισχύουν τη δυνατότητα εξαγωγής τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις κλιματικές και περιβαλλοντικές μεταβολές που συνοδεύουν τη διαδικασία απολιγνιτοποίησης στη Δυτική Μακεδονία.

3.6 Προεπεξεργασία και έλεγχος ποιότητας δεδομένων

Η αξιοπιστία μιας κλιματικής, γεωγραφικής και ενεργειακής ανάλυσης εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα, τη συνέπεια και την κατάλληλη προετοιμασία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Για τον λόγο αυτόν, πριν από την εφαρμογή των μεθόδων χωρικής, στατιστικής και συγκριτικής ανάλυσης, πραγματοποιήθηκε μια σειρά

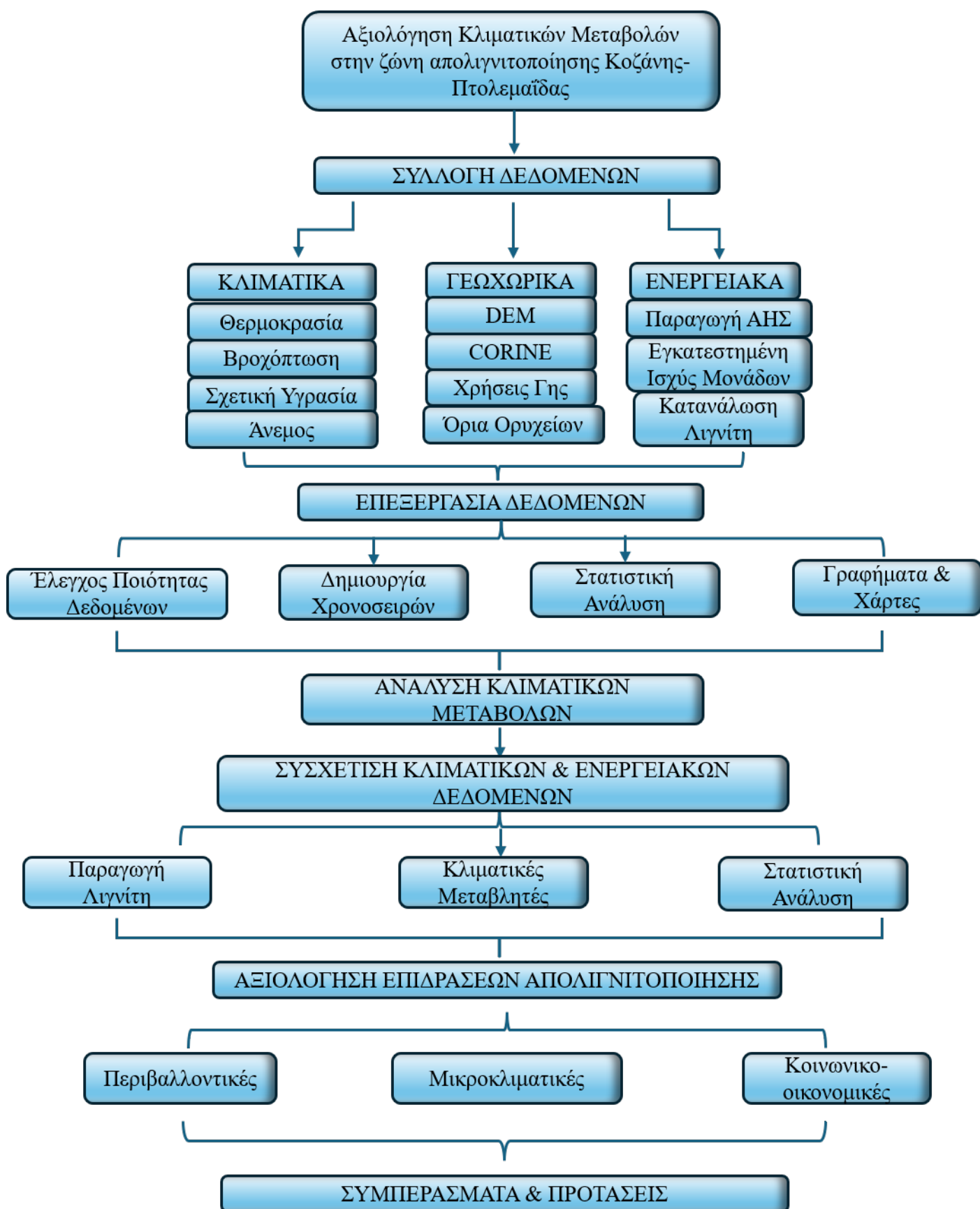
διαδικασιών ελέγχου, οργάνωσης και ομογενοποίησης των επιμέρους συνόλων δεδομένων, με στόχο τη δημιουργία ενός συνεκτικού και αξιόπιστου πλαισίου αναφοράς. Δεδομένου ότι τα στοιχεία προέρχονται από διαφορετικούς φορείς και καλύπτουν διαφορετικές χρονικές περιόδους, κρίθηκε απαραίτητη η εφαρμογή κοινών διαδικασιών επεξεργασίας, ώστε να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των μεταβλητών και η ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας εξετάστηκε η ποιότητα και η πληρότητα των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων, με στόχο τη διατήρηση της συνέπειας μεταξύ των επιμέρους χρονοσειρών. Η διαδικασία αυτή περιλάμβανε τον εντοπισμό πιθανών ελλείψεων, ασυνεχειών και ακραίων τιμών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αξιοπιστία της ανάλυσης. Ακολούθησε η οργάνωση των δεδομένων σε ενιαία μορφή επεξεργασίας, ώστε να καταστεί δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών σταθμών και χρονικών περιόδων. Ανάλογα με τη φύση κάθε μεταβλητής υπολογίστηκαν μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές, καθώς και αθροιστικά μεγέθη, ενώ δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικοί πίνακες που διευκόλυναν τη συστηματική σύγκριση των μετεωρολογικών παραμέτρων μεταξύ των σταθμών της περιοχής μελέτης. Μέσω της διαδικασίας αυτής κατέστη δυνατή η αποτύπωση των χωρικών διαφοροποιήσεων της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της σχετικής υγρασίας και των χαρακτηριστικών του ανέμου, καθώς και η διερεύνηση της επίδρασης παραγόντων όπως το υψόμετρο στις τοπικές κλιματικές συνθήκες.

Η επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε κοινό περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η χωρική συμβατότητα των διαθέσιμων πληροφοριών. Τα δεδομένα χρήσεων γης του CORINE Land Cover και τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους αξιοποιήθηκαν για την αποτύπωση της χωρικής οργάνωσης της περιοχής και την ερμηνεία των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται μεταξύ των επιμέρους θέσεων μέτρησης. Η συσχέτιση μορφολογικών χαρακτηριστικών, όπως το υψόμετρο και η χωρική διαφοροποίηση του αναγλύφου, με τις μετεωρολογικές μεταβλητές συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών. Τα δεδομένα κάλυψης και χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση των περιβαλλοντικών μεταβολών με τη μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα και τη σύγχρονη διαδικασία απολιγνιτοποίησης.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα δεδομένα ενεργειακής παραγωγής, τα οποία οργανώθηκαν σε ημερήσια βάση, ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες μετεωρολογικές παραμέτρους. Δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικοί πίνακες ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνιτικές μονάδες και φωτοβολταϊκούς σταθμούς, οι οποίοι συσχετίστηκαν με τις μέσες θερμοκρασιακές μεταβλητές που προέκυψαν από τους διαθέσιμους μετεωρολογικούς σταθμούς. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε τη διερεύνηση πιθανών σχέσεων μεταξύ ενεργειακής δραστηριότητας και κλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής, καθώς και την ανάδειξη τάσεων που σχετίζονται με τις σύγχρονες συνθήκες της ενεργειακής μετάβασης. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις χωρικές διαφοροποιήσεις των σταθμών, τη διαφορετική χρονική κάλυψη των επιμέρους πηγών και τους περιορισμούς που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Η διασύνδεση των επιμέρους σταδίων της μελέτης και η σταδιακή μετάβαση από τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων στην εφαρμογή των μεθόδων ανάλυσης διαμόρφωσαν το μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Η συνολική πορεία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (Σχήμα 3.4), όπου αποτυπώνονται τα βασικά στάδια της ερευνητικής διαδικασίας και η μεταξύ τους αλληλεξάρτηση.



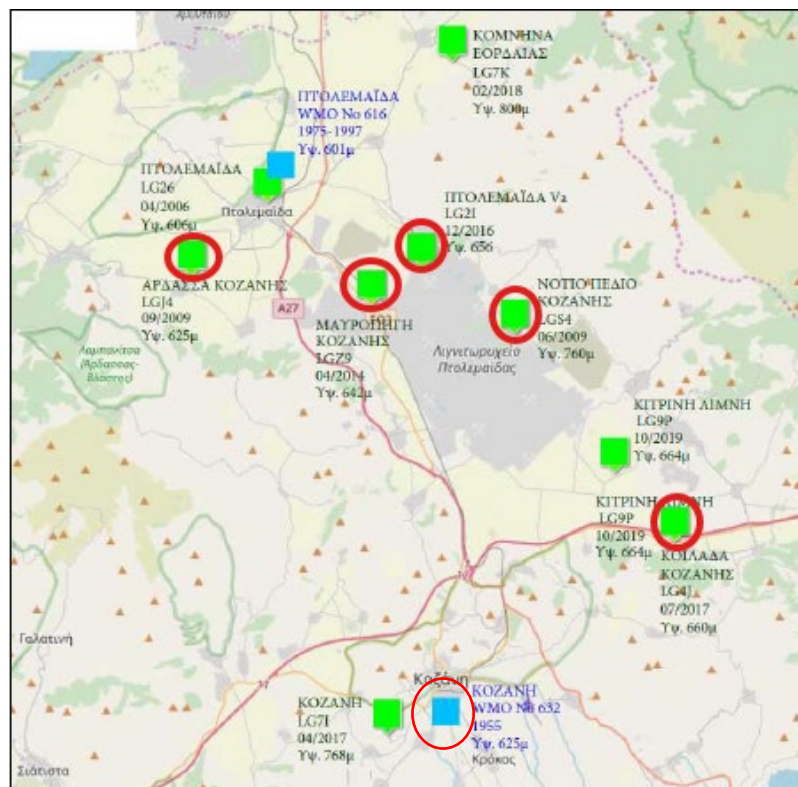
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής μεθοδολογικής προσέγγιση της έρευνας

4. Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1 Διαχρονικές τάσεις θερμοκρασίας, υετού και λοιπών παραμέτρων

4.1.1 Συγκριτική ανάλυση των μετεωρολογικών σταθμών

Για τη διερεύνηση των χωρικών διαφοροποιήσεων των κλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης αξιοποιήθηκαν δεδομένα από έξι μετεωρολογικούς σταθμούς. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα μακροχρόνια δεδομένα του σταθμού της ΕΜΥ στην Κοζάνη, καθώς και δεδομένα πέντε σταθμών του δικτύου του ΕΑΑ, οι οποίοι βρίσκονται εντός ή πλησίον της λιγνιτικής λεκάνης Κοζάνης-Πτολεμαΐδας. Η χωρική κατανομή των σταθμών και τα βασικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 και στον Πίνακα 4.1. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αρχικά τα μακροχρόνια κλιματικά χαρακτηριστικά του σταθμού της Κοζάνης, τα οποία αποτελούν σημείο αναφοράς για την ευρύτερη περιοχή, ενώ ακολούθως εξετάζονται οι διαφοροποιήσεις που καταγράφονται στους υπόλοιπους σταθμούς της λιγνιτικής λεκάνης.



Σχήμα 4.1: Χάρτης Μετεωρολογικών Σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (μπλε χρώμα) και του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (πράσινο χρώμα) της ευρύτερης περιοχής.

Πηγή δεδομένων: Ίδια επεξεργασία του συγγραφέα βάσει δεδομένων ΕΜΥ και Meteo.gr (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Ο παρακάτω Πίνακας 4.1 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των έξι μετεωρολογικών σταθμών.

Πίνακας 4.1: Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών Δικτύου Κοζάνης.

Πηγή: Meteo.gr (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Μετεωρολογικός Σταθμός (ΜΣ)	Υψόμετρο (m)	Περίοδος Δεδομένων
Κοζάνη	625	1955-2024
Αδρασσα	617	2010-2025
Μαυροπηγή	642	2014-2025
Πτολεμαΐδα Va	656	2016-2025
Κοιλάδα	660	2017-2025
Νότιο Πεδίο	760	2010-2025

4.1.2 Κλιματικά Δεδομένα της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης (Σταθμός Κοζάνης)

Η Π.Ε. Κοζάνης εντάσσεται κλιματικά στον ηπειρωτικό τύπο της Βόρειας Ελλάδας, παρουσιάζοντας έντονη εποχικότητα και σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ χειμερινής και θερινής περιόδου. Η γεωγραφική θέση της περιοχής στο εσωτερικό της Δυτικής Μακεδονίας, σε συνδυασμό με τη μορφολογία του εδάφους και την παρουσία ορεινών και ημιορεινών περιοχών, διαμορφώνουν ιδιαίτερες τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες. Το κλίμα χαρακτηρίζεται από ψυχρούς χειμώνες με συχνή εμφάνιση παγετού και χιονοπτώσεων, αλλά και από θερμά έως ιδιαίτερα θερμά καλοκαίρια με αυξημένη θερμική καταπόνηση ιδίως κατά τις περιόδους καύσωνα.

Η περιοχή της Κοζάνης παρουσιάζει αυξημένο ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος, χαρακτηριστικό των ηπειρωτικών κλιμάτων και ιδίως μεταξύ χειμερινών και θερινών θερμοκρασιών. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΜΥ για την περίοδο 1955–2024, η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται από περίπου 2,3°C τον Ιανουάριο έως 24,6°C τον Ιούλιο. Αντίστοιχα, οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες ανέρχονται στους 30,0°C κατά τον Ιούλιο και 29,9°C τον Αύγουστο, ενώ οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες κατά τη χειμερινή περίοδο διαμορφώνονται κάτω ή πολύ κοντά στο μηδέν, όπως αναλύονται και στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων 1955-2024 του Σταθμού Κοζάνης της ΕΜΥ.

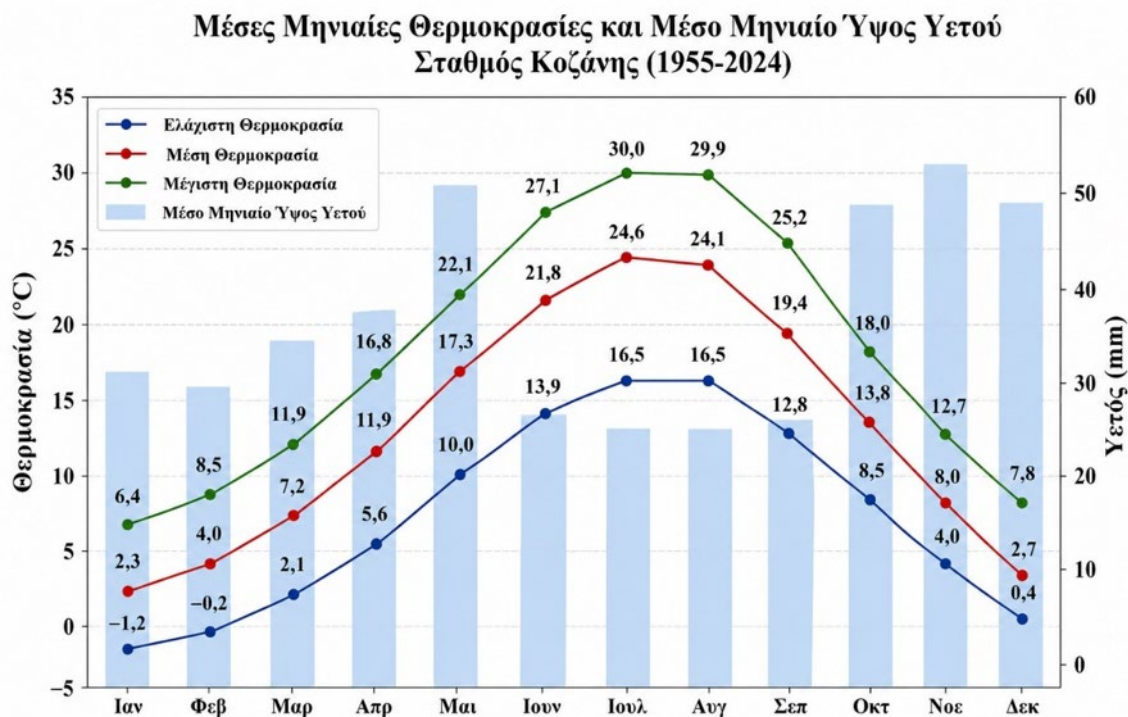
Πηγή: Ίδια επεξεργασία δεδομένων βάσει Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ).

	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μια.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία σε °C	-1,2	-0,2	2,1	5,6	10,0	13,9	16,5	16,5	12,8	8,5	4,0	0,4
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία σε °C	2,3	4,0	7,2	11,9	17,3	21,8	24,6	24,1	19,4	13,8	8,0	3,7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία σε °C	6,4	8,5	11,9	16,8	22,1	27,1	30,0	29,9	25,2	19,0	12,7	7,8
Μέσο Μηνιαίο Ύψος Υετού mm	35,6	34,8	40,1	41,9	51,7	34,6	31,2	28,9	33,8	49,5	52,6	49,4
Μέση Μηνιαία Σχετική Υγρασία %	74,1	69,7	65,6	62,0	61,2	53,7	47,7	48,9	56,9	66,7	74,8	76,0

Η θερμοκρασιακή αυτή κατανομή επιβεβαιώνει τον έντονα ηπειρωτικό χαρακτήρα της περιοχής και αναδεικνύει τη σημαντική εποχική διαφοροποίηση του τοπικού κλίματος. Η μεγάλη διάρκεια των ψυχρών περιόδων σχετίζεται άμεσα με την εγκλωβισμένη ψυχρή αέρια μάζα στις κλειστές λεκάνες της Δυτικής Μακεδονίας, καθώς και με τα συχνά φαινόμενα θερμοκρασιακής αναστροφής κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Κατά τους θερινούς μήνες, η περιορισμένη θαλάσσια επίδραση και η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία οδηγούν σε υψηλές θερμοκρασίες και σημαντική ημερήσια θερμοκρασιακή διακύμανση.

Το παρακάτω διάγραμμα της περιοχής αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους. Το μέσο ετήσιο ύψος υετού στην Κοζάνη ανέρχεται περίπου στα 484,1 mm, παρουσιάζοντας σχετικά ομοιόμορφη ετήσια κατανομή, με αυξημένες τιμές κατά τη μεταβατική και ψυχρή περίοδο του έτους. Οι μεγαλύτερες μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης εμφανίζονται τον Νοέμβριο (52,6 mm) και τον Μάιο (51,7 mm), ενώ οι χαμηλότερες καταγράφονται κατά τη θερινή

περίοδο, κυρίως τον Αύγουστο (28,9 mm) και τον Ιούλιο (31,2 mm), όπως αναμένεται για το κλίμα της περιοχής.



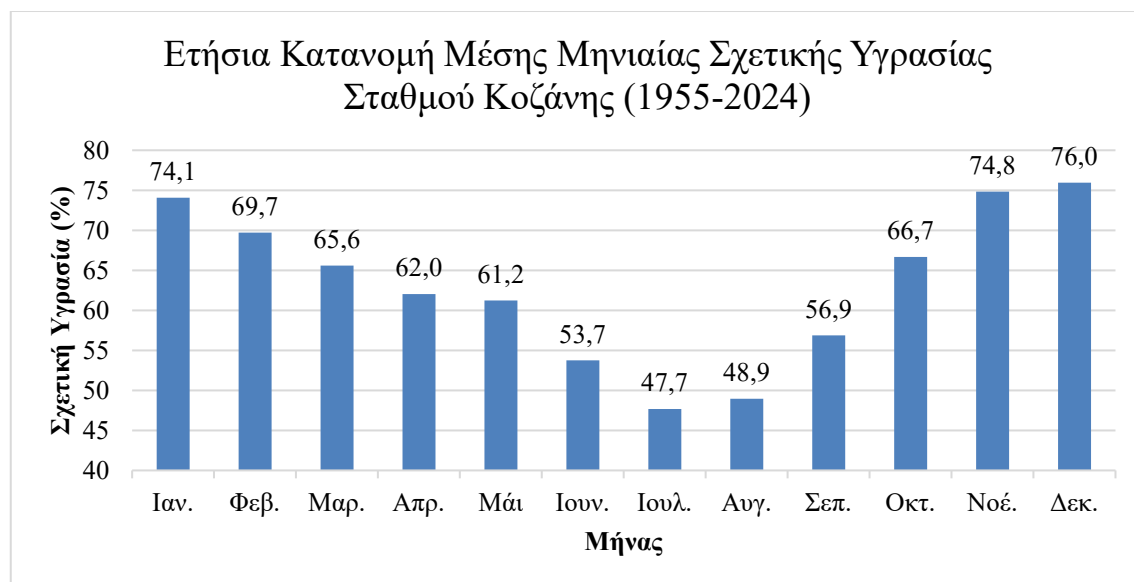
Σχήμα 4.2: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και μέσο μηνιαίο ύψος υετού στον σταθμό Κοζάνης (1955–2024).

Πηγή: Ιδία επεξεργασία δεδομένων βάσει EMY

Η εποχική αυτή διαφοροποίηση συνδέεται με τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Κατά τη χειμερινή περίοδο, η συχνότερη διέλευση βαρομετρικών χαμηλών και μετωπικών συστημάτων από την περιοχή Μεσογείου ενισχύει την εμφάνιση βροχοπτώσεων, ενώ κατά τη θερινή περίοδο επικρατούν πιο σταθερές και ξηρές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ωστόσο, η παρουσία ορεινών όγκων στην ευρύτερη περιοχή ευνοεί τοπικές θερμικές αστάθειες και καταιγίδες που εκδηλώνονται κυρίως την άνοιξη και τις αρχές του καλοκαιριού, εξηγώντας τις αυξημένες βροχοπτώσεις του Μαΐου, όπου είναι δυνατόν να καταγραφούν μεγάλα ύψη βροχής σε σύντομο χρονικό διάστημα λόγω της έντονης κατακόρυφης ανάπτυξης των καταιγίδων.

Η εποχική διακύμανση της σχετικής υγρασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3, όπου αποτυπώνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές για την περίοδο 1955-2024. Παρατηρείται

ότι οι υψηλότερες μέσες μηνιαίες τιμές σχετικής υγρασίας καταγράφονται κατά τη χειμερινή περίοδο, με μέγιστο ποσοστό περίπου 76% τον Δεκέμβριο, ενώ οι χαμηλότερες εμφανίζονται το καλοκαίρι, με ελάχιστη τιμή περίπου 47,7% τον Ιούλιο.



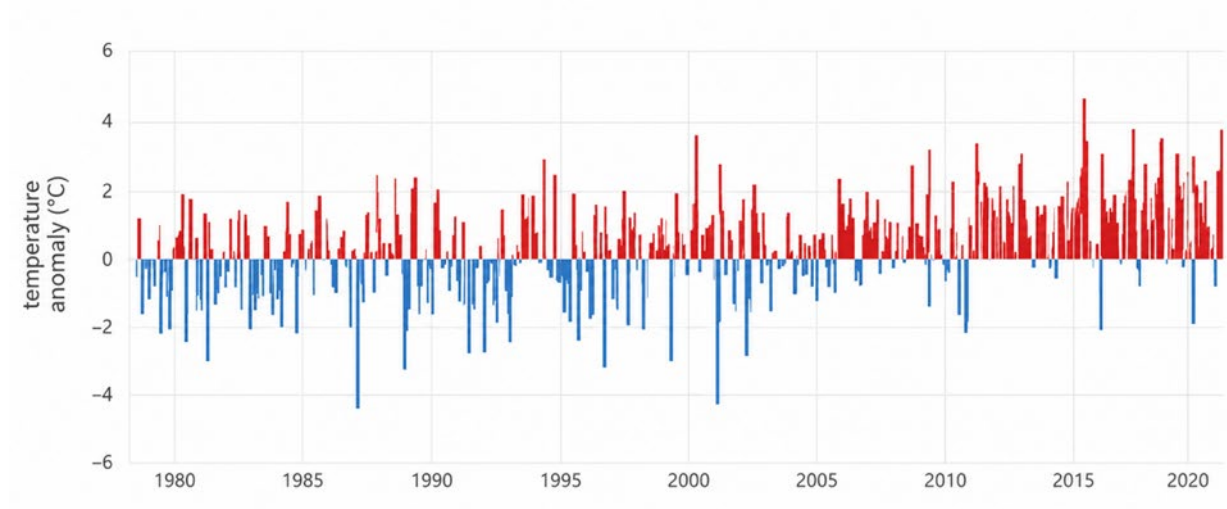
Σχήμα 4.3: Ετήσια κατανομή της σχετικής υγρασίας στον σταθμό της Κοζάνης.

Πηγή: Ιδία επεξεργασία δεδομένων βάσει EMY, 1955–2024

Η μείωση της σχετικής υγρασίας κατά τους θερμούς μήνες συνδέεται άμεσα με την αύξηση της θερμοκρασίας και την ικανότητα της ατμόσφαιρας να συγκρατεί υδατμούς, με αποτέλεσμα η κατανομή αυτή να παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση με τη θερμοκρασία. Οι συνθήκες αυτές οδηγούν σε εντονότερη ξηρότητα της ατμόσφαιρας και αυξημένο θερμικό φορτίο, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα. Επιπλέον, ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλής σχετικής υγρασίας αυξάνει την πιθανότητα εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών, ενισχύοντας τον κίνδυνο ξηρασίας και συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη μείωση των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων, με αποτέλεσμα σε μείωση της στάθμης των ταμιευτήρων με αντίκτυπο στη γεωργία και την κοινωνία ευρύτερα.

Η ανάλυση των μηνιαίων θερμοκρασιακών ανωμαλιών για την περίοδο 1979–2024 δείχνει σαφή και συνεχή τάση αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή της Κοζάνης σε σύγκριση με τη μέση τιμή της περιόδου αναφοράς 1980–2024 (Meteoblue, n.d.). Η αυξανόμενη συχνότητα εμφάνισης θετικών ανωμαλιών, ιδιαίτερα μετά το 2000,

υποδηλώνει επιτάχυνση της κλιματικής θέρμανσης. Με βάση την ερμηνεία των δεδομένων, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας εκτιμάται ότι κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,3 και 0,4°C ανά δεκαετία, μέγεθος το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με τις τάσεις θέρμανσης που καταγράφονται ευρύτερα στη Μεσόγειο και τη Νότια Ευρώπη (IPCC, 2021). Οι μεγαλύτερες θερμές ανωμαλίες καταγράφονται με ακόμη μεγαλύτερη ένταση μετά το 2000, ενώ οι ψυχρές ανωμαλίες εμφανίζονται κυρίως σε παλαιότερες περιόδους, ένδειξη που υποδηλώνει μείωση της έντασης και της συχνότητάς τους (Meteoblue, n.d.).



Σχήμα 4.4: Μηνιαίες ανωμαλίες θερμοκρασίας στην Κοζάνη από το 1979 έως το 2024.

Πηγή: Meteoblue (n.d)

Η άνοδος της θερμοκρασίας μεταβάλλει το εποχικό πρότυπο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας τις ανάγκες ψύξης κατά τη θερινή περίοδο και περιορίζοντας αντίστοιχα τη ζήτηση για θέρμανση τους χειμερινούς μήνες. Οι ίδιες μεταβολές επηρεάζουν και τη λειτουργία των ΑΠΕ, καθώς η αυξημένη ηλιοφάνεια ευνοεί την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα, ενώ οι ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν να περιορίσουν την απόδοσή τους. Ταυτόχρονα, η αυξημένη μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων, με πιθανές συνέπειες στην ενεργειακή αξιοποίησή τους (EEA, 2022; IPCC, 2023).

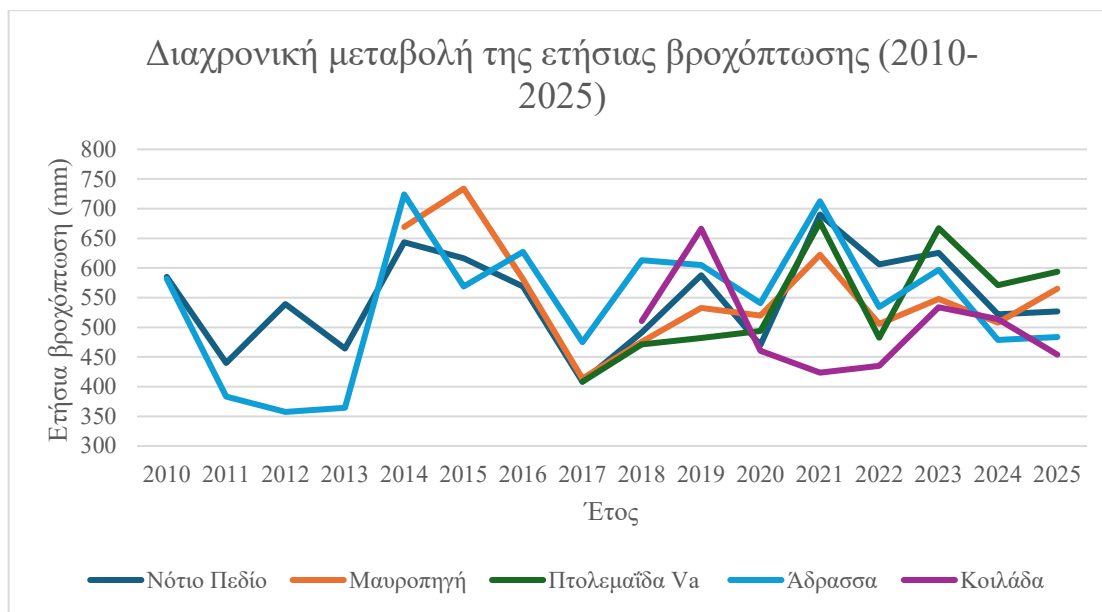
Η περιοχή της Κοζάνης παρουσιάζει σαφείς ενδείξεις κλιματικής μεταβολής, με κυρίαρχα χαρακτηριστικά την άνοδο της θερμοκρασίας και την ενίσχυση της

υδρολογικής μεταβλητότητας. Οι τάσεις αυτές συνάδουν με τα συμπεράσματα των πλέον πρόσφατων αξιολογήσεων της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή, σύμφωνα με τις οποίες η λεκάνη της Μεσογείου συγκαταλέγεται μεταξύ των πλέον ευάλωτων περιοχών στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2023). Η διαπίστωση αυτή αναδεικνύει την ανάγκη ενσωμάτωσης των κλιματικών παραμέτρων στον ενεργειακό σχεδιασμό, ιδιαίτερα σε περιοχές που βρίσκονται σε φάση ενεργειακής μετάβασης, όπως η Δυτική Μακεδονία.

Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μακροχρόνια ανάλυση του σταθμού της Κοζάνης, κρίνεται σκόπιμη η εξέταση των επιμέρους χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής μέσω δεδομένων από πέντε πρόσθετους μετεωρολογικούς σταθμούς του δικτύου του ΕΑΑ, οι οποίοι βρίσκονται πλησίον και εντός της ζώνης απολιγνιτοποίησης της Δυτικής Μακεδονίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτύπωση της χωρικής μεταβλητότητας των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων και την ανάδειξη πιθανών διαφοροποιήσεων που συνδέονται με το υψόμετρο, τη γεωγραφική θέση και τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες του κάθε σταθμού. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον χάρτη και στον πίνακα που ακολουθούν, ενώ στη συνέχεια εξετάζονται διαδοχικά οι μεταβολές της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και του ανέμου.

4.1.2.1 Βροχόπτωση

Για την αξιολόγηση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των ετήσιων αθροισμάτων βροχόπτωσης σε πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς του δικτύου του ΕΑΑ. Η σύγκριση επιτρέπει την αποτύπωση πιθανών διαφοροποιήσεων μεταξύ των επιμέρους περιοχών της λιγνιτικής λεκάνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας και την ανάδειξη κοινών υδρομετεωρολογικών τάσεων.



Σχήμα 4.5: Διαχρονική μεταβολή της ετήσιας βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, της Πτολεμαΐδας Va, της Άδρασσας και της Κοιλάδας για την περίοδο 2010–2025.

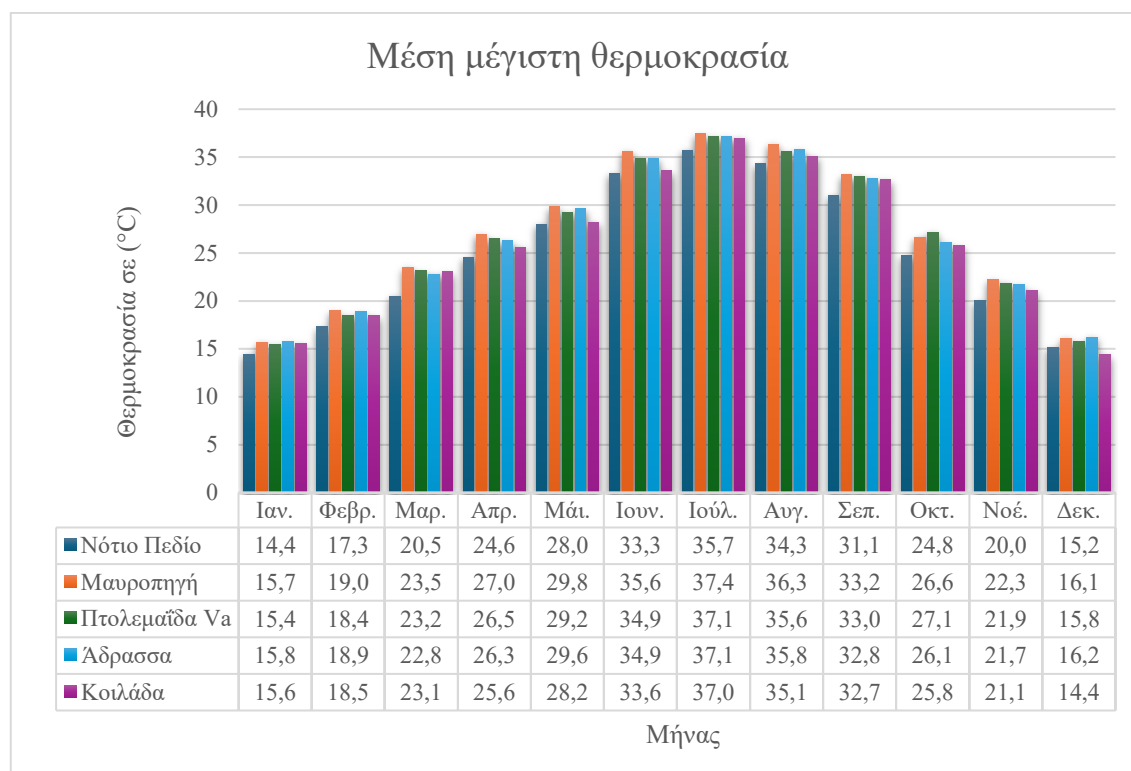
Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

Από το Σχήμα 4.5 προκύπτει ότι οι πέντε μετεωρολογικοί σταθμοί παρουσιάζουν παρόμοια διαχρονική συμπεριφορά ως προς την ετήσια βροχόπτωση, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μεταβολές των υετικών συνθηκών επηρεάζουν συνολικά την ευρύτερη περιοχή μελέτης. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται κυρίως κατά τα έτη 2014–2015 και 2021, ενώ μειωμένες βροχοπτώσεις παρατηρούνται το 2017 και σε ορισμένους σταθμούς κατά την περίοδο 2020–2022. Επισημαίνεται ότι η απότομη πτώση που εμφανίζεται στο σταθμό της Κοιλάδας οφείλεται σε απώλεια δεδομένων και δεν αντανακλά απαραίτητα πραγματική μεταβολή των υετικών συνθηκών.

Παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις στο ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης, δεν διακρίνεται σαφής μακροχρόνια αυξητική ή μειωτική τάση κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Η γενική ομοιότητα των χρονοσειρών μας δείχνει ότι οι σταθμοί επηρεάζονται από κοινές περιφερειακές κλιματικές συνθήκες, ενώ οι επιμέρους διαφοροποιήσεις μπορούν να αποδοθούν σε τοπικούς παράγοντες, όπως το υψόμετρο, η τοπογραφία και τα ιδιαίτερα μικροκλιματικά χαρακτηριστικά κάθε θέσης.

4.1.2.2 Μέση μέγιστη θερμοκρασία

Για την αξιολόγηση της χωρικής μεταβλητότητας της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των μέσων μέγιστων μηνιαίων θερμοκρασιών στους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση των χωρικών διαφοροποιήσεων του τοπικού κλίματος και την ανάδειξη πιθανών επιδράσεων του υψομέτρου, της μορφολογίας του εδάφους και των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών.



Σχήμα 4.6: Μέσες μέγιστες μηνιαίες θερμοκρασίες στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, της Πτολεμαΐδας Va, της Άδρασας και της Κοιλάδας.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ). Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

Από το Σχήμα 4.6 παρατηρείται ότι οι πέντε μετεωρολογικοί σταθμοί παρουσιάζουν παρόμοια ετήσια θερμοκρασιακή κατανομή, με τις μέγιστες θερμοκρασίες να καταγράφονται κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος–Αύγουστος) και τις χαμηλότερες κατά τη χειμερινή περίοδο (Δεκέμβριος–Φεβρουάριος). Οι υψηλότερες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται τον Ιούλιο, όπου οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ περίπου

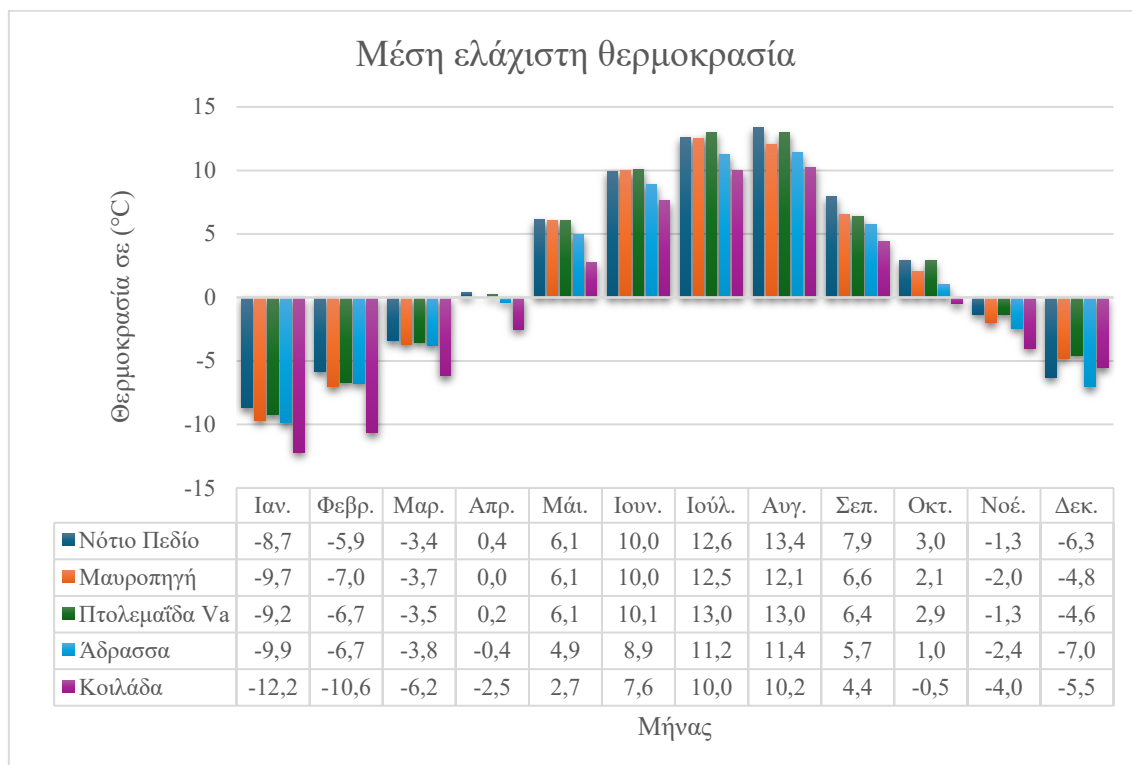
35,7°C και 37,4°C, ενώ οι χαμηλότερες καταγράφονται τον Ιανουάριο με τιμές μεταξύ 14,4°C και 15,8°C.

Παρά τη γενική ομοιομορφία των θερμοκρασιακών καμπυλών, παρατηρούνται μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών. Ο σταθμός της Μαυροπηγής εμφανίζει τις υψηλότερες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες κατά τη θερινή περίοδο, ενώ το Νότιο Πεδίο παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές σε αρκετούς μήνες του έτους.

Η σύγκριση των πέντε μετεωρολογικών σταθμών δείχνει ότι η ετήσια πορεία της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας είναι παρόμοια σε όλη την περιοχή μελέτης. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται είναι περιορισμένες και σχετίζονται κυρίως με το υψόμετρο, τη γεωμορφολογία και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μικροκλίματος κάθε περιοχής

4.1.2.3 Μέση ελάχιστη θερμοκρασία

Η ανάλυση των ελάχιστων θερμοκρασιών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αποτυπώνει τις συνθήκες ψύχους, τη συχνότητα εμφάνισης παγετού και τις επιδράσεις των τοπικών μικροκλιματικών χαρακτηριστικών στο θερμοκρασιακό καθεστώς της περιοχής.



Σχήμα 4.7: Μέσες ελάχιστες μηνιαίες θερμοκρασίες στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, της Πτολεμαΐδας Va, της Άδρασσας και της Κοιλιάδας

Η ανάλυση των μέσων ελάχιστων μηνιαίων θερμοκρασιών αποτυπώνει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των μετεωρολογικών σταθμών, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο. Οι χαμηλότερες τιμές καταγράφονται στους μήνες Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο, ενώ η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας από την άνοιξη προς το καλοκαίρι ακολουθεί παρόμοια πορεία σε όλους τους σταθμούς.

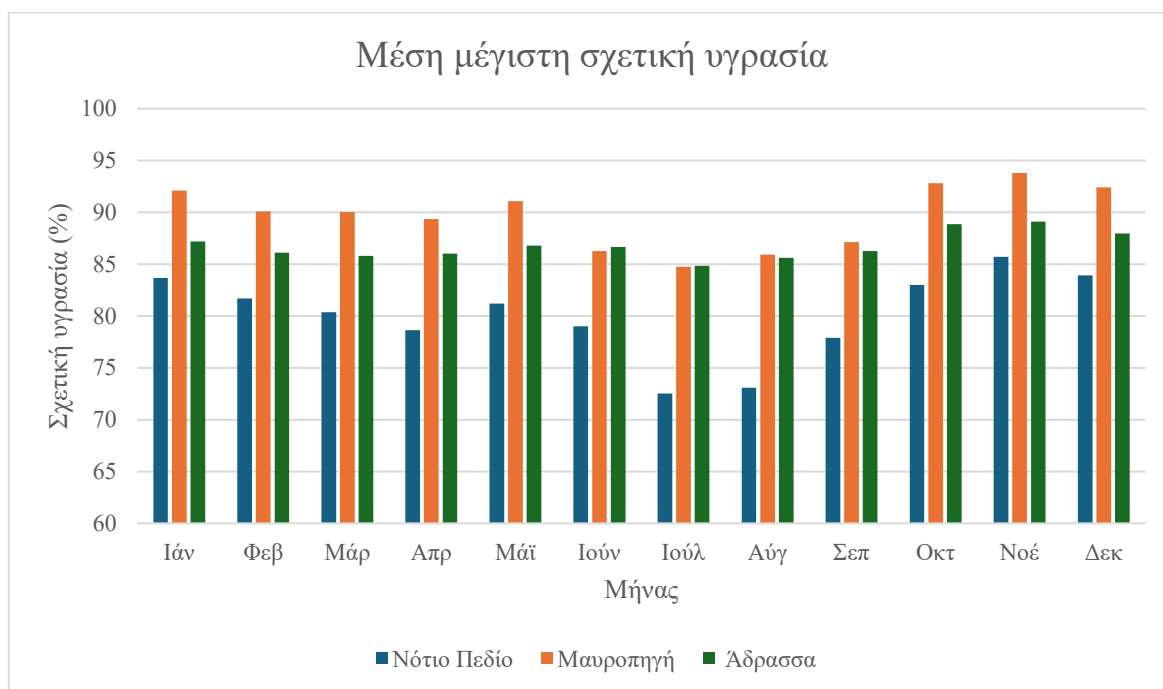
Αξιοσημείωτο είναι ότι ο σταθμός της Κοιλιάδας, ο οποίος εμφανίζει συστηματικά χαμηλότερες ελάχιστες θερμοκρασίες σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ενδεικτικά, κατά τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες διαμορφώνονται στους $-12,2^{\circ}\text{C}$ και $-10,6^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα, τιμές σημαντικά χαμηλότερες από αυτές που καταγράφονται στις υπόλοιπες θέσεις μέτρησης. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει αυξημένη συχνότητα εμφάνισης συνθηκών παγετού και πιθανώς εντονότερη εκδήλωση θερμοκρασιακών αναστροφών κατά τις νυχτερινές ώρες.

Αντίθετα, οι σταθμοί του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής και της Πτολεμαΐδας να παρουσιάζουν ηπιότερες ελάχιστες θερμοκρασίες, πιθανότατα λόγω του αναγλύφου της περιοχής και της διαφορετικής κυκλοφορίας των αέριων μαζών. Παρά τις επιμέρους διαφοροποιήσεις, όλοι οι σταθμοί ακολουθούν κοινό ετήσιο θερμοκρασιακό κύκλο, με μέγιστες ελάχιστες τιμές κατά τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη χωρική μεταβλητότητα ως προς τις ελάχιστες θερμοκρασίες, στοιχείο που αντανακλά την επίδραση του τοπικού αναγλύφου και των μικροκλιματικών συνθηκών στη διαμόρφωση του θερμικού καθεστώτος της λεκάνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

4.1.2.4 Μέση μέγιστη σχετική υγρασία (RH)

Εκτός από τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση, σημαντική παράμετρο για την περιγραφή των μικροκλιματικών συνθηκών της περιοχής αποτελεί η σχετική υγρασία. Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκε η μέση μέγιστη μηνιαία σχετική υγρασία στους μετεωρολογικούς σταθμούς Νοτίου Πεδίου, Μαυροπηγής και Άδρασας, προκειμένου να αξιολογηθούν οι χωρικές και εποχικές μεταβολές της συγκεκριμένης παραμέτρου. Σημειώνεται ότι, οι μετεωρολογικοί σταθμοί Πτολεμαΐδας Na και Κοιλιάδας δεν παρέχουν τα δεδομένα μέτρησης σχετικής υγρασίας και για το λόγο αυτό δεν υπάρχουν στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.8: Μέση μέγιστη μηνιαία σχετική υγρασία στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, και της Άδρασας

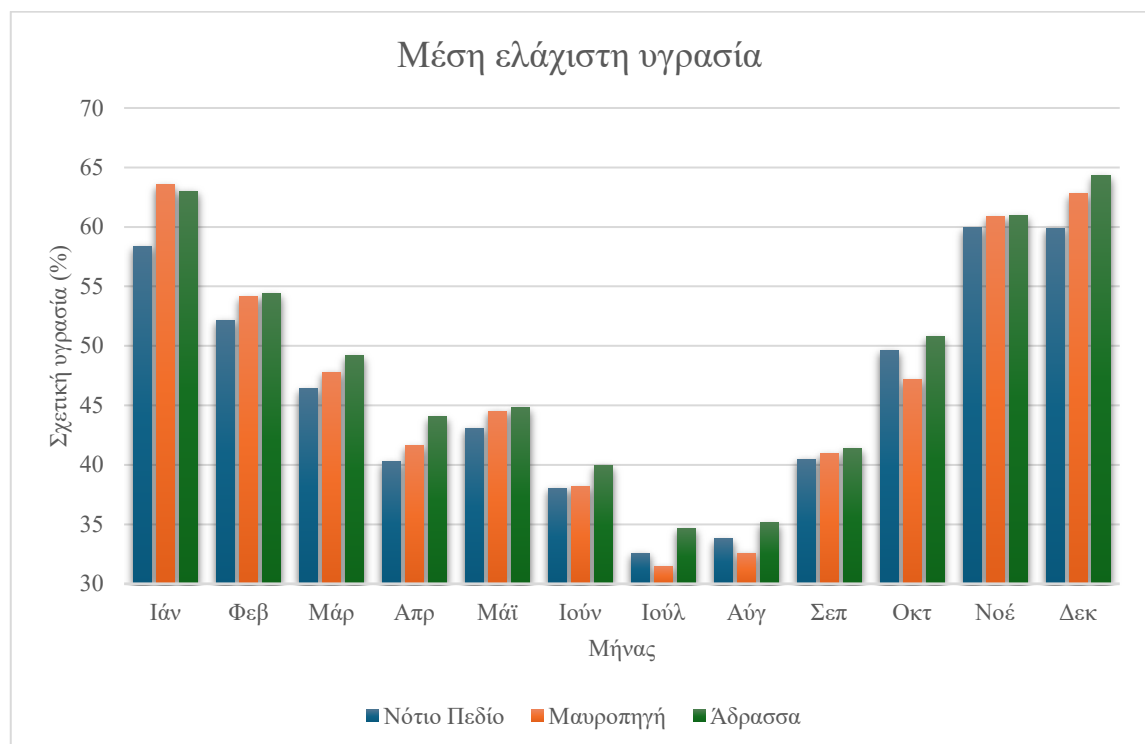
Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ). Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

Η σύγκριση της μέσης μέγιστης σχετικής υγρασίας μεταξύ των τριών μετεωρολογικών σταθμών δείχνει παρόμοια ετήσια συμπεριφορά, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται κατά την ψυχρή περίοδο του έτους και τις χαμηλότερες κατά τους θερινούς μήνες. Η Μαυροπηγή καταγράφει σταθερά τις υψηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας, ενώ το Νότιο Πεδίο εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές σχεδόν σε όλους τους μήνες της περιόδου αναφοράς.

Η εποχική διακύμανση είναι εμφανής, καθώς από τον Οκτώβριο έως τον Φεβρουάριο η σχετική υγρασία αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που συνδέεται με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες και τη συχνότερη παρουσία νεφοκάλυψης και υετικών φαινομένων. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται μείωση των τιμών λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της εντονότερης εξάτμισης. Οι περιορισμένες αποκλίσεις μεταξύ των σταθμών υποδηλώνουν ότι η σχετική υγρασία επηρεάζεται κυρίως από τις ευρύτερες κλιματικές συνθήκες της λεκάνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας, ενώ οι τοπικές μικροκλιματικές διαφοροποιήσεις εμφανίζονται σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και η βροχόπτωση.

4.1.2.5 Μέση ελάχιστη σχετική υγρασία (RH)

Στο παρακάτω σχήμα εξετάστηκε και η διακύμανση της μέσης ελάχιστης σχετικής υγρασίας στους μετεωρολογικούς σταθμούς Νοτίου Πεδίου, Μαυροπηγής και Άδρασσα. Η παράμετρος αυτή αποτυπώνει τις ξηρότερες ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια του έτους και ενισχύει την κατανόηση των τοπικών μικροκλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4.9: Μέση ελάχιστη μηνιαία σχετική υγρασία στους μετεωρολογικούς σταθμούς του Νοτίου Πεδίου, της Μαυροπηγής, και της Άδρασσας.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ). Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

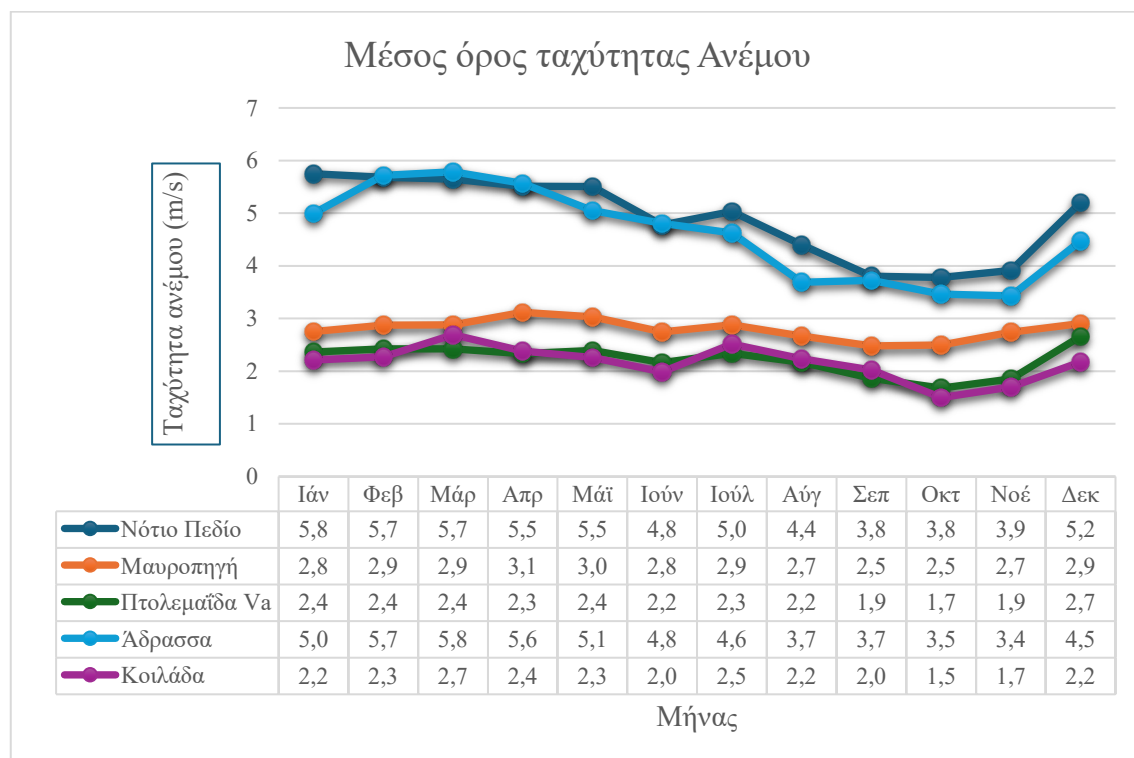
Η ανάλυση της μέσης ελάχιστης σχετικής υγρασίας καταδεικνύει σαφή εποχική μεταβολή και στους τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται κατά τη χειμερινή περίοδο, κυρίως από τον Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο, ενώ οι χαμηλότερες εμφανίζονται κατά τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, όπως αναμένεται καθώς οι θερινοί μήνες αποτελούν την ξηρότερη περίοδο του έτους. Το πρότυπο αυτό αντανακλά την επίδραση της εποχικής μεταβολής της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας στη διαθέσιμη υγρασία της ατμόσφαιρας.

Οι τρεις σταθμοί παρουσιάζουν παρόμοια ετήσια συμπεριφορά, υποδηλώνοντας ότι επηρεάζονται από κοινές κλιματικές συνθήκες σε περιφερειακή κλίμακα. Ωστόσο, ο σταθμός της Άδρασσας εμφανίζει συστηματικά ελαφρώς υψηλότερες τιμές ελάχιστης σχετικής υγρασίας σε αρκετούς μήνες του έτους, ενώ το Νότιο Πεδίο καταγράφει τις χαμηλότερες τιμές κατά τη θερινή περίοδο.

Επομένως, οι διαφορές μεταξύ των σταθμών παραμένουν περιορισμένες, ένδειξη ότι επικρατούν σχετικά ομοιογενείς συνθήκες υγρασίας στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης Κοζάνης-Πτολεμαΐδας, παρά τις επιμέρους τοπικές διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με το ανάγλυφο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε θέσης μέτρησης.

4.1.2.6 Μέσος όρος ταχύτητας ανέμου (m/s)

Ο άνεμος συγκαταλέγεται στις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους, καθώς επηρεάζει τη διασπορά αέριων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων, τη θερμική άνεση και τη διαμόρφωση των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκε η μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου στους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης, προκειμένου να αναδειχθούν πιθανές χωρικές διαφοροποιήσεις και να αξιολογηθεί η επίδραση της γεωμορφολογίας στην κυκλοφορία των αέριων μαζών.



Σχήμα 4.10: Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s) στους μετεωρολογικούς σταθμούς Νοτίου Πεδίου, Μαυροπηγής, Πτολεμαΐδας Va, Άδρασσας και Κοιλάδας.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ). Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

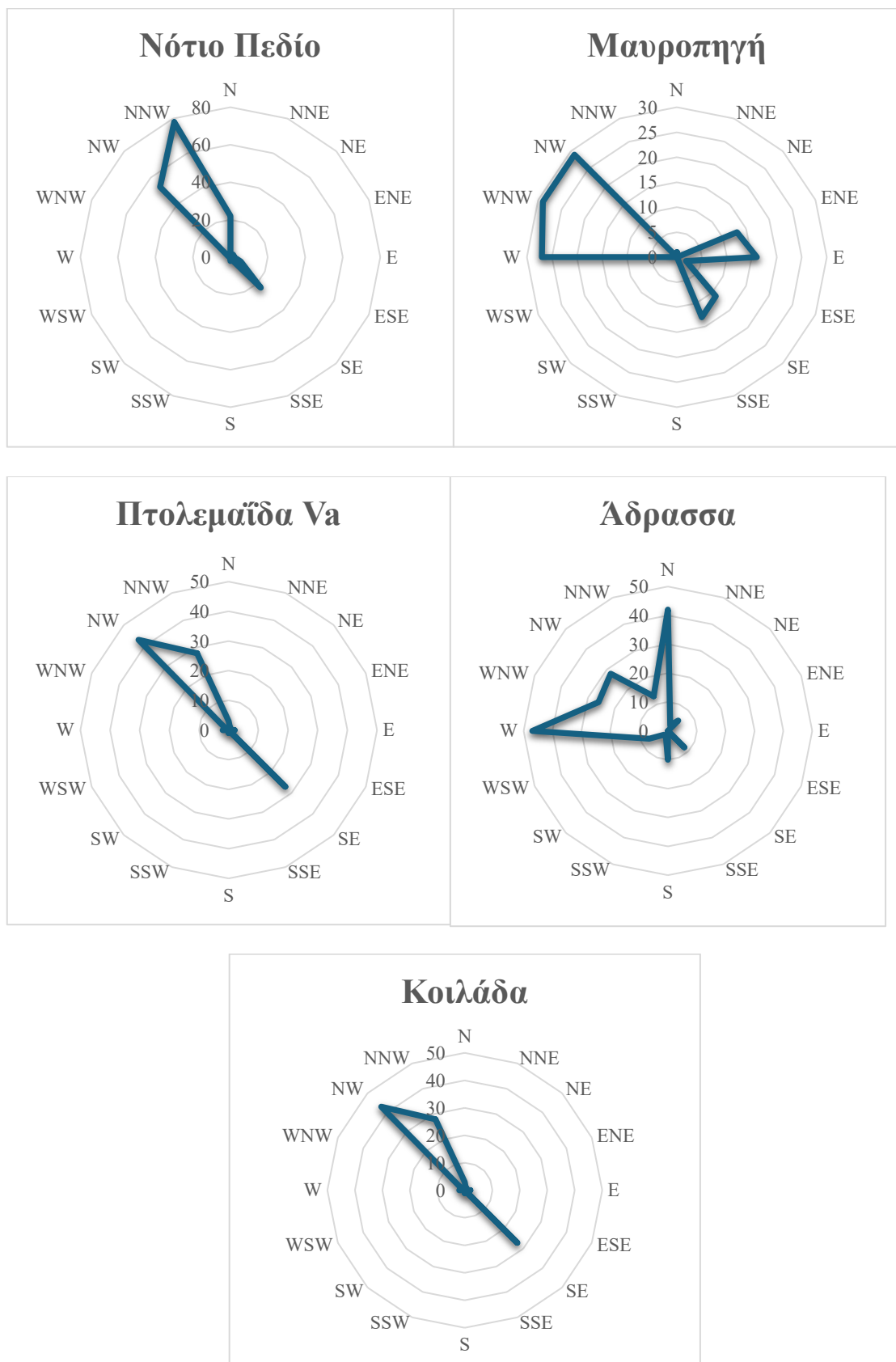
Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.10, η μέση ταχύτητα ανέμου εμφανίζει αξιοσημείωτες χωρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των εξεταζόμενων σταθμών. Οι υψηλότερες τιμές καταγράφονται στο Νότιο Πεδίο και στην Άδρασσα, με μέσους ετήσιους όρους 4,92 m/s και 4,61 m/s αντίστοιχα, ενώ οι χαμηλότερες παρατηρούνται στην Πτολεμαΐδα Va (2,23 m/s) και στην Κοιλιάδα (2,17 m/s). Η Μαυροπηγή καταλαμβάνει ενδιάμεση θέση με μέση ετήσια ταχύτητα 2,80 m/s.

Η διαφοροποίηση αυτή πιθανότητα σχετίζεται με τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Το Νότιο Πεδίο και η Άδρασσα βρίσκονται σε περισσότερο ανοικτές εκτάσεις, όπου η κίνηση των αέριων μαζών πραγματοποιείται με λιγότερα φυσικά εμπόδια, επιτρέποντας την ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων ανέμου. Αντίθετα, οι σταθμοί της Κοιλιάδας, της Πτολεμαΐδας Va και της Μαυροπηγής επηρεάζονται περισσότερο από το τοπικό ανάγλυφο και τις συνθήκες επιφανειακής τραχύτητας, με αποτέλεσμα να ευνοείται η μείωση της έντασης του ανέμου.

Παράλληλα, παρατηρείται εποχική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, με σχετικά υψηλότερες τιμές κατά τη χειμερινή και εαρινή περίοδο και μικρότερες κατά το φθινόπωρο. Η κατανομή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς και διασποράς σκόνης και ατμοσφαιρικών ρύπων στην ευρύτερη λιγνιτική ζώνη της Πτολεμαΐδας, καθώς και για την ερμηνεία των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών που διαμορφώνονται εντός της λεκάνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

4.1.2.7 Κατανομή διευθύνσεων ανέμων

Η κατανομή των επικρατουσών διευθύνσεων ανέμου θεωρείται σημαντική παράμετρο για την κατανόηση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και των μικροκλιματικών συνθηκών της περιοχής μελέτης. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν αραχνοειδή διαγράμματα, μέσω των οποίων αποτυπώνεται η σχετική συχνότητα εμφάνισης των επιμέρους διευθύνσεων ανέμου στους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς κατά την περίοδο λειτουργίας τους. Η διεύθυνση του ανέμου επηρεάζει τη μεταφορά σκόνης και αέριων ρύπων, τη χωρική κατανομή της θερμοκρασίας και, γενικότερα, τις τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες.



Σχήμα 4.11: Κατανομή των επικρατουσών διευθύνσεων ανέμου στους μετεωρολογικούς σταθμούς της μελέτης.

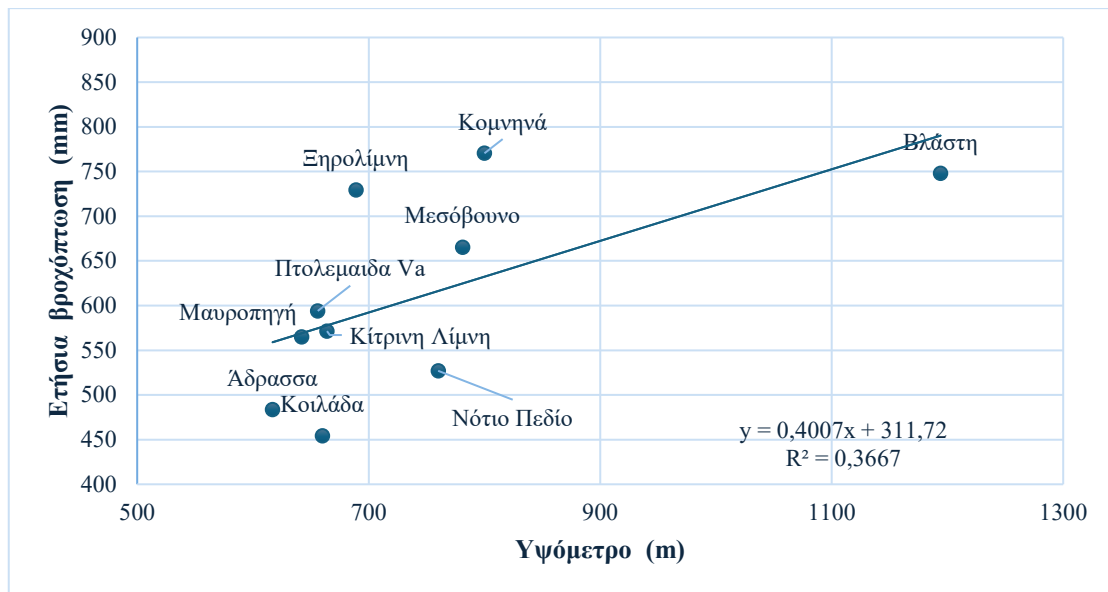
Τα αραχνοειδή διαγράμματα του Σχήματος 4.11 δείχνουν ότι στην ευρύτερη περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας επικρατούν κυρίως άνεμοι βορειοδυτικής έως δυτικής διεύθυνσης, εύρημα που συμφωνεί με τη γενικότερη ατμοσφαιρική κυκλοφορία της Δυτικής Μακεδονίας. Παρά τη σαφή αυτή τάση, διακρίνονται διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών ως προς τη συχνότητα εμφάνισης και τις δευτερεύουσες επικρατούσες διευθύνσεις, υποδηλώνοντας την επίδραση τοπικών παραγόντων στη διαμόρφωση του ανεμολογικού πεδίου.

Οι διαφοροποιήσεις αυτές σχετίζονται με το ανάγλυφο, τις υψομετρικές μεταβολές, τον προσανατολισμό των λεκανών και των κοιλάδων, καθώς και με την παρουσία των εκτεταμένων λιγνιτικών ορυχείων και των αποθέσεων στείρων υλικών, τα οποία δύνανται να επηρεάσουν τη ροή του αέρα σε τοπική κλίμακα. Επιπροσθέτως, η διαφορετική θέση των μετεωρολογικών σταθμών σε σχέση με τις εξορυκτικές δραστηριότητες και τα μορφολογικά εμπόδια επηρεάζει τη διαμόρφωση ιδιαίτερων ανεμολογικών χαρακτηριστικών σε κάθε θέση μέτρησης.

Παρότι διαπιστώνεται η παρουσία ενός κοινού κυρίαρχου βορειοδυτικού ρεύματος, η περιοχή δεν εμφανίζει ομοιογενή ανεμολογική συμπεριφορά. Αντίθετα, η χωρική διαφοροποίηση που παρατηρείται μεταξύ των σταθμών αναδεικνύει την πολυπλοκότητα του μικροκλίματος της λιγνιτικής ζώνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

4.2 Χωρικές διαφοροποιήσεις μικροκλιματικών μεταβολών

4.2.1 Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης ετήσιας βροχόπτωσης



Σχήμα 4.12: Συσχέτιση υψόμετρου και συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για το έτος 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Το Σχήμα 4.12 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ του υψόμετρου και της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για το έτος 2025, όπως αυτή προέκυψε από τα δεδομένα δέκα μετεωρολογικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν οι σταθμοί Νότιο Πεδίο, Μαυροπηγή, Πτολεμαΐδα VA, Άδρασσα, Κουιάδα, Κίτρινη Λίμνη, Ξηρολίμνη, Μεσόβουνο, Κομνηνά και Βλάστη από το δίκτυο του meteo.gr, οι οποίοι καλύπτουν ευρύ υψομετρικό εύρος και αποτυπώνουν τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των χαμηλότερων και των περισσότερο ορεινών περιοχών.

Η γραμμική παλινδρόμηση απέδωσε την εξίσωση $y = 0,4007x + 311,72$, ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίστηκε σε $R^2 = 0,3667$. Η θετική κλίση της ευθείας τάσης υποδηλώνει ότι η βροχόπτωση τείνει γενικά να αυξάνεται με το υψόμετρο. Σύμφωνα με το προσαρμοσμένο μοντέλο, αύξηση του υψόμετρου κατά 100 m αντιστοιχεί θεωρητικά σε αύξηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κατά περίπου 40 mm.

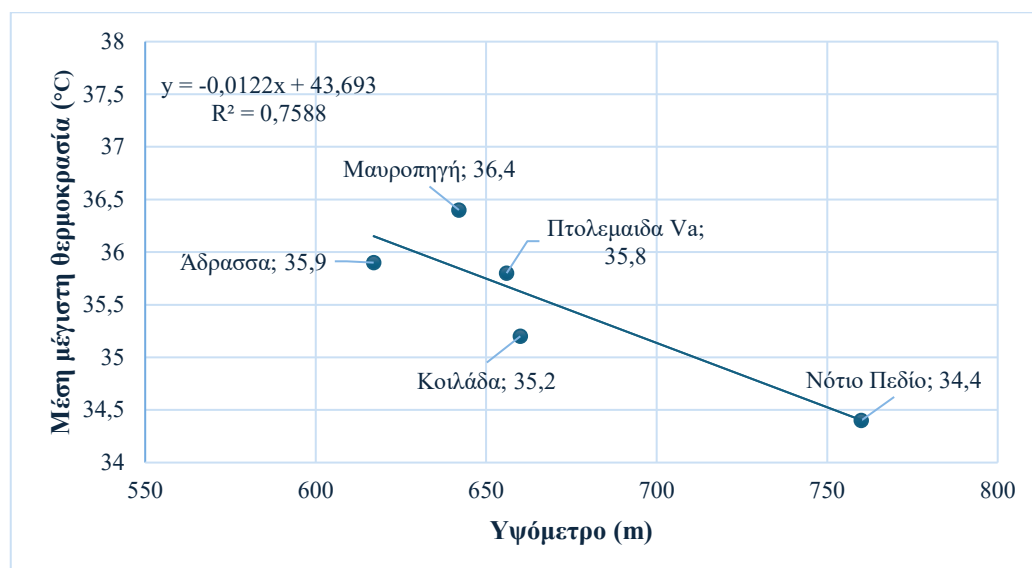
Ωστόσο, η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού δείχνει ότι το υψόμετρο εξηγεί περίπου το 36,7 % της συνολικής διακύμανσης των βροχομετρικών τιμών. Επομένως, παρότι η υψομετρική επίδραση είναι εμφανής, η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης δεν καθορίζεται αποκλειστικά από το υψόμετρο. Σημαντικό ρόλο φαίνεται να διαδραματίζουν και άλλοι παράγοντες, όπως η μορφολογία του αναγλύφου, η έκθεση των

σταθμών, η τοπογραφική διάταξη, καθώς και οι τοπικές μικροκλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε θέση.

Η συμπεριφορά αυτή γίνεται εμφανής και από την κατανομή των επιμέρους σημείων του διαγράμματος. Σταθμοί με παρόμοιο υψόμετρο εμφανίζουν διαφορετικά ετήσια ύψη βροχής, αναδεικνύοντας την επίδραση τοπικών παραγόντων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι σταθμοί Κοιλάδας και Άδρασσας, οι οποίοι καταγράφουν χαμηλότερες βροχομετρικές τιμές σε σχέση με άλλους σταθμούς αντίστοιχου υψόμετρου. Αντίθετα, οι σταθμοί Κομνηνά, Εξοχή και Βλάστη παρουσιάζουν αυξημένες τιμές, οι οποίες ενδέχεται να συνδέονται με την ορογραφική ενίσχυση των κατακρημνισμάτων και με ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων περιοχών.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υψόμετρο χαρακτηρίζεται ως ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης στη Δυτική Μακεδονία, χωρίς όμως να καθορίζει αποκλειστικά τη διακύμανσή της. Η εικόνα που προκύπτει αντανακλά τον σύνθετο χαρακτήρα των μικροκλιματικών διεργασιών της περιοχής και επιβεβαιώνει ότι η ερμηνεία των βροχομετρικών μεταβολών απαιτεί τη συνεκτίμηση τόσο των υψομετρικών όσο και των τοπικών γεωμορφολογικών παραμέτρων.

4.2.2 Συσχέτιση υψόμετρου και μέγιστης θερμοκρασίας



Σχήμα 4.13: Συσχέτιση υψόμετρου και μέσης μέγιστης θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Αύγουστος). Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία. συγγραφέα

Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ υψομέτρου και μέσης μέγιστης θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος–Αύγουστος) πραγματοποιήθηκε για τους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται τόσο τα υψόμετρα των σταθμών όσο και η περίοδος διαθεσιμότητας των κλιματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση. Η επιλογή των συγκεκριμένων σταθμών βασίστηκε στη διαθεσιμότητα αξιόπιστων και επαρκώς συνεχών χρονοσειρών, οι οποίες καλύπτουν χρονικές περιόδους από το 2010 έως το 2025, ανάλογα με την έναρξη λειτουργίας κάθε σταθμού. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει την ομοιογένεια και τη συγκρισιμότητα των δεδομένων, περιορίζοντας επίσης τις αβεβαιότητες που θα μπορούσαν να προκύψουν από τη χρήση σταθμών με περιορισμένη ή ασυνεχή χρονική κάλυψη.

Το Σχήμα 4.13 αποτυπώνει τη σχέση μεταξύ του υψομέτρου των μετεωρολογικών σταθμών και της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος–Αύγουστος). Η γραμμική παλινδρόμηση των δεδομένων περιγράφεται από την εξίσωση $y = -0,0122x + 43,693$, ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού υπολογίσθηκε ίσος με $R^2 = 0,7588$.

Σε αντίθεση με τη μέτρια συσχέτιση που προέκυψε για τη βροχόπτωση, η εξάρτηση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας από το υψόμετρο εμφανίζεται ιδιαίτερα ισχυρή. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού δείχνει ότι σημαντικό μέρος της μεταβλητότητας των θερμοκρασιών μπορεί να αποδοθεί στις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σταθμών, γεγονός που φανερώνει στενή σύνδεση των δύο μεταβλητών.

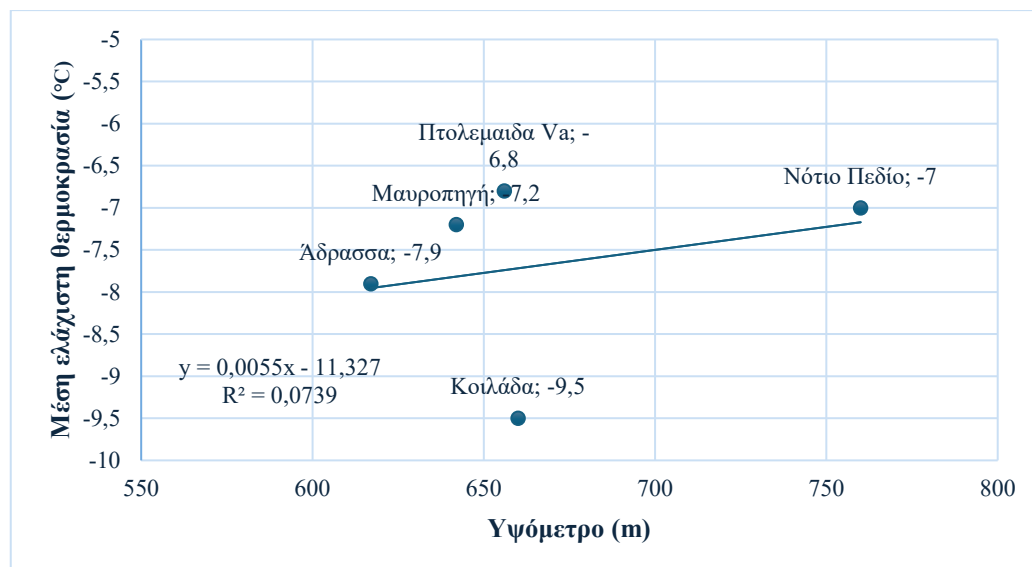
Η αρνητική κλίση της ευθείας τάσης επιβεβαιώνει ότι οι υψηλότερες περιοχές χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Σύμφωνα με το προσαρμοσμένο μοντέλο, αύξηση του υψομέτρου κατά 100 m αντιστοιχεί σε μείωση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας κατά περίπου 1,2 °C. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με τη φυσική κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας και με τη γενικότερη επίδραση του αναγλύφου στο θερμοκρασιακό καθεστώς.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σταθμός του Νοτίου Πεδίου, ο οποίος βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο (760 m) και καταγράφει τη χαμηλότερη μέση μέγιστη θερμοκρασία (34,4°C). Αντίθετα, οι σταθμοί που βρίσκονται σε χαμηλότερα

υψόμετρα παρουσιάζουν υψηλότερες θερμοκρασιακές τιμές, ενισχύοντας την παρατηρούμενη τάση.

Η ισχυρή αρνητική συσχέτιση που καταγράφεται επιβεβαιώνει ότι το υψόμετρο θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες διαμόρφωσης του θερμοκρασιακού καθεστώτος κατά τη θερινή περίοδο. Σε αντίθεση με τη βροχόπτωση, όπου η επίδραση πρόσθετων παραγόντων είναι περισσότερο εμφανής, η μεταβολή των μέγιστων θερμοκρασιών ακολουθεί σε μεγαλύτερο βαθμό την υψομετρική διαφοροποίηση των σταθμών.

4.2.3 Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας



Σχήμα 4.14: Συσχέτιση υψομέτρου και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας κατά την χειμερινή περίοδο (Δεκέμβριος–Φεβρουάριος),

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (EAA), Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ υψομέτρου και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας κατά τη χειμερινή περίοδο (Δεκέμβριος–Φεβρουάριος) πραγματοποιήθηκε για τους πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν διαπιστώνεται σαφής γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών, καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού ($R^2 = 0,0739$) δείχνει πολύ ασθενή εξάρτηση της μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας από το υψόμετρο. Η ιδιαίτερα χαμηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού υποδηλώνει ότι η μεταβλητότητα των μέσων ελάχιστων θερμοκρασιών κατά τη χειμερινή περίοδο δεν μπορεί να ερμηνευθεί επαρκώς από τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σταθμών. Ως εκ τούτου, η

διαμόρφωση του θερμοκρασιακού καθεστώτος φαίνεται να επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τοπικούς παράγοντες και μικροκλιματικές διεργασίες.

Η ασθενώς θετική κλίση της ευθείας τάσης αποκλίνει από τη συνήθη κατακόρυφη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρας, σύμφωνα με την οποία η θερμοκρασία αναμένεται να μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου. Η συμπεριφορά αυτή πιθανόν σχετίζεται με τις ιδιαίτερες γεωμορφολογικές και μικροκλιματικές συνθήκες της λεκάνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας, όπου κατά τους χειμερινούς μήνες ευνοείται η ανάπτυξη θερμοκρασιακών αναστροφών, η περιορισμένη κατακόρυφη ανάμιξη της ατμόσφαιρας και η συγκέντρωση ψυχρών αέριων μαζών στα χαμηλότερα στρώματα, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και κλειστές λεκάνες (Whiteman et al., 2004; Lundquist et al., 2008).

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του σταθμού της Κοιλάδας, ο οποίος καταγράφει αισθητά χαμηλότερες μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς, παρά το γεγονός ότι βρίσκεται σε παρόμοιο υψομετρικό επίπεδο. Η απόκλιση αυτή υποδηλώνει ότι η τοπογραφική θέση του σταθμού και οι τοπικές συνθήκες απορροής και εγκλωβισμού ψυχρού αέρα επηρεάζουν σημαντικά το θερμοκρασιακό καθεστώς, αναδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο των μικροκλιματικών διεργασιών στην περιοχή.

Η εικόνα που προκύπτει διαφοροποιείται αισθητά από εκείνη που καταγράφηκε για τις μέγιστες θερινές θερμοκρασίες, όπου η επίδραση του υψομέτρου εμφανίστηκε σαφώς ισχυρότερη. Αντίθετα, κατά τη χειμερινή περίοδο οι τοπικές συνθήκες ανάγλυφου, η μορφή των λεκανών και η εκδήλωση θερμοκρασιακών αναστροφών φαίνεται να επηρεάζουν περισσότερο τη διαμόρφωση των ελάχιστων θερμοκρασιών από ό,τι η υψομετρική διαφοροποίηση των σταθμών.

4.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε σχέση με την απολιγνιτοποίηση

4.3.1 Διαχρονική εξέλιξη της λιγνιτικής παραγωγής στην περιοχή Κοζάνης-Πτολεμαΐδας

Η λεκάνη Κοζάνης–Πτολεμαΐδας αποτέλεσε για πολλές δεκαετίες το σημαντικότερο κέντρο εξόρυξης λιγνίτη και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Η ανάπτυξη των ορυχείων και των θερμοηλεκτρικών σταθμών συνέβαλε καθοριστικά στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της χώρας, διαμορφώνοντας παράλληλα το φυσικό και κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής.

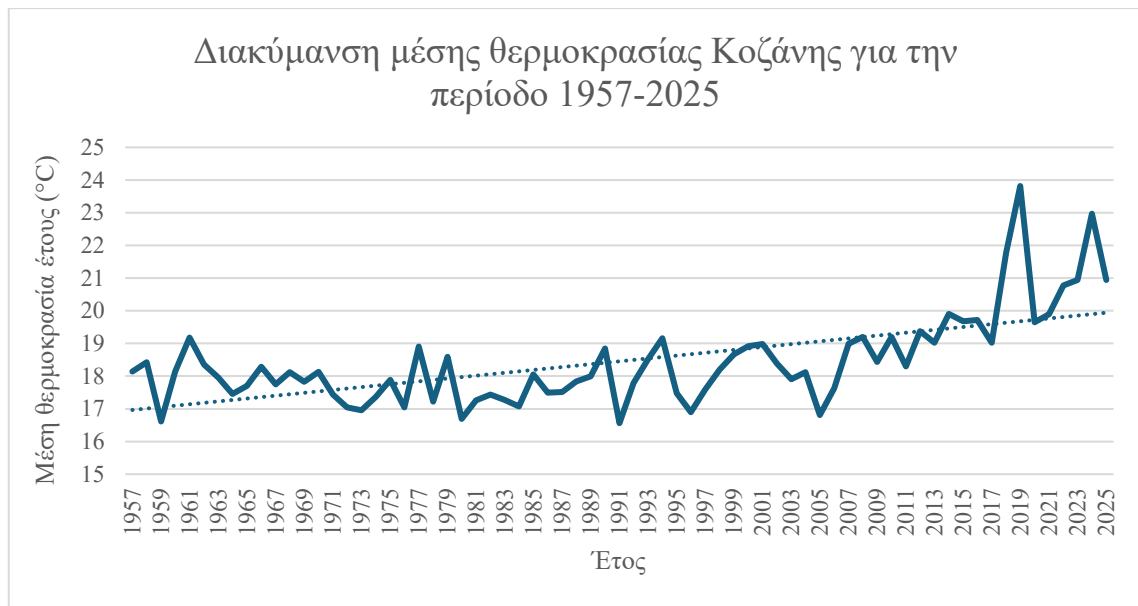
Η διαχρονική εξέλιξη της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία κατά την περίοδο 1957–2025 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15. Από την έναρξη της συστηματικής εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων παρατηρείται συνεχής αύξηση της παραγωγής, η οποία κορυφώνεται στις αρχές της δεκαετίας του 2000, όταν οι ετήσιες εξορύξεις προσέγγισαν τα 48 εκατομμύρια τόνους. Από τα μέσα της δεκαετίας του 2010 και ιδιαίτερα μετά το 2019 καταγράφεται έντονη υποχώρηση, η οποία συνδέεται με τη σταδιακή εφαρμογή της πολιτικής απολιγνιτοποίησης και την αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα.



Σχήμα 4.15: Διαχρονική εξέλιξη της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία κατά την περίοδο 1957–2025.

Πηγή δεδομένων: ΔΕΗ, Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Η εξέλιξη της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη εμφανίζει σαφή ανοδική τάση κατά την ίδια χρονική περίοδο. Η αύξηση αυτή καθίσταται περισσότερο εμφανής από τις αρχές του 21ου αιώνα, ακολουθώντας τη γενικότερη τάση θέρμανσης που έχει καταγραφεί στην Ανατολική Μεσόγειο και αποδίδεται στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Οι υψηλότερες τιμές των τελευταίων ετών υποδηλώνουν την ενίσχυση των θερμών ανωμαλιών και τη μεταβολή των τοπικών κλιματικών συνθηκών.



Σχήμα 4.16: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη κατά την περίοδο 1957–2025.

Πηγή δεδομένων: EMY(2026), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Η παράλληλη απεικόνιση της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη και της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας επιτρέπει τη συνολική θεώρηση της εξέλιξης των δύο μεταβλητών κατά την περίοδο 1957–2025. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17, οι δύο χρονοσειρές παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, υποδηλώνοντας ότι η μεταβολή τους δεν ακολουθεί κοινή δυναμική και επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες. Η ανάλυση της συγκεκριμένης χρονοσειράς παρέχει τη βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση με την εξέλιξη της λιγνιτικής παραγωγής, η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

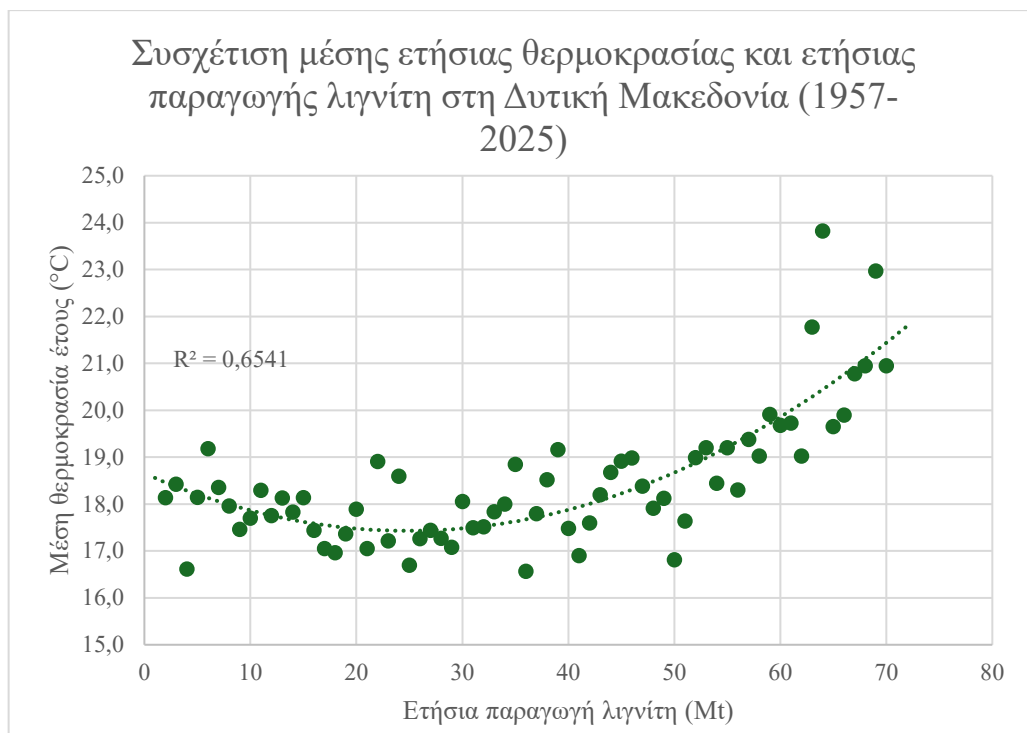


Σχήμα 4.17: Συγκριτική απεικόνιση της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη και της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη για την περίοδο 1957–2025.

Πηγή δεδομένων: ΕΜΥ(2026), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη κατασκευάστηκε το διάγραμμα διασποράς του Σχήματος 4.18. Η πολωνυμική προσαρμογή δεύτερου βαθμού απέδωσε συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,654$, ένδειξη ότι η μεταβολή των δύο μεταβλητών περιγράφεται ικανοποιητικότερα από ένα μη γραμμικό μοντέλο σε σύγκριση με μια απλή γραμμική προσέγγιση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για χαμηλές και μέσες τιμές ετήσιας παραγωγής λιγνίτη η μέση ετήσια θερμοκρασία μεταβάλλεται περιορισμένα, ενώ στις υψηλότερες τιμές παραγωγής εμφανίζεται εντονότερη ανοδική τάση.

Ωστόσο, η στατιστική αυτή συσχέτιση δεν μπορεί να ερμηνευθεί ως σχέση αιτίου–αποτελέσματος. Η εξέλιξη της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας επηρεάζεται κυρίως από τη μακροχρόνια κλιματική μεταβολή, ενώ η ετήσια παραγωγή λιγνίτη διαμορφώνεται από παράγοντες όπως η ενεργειακή πολιτική, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η διαθεσιμότητα των μονάδων και η σταδιακή απολιγνιτοποίηση. Επομένως, η παρατηρούμενη σχέση αντανακλά κυρίως την κοινή διαχρονική εξέλιξη των δύο μεταβλητών και δεν τεκμηριώνει άμεση αιτιώδη σύνδεση μεταξύ τους.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Κοζάνη και της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη στη Δυτική Μακεδονία κατά την περίοδο 1957–2025.

Πηγή δεδομένων: ΔΕΗ, Ιδία επεξεργασία.συγγραφέα

4.3.2 Μεθοδολογική προσέγγιση για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ενεργειακής παραγωγής και μετεωρολογικών παραμέτρων

Για την εξέταση πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της ενεργειακής παραγωγής και των θερμοκρασιακών συνθηκών στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας αξιοποιήθηκαν δεδομένα από ενεργειακές εγκαταστάσεις και μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο του 2025, τα οποία προέρχονται από πέντε φωτοβολταϊκούς σταθμούς και δύο λιγνιτικές μονάδες, καθώς και δεδομένα θερμοκρασίας από πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται εντός ή σε άμεση γειτνίαση με τη λιγνιτική λεκάνη της Πτολεμαΐδας.

Η επιλογή των εγκαταστάσεων βασίστηκε στη χωρική αντιπροσωπευτικότητα και στην εγγύτητά τους προς τις κύριες περιοχές εξορυκτικής δραστηριότητας. Επειδή οι θέσεις των ενεργειακών εγκαταστάσεων και των μετεωρολογικών σταθμών δεν συμπίπτουν γεωγραφικά, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε περιφερειακή κλίμακα,

αξιοποιώντας τις μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας που προέκυψαν από τους διαθέσιμους σταθμούς.

Ο Πίνακας 4.4 καταγράφει τις ενεργειακές εγκαταστάσεις και τους μετεωρολογικούς σταθμούς που εντάχθηκαν στην ανάλυση, καθώς και τον επιμέρους ρόλο τους στην αξιολόγηση των σχέσεων μεταξύ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμοκρασιακών μεταβλητών.

Πίνακας 4.3: Ενεργειακές εγκαταστάσεις και μετεωρολογικοί σταθμοί της Περιοχής Κοζάνης-Πτολεμαΐδας

Πηγή: Ίδια σύνθεση και επεξεργασία βάσει δεδομένων ΑΔΜΗΕ, Meteo.gr (ΕΑΑ) και ΡΑΑΕΥ.

Κατηγορία	Ονομασία ΑΔΜΗΕ	Σχέση με το ορυχείο Πτολεμαΐδας	Ρόλος στην ανάλυση
Φ/Β σταθμός	ΚΥΤ Κοζάνης	Άμεση/υψηλή	Παραγωγή ΑΠΕ
Φ/Β σταθμός	Πέρδικας	Άμεση	Παραγωγή ΑΠΕ
Φ/Β σταθμός	Χαραυγή	Άμεση	Παραγωγή ΑΠΕ
Φ/Β σταθμός	Καλάμια	Περιφερειακή	Παραγωγή ΑΠΕ
Φ/Β σταθμός	Λυγέρη	Περιφερειακή	Παραγωγή ΑΠΕ
Λιγνιτική Μονάδα	Άγιος Δημήτριος 3,4,5	Άμεση	Παραγωγή Λιγνίτη
Λιγνιτική Μονάδα	Πτολεμαΐδα 5	Άμεση	Παραγωγή Λιγνίτη
Μετ/κός σταθμός	Νότιο Πεδίο	Άμεση	Θερμοκρασία
Μετ/κός σταθμός	Μαυροπηγή	Άμεση	Θερμοκρασία
Μετ/κός σταθμός	Πτολεμαΐδα Va	Άμεση	Θερμοκρασία
Μετ/κός σταθμός	Άδρασσα	Άμεση	Θερμοκρασία
Μετ/κός σταθμός	Κοιλάδα	Άμεση	Θερμοκρασία

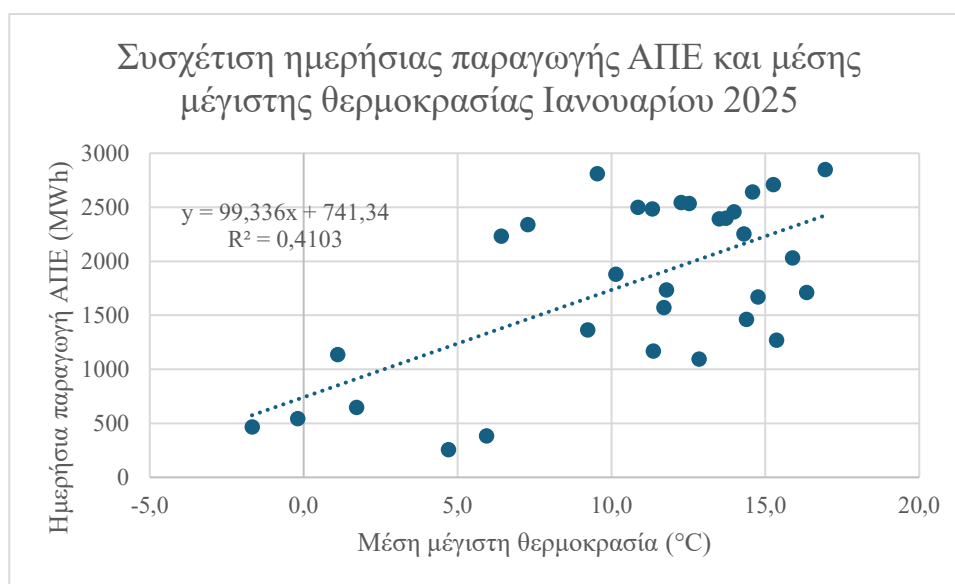
Στο πλαίσιο της παρούσας προσέγγισης εξετάστηκαν οι σχέσεις μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς (PV), της λιγνιτικής παραγωγής και των θερμοκρασιακών συνθηκών, με στόχο την αναγνώριση πιθανών τάσεων που συνδέονται με τη διαδικασία της απολιγνιτοποίησης και τη σταδιακή μεταβολή του ενεργειακού μίγματος στην περιοχή.

4.3.3 Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμοκρασιακών συνθηκών

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η πιθανή αλληλεπίδραση μεταξύ της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και λιγνιτικές μονάδες και των θερμοκρασιακών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα παραγωγής και μέσες ημερήσιες μέγιστες θερμοκρασίες, οι οποίες προέκυψαν από τη συνδυαστική επεξεργασία των διαθέσιμων μετεωρολογικών σταθμών.

Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε δύο αντιπροσωπευτικούς μήνες του 2025, τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο, ώστε να διερευνηθούν ενδεχόμενες διαφοροποιήσεις μεταξύ των χειμερινών και των θερινών συνθηκών.

4.3.3.1 Συσχέτιση παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και θερμοκρασίας

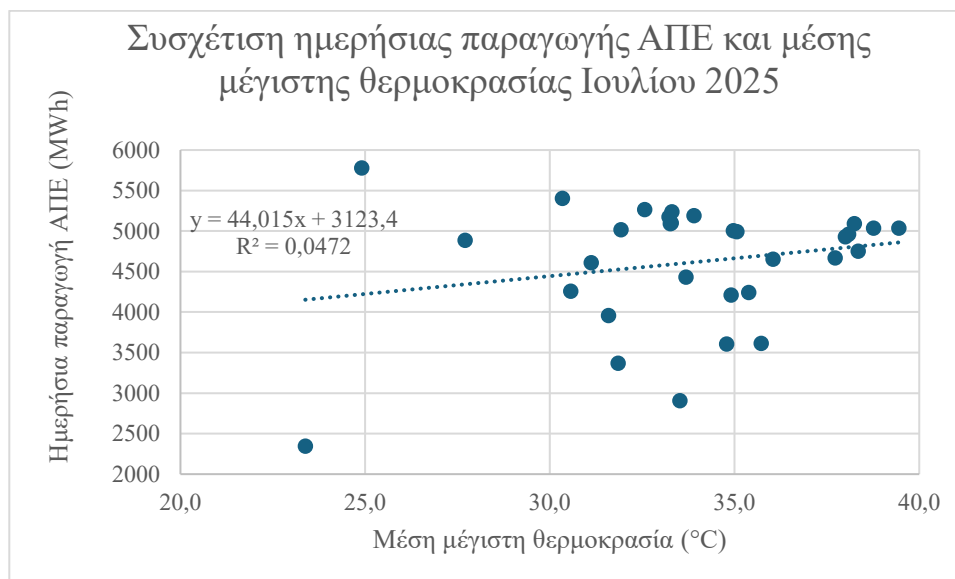


Σχήμα 4.19: Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς ως προς τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον Ιανουάριο του 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Η ανάλυση των δεδομένων για τον Ιανουάριο του 2025 προέκυψε μέτριας θετικής συσχέτιση μεταξύ της ημερήσιας φωτοβολταϊκής παραγωγής και της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,4103$. Η τάση αυτή υποδηλώνει ότι οι θερμότερες ημέρες της χειμερινής περιόδου συνοδεύονται γενικά από υψηλότερα

επίπεδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά αποδίδεται κυρίως στη μεγαλύτερη διάρκεια ηλιοφάνειας και στη μειωμένη νεφοκάλυψη που χαρακτηρίζουν τις ηπιότερες χειμερινές ημέρες.



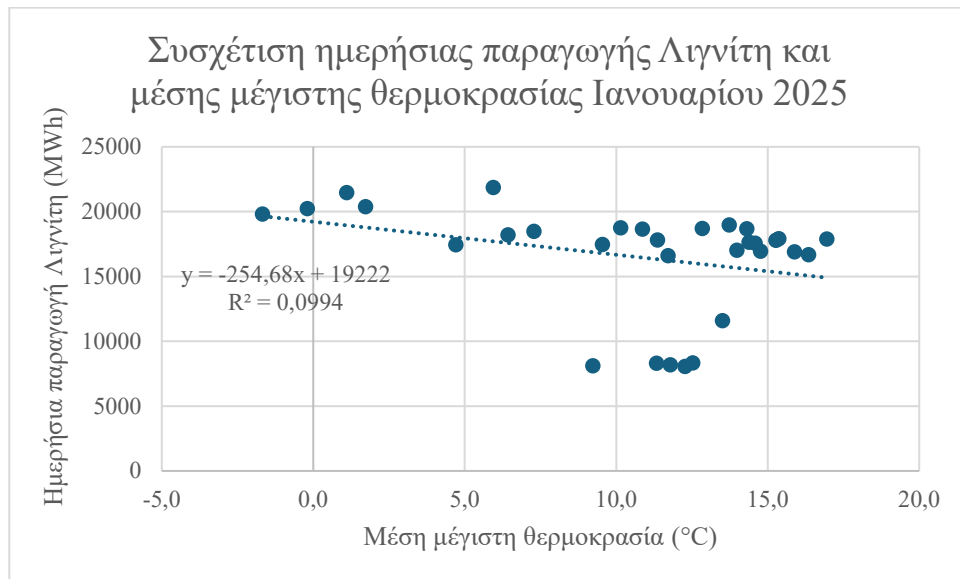
Σχήμα 4.20: Απεικόνιση της μεταβολής της ημερήσιας φωτοβολταϊκής παραγωγής σε σχέση με τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον μήνα Ιούλιο 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Αντίθετα, κατά τον Ιούλιο του 2025 η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών εμφανίζεται ιδιαίτερα ασθενής, καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού περιορίζεται σε $R^2 = 0,0472$. Η περιορισμένη αυτή συσχέτιση υποδηλώνει ότι, κατά τη θερινή περίοδο, οι μεταβολές της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας δεν συνοδεύονται από αντίστοιχες μεταβολές της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Η τελευταία διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, καθώς οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας είναι ευνοϊκές καθ' όλη τη διάρκεια του μήνα.

Η σύγκριση των δύο περιόδων αναδεικνύει ότι η θερμοκρασία δεν αντιπροσωπεύει από μόνη της τον κυρίαρχο παράγοντα διαμόρφωσης της παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Κατά τους θερινούς μήνες η παραγωγή επηρεάζεται περισσότερο από τη συνολική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο οι διακυμάνσεις των θερμοκρασιακών συνθηκών φαίνεται να συνδέονται σε μεγαλύτερο βαθμό με τη μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και φωτοβολταϊκής παραγωγής παρουσιάζει σαφή εποχική διαφοροποίηση και δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους.

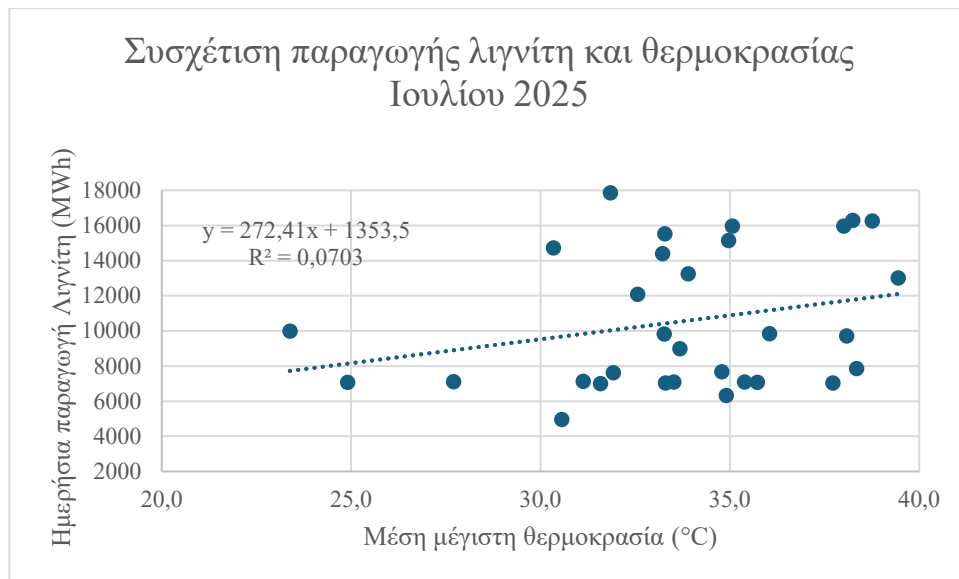
4.3.3.2 Συσχέτιση λιγνιτικής παραγωγής και θερμοκρασίας



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας λιγνιτικής παραγωγής ως προς τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον Ιανουάριο του 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ημερήσιας λιγνιτικής παραγωγής και μέσης μέγιστης θερμοκρασίας για τον Ιανουάριο του 2025 υποδηλώνει μια πολύ ασθενή αρνητική τάση, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,0994$. Η χαμηλή τιμή του συντελεστή υποδηλώνει ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας συνδέονται σε μικρό βαθμό με τις διακυμάνσεις της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη. Κατά συνέπεια, η λειτουργία των μονάδων φαίνεται να επηρεάζεται κυρίως από επιχειρησιακούς και ενεργειακούς παράγοντες, όπως η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, η διαθεσιμότητα των μονάδων και οι ανάγκες εξισορρόπησης του ηλεκτρικού συστήματος.



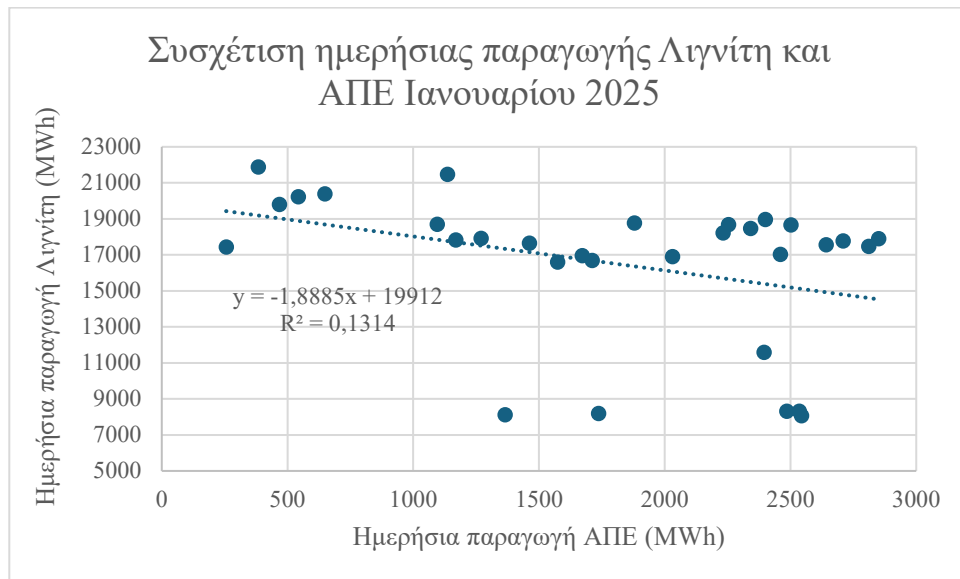
Σχήμα 4.22: Απεικόνιση της μεταβολής της ημερήσιας λιγνιτικής παραγωγής σε σχέση με τη μέση μέγιστη θερμοκρασία για τον μήνα Ιούλιο 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Αντίστοιχα, κατά τον Ιούλιο του 2025 προκύπτει ασθενής θετική τάση, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,0703$. Παρά την αλλαγή του πρόσημου της γραμμής παλινδρόμησης, η ιδιαίτερα μικρή τιμή του R^2 δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για ουσιαστική εξάρτηση της λιγνιτικής παραγωγής από τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Η διασπορά των σημείων στο διάγραμμα υποδηλώνει ότι η ημερήσια παραγωγή παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα, η οποία αποδίδεται κυρίως στη λειτουργική κατάσταση των μονάδων και στις απαιτήσεις κάλυψης του φορτίου.

Παρά τη διαφοροποίηση του πρόσημου της γραμμικής τάσης μεταξύ Ιανουαρίου και Ιουλίου, οι ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού στις δύο περιπτώσεις καταδεικνύουν ότι η μεταβολή της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας συνοδεύεται από περιορισμένες μόνο μεταβολές της ημερήσιας λιγνιτικής παραγωγής. Η εικόνα αυτή αντανακλά τη μεγάλη διασπορά των δεδομένων και υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά της συγκεκριμένης μεταβλητής δεν ακολουθεί μια σαφή γραμμική σχέση με τις επικρατούσες θερμοκρασιακές συνθήκες.

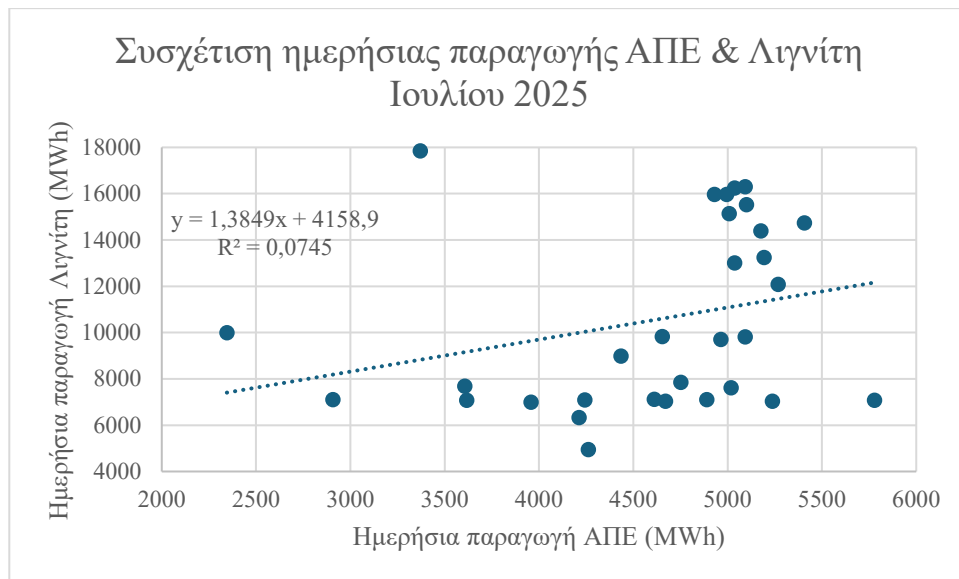
4.3.3.3 Συσχέτιση μεταξύ παραγωγής από ΑΠΕ και λιγνιτικής παραγωγής



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα διασποράς της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και λιγνιτικές μονάδες κατά τον Ιανουάριο του 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Το διάγραμμα διασποράς δείχνει ότι, κατά τον Ιανουάριο του 2025, η αύξηση της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς συνοδεύεται, σε γενικές γραμμές, από μείωση της λιγνιτικής παραγωγής. Ωστόσο, η σχέση αυτή είναι ασθενής ($R^2 = 0,1314$), καθώς παρατηρείται μεγάλη διασπορά των τιμών. Επομένως, παρότι διαφαίνεται μια γενική τάση υποκατάστασης της λιγνιτικής παραγωγής από την αυξημένη συμμετοχή των φωτοβολταϊκών, τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών.



Σχήμα 4.24: Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της ημερήσιας παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και της αντίστοιχης λιγνιτικής παραγωγής για τον μήνα Ιούλιο 2025.

Πηγή δεδομένων: Meteo.gr (ΕΑΑ), Ιδία επεξεργασία συγγραφέα

Σε αντίθεση με τον Ιανουάριο, κατά τον Ιούλιο του 2025 η συσχέτιση μεταξύ της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και της αντίστοιχης λιγνιτικής παραγωγής είναι ασθενώς θετική ($R^2 = 0,0745$). Η μεγάλη διασπορά των σημείων δείχνει ότι η αύξηση της παραγωγής από φωτοβολταϊκά δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή της λιγνιτικής παραγωγής. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι κατά τη θερινή περίοδο η λειτουργία των δύο τεχνολογιών επηρεάζεται κυρίως από τις εκάστοτε ανάγκες του ηλεκτρικού συστήματος και όχι από μια άμεση σχέση μεταξύ τους.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του Ιανουαρίου και του Ιουλίου δείχνει ότι η σχέση μεταξύ της φωτοβολταϊκής και της λιγνιτικής παραγωγής μεταβάλλεται εποχικά και δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον, η μεγάλη διασπορά των τιμών και στις δύο περιόδους υποδηλώνει ότι η ημερήσια παραγωγή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος, οι οποίοι δεν μπορούν να περιγραφούν επαρκώς από μια απλή γραμμική συσχέτιση.

4.3.4 Συγκριτική αξιολόγηση της συμμετοχής του λιγνίτη και των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της περιοχής και της θερμοκρασίας

Η συνδυαστική αξιολόγηση των επιμέρους αναλύσεων επιτρέπει τη διαμόρφωση μιας συνολικής εικόνας σχετικά με τη λειτουργία του ενεργειακού συστήματος της περιοχής Κοζάνης–Πτολεμαΐδας κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου της απολιγνιτοποίησης. Παρότι η διερεύνηση βασίστηκε σε ημερήσια δεδομένα και σε δύο αντιπροσωπευτικούς μήνες του έτους, τα αποτελέσματα παρέχουν χρήσιμες ενδείξεις για τον τρόπο με τον οποίο οι διαφορετικές μορφές ηλεκτροπαραγωγής ανταποκρίνονται στις επικρατούσες θερμοκρασιακές συνθήκες.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς παρουσίασε μεγαλύτερη ευαισθησία στις εποχικές μεταβολές. Ειδικότερα, κατά τον Ιανουάριο του 2025 διαπιστώθηκε μέτρια θετική συσχέτιση με τη μέση μέγιστη θερμοκρασία, υποδηλώνοντας ότι οι θερμότερες ημέρες της χειμερινής περιόδου συνοδεύονται συνήθως από ευνοϊκότερες συνθήκες ηλιοφάνειας και μικρότερη νεφοκάλυψη, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Αντίθετα, κατά τον Ιούλιο του 2025 η σχέση αυτή εξασθενεί σημαντικά, ένδειξη ότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών σταθμών διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μέσα στη θερινή περίοδο.

Από την άλλη πλευρά, η λιγνιτική παραγωγή εμφανίζει πολύ ασθενείς συσχετίσεις με τη θερμοκρασία τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή περίοδο. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ότι η λειτουργία των λιγνιτικών μονάδων δεν καθορίζεται άμεσα από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, αλλά κυρίως από παράγοντες που σχετίζονται με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαθεσιμότητα των μονάδων, τις ανάγκες εξισορρόπησης του συστήματος και τη συμμετοχή των επιμέρους τεχνολογιών στο ενεργειακό μίγμα.

Η σύγκριση μεταξύ της ημερήσιας παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και της αντίστοιχης λιγνιτικής παραγωγής ανέδειξε γενικά ασθενείς σχέσεις, χωρίς να προκύπτει σαφής ανταγωνισμός μεταξύ των δύο μορφών παραγωγής. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι κατά την εξεταζόμενη περίοδο οι δύο τεχνολογίες λειτουργούν περισσότερο συμπληρωματικά, καλύπτοντας από κοινού στην κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού συστήματος.

Επιπλέον, η επεξεργασία των δεδομένων δεν τεκμηριώνουν την ύπαρξη ισχυρής άμεσης σχέσης μεταξύ της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της διαμόρφωσης των θερμοκρασιακών συνθηκών στην περιοχή. Με άλλα λόγια, δεν προκύπτουν ενδείξεις ότι οι βραχυχρόνιες μεταβολές της παραγωγής από λιγνιτικές μονάδες ή φωτοβολταϊκούς σταθμούς μπορούν από μόνες τους να οδηγήσουν σε αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας. Οι κλιματικές και μικροκλιματικές επιδράσεις αποτελούν διαδικασίες μεγαλύτερης χρονικής και χωρικής κλίμακας, οι οποίες επηρεάζονται από ένα πλήθος φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων.

Από την παρούσα ανάλυση προκύπτει ότι η μεταβολή του ενεργειακού μίγματος της περιοχής δεν συνδέεται με απλές γραμμικές σχέσεις με τις βραχυχρόνιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Η πληρέστερη διερεύνηση των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών και μικροκλιματικών επιδράσεων της απολιγνιτοποίησης προϋποθέτει την αξιοποίηση μακροχρόνιων χρονοσειρών, γεωχωρικών δεδομένων και στοχευμένων μικροκλιματικών μελετών, ώστε να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

4.4 Σύγκριση με βιβλιογραφικά δεδομένα και διεθνείς μελέτες

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με τη σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι οι αλλαγές που παρατηρούνται στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας εντάσσονται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο περιβαλλοντικών και μικροκλιματικών επιδράσεων που έχουν καταγραφεί σε περιοχές εντατικής εξορυκτικής δραστηριότητας. Η απομάκρυνση της φυσικής βλάστησης, η εκτεταμένη αποκάλυψη εδαφικών και γεωλογικών σχηματισμών, η μεταβολή του αναγλύφου και η αλλαγή των χρήσεων γης αποτελούν παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το τοπικό ενεργειακό ισοζύγιο, τη θερμική συμπεριφορά των επιφανειών και τις συνθήκες του μικροκλίματος.

Αντίστοιχες διαπιστώσεις έχουν καταγραφεί σε διεθνείς μελέτες που εξετάζουν την επίδραση των επιφανειακών εξορύξεων στη θερμοκρασία επιφανείας και στη χωρική κατανομή της θερμικής επιβάρυνσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι περιοχές εκσκαφής και οι γυμνές επιφάνειες εμφανίζουν συχνά υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας επιφανείας σε σύγκριση με γειτονικές δασικές ή αγροτικές εκτάσεις, κυρίως λόγω της μειωμένης φυτοκάλυψης, της απώλειας εξατμισοδιαπνοής και της διαφοροποίησης του albedo (Azeez, 2022). Ωστόσο, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι τιμές αυτές αφορούν συνήθως τη θερμοκρασία επιφανείας, η οποία προκύπτει από τα δορυφορικά δεδομένα,

και δεν ταυτίζεται με τη θερμοκρασία αέρα που καταγράφεται από μετεωρολογικούς σταθμούς σε ύψος τουλάχιστον 2m από το έδαφος σε ειδικά σχεδιασμένο κλωβό. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη δεν αντιμετωπίζει τις διεθνείς τιμές LST ως άμεσα συγκρίσιμες με τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής, αλλά τις αξιοποιεί ως ένδειξη των μηχανισμών μέσω των οποίων η αλλαγή της κάλυψης γης μπορεί να επηρεάσει το τοπικό θερμικό περιβάλλον.

Η σημασία της φυτοκάλυψης επιβεβαιώνεται και από τη συσχέτιση μεταξύ δεικτών βλάστησης και θερμοκρασίας επιφανείας που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η μείωση της βλάστησης οδηγεί σε περιορισμό της εξατμισοδιαπνοής και σε αύξηση της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από γυμνές ή τεχνητά τροποποιημένες επιφάνειες. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, τα οποία αναδεικνύουν χωρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ σταθμών με διαφορετικά μορφολογικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, μπορούν να ερμηνευθούν σε συνάρτηση με τις αλλαγές χρήσεων γης και την διαχρονική παρουσία της λιγνιτικής δραστηριότητας στην λεκάνη Κοζάνης–Πτολεμαΐδας.

Σημαντικό στοιχείο συνιστά και ο γεωμορφολογικός μετασχηματισμός που έχει προκληθεί από την πολυετή εξορυκτική δραστηριότητα. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει ότι οι μεγάλες επιφανειακές εξορύξεις δεν μεταβάλλουν μόνο την κάλυψη γης, αλλά και το ίδιο το ανάγλυφο, δημιουργώντας τεχνητές κοιλότητες, πρανή, αποθέσεις και νέες επιφάνειες με διαφορετικά θερμικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας, η κλίμακα των εκσκαφών και των αποθέσεων κατατάσει την περιοχή μεταξύ των σημαντικότερων περιπτώσεων ανθρωπογενούς αναδιαμόρφωσης του τοπίου στην Ελλάδα και στην Ευρώπη (Paraskevis et al., 2021). Ανάλογα φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί σε παλαιές λιγνιτικές περιοχές της Γερμανίας, όπου η εξορυκτική δραστηριότητα προκάλεσε εκτεταμένες μεταβολές του αναγλύφου, με σημαντικές επιδράσεις στη γεωμορφολογία και στη χωρική οργάνωση του τοπίου (Henselowsky et al., 2021).

Παρά τις ομοιότητες που παρουσιάζουν οι πρώην λιγνιτικές περιοχές, η περίπτωση της Κοζάνης–Πτολεμαΐδας εμφανίζει και σημαντικές ιδιαιτερότητες. Σε αρκετές ευρωπαϊκές περιοχές εξόρυξης λιγνίτη, όπως η Ρηνανία (Rhineland) στη δυτική Γερμανία, η οποία περιλαμβάνει τα μεγάλα ορυχεία Hambach, Garzweiler και Inden, καθώς και η Λουσατία (Lusatia) στην ανατολική Γερμανία, η οποία συγκαταλέγεται στις σημαντικότερες λιγνιτικές περιφέρειες της χώρας, η αποκατάσταση των εξαντλημένων

ορυχείων συνοδεύτηκε σε μεγάλο βαθμό από τη δημιουργία τεχνητών λιμνών, υδροτοπικών οικοσυστημάτων και νέων περιοχών αναψυχής. Οι παρεμβάσεις αυτές αποσκοπούσαν όχι μόνο στην περιβαλλοντική αποκατάσταση των υποβαθμισμένων εκτάσεων, αλλά και στη βελτίωση των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών και στην ενίσχυση της οικολογικής συνδεσιμότητας (Gerwin et al., 2023).

Αντίθετα, στη Δυτική Μακεδονία, η μεταλιγνιτική μετάβαση συνδέεται κυρίως με την ανάπτυξη εκτεταμένων έργων ΑΠΕ και ιδιαίτερα μεγάλων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων (Pavloudakis et al., 2023b). Η διαφορετική αυτή προσέγγιση ενδέχεται να διαμορφώσει διακριτές περιβαλλοντικές και μικροκλιματικές συνθήκες σε σχέση με τις αντίστοιχες ευρωπαϊκές περιπτώσεις, καθιστώντας ιδιαίτερα σημαντική την παρακολούθηση των μεταβολών των χρήσεων γης και των επιπτώσεών τους στο τοπικό περιβάλλον.

Η βιβλιογραφία για τις μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις δείχνει ότι οι επιδράσεις τους στο μικροκλίμα δεν είναι μονοσήμαντες. Από τη μία πλευρά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και θεωρείται βασικός άξονας της ενεργειακής μετάβασης. Από την άλλη πλευρά, όμως, η εκτεταμένη κάλυψη του εδάφους με φωτοβολταϊκές συστοιχίες μπορεί να μεταβάλει το albedo, τη σκίαση, την υγρασία του εδάφους και την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ επιφάνειας και ατμόσφαιρας (Xu et al., 2024). Συνεπώς, η χωροθέτηση και ο σωστός σχεδιασμός των έργων ΑΠΕ σε πρώην λιγνιτικές εκτάσεις είναι σκόπιμο να συνοδεύονται από μέτρα φυτοτεχνικής αποκατάστασης, διατήρησης διαδρόμων βλάστησης και ελέγχου της διάβρωσης, ώστε η ενεργειακή μετάβαση να μη συνοδευτεί από νέες περιβαλλοντικές πιέσεις σε τοπική κλίμακα.

Τα ευρήματα της παρούσας εργασίας συνδέονται επίσης με τις κλιματικές προβολές για την Ελλάδα και τη Νοτιοανατολική Ευρώπη. Η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας βρίσκεται σε μια ζώνη όπου η αύξηση της θερμοκρασίας, η μεταβολή των βροχοπτώσεων και η ενίσχυση των ξηροθερμικών συνθηκών αναμένεται να επηρεάσουν τόσο τα φυσικά οικοσυστήματα όσο και τις παραγωγικές δραστηριότητες. Μελέτες για την Ελλάδα εκτιμούν ότι η Βόρεια Ελλάδα εκτιμάται ότι θα παρουσιάσει σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας κατά τις επόμενες δεκαετίες, ιδιαίτερα υπό σενάρια υψηλών εκπομπών (Politi et al., 2022). Παράλληλα, οι δείκτες θερμικής καταπόνησης αναμένεται να επιβαρυνθούν, γεγονός που ενδέχεται να έχει συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία, την

εργασία σε εξωτερικούς χώρους και τη λειτουργία των τοπικών οικοσυστημάτων (Pantavou et al., 2025· Petrou and Kassomenos, 2024).

Παρά τα ευρήματα που προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων, η παρούσα εργασία δεν αποσκοπεί στην τεκμηρίωση άμεσων σχέσεων αιτίου–αποτελέσματος μεταξύ της εξορυκτικής δραστηριότητας και κάθε επιμέρους μεταβολής των κλιματικών παραμέτρων που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης. Η πολυπαραγοντική φύση του κλιματικού συστήματος, σε συνδυασμό με τη διαφορετική χρονική και χωρική κλίμακα των διεργασιών που εμπλέκονται, καθιστά αναγκαία την προσεκτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η σύγκριση με τα ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας αναδεικνύει ότι οι εκτεταμένες μεταβολές του τοπίου, η διαφοροποίηση των χρήσεων γης και οι παρεμβάσεις μεγάλης κλίμακας μπορούν να επηρεάσουν τη διαμόρφωση του τοπικού θερμικού περιβάλλοντος και των μικροκλιματικών χαρακτηριστικών. Υπό το πρίσμα αυτό, η περίπτωση της λεκάνης Κοζάνης–Πτολεμαΐδας αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζει τη σταδιακή παύση της λιγνιτικής δραστηριότητας με την ανάπτυξη νέων ενεργειακών υποδομών και την αναδιαμόρφωση μεγάλων εκτάσεων.

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός της μεταλιγνιτικής περιόδου και των δράσεων περιβαλλοντικής αποκατάστασης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις ενεργειακές και οικονομικές παραμέτρους, αλλά και τις πιθανές επιδράσεις που σχετίζονται με τη χωρική οργάνωση των νέων χρήσεων γης και τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας. Η συστηματική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών μεταβολών και η αξιοποίηση μακροχρόνιων χρονοσειρών μπορούν να ενισχύσουν την πληρέστερη κατανόηση των διεργασιών που συνοδεύουν την ενεργειακή μετάβαση στη Δυτική Μακεδονία.

4.5 Περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιδράσεις

Η απολιγνιτοποίηση στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία μετάβασης, οι επιδράσεις της οποίας εκτείνονται τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στην κοινωνικοοικονομική δομή της περιοχής. Η πολυετής εξορυκτική δραστηριότητα έχει επιφέρει σημαντικές μεταβολές στις χρήσεις γης, στο ανάγλυφο και στα υδρολογικά χαρακτηριστικά, επηρεάζοντας τη λειτουργία των οικοσυστημάτων και τη βιοποικιλότητα (Paraskevis et al., 2021). Την ίδια περίοδο, η σταδιακή παύση της λιγνιτικής δραστηριότητας συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών

αερίων του θερμοκηπίου και εναρμονίζεται με τους ευρωπαϊκούς και εθνικούς στόχους για την κλιματική ουδετερότητα, χωρίς ωστόσο να εξαλείφει τις περιβαλλοντικές προκλήσεις που συνδέονται με τη διαχείριση και την αποκατάσταση των εκτεταμένων πρώην εξορυκτικών εκτάσεων.

Η μεταβολή των χρήσεων γης και η ανάπτυξη νέων ενεργειακών υποδομών αναμένεται να επηρεάσουν τις μελλοντικές μικροκλιματικές συνθήκες της περιοχής. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι αλλαγές στην κάλυψη γης, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη συχνότητα εμφάνισης θερμών επεισοδίων που αποδίδονται στην κλιματική αλλαγή, δύνανται να επηρεάσουν το τοπικό βιοκλίμα και τις συνθήκες θερμικής άνεσης των κατοίκων, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο (Pantavou et al., 2025). Υπό το πρίσμα αυτό, η περιβαλλοντική αποκατάσταση των πρώην ορυχείων και η ενίσχυση της φυτοκάλυψης αποκτούν μείζονος σημασία, καθώς ενισχύουν την περιβαλλοντική ανθεκτικότητα και της προσαρμοστική ικανότητα της περιοχής απέναντι στις αναμενόμενες κλιματικές μεταβολές.

Παράλληλα με τον περιβαλλοντικό μετασχηματισμό, η Δυτική Μακεδονία βρίσκεται αντιμέτωπη με σημαντικές κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις. Η ανάπτυξη της περιοχής κατά τις προηγούμενες δεκαετίες συνδέθηκε σε μεγάλο βαθμό με τη λιγνιτική δραστηριότητα και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ. Η επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης συνοδεύτηκε από σημαντικές ανάγκες οικονομικής αναδιάρθρωσης, οι οποίες αντανακλώνται στις μεταβολές της αγοράς εργασίας, στην ανακατανομή των παραγωγικών δραστηριοτήτων και στην αυξημένη ανάγκη για επανεκπαίδευση και απόκτηση νέων δεξιοτήτων (Tranoulidis et al., 2022· Boulogiorgou and Kaldellis, 2025).

Οι εξελίξεις αυτές συνδέονται και με τις δημογραφικές μεταβολές που παρατηρούνται στη Δυτική Μακεδονία τις τελευταίες δεκαετίες. Η μείωση του πληθυσμού, η γήρανση και η μετακίνηση ανθρώπινου δυναμικού προς μεγαλύτερα αστικά κέντρα αποτελούν παράγοντες που δυσχεραίνουν τη μετάβαση σε ένα νέο παραγωγικό πρότυπο και περιορίζουν τις αναπτυξιακές δυνατότητες της περιοχής. Η αντιμετώπιση των προκλήσεων αυτών προϋποθέτει την προσέλκυση νέων επενδύσεων, την ενίσχυση της καινοτομίας και τη διαφοροποίηση της τοπικής οικονομίας πέραν του ενεργειακού τομέα.

Η ταυτόχρονη εκδήλωση περιβαλλοντικών, οικονομικών και δημογραφικών μεταβολών αναδεικνύει τον πολυδιάστατο χαρακτήρα της μεταλιγνιτικής μετάβασης. Στο πλαίσιο αυτό, καθοριστικό ρόλο έχουν οι αρχές της Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης, καθώς και η ενίσχυση της ανθεκτικότητας των περιοχών που εξαρτήθηκαν επί δεκαετίες από τα ορυκτά καύσιμα. Η επιτυχής μετάβαση σε ένα νέο ενεργειακό και παραγωγικό πρότυπο δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την αντικατάσταση των συμβατικών μορφών παραγωγής ενέργειας, αλλά και από τη διασφάλιση της κοινωνικής συνοχής, τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων (Pavloudakis et al., 2023a).

Η ενίσχυση της περιβαλλοντικής αποκατάστασης, η διαφοροποίηση των παραγωγικών δραστηριοτήτων και η αξιοποίηση των διαθέσιμων χρηματοδοτικών εργαλείων μπορούν να ενισχύσουν την κοινωνική και οικονομική ανθεκτικότητα της περιοχής. Η αξιοποίηση των αποκατεστημένων εκτάσεων μέσω πρακτικών κυκλικής οικονομίας, η ανάπτυξη πράσινων υποδομών και η προώθηση δραστηριοτήτων όπως η βιώσιμη γεωργία, ο αγροτουρισμός και οι τομείς που σχετίζονται με την καινοτομία και τις νέες τεχνολογίες δύνανται να συμβάλουν στη διαμόρφωση ενός περισσότερο διαφοροποιημένου και βιώσιμου παραγωγικού μοντέλου για τη Δυτική Μακεδονία (Mitrousis et al., 2025).

Οι περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές διαστάσεις που συνοδεύουν τη μεταλιγνιτική περίοδο καταδεικνύουν ότι η ενεργειακή μετάβαση στη Δυτική Μακεδονία δεν περιορίζεται στην αντικατάσταση των πηγών ηλεκτροπαραγωγής, αλλά συνιστά μια ευρύτερη διαδικασία χωρικού, οικονομικού και κοινωνικού μετασχηματισμού. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των προκλήσεων που ανακύπτουν προϋποθέτει τον συνδυασμό περιβαλλοντικής αποκατάστασης, παραγωγικής ανασυγκρότησης και κοινωνικής συνοχής, ώστε να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις για ένα περισσότερο ανθεκτικό και βιώσιμο αναπτυξιακό πρότυπο. Υπό το πρίσμα αυτό, η πορεία της Δυτικής Μακεδονίας κατά τις επόμενες δεκαετίες αναμένεται να αποτελέσει ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των αρχών της Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

4.6 Κριτική αποτίμηση και όρια της έρευνας

Η διερεύνηση των περιβαλλοντικών μεταβολών στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας διαμορφώνει ένα ιδιαίτερα σύνθετο επιστημονικό αντικείμενο, καθώς η

περιοχή επηρεάζεται ταυτόχρονα από την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, τη μακροχρόνια εξορυκτική δραστηριότητα και τη συνεχιζόμενη ενεργειακή μετάβαση. Η αλληλεπίδραση φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών, σε συνδυασμό με τις διαχρονικές μεταβολές των χρήσεων γης, καθιστά δύσκολη την απομόνωση της συμβολής κάθε επιμέρους παράγοντα στις παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων.

Παρά την αξιοποίηση εκτεταμένων χρονοσειρών και τη χρήση δεδομένων προερχόμενων από διαφορετικές πηγές, η έρευνα υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Ένας από τους σημαντικότερους σχετίζεται με την ετερογένεια των διαθέσιμων δεδομένων. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν διαφορετικές περιόδους λειτουργίας, άνισο μήκος καταγραφών και διαφοροποιήσεις ως προς τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και τη χωρική τους θέση. Κατά συνέπεια, οι διαφορές που καταγράφονται μεταξύ των σταθμών δεν μπορούν να αποδοθούν αποκλειστικά στη λιγνιτική δραστηριότητα ή στις μεταβολές των χρήσεων γης, αλλά επηρεάζονται και από φυσικούς παράγοντες που σχετίζονται με το ανάγλυφο και τη γεωγραφική θέση της περιοχής.

Επιπλέον, η πολυπαραγοντική φύση των κλιματικών διεργασιών δεν επιτρέπει την εξαγωγή άμεσων σχέσεων αιτιότητας μεταξύ της εξορυκτικής δραστηριότητας και των μεταβολών που παρατηρούνται στη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση, τη σχετική υγρασία και τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά. Οι παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις αποτελούν αποτέλεσμα σύνθετων διεργασιών στις οποίες συμμετέχουν η φυσική μεταβλητότητα του κλίματος, οι περιφερειακές εκδηλώσεις της κλιματικής αλλαγής, η τοπογραφία και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στο τοπίο (IPCC, 2023).

Ένας πρόσθετος περιορισμός αφορά τη χωρική πυκνότητα των διαθέσιμων παρατηρήσεων. Παρά την ύπαρξη μακροχρόνιων καταγραφών, η περιορισμένη παρουσία μετεωρολογικών σταθμών εντός των πρώην εξορυκτικών περιοχών δεν επιτρέπει την πλήρη αποτύπωση των τοπικών μικροκλιματικών διαφοροποιήσεων. Παράλληλα, η συνεχής εξέλιξη της μεταλιγνιτικής περιόδου και οι διαρκείς μεταβολές των χρήσεων γης υποδηλώνουν ότι η περιοχή εξακολουθεί να βρίσκεται σε στάδιο μετασχηματισμού, γεγονός που καθιστά τα παρόντα αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου και όχι μιας πλήρως διαμορφωμένης κατάστασης.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση των περιβαλλοντικών μεταβολών που συνοδεύουν την ενεργειακή μετάβαση στη Δυτική Μακεδονία. Η συνδυαστική αξιοποίηση μετεωρολογικών χρονοσειρών, γεωχωρικών δεδομένων και βιβλιογραφικών πληροφοριών επέτρεψε την ανάδειξη χωρικών διαφοροποιήσεων και διαχρονικών τάσεων, παρέχοντας ένα πλαίσιο αναφοράς για τη μελέτη των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα σε μία από τις σημαντικότερες μεταλιγνιτικές περιοχές της Ευρώπης.

Η περαιτέρω διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλιματικής αλλαγής, μεταβολών χρήσεων γης και ενεργειακής μετάβασης θα μπορούσε να ενισχυθεί μέσω της αξιοποίησης δεδομένων υψηλότερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης, της εφαρμογής εξειδικευμένων στατιστικών τεχνικών και της ανάπτυξης μικροκλιματικών μοντέλων προσομοίωσης. Επίσης, η συστηματική παρακολούθηση της περιοχής κατά τις επόμενες δεκαετίες και η συσχέτιση των μετεωρολογικών μεταβολών με δεδομένα παραγωγής ενέργειας, μεταβολών χρήσεων γης και περιβαλλοντικών δεικτών θα μπορούσαν να συμβάλουν στην πληρέστερη κατανόηση των μακροχρόνιων επιπτώσεων της απολιγνιτοποίησης και της προσαρμογής των τοπικών οικοσυστημάτων και κοινωνιών στις νέες συνθήκες.

Εν κατακλείδι, τα ευρήματα της παρούσας έρευνας θα πρέπει να ερμηνεύονται υπό το πρίσμα των παραπάνω περιορισμών, χωρίς αυτό να μειώνει την επιστημονική τους αξία. Αντίθετα, αναδεικνύουν την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση και διεπιστημονική προσέγγιση των περιβαλλοντικών μεταβολών που συνοδεύουν την ενεργειακή μετάβαση της Δυτικής Μακεδονίας. Η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλίματος, χρήσεων γης και ανθρώπινων παρεμβάσεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών προσαρμογής και βιώσιμης ανάπτυξης στη μεταλιγνιτική εποχή.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Κύρια συμπεράσματα της έρευνας

Η περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας συνιστά ένα δυναμικό και διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβαλλοντικό σύστημα, στο οποίο η μακροχρόνια λιγνιτική δραστηριότητα, οι μεταβολές των χρήσεων γης και οι ευρύτερες εκδηλώσεις της κλιματικής αλλαγής αλληλεπιδρούν και διαμορφώνουν ένα ιδιαίτερα σύνθετο χωρικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι οι παρατηρούμενες μεταβολές δεν μπορούν να αποδοθούν σε έναν μόνο παράγοντα, αλλά αποτελούν προϊόν της συνδυασμένης επίδρασης φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών.

Η επεξεργασία των διαθέσιμων μετεωρολογικών χρονοσειρών έδειξε την ύπαρξη αξιοσημείωτης χωρικής διαφοροποίησης μεταξύ των σταθμών της περιοχής μελέτης. Οι διαφοροποιήσεις που καταγράφηκαν ως προς τη θερμοκρασία, τη βροχόπτωση, τη σχετική υγρασία και τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά συνδέονται σε σημαντικό βαθμό με το υψόμετρο, την τοπογραφία και τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά κάθε θέσης. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι ακόμη και σε σχετικά μικρές αποστάσεις μπορούν να εμφανίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών.

Η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας βρίσκεται σήμερα αντιμέτωπη με την ταυτόχρονη εξέλιξη δύο σημαντικών διεργασιών, της κλιματικής αλλαγής και της ενεργειακής μετάβασης. Η συνύπαρξη αυτών των παραγόντων καθιστά δυσχερή την απομόνωση των επιμέρους επιδράσεων, αναδεικνύοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένη προσέγγιση και συνεχή παρακολούθηση των περιβαλλοντικών μεταβολών κατά τις επόμενες δεκαετίες.

Η ανάλυση των συσχετίσεων μεταξύ ενεργειακής παραγωγής και θερμοκρασιακών συνθηκών έδειξε ότι οι μεταβολές της ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν συνδέονται με ισχυρές γραμμικές σχέσεις με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εμφάνισαν μεγαλύτερη εποχική ευαισθησία, κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ η λιγνιτική παραγωγή παρουσίασε ασθενείς συσχετίσεις με τις θερμοκρασιακές μεταβολές, γεγονός που υποδηλώνει ότι η λειτουργία των μονάδων επηρεάζεται κυρίως από τις ανάγκες του ηλεκτρικού συστήματος και τη διαθεσιμότητα των εγκαταστάσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, η σύγκριση

της παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς και λιγνιτικές μονάδες δεν ανέδειξε σαφή ανταγωνιστική σχέση, αλλά περισσότερο μια συμπληρωματική λειτουργία στο πλαίσιο του ενεργειακού μίγματος της περιοχής.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία έδειξε ότι τα ευρήματα της παρούσας εργασίας είναι συμβατά με αντίστοιχες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε μεγάλες εξορυκτικές περιοχές της Ευρώπης και άλλων χωρών. Οι αλλαγές στην κάλυψη γης, η εκτεταμένη διαμόρφωση του αναγλύφου και η μεταβολή της επιφανειακής ενεργειακής ισορροπίας αποτελούν παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το μικροκλίμα και τη θερμική συμπεριφορά των επιφανειών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν τεκμηριώνουν την ύπαρξη άμεσης σχέσης αιτιότητας μεταξύ των βραχυχρόνιων μεταβολών της ενεργειακής παραγωγής και των μεταβολών των μετεωρολογικών παραμέτρων, υπογραμμίζοντας την πολυπλοκότητα των μηχανισμών που διέπουν τα τοπικά κλιματικά συστήματα.

Παράλληλα, η απολιγνιτοποίηση δεν συνιστά αποκλειστικά μια ενεργειακή διαδικασία, αλλά έναν ευρύτερο μετασχηματισμό με περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις. Η σταδιακή παύση της εξορυκτικής δραστηριότητας δημιουργεί νέες προκλήσεις που σχετίζονται με την αποκατάσταση των πρώην ορυχείων, την αναδιάρθρωση της τοπικής οικονομίας, την προσαρμογή της αγοράς εργασίας και την ενίσχυση της κοινωνικής συνοχής. Η επιτυχία της μετάβασης προϋποθέτει την ταυτόχρονη αντιμετώπιση όλων αυτών των παραμέτρων στο πλαίσιο της Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης.

Συνολικά, η περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας αποτελεί μια χαρακτηριστική περίπτωση μετάβασης, όπου οι κλιματικές μεταβολές, η απολιγνιτοποίηση και οι αλλαγές στις χρήσεις γης εξελίσσονται ταυτόχρονα και επηρεάζουν τη μελλοντική αναπτυξιακή πορεία της περιοχής. Για τον λόγο αυτό, οι πολιτικές αποκατάστασης και ανάπτυξης είναι απαραίτητο να λαμβάνουν υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές όσο και τις κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους.

5.2 Επιστημονική και πρακτική συμβολή της μελέτης

Η μελέτη συμβάλλει στην ολοκληρωμένη διερεύνηση των περιβαλλοντικών μεταβολών που συνοδεύουν τη μεταλιγνιτική μετάβαση στην περιοχή Κοζάνης–Πτολεμαΐδας, μέσω της συνδυαστικής αξιοποίησης μετεωρολογικών χρονοσειρών, γεωχωρικών δεδομένων,

στοιχείων ενεργειακής παραγωγής και της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την εξέταση της περιοχής ως ενός σύνθετου συστήματος, στο οποίο αλληλεπιδρούν η κλιματική αλλαγή, οι μεταβολές των χρήσεων γης και ο ενεργειακός μετασχηματισμός.

Σε επιστημονικό επίπεδο, η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της πολυπαραγοντικής προσέγγισης κατά την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε πρώην λιγνιτικές περιοχές. Τα αποτελέσματα αποτυπώνουν ότι οι παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων και των μικροκλιματικών χαρακτηριστικών δεν μπορούν να αποδοθούν σε έναν μόνο παράγοντα, αλλά αποτελούν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών. Η εργασία συμβάλλει στη γεφύρωση της διεθνούς βιβλιογραφίας με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της Δυτικής Μακεδονίας, προσφέροντας μια επικαιροποιημένη αποτύπωση της περιβαλλοντικής κατάστασης κατά την τρέχουσα περίοδο της απολιγνιτοποίησης.

Αξιοσημείωτη είναι η ενσωμάτωση δεδομένων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνιτικές μονάδες και φωτοβολταϊκούς σταθμούς στη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ ενεργειακού μίγματος και θερμοκρασιακών συνθηκών. Η ανάλυση αυτή παρέχει μια πρώτη εικόνα της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος της περιοχής κατά τη μεταβατική περίοδο και αναδεικνύει τη δυνατότητα αξιοποίησης αντίστοιχων δεδομένων σε μελλοντικές, περισσότερο εξειδικευμένες μελέτες.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα ευρήματα της έρευνας μπορούν να αξιοποιηθούν για τον σχεδιασμό δράσεων περιβαλλοντικής αποκατάστασης και προσαρμογής στη μεταλιγνιτική εποχή. Η ανάδειξη των χωρικών διαφοροποιήσεων των κλιματικών παραμέτρων και η κατανόηση της επίδρασης των μεταβολών των χρήσεων γης μπορούν να υποστηρίξουν τη διαμόρφωση αποτελεσματικότερων πολιτικών διαχείρισης του περιβάλλοντος, καθώς και την ενσωμάτωση κριτηρίων περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας στον αναπτυξιακό σχεδιασμό της περιοχής.

Η περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής που μεταβαίνει από ένα παραγωγικό πρότυπο βασισμένο στον λιγνίτη σε ένα νέο ενεργειακό και αναπτυξιακό μοντέλο. Η εμπειρία αυτή μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο σημείο αναφοράς και για άλλες περιοχές της Ελλάδας και της Ευρώπης που βρίσκονται αντιμέτωπες με αντίστοιχες προκλήσεις ενεργειακής μετάβασης και περιβαλλοντικής αποκατάστασης.

Τέλος, η συγκεκριμένη εργασία δημιουργεί μια βάση αναφοράς για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ κλιματικής αλλαγής, μεταβολών των χρήσεων γης και ενεργειακού μετασχηματισμού. Η συστηματική παρακολούθηση των περιβαλλοντικών μεταβολών και η αξιοποίηση δεδομένων μεγαλύτερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης αναμένεται να συμβάλει στην πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών που διαμορφώνουν το περιβάλλον των μεταλιγνιτικών περιοχών και στην υποστήριξη της βιώσιμης ανάπτυξής τους.

5.3 Προτάσεις για πολιτικές προσαρμογής και βιώσιμη ανάπτυξη

Η μετάβαση της Δυτικής Μακεδονίας στη μεταλιγνιτική εποχή συνιστά μια σύνθετη διαδικασία, η οποία εκτείνεται πέραν του ενεργειακού τομέα και συνδέεται άμεσα με περιβαλλοντικές, χωρικές και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους. Η συνύπαρξη των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής, των μεταβολών των χρήσεων γης και της σταδιακής υποχώρησης της λιγνιτικής δραστηριότητας καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση ολοκληρωμένης στρατηγικής προσαρμογής, η οποία θα βασίζεται στις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης (European Commission, 2024).

Προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στην ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποκατάσταση των πρώην εξορυκτικών εκτάσεων. Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η αποκατάσταση των μεταλλευτικών τοπίων δεν θα πρέπει να περιορίζεται αποκλειστικά στη γεωτεχνική διαμόρφωση του αναγλύφου, αλλά να αποσκοπεί στην επαναφορά των οικοσυστημικών λειτουργιών, στη βελτίωση της βιοποικιλότητας και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας (Tibbett, 2024, Xiang et al., 2025). Στην περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας, η ενίσχυση της φυτοκάλυψης, η δημιουργία πράσινων διαδρόμων, η αποκατάσταση των υδρολογικών διεργασιών και η αξιοποίηση των αποκατεστημένων εκτάσεων μέσω ήπιων χρήσεων γης μπορούν να διευκολύνουν τη βελτίωση της λειτουργίας των οικοσυστημάτων και να συμβάλλουν στη μακροχρόνια περιβαλλοντική αναβάθμιση της περιοχής.

Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη νέων ενεργειακών υποδομών και η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ πρέπει να συνοδεύονται από ολοκληρωμένο χωροταξικό σχεδιασμό και από τη συνεκτίμηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του τοπίου. Δεδομένου ότι σημαντικό μέρος των νέων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων αναπτύσσεται σε πρώην λιγνιτικές εκτάσεις, κρίνεται αναγκαία η ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων στη

διαδικασία σχεδιασμού, ώστε η ενεργειακή μετάβαση να συνδυάζεται με την προστασία της βιοποικιλότητας, τη διατήρηση της οικολογικής συνδεσιμότητας και την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων (ΣΔΑΜ 2021).

Από τη διερεύνηση των διαθέσιμων στοιχείων της μελέτης προέκυψαν χωρικές διαφοροποιήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η Δυτική Μακεδονία θα μπορούσε να αποτελέσει πεδίο ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου συστήματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Η εγκατάσταση πρόσθετων μετεωρολογικών σταθμών, η αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων, καθώς και η συνδυασμένη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και τεχνικών τηλεπισκόπησης θα μπορούσαν να συμβάλουν στην πληρέστερη κατανόηση των τοπικών μικροκλιματικών διεργασιών και στην αποτελεσματικότερη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών μεταβολών που συνοδεύουν την ενεργειακή μετάβαση (OECD, 2024).

Εξίσου σημαντική είναι η δημιουργία ενός μόνιμου μηχανισμού παρακολούθησης περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών δεικτών. Η συστηματική καταγραφή παραμέτρων που σχετίζονται με το κλίμα, τις χρήσεις γης, την απασχόληση, τη δημογραφική εξέλιξη και την οικονομική δραστηριότητα μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των πολιτικών που εφαρμόζονται και να διευκολύνει την έγκαιρη προσαρμογή τους στις μεταβαλλόμενες συνθήκες (OECD, 2024; CINTRAN, 2024). Αντίστοιχες προσεγγίσεις έχουν προταθεί και για τη Δυτική Μακεδονία στο πλαίσιο των πολιτικών Δίκαιης Μετάβασης και των σχετικών ευρωπαϊκών προγραμμάτων.

Η επιτυχία της μεταλignιτικής μετάβασης εξαρτάται, επίσης, από την ενεργό συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών και τη διασφάλιση ευρύτερης κοινωνικής συναίνεσης. Η διεθνής εμπειρία από περιοχές που ακολούθησαν αντίστοιχες διαδικασίες μετάβασης δείχνει ότι η συμμετοχή των κατοίκων, των τοπικών φορέων και της ακαδημαϊκής κοινότητας στις διαδικασίες σχεδιασμού ενισχύει την κοινωνική αποδοχή και βελτιώνει την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων (Jordan and Tenzing, 2024). Η ενίσχυση της διαβούλευσης και η αξιοποίηση της τοπικής γνώσης μπορούν να συμβάλουν στη διαμόρφωση περισσότερο ανθεκτικών και κοινωνικά αποδεκτών αναπτυξιακών στρατηγικών. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται από την ανάλυση των λιγνιτικών περιοχών της Γερμανίας, όπου η μετάβαση συνδέεται με τη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών και τη διαφοροποίηση των χρήσεων γης, καταδεικνύοντας

ότι η κοινωνική και περιβαλλοντική διάσταση της μετάβασης είναι αλληλένδετες (Gerwin et al., 2023).

Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, η μακροχρόνια αναπτυξιακή προοπτική της Δυτικής Μακεδονίας προϋποθέτει τη σταδιακή διαφοροποίηση της οικονομικής δραστηριότητας και τη μείωση της εξάρτησης από τον ενεργειακό τομέα. Η διεθνής εμπειρία από μεταλιγνιτικές περιοχές της Ευρώπης υποδεικνύει ότι η ενίσχυση της καινοτομίας, η προσέλκυση νέων επενδύσεων και η ανάπτυξη δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την κυκλική οικονομία, τις πράσινες τεχνολογίες, τη βιώσιμη γεωργία και τον αγροτουρισμό μπορούν να υποστηρίξουν τη δημιουργία ενός περισσότερο διαφοροποιημένου και ανθεκτικού παραγωγικού προτύπου (Oei et al., 2020· Boulogiorgou and Kaldellis, 2025).

Η περίπτωση της Δυτικής Μακεδονίας λειτουργεί ως ένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα ενεργειακής μετάβασης στην Ευρώπη. Η αξιοποίηση της εμπειρίας που αποκτήθηκε κατά τη λιγνιτική περίοδο, σε συνδυασμό με τη συστηματική περιβαλλοντική αποκατάσταση, την τεχνολογική καινοτομία και την ενίσχυση της τοπικής οικονομίας, μπορεί να βοηθήσει στη διαμόρφωση ενός νέου αναπτυξιακού προτύπου, προσαρμοσμένου στις ιδιαίτερες φυσικές και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες της περιοχής. Η ενσωμάτωση επιστημονικών δεδομένων στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων και η συνεχής αξιολόγηση των εφαρμοζόμενων πολιτικών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διασφάλιση μιας ισόρροπης και μακροχρόνια βιώσιμης μετάβασης.

5.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μεταλιγνιτική μετάβαση στη Δυτική Μακεδονία είναι μία μακροχρόνια διαδικασία, στην οποία αλληλεπιδρούν κλιματικοί, περιβαλλοντικοί, ενεργειακοί και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες. Η πολυπλοκότητα αυτών των διεργασιών καθιστά αναγκαία τη συνέχιση της επιστημονικής έρευνας με διεπιστημονική προσέγγιση και με μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα, ώστε να γίνει δυνατή η πληρέστερη κατανόηση των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή.

Ένα βασικό πεδίο μελλοντικής διερεύνησης αφορά τη μακροχρόνια αξιολόγηση των αποκατεστημένων εκτάσεων και την εξέλιξη των οικοσυστημάτων που αναπτύσσονται στις πρώην λιγνιτικές περιοχές. Η συστηματική παρακολούθηση της

ποιότητας των εδαφών, των υδατικών πόρων, της βλάστησης και της βιοποικιλότητας μπορεί να διευκολύνει την εκτίμηση της περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας των νέων χρήσεων γης και να υποστηρίξει τον σχεδιασμό αποτελεσματικότερων πρακτικών αποκατάστασης.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο αφορά την περαιτέρω διερεύνηση των πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβολών των χρήσεων γης και των τοπικών μικροκλιματικών συνθηκών. Η αξιοποίηση πυκνότερων δικτύων μετεωρολογικών σταθμών, σε συνδυασμό με δεδομένα τηλεπισκόπησης, γεωχωρικές τεχνικές και εξειδικευμένα χωρικά μοντέλα, θα μπορούσε να προσφέρει ακριβέστερη αποτύπωση των τοπικών διαφοροποιήσεων και να συμβάλει στην ανάπτυξη σεναρίων περιβαλλοντικής διαχείρισης και προσαρμογής.

Μία ακόμη ερευνητική κατεύθυνση σχετίζεται με την αξιοποίηση των πρώην εξορυκτικών εκτάσεων για την ανάπτυξη έργων ΑΠΕ και άλλων βιώσιμων χρήσεων γης, στο πλαίσιο της μεταλιγνιτικής μετάβασης (Pavloudakis et al., 2020). Η μεταβολή των χαρακτηριστικών της επιφάνειας, του ισοζυγίου ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας επιφανείας συνιστά αντικείμενο αυξανόμενου επιστημονικού ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου αναπτύσσονται μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Η συστηματική παρακολούθηση των διεργασιών αυτών δύναται να βελτιώσει την κατανόηση των πιθανών μικροκλιματικών επιδράσεων των νέων ενεργειακών υποδομών.

Παράλληλα, η σύνδεση των περιβαλλοντικών μεταβολών με κοινωνικούς και οικονομικούς δείκτες αποτελεί ένα πεδίο με βαρύτητα για τις μεταλιγνιτικές περιοχές. Η διερεύνηση θεμάτων που σχετίζονται με τη δημόσια υγεία, την ποιότητα ζωής, την ενεργειακή φτώχεια, τις δημογραφικές μεταβολές και τη διαμόρφωση νέων παραγωγικών δραστηριοτήτων θα μπορούσε να προσφέρει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα των επιπτώσεων της ενεργειακής μετάβασης και να υποστηρίξει τη χάραξη αποτελεσματικότερων πολιτικών προσαρμογής.

Επιπρόσθετα, η αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων αξιοποίησης των πρώην λιγνιτικών εκτάσεων αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Η ανάπτυξη πράσινων υποδομών, η δημιουργία τεχνητών υγροτόπων, η ενίσχυση της δασικής βλάστησης και η συνδυασμένη αξιοποίηση των αποκατεστημένων εκτάσεων για παραγωγικές και οικολογικές λειτουργίες μπορούν να εξεταστούν μέσω κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης και πολυκριτηριακών προσεγγίσεων, σύμφωνα με

τις σύγχρονες αρχές της βιώσιμης διαχείρισης και της δίκαιης μετάβασης (European Commission, 2024).

Οι ιδιαίτερες συνθήκες που χαρακτηρίζουν τη Δυτική Μακεδονία καθιστούν την περιοχή ένα σημαντικό πεδίο αναφοράς για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ κλιματικής αλλαγής, μεταβολών των χρήσεων γης και ενεργειακού μετασχηματισμού. Η συνέχιση της επιστημονικής παρακολούθησης και η αξιοποίηση διεπιστημονικών προσεγγίσεων αναμένεται να εμπλουτίσουν τη γνώση σχετικά με τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και αναπτυξιακές διαστάσεις της μεταλιγνιτικής εποχής. Τα ευρήματα των μελλοντικών ερευνών εκτιμάται ότι θα υποστηρίξουν τον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών προσαρμογής και βιώσιμης ανάπτυξης, τόσο για τη Δυτική Μακεδονία όσο και για άλλες ευρωπαϊκές περιοχές που βρίσκονται σε αντίστοιχη διαδικασία ενεργειακής μετάβασης.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Al-shateri, H.A.A., 2022. Estimation of land surface temperature and distribution across land use/land cover in response to coal mining activity in V. D. Yelevisky coal mine area – Russia. *Russian Journal of Earth Sciences*, 22(2), pp. 1–12.

<https://doi.org/10.2205/2021ES000778>

Amani-Beni, M., Zhang, B., Xie, G.-D. and Odgaard, A.J., 2021. Impacts of the Microclimate of a Large Urban Park on Its Surrounding Built Environment in the Summertime. *Remote Sensing*, 13(23), 4703. <https://doi.org/10.3390/rs13224703>

Ballesteros, M., Řehounková, K., Decler, K., Martínez-Ruiz, C., Alday, J.G., Gentili, R., Nunes, A., Salgueiro, P.A., Mahy, G., Bouchoms, S., Kirmer, A., Tischew, S., Carabassa, V., Nikolic, N., Marrs, R. and Prach, K., 2025. Maximising biodiversity potential in Europe's mines and quarries: A key role for EU Nature Restoration Regulation targets. *Ambio*. <https://doi.org/10.1007/s13280-025-02235-4>.

Bonan, G., 2015. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Boulogiorgou, D. and Kaldellis, J.K., 2025. The impact of the green energy transition at the local level: How just is the fast implementation of decarbonization policy in West Macedonia? *Frontiers in Environmental Science*, 13, Article 1616839.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1616839>

Burakowski, E.A., Tawfik, A.B., Ouimette, A.P., Lepine, L.C., Novick, K.A., Ollinger, S.V., Zarzycki, C.M. and Bonan, G.B., 2018. The role of surface roughness, albedo, and Bowen ratio on ecosystem energy balance in the Eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, pp.367–376. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.030>

Cao, Q., Liu, Y., Georgescu, M. and Wu, J., 2020. Impacts of landscape changes on local and regional climate: A systematic review. *Landscape Ecology*, 35(6), pp.1269–1290. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01015-7>

Chen, X., Zhao, H., Li, P. and Yin, Z., 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), pp.133–146. Doi:[10.1016/j.rse.2005.11.016](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016)

Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Boyer, T., Locarnini, R.A., et al., 2025. Record High Temperatures in the Ocean in 2024. *Advances in Atmospheric Sciences*, 42(6), pp.1092–1109. <https://doi.org/10.1007/s00376-025-4541-3>

Firozjaei, M.K., Sedighi, A., Firozjaei, H.K., Kiavarz, M., Homaei, H., Arsanjani, J.J., Makki, M., Naimi, B. and Alavipanah, S.K., 2021. A historical and future impact

assessment of mining activities on surface biophysical characteristics change: A remote sensing-based approach. *Ecological Indicators*, 122, 107264.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107264>

Forster, P. et al., 2021. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 923–1054.
<https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=3981174>

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M., Hauck, J. et al., 2025. Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), pp.965–1039.
<https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>

Giannaros, C., Dafis, S., Kotroni, V. & Lagouvardos, K., 2024. The extreme heat wave of late July/early August 2021 in Greece under the context of the direct effect of anthropogenic greenhouse gases. *Atmospheric Science Letters*, 25(1), e1191.
<https://doi.org/10.1002/asl.1191>

Geiger, R., Aron, R.H. and Todhunter, P., 2009. *The Climate Near the Ground*. 7th ed. Lanham, MD: Rowman & Littlefield Publishers.

Georgoulas, A.K., Akritidis, D., Kalisoras, A., Kapsomenakis, J., Melas, D., Zerefos, C.S. and Zanis, P., 2022. Climate change projections for Greece in the 21st century from high-resolution EURO-CORDEX RCM simulations. *Atmospheric Research*, 271, 106049. [10.1016/j.atmosres.2022.106049](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106049)

Gerwin, W., Raab, T., Birkhofer, K., Hinz, C., Letmathe, P., Leuchner, M., Roß-Nickoll, M., Rüde, T., Trachte, K., Wätzold, F. and Lehmkuhl, F., 2023. Perspectives of lignite post-mining landscapes under changing environmental conditions: what can we learn from a comparison between the Rhenish and Lusatian region in Germany? *Environmental Sciences Europe*, 35(1), Article 36. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00738-z>

Henselowsky, F., Rölkens, J., Kelterbaum, D. and Bubenzer, O., 2021. Anthropogenic relief changes in a long-lasting lignite mining area ('Ville', Germany) derived from historic maps and digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(9), pp.1725–1738 <https://doi.org/10.1002/esp.5103>

Ioannidis, P., Mamara, A., Armaos, V. and Argiriou, A.A., 2025. Long-Term Trends and Variability of Heatwaves in Greece. *Environmental and Earth Sciences Proceedings*, 35(1), 79. DOI:[10.3390/eesp2025035079](https://doi.org/10.3390/eesp2025035079)

Jordan, J. and Tenzing, J., 2024. *Social Foundations of a Just Coal Transition*. World Bank Report No. 195238. Washington, DC: World Bank.

Kilintzis, P., Samara, E., Topaloglou, L., Avlogiaris, G. and Kafetzopoulos, D., 2023. The role of Green Public Procurements in energy transition: the case of Western Macedonia. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 12, Article 87.
<https://link.springer.com/article/10.1186/s13731-023-00354->

[4?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article#citeas~:text=DOI-.https%3A//doi.org/10.1186/s13731-023-00354-4,-Share%20this%20article](https://doi.org/10.1186/s13731-023-00354-4)

Lagouvardos, K., Dafis, S., Kotroni, V., Kyros, G. and Giannaros, C., 2024. Exploring Recent (1991–2020) Trends of Essential Climate Variables in Greece. *Atmosphere*, 15(9), 1104. <https://doi.org/10.3390/atmos15091104>

Lionello, P., Scarascia, L., Malanotte-Rizzoli, P. and Boscolo, R. (eds), 2022. *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*. London: Elsevier Academic Press.
https://www.researchgate.net/publication/250928261_The_Climate_of_the_Mediterranean_Region_From_the_Past_to_the_Future

Liu, S., Wang, D. and Cao, Y., 2023. Characteristics of the Thermal Environment and Its Guidance to Ecological Restoration in a Resource-Based Area in the Loess Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), Article 3650. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043650>

Loksa, G., 2007. Variations in microclimate modified by open-cast mining: Case studies from Hungary. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 30, pp.215–218.

Lundquist, J.D., Pepin, N. and Rochford, C., 2008. Automated algorithm for mapping regions of cold-air pooling in complex terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D22), pp.1–13. <https://doi.org/10.1029/2008JD009879>

Martins, B.R., Lima, D.R., Barros Junior, U.O., Amorim, L.S.V.B., Oliveira, F.A. and Schwartz, G., 2020. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*, 145, 105707. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>

Mitrousis, I., et al., 2025. Specifications for the phytotechnical arrangement of the surrounding Renewable Energy Sources (RES) environment. *Operations Research Forum*, 6(3), p.139. <https://doi.org/10.1007/s43069-025-00526-w>

Nanaki, E.A., Koroneos, C.J., Xydis, G.A., 2016. Environmental impact assessment of electricity production from lignite. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(6):1868-1875. <https://doi.org/10.1002/ep.12427>

Napolitano, E., Carillo, A., Iacono, R., Struglia, M.V. et al., 2025. Unprecedented Mediterranean Sea warming in 2024: analysis of the driving mechanisms. *Frontiers in Marine Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1668204>

Nikolaidou, P., Triantafyllou, A., Kantiranis, N., et al., 2017. 'Mineralogical composition of suspended particles PM10 in the Ptolemais–Kozani area, Macedonia, Greece'. *Scientific Reports*, 7.
<https://ejournals.epublishing.ekt.gr/index.php/geosociety/article/view/11809/11848>

- Oei, P.-Y., Brauers, H. and Herpich, P., 2020. Lessons from Germany's hard coal mining phase-out: Policies and transition from fossil fuels. *Climate Policy*, 20(8), pp.963–979. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1688636>
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. London: Routledge.
- Pantavou, K., Kotroni, V., Kyros, G. and Lagouvardos, K., 2024. Thermal bioclimate in Greece based on the Universal Thermal Climate Index (UTCI) and insights into 2021 and 2023 heatwaves. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, pp. 6661–6675. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04989-5>
- Pantavou, K., et al., 2025. Future changes of bioclimate in Greece: Variations in thermal stress according to the UTCI. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179514>
- Paraskevis, N., Servou, A., Roumpos, C. and Pavloudakis, F., 2021. Spatiotemporal Interactions between Surface Coal Mining and Land Cover and Use Changes. *Journal of Sustainable Mining*, 20(2), pp.53–65.doi: [10.46873/2300-3960.1053](https://doi.org/10.46873/2300-3960.1053)
- Pavloudakis, F., Roumpos, C., Karlopoulos, E. and Koukouzas, N., 2020. Sustainable Rehabilitation of Surface Coal Mining Areas: The Case of Greek Lignite Mines. *Energies*, 13(15), Article 3995.
- Pavloudakis, F., Karlopoulos, E. and Roumpos, C., 2023a. Just transition governance to avoid socio-economic impacts of lignite phase-out: The case of Western Macedonia, Greece. *Resources Policy*, 14, Article 101248. Doi:[10.1016/j.exis.2023.101248](https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101248)
- Pavloudakis, F., Roumpos, C., Galetakis, M. and Menegaki, M., 2023b. Planning the closure of surface coal mines based on circular economy principles. *Mining*, 4, pp.75–96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00278-x>
- Pavloudakis, F., Karlopoulos, E. and Pagouni, C., 2023. The Emergence of Non-Energy Uses of Coal and the Future of Lignite Mining in a Region of Low Carbon Footprint: A Case Study. *Mining Revue*, 29(1), pp.63–78. DOI: <https://doi.org/10.2478/minrv-2023-0005>
- Petrou, I. and Kassomenos, P., 2024. Spatiotemporal analysis of Holiday Climate Index for urban and beach destinations in Greece. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4631316/v1>
- Politi, N., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A. and Nastos, P.T., 2023. High resolution projections for extreme temperatures and precipitation over Greece. *Climate Dynamics*, 61, pp.633–667. Doi: [10.1007/s00382-022-06590-w](https://doi.org/10.1007/s00382-022-06590-w)
- Sokratidou, A., Roumpos, C. and Paraskevis, N., 2023. Extractive Waste Management in Coal Surface Mining Projects—A Circular Economy Approach. *Sustainability*, 15(4), Article 3278. <https://doi.org/10.3390/su15043278>
- Tibbett, M., 2024. Post-mining ecosystem reconstruction. *Current Biology*, 34(9), pp.R387–R393. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.03.023>
- Tranoulidis, A., et al., 2022. Decarbonization and transition to the post-lignite era: Analysis for a sustainable transition in the region of Western Macedonia. *Sustainability*, 14(16), 10173. <https://doi.org/10.3390/su141610173>

- Whiteman, C.D., Haiden, T., Pospichal, B., Eisenbach, S. and Steinacker, R., 2004. Minimum temperatures, diurnal temperature ranges, and temperature inversion in limestone sinkholes of different sizes and shapes. *Journal of Applied Meteorology*, 40(7), pp.1224–1236. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<1224:MTDTRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1224:MTDTRA>2.0.CO;2)
- Wolkersdorfer, C. (2022). Effects of Mining on Surface Water. In: *Encyclopedia of Inland Waters* (2nd ed.). Elsevier.
- Xiang, Y., Gong, J., Zhang, L., Zhang, M., Chen, J., Liang, H., Chen, Y., Fu, X., Su, R. and Luo, Y., 2025. Research Progress of Mine Ecological Restoration Technology. *Resources*, 14(6), Article 100. <https://doi.org/10.3390/resources14060100>
- Xu, Z., Li, Y., Qin, Y. and Bach, E., 2024. A global assessment of the effects of solar farms on albedo, vegetation, and land surface temperature using remote sensing. *Solar Energy*, 268, Article 112198. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112198>
- Zanis, P., Georgoulas, A.K., Velikou, K., et al., 2024. Future projections of precipitation extremes for Greece based on an ensemble of high-resolution regional climate model simulations. *Atmosphere*, 15(5), 601. <https://doi.org/10.3390/atmos15050601>
- Ziouzios, D., Karlopoulos, E., Fragkos, P. and Vrontisi, Z., 2021. 'Challenges and Opportunities of Coal Phase-Out in Western Macedonia'. *Climate*, 9(7), 115. <https://doi.org/10.3390/cli9070115>

2. Θεσμικές εκθέσεις και διεθνείς οργανισμοί

- CINTRAN, 2024. Post-Lignite Era in Western Macedonia: Assessing the Socio-Economic Implications of Just Transition Funds. Policy Brief, March 2024. Carbon Intensive Regions in Transition (CINTRAN). https://pta.pdm.gr/wp-content/uploads/2024/03/20240325_CINTRAN_Policy-Brief-Western-Macedonia.pdf
- Copernicus Climate Change Service (C3S) and World Meteorological Organization (WMO), 2025. European State of the Climate 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://climate.copernicus.eu/esotc/2025>
- European Commission, 2019. The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final. Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640>
- European Commission, 2021. ‘Fit for 55’: Delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. COM(2021) 550 final. Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550>
- European Commission, 2022. REPowerEU Plan. Communication from the Commission. COM(2022) 230 final. Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52022DC0230>

European Commission, 2024. Just Transition Platform: Supporting Coal Regions in Transition. Brussels: European Commission.

https://ec.europa.eu/regional_policy/funding/just-transition-fund/just-transition-platform_en

European Commission, 2025. EU Climate Action Progress Report 2025. Brussels:

European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/progress-climate-action/eu-climate-action-progress-report-2025_en

European Environment Agency (EEA), 2022. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2022: An indicator-based report. EEA Report No 16/2022. Copenhagen:

European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/climate-change-impacts-risks-and-adaptation>

European Environment Agency (EEA), 2024. European Climate Risk Assessment. Copenhagen: European Environment Agency.

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-climate-risk-assessment>

International Energy Agency (IEA), 2022. World Energy Outlook 2022. Paris:

International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

International Energy Agency (IEA), 2024. World Energy Outlook 2024. Paris:

International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Climate Change 2023:

Synthesis Report. Geneva: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

OECD, 2024. Lessons from OECD Countries on Just Climate Transitions. Paris: OECD

Publishing. <https://doi.org/10.1787/357b63f7-en>

REN21, 2023. Renewables 2023 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.

<https://www.ren21.net/gsr-2023/>

World Meteorological Organization (WMO), 2025. State of the Global Climate 2024.

Geneva: WMO. https://wmo.int/sites/default/files/2025-03/WMO-1368-2024_en.pdf

3. Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Βούρας, Δ.Ν., Νικολάου, Ι. και Πελέκης, Π., 2021. Τεχνικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις απολιγνιτοποίησης στη Δυτική Μακεδονία. (Διπλωματική Εργασία), Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

ΔΕΗ / ADENS, 2020. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων λιγνιτικών περιοχών Κοζάνης και Πτολεμαΐδας. Αθήνα: ΔΕΗ Α.Ε.

ΔΕΗ Α.Ε., 2025. Τεχνική Έκθεση για την εξέλιξη των έργων εκμετάλλευσης και αποκατάστασης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας. Διεύθυνση Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας, Κλάδος Προγραμματισμού και Χαρτογραφίσεων Γης.

ΔΕΗ Α.Ε., 2025, Υδρογεωλογική Μελέτη για την Περιβαλλοντική παρακολούθηση και Διαχείριση του Υδατικού δυναμικού των ορυχείων Πτολεμαΐδας κατά το έτος 2024, Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων, Κλάδος Μεταλλευτικών Μελετών.

ΔΕΗ Α.Ε., 2026. Στοιχεία λειτουργίας και χωρικά δεδομένα ορυχείων Πτολεμαΐδας, stand 02.2026. Εσωτερικά στοιχεία ΔΕΗ Α.Ε.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), 2021, Δημογραφικά στοιχεία Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης 1951–2021. Αθήνα: ΕΛΣΤΑΤ. <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SAM03/->

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), 2021. Απογραφή Πληθυσμού και Κατοικιών 2021: Μόνιμος πληθυσμός. Αθήνα: ΕΛΣΤΑΤ. <https://www.statistics.gr/el/2021-census-pop-hous>

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), 2026. Κλιματολογικά δεδομένα σταθμού Κοζάνης 1955–2024. Αθήνα: ΕΜΥ.

Κυβερνητική Επιτροπή Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης, 2021. Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης Λιγνιτικών Περιοχών. Αθήνα. https://thegreentank.gr/wp-content/uploads/2021/07/202107_GreenTank_JustTransition_Governance_Report.pdf

Νόμος 4936/2022. Εθνικός Κλιματικός Νόμος – Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. ΦΕΚ Α' 105/27.05.2022. https://civilprotection.gov.gr/sites/default/files/2023-01/%CE%95%CE%B8%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%20%CE%9A%CE%BB%CE%B9%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%20%CE%9D%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%82%204936_2022.pdf

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), 2024. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα – Αναθεωρημένη Έκδοση. Αθήνα: ΥΠΕΝ. https://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/2024/08/%CE%95%CE%B8%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CE%A3%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%BF-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%B7%CE%BD-%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-%CE%9A%CE%BB%CE%AF%CE%BC%CE%B1-%CE%95%CE%A3%CE%95%CE%9A_%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%B8%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%B7%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7-%CE%AD%CE%BA%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7.pdf

4. Ηλεκτρονικές πηγές και βάσεις δεδομένων

Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), 2025 Στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Διαθέσιμο στο: <https://www.admie.gr/data-type/fortisi-monadon-kai-fortia-systimatos>

Copernicus Climate Change Service (C3S), χ.χ. ERA5 Reanalysis Dataset. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/>

Copernicus Land Monitoring Service, 2018. CORINE Land Cover (CLC) 2018. Available at: <https://land.copernicus.eu/en>

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), χ.χ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Available at: <https://www.ecmwf.int/>

Eurokinissi, 2022. *Ορυχεία λιγνίτη στην Πτολεμαΐδα*. Δημοσιεύθηκε στο [Powergame.gr](https://www.powergame.gr), στο άρθρο «Οι πρώτες ποσότητες λιγνίτη στην αυλή της 5ης Μονάδας Πτολεμαΐδας», 12 Αυγούστου 2022. Διαθέσιμο στο: <https://www.powergame.gr/ikonomia/290140/oi-protos-posotites-ligniti-stin-avli-tis-5is-monadas-ptolemaidas/>

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, χ.χ. Meteo.gr. Διαθέσιμο στο: <https://meteosearch.meteo.gr/data/index.cfm>

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), χ.χ. Κλιματολογικά δεδομένα. Διαθέσιμο στο: <https://www.emy.gr>.

Meteoblue, 2025, Climate diagrams and climate data for Kozani. Available at: https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/kozani_greece_735563

National Aeronautics and Space Administration (NASA), χ.χ. NASA POWER Data Access Viewer. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/>.

National Aeronautics and Space Administration (NASA), χ.χ. Landsat Missions. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας, χ.χ. Γενικά στοιχεία και χαρτογραφικό υλικό. Διαθέσιμο στο: <https://www.pdm.gov.gr/periferia/parousiasi-periferias/>

Topographic-map.com, 2026. Topographic Map. Available at: <https://en-us.topographic-map.com/map-vzmk51/>

Kozani/Buddiess.weebly.com, χ.χ. Educational diagrams and schematic illustrations. Available at: <https://buddiess.weebly.com/>