

**AGRO
FUTURE
CLIMATE STRESS**

**ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ
ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ
ΥΔΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ
ΚΑΙ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ
ΕΚΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΖΩΩΝ ΥΠΟ ΣΕΝΑΡΙΑ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ**

Σεπτέμβριος, 2025



Με τη χρηματοδότηση
της Ευρωπαϊκής Ένωσης
NextGenerationEU

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1.1 Καλλιέργειες και Εκτρεφόμενα Ζώα που Μελετήθηκαν.....	4
1.2 Τεχνικές Χαρτογράφησης που Εφαρμόστηκαν.....	7
1.3 Χαρτογράφηση της Καλλιέργειας Σιταριού και Ελιάς.....	9
1.4 Χαρτογράφηση της Εκτροφής Βοοειδών και Προβάτων.....	11
1.5 Σύντομη Παρουσίαση των Σεναρίων Κλιματικής Αλλαγής που Εξετάστηκαν.....	13
1.6 Μοντελικό Εργαλείο για την Προσομοίωση των Κλιματικών Συνθηκών.....	15
1.7 Δείκτης Αποτίμησης της Υδατικής Καταπόνησης που Εφαρμόστηκε.....	20
1.8. Δείκτες Αποτίμησης της Θερμικής Καταπόνησης που Εφαρμόστηκαν.....	23
2. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	25
2.1 Χαρτογράφηση της Υδατικής Καταπόνησης Χειμερινού Σιταριού και Ελιάς υπό Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής – Ενδεικτικά Αποτελέσματα.....	25
2.1.1 Χειμερινό Σιτάρι.....	25
2.1.2 Ελιά.....	26
2.2 Μέτρα Προσαρμογής και Καλές Πρακτικές για τη Μείωση της Τρωτότητας της Καλλιέργειας Φυτών από την Υδατική Καταπόνηση λόγω Κλιματικής Αλλαγής.....	27
2.2.1 Καλλιέργεια Σιταριού.....	27
2.2.2 Καλλιέργεια Ελιάς.....	31
3. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	40
3.1 Χαρτογράφηση της Θερμικής Καταπόνησης Προβάτων και Βοοειδών υπό Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής – Ενδεικτικά Αποτελέσματα.....	40
3.1.1 Πρόβατα.....	40
3.1.2 Βοοειδή.....	41
3.2 Μέτρα Προσαρμογής και Καλές Πρακτικές για τη Μείωση της Τρωτότητας της Εκτροφής Ζώων από τη Θερμική Καταπόνηση λόγω Κλιματικής Αλλαγής.....	43
3.2.1 Εκτροφή Προβάτων.....	47
3.2.2 Εκτροφή Βοοειδών.....	51
4. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	56
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	58
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	64

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τον αγροτικό τομέα στην Ελλάδα (κτηνοτροφία και καλλιέργειες). Η παρούσα ερευνητική εργασία εξετάζει πώς οι συνθήκες θερμικής καταπόνησης για τα δημοφιλή εκτρεφόμενα ζώα (αγελάδες και πρόβατα), και οι συνθήκες υδατικής καταπόνησης για τις δημοφιλείς καλλιέργειες (σιταριού και ελιάς) θα εξελιχθούν στο μέλλον λόγω της κλιματικής αλλαγής και προτείνει μέτρα προσαρμογής (Papanastasiou et al., 2024). Για το σκοπό αυτό, εφαρμόστηκε το περιοχικό κλιματικό μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF) με χωρική ανάλυση 10 χλμ. για την Ελλάδα, προκειμένου να προσομοιωθεί το παρόν κλίμα της χρονικής περιόδου αναφοράς (2005–2014) και εκείνο στο κοντινό μέλλον (2046–2055) υπό δύο κλιματικά σενάρια, το SSP2-4.5 (ενδιάμεσο σενάριο) και το SSP5-8.5 (χειρότερο σενάριο). Οι προσομοιώσεις βασίστηκαν στα διορθωμένα από σφάλματα δεδομένα που προήλθαν από 18 μοντέλα του Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6).

Η θερμική καταπόνηση των ζώων εκφράστηκε μέσω του Δείκτη Θερμοκρασίας-Υγρασίας (THI), ενώ η υδατική πίεση των καλλιεργειών μέσω του Δείκτη Υδατικής Καταπόνησης Καλλιέργειας (CWSI). Η χωρική κατανομή των διαφορών στις τιμές των δεικτών μεταξύ του μελλοντικού και του παρόντος κλίματος επέτρεψε τον εντοπισμό γεωγραφικών περιοχών όπου αναμένεται η αύξηση της καταπόνησης στα φυτά και τα ζώα θα είναι πιο έντονη. Αυτή η αύξηση αξιολογήθηκε συγκριτικά με πληροφορίες από την Ελληνική Στατιστική Αρχή για τις περισσότερες και λιγότερες δημοφιλείς Ελληνικές Περιφέρειες για την καλλιέργεια σιταριού και ελιάς, και για εκτροφή αγελάδων και προβάτων.

Βάσει της προαναφερόμενης ανάλυσης, προτείνονται μέτρα και καλές πρακτικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή στους γεωργούς για την καλλιέργεια σίτου και ελιάς, και στους κτηνοτρόφους για την εκτροφή αγελάδων και προβάτων, προκειμένου να μειωθούν οι επιπτώσεις στην επάρκεια και ασφάλεια τροφίμων, και στην αγροτική οικονομία και το εισόδημα λόγω των ενισχυμένων συνθηκών θερμικής και υδατικής καταπόνησης από την κλιματική αλλαγή. **Μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται:** (α) για τους γεωργούς: η διαχείριση υδάτων και η αποτελεσματική άρδευση, η εφαρμογή τεχνολογιών ακριβείας στη γεωργία, η εφαρμογή τεχνικών διατήρησης υγρασίας του εδάφους, η προσαρμογή των ημερομηνιών σποράς, η καλλιέργεια νέων ποικιλιών ανθεκτικών στην υδατική καταπόνηση, και (β) για τους κτηνοτρόφους: η εκτροφή ζωικών γενετικών τύπων ανθεκτικών στη θερμική καταπόνηση, η βελτίωση του σχεδιασμού των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων στέγασης των ζώων, οι τροποποιήσεις στη διατροφή των ζώων, και η εφαρμογή τεχνολογιών ακριβείας στην κτηνοτροφία.

ABSTRACT

Adaptation Measures to Reduce the Vulnerability of the Greek Agricultural Sector in Terms of Crops Water Stress and Livestock Thermal Stress under Climate Change Scenarios

Climate change is expected to significantly affect the agricultural sector in Greece (livestock and crops). This research study explores how the thermal stress conditions for popular farmed animals (i.e. cows and sheep) and the water stress conditions for popular crops (i.e. wheat and olive) will evolve in the future due to climate change and proposes adaptations measures (Papanastasiou et al., 2024). For this reason, the Weather Research and Forecasting (WRF) regional climate model was applied at 10km spatial resolution over Greece to simulate the reference (2005–2014) and the near future (2046–2055) climate under two climate scenarios, namely the SSP2-4.5 (intermediate) and the SSP5-8.5 (worst-case). Simulations were driven by a bias-corrected dataset based on 18 models of the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6).

Animal thermal stress was expressed through the Temperature Humidity Index (THI), while water stress through Crop Water Stress Index (CWSI). The spatial distribution of the differences in the indices values between future and present climate identified geographic areas where the increase of crop and livestock stress is expected to be more pronounced. This increase was comparatively assessed with information obtained from the Hellenic Statistical Authority that identified the more and less popular Greek Prefectures for wheat and olive cultivation and for cows and sheep breeding.

Based on the aforementioned analysis, measures and best practices are recommended for adapting to climate change for crop farmers cultivating wheat and olives, and for livestock farmers breeding cattle and sheep, in order to reduce the impacts on food security and availability, as well as on agricultural economies and income due to enhanced thermal and water stress conditions from climate change. **Among these, the following are included: (a) for crop farmers: water management and efficient irrigation, utilization of precision agriculture technologies, use of soil moisture conservation techniques, adjustment of sowing dates, cultivation of new varieties resistant to water stress, and (b) for livestock farmers: breeding heat-tolerant livestock genetic types, improvement of livestock housing design, nutritional management, and use of precision technologies in livestock farming.**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Καλλιέργειες και Εκτρεφόμενα Ζώα που Μελετήθηκαν

Το σιτάρι καλλιεργείται σχεδόν σε όλες τις χώρες του κόσμου, με κύρια ζώνη καλλιέργειας τις εύκρατες περιοχές της Γης. Ωστόσο, συναντάται και σε πολλές τροπικές και υποτροπικές χώρες. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το σιτάρι καλύπτει περίπου το 14% της καλλιεργούμενης γης (Food and Agriculture Organization, 2025), ενώ στην Ελλάδα το ποσοστό φτάνει περίπου στο 25%. Πρόκειται για φυτό που αναπτύσσεται σε θερμοκρασίες από 3–4°C έως 30–32°C, με ιδανική θερμοκρασία γύρω στους 25°C για πολλές φυσιολογικές λειτουργίες. Υψηλές θερμοκρασίες κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης καθυστερούν την άνθηση, ενώ θερμοκρασίες άνω των 32°C, 3–4 εβδομάδες μετά την άνθηση, διακόπτουν πρόωρα το γέμισμα του σπόρου και προκαλούν κακή γονιμοποίηση. Ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών και υψηλής σχετικής υγρασίας αυξάνει τις προσβολές από σκωρίαση. Το σιτάρι είναι πιο ανθεκτικό από το κριθάρι και τη βρώμη, αλλά πιο ευαίσθητο από τη σίκαλη στις χαμηλές θερμοκρασίες. Καλλιεργείται σε περιοχές με ετήσια βροχόπτωση από 250 έως 1.750 mm, συνήθως όμως σε περιοχές με 375–775 mm. Μπορεί να καλλιεργηθεί και σε ξηρότερες περιοχές (<250 mm), εφόσον εφαρμόζεται αγρανάπαυση ανά διετία. Η ιδανική ετήσια βροχόπτωση είναι 625–775 mm, με 10–15 mm να πέφτουν τους δύο μήνες πριν την ωρίμανση. Το σιτάρι μπορεί επίσης να καλλιεργηθεί σε μεγάλα υψόμετρα (Καραμάνος, 2008). Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες: το σκληρό σιτάρι, που χρησιμοποιείται για ζυμαρικά, και το μαλακό σιτάρι, που προορίζεται για ψωμί και αρτοσκευάσματα. Στην Ελλάδα, τη δεκαετία 2013–2022, η μέση ετήσια παραγωγή σκληρού σιταριού ήταν 812.000 τόνοι και μαλακού σιταριού 379.000 τόνοι, σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat. Η χώρα θεωρείται αυτάρκης στην παραγωγή σκληρού σιταριού, αλλά ελλειμματική στο μαλακό.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός, καταναλωτής και εξαγωγέας ελαιολάδου παγκοσμίως (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020), καλύπτοντας περίπου το 67% της παγκόσμιας παραγωγής. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση καλλιεργούνται περίπου 4 εκατομμύρια εκτάρια με ελαιόδεντρα, κυρίως στις Μεσογειακές χώρες, σε συστήματα παραδοσιακής, εντατικής και υπερεντατικής καλλιέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας του ΟΗΕ (Food and Agriculture Organization, 2024), η Ελλάδα είναι η τρίτη μεγαλύτερη ελαιοπαραγωγός χώρα στον κόσμο, μετά την Ιταλία και την Ισπανία. Ωστόσο, ως προς την ποιότητα, κατατάσσεται πρώτη διεθνώς, καθώς σύμφωνα με στοιχεία του Enterprise Greece, πάνω από το 70% της ελληνικής παραγωγής είναι «εξαιρετικά παρθένο ελαιόλαδο». Η Ιταλία και η Ισπανία είναι οι μεγαλύτεροι καταναλωτές στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με περίπου 500.000 τόνους ετησίως η καθεμία, ενώ η Ελλάδα έχει τη μεγαλύτερη κατά κεφαλήν κατανάλωση, περίπου 12 κιλά ανά άτομο τον χρόνο. Συνολικά, η Ευρωπαϊκή Ένωση αντιπροσωπεύει περίπου το 53% της παγκόσμιας κατανάλωσης.

Στην Ελλάδα καλλιεργούνται πάνω από 132 εκατομμύρια ελαιόδεντρα, από τα οποία παράγονται σε κανονικές χρονιές περίπου 300.000 τόνοι ελαιολάδου, εκ των οποίων το 70-80% είναι «εξαιρετικά παρθένο», όταν στην Ισπανία το ποσοστό είναι 25%-30%, και στην Ιταλία 40%-45%. Περίπου το μισό της ελληνικής παραγωγής εξάγεται σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι σημαντικότερες ελαιοπαραγωγικές περιοχές είναι η Πελοπόννησος (65% της παραγωγής), η Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου. Η ελιά είναι ανθεκτικό στην ξηρασία είδος που μπορεί να αναπτυχθεί σε ποικιλία εδαφικών και κλιματικών συνθηκών, κυρίως σε περιοχές με Μεσογειακό κλίμα, δηλαδή ήπιους, βροχερούς χειμώνες και ξηρά, θερμά καλοκαίρια. Οι κατάλληλες περιοχές έχουν μέση θερμοκρασία 15–20°C, με ελάχιστη 4°C και μέγιστη 40°C, ενώ θερμοκρασίες κάτω από -7°C προκαλούν σοβαρές ζημιές.

Υψηλά υψόμετρα δεν είναι κατάλληλα λόγω κινδύνου παγετού και μικρότερης βλαστικής περιόδου· στις Μεσογειακές χώρες η καλλιέργεια δεν ξεπερνά τα 600–800 μέτρα. Η ελιά είναι λιγότερο ευαίσθητη στους ανέμους σε σχέση με άλλα δέντρα, αλλά οι θερμοί και ξηροί άνεμοι κατά την άνθηση και καρπόδεση πρέπει να αποφεύγονται. Η υψηλή υγρασία ευνοεί ασθένειες, ενώ βροχερές περίοδοι με υψηλές θερμοκρασίες στις αρχές καλοκαιριού ή τον Σεπτέμβριο αυξάνουν τον πληθυσμό του δάκου. Τέλος, οι έντονες ανοιξιάτικες βροχές απομακρύνουν τη γύρη, μειώνοντας την καρπόδεση. Ο κτηνοτροφικός τομέας αποτελεί βασικό πυλώνα της ελληνικής οικονομίας, καθώς παράγει τρόφιμα υψηλής διατροφικής και βιολογικής αξίας, συμβάλλοντας σημαντικά στο εθνικό προϊόν. Η ζωική παραγωγή έχει ιδιαίτερη οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική σημασία, καθώς πρόκειται για πολυλειτουργική δραστηριότητα που αξιοποιεί ορεινές περιοχές, ακατάλληλες για άλλες χρήσεις. Η σημασία της για την ανάπτυξη της χώρας αποδεικνύεται και από το γεγονός ότι συνεισφέρει στο 29,7% της συνολικής ακαθάριστης αξίας της αγροτικής παραγωγής. Στον κλάδο απασχολούνται δεκάδες χιλιάδες εργαζόμενοι, τόσο στην πρωτογενή παραγωγή όσο και στη μεταποίηση (βιομηχανίες ζωοτροφών, γαλακτοβιομηχανίες, σφαγεία, μεταφορές, εφοδιαστική αλυσίδα). Η συμβολή της κτηνοτροφίας στην οικονομία διαφοροποιείται ανάλογα με τον κλάδο παραγωγής. Η αιγοπροβατοτροφία είναι ο σημαντικότερος κλάδος, με την Ελλάδα να κατέχει την πρώτη θέση στην Ευρωπαϊκή Ένωση στον αριθμό αιγών και την τέταρτη στα πρόβατα. Η οικονομική της σημασία αποτυπώνεται στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων γαλακτοκομικών προϊόντων υψηλής εξαγωγικής αξίας (φέτα, γιαούρτι). Επιπλέον, η προβατοτροφία είναι ο μόνος κλάδος με θετικό ρυθμό ανάπτυξης, προσφέροντας εισόδημα και εργασία σε χιλιάδες οικογένειες σε ορεινές και απομακρυσμένες περιοχές. Αντίθετα, η βοοτροφία (γαλακτοπαραγωγική και κρεοπαραγωγική), παρά το υψηλότερο επίπεδο τεχνογνωσίας, εμφανίζει χαμηλή ανταγωνιστικότητα και χαμηλά ποσοστά αυτάρκειας (40% στο γάλα και μόλις 15–20% στο βόειο κρέας), με συνεχή μείωση της εγχώριας παραγωγής τα τελευταία χρόνια. Τα πρόβατα είναι πολυπαραγωγικά ζώα (γάλα, κρέας, μαλλί), με την παραγωγή να εξαρτάται

από τη φυλή, τις εδαφοκλιματικές συνθήκες και το σύστημα εκτροφής. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το 2018, η Μεγάλη Βρετανία κατείχε το 29,8% του πληθυσμού προβάτων, η Ισπανία 21,2%, η Ιταλία και η Γαλλία από 9,6%. Η παραγωγή γάλακτος στην Ευρώπη προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από αγελάδες (97,6%), ενώ το πρόβειο γάλα αντιστοιχεί μόλις στο 1,3%. Παρά τη μικρή συμμετοχή, γίνονται προσπάθειες αύξησης της παραγωγής μέσω βελτίωσης του ζωικού κεφαλαίου. Η Ελλάδα παράγει το 31,9% του πρόβειου γάλακτος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ακολουθούμενη από την Ισπανία (25,8%), την Ιταλία (22,9%) και τη Γαλλία (14,2%). Στην Ελλάδα, η παραγωγή αιγοπρόβειου γάλακτος είναι σχεδόν διπλάσια από εκείνη αγελαδινού γάλακτος (μοναδική περίπτωση στην Ευρωπαϊκή Ένωση), κατατάσσοντας τη χώρα πρώτη στην παραγωγή αιγοπρόβειου γάλακτος, χωρίς προβλήματα διάθεσης. Το 85% του γάλακτος κασίικας χρησιμοποιείται για τυροκομία, με τη φέτα να ξεχωρίζει, καταλαμβάνοντας την 5η θέση ανάμεσα στα 251 τυριά ΠΟΠ της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Συνολικά, η καλλιέργεια των συγκεκριμένων φυτών (σιτάρι και ελιά), και η εκτροφή των συγκεκριμένων ζώων (βοοειδή και πρόβατα) είναι κρίσιμες για την επισιτιστική επάρκεια και ασφάλεια, επηρεάζοντας σημαντικούς τομείς της αγροτικής οικονομίας και του αγροτικού εισοδήματος. Η διασφάλιση της συνέχισης αυτών των δραστηριοτήτων απέναντι στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αποτελεί σοβαρή πρόκληση για το μέλλον, την οποία στοχεύει να αντιμετωπίσει η παρούσα ερευνητική εργασία.

1.2 Τεχνικές Χαρτογράφησης που Εφαρμόστηκαν

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) αναγνωρίζονται ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη χαρτογράφηση, εντοπισμό και ανάλυση χωρικών προτύπων. Τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται στην κατανόηση χωρικών επιπτώσεων εξαιτίας κοινωνικών και οικονομικών αλλαγών, καθώς και στην παρακολούθηση επιπτώσεων σε διάφορες κλίμακες (από την τοπική έως και την περιφερειακή), καθιστώντας τα βασικό αρωγό στην αξιολόγηση και στη λήψη αποφάσεων ιδιαίτερα σε σύνθετα ζητήματα. Η επιστήμη των ΓΣΠ παρέχει μεθόδους και εργαλεία για ανάλυση και προσομοίωση σύνθετων φαινομένων. Ειδικότερα, ενσωματώνουν λειτουργίες, όπως τα χωρικά ερωτήματα σε γεωγραφικές βάσεις δεδομένων και η στατιστική ανάλυση, οι οποίες συνδυάζονται με την οπτικοποίηση και τη χαρτογραφία.

Στις νέες προσεγγίσεις αγροτικού σχεδιασμού, η επιστήμη των ΓΣΠ θεωρείται πολύ χρήσιμο και υποστηρικτικό εργαλείο για τους υπεύθυνους διαχείρισης φυσικών πόρων και για τους ερευνητές (Ran and Bo, 2013; Mishra et al., 2017; Kurowska et al., 2021). Οι εφαρμογές των ΓΣΠ που συνδέονται άμεσα με τη διαχείριση του περιβάλλοντος και τα ζητήματα αγροτικής ανάπτυξης περιλαμβάνουν τη χαρτογράφηση φυσικών πόρων, καθώς και την ενσωμάτωση της τοπικής και επιστημονικής χωρικής γνώσης (Goussios and Faraslis, 2022). Επίσης, με τη δημιουργία χαρτογραφικών υποβάθρων χρονικών σειρών, τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ξηρασίας και της κατάστασης της βλάστησης με στόχο την παρακολούθηση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Ghobadi and Badehian, 2017; Villani et al., 2022). Παράλληλα, εκτεταμένη χρήση των ΓΣΠ διαπιστώνεται στη διεθνή βιβλιογραφία για την διερεύνηση της υδατικής καταπόνησης των φυτών και της θερμικής καταπόνησης των ζώων (ενδεικτικά: Marinho et al., 2023; Emmerichs et al., 2024).

Στην παρούσα ερευνητική εργασία, η επεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων έγινε με τη χρήση του λογισμικού Arcgis pro (έκδοση 3.5) (<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>). Πρόκειται για μια ολοκληρωμένη, ευέλικτη και ισχυρή πλατφόρμα υποστήριξης πολλαπλών μορφών γεωχωρικών δεδομένων της εταιρείας ESRI, η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο για περισσότερα από πενήντα έτη. Το λογισμικό Arcgis pro (μαζί με αρκετές επεκτάσεις του) έχει αγοραστεί από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και διατίθεται σε όλα τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητάς του στην πλήρη έκδοσή του (ArcGIS Pro Advanced). Στην παρούσα ερευνητική εργασία για την εκτίμηση τιμών σε σημεία στα οποία δεν υπήρχαν μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η παρεμβολή αντίστροφης απόστασης (Inverse Distance Weighting, IDW). Η IDW είναι μια μέθοδος χωρικής παρεμβολής όπου η τιμή ενός σημείου υπολογίζεται ως σταθμισμένος μέσος όρος των γνωστών τιμών γειτονικών σημείων (Liu et al., 2021). Η μέθοδος αυτή θεωρείται κατάλληλη για την εκτίμηση τιμών σε μεγάλες περιοχές με πυκνά και ομοιόμορφα κατανομημένα σημεία δεδομένων, όπως συνέβη στην παρούσα εργασία, στην οποία υπήρχε δίκτυο καννάβου γνωστών τιμών δεικτών με διαστάσεις $10 \times 10 \text{ km}^2$ (Camera et al., 2014). Η χαρτογράφηση που παράχθηκε στην παρούσα ερευνητική εργασία περιλαμβάνει δύο βασικές ενότητες:

1

Χαρτογράφηση της έκτασης των καλλιεργειών σιταριού και ελιάς, καθώς και του αριθμού των εκτρεφόμενων βοοειδών και προβάτων, στην Ελλάδα, σε επίπεδο Περιφερειακών Ενοτήτων. Για αυτή ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

(α) Κωδικοποίηση στατιστικών πληροφοριών σε γεωγραφική βάση δεδομένων. Οι στατιστικές πληροφορίες αντλήθηκαν σε μορφή πίνακα από την Ελληνική Στατιστική Αρχή, μετασχηματίστηκαν σε γεωγραφική πληροφορία και ενσωματώθηκαν στην πολυγωνική δομή, η οποία περιγράφει τα όρια των Περιφερειακών Ενοτήτων.

(β) Ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιώντας τεχνικές χαρτογραφικής απόδοσης – οπτικοποίησης, χρωματική κωδικοποίηση με στόχο την ιεράρχηση της πληροφορίας και την καλύτερη ανάγνωση και ερμηνεία των δεδομένων. Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε η τεχνική ομαδοποίησης των δεδομένων Natural Breaks (Jenks) σε πέντε κατηγορίες. Η συγκεκριμένη χρωματική μέθοδος ταξινόμησης επιλέχθηκε γιατί διαχωρίζει τα δεδομένα σε κατηγορίες με βάση την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης εντός της κάθε κατηγορίας, καθώς και τη μεγιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ των κατηγοριών, δημιουργώντας έτσι ομάδες δεδομένων όσο το δυνατόν πιο ομοιογενείς (Chen et al., 2013).

2

Χαρτογράφηση της υδατικής καταπόνησης του σιταριού και της ελιάς, καθώς και της θερμικής καταπόνησης των βοοειδών και των προβάτων, υπό σενάρια κλιματικής αλλαγής, χρησιμοποιώντας δίκτυο καννάβου γνωστών τιμών σχετικών δεικτών καταπόνησης $10 \times 10 \text{ km}^2$. Για αυτήν ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

(α) Κωδικοποίηση των τιμών καννάβου (σημειακές τιμές δεικτών καταπόνησης) διαστάσεων $10 \times 10 \text{ km}^2$ σε γεωγραφική βάση δεδομένων. Οι τιμές των μεταβλητών με τις αντίστοιχες συντεταγμένες μετασχηματίστηκαν από αρχείο σε μορφή πίνακα σε σημειακό μορφότυπο, δηλαδή σε χωρικά δεδομένα που αναπαρίστανται ως σημεία στον χώρο.

(β) Ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής IDW που περιγράφηκε παραπάνω για τη μετατροπή των αρχικών σημειακών τιμών των μεταβλητών του καννάβου σε τιμές εικονοστοιχείων (pixels). Έτσι δημιουργήθηκαν αρχεία πλέγματος (raster), όπου κάθε σημείο του χώρου είχε μια τιμή με διαστάσεις pixel $10 \times 10 \text{ km}^2$.

(γ) Χαρτογραφική απόδοση και χρωματική κωδικοποίηση με στόχο την ιεράρχηση της πληροφορίας και την καλύτερη ανάγνωση και ερμηνεία των δεδομένων. Ο διαχωρισμός των ομάδων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική ερμηνεία του κάθε δείκτη καταπόνησης, καθώς και το ιστόγραμμα του κάθε raster αρχείου στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών των pixel. Τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε 4 κατηγορίες για κάθε δείκτη καταπόνησης που μελετήθηκε.

1.3 Χαρτογράφηση της Καλλιέργειας Σιταριού και Ελιάς

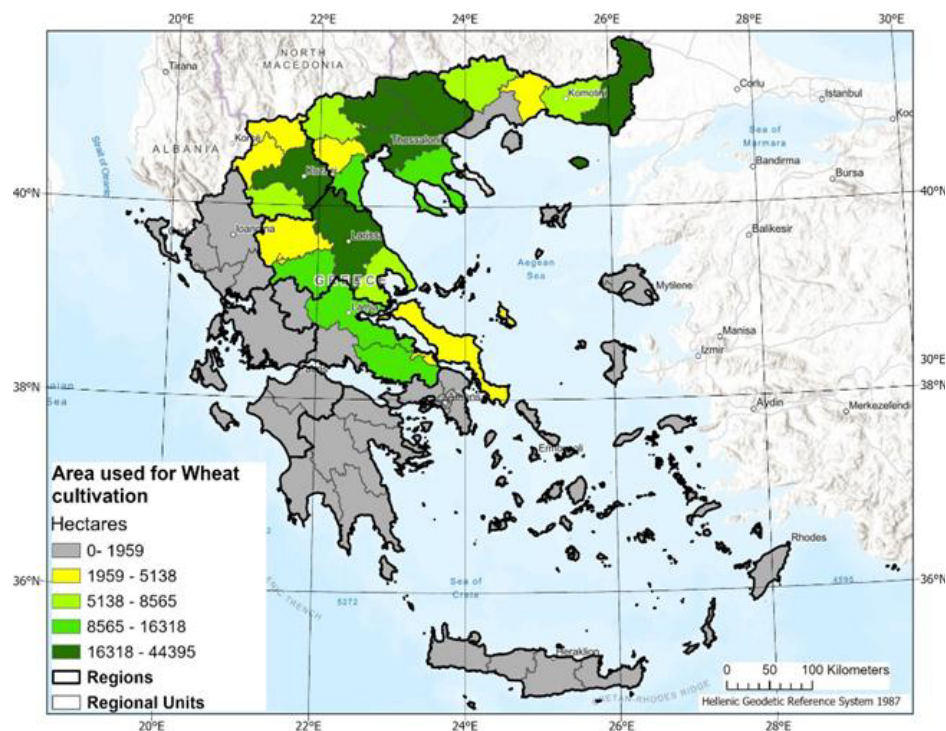
Στα Σχήματα 1.3.1 και 1.3.2 παρουσιάζεται η έκταση κάθε Νομού της χώρας που χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια χειμερινού σιταριού (μαλακό, ημίσκληρο και σκληρό) και ελιάς (για παραγωγή ελαιολάδου και επιτραπέζιας ελιάς), αντίστοιχα. Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την Απογραφή Γεωργίας – Κτηνοτροφίας, έτους 2020, της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2020α).

Από το Σχήμα 1.3.1 προκύπτει ότι το σιτάρι καλλιεργείται κυρίως στο κεντρικό και βόρειο μέρος της ανατολικής Ελλάδας. Οι 4 Περιφέρειες με τη μεγαλύτερη έκταση καλλιέργειας σιταριού είναι οι (κατά φθίνουσα σειρά): Κεντρικής Μακεδονίας (1.144.400,3 στρέμματα), Θεσσαλίας (680.337,4 στρέμματα), Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (446.685,3 στρέμματα), και Δυτικής Μακεδονίας (445.634,1 στρέμματα), (1 εκτάριο = 10 στρέμματα). Οι αριθμοί αυτοί αντιστοιχούν περίπου στο 36%, 21%, 14% και 14% της έκτασης καλλιέργειας σιταριού όλης της χώρας (3.202.645,6 στρέμματα). Αξίζει να σημειωθεί η καλλιέργεια σημαντικής έκτασης σιταριού που παρατηρείται στους Νομούς Φθιώτιδας και Βοιωτίας, οι οποίοι δε συμπεριλαμβάνονται στις παραπάνω 4 Περιφέρειες.

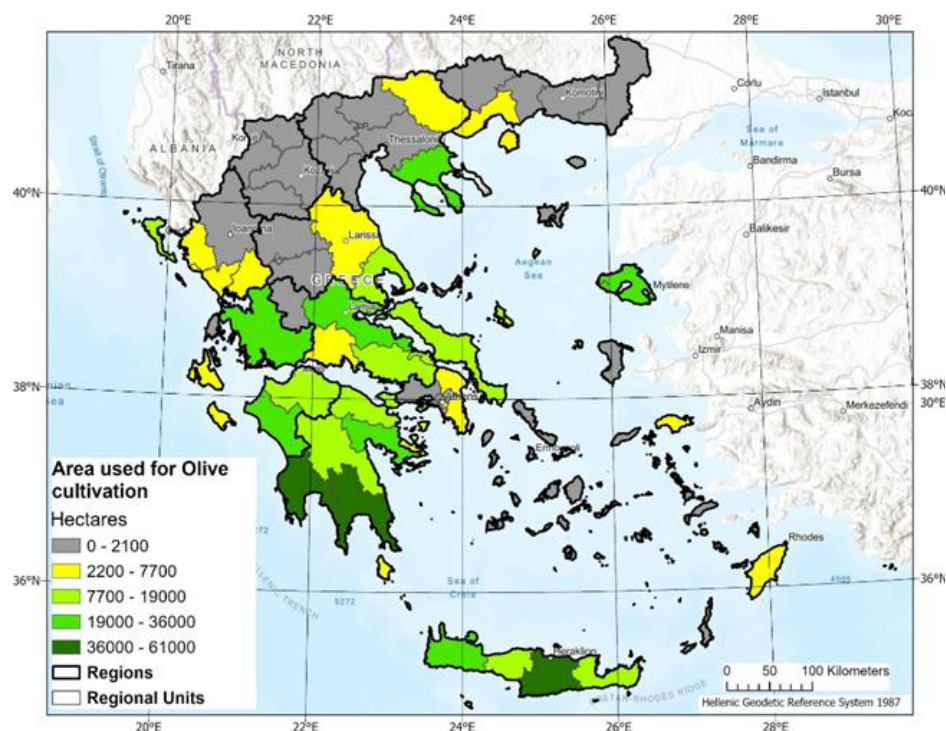
Από το Σχήμα 1.3.2 προκύπτει ότι η ελιά καλλιεργείται κυρίως στην κεντρική και νότια Ελλάδα. Οι 4 Περιφέρειες με τη μεγαλύτερη έκταση καλλιέργειας ελαιόδεντρων είναι οι (κατά φθίνουσα σειρά): Πελοποννήσου (1.485.596,8 στρέμματα), Κρήτης (1.229.714,4 στρέμματα), Δυτικής Ελλάδας (732.901,5 στρέμματα), και Στερεάς Ελλάδας (608.571,1 στρέμματα), (1 εκτάριο = 10 στρέμματα). Οι αριθμοί αυτοί αντιστοιχούν περίπου στο 25%, 21%, 13% και 10% της έκτασης καλλιέργειας ελαιόδεντρων όλης της χώρας (5.842.422,6 στρέμματα). Αξίζει να σημειωθεί η καλλιέργεια σημαντικής έκτασης ελαιόδεντρων που παρατηρείται στους Νομούς Χαλκιδικής και Λέσβου, οι οποίοι δε συμπεριλαμβάνονται στις παραπάνω 4 Περιφέρειες.

OLIVE CULTIVATION





Σχήμα 1.3.1: Έκταση ανά Νομό της χώρας που χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια σιταριού.



Σχήμα 1.3.2: Έκταση ανά Νομό της χώρας που χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια ελιάς.

1.4 Χαρτογράφηση της Εκτροφής Βοοειδών και Προβάτων

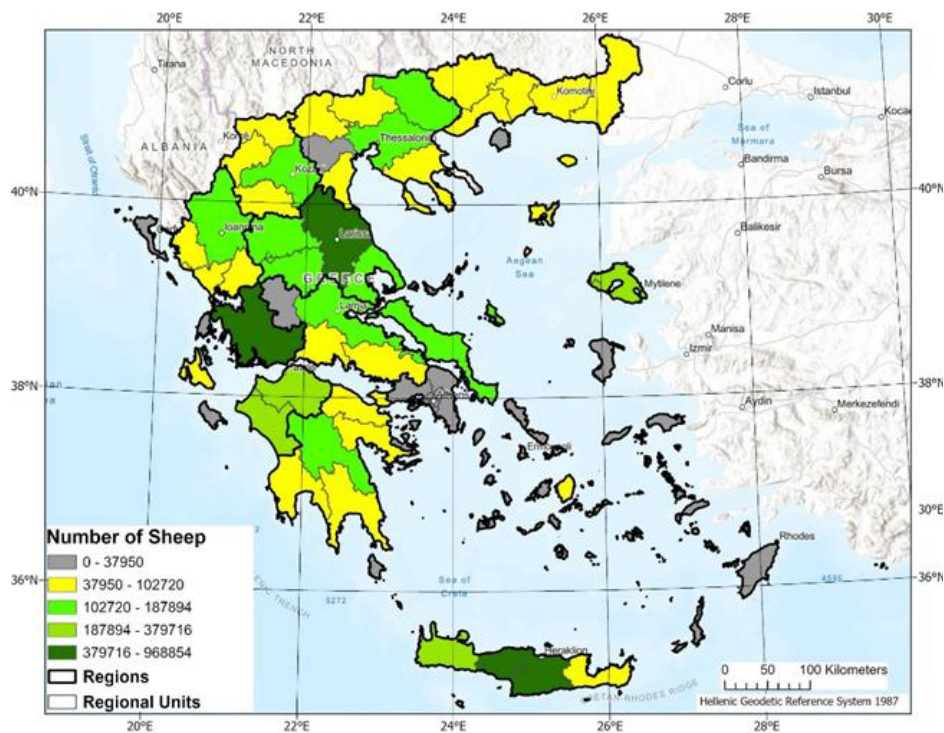
Στα Σχήματα 1.4.1 και 1.4.2 παρουσιάζεται ο αριθμός των προβάτων και των βοοειδών, αντίστοιχα, που εκτρέφονται σε κάθε Νομό της χώρας. Τα στατιστικά στοιχεία αντλήθηκαν από την Απογραφή Γεωργίας – Κτηνοτροφίας, έτους 2020, της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2020b).

Από το Σχήμα 1.4.1 προκύπτει ότι η προβατοτροφία είναι μια κτηνοτροφική δραστηριότητα που παρατηρείται γενικά σε όλη τη χώρα. Οι 3 Περιφέρειες με τον μεγαλύτερο αριθμό εκτρεφόμενων προβάτων είναι οι (κατά φθίνουσα σειρά): Κρήτης (1.936.032 ζώα), Δυτικής Ελλάδας (1.269.281 ζώα), και Θεσσαλίας (988.472 ζώα). Οι αριθμοί αυτοί αντιστοιχούν περίπου στο 26%, 17% και 13% του αριθμού των προβάτων που εκτρέφονται συνολικά στη χώρα (7.576.088 ζώα). Αξίζει να σημειωθεί η εκτροφή σημαντικού αριθμού προβάτων που παρατηρείται στους Νομούς Αχαΐας και Λέσβου, οι οποίοι δε συμπεριλαμβάνονται στις παραπάνω 3 Περιφέρειες.

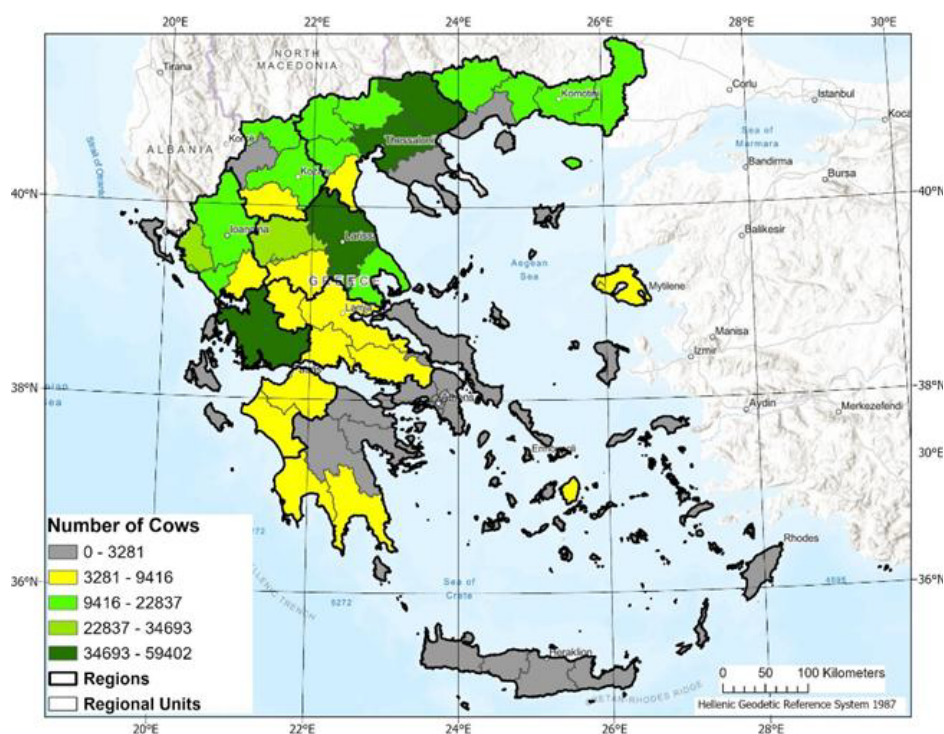
Από το Σχήμα 1.4.2 προκύπτει ότι η εκτροφή βοοειδών είναι μια κτηνοτροφική δραστηριότητα που είναι περισσότερο δημοφιλής στην κεντρική και βόρεια Ελλάδα. Οι 3 Περιφέρειες με τον μεγαλύτερο αριθμό εκτρεφόμενων βοοειδών είναι οι (κατά φθίνουσα σειρά): Κεντρικής Μακεδονίας (150.873 ζώα), Θεσσαλίας (116.721 ζώα), και Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (87.261 ζώα). Οι αριθμοί αυτοί αντιστοιχούν περίπου στο 25%, 19% και 14% του αριθμού των βοοειδών προβάτων που εκτρέφονται συνολικά στη χώρα (612.885 ζώα). Αξίζει να σημειωθεί η εκτροφή πολύ σημαντικού αριθμού βοοειδών που παρατηρείται στον Νομό Αιτωλοακαρνανίας, ο οποίος δε συμπεριλαμβάνεται στις παραπάνω 3 Περιφέρειες.



**SHEEP
BREEDING**



Σχήμα 1.4.1: Αριθμός προβάτων που εκτρέφονται σε κάθε Νομό της χώρας.



Σχήμα 1.4.2: Αριθμός βοοειδών που εκτρέφονται σε κάθε Νομό της χώρας.

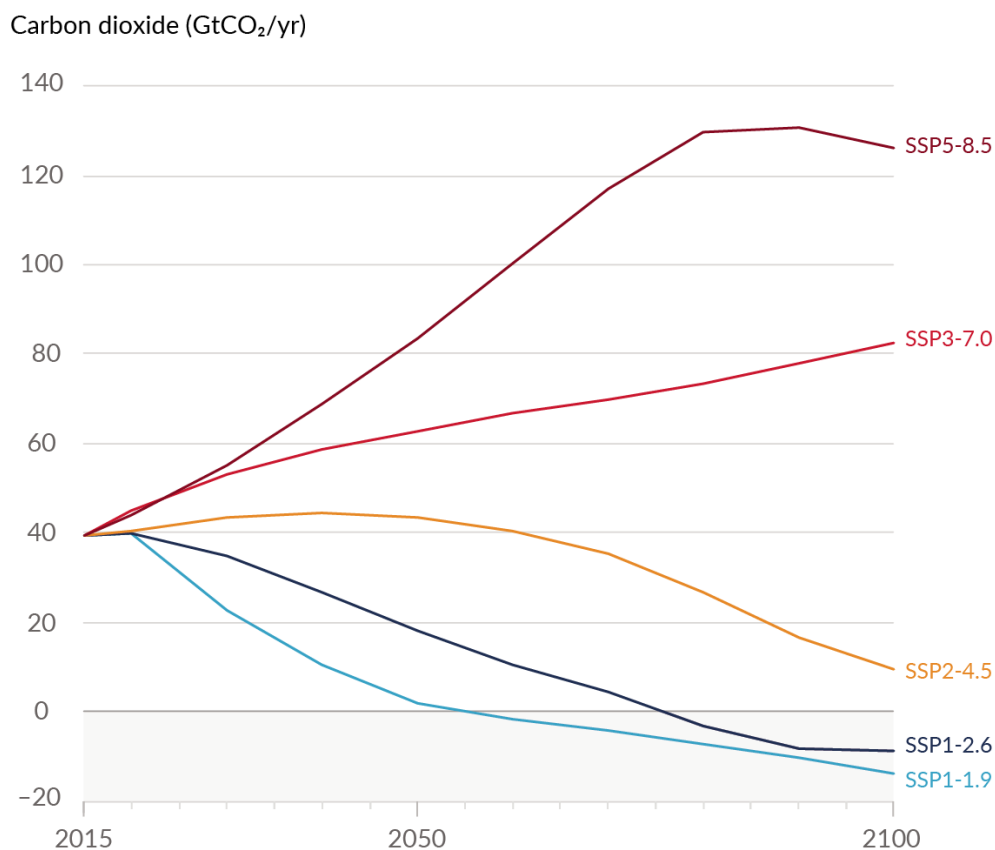
1.5 Σύντομη Παρουσίαση των Σεναρίων Κλιματικής Αλλαγής που Εξετάστηκαν

Για την εκτίμηση των μελλοντικών κινδύνων της κλιματικής αλλαγής και τη καθοδήγηση της λήψης έγκαιρων πολιτικών αποφάσεων, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) χρησιμοποιεί μια ποικιλία σεναρίων που απεικονίζουν τις πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις της κοινωνίας όσον αφορά στις εκπομπές θερμοκηπικών αερίων. Το πιο πρόσφατο πλαίσιο σεναρίων που έχει υιοθετήσει η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή και το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην 6^η Έκθεση Αξιολόγησης για την κλιματική αλλαγή είναι αυτό των Shared Socioeconomic Pathways (SSP) (Riahi et al., 2017; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Τα σενάρια αυτά παράγονται στηριζόμενα σε εκτιμήσεις μελλοντικής εξέλιξης κοινωνικοοικονομικών παραγόντων όπως η πληθυσμιακή αύξηση, η οικονομική ανάπτυξη και η αστικοποίηση, καθώς και σε εκτιμήσεις για το βαθμό παρέμβασης των δημοσίων αρχών με πολιτικές μείωσης των εκπομπών ρύπων.

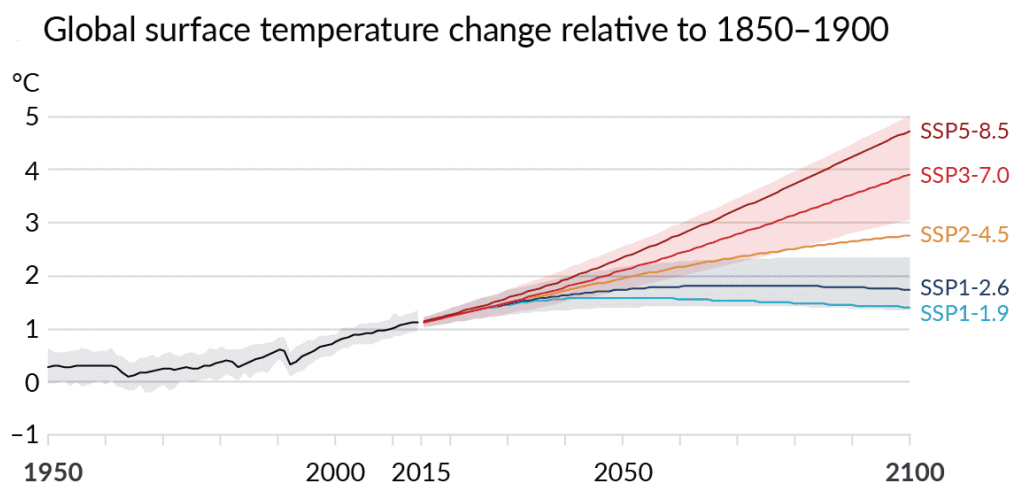
Ως αποτέλεσμα, καλύπτει ένα μεγάλο εύρος πιθανών εκβάσεων των μελλοντικών εκπομπών, καθώς και της συνεπαγόμενης θερμοκρασιακής αύξησης μέχρι τα τέλη του τρέχοντος αιώνα, που κυμαίνονται από σενάρια με επίκεντρο τη βιώσιμη ανάπτυξη έως και σενάρια βασισμένα σε ανάπτυξη στηριζόμενη σε ορυκτά καύσιμα. Το Σχήμα 1.5.1 απεικονίζει την προβλεπόμενη εξέλιξη των εκπομπών CO₂ υπό κάθε σενάριο SSP, υπογραμμίζοντας τις διαφορετικές πορείες με βάση τις ποικίλες κοινωνικοοικονομικές υποθέσεις και τις προσπάθειες μετριασμού. Αντίστοιχα, το Σχήμα 1.5.2 παρουσιάζει τις αντίστοιχες μεταβολές στη μέση παγκόσμια θερμοκρασία επιφάνειας σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, αναδεικνύοντας τις σημαντικές μακροπρόθεσμες κλιματικές επιπτώσεις αυτών των διαφορετικών κατευθύνσεων εκπομπών.



CLIMATE
CHANGE
SCENARIOS



Σχήμα 1.5.1: Μελλοντικές ετήσιες εκπομπές CO₂ ανά σενάριο SSP (Πηγή: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).



Σχήμα 1.5.2: Μεταβολή της παγκόσμιας θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια σε σχέση με την περίοδο 1850–1900 ανά σενάριο SSP (οι σκιάσεις αντιπροσωπεύουν το εύρος της αβεβαιότητας) (Πηγή: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, επιλέχθηκαν δύο σενάρια εκπομπών ως αντιπροσωπευτικά της μελλοντικής θέρμανσης:

- Το SSP2-4.5, το οποίο συχνά αναφέρεται και ως το σενάριο ‘μέσης οδού’, το οποίο θεωρείται ένα εύλογο, ενδιάμεσο σενάριο χωρίς ακραίες μετατοπίσεις προς τη βιωσιμότητα, αλλά και χωρίς τη διατήρηση των σημερινών πρακτικών. Το σενάριο αυτό ενσωματώνει πολιτικές μετριασμού και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, με αποτέλεσμα ο εξαναγκασμός ακτινοβολίας (radiative forcing) να φτάνει τα 4.5 W/m² έως το 2100.
- Το SSP5-8.5, ένα σενάριο υψηλών εκπομπών, το οποίο βασίζεται στην κατεύθυνση της ανάπτυξης με επίκεντρο τα ορυκτά καύσιμα. Προβλέπει ισχυρή πληθυσμιακή αύξηση και υψηλή κατανάλωση ενέργειας, με ελάχιστη έμφαση στη βιωσιμότητα ή τη μείωση των εκπομπών. Ο εξαναγκασμός ακτινοβολίας σε αυτό το σενάριο φτάνει τα 8.5 W/m² έως το 2100, και χρησιμοποιείται ως το χειρότερο δυνατό σενάριο για τις κλιματικές προβλέψεις.

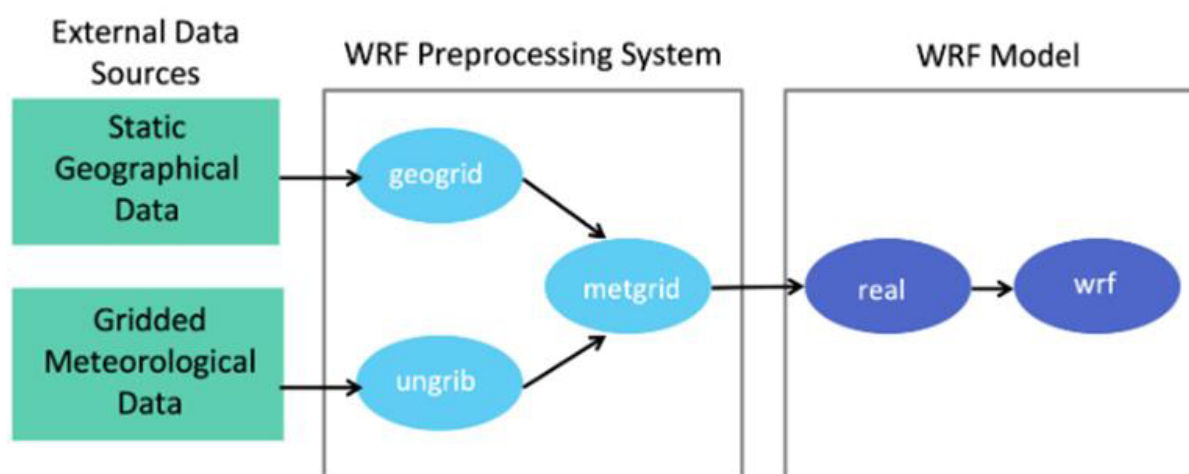
Η εξέταση των δύο αυτών σεναρίων αποσκοπεί στην εκτίμηση του εύρους των εκβάσεων της κλιματικής αλλαγής και των αντίστοιχων επιπτώσεων σε βασικές μετεωρολογικές και κλιματικές παραμέτρους στην περιοχή της Ελλάδας.

1.6 Μοντελικό Εργαλείο για την Προσομοίωση των Κλιματικών Συνθηκών

Το μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF) είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα για ατμοσφαιρική μοντελοποίηση, το οποίο χρησιμοποιείται για ερευνητικούς σκοπούς και για αριθμητική πρόγνωση καιρού (Skamarock et al., 2008). Αναπτύχθηκε συνεργατικά από ιδρύματα όπως το National Center for Atmospheric Research (NCAR), το National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ και άλλους φορείς, και εξυπηρετεί ακαδημαϊκές, κυβερνητικές και εμπορικές εφαρμογές. Η βασική διαμόρφωση του μοντέλου, το Advanced Research WRF (ARW), ενσωματώνει έναν εξειδικευμένο επιλυτή εξισώσεων δυναμικής σε συνδυασμό με σχήματα φυσικής, αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των εξισώσεων, διαδικασίες αρχικοποίησης των προσομοιώσεων, και το σύστημα αφομοίωσης δεδομένων WRFDA. Το ARW υποστηρίζει εφαρμογές όπως επιχειρησιακή πρόγνωση σε πραγματικό χρόνο, μελέτες καιρού και ατμόσφαιρας, αφομοίωση δεδομένων, μοντελοποίηση περιφερειακού κλίματος, ανάλυση ποιότητας αέρα, και συζευγμένες προσομοιώσεις ατμόσφαιρας-ωκεανού.

Το μοντέλο WRF μπορεί να εκτελεστεί τόσο για εξιδανικευμένες περιπτώσεις, όσο και για περιπτώσεις με πραγματικά δεδομένα. Το Σχήμα 1.6.1 απεικονίζει τα επιμέρους στοιχεία και τη ροή δεδομένων στο σύστημα μοντελοποίησης WRF για την περίπτωση προσομοιώσεων με πραγματικά δεδομένα. Το Σύστημα Προεπεξεργασίας WRF (WPS) αποτελείται από τρία προγράμματα που έχουν σχεδιαστεί για να προετοιμάζουν τα δεδομένα εισόδου για το πρόγραμμα real.exe, το οποίο χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις με πραγματικά δεδομένα. Οι κύριες λειτουργίες του WPS είναι ο καθορισμός των περιοχών προσομοίωσης, η παρεμβολή γεωγραφικών δεδομένων (π.χ. υψομετρικά δεδομένα, χρήση γης και τύποι εδάφους) στο πλέγμα προσομοίωσης, και η επεξεργασία και παρεμβολή μετεωρολογικών δεδομένων από εξωτερικά μοντέλα στο πλέγμα της προσομοίωσης.

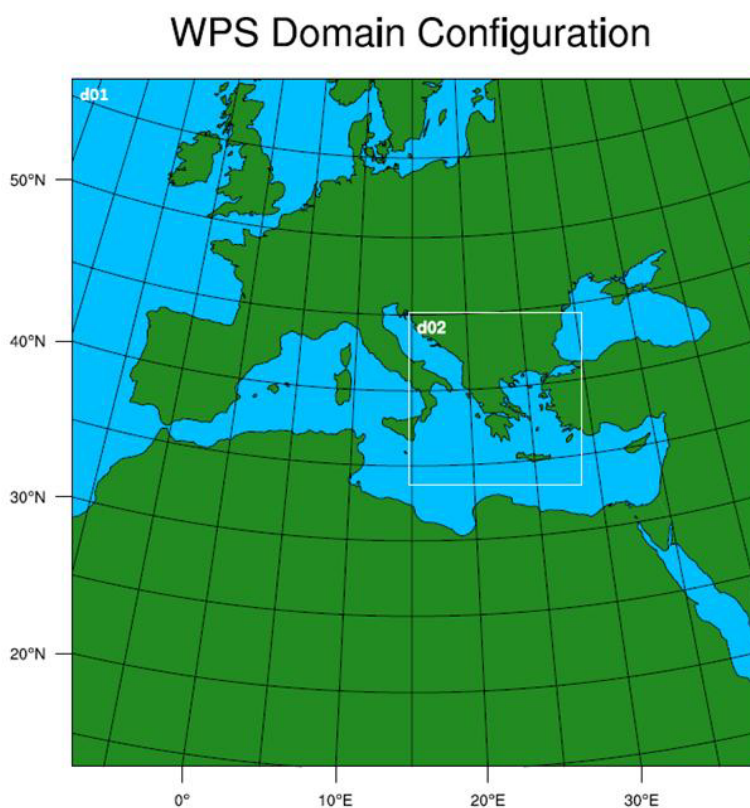
Για τις προσομοιώσεις με πραγματικά δεδομένα, τα δεδομένα εισόδου προέρχονται από κάποια παγκόσμια ανάλυση ή κάποιο παγκόσμιο προγνωστικό μοντέλο. Το πρόγραμμα `real.exe` χρησιμοποιεί τα διδιάστατα (2-D) δεδομένα εξόδου του WPS για να εκτελέσει κατακόρυφη παρεμβολή και να τα μετατρέψει σε τρισδιάστατα (3-D) μετεωρολογικά πεδία και δεδομένα υπεδάφους, δημιουργώντας τα αρχεία αρχικών και οριακών συνθηκών που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση των προσομοιώσεων του μοντέλου. Το μοντέλο WRF, το οποίο εκτελείται μέσω του προγράμματος `wrf.exe`, αποτελεί τον βασικό πυρήνα του συστήματος μοντελοποίησης. Λειτουργεί ως ένα πλήρως συμπίεστό, μη-υδροστατικό μοντέλο, με υβριδική κατακόρυφη συντεταγμένη υδροστατικής πίεσης και διάταξη πλέγματος τύπου Arakawa C. Το μοντέλο χρησιμοποιεί προηγμένες αριθμητικές μεθόδους, όπως σχήματα χρονικής ολοκλήρωσης Runge-Kutta 2 και 3 τάξης, και σχήματα μεταφοράς 2 έως 6 τάξης για τις οριζόντιες και κατακόρυφες διαστάσεις. Επιπλέον, ενσωματώνει μια μέθοδο χρονικού διαχωρισμού (time-split) με μικρά χρονικά βήματα για την αντιμετώπιση ακουστικών κυμάτων και κυμάτων βαρύτητας, διασφαλίζοντας τη δυναμική συνέπεια και τη διατήρηση των βαθμωτών μεταβλητών.



Σχήμα 1.6.1: Ροή δεδομένων μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος μοντελοποίησης WRF για την περίπτωση των προσομοιώσεων πραγματικών δεδομένων (Πηγή: Skamarock et al., 2008).

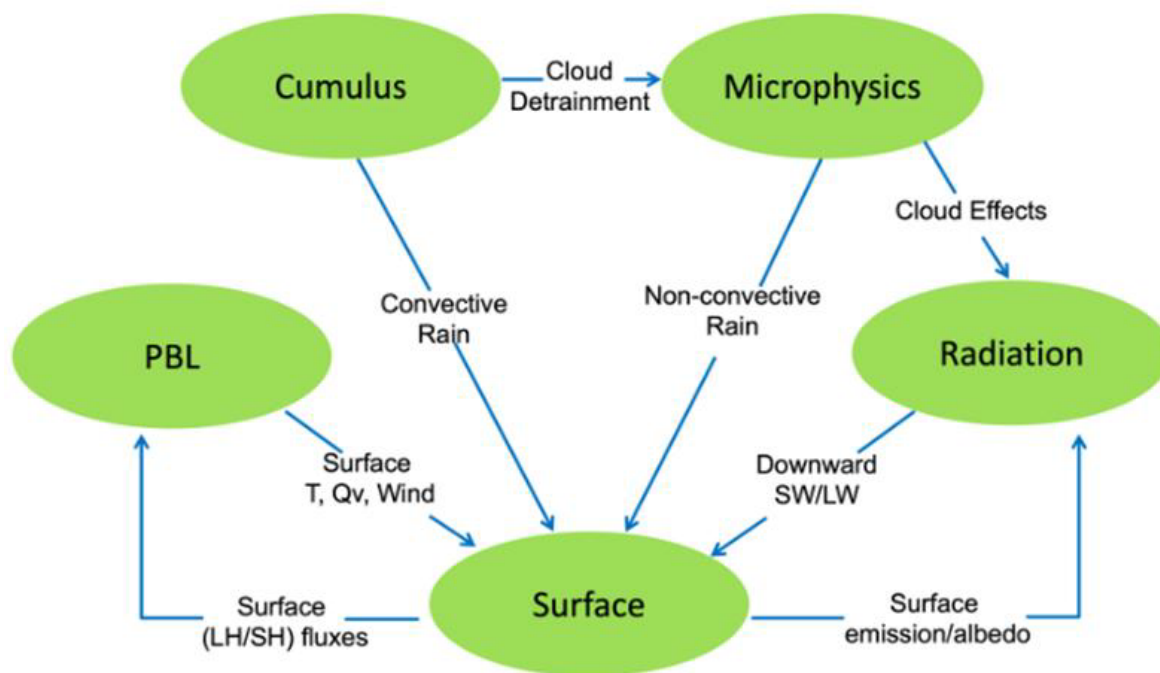
Για τους σκοπούς της παρούσας ερευνητικής εργασίας, οι περιοχές προσομοίωσης διαμορφώθηκαν χρησιμοποιώντας την τεχνική της εμφώλευσης (nesting). Μια εμφωλευμένη προσομοίωση είναι αυτή στην οποία μια περιοχή προσομοίωσης χαμηλής χωρικής ανάλυσης (γονική) περιέχει τουλάχιστον μια περιοχή προσομοίωσης υψηλότερης ανάλυσης (θυγατρική) ενσωματωμένη στο εσωτερικό της. Αυτή η μεθοδολογία επιτυγχάνει μια ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής απόδοσης και ακρίβειας, αποφεύγοντας την ανάγκη για υψηλή ανάλυση σε ολόκληρη την περιοχή προσομοίωσης. Οι περιοχές προσομοίωσης του έργου απεικονίζονται στο Σχήμα 1.6.2. Η γονική περιοχή (d01) καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, της Βόρειας Αφρικής και της Μέσης Ανατολής, με οριζόντια ανάλυση 50 km, προκειμένου να καταγραφούν οι συνοπτικής κλίμακας μετεωρολογικές συνθήκες.

Η θυγατρική περιοχή (d02) επικεντρώνεται στη ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, με οριζόντια ανάλυση 10 km, ώστε να αποδοθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα κλιματικά χαρακτηριστικά και η πολύπλοκη τοπογραφία της περιοχής, παρέχοντας έτσι πιο λεπτομερείς και ακριβείς προσομοιώσεις. Και οι δύο τομείς έχουν το ίδιο κατακόρυφο εύρος και ανάλυση, το οποίο εκτείνεται από την επιφάνεια έως τα 100 hPa, και αποδίδεται μέσω 35 ανισομερώς κατανεμημένων κατακόρυφων επιπέδων, με το πρώτο επίπεδο να εκτείνεται, κατά μέσο όρο, περίπου 50 m πάνω από την επιφάνεια του μοντέλου (Paradopoulos et al., 2025).



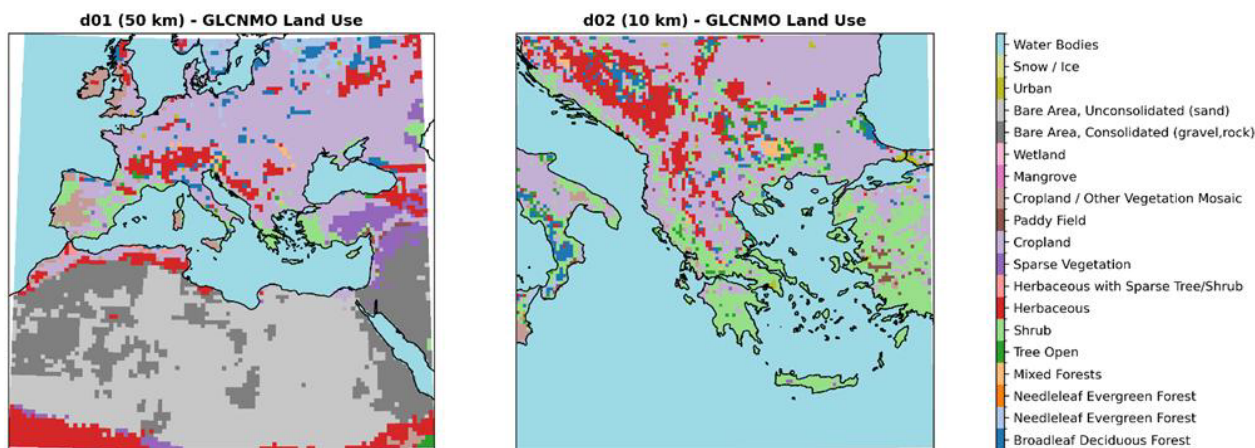
Σχήμα 1.6.2: Διαμόρφωση των περιοχών προσομοίωσης του WRF.

Το μοντέλο WRF ενσωματώνει μια ποικιλία σχημάτων παραμετροποίησης φυσικής, καθένα από τα οποία έχει σχεδιαστεί για να αναπαριστά συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα της ατμόσφαιρας. Τα σχήματα αυτά αλληλεπιδρούν δυναμικά κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, ώστε να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά της γήινης ατμόσφαιρας (Σχήμα 1.6.3). Κυμαίνονται από απλά και υπολογιστικά αποδοτικά σχήματα, έως προηγμένα και απαιτητικά σε υπολογιστικούς πόρους. Οι επιλογές των σχημάτων φυσικής για τις κλιματικές προσομοιώσεις του έργου έγιναν με προσεκτική αξιολόγηση, βάσει δοκιμών ευαισθησίας και προηγούμενων μελετών, οι οποίες ανέδειξαν την αποτελεσματική τους απόδοση για την περιοχή ενδιαφέροντος (π.χ. Politi et al., 2018; Giannaros et al., 2019).

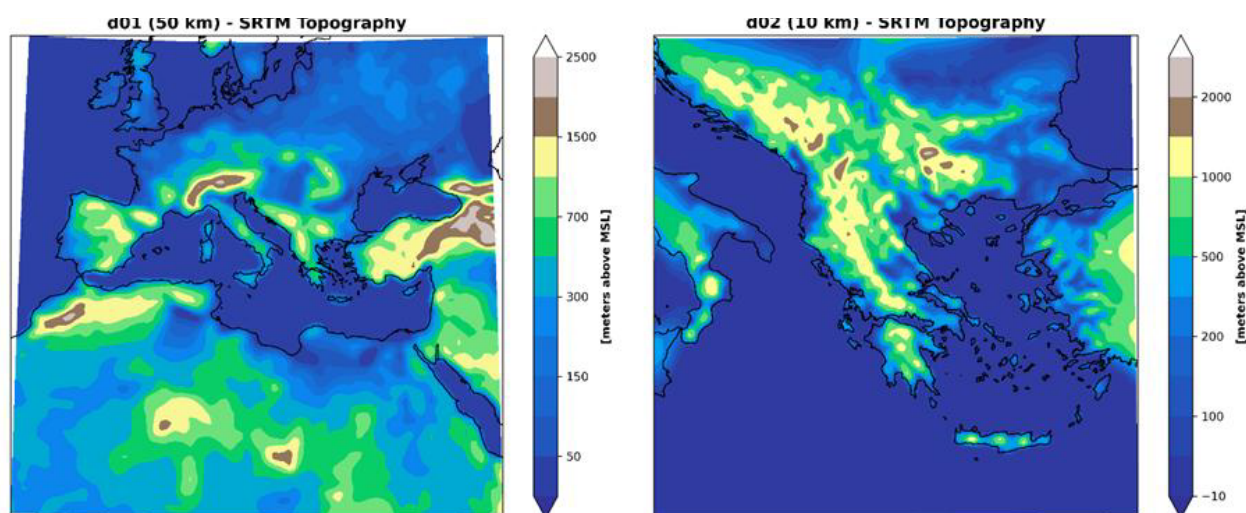


Σχήμα 1.6.3: Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σχημάτων παραμετροποίησης φυσικής στο μοντέλο WRF (Πηγή: Skamarock et al., 2008).

Η αποτύπωση της χρήσης γης και της τοπογραφίας στις περιοχές προσομοίωσης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο των προσομοιώσεων, καθώς τα δεδομένα αυτά επηρεάζουν σημαντικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ επιφάνειας και ατμόσφαιρας και, κατά συνέπεια, την ακρίβεια του μοντέλου στην προσομοίωση των κλιματικών διεργασιών. Για την απεικόνιση της χρήσης γης χρησιμοποιήθηκε το σύνολο δεδομένων Global Land Cover by National Mapping Organizations (GLCNMO v1) (Tateishi et al., 2014) (Σχήμα 1.6.4). Το συγκεκριμένο σύνολο προσφέρει οριζόντια ανάλυση 1 km και περιλαμβάνει 20 κατηγορίες χρήσης γης. Για την απεικόνιση της τοπογραφίας, ενσωματώθηκε το σύνολο δεδομένων από την αποστολή Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr et al., 2007) (Σχήμα 1.6.5), το οποίο προσφέρει υψηλής ανάλυσης απεικόνιση του αναγλύφου με οριζόντια ανάλυση 90 m, η οποία εφαρμόστηκε σε όλες τις περιοχές προσομοίωσης. Αυτό το υψηλής ανάλυσης τοπογραφικό σύνολο δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση πολύπλοκων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, ιδιαίτερα σε περιοχές με σημαντική υψομετρική μεταβλητότητα, όπως η Ελλάδα. Η ακριβής τοπογραφία είναι ουσιώδης για την προσομοίωση διεργασιών, όπως η ορογραφική ανύψωση, η οποία επηρεάζει τα πρότυπα βροχόπτωσης, αλλά και για την αποτύπωση μικρής κλίμακας ατμοσφαιρικών κυκλοφοριών που επηρεάζονται από το ανάγλυφο.



Σχήμα 1.6.4: Αποτύπωση του σετ δεδομένων χρήσης γης GLCNMO στις περιοχές προσομοίωσης του WRF.



Σχήμα 1.6.5: Αποτύπωση του σετ δεδομένων τοπογραφίας SRTM στις περιοχές προσομοίωσης του WRF.

Οι προσομοιώσεις κάλυψαν δύο αντιπροσωπευτικές δεκαετίες: το τρέχον κλίμα (2005–2014) και το εγγύς μέλλον (2046–2055) με βάση τα σενάρια εκπομπών που περιγράφονται στην Ενότητα 1.5. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την επίδραση της μεταβλητότητας του κλίματος μεταξύ ετών, η οποία μπορεί να προκαλέσει ακραία θερμά, ψυχρά, υγρά ή ξηρά έτη που δεν αντιπροσωπεύουν επαρκώς το ευρύτερο κλιματικό καθεστώς. Η χρήση δεκαετιών προσφέρει δύο βασικά πλεονεκτήματα: **(α)** η εκτεταμένη περίοδος αναφοράς παρέχει αρκετά μεγάλο δείγμα δεδομένων, επιτρέποντας μια αξιόπιστη και στατιστικά τεκμηριωμένη αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου στην αναπαράσταση του παρόντος κλίματος σε σύγκριση με δεδομένα αναφοράς, **(β)** η ανάλυση δύο δεκαετιών (παρούσα και μελλοντική) ενισχύει τη στατιστική σημαντικότητα των προβλεπόμενων μεταβολών σε κλιματικές παραμέτρους, που είναι κρίσιμες για τον υπολογισμό των αγροκτηνοτροφικών δεικτών. Η χρονική ανάλυση της εξόδου των αποτελεσμάτων είναι 1 ώρα.

Η αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με βάση το σύνολο δεδομένων ERA5-Land (Munoz-Sabater et al., 2021), το οποίο παρέχει υψηλής ανάλυσης (9 km) κλιματικά δεδομένα για την περίοδο αναφοράς (2005-2014). Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίθηκαν ως μέσες μηνιαίες τιμές με τα αντίστοιχα του ERA5-Land, χρησιμοποιώντας πληθώρα δεικτών αξιολόγησης προκειμένου να σχηματιστεί μια πλήρης εικόνα για την επίδοση του μοντέλου στην αποτύπωση του παρόντος κλίματος. Η σύγκριση των προσομοιώσεων με τα δεδομένα του ERA5-Land έδειξε ότι το μοντέλο παρουσιάζει ικανοποιητική απόδοση, αποτυπώνοντας με επάρκεια τα βασικά χωρικά και χρονικά μοτίβα των κλιματικών παραμέτρων της περιοχής της Ελλάδας.

1.7 Δείκτης Αποτίμησης της Υδατικής Καταπόνησης που Εφαρμόστηκε

Για την αποτίμηση της υδατικής καταπόνησης και των δύο καλλιεργειών (χειμερινό σιτάρι και ελιά) χρησιμοποιήθηκε ο Δείκτης Υδατικής Καταπόνησης Καλλιέργειας (Crop Water Stress Index, CWSI), που ορίστηκε από τους Jackson et al. (1988) σύμφωνα με την Εξίσωση 1.7.1. Στην Εξίσωση 1.7.1, $(T_c - T_a)$ είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας φυλλώματος (T_c) και της θερμοκρασίας αέρα (T_a), η διαφορά $(T_c - T_a)_{LL}$ εκφράζει το κατώτερο όριο (καλλιέργεια χωρίς υδατική καταπόνηση) και αντιστοιχεί σε κόμη που διαπνέει στο μέγιστο ρυθμό, ενώ η διαφορά $(T_c - T_a)_{UL}$ εκφράζει το ανώτερο όριο (πλήρως υδατικά καταπονημένη καλλιέργεια) και αντιστοιχεί σε κόμη χωρίς διαπνοή.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}} \quad (1.7.1)$$

Η διαφορά $(T_c - T_a)$ υπολογίστηκε με βάση τους Jackson et al. (1981) από την Εξίσωση 1.7.2, στην οποία R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία ($W \cdot m^{-2}$), λE είναι η λανθάνουσα ροή θερμότητας ($W \cdot m^{-2}$) που σχετίζεται με την εξατμισοδιαπνοή, G είναι η ροή θερμότητας στο έδαφος ($W \cdot m^{-2}$), ρ είναι η πυκνότητα του αέρα ($1,204 \text{ kg} \cdot m^{-3}$), C_p είναι η ειδική θερμότητα του αέρα ($1006 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot K^{-1}$), και r_a είναι η αεροδυναμική αντίσταση ($s \cdot m^{-1}$) που εκφράζει την αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ φυλλώματος και ατμόσφαιρας.

$$(T_c - T_a) = \frac{[r_a (R_n - \lambda E - G)]}{\rho C_p} \quad (1.7.2)$$

Η διαφορά $(T_c - T_a)_{LL}$ υπολογίστηκε θεωρώντας ότι η αντίσταση φυλλώματος (r_c) ισούται με 0 (δηλαδή, κόμη που διαπνέει στον μέγιστο ρυθμό) (Jackson et al., 1981; Zhang et al., 2024) από την Εξίσωση 1.7.3, στην οποία γ είναι η ψυχρομετρική σταθερά ($0,066 \text{ Pa}\cdot\text{K}^{-1}$), Δ είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμένης τάσης υδρατμών ως προς τη θερμοκρασία ($\text{Pa}\cdot\text{K}^{-1}$), και VPD είναι το έλλειμμα τάσης υδρατμών (Pa). Οι παράμετροι Δ και VPD υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφουν οι Katsoulas et al. (2001) και Monteith and Unsworth (2013).

$$(T_c - T_a)_{LL} = \frac{r_A(R_n - G)}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{\text{VPD}}{\Delta + \gamma} \quad (1.7.3)$$

Για το χειμερινό σιτάρι, η διαφορά $(T_c - T_a)_{UL}$ υπολογίστηκε θεωρώντας ότι η r_c αυξάνεται απεριόριστα ($r_c \rightarrow \infty$), με αποτέλεσμα η λE να τείνει στο μηδέν, (Jackson et al., 1981; Zhang et al., 2024), από την Εξίσωση 1.7.4, στην οποία η r_A ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$) εκφράστηκε από τις Εξισώσεις 1.7.5 και 1.7.6 ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου (WS) (Zhang et al., 2024). Στις Εξισώσεις 1.7.5 και 1.7.6, z είναι το ύψος αναφοράς (m), h είναι το ύψος της καλλιέργειας (m), d είναι το ύψος εκτόπισης (m) (θεωρήθηκε ίσο με $2/3h$), z_0 είναι το μήκος τραχύτητας (m) (θεωρήθηκε ίσο με $0,13h$), και WS είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), με ύψος αναφοράς τα 2 m.

$$(T_c - T_a)_{UL} = \frac{[r_A(R_n - G)]}{\rho C_p} \quad (1.7.4)$$

$$r_A = \frac{4,72 \left[\frac{\ln(z-d)}{z_0} \right]^2}{1 + 0,54WS} WS, \text{ αν } WS \leq 2 \text{ m s}^{-1} \quad (1.7.5)$$

$$r_A = \frac{\left[\frac{\ln(z-d)}{z_0} \right]^2}{k^2 WS} WS, \text{ αν } WS > 2 \text{ m s}^{-1} \quad (1.7.6)$$

Για την ανάλυση της μεταβολής του ύψους του φυτού χρησιμοποιήθηκε λογιστικό μοντέλο με ανεξάρτητη μεταβλητή τις βαθμοημέρες ανάπτυξης (GDD), σε διαφορετικές περιοχές, σύμφωνα με την Εξίσωση 1.7.7 (Liu et al., 2020), στην οποία $h_{\max}$ είναι το θεωρητικό μέγιστο ύψος φυτού (θεωρήθηκε ίσο με 1 m), και $a_0 = 3,233$ και $a_1 = 0,04$ εμπειρικές παράμετροι.

$$h = \frac{h_{\max}}{1 + \exp(a_0 + a_1 \times \text{GDD})} \quad (1.7.7)$$

Στην Εξίσωση 1.7.7, οι βαθμοημέρες ανάπτυξης (GDD) υπολογίστηκαν ως η διαφορά μεταξύ της ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ελάχιστης θερμοκρασίας που απαιτείται για τη δραστηριότητα της καλλιέργειας (Εξίσωση 1.7.8) (Liu et al., 2020), στην οποία T_{avg} είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία και T_{base} η ελάχιστη θερμοκρασία που απαιτείται για τη δραστηριότητα της καλλιέργειας. Το βιολογικό ανώτερο και κατώτερο θερμοκρασιακό όριο για το χειμερινό σιτάρι είναι 32 °C και 0 °C, αντίστοιχα (Mather and Yoshioka, 1968).

$$GDD = \sum (T_{avg} - T_{base}) \quad (1.7.8)$$

Οι McMaster and Wilhelm (1997) πρότειναν την παρακάτω μέθοδο για τον υπολογισμό της T_{avg} , στην οποία T_{upper} είναι η μέγιστη θερμοκρασία που ανέχεται η καλλιέργεια.

$$\begin{cases} T_{avg} = T_{base}, & \text{if } T_{avg} \leq T_{base} \\ T_{avg} = T_{upper}, & \text{if } T_{avg} \geq T_{upper} \end{cases}$$

Ο CWSI υπολογίστηκε για το μαλακό και το σκληρό χειμερινό σιτάρι, θεωρώντας ημερομηνία σποράς την 1η Νοεμβρίου και συγκομιδή έως την 31η Μαΐου. Η αξιολόγηση έγινε για τρία στάδια ανάπτυξης όπως ορίζονται από τον Food and Agriculture Organization (GS1: 10–35 DAS – αρχική ανάπτυξη, GS2: 35–120 DAS – βλαστική έως αναπαραγωγική ανάπτυξη/αδελφώσεις, GS3: 130–180 DAS – γέμισμα κόκκου έως ωρίμανση), με βάση μέσους όρους ωριαίων τιμών ανά στάδιο ανάπτυξης.

Για την ελιά, η διαφορά $(T_c - T_a)_{UL}$ θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 5 °C σύμφωνα με τους Ben-Gal et al. (2009). Επιπροσθέτως, δε χρειάστηκε υπολογισμός βαθμοημερών ανάπτυξης (GDD), καθώς το ύψος της καλλιέργειας θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 5 m, τιμή που είναι αντιπροσωπευτική για τους Ελληνικούς ελαιώνες. Η r_a υπολογίστηκε θεωρώντας ως ύψος αναφοράς τα 6 m, ύψος εκτόπισης d ίσο με 0,732h και μήκος τραχύτητας z_0 ίσο με 0,123h (Berni et al., 2009).

Τέλος, οι υπολογισμοί του CWSI και για τις δύο καλλιέργειες έγιναν για συνθήκες καθαρής ακτινοβολίας μεγαλύτερης από 100 W·m⁻² και ταχύτητας ανέμου μεγαλύτερης από 0,2 m·s⁻¹. Οι τιμές του CWSI που αποτιμήθηκαν κυμάνθηκαν από 0 έως 1 (Zhang et al., 2024).

1.8. Δείκτες Αποτίμησης της Θερμικής Καταπόνησης που Εφαρμόστηκαν

Η θερμική καταπόνηση των προβάτων και των βοοειδών αποτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τον Δείκτη Θερμοκρασίας – Υγρασίας (Temperature – Humidity Index, THI), ο οποίος έχει εφαρμοστεί ευρέως σε αντίστοιχες εργασίες (ενδεικτικά: Papanastasiou et al., 2014; McManus et al., 2015; Panagakis, 2016).

Για τα πρόβατα χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 1.8.1 που προτάθηκε από τους Marai et al. (2007), και οι αντίστοιχες κατηγορίες θερμικής καταπόνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.8.1.

$$\text{THI (πρόβατα)} = T - (0,31 - 0,0031 \cdot RH) \cdot (T - 14,4) \quad (1.8.1)$$

Πίνακας 1.8.1: Κατηγορίες θερμικής καταπόνησης προβάτων σύμφωνα με τις τιμές του THI

Κλάση THI Προβάτων	Κατηγορία Θερμικής Καταπόνησης Προβάτων
THI < 22,2	Απουσία θερμικής καταπόνησης
22,2 ≤ THI < 23,3	Μέτρια θερμική καταπόνηση
23,3 ≤ THI < 25,6	Σοβαρή θερμική καταπόνηση
THI ≥ 25,6	Εξαιρετικά σοβαρή θερμική καταπόνηση

Για τα βοοειδή χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 1.8.2 που προτάθηκε από τους Mader et al. (2006), η οποία αποτελεί προσαρμογή του THI [THI (adj)] ως προς την ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία. Στη Σχέση 1.8.2, η τιμή του THI υπολογίστηκε από τη Σχέση 1.8.3. Τα αντίστοιχα επίπεδα θερμικής καταπόνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.8.2.

$$\text{THI (adj) (βοοειδή)} = \text{THI (βοοειδή)} + 4,51 - (1,992 \cdot WS) + (0,0068 \cdot SR) \quad (1.8.2)$$

$$\text{THI (βοοειδή)} = (0,8 \cdot T) + [(RH/100) \cdot (T - 14,4)] + 46,4 \quad (1.8.3)$$

Πίνακας 1.8.2: Επίπεδα θερμικής καταπόνησης βοοειδών σύμφωνα με τις τιμές του THI (adj).

Κλάση THI (adj) Βοοειδών	Επίπεδα Θερμικής Καταπόνησης Βοοειδών
THI (adj) < 74	Επίπεδα θερμικής καταπόνησης φυσιολογικά
$74 \leq \text{THI (adj)} < 79$	Επίπεδα θερμικής καταπόνησης συναγερμού
$79 \leq \text{THI (adj)} < 84$	Επίπεδα θερμικής καταπόνησης επικίνδυνα
THI (adj) ≥ 84	Επίπεδα θερμικής καταπόνησης έκτακτης ανάγκης

Στις παραπάνω Σχέσεις 1.8.1, 1.8.2 και 1.8.3, T είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού ($^{\circ}\text{C}$), RH είναι η σχετική υγρασία (%), WS είναι η ταχύτητα του ανέμου ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) και SR είναι η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).



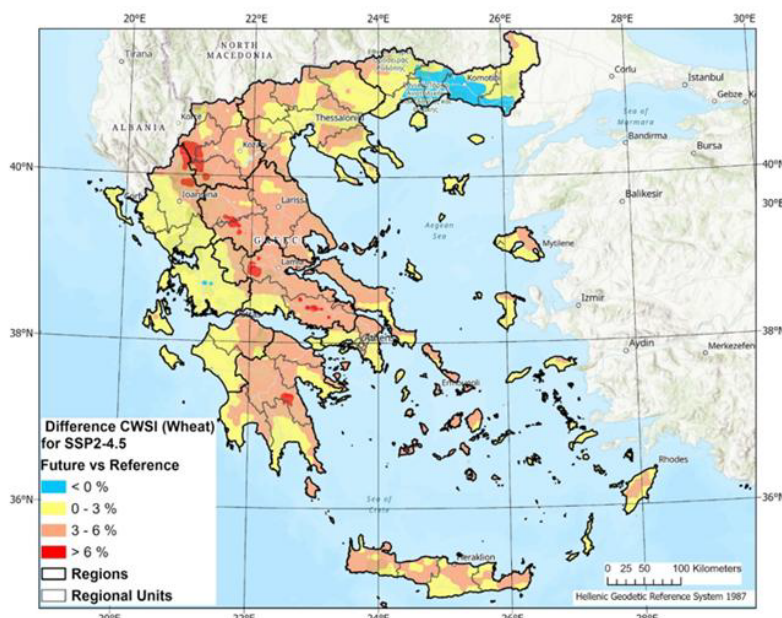
**CATTLE
BREEDING**

2. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

2.1 Χαρτογράφηση της Υδατικής Καταπόνησης Χειμερινού Σιταριού και Ελιάς υπό Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής – Ενδεικτικά Αποτελέσματα

2.1.1 Χειμερινό Σιτάρι

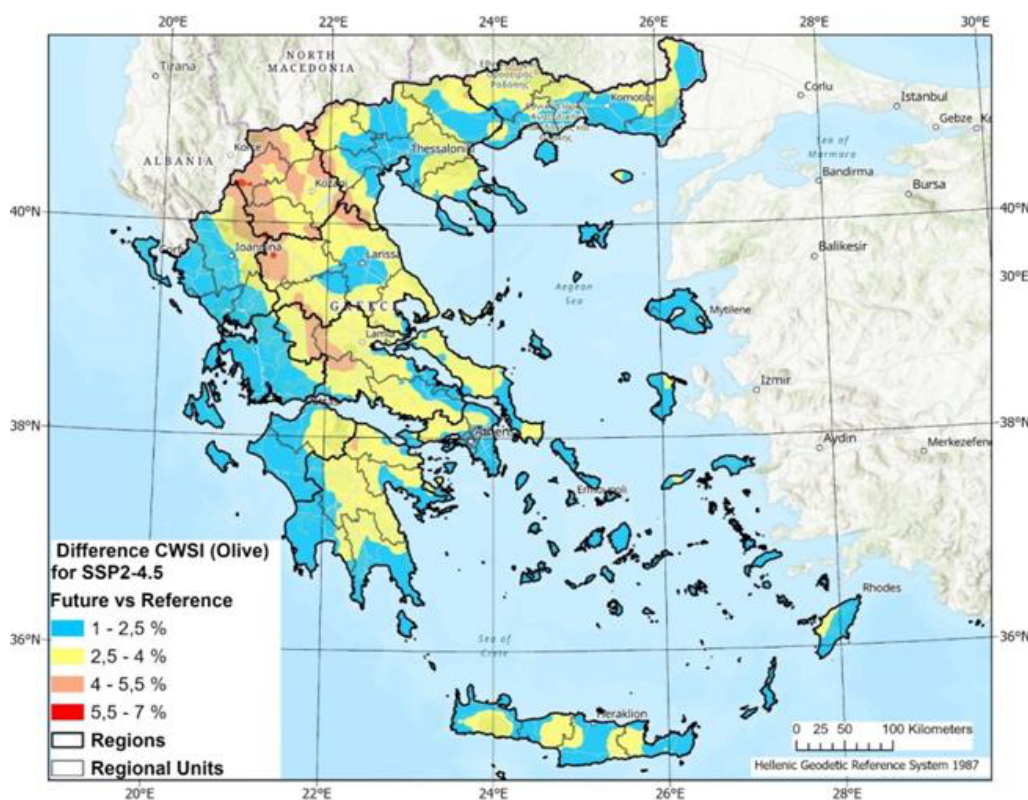
Το Σχήμα 2.1.1 δείχνει τη διαφορά της μέσης τιμής του CWSI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του CWSI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για το σιτάρι χειμερινής σποράς για κάθε κελί του μοντέλου υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5 (Papanastasiou et al., 2025a). Οι μεγαλύτερες αυξήσεις της παραπάνω διαφοράς (> 6%) εμφανίζονται κυρίως στη βόρεια Πίνδο, όπου προβλέπονται η υψηλότερη αύξηση της θερμοκρασίας και η υψηλότερη μείωση της σχετικής υγρασίας. Αυξήσεις 3% – 6% καταγράφονται στη Θεσσαλία, την Κρήτη, την Πελοπόννησο, τη Στερεά Ελλάδα, και την Κεντρική Μακεδονία, ενώ χαμηλότερες αυξήσεις (< 3%) καταγράφονται στη Δυτική Ελλάδα, και στην Ανατολική Μακεδονία. Στη Θράκη, προβλέπεται μείωση της παραπάνω διαφοράς, κάτι που υποστηρίζεται από τις ελάχιστες μεταβολές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας που προβλέπονται για την περιοχή. Από την ανάλυση της παραπάνω διαφοράς ανά κελί του μοντέλου προκύπτει επίσης ότι: (α) στη Στερεά Ελλάδα, η διαφορά είναι μεγαλύτερη από 3% στο 70% των κελιών και μεγαλύτερη από 6% στο 18% των κελιών, (β) στη Δυτική Μακεδονία, η διαφορά κυμαίνεται μεταξύ 3% και 6% στο 52,3% των κελιών, και είναι μεγαλύτερη από 6% στο 22,7% των κελιών.



Σχήμα 2.1.1: Προσομοίωση της διαφοράς της μέσης τιμής του CWSI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του CWSI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για το σιτάρι χειμερινής σποράς υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5.

2.1.2 Ελιά

Το Σχήμα 2.1.2 δείχνει τη διαφορά της μέσης τιμής του CWSI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλν της μέσης τιμής του CWSI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για την ελιά για κάθε κελί του μοντέλου υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5, αποτυπώνοντας εκτεταμένη αύξηση της υδατικής καταπόνησης σε βασικές περιοχές ελαιοκαλλιέργειας στην Ελλάδα (Papanastasiou et al., 2025a). Η Ανατολική Πελοπόννησος και η Κεντρική Ελλάδα, οι οποίες αποτελούν βασικές Περιφέρειες καλλιέργειας της ελιάς, παρουσιάζουν αυξήσεις της παραπάνω διαφοράς τουλάχιστον 2,5%. Η Κρήτη, η οποία επίσης είναι περιοχή με σημαντική παραγωγή ελιάς, παρουσιάζει μια πιο μέτρια μέση αύξηση του CWSI. Ωστόσο, η αύξηση αυτή μπορεί να είναι κρίσιμη για τους παραδοσιακούς ξηρικούς ελαιώνες, ειδικά σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας. Η Θεσσαλία, η οποία είναι μια σημαντική περιοχή παραγωγής επιτραπέζιας ελιάς, εμφανίζει επίσης αξιοσημείωτες αυξήσεις του CWSI. Περιοχές της Κεντρικής και της Ανατολικής Μακεδονίας στις οποίες παράγεται σημαντική ποσότητα επιτραπέζιας ελιάς παρουσιάζουν μέση αύξηση μεγαλύτερη από 2,5%. Αντίθετα, στη Δυτική Ελλάδα και στη Δυτική Πελοπόννησο, η μέση αύξηση του CWSI είναι μικρότερη από 2,5%.



Σχήμα 2.1.2: Προσομοίωση της διαφοράς της μέσης τιμής του CWSI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλν της μέσης τιμής του CWSI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για την ελιά υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5.

2.2 Μέτρα Προσαρμογής και Καλές Πρακτικές για τη Μείωση της Τρωτότητας της Καλλιέργειας Φυτών από την Υδατική Καταπόνηση λόγω Κλιματικής Αλλαγής

2.2.1 Καλλιέργεια Σιταριού

Οι πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην καλλιέργεια σιτηρών στην Ελλάδα συνδέεται με μεταβολές στις αποδόσεις. Ενδεικτικά, αναφέρεται μελέτη της Τράπεζας της Ελλάδος (Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011) που κατέδειξε ως πιο ευαίσθητη περιοχή την Κεντρική και Ανατολική Ελλάδα, όπου η μείωση στις αποδόσεις δύναται να ξεπεράσει το 10% από το 2040 και μετά για τα κλιματικά σενάρια A1B και A2 (τα κλιματικά σενάρια A1B «μέτριες-υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου» και A2 «υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου» σχετίζονται με το Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) που υποστήριξε την 4η Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή). Επίσης, σύμφωνα με τους Georgoroulou et al. (2024), οι Περιφέρειες Θεσσαλίας, Στερεάς Ελλάδας και Κεντρικής Μακεδονίας αναμένεται να εμφανίσουν τις μεγαλύτερες μειώσεις έως το 2040 για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5, ενώ για τη περίοδο 2041-2060 οι αρνητικότερες επιδράσεις φαίνονται στο σενάριο RCP8.5 και προσεγγίζουν το 10% (τα κλιματικά σενάρια RCP4.5 «μέτριες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου» και RCP8.5 «πολύ υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου» σχετίζονται με το Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) που υποστήριξε την 5η Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή). Οι βασικές στρατηγικές και καλές πρακτικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή για την καλλιέργεια σιταριού, ειδικότερα μάλιστα σε ό,τι αφορά στο πρόβλημα αύξησης της υδατικής καταπόνησης, είναι οι παρακάτω (Roupkou et al., 2025):

1 Επιλογή Κλιματικά Ανθεκτικών Ποικιλιών Σιταριού

Η **ανάπτυξη και υιοθέτηση ποικιλιών ανθεκτικών στην ξηρασία και στις υψηλές θερμοκρασίες** είναι κρίσιμη για τη διατήρηση των αποδόσεων σε συνθήκες κλιματικής μεταβλητότητας. Ποικιλίες με μειωμένες ανάγκες εαρινοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την προσαρμογή σε θερμότερους και λιγότερο προβλέψιμους χειμώνες, εξασφαλίζοντας σωστή άνθηση και ανάπτυξη του σπόρου. Οι Yang et al. (2019) έδειξαν με την χρήση προτύπων ανάπτυξης καλλιεργειών ότι οι αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση του σιταριού, μπορούν να αναστραφούν σημαντικά έως πλήρως με τη χρήση ποικιλιών πρώιμης άνθησης.

Επιπλέον, **ποικιλίες με βαθύ ριζικό σύστημα** βελτιώνουν την πρόσληψη νερού, ενώ η **ανθεκτικότητα σε ασθένειες** ενισχύει την αντοχή απέναντι σε νέες πιέσεις από εχθρούς και παθογόνα. Η επιλογή ποικιλιών σιταριού με αυτές τις ιδιότητες προτείνονται και για την περιοχή της Θεσσαλίας, όπου ερευνητικά δεδομένα έδειξαν μείωση των αρνητικών

συνεπειών ιδιαίτερα στο ενδιάμεσο και δυσμενέστερο κλιματικό σενάριο έως το μέσο του τρέχοντος αιώνα (Καραμάνος κ.α., 2022).

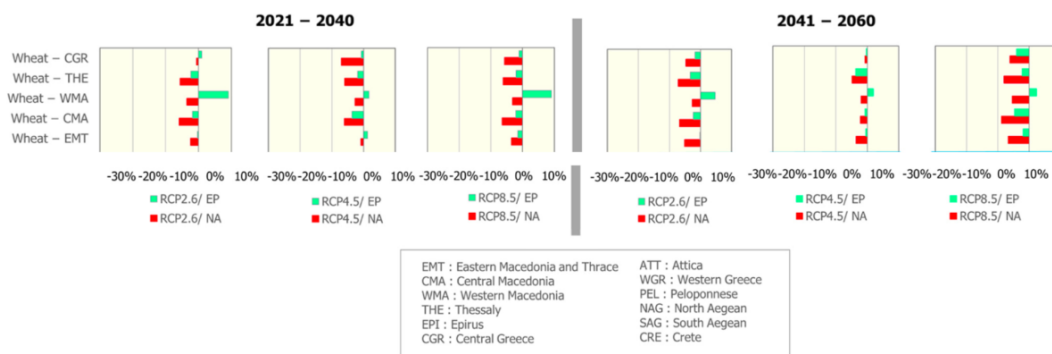
Στη χώρα μας, η σημασία της διερεύνησης του γενετικού δυναμικού ελληνικών πληθυσμών μαλακού σιταριού εξετάστηκε σε πειράματα που διεξήχθησαν την περίοδο 2004-2006 στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, όπου εξετάστηκε η προσαρμοστικότητα τους σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης (Εικόνα 2.2.1) (Tsakalis et al., 2006). Από τους πέντε πληθυσμούς που μελετήθηκαν, οι δύο εξ αυτών παρουσίασαν αρκετά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από την αντίδρασή τους σε συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης. Πιο συγκεκριμένα, η εξέλιξη της διαφοροποίησης των ανθικών καταβολών, δεν φαίνεται να επηρεάστηκε αρνητικά, και είναι βέβαιο ότι τα μεριστώματα δεν εκφυλίστηκαν στην πορεία σχηματισμού των στάχων. Η διαπίστωση αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αν αναλογιστεί κανείς το ξηροθερμικό περιβάλλον της χώρας μας και το ολοένα αυξανόμενο πρόβλημα της επάρκειας των υδάτινων πόρων. Συνεπώς, κάποιοι βιότυποι εμφανίζουν ηπιότερη προσαρμογή στις συνθήκες ελλειμματικής άρδευσης, ενώ κάποιοι άλλοι όχι. Αυτό σημαίνει ότι οι βιότυποι δύνανται να κρύβουν μέσα τους έντονη γενετική παραλλακτικότητα όσον αφορά στην ανθεκτικότητά τους στην έλλειψη νερού.



Εικόνα 2.2.1: Πειραματική διάταξη ελληνικών πληθυσμών σιταριού για τη διερεύνηση της υδατικής καταπόνησης (αριστερά) και μέτρηση μεριστώματος με μικροσκόπιο (δεξιά) (Πηγή: Tsakalis et al., 2006).

2 Προσαρμογή των Ημερομηνιών Σποράς

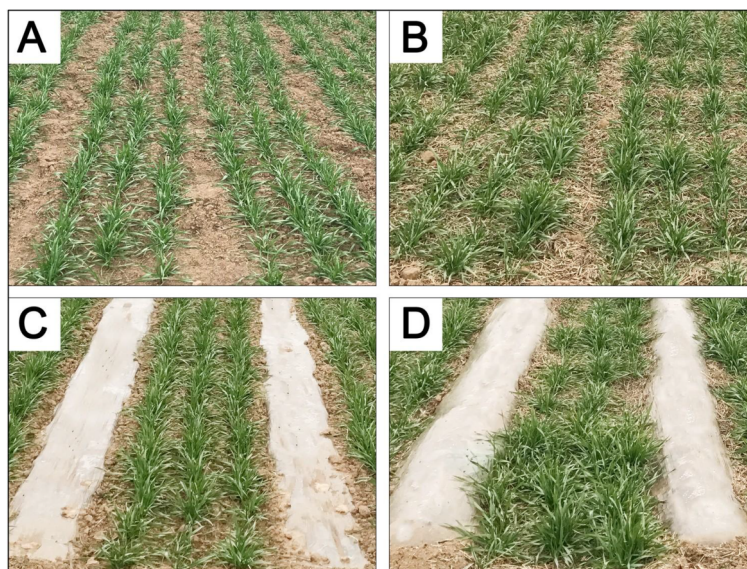
Η ευελιξία στον προγραμματισμό της σποράς αποτελεί βασικό μέτρο προσαρμογής. Η **πρώιμη ή καθυστερημένη σπορά, με βάση τις εποχικές προβλέψεις και τα κλιματικά δεδομένα**, συμβάλλει στη βελτίωση της εγκατάστασης της καλλιέργειας και στη μείωση της έκθεσης σε πρώιμους κλιματικούς στρεσογόνους παράγοντες, μειώνοντας τον κίνδυνο απωλειών και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα. Ιδιαίτερα για το σιτάρι, σε Μεσογειακό επίπεδο έρευνες στο Μαρόκο έδειξαν ότι πρώιμη σπορά έχει θετικές επιδράσεις στις τελικές αποδόσεις με ταυτόχρονη μείωση σε αρδευτικές ανάγκες (Belaqziz et al., 2021), ενώ στην Ελλάδα (Georgoroulou et al., 2024), η πρώιμη σπορά κατά ένα μήνα έχει θετική επίδραση έως 10% στις αποδόσεις, η οποία όμως εξανεμίζεται πλησιάζοντας το 2060 (Σχήμα 2.2.1).



Σχήμα 2.1.2: Μεταβολή των αποδόσεων σιταριού με εφαρμογή πρώιμης σποράς (EP) συγκριτικά με τη μη αλλαγή της ημερομηνίας σποράς (NA) (Πηγή: Georgoroulou et al., 2024).

3 Εφαρμογή Πρακτικών Διατήρησης Εδαφικής Υγρασίας

Η διατήρηση της υγρασίας και η βελτίωση της υγείας του εδάφους είναι καθοριστικής σημασίας για την ανθεκτικότητα. Πρακτικές όπως η **μειωμένη κατεργασία**, η **εδαφοκάλυψη** και η **αμειψισπορά** συμβάλλουν στη μείωση της εξάτμισης, στη διατήρηση της δομής του εδάφους και στην αύξηση της οργανικής ουσίας. Αυτές οι πρακτικές σταθεροποιούν τις αποδόσεις σε ξηρές περιόδους, και ενισχύουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του συστήματος παραγωγής. Οι Zhao et al. (2024) και Liu et al. (2018) έδειξαν ότι η χρήση πλαστικών εδαφοκάλυψης αύξησαν την απόδοση χρήσης του νερού από τα φυτά σιταριού, ενώ η εδαφοκάλυψη με υπολείμματα καλλιεργειών αύξησε την διατήρηση του ύδατος στο έδαφος (Εικόνα 2.2.2).



Εικόνα 2.2.2: Καλλιέργεια σιταριού: Α) χωρίς εδαφοκάλυψη, Β) με εδαφοκάλυψη υπολειμμάτων καλλιεργειών, C) με εδαφοκάλυψη από αδιαπέραστο πλαστικό, και D) με συνδυαστική εδαφοκάλυψη (υπολείμματα καλλιεργειών και πλαστικό) (Πηγή: Liu et al., 2018).

Επιπλέον για το σιτάρι, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών θα μπορούσαν να επηρεαστούν θετικά από το σύστημα μη άρροσης, το οποίο μπορεί να βελτιώσει αποτελεσματικά τα αδρανή του εδάφους, να μειώσει τη διάβρωση, και να βελτιώσει την κατακράτηση νερού (Ortiz et al., 2008).

4 Επέκταση Αρδευόμενων Εκτάσεων με Χρήση Τεχνολογιών Ακριβείας

Καθώς οι βροχοπτώσεις γίνονται ολοένα και πιο ασταθείς, η **ανάπτυξη αρδευτικών υποδομών** είναι απαραίτητη για την ασφάλεια της παραγωγής σιταριού. Ωστόσο, αυτό πρέπει να γίνει με βιώσιμο τρόπο, **μέσω τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας** που βελτιστοποιούν την αποδοτικότητα χρήσης νερού. Τεχνικές όπως η **στάγδην άρδευση, οι αισθητήρες υγρασίας εδάφους και τα αυτοματοποιημένα συστήματα άρδευσης** εξασφαλίζουν ότι το νερό εφαρμόζεται μόνο όταν και όπου χρειάζεται, μειώνοντας τις απώλειες και προστατεύοντας τους υδατικούς πόρους. Ο **συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών με κλιματικά δεδομένα και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων** ενισχύει σημαντικά την ανθεκτικότητα, περιορίζοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η ενσωμάτωση για παράδειγμα του **μοντέλου CWSI** στον προγραμματισμό άρδευσης μπορεί να βελτιστοποιήσει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, καθορίζοντας με ακρίβεια τις απαιτούμενες δόσεις και τη συχνότητα άρδευσης, οδηγώντας τελικά σε αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης νερού. Η διατήρηση της επιθυμητής υδατικής συγκέντρωσης των καλλιεργειών εντός του εύρους $0,0 < CWSI \leq 0,25$ εξασφαλίζει βέλτιστες αποδόσεις, όπως αποδεικνύεται από τη μεγαλύτερη εμπορεύσιμη παραγωγή σε αμώδη ιλυώδη εδάφη με υγρασία 70–100% της χωρητικότητας πεδίου. Αντίθετα, έντονη υδατική καταπόνηση ($0,75 < CWSI \leq 1,0$) υπό 40–50% χωρητικότητα πεδίου σε ιλυώδη εδάφη οδήγησε στις χαμηλότερες αποδόσεις, ενώ ο **συνδυασμός του CWSI με μετρήσεις υγρασίας εδάφους** βελτίωσε την αποδοτικότητα άρδευσης έως και 25% (Alordzinu et al., 2021).

2.2.2 Καλλιέργεια Ελιάς

Παρά το γεγονός ότι η ελιά είναι καλά προσαρμοσμένη στο Μεσογειακό κλίμα και ανθεκτική στην ξηρασία, με υψηλή ικανότητα ανάκαμψης από παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, συγκεκριμένα κρίσιμα φαινολογικά στάδια είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες και την έλλειψη νερού. Η ανεπάρκεια σε νερό ή/και οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ανθοφορία, την καρπόδεση και την ανάπτυξη των καρπών. Επομένως, η υδατική καταπόνηση θα πρέπει να αποφεύγεται από την ανάπτυξη των ανθικών καταβολών έως την καρπόδεση (Gucci et al., 2012). Ευαίσθητα στην έλλειψη νερού είναι επίσης το αρχικό στάδιο της ταχείας ανάπτυξης των καρπών και το στάδιο συσσώρευσης του ελαιολάδου στον καρπό (Gucci et al., 2012). Επιπλέον, τα πρώιμα κύματα καύσωνα ή οι μη τυπικές βροχοπτώσεις κατά την ανθοφορία και οι μεγάλες περίοδοι ξηρασίας (π.χ. Φεβρουάριο έως Οκτώβριο) επηρεάζουν αρνητικά την ετήσια απόδοση (Koubouris and Psarras, 2024). Η εμφάνιση ακραίων θερμοκρασιών (30–40 °C), ακόμη και για σύντομο χρονικό διάστημα, μπορούν να επηρεάσουν τη βλαστικότητα της γύρης και την ικανότητα ανάπτυξης του γυρεοσωλήνα, μειώνοντας πιθανόν την καρπόδεση και την απόδοση, με την ένταση της επίπτωσης να διαφέρει ανά ποικιλία (Koubouris et al., 2009). Οι Ben-Ari et al. (2021) ανέφεραν ότι θερμοκρασίες μόλις 3–4 °C πάνω από τη θερμοκρασία αέρα μπορούν να μειώσουν σημαντικά την παραγωγή καρπών, την ποσότητα και την ποιότητα του ελαιολάδου. Στο άρθρο ανασκόπησης των Brito et al. (2019) αναφέρεται ότι οι αναμενόμενες αυξήσεις στις θερμοκρασίες την άνοιξη και το φθινόπωρο θα παρατείνουν την καλλιεργητική περίοδο και θα επιταχύνουν την ημερομηνία ανθοφορίας, κατά 1 έως 2 εβδομάδες. Από την άλλη πλευρά, οι Bonofiglio et al. (2009) ανέφεραν ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε πρώιμα και συντομότερα φαινολογικά στάδια, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις αποδόσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Για την ελιά, μία από τις κύριες κλιματικές προκλήσεις είναι η συχνότητα εμφάνισης ήπιων χειμώνων που οδηγούν σε ανεπαρκή συσσώρευση ψύχους για τη διαφοροποίηση των ανθοφόρων οφθαλμών (Fraga et al., 2020; Koubouris and Psarras, 2024). Η συσσώρευση ωρών ψύχους τον χειμώνα είναι απαραίτητη για τη διαφοροποίηση των ανθοφόρων οφθαλμών, ενώ η έλλειψη ψύχους έχει ως αποτέλεσμα τον μειωμένο και ανομοιόμορφο σχηματισμό ανθοφόρων οφθαλμών.

Με βάση τα συμπεράσματα μελέτης της Τράπεζας της Ελλάδος (Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011), αναμένονται θετικές επιπτώσεις για τις ελιές στα βόρεια τμήματα της χώρας, την Ανατολική Μακεδονία-Θράκη, και τη Δυτική-Κεντρική Μακεδονία, όπου οι αποδόσεις αναμένεται να αυξηθούν κατά περισσότερο από 10%. Παρόμοιες είναι οι προβλέψεις για τις περιοχές της Δυτικής Ελλάδας, του Ιονίου και του Βόρειου Αιγαίου, αλλά με μικρότερη αύξηση της απόδοσης. Οι σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις για τις ελιές αναμένονται στα υπόλοιπα μέρη της χώρας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς, όπως προκύπτει από το Σχήμα 1.3.2, η ελιά καλλιεργείται κυρίως στην κεντρική και νότια Ελλάδα (π.χ. στην Πελοπόννησο και στην Κρήτη βρίσκεται το 25% και 21%, αντίστοιχα, της έκτασης καλλιέργειας ελαιόδεντρων όλης της χώρας).

Η πιο πρόσφατη έρευνα των Georgoroulou et al. (2024) έδειξε ότι η παραγωγή ελαιόδεντρων θα αντιμετωπίσει μέτρια μείωση στη Θεσσαλία, την Κεντρική Ελλάδα και την Κρήτη για όλα τα υπό εξέταση κλιματικά σενάρια για το εγγύς μέλλον μέχρι το 2040 και για την περίοδο 2041-2060.

Οι βασικές στρατηγικές και καλές πρακτικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή για την καλλιέργεια της ελιάς, ειδικότερα μάλιστα σε ό,τι αφορά στο πρόβλημα αύξησης της υδατικής καταπόνησης, είναι οι παρακάτω (Ρουρκου et al., 2025):

1

Διαχείριση Υδάτων και Αποτελεσματική Άρδευση

Ειδικότερα:

- **Τεχνολογίες ακριβείας για τη διαχείριση του νερού: Ενδεικτικά: α) Ολοκληρωμένα συστήματα λήψης αποφάσεων** για τον προσδιορισμό των αναγκών της ελιάς σε νερό, και τον υπολογισμό του όγκου και του χρονισμού της άρδευσης, β) Εργαλεία γεωργίας ακριβείας, όπως η ασύρματη τεχνολογία αισθητήρων για δεδομένα υγρασίας του εδάφους.
- **Ελλειμματική άρδευση** κατά τη διάρκεια λιγότερο κρίσιμων φαινολογικών σταδίων (όπως κατά τη σκλήρυνση του πυρήνα) για την εξοικονόμηση νερού.
- **Επιλογή της πιο αποδοτικής μεθόδου άρδευσης** για την καλύτερη χρήση νερού: **Στάγδην άρδευση** (επιφανειακή ή υπόγεια) με επιλογή του κατάλληλου αριθμού σταλακτών σύμφωνα με τον τύπο εδάφους, την πυκνότητα φύτευσης του ελαιώνα και τον όγκο νερού άρδευσης.
- **Διαχείριση άρδευσης σύμφωνα με την ποικιλία ελιάς:** Οι ποικιλίες που προορίζονται για παραγωγή ελαιόλαδου απαιτούν χαμηλότερο όγκο αρδευτικού νερού σε σύγκριση με τις ποικιλίες που προορίζονται για παραγωγή επιτραπέζιων ελιών.

Πιλοτικά έργα στην Κρήτη και τη Θεσσαλία δείχνουν ότι ο έξυπνος προγραμματισμός άρδευσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση νερού κατά 30-40% χωρίς απώλεια απόδοσης (Kakkanou et al., 2024).

2

Επιλογή Ποικιλιών Ανθεκτικών στο Κλίμα

Οι υψηλές θερμοκρασίες και οι ηπιότεροι χειμώνες μειώνουν τις ώρες συσσώρευσης ψύχους, επηρεάζοντας την ανθοφορία και την καρπόδεση. Το Διεθνές Συμβούλιο Ελαιοκομίας έχει ταξινομήσει ορισμένες από τις κύριες ποικιλίες ελιάς με βάση την ανοχή τους στην ξηρασία, π.χ. η Χαλκιδικής και η Κορωνέικη είναι ανθεκτικές στην ξηρασία.

3 Καλές Γεωργικές Πρακτικές που Σχετίζονται με το Νερό και το Έδαφος

Σε αυτές περιλαμβάνονται οι:

- **Μη κατεργασία.**
- **Καλλιέργειες κάλυψης.**
- **Προσαρμογή του χειμερινού και καλοκαιρινού κλαδέματος** για τη ρύθμιση της ανάπτυξης των δέντρων και του φορτίου καρπών σύμφωνα με το διαθέσιμο νερό.
- **Ενσωμάτωση των υπολειμμάτων κλαδέματος.**
- **Έλεγχος των ζιζανίων** μόνο με χλοοκοπή την άνοιξη και το καλοκαίρι.
- **Εφαρμογή αντιδιαπνευστικών σκευασμάτων ή μείωσης της θερμικής καταπόνησης** (καολίνης).
- **Ορθολογική λίπανση** (βάσει αναλύσεων φύλλων και εδάφους) **και εφαρμογή κομπόστ.**
- **Φυσικά εμπόδια για τη μείωση της απορροής του νερού και της διάβρωσης.**

Τα αποτελέσματα της μελέτης των Kourgialas et al. (2022) δείχνουν ότι η εφαρμογή των Καλών Γεωργικών Πρακτικών που σχετίζονται με το νερό και το έδαφος (όπως η μη κοπή ζιζανίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το μη όργωμα του εδάφους, οι καλλιέργειες κάλυψης, το κλάδεμα, η κομποστοποίηση κ.λπ.) βελτίωσε την αποδοτικότητα της χρήσης νερού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αυξανόμενη λειψυδρία, η συχνότητα των ξηρασιών και τα ακραία κλιματικά φαινόμενα αποτελούν τις κύριες απειλές για τη μεσογειακή γεωργία, οι Καλές Γεωργικές Πρακτικές καταδεικνύουν σημαντικό δυναμικό για την υποστήριξη της προσαρμοστικότητας της ελαιοκαλλιέργειας σε ακραίες κλιματικές και υδατικές συνθήκες.

4 Εκπαίδευση Αγροτών - Δίκτυα Αγροτών

Η εκπαίδευση και τα δίκτυα αγροτών, σε συνδυασμό τα αποτελεσματικά μέτρα πολιτικής, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της προσαρμοστικής ικανότητας των ελαιοκαλλιεργητών. Οι επιδοτήσεις για τεχνολογίες εξοικονόμησης νερού, τα προγράμματα κατάρτισης για τις Καλές Γεωργικές Πρακτικές, και η ανταλλαγή εμπειριών μεταξύ παραγωγών είναι ζωτικής σημασίας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται παραδείγματα πιλοτικής εφαρμογής καλών πρακτικών για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή της καλλιέργειας της ελιάς, οι οποίες σχετίζονται και με την υδατική καταπόνηση λόγω της κλιματικής αλλαγής:

Γεωργία ακριβείας: Βιώσιμη άρδευση ελαιοδέντρων βάσει μετρήσεων για τον περιορισμό της υδατικής καταπόνησης και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή

Στο πλαίσιο του έργου «Sustainable Approaches to LAnd and water Management in MEditerranean Drylands (SALAM-MED)» (<https://www.salam-med.org/>) διερευνήθηκε πώς οι διαφορετικές πρακτικές άρδευσης, συμπεριλαμβανομένης και πρακτικής γεωργίας ακριβείας, επηρεάζουν την ανάπτυξη των ελαιοδέντρων και μπορεί να βελτιστοποιούν την παραγωγή ελαιολάδου.

Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε πείραμα στην περιοχή της Μεσσηνίας, όπου η πλειονότητα των ελαιώνων είναι ξηρικοί. Η κλιματική αλλαγή θα αυξήσει την υδατική καταπόνηση στην περιοχή μελέτης, και η διαθεσιμότητα του φυσικού νερού από βροχοπτώσεις για άρδευση ενδέχεται να καταστεί λιγότερο αξιόπιστη. Αναμένεται συνεπώς αυξημένη ζήτηση νερού, και αύξηση στην εφαρμογή πρακτικών άρδευσης, ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή νερού για τα ελαιόδεντρα. Ήδη, ορισμένοι αγρότες στην περιοχή μελέτης αρδεύουν τα αγροτεμάχιά τους αντλώντας νερό από ιδιωτικές γεωτρήσεις ή πηγάδια. Τα προαναφερόμενα εγείρουν ανησυχία σχετικά με τη βιωσιμότητα των υπόγειων υδάτινων πόρων, και την πιθανή εισχώρηση θαλασσινού νερού (ειδικά λαμβάνοντας υπόψη ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται κοντά στην ακτογραμμή).

Στο πλαίσιο του πειράματος, δοκιμάστηκαν οι παρακάτω πρακτικές άρδευσης αγροτεμαχίων με ελαιόδεντρα (Pantazis et al., 2025):

-  Άρδευση από βροχοπτώσεις (ξηρική καλλιέργεια).
-  Άρδευση βάσει της εμπειρίας του ελαιοπαραγωγού (χωρίς έλεγχο στη χρήση νερού).
-  Άρδευση βασισμένη με παρακολούθηση της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής κατά τα κρίσιμα φαινολογικά στάδια.

Κάθε αγροτεμάχιο κάλυπτε επιφάνεια 0,3 εκταρίων, αποτελούνταν από τριάντα τρία ελαιόδεντρα (Εικόνα 2.2.3). Όλα τα ελαιόδεντρα (είδος *Olea europaea*) ήταν περίπου σαράντα ετών και της ποικιλίας Κορωνέικη.

Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των διαφορετικών πρακτικών άρδευσης στα ελαιόδεντρα, πραγματοποιούνταν μετρήσεις βασικών παραμέτρων στα αγροτεμάχια μέσω της εγκατάστασης αισθητήρων, και ερευνητικών εκστρατειών που περιλάμβαναν επιτόπιες μετρήσεις. Οι βασικές μετρήσεις αφορούσαν στις χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους, στην υγρασία του εδάφους (αισθητήρες εγκατεστημένους σε βάθος 30 cm, σε απόσταση 2 m από τους κορμούς των δέντρων) (Εικόνα 2.2.3), καθώς και σε αγρομετεωρολογικές παραμέτρους (θερμοκρασία, εξατμισοδιαπνοή, βροχόπτωση) από αγρομετεωρολογικό σταθμό.

Επίσης, πραγματοποιήθηκαν οικο-φυσιολογικές μετρήσεις απευθείας στα φυτά. Αυτές περιλάμβαναν την ανάλυση ανταλλαγής αερίων των φύλλων, και τη χρήση οπτικών αναλυτών για την ανίχνευση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, των χρωστικών και της φωτοσυνθετικής απόδοσης. Διενεργήθηκαν επίσης επιτόπιες έρευνες με μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) με σκοπό τη διερεύνηση της δυνατότητας απομακρυσμένης και σε μεγάλη κλίμακα παρακολούθησης με χρήση αισθητήρων της υδατικής και φυσιολογικής κατάστασης των ελαιοδέντρων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο αναλύσεις του ελαιολάδου με σκοπό την αξιολόγηση βασικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, όπως η οξύτητα, οι πολυφαινόλες, τα υπεροξειδία και η περιεκτικότητα σε λάδι (σύμφωνα με το Διεθνές Πρότυπο EN ISO/IEC 17025:2005).

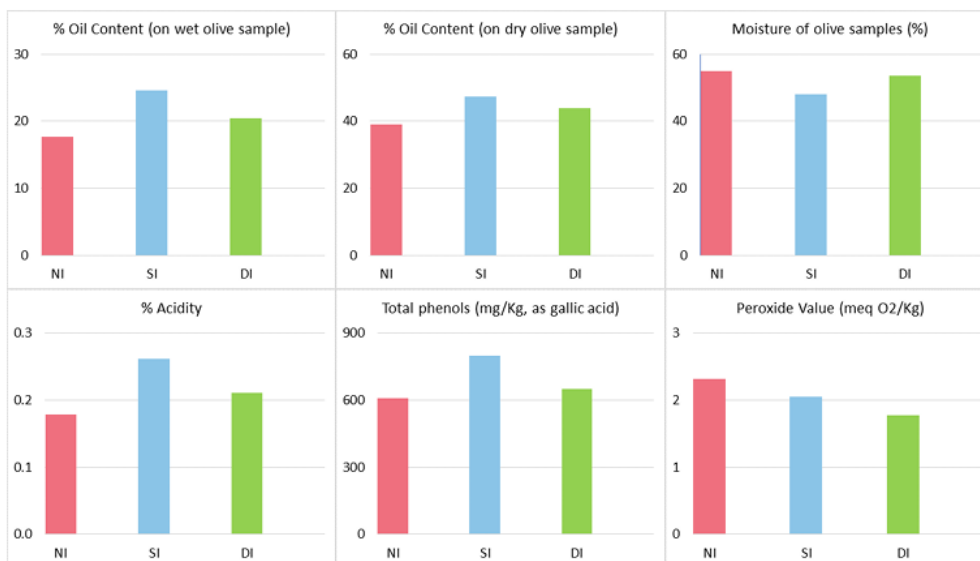


Εικόνα 2.2.3: Πειραματική διάταξη του δικτύου παρακολούθησης άρδευσης (αριστερά) και εικόνα αισθητήρα υγρασίας εδάφους (δεξιά) (Πηγή: Pantazis et al., 2025).

Κατά το πρώτο έτος του πειράματος, η φυσικοχημική ανάλυση επιβεβαίωσε ότι όλα τα δείγματα ελαιολάδου συμμορφώνονταν με τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το εξαιρετικά παρθένο ελαιόλαδο. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο οξύτητας για το εξαιρετικά παρθένο ελαιόλαδο είναι 0,8% — με χαμηλότερες τιμές να υποδηλώνουν ανώτερη ποιότητα. Κανένα από τα δείγματα δεν υπερέβη το όριο αυτό. Τα ξηρικά αγροτεμάχια παρήγαγαν ελαιόλαδο με λίγο χαμηλότερα επίπεδα οξύτητας σε σύγκριση με τα αρδευόμενα (Σχήμα 2.2.2). Ωστόσο, για το ελαιόλαδο από τα ξηρικά αγροτεμάχια καταγράφηκαν υψηλότερα επίπεδα υπεροξειδίων. Οι χαμηλότερες τιμές υπεροξειδίων υποδηλώνουν πιο φρέσκο λάδι με περισσότερο διατηρημένη γεύση και άρωμα (η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θέτει ως όριο την τιμή των 20 mEqO₂/kg, ενώ υπέρβασή της μπορεί να υποβαθμίσει τη γεύση και την ποιότητα του λαδιού). Επίσης, οι μετρήσεις έδειξαν ότι η συνολική περιεκτικότητα σε φαινόλες, εκφρασμένη σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος, ήταν υψηλότερη στο ελαιόλαδο από τα αρδευόμενα αγροτεμάχια (ελαιόλαδο με υψηλότερη περιεκτικότητα σε φαινόλες

παρουσιάζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ανώτερη ποιότητα). Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε λάδι ήταν υψηλότερη για τα αρδευόμενα αγροτεμάχια.

Συνολικά, τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν ότι, σε σχέση με τις άλλες εξεταζόμενες πρακτικές άρδευσης, η βιώσιμη άρδευση βάσει της εξατμισοδιαπνοής βελτιώνει ελαφρώς την περιεκτικότητα σε λάδι, μειώνει την υγρασία και ενισχύει την περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις, καθιστώντας την πιο ευνοϊκή πρακτική άρδευσης τόσο για την απόδοση, όσο και για τη διατροφική ποιότητα, παρά τη λίγο υψηλότερη οξύτητα του λαδιού.



Σχήμα 2.2.2: Αποτελέσματα ποιότητας ελαιολάδου ανά πρακτική άρδευσης (NI: ξηρική καλλιέργεια, SI: άρδευση βάσει φαινολογίας, DI: άρδευση βάσει εμπειρίας παραγωγού) (Πηγή: Pantazis et al., 2025).

Εφαρμογή Καλών Γεωργικών Πρακτικών για την προσαρμογή της ελαιοκαλλιέργειας στην κλιματική αλλαγή

Στο πλαίσιο του έργου «Ψηφιακά εργαλεία και σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για την προσαρμογή της ελαιοκαλλιέργειας στην κλιματική αλλαγή (OLIVEALARM)» (<https://olivealarm.eu/>), κατά τα έτη 2023-2024 και 2024-2025 εφαρμόστηκαν σε πιλοτικούς ελαιώνες πρακτικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με ελαιώνες μάρτυρες όπου οι καλλιεργητικοί χειρισμοί δεν μεταβλήθηκαν. Η ιδέα του έργου ήταν να εντοπίζεται ο κίνδυνος για την καλλιέργεια με βάση το αναπτυξιακό στάδιο της ελιάς και τα μετεωρολογικά στοιχεία, και να ειδοποιούνται άμεσα οι παραγωγοί ώστε, σε συνεργασία με τον γεωπόνο τους, να αξιολογούν την ενέργεια που θα κάνουν στον ελαιώνα (παροχή προσωποποιημένων και εξειδικευμένων κατά περίπτωση συμβουλών). Για τη δημιουργία ενός ολιστικού συστήματος διαχείρισης ελαιώνα, πέρα από τον μηχανισμό έγκαιρης προειδοποίησης,

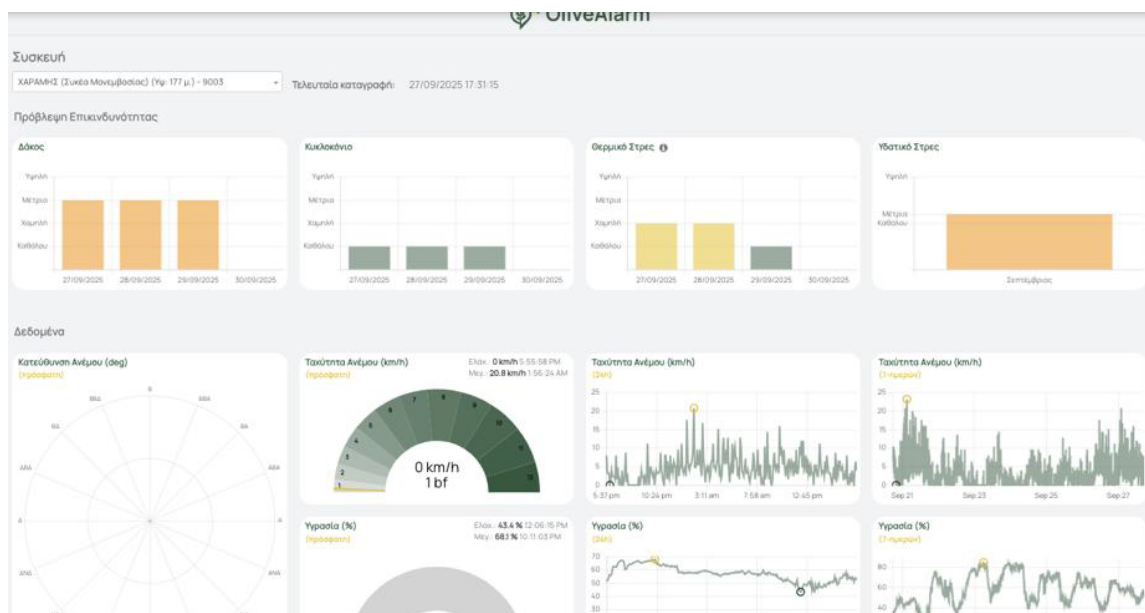
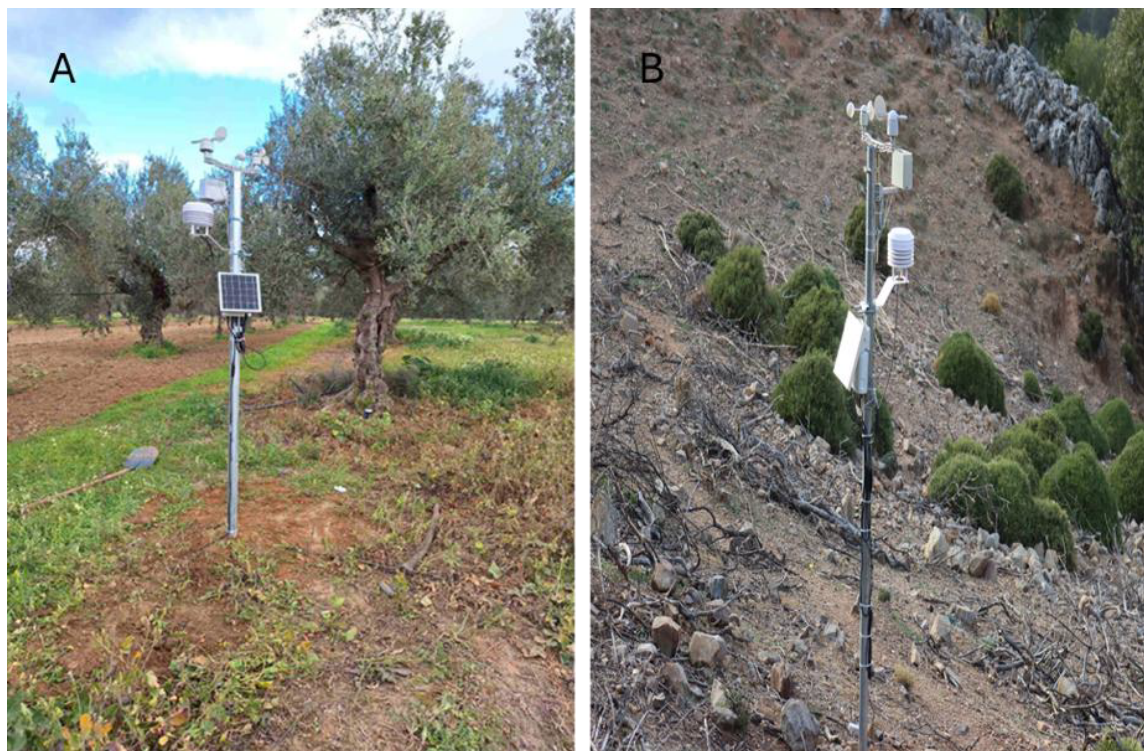
εφαρμόστηκαν επεμβάσεις σε πιλοτικούς ελαιώνες, σύμφωνες με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής και Εθνικής Νομοθεσίας και συγκεκριμένα των οικολογικών σχημάτων (eco-schemes). Οι πρακτικές εφαρμόστηκαν σε δύο περιοχές που είναι αρκετά ευάλωτες στις αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, και συγκεκριμένα σε πεδινούς αρδευόμενους ελαιώνες στους Μολάους Λακωνίας και σε ημιορεινούς και ορεινούς ελαιώνες στα Παλαιά Ρούματα Χανίων (Εικόνες 2.2.4 και 2.2.5).

Οι προτεινόμενες πρακτικές ήταν οι ακόλουθες:

- 1 Αναλύσεις εδάφους και φύλλων.
- 2 Εφαρμογή θερινού κλαδέματος.
- 3 Χρήση ψηφιακής εφαρμογής διαχείρισης εισροών και παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων (Ψηφιακή πλατφόρμα Fast (Farm Sustainability Tool - Εργαλείο Αειφορίας Φάρμας για τα Θρεπτικά συστατικά) ή gaiasense app).
- 4 Συγκέντρωση και θρυμματισμός των υπολειμμάτων καλλιεργειών και των κλαδεμάτων και εφαρμογή του κομπόστ (ιδιοπαραγώμενο ή μη).
- 5 Χρήση προϊόντων ή λιπασμάτων με βιοδιεγέρτες.
- 6 Πότισμα με βάση αισθητήρα εδαφικής υγρασίας και μετεωρολογικό σταθμό.
- 7 Καλλιέργεια φυτών ξενιστών για ενίσχυση της βιοποικιλότητας.
- 8 Καλλιέργεια χειμερινών σιτηρών και ψυχανθών.
- 9 Διατήρηση και προστασία καλλιεργειών σε εκτάσεις με αναβαθμίδες.
- 10 Εφαρμογή καολίνης για δάκο ή αντιδιαπνευστικά σκευάσματα.

Τόσο στην Λακωνία όσο και στα Χανιά χρησιμοποιήθηκαν δύο ζεύγη πιλοτικών αγρών, στους οποίους οι παραγωγοί επέλεξαν κάποιες από τις παραπάνω πρακτικές. Κάποιες από τις πρακτικές που επιλέχθηκαν ήταν κοινές και στις δύο περιπτώσεις και σχετίζονται με την αντιμετώπιση της υδατικής καταπόνησης. Οι κοινές πρακτικές ήταν η χρήση κομπόστ, η οποία αυξάνει την οργανική ύλη στο έδαφος και βοηθά στην συγκράτηση περισσότερης εδαφικής υγρασίας, και τα λιπάσματα με βιοδιεγέρτες, που βοηθούν τα φυτά να αντιμετωπίσουν την έλλειψη νερού βελτιώνοντας την ποιότητα και ποσότητα της παραγωγής. Συγκεκριμένα, ενισχύουν την αντοχή, διεγείρουν την ανάπτυξη ριζών, και

βελτιώνουν τη θρεπτική πρόσληψη, καθιστώντας τα φυτά πιο ανθεκτικά σε περιόδους ξηρασίας. Για την εφαρμογή των καλλιεργητικών χειρισμών λαμβάνονταν υπόψη οι πληροφορίες από τους εγκατεστημένους μετεωρολογικούς σταθμούς (Εικόνα 2.2.4).



Εικόνα 2.2.4: Εγκατάσταση μετεωρολογικών σταθμών σε ελαιώνες στη Λακωνία-Μολάους (Α) και στα Χανιά-Παλαιά Ρούματα (Β), και παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων με υποβοήθηση στη λήψη απόφασης για την υδατική καταπόνηση, στο πλαίσιο του έργου OLIVEALARM (Πηγή: OLIVEALARM, <https://olivealarm.eu/>).



Εικόνα 2.2.5: Εφαρμογή Καλών Γεωργικών Πρακτικών (εφαρμογή κομπόστ) σε ελαιώνες στη Λακωνία στο πλαίσιο του έργου OLIVEALARM (Πηγή: OLIVEALARM, <https://olivealarm.eu/>).

Από τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι οι εφαρμογές είχαν μεγαλύτερη επίδραση στον ελαιόκαρπο στην περιοχή της Λακωνίας σε σχέση με τα Παλαιά Ρούματα Χανίων. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της Λακωνίας στο ένα ζεύγος ελαιώνων (θέση Κουρίστρα) υπήρξε θετική επίδραση των εφαρμογών στο μέσο βάρος και στη διάμετρο καρπού. Η θετική επίδραση των εφαρμογών φάνηκε, επίσης, στα ποσοστά ελαιοπεριεκτικότητας επί νωπού και επί ξηρού στα δύο ζεύγη ελαιώνων στην περιοχή της Λακωνίας.

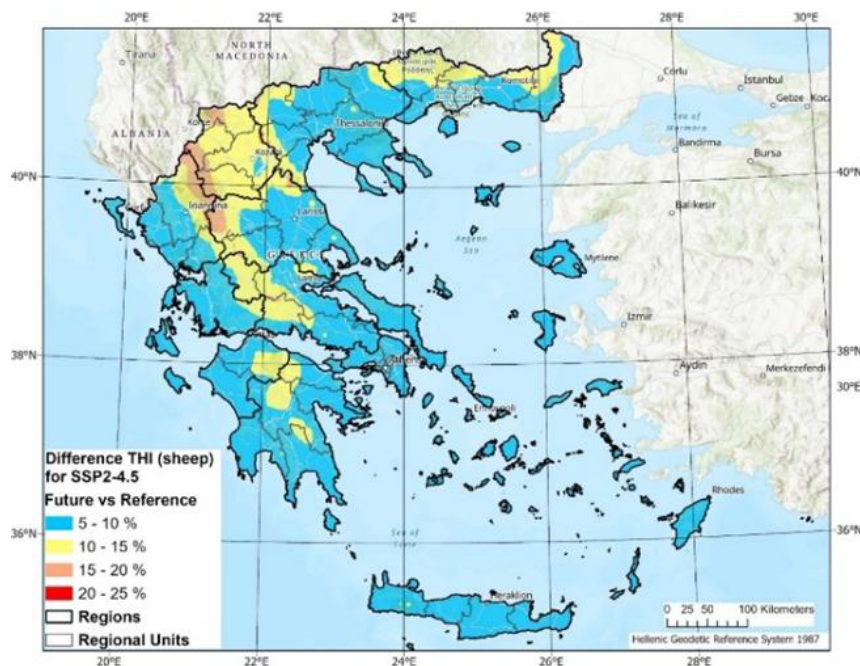
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκύπτει επίσης από την ανάλυση των δεδομένων των δακοπαγίδων στην περιοχή των Παλαιών Ρουμάτων Χανίων, όπου οι μεγαλύτερες αυξήσεις του δακοπληθυσμού σημειώθηκαν κατά το έτος 2022 το 3ο δεκάημερο του Αυγούστου, κατά το έτος 2023 το 2ο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου, και κατά το έτος 2024 στα τέλη Σεπτεμβρίου με αρχές Οκτωβρίου. Η πληροφορία αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να αξιολογείται κατά τόπους, καθώς ελαιόδενδρα που υφίστανται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα υδατική καταπόνηση και είναι περισσότερο διάστημα εκτεθειμένα στις δακοπροσβολές λόγω της επέκτασης των συνθηκών ανάπτυξης του εντόμου και μέσα στο φθινόπωρο, αντιμετωπίζουν ποσοτικά και ποιοτικά προβλήματα στην παραγωγή.

3. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

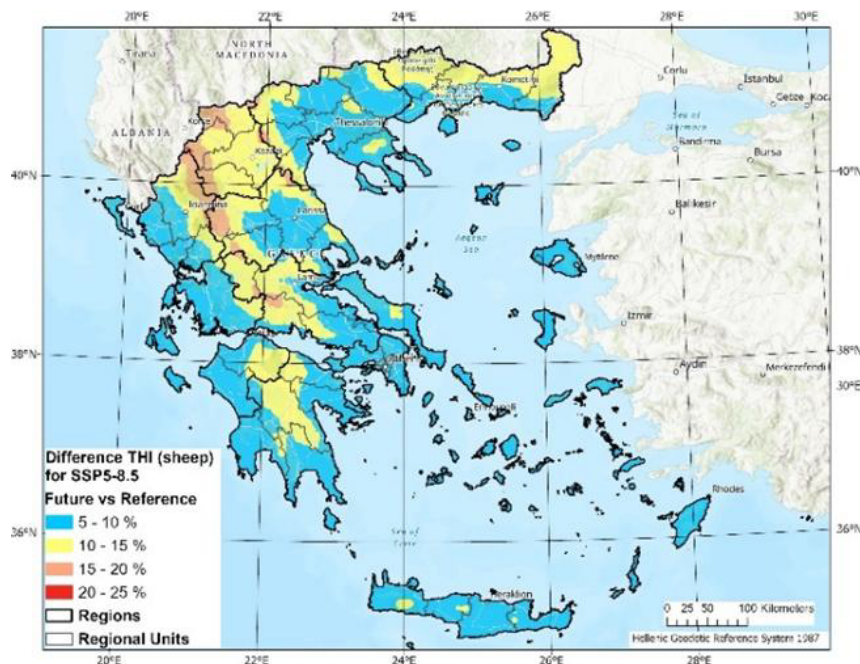
3.1 Χαρτογράφηση της Θερμικής Καταπόνησης Προβάτων και Βοοειδών υπό Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής – Ενδεικτικά Αποτελέσματα

3.1.1 Πρόβατα

Τα Σχήματα 3.1.1 και 3.1.2 δείχνουν τη διαφορά της μέσης τιμής του THI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του THI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για τα πρόβατα για κάθε κελί του μοντέλου υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5 και το σενάριο εκπομπών SSP8–4.5, αντίστοιχα (Papanastasiou et al., 2025a). Για το ενδιάμεσο σενάριο εκπομπών (SSP2–4.5), η μέση τιμή του THI των προβάτων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 5% – 10%, 10% – 15%, 15% – 20% και 20% – 25% στο 74,0%, 21,7%, 4,0% και 0,3% της Ελληνικής επικράτειας, αντίστοιχα. Τα μέσα επίπεδα THI των προβάτων επιδεινώνονται ελαφρώς όταν εφαρμόζεται το χειρότερο σενάριο εκπομπών (SSP5–8.5). Μεγαλύτερες αυξήσεις προβλέπονται για τις ορεινές περιοχές και για τα δύο σενάρια εκπομπών.



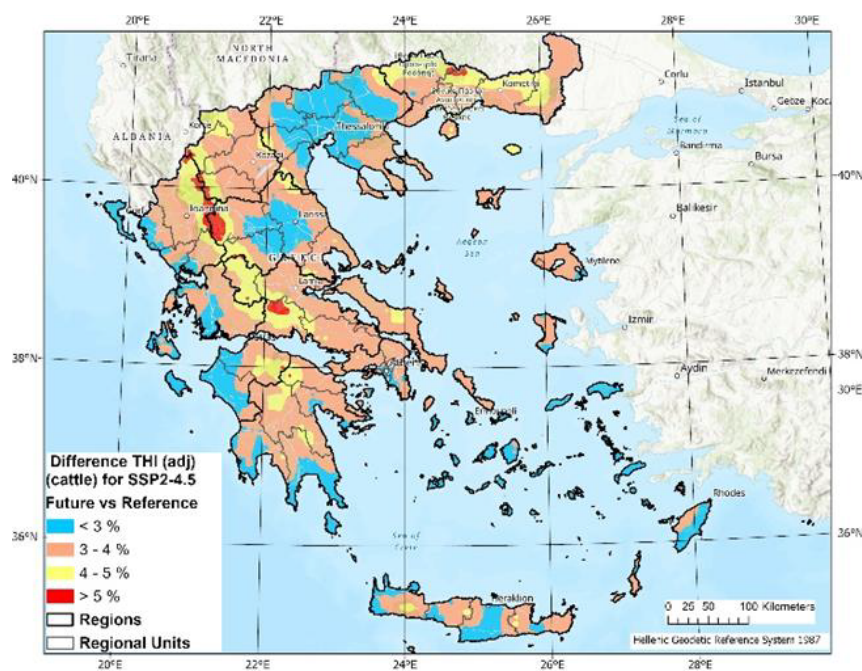
Σχήμα 3.1.1: Προσομοίωση της διαφοράς της μέσης τιμής του THI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του THI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για τα πρόβατα υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5.



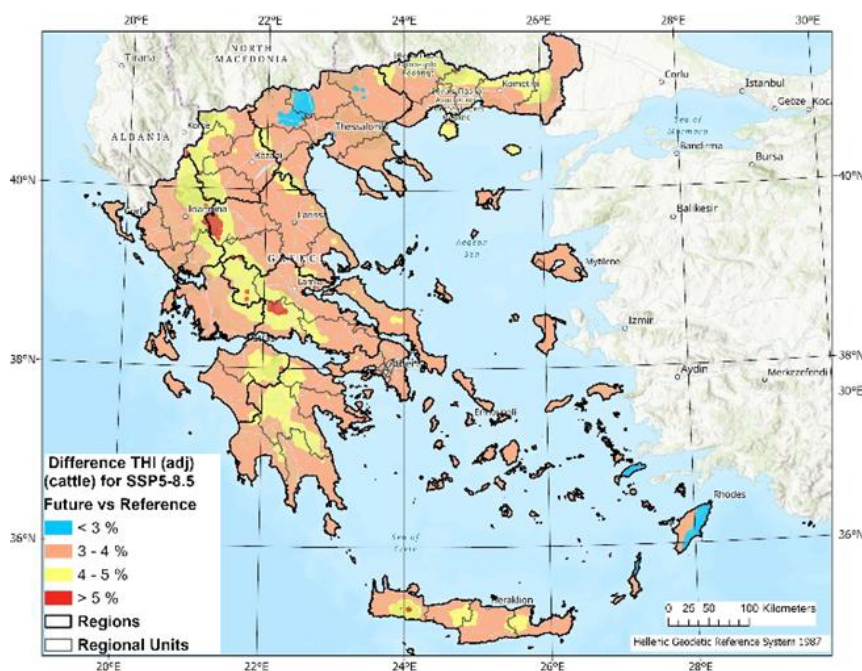
Σχήμα 3.1.2: Προσομοίωση της διαφοράς της μέσης τιμής του THI τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του THI την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για τα πρόβατα υπό το σενάριο εκπομπών SSP5–8.5.

3.1.2 Βοοειδή

Τα Σχήματα 3.1.3 και 3.1.4 δείχνουν τη διαφορά της μέσης τιμής του THI (adj) τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του THI (adj) την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για τα βοοειδή για κάθε κελί του μοντέλου υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5 και το σενάριο εκπομπών SSP8–4.5, αντίστοιχα (Papanastasiou et al., 2025a). Για το ενδιάμεσο σενάριο εκπομπών (SSP2–4.5), η μέση τιμή του THI (adj) των βοοειδών προβλέπεται να αυξηθεί λιγότερο από 3%, κατά 3% – 4%, κατά 4% – 5% και περισσότερο από 5% στο 30,0%, 51,8%, 14,7% και 3,5% της Ελληνικής επικράτειας, αντίστοιχα. Τα μέσα επίπεδα THI (adj) των βοοειδών επιδεινώνονται όταν εφαρμόζεται το χειρότερο σενάριο εκπομπών (SSP5–8.5). Όπως και στην περίπτωση των προβάτων, μεγαλύτερες αυξήσεις προβλέπονται για τις ορεινές περιοχές και για τα δύο σενάρια εκπομπών.



Σχήμα 3.1.3: Προσομοίωση της διαφοράς της μέσης τιμής του THI (adj) τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του THI (adj) την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για τα βοοειδή υπό το σενάριο εκπομπών SSP2–4.5.



Σχήμα 3.1.4: Προσομοίωση της διαφοράς της μέσης τιμής του THI (adj) τη μελλοντική περίοδο (2046–2055) πλην της μέσης τιμής του THI (adj) την περίοδο αναφοράς (2005–2014) για τα βοοειδή υπό το σενάριο εκπομπών SSP5–8.5.

3.2 Μέτρα Προσαρμογής και Καλές Πρακτικές για τη Μείωση της Τρωτότητας της Εκτροφής Ζώων από τη Θερμική Καταπόνηση λόγω Κλιματικής Αλλαγής

Γενικά, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην κτηνοτροφία μπορεί να υφίστανται μέσω των παρακάτω τεσσάρων διαφορετικών κατηγοριών επιδράσεων (Sejian et al., 2015):

α) στη γεωργία για την παραγωγή τροφίμων και πρώτων υλών για τη διατροφή του ανθρώπινου και ζωικού πληθυσμού. Αυτές οι επιπτώσεις αφορούν κυρίως στην παραγωγή δημητριακών και πρωτεϊνούχων καρπών, και δευτερευόντως στην παραγωγή ψυχανθών και βιομηχανικών φυτών, τα υποπροϊόντα των οποίων χρησιμοποιούνται στη διατροφή των ζώων.

β) στη χλωρά νομή των φυσικών βοσκότοπων και των τεχνητών λειμώνων, ως προς την ποιότητα και την ποσότητα της παραγόμενης βιομάζας που χρησιμοποιείται για τη διατροφή των μηρυκαστικών και άλλων ζώων. Έτσι, σε ξηρά και σε ημίξηρα, θερμά περιβάλλοντα, η παραγωγικότητα και η αναπαραγωγική ικανότητα των ζώων μειώνεται λόγω της μειωμένης παραγωγής φυτικής βιομάζας στους βοσκοτόπους και της μειωμένης διαθεσιμότητας νερού, με αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων για τη θερμορύθμιση και τη μετακίνηση των ζώων σε μεγαλύτερες αποστάσεις κατά την αναζήτηση τροφής και νερού.

γ) σε μικροβιακούς ή σε μη μικροβιακούς παράγοντες που προκαλούν ή προδιαθέτουν στην εμφάνιση ζωνοδόσων. Η κλιματική αλλαγή οδηγεί επίσης σε χωρο-χρονική ανακατανομή των μικροβίων, των παρασίτων και των εντόμων, αυξάνοντας τη δυναμική της μετάδοσης και τη διασπορά παθογόνων (Tsadilas, 2023).

δ) στην ανάπτυξη, την παραγωγή γάλακτος, την παραγωγή κρέατος και την αναπαραγωγική ικανότητα των αγροτικών ζώων. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε στρες και σε μειωμένη κατανάλωση τροφής, μειώνοντας το βάρος των ζώων και την παραγωγή κρέατος και γάλακτος (Bilal et al., 2021), ενώ το θερμικό στρες επηρεάζει συνολικά το μεταβολισμό των παραγωγικών ζώων (Koutsouli and Bizelis, 2019).

Οι βασικές στρατηγικές και καλές πρακτικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή για την εκτροφή ζώων, ειδικότερα μάλιστα σε ό,τι αφορά στο πρόβλημα αύξησης της θερμικής καταπόνησης, επικεντρώνονται στους παρακάτω τομείς (Roupkou et al., 2025):

1 Τροποποιήσεις στο Περιβάλλον και στον Τρόπο Διαχείρισης της Εκτροφής

Το φυσικό περιβάλλον μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση πιο αποτελεσματικών συστημάτων σκίασης, φυσικού ή τεχνητού αερισμού, με τη χρήση συστήματος ψεκασμού ή κλιματισμού, με την πιο συχνή παροχή νερού στα ζώα κ.λπ. Ο ευκολότερος και φθηνότερος τρόπος προστασίας από την ηλιακή ακτινοβολία μειώνοντας το θερμικό φορτίο κατά 30 έως 50% επιτυγχάνεται με τη χρήση φυσικής σκιάς (δέντρα) ή τη δημιουργία καταφυγίου για τα ζώα από διάφορα υλικά. Η χρήση μονωτικών υλικών μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία δωματίου έως και 10°C. Όταν η υψηλή θερμοκρασία συνδυάζεται με υψηλή υγρασία, η σκίαση είναι αναποτελεσματική. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούνται δυναμικά συστήματα αερισμού, συστήματα αερισμού-ψύξης, άμεσος ψεκασμός των ζώων ή συνδυασμός των παραπάνω. Τα παραπάνω συστήματα μπορούν να αυξήσουν την ημερήσια παραγωγή γάλακτος κατά 10 έως 20%, ειδικά τις ζεστές ημέρες (Koutsouli and Bizelis, 2019).

2 Τροποποιήσεις στη Διατροφή

Το θερμικό στρες επηρεάζει το μεταβολισμό των ζώων. Τα διατροφικά μέτρα ελέγχου του θερμικού στρες περιλαμβάνουν τη μείωση της κατανάλωσης ξηράς ουσίας, την αποφυγή της υπερβολικής χορήγησης πρωτεϊνών, τη μείωση των φυτικών ινών, την αύξηση των υδατανθράκων, και την παροχή επιπλέον νατρίου και καλίου. Στόχος είναι η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας της διατροφής για να αντισταθμιστεί η μείωση της πρόσληψης θρεπτικών ουσιών και ενέργειας, που προκαλείται από το θερμικό στρες και το μεταβολικό θερμικό φορτίο που σχετίζεται με τις ζυμώσεις των ζωοτροφών.

Οι Zervas et al. (2024) προτείνουν την υιοθέτηση συστημάτων διατροφής ακριβείας, σύμφωνα με τα οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της χορηγούμενης ενέργειας και των θρεπτικών συστατικών μέσω της διατροφής (μέγιστη απόδοση της τροφής), ελαχιστοποιείται η απέκκρισή τους με τα απόβλητα (ενώσεις αζώτου (N), φωσφόρου (P), κ.λπ.), εκδηλώνεται πλήρως το παραγωγικό δυναμικό των ζώων, και γίνεται η βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Κατά την προετοιμασία των σιτηρεσιών, επιλέγονται τροφές υψηλής πεπτικότητας και μικρότερο ποσοστό χονδροειδών ζωοτροφών για τη μείωση του παραγόμενου «εντερικού» μεθανίου. Η μείωση του μεθανίου επιτυγχάνεται επίσης με την προσθήκη φυτικής προέλευσης λίπους, πολυακόρεστων λιπαρών οξέων και άλλων προσθέτων στη διατροφή των ζώων.

Στις δίαιτες των παμφάγων ζώων, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση της βιολογικής αξίας των πρωτεϊνών, με την προσθήκη συνθετικών θειούχων αμινοξέων, για την πιο αποτελεσματική αξιοποίηση της τροφής.

3 Χρήση Γενετικών Μεθόδων

Υπάρχουν σημαντικές γενετικές διαφορές στα χαρακτηριστικά των ζώων που σχετίζονται με την ικανότητά τους να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό επιτρέπει, μέσω της επιλογής ανθεκτικών γονοτύπων, τη δημιουργία πληθυσμών που μπορούν να ανταπεξέλθουν στις νέες συνθήκες (Koutsouli and Bizelis, 2019). Μέσω προγραμμάτων γενετικής βελτίωσης είναι εφικτή η επιλογή ζώων που είναι ανθεκτικά στο θερμικό στρες, και εκμεταλλεύονται αποτελεσματικότερα τα θρεπτικά συστατικά του χορηγούμενου σιτηρεσίου, μειώνοντας το ποσοστό μεθανογένεσης. Για κάθε σύστημα παραγωγής, επιλέγονται τα καταλληλότερα ζώα, τα οποία πρέπει να είναι υψηλής παραγωγικότητας, δεδομένου ότι το αποτύπωμα άνθρακα εκφράζεται ανά μονάδα βάρους του ζωικού προϊόντος. Έτσι, καθώς αυξάνεται η παραγωγικότητα, το αποτύπωμα άνθρακα μειώνεται (Zervas et al., 2024).

4 Τεχνολογίες Κτηνοτροφίας Ακριβείας

Η σύγχρονη τεχνολογία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της υγείας και της ευζωίας των ζώων, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη της κτηνοτροφίας. Μέσω της χρήσης αισθητήρων, συστημάτων παρακολούθησης και τεχνητής νοημοσύνης, οι κτηνοτρόφοι έχουν πλέον τη δυνατότητα να λαμβάνουν ακριβή και εξειδικευμένα δεδομένα για κάθε ζώο ξεχωριστά. Η εφαρμογή της κτηνοτροφίας ακριβείας επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών, τη βελτιστοποίηση της διατροφής και την αποδοτικότερη χρήση των πόρων, ενισχύοντας τόσο την παραγωγικότητα όσο και την ευημερία των ζώων. Επιπλέον, μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και ενισχύεται η ιχνηλασιμότητα και η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Συνεπώς, η υιοθέτηση τεχνολογικά προηγμένων λύσεων αποτελεί σημαντική συνθήκη για τη μετάβαση σε ένα πιο υπεύθυνο μοντέλο ζωικής παραγωγής.

5 Προσαρμοστικές Στρατηγικές

Το πλαίσιο των προσαρμοστικών στρατηγικών για την κτηνοτροφία στην Ελλάδα προτείνεται να επικεντρωθεί στα παρακάτω (Voloudakis, 2020):

- Ανάδειξη των ιδιαιτεροτήτων των εγχώριων παραγωγικών συστημάτων και φυλών και του φιλικού προς το περιβάλλον χαρακτήρα της αιγοπροβατοτροφίας.
- Στρατηγικός σχεδιασμός για την ορεινή κτηνοτροφία.
- Αξιολόγηση των χρηματοοικονομικών ροών για τα βοοειδή ελεύθερας βοσκής και οι επιπτώσεις της εκτροφής τους στην κλιματική αλλαγή και τη διάβρωση του εδάφους των ορεινών βοσκοτόπων.
- Αξιοποίηση εγχώριων πρώτων υλών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα ζωοτροφών και να μειώσουν την παραγωγή αέριων ρύπων από την πέψη της τροφής στο πεπτικό σύστημα των μηρυκαστικών.
- Οι επιδοτήσεις πρέπει να είναι συνδεδεμένες με την παραγωγικότητα των ζώων, τη βιωσιμότητα των συστημάτων εκτροφής και την ενσωμάτωση καινοτομιών σε επίπεδο διαχείρισης.
- Μεγαλύτερη και δικαιότερη πρόσβαση των κτηνοτρόφων σε αποτελεσματικά χρηματοοικονομικά εργαλεία.
- Υιοθέτηση ορθών κτηνοτροφικών πρακτικών και πρακτικών κυκλικής οικονομίας στη ζωική παραγωγή της χώρας.

3.2.1 Εκτροφή Προβάτων

Η εφαρμογή μέτρων προσαρμογής και βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης συνιστάται έντονα για τους αιγοπροβατοτρόφους, προκειμένου να μετριαστούν οι δυσμενείς επιπτώσεις της θερμικής καταπόνησης που προκαλείται από την κλιματική αλλαγή στην παραγωγικότητα, την υγεία και την ευζωία των ζώων. Δεδομένης της εξαιρετικής οικονομικής, κοινωνικής, και περιβαλλοντικής σημασίας της αιγοπροβατοτροφίας στην Ελλάδα, η αποτελεσματική προσαρμογή και ο μετριασμός των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής αποτελούν επείγουσες προτεραιότητες για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας του τομέα.

Οι βασικές δράσεις προσαρμογής για την αιγοπροβατοτροφία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις τομείς (Papanastasiou et al., 2025b) (Πίνακας 3.2.1):

1

Γενετική Επιλογή και Στρατηγικές Εκτροφής

- **Εκτροφή φυλών ανθεκτικών στη θερμική καταπόνηση:** Συνιστάται η επιλογή φυλών αιγών και προβάτων που μπορούν να επιδείξουν **προσαρμοστικά φυσιολογικά χαρακτηριστικά και αυξημένη θερμοανοχή** (Joy et al., 2020; Muzzo et al., 2025; Papanastasiou et al., 2025b).
- **Ενσωμάτωση χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας:** Η ενσωμάτωση χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας στη θερμική καταπόνηση, όπως το **λευκό χρώμα του τριχώματος/ερίου και η αποτελεσματικότερη θερμορύθμιση μέσω ομοιοστατικών μηχανισμών**, στα προγράμματα γενετικής επιλογής είναι σημαντική (Papanastasiou et al., 2025b).
- **Στοχευμένη φαινοτυπική επιλογή:** Η φαινοτυπική επιλογή πρέπει να επικεντρωθεί σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή παραγωγικότητα, η βελτιωμένη θερμοανοχή και η **υψηλή αντοχή στα νοσήματα**. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι ο τύπος του δέρματος και του τριχώματος, η αναπαραγωγική ικανότητα, ο δείκτης μετατρεψιμότητας της τροφής και η μέση ημερήσια αύξηση, η αντοχή στην ξηρασία, και ο χαμηλός μεταβολικός ρυθμός (Joy et al., 2020).

2 Διαχείριση Στέγασσης και Μικροκλίματος (Περιβαλλοντικές Τροποποιήσεις)

Η προσαρμογή του περιβάλλοντος των ζώων είναι κρίσιμη για τον μετριασμό των επιπτώσεων της θερμικής καταπόνησης (Henry et al., 2018; Papanastasiou et al., 2025b).

- **Παροχή σκιάς και ψύξης:** Η παροχή επαρκούς **φυσικής (π.χ. δέντρα) ή τεχνητής σκιάς (π.χ. καταφύγιο)** είναι απαραίτητη.
- **Συστήματα εξαερισμού και ψύξης:** Η χρήση **φυσικού ή τεχνητού αερισμού και συστημάτων ψύξης** (π.χ. καταιονιστήρες, μίστρες, ανεμιστήρες) είναι σημαντική.
- **Βελτιώσεις στις εγκαταστάσεις:** Η χρήση **μονωτικών υλικών** και η βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας του αέρα για τη μείωση της συσσώρευσης θερμότητας στον στάβλο συνιστάται.
- **Διαχείριση βόσκησης:** Η **στратηγική βόσκηση νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα** βοηθά στην αποφυγή της έκθεσης σε συνθήκες θερμικής καταπόνησης.
- **Προσαρμογή της φόρτισης δαπέδου:** Οι **εποχιακές τροποποιήσεις στην φόρτιση δαπέδου** και η αποφυγή του υπερπληθυσμού μειώνουν τη συσσώρευση θερμότητας.
- **Υποδομές ύδρευσης σε βοσκότοπους:** Η αύξηση των σημείων ύδρευσης στους βοσκότοπους μειώνει την απόσταση που διανύουν τα ζώα για να πίνουν νερό, ενώ η παροχή σκιάς πάνω από τα σημεία ύδρευσης μειώνει την εξάτμιση και τη θερμοκρασία του νερού, βοηθώντας στην αντιμετώπιση της θερμικής καταπόνησης.

3 Διατροφικές Παρεμβάσεις και Διαχείριση Υδάτινων Πόρων

Η βελτιστοποίηση της διατροφής και η επαρκής ενυδάτωση είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση της θερμικής καταπόνησης (Henry et al., 2018; Joy et al., 2020; Papanastasiou et al., 2025b).

- **Πρόσβαση σε νερό και ηλεκτρολύτες:** Η εξασφάλιση **ελεύθερης πρόσβασης σε φρέσκο, δροσερό νερό και ηλεκτρολύτες** είναι πρωταρχικής σημασίας για την πρόληψη της αφυδάτωσης και την υποστήριξη της θερμορύθμισης.

— Τροποποίηση της διατροφής:

- **Μείωση της περιεκτικότητας σε ινώδεις ουσίες** (ακατέργαστες) και **αύξηση της ποσότητας των συμπυκνωμένων ζωοτροφών** στα σιτηρέσια, ώστε να μειωθεί η παραγωγή θερμότητας από τις ζυμώσεις των μικροοργανισμών της μεγάλης κοιλίας.
- Χρήση **υψηλής ποιότητας χορτονομής και στρατηγικών διατροφικών συμπληρωμάτων** για βελτίωση της αποτελεσματικότητας της παραγωγής.
- Αύξηση της περιεκτικότητας σε πεπτές πρωτεΐνες και **καθαρή ενέργεια** για την αντιστάθμιση της μειωμένης ικανότητας πρόσληψης τροφής κατά τη θερμική καταπόνηση.

— **Συμπληρώματα ζωοτροφών:** Η χορήγηση συμπληρωμάτων διατροφής με αντιοξειδωτική δράση (όπως βιταμίνη Ε και σελήνιο) συμβάλλει στον μετριασμό του οξειδωτικού στρες που προκαλείται από τη θερμική καταπόνηση. Άλλα χρήσιμα συμπληρώματα περιλαμβάνουν τη βιταμίνη C και τη βηταΐνη.

— **Προσαρμογή των βοσκοτόπων:** Η εισαγωγή **ξηροανθεκτικών ειδών χορτονομής** εξασφαλίζει βιώσιμες πηγές τροφής για τα ζώα.

— **Διαχείριση βοσκοτόπων:** Η εφαρμογή **συστημάτων διαχείρισης της βόσκησης**, όπως η εκ περιτροπής βόσκηση (rotational grazing), μπορεί να προωθήσει την υγεία των βοσκοτόπων και να μετριάσει την υποβάθμιση της γης.

4 Τεχνολογίες Κτηνοτροφίας Ακριβείας και Παρακολούθηση

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διαχείριση της υγείας και της ευζωίας των ζώων (Kazemi et al, 2025, Papanastasiou et al, 2025b).

— **Συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο:** Χρήση συστημάτων παρακολούθησης των **μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών** και **φορητών αισθητήρων** (wearable sensors) για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των ζώων και δεικτών θερμικής καταπόνησης.

- **Συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο:** Χρήση συστημάτων παρακολούθησης των μικροπεριβαλλοντικών συνθηκών και φορητών αισθητήρων (wearable sensors) για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των ζώων και δεικτών θερμικής καταπόνησης.
- **Παρακολούθηση δεικτών:** Παρακολούθηση δεικτών υγείας και ευζωίας όπως η κινητικότητα, η θερμοκρασία του σώματος και ο ρυθμός αναπνοής, η αφυδάτωση και η μειωμένη πρόσληψη τροφής.
- **Αυτοματοποιημένες τεχνολογίες:** Εφαρμογή αυτοματοποιημένων τεχνολογιών φαινοτύπησης και καταγραφής δεδομένων συμπεριφοράς, παραγωγικότητας, υγείας, και ευζωίας.
- **Πρωτόκολλα υγείας:** Εφαρμογή κατάλληλης κτηνιατρικής φροντίδας, διατροφικών πρωτοκόλλων και πρωτοκόλλων διαχείρισης της υγείας της εκτροφής για την υποστήριξη της ανοσολογικής απόκρισης των ζώων.
- **Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης:** Χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων προειδοποίησης (π.χ. βάσει του Δείκτη Θερμοκρασίας – Υγρασίας, THI) για την ενεργοποίηση διαχειριστικών δράσεων (Henry et al., 2018).



AGRO
FUTURE
CLIMATE STRESS

3.2.2 Εκτροφή Βοοειδών

Οι βασικές δράσεις προσαρμογής για τα βοοειδή (και τα μηρυκαστικά γενικότερα) απέναντι στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, ιδίως λόγω της αναμενόμενης αύξησης του θερμικού στρες, είναι πολυδιάστατες και χωρίζονται σε τέσσερις κύριους τομείς: γενετική επιλογή, διαχείριση της στέγασσης και του μικροκλίματος, διατροφικές παρεμβάσεις και τεχνολογίες κτηνοτροφίας ακριβείας (Henry et al., 2018; Papanastasiou et al., 2025b).

Αυτές οι στρατηγικές και οι ορθές κτηνοτροφικές πρακτικές συνιστώνται σθεναρά για τον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων της θερμικής καταπόνησης στην παραγωγικότητα, την υγεία και την ευζωία των ζώων (Πίνακας 3.2.1):

1 Γενετική Επιλογή και Αναπαραγωγή

Η γενετική επιλογή στοχεύει στη βελτίωση της εγγενούς ανθεκτικότητας των ζώων στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος.

- **Επιλογή ανθεκτικών φυλών:** Συνιστάται η χρησιμοποίηση φυλών βοοειδών που επιδεικνύουν αυξημένη προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και ανώτερη **θερμοαντοχή**. Ήδη υπάρχουν παρατηρήσεις που δείχνουν ότι η παραγωγή γάλακτος των γαλακτοπαραγωγών βοοειδών Holstein-Jersey σε τροπικές και υποτροπικές συνθήκες μπορεί να είναι 40% έως 60% χαμηλότερη, από ό,τι σε εύκρατες συνθήκες (Henry et al., 2018).
- **Ενσωμάτωση χαρακτηριστικών αντοχής:** Τα προγράμματα γενετικής επιλογής πρέπει να ενσωματώνουν χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αντοχή στη θερμότητα, όπως το **χρώμα του δέρματος και του τριχώματος** και η ρύθμιση του μεταβολικού ρυθμού (Papanastasiou et al., 2025b).
- **Αξιοποίηση γονιδιωματικής και επικοινωνιακής μνήμης:** Η γενετική επιλογή, σε συνδυασμό με την εύρεση επιγενετικών βιοδεικτών και επιγενετικών μνημών, παρέχει τη δυνατότητα ενίσχυσης της ανθεκτικότητας των πληθυσμών βοοειδών και τη βελτίωση της προσαρμογής τους στο περιβαλλοντικό στρες (Muzzo et al., 2025).

- **Διασταυρώσεις φυλών:** Οι στοχευμένες διασταυρώσεις μπορεί να βελτιώσουν την ανθεκτικότητα στο κλίμα εισάγοντας γενετική ποικιλομορφία από φυλές με προσαρμοστικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, διασταυρωμένα βοοειδή (όπως τα Criollo × Angus) έχουν δείξει χαμηλότερες ανάγκες σε νερό και καλύτερη προσαρμογή σε θερμά κλίματα (Muzzo et al., 2025).

2 Διαχείριση Στέγασσης και Μικροκλίματος

Η διαχείριση του περιβάλλοντος των ζώων είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση της συσσωρευμένης θερμότητας (Henry et al., 2018; Papanastasiou et al., 2025b).

- **Σκίαση και ψύξη:** Παροχή επαρκούς σκίασης, είτε φυσικής (π.χ. δέντρα) είτε τεχνητής (π.χ. στέγαστρο).
- **Συστήματα ψύξης:** Εφαρμογή συστημάτων φυσικού ή τεχνητού αερισμού και ψύξης (π.χ. ψεκαστήρες και συστήματα υδρονέφωσης).
- **Βελτίωση στάβλων:** Χρήση μονωτικών υλικών για τη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας του αέρα και τη μείωση της συσσώρευσης θερμότητας στους στάβλους.
- **Διαχείριση βόσκησης:** Στρατηγική βόσκηση κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και αργά το απόγευμα για αποφυγή έκθεσης στη θερμότητα.
- **Φόρτιση δαπέδου:** Εποχιακές τροποποιήσεις στη φόρτιση δαπέδου και αποφυγή του συνωστισμού για μείωση της συσσώρευσης θερμότητας.
- **Διαχείριση κοπριάς:** Σε περιβάλλοντα όπως οι κτηνοτροφικές μονάδες πάχυνσης (feedlots), συνιστάται η τακτική απομάκρυνση της κοπριάς.

3 Διατροφικές Παρεμβάσεις

Οι παρεμβάσεις στη διατροφή και η επαρκής ενυδάτωση βοηθούν τα βοοειδή να διαχειριστούν διαταραχές του μεταβολισμού που σχετίζονται με τη θερμική καταπόνηση (Henry et al., 2018; Papanastasiou et al., 2025b).

- **Νερό και ηλεκτρολύτες:** Ελεύθερη πρόσβαση σε φρέσκο, δροσερό νερό και ηλεκτρολύτες για την πρόληψη της αφυδάτωσης και την υποστήριξη της θερμορύθμισης. Το πόσιμο νερό για τα βοοειδή συνιστάται να έχει θερμοκρασία μεταξύ 5°C και 18°C.

○ Η **στρατηγική τοποθέτηση σημείων ύδρευσης** (εντός 1 έως 2 χιλιομέτρων) είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που δαπανάται για την πρόσβαση σε νερό, ιδιαίτερα σε ξηροθερμικές περιοχές.

○ Η **επεξεργασία του νερού** (π.χ. φιλτράρισμα, χλωρίωση) είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ποιότητας, καθώς οι αλλαγές στο κλίμα μπορούν να μειώσουν την ποιότητα του νερού.

— **Προσαρμογή διατροφής:** Μείωση της περιεκτικότητας σε φυτικές ίνες και αύξηση των συμπυκνωμένων ζωοτροφών στη διατροφή για τη μείωση της παραγωγής θερμότητας από τις ζυμώσεις του περιεχομένου της μεγάλης κοιλίας. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνες και εύπεπτη ενέργεια μπορεί να αντισταθμίσει τη μειωμένη πρόσληψη τροφής κατά τη διάρκεια του θερμικού στρες.

— **Συμπληρώματα:** Συμπλήρωση με **αντιοξειδωτικά** (όπως βιταμίνη Ε και σελήνιο) για τον μετριασμό του οξειδωτικού στρες που προκαλείται από τη θερμική καταπόνηση. Συνιστώνται επίσης βιταμίνες C και Α και ιχνοστοιχεία, όπως ο ψευδάργυρος.

— **Ποικιλομορφία φυτικής ύλης (Forage Diversity):** Η δημιουργία «νησίδων λειτουργικής ποικιλομορφίας φυτών» (feed patches) βελτιώνει την ποιότητα της χορτονομής, μειώνει το αποτύπωμα άνθρακα και αζώτου, και παρέχει τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά και βιοενεργά στοιχεία για τη διατροφή των βοοειδών. Η ενσωμάτωση θάμνων (shrubs) στους βοσκότοπους μπορεί να επεκτείνει την περίοδο βόσκησης και να προσφέρει τροφή υψηλής ποιότητας κατά τη διάρκεια της ξηρασίας (Muzzo et al., 2025).

4 Τεχνολογίες Κτηνοτροφίας Ακριβείας και Διαχείριση

Η αξιοποίηση συστημάτων κτηνοτροφίας ακριβείας επιτρέπει την ακριβή και προσαρμοστική διαχείριση (Muzzo et al., 2025; Papanastasiou et al., 2025b) των εκτροφών.

— **Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο:** Εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης του μικροπεριβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο.

- **Φορητοί αισθητήρες:** Χρήση φορητών αισθητήρων (wearable sensors) για την παρακολούθηση της **συμπεριφοράς** των ζώων και των **δεικτών θερμικού στρες**, όπως η μειωμένη κινητικότητα, η αυξημένη θερμοκρασία του σώματος, ο αυξημένος αναπνευστικός ρυθμός, η αφυδάτωση, και η μειωμένη πρόσληψη τροφής.
- **GPS και επιταχυνσιόμετρα:** Τα κολάρα GPS σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με επιταχυνσιόμετρα, παρέχουν λεπτομερή δεδομένα για την κίνηση και τη δραστηριότητα των βοοειδών, βοηθώντας στη διαχείριση της διατροφής και στο μετριασμό της θερμικής καταπόνησης.
- **Τηλεπισκόπηση και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών:** Η χρήση τηλεπισκόπησης (Remote Sensing) και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ, GIS) βοηθά στον εντοπισμό υγρών σημείων (wet spots) για την εγκατάσταση νησίδων φυτικής ποικιλομορφίας, καθώς και στην παρακολούθηση της υγείας της βλάστησης (π.χ. με δείκτες NDVI, EVI) για τον εντοπισμό βέλτιστων περιοχών βόσκησης («green spots»).



Πίνακας 3.2.1: Μέτρα προσαρμογής ανά κατηγορία ζώνων

Κατηγορία Μέτρων	Βοοειδή	Αιγοπρόβατα
Θερμική Άνεση	Σκίαση, ανεμιστήρες, ψεκασμός νερού, θερμομονωτικοί στάβλοι	Σκίαση σε βοσκότοπους, φυσικά καταφύγια (δέντρα), μηχανικός αερισμός σε στάβλους
Γενετική Βελτίωση	Επιλογή θερμοανθεκτικών φυλών (π.χ. Brahman) σε σχήματα διασταυρώσεων	Διατήρηση τοπικών φυλών ανθεκτικών σε ξηροθερμικές συνθήκες (π.χ. πρόβατα Χίου, Λέσβου, Σφακίων, αίγα Κρήτης)
Διατροφή & Νερό	Συστήματα αποθήκευσης νερού, συμπληρώματα για την αντιμετώπιση της θερμικής καταπόνησης	Εκ περιτροπής βόσκηση, ανθεκτικά φυτά για την παραγωγή ζωοτροφών, ποτίστρες χαμηλών απωλειών
Υγεία & Βιοασφάλεια	Πρόληψη θερμικής καταπόνησης, εμβολιασμοί, παρακολούθηση νοσημάτων	Έλεγχος παρασίτων, ενίσχυση προγραμμάτων υγείας
Τεχνολογίες	Αισθητήρες θερμοκρασίας, αυτόματες ποτίστρες, συστήματα ψύξης	GPS για βόσκηση, εικονικοί φράχτες, παρακολούθηση υγείας
Ολοκληρωμένες Πρακτικές	Συνδυασμός δέντρων και βοσκότοπου για τη διαμόρφωση μικροκλίματος, αγροβολταικά για σκίαση και παραγωγή ενέργειας	Συνδυασμός δέντρων και βοσκής βοσκότοπου για τη διαμόρφωση μικροκλίματος, αγροβολταικά για σκίαση και παραγωγή ενέργειας

4. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η γεωργία και η κτηνοτροφία αποτελούν βασικούς πυλώνες της οικονομίας στην Ελλάδα και στις Μεσογειακές χώρες γενικότερα. Η καλλιέργεια σιταριού και ελαιόδεντρων, καθώς και η εκτροφή βοοειδών και προβάτων, είναι κρίσιμες για την εξασφάλιση της διατροφικής επάρκειας και ασφάλειας.

Η προσαρμογή του γεωργικού και κτηνοτροφικού τομέα στην κλιματική αλλαγή απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που βασίζεται στη διατομεακή και διεπιστημονική συνεργασία. Οι στρατηγικές προσαρμογής μπορούν να υλοποιηθούν με τη συμμετοχή και συντονισμό όλων των εμπλεκόμενων φορέων, από τους παραγωγούς έως τις κυβερνητικές αρχές και τα ερευνητικά ιδρύματα:

- ① **Γεωργοί, Κτηνοτρόφοι:** Η εφαρμογή στρατηγικών προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή από τους αγρότες είναι θεμελιώδης. Οι γεωργοί και κτηνοτρόφοι θα πρέπει να ενσωματώσουν νέες πρακτικές και καινοτόμες μεθόδους στην παραγωγή τους, προκειμένου να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες κλιματικές προκλήσεις. Η εκπαίδευση και η συνεχής ενημέρωσή τους για τις καλύτερες δυνατές πρακτικές είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα αυτών των στρατηγικών.
- ② **Κυβέρνηση, Πολιτικοί Υπεύθυνοι:** Οι κυβερνητικοί φορείς και οι αρμόδιοι για τη χάραξη πολιτικής έχουν τον ρόλο να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν σχέδια προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Η θέσπιση κινήτρων και κανονιστικών ρυθμίσεων που να στηρίζουν την προσαρμογή του αγροτικού τομέα είναι κρίσιμη για τη μακροχρόνια επιτυχία της διαδικασίας. Η δημιουργία ενός ευνοϊκού πλαισίου για τη στήριξη των γεωργών και των κτηνοτρόφων είναι καθοριστική.
- ③ **Ερευνητικά Ιδρύματα/Πανεπιστήμια, Μετεωρολογικές Υπηρεσίες, Παροχείς Κλιματικών Δεδομένων:** Η επιστημονική κοινότητα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην προσαρμογή του γεωργικού τομέα στην κλιματική αλλαγή. Η παροχή αξιόπιστων κλιματικών δεδομένων, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, η πραγματοποίηση πιλοτικών μελετών, και η μετάδοση γνώσης και καινοτομίας στους γεωργούς και κτηνοτρόφους είναι απαραίτητα βήματα για την υποστήριξη της προσαρμογής. Ειδικότερα, η παροχή εποχικών προβλέψεων, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και συμβουλών σχετικών με καιρικά φαινόμενα μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην πρόληψη των ζημιών από τις κλιματικές καταστροφές.
- ④ **Αγροτικοί Συνεταιρισμοί, Εκπρόσωποι Βιομηχανίας:** Οι αγροτικοί συνεταιρισμοί και οι εκπρόσωποι της βιομηχανίας έχουν το ρόλο να συνδέσουν τους αγρότες με τις αγορές, τους πόρους και τις συλλογικές υποδομές.

Επιπλέον, η πρωτοβουλία και ευθύνη διοργάνωσης προγραμμάτων κατάρτισης για τη συνεχιζόμενη εκπαίδευση των γεωργών και κτηνοτρόφων είναι σημαντική για την εφαρμογή των νέων στρατηγικών και τεχνολογιών για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

- Χρηματοπιστωτικά Ιδρύματα, Παροχές Ασφαλίσεων:** Η χρηματοδότηση της προσαρμογής απαιτεί τη δημιουργία «κλιματικά έξυπνων» δανείων, συστημάτων ασφάλισης καλλιεργειών, και μηχανισμών «πράσινων» επενδύσεων. Οι τράπεζες και οι ασφαλιστικές εταιρείες πρέπει να παρέχουν τα κατάλληλα οικονομικά εργαλεία που θα ενισχύσουν τις δυνατότητες των αγροτών να επενδύσουν σε πιο ανθεκτικές και βιώσιμες πρακτικές.

- Τοπικές Κοινότητες, Μη Κυβερνητικές Οργανώσεις:** Οι τοπικές κοινότητες και οι μη κυβερνητικές οργανώσεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη τοπικών έργων προσαρμογής, και στην ευαισθητοποίηση των πολιτών ενισχύοντας τη βιωσιμότητα αυτών των προσπαθειών και διασφαλίζοντας την κοινωνική αποδοχή τους.

Η επιτυχής προσαρμογή του αγροτικού τομέα στην κλιματική αλλαγή απαιτεί τον συντονισμό των δράσεων αυτών των διαφορετικών φορέων, και την ανάπτυξη στρατηγικών που να συνδυάζουν τις ανάγκες του περιβάλλοντος, της κοινωνίας και της οικονομίας. Μόνο μέσα από την αποτελεσματική συνεργασία και τη συνεχιζόμενη προσαρμογή μπορούμε να διασφαλίσουμε την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα της γεωργίας και κτηνοτροφίας στον 21ο αιώνα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση

1. Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2020α, <https://www.statistics.gr/el/statistics//publication/SPG31>.
2. Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2020β, <https://www.statistics.gr/el/statistics//publication/SPK11>.
3. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής. Οι Περιβαλλοντικές, Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα, 2011. Αθήνα: Ίδρυμα Εκτύπωσης Τραπεζογραμματίων και Αξιών της Τράπεζας της Ελλάδος, www.bankofgreece.gr/BogEkdoseis/Πληρης_Εκθεση.pdf.
4. Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Ελαιόλαδο: Επισκόπηση της παραγωγής και εμπορίας ελαιολάδου στην ΕΕ, 2020, https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/olive-oil_el.
5. Καραμάνος, Α. Τα σιτηρά των εύκρατων κλιμάτων. Εκδόσεις Παπαζήση, 2008.
6. Καραμάνος, Α.; Κοσμάς, Κ.; Βολουδάκης, Δ.; Καϊρης, Ο.; Καψωμενάκης, Ι. Εκτιμήσεις των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στους εδαφικούς πόρους και στις αροτραίες καλλιέργειες της Θεσσαλίας. Ακαδημία Αθηνών, 2022, ISBN: 978-960-404-394-1.

Ξενόγλωσση

1. Alordzinu, K. E.; Li, J.; Lan, Y.; Appiah, S. A.; Al Aasmi, A.; Wang, H. Rapid estimation of crop water stress index on tomato growth. *Sensors* 2021, 21, 5142, <https://doi.org/10.3390/s21155142>.
2. Belaaziz, S.; Khabba, S.; Kharrou, M.H.; Bouras, E.H.; Er-Raki, S.; Chehbouni, A. Optimizing the sowing date to improve water management and wheat yield in a large irrigation scheme, through a remote sensing and an evolution strategy-based approach. *Remote Sens.* 2021, 13, 3789, <https://doi.org/10.3390/rs13183789>.
3. Ben-Ari, G.; Biton, I.; Many, Y.; Namdar, D.; Samach, A. Elevated temperatures negatively affect olive productive cycle and oil quality. *Agronomy* 2021, 11:1492, <https://doi.org/10.3390/agronomy11081492>.
4. Ben-Gal, A.; Agam, N.; Alchanatis, V.; Cohen, Y.; Yermiyahu, U.; Zipori, I.; Presnov, E.; Dag, A.; Bonfil, D.J. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrig. Sci.* 2009, 27, 367-376, <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0150-7>.
5. Berni, J.A.J.; Zarco-Tejada, P.J.; Sepulcre-Cantó, G.; Fereres, E.; Villalobos, F. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, 2380-2388, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.018>.
6. Bilal, R.M.; Hussan, F.; Farag, M.R.; Nasir, T.A.; Ragni, M.; Mahgoub, H.A.M.; Alagawany, M. Thermal stress and high stocking densities in poultry farms: Potential effects and mitigation strategies. *J. Therm. Biol.* 2021, 99, 102944, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102944>.

7. Bonofiglio, T.; Orlandi, F.; Sgromo, C.; Romano, B.; Fornaciari, M. Evidences of olive pollination date variations in relation to spring temperature trends. *Aerobiologia* 2009, 25, 227–237, <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9128-4>.
8. Brito, C.; Dinis, L.-T.; Moutinho-Pereira, J.; Correia, C.M. Drought stress effects and olive tree acclimation under a changing climate. *Plants* 2019, 8:232, <https://doi.org/10.3390/plants8070232>.
9. Camera, C.; Bruggeman, A.; Hadjinicolaou, P.; Pashiardis, S.; Lange, M.A. Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation ($1 \times 1 \text{ km}^2$); Cyprus, 1980–2010. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014, 119, 693–712, <https://doi.org/10.1002/2013JD020611>.
10. Chen, J.; Yang, S.; Li, H.; Zhang, B.; Lv, J. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2013, XL-4/W3, 2013 ISPRS/IGU/ICA Joint Workshop on Borderlands Modelling and Understanding for Global Sustainability, 5–6 December 2013, Beijing, China.
11. Emmerichs, T.; Lu, Y.-S.; Taraborrelli, D. The influence of plant water stress on vegetation–atmosphere exchanges: Implications for ozone modelling. *Biogeosciences* 2024, 21, 3251–3269, <https://doi.org/10.5194/bg-21-3251-2024>.
12. Food and Agriculture Organization. Focus on olive oil. Food outlook, November 2024, <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e3f86a02-f489-4f12-a859-64a038409c1f/content>
13. Food and Agriculture Organization. Land statistics 2001–2023 – Global, regional and country trends. FAOSTAT Analytical Briefs, No.107, 2025, Rome, <https://doi.org/10.4060/cd5765en>.
14. Farr, T.G.; Rosen, P.A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D.; Alsdorf, D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 2007, 45, <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
15. Fraga, H.; Pinto, J.G.; Santos, J.A. Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo Portugal. *Agric. Water Manag.* 2020, 237, 106193, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106193>.
16. Georgopoulou, E.; Gakis, N.; Voloudakis, D.; Daskalakis, M.; Sarafidis, Y.; Lalas, D.P.; Mirasgedis, S. Effectiveness of options for the adaptation of crop farming to climate change in a country of the European South. *Agriculture* 2024, 14, 1814, <https://doi.org/10.3390/agriculture14101814>.
17. Ghobadi, M.; Badehian, Z. Assessment of agricultural drought severity using multi-temporal remote sensing data in the Lorestan region. *Sci. Rep.* 2015, 15, 18528, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03087-4>.
18. Giannaros, C.; Melas, D.; Giannaros, T.M. On the short-term simulation of heat waves in the Southeast Mediterranean: Sensitivity of the WRF model to various physics schemes. *Atmos. Res.* 2019, 218, 99–116, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.11.015>.
19. Goussios, D.; Faraslis, I. Integrated remote sensing and 3D GIS methodology to strengthen public participation and identify cultural resources. *Land* 2022, 11, no. 10: 1657, <https://doi.org/10.3390/land11101657>.

- 20.** Gucci, R.; Fereres, E.; Goldhamer, D.A. Olive. In: Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (eds.) *Crop Yield Response to Water Irrigation and Drainage Paper 66* FAO, Rome, 2012, pp. 300-313.
- 21.** Henry, B.K.; Eckard, R.J.; Beauchemin, K.A. Review: Adaptation of ruminant livestock production systems to climate changes. *Animal*. 2018, 12(s2), s445-s456, <https://doi.org/10.1017/S1751731118001301>.
- 22.** Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou B. (eds.) *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, In press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- 23.** Joy, A.; Dunshea, F.R.; Leury, B.J.; Clarke, I.J.; DiGiacomo, K.; Chauhan, S.S. Resilience of small ruminants to climate change and increased environmental temperature: A review. *Animals* 2020, 10, 867, <https://doi.org/10.3390/ani10050867>.
- 24.** Jackson, R.D. Soil moisture inferences from thermal infrared measurements of vegetation temperatures. In: *Digest 1981 International Geosciences and Remote Sensing Symposium IEEE: Washington, DC, USA; New York, NY, USA, 1981*.
- 25.** Jackson, R.D.; Kustas, W.P.; Choudhury, B.J. A reexamination of the crop water stress index. *Irrig. Sci.* 1988, 9, 309-317, <https://doi.org/10.1007/BF00296705>.
- 26.** Kakkavou, K.; Gemtou, M.; Foundas, S. Drivers and barriers to the adoption precision irrigation technologies in olive and cotton farming. Lessons from Messenia and Thessaly regions in Greece. *Smart Agr. Technol.* 2024, 7, 100401, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100401>.
- 27.** Katsoulas, N.; Baille, A.; Kittas, C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agric. For. Meteorol.* 2001, 106, 233-247, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00211-2).
- 28.** Kazemi, M.; Elghandour, M.M.M.Y.; Salem, A.Z.M. Toward climate-smart ruminant production: Best practices and future directions. In: Lackner, M., Sajjadi, B., Chen, WY. (eds.) *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, Springer, Cham., 2025, https://doi.org/10.1007/978-3-031-84483-6_212.
- 29.** Koubouris, G.C.; Metzidakis, I.T.; Vasilakakis, M.D. Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 2009, 67, 209-214, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.002>.
- 30.** Koubouris, G.; Psarras, G. Pedoclimatic and landscape conditions of Greek olive groves. In: Muñoz-Rojas, J., García-Ruiz, R. (eds) *The Olive Landscapes of the Mediterranean Landscape Series*, Springer, Cham., 2024, pp. 223-227, https://doi.org/10.1007/978-3-031-57956-1_20.
- 31.** Kourgialas, N.N.; Psarras, G.; Morianou, G.; Pisinaras, V.; Koubouris, G.; Digalaki, N.; Malliaraki, S.; Aggelaki, K.; Motakis, G.; Arampatzis, G. Good agricultural practices related to water and soil as a means of adaptation of Mediterranean olive growing to extreme climate-water conditions. *Sustainability* 2022, 14, 13673, <https://doi.org/10.3390/su142013673>.

- 32.** Koutsouli, P.; Bizelis, I. Climate change and livestock production. *Triptolemos* 2019, Issue 45, Agricultural University of Athens, Greece.
- 33.** Kurowska, K.; Marks-Bielska, R.; Bielski, S.; Aleknavičius, A.; Kowalczyk, C. Geographic Information Systems and the sustainable development of rural areas. *Land*, 2021, 10, 6, <https://doi.org/10.3390/land10010006>.
- 34.** Liu, G.; Zuo, Y.; Zhang, Q.; Yang, L.; Zhao, E.; Liang, L.; Tong, Y. Ridge-furrow with plastic film and straw mulch increases water availability and wheat production on the Loess Plateau. *Sci Rep* 2018, 8, 6503, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24864-4>.
- 35.** Liu, L.; Su, L.; Wang, Q.; Zhang, J.; Shan, Y.; Deng, M. Comprehensive and quantitative analysis of growth characteristics of winter wheat in China based on growing degree days. In: Sparks, D.L. (eds.) *Advances in Agronomy*, vol 159, Academic Press, 2020, pp. 237-273, <https://doi.org/10.1016/bsagron201907007>.
- 36.** Liu, Z.-N.; Yu, X.-Y.; Jia, L.-F.; Wang, Y.-S.; Song, Y.-C.; Meng, H.-D. The influence of distance weight on the inverse distance weighted method for ore-grade estimation. *Sci. Rep.* 2021, 11, 2689, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82227-y>.
- 37.** Mader T.L.; Davis M.S.; Brown-Brandl T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 2006, 84(3), 712–719, <https://doi.org/10.2527/2006.843712x>.
- 38.** Marai, I.F.M.; El-Darawany, A.A.; Fadiel, A.; Abdel-Hafez, M.A.M. Physiological traits as affected by heat stress in sheep-A review. *Small Rum. Res.* 2007, 71, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.10.003>.
- 39.** Marinho, G.T.B.; Pandorfi, H.; da Silva, M.V.; Montenegro, A.A.A.; de Sousa, L.B.; Desenzi, R.; da Silva, J.L.B.; de Oliveira-Júnior, J.F.; Mesquita, M.; de Almeida, G.L.P.; Guiselini, C.; da Rosa Ferraz Jardim, A.M.; Silva, T.G.F.D. Bioclimatic zoning for sheep farming through geostatistical modeling in the State of Pernambuco, Brazil. *Animals (Basel)* 2023, 13, 1124, <https://doi.org/10.3390/ani13061124>.
- 40.** Mather, J.R.; Yoshioka, G.A. The role of climate in the distribution of vegetation. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 1968, 58, 29–41, <https://www.jstor.org/stable/2561817>.
- 41.** McManus, C.; Bianchini, E.; Paim, T.D.P.; De Lima, F.G.; Neto, J.B.; Castanheira, M.; Esteves, G.I.F.; Cardoso, C.C.; Dalcin, V.C. Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of lambs. *Sensors* 2015, 15, 17258–17273, <https://doi.org/10.3390/s150717258>.
- 42.** McMaster, G.S.; Wilhelm, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.* 1997, 87, 291–300, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0).
- 43.** Mishra, P.; Kavidayal, S.; Bhatt, A. GIS and its role in strengthening rural areas. *Int. J. Emerg. Technol.* 2017, 8, 179–183.
- 44.** Monteith, J.L.; Unsworth, M.H. *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere* 4th ed, Academic Press, Amsterdam, 2013, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386910-4.00013-5>.
- 45.** Muñoz-Sabater, J.; Dutra, E.; Agustí-Panareda, A.; Albergel, C.; Arduini, G.; Balsamo, G.; Boussetta, S.; Choulga, M.; Harrigan, S.; Hersbach, H.; Martens, B.; Miralles, D.G.; Piles, M.; Rodríguez-Fernández, N.J.; Zsoter, E.; Buontempo, C.; Thépaut, J.-N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* 2021, 13, 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

- 46.** Muzzo, B.I.; Ramsey, R.D.; Villalba, J.J. Changes in climate and their implications for cattle nutrition and management. *Climate* 2025, 13, 1, <https://doi.org/10.3390/cli13010001>.
- 47.** Ortiz, R.; Sayre, K.D.; Govaerts, B.; Gupta, R.; Subbarao, G.V.; Ban, T.; Hodson, D.; Dixon, J.M.; Ortiz-Monasterio, J.I.; Reynolds, M. Climate change: Can wheat beat the heat?. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2008, 126, 46–58, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.019>.
- 48.** Panagakis, P. Potential seasonal HS of sheep: assessment of four husbandry areas in Greece. *Appl. Eng. Agric.* 2016, 32, 125–129, <http://dx.doi.org/10.13031/aea.32.11451>.
- 49.** Pantazis, C.; Solomos, S.; Nastos, P.; Maneas, G.; Kairis, O.; Centrito, M.; Marino, G.; Roggero, P. P.; Mihail, J.; Fountoulakis, I.; Kapsomenakis, J.; Gkisakis, V.; Kourgialas, N.; Kalantzakis, G. S.; Papamanolioudaki, A. G.; Sergeantani, C. K.; Zerefos, C. S. Insights into the effects of climate variability; Agricultural practices on olive orchards in Messenia, Greece: A field experiment study. *SSRN* 2025, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5084155> (under review).
- 50.** Papadopoulos, G.; Melas, D.; Douvis, K.; Kapsomenakis, J.; Papanastasiou, D.; Elvanidi, A.; Faraslis, I.; Katsoulas, N.; Poupkou, A. Assessing climate change impacts on crops and livestock in Greece with regional climate modeling: Model setup, evaluation and future projections. 12th Congress of the Balkan Physical Union, 8 - 12 July 2025, Bucharest, Romania.
- 51.** Papanastasiou, D.; Bartzanas, T.; Panagakis, P.; Kittas, C. Assessment of a typical sheep barn based on potential seasonal HS of dairy ewes. *Appl. Eng. Agric.* 2014, 30, 953–959, <https://doi.org/10.13031/aea.30.10256>.
- 52.** Papanastasiou, D.; Melas, D.; Poupkou, A.; Keppas, S.; Voloudakis, D.; Faraslis, I.; Elvanidi, A.; Gelasakis, A.; Maletsika, P.; Kapsomenakis, J.; Douvis, K.; Stergiou, I.; Progiou, A.; Katsoulas, N. The AGRO FUTURE CLIMATE STRESS Project: Crop and livestock stress under climate change scenarios. AgEng 2024 Conference, Agricultural Engineering challenges in existing and new agroecosystems, 1 - 4 July 2024, Athens, Greece.
- 53.** Papanastasiou, D.; Papadopoulos, G.; Katsoulas, N.; Elvanidi, A.; Maletsika, P.; Gelasakis, A.; Douvis, K.; Faraslis, I.; Poupkou, A.; Voloudakis, D.; Kapsomenakis, I.; Progiou, A.; Keppas, S.; Stergiou, I.; Mela, D. Agriculture stress under climate change scenarios. International Conference on Agriculture Engineering (Agritech 2025), Cultivating Innovation: Engineering the Future of Agriculture, 23 - 24 June 2025a, Berlin, Germany.
- 54.** Papanastasiou, D.; Gelasakis, A.; Papadopoulos, G.; Melas, D.; Douvis, K.; Faraslis, I.; Keppas, S.; Stergiou, I.; Poupkou, A.; Voloudakis, D.; Progiou, A.; Kapsomenakis, J.; Katsoulas, N. Projected heat-stress in sheep and cattle in Greece under future climate change scenarios. *Agriculture* 2025b, 15, 2141, <https://doi.org/10.3390/agriculture15202141>.
- 55.** Politi, N.; Nastos, P.T.; Sfetsos, A.; Vlachogiannis, D.; Dalezios, N.R. Evaluation of the AWR–WRF model configuration at high resolution over the domain of Greece. *Atmos. Res.* 2018, 208, 229–245, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.019>.
- 56.** Poupkou, A.; Voloudakis, D.; Douvis, K.; Kapsomenakis, I.; Progiou, A.; Papanastasiou, D.; Faraslis, I.; Elvanidi, A.; Gelasakis, A.; Maletsika, P.; Katsoulas, N.; Papadopoulos, G.; Stergiou, I.; Keppas, S.; Melas, D. Adaptation measures to reduce the vulnerability of the Greek agricultural sector in terms of crops water stress and livestock thermal stress under climate change scenarios. International Conference on Agriculture Engineering (Agritech 2025), Cultivating Innovation: Engineering the Future of Agriculture, 23 - 24 June 2025, Berlin, Germany.

- 57.** Ran, L.H.; Bo, Z. Application of GIS in rural planning. *Int. J. Model. Optim.* 2013, **3**, 202–205.
- 58.** Riahi, K.; van Vuuren, D.P.; Kriegler, E.; Edmonds, J.; O'Neill, B.C.; Fujimori, S.; Bauer, N.; Calvin, K.; Dellink, R.; Fricko, O.; Lutz, W.; Popp, A.; Cuaresma, J.C.; Samir, K.; Leimbach, M.; Jiang, L.; Kram, T.; Rao, S.; Emmerling, J.; et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview. *Glob. Environ. Change* 2017, **42**, 153–168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- 59.** Sejian, V.; Blatta, R.; Soren, N.M.; Malik, P.K.; Ravindra, J.P.; Prasad, C.S.; Lal, R. Climate change impact on livestock: Adaptation and mitigation. In: Sejian, V., Gaughan, J., Baumgard, L., Prasad, C. (eds.), Springer India: Connaught Place, Delhi, 2015, Chapter 1, pp. 1.
- 60.** Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Barker, D.; Wang, W.; Powers, J.G. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR 2008, 3–27.
- 61.** Tateishi, R.; Hoan, N.T.; Kobayashi, T.; Alsaideh, B.; Tana, G.; Phong, D.X. Production of Global Land Cover Data—GLCNMO2008. *J. Geogr. Geol.* 2014, **6**, 99–122, <https://doi.org/10.5539/jgg.v6n3p99>.
- 62.** Tsadilas, C.D. Impact of climate change on the primary agricultural sector of Greece: Adaptation policies and measures. *Earth* 2023, **4**, 758–775, <https://doi.org/10.3390/earth4040041>.
- 63.** Tsakalis, N.; Vahamidis, P.; Voloudakis, D.; Sanidas, K.; Papastavrou A.; Economou, G.; Karamanos, A. Assessment of water stress impact on Greek wheat traditional populations. Studying morphological and phenological differences. Proceedings 11th Conference of the Greek Crop Breeding Society, Orestiada, Greece, 2006.
- 64.** Villani, L.; Castelli, G.; Piemontese, L.; Penna, D.; Bresci, E. Drought risk assessment in Mediterranean agricultural watersheds: A case study in Central Italy. *Agric. Water Manag.* 2022, **271**, 107748, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107748>.
- 65.** Voloudakis, D.; Assessment of the impacts of climate change on Greek livestock farming and adaptation measures. CLIMPACT, 1st forum on Climate Change Mitigation and Adaptation in the Agricultural Sector, 2020, Aristotle University of Thessaloniki, <https://climpact.gr/news-events/post/996>.
- 66.** Yang, C.; Fraga, H.; van Ieperen, W.; Trindade, H.; Santos, J.A. Effects of climate change and adaptation options on winter wheat yield under rainfed Mediterranean conditions in southern Portugal. *Clim. Chang.* 2019, **154**, 159–178, <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02419-4>.
- 67.** Zervas, G.; Voloudakis, D.; Sintori, A. Expected impacts of climate change on animal production in the future. Climate Change Impacts Study Committee (CCISC), 2024 (In press).
- 68.** Zhang, Q.; Yang, X.; Liu, C.; Yang, N.; Yu, G.; Zhang, Z.; Chen, Y.; Yao, Y.; Hu, X. Monitoring soil moisture in winter wheat with crop water stress index based on canopy-air temperature time lag effect. *Int. J. Biometeorol.* 2024, **68**, 647–659, <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02612-2>.
- 69.** Zhao, H.; Liu, G.; Dou, Y.; Yang, H.; Wang, T.; Wang, Z.; Malhi, S.; Khan, A.A. Plastic mulch increases dryland wheat yield and water-use productivity, while straw mulch increases soil water storage. *J. Integr. Agric.* 2024, **23**, 3174–3185, <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.01.008>.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο "Καταπόνηση Φυτών και Ζώων υπό Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής (Agro Future Climate Stress)" υλοποιείται στο πλαίσιο του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0», με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης - NextGenerationEU (Φορέας Υλοποίησης: ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.).

Δικαιούχοι:



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ



ΑΘΗΝΩΝ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ