

Α. Ι. ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ, Κ. ΚΟΣΜΑΣ, Δ. ΒΟΛΟΥΔΑΚΗΣ,
Ο. ΚΑΪΡΗΣ, Ι. ΚΑΨΩΜΕΝΑΚΗΣ

ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ
ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΥΣ ΕΔΑΦΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ
ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΡΟΤΡΑΙΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



ΑΚΑΔΗΜΙΑ
ΑΘΗΝΩΝ



© Ακαδημία Αθηνών και Ανδρέας Ι. Καραμάνος

Εκδοτική επιμέλεια
Ευγενία Σαράντη

Σχεδιασμός έκδοσης
Ιωάννης Κ. Τσίγκας

Παραγωγή – Εκτύπωση
Κάπα Εκδοτική

ISBN: 978-960-404-394-1

Η Ακαδημία Αθηνών δεν φέρει ευθύνη για το περιεχόμενο των κειμένων τα οποία περιέχονται στον παρόντα τόμο και εκφράζουν τις προσωπικές απόψεις των συγγραφέων, επομένως δεν υιοθετεί κατ' ανάγκην τις απόψεις τους.

ΑΘΗΝΑΙ
ΓΡΑΦΕΙΟΝ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ
2022

*Σε όσους μόχθησαν και μοχθούν για την αγροτική ανάπτυξη της Θεσσαλίας
με σεβασμό στο περιβάλλον και στην αειφορία*



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΠΙΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ	13
EXECUTIVE SUMMARY.....	21
A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
B. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	35
B.1 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	35
B.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	36
B.3 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	38
B.3.1 Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης των γαιών με χρήση της μεθοδολογίας ESA (Environmental Sensitive Areas)	38
B.3.1.1 Δείκτης ποιότητας του εδάφους	39
B.3.1.2 Δείκτης ποιότητας του κλίματος	42
B.3.1.3 Δείκτης ποιότητας της βλάστησης	44
B.3.1.4 Δείκτης ποιότητας της διαχείρισης	48
B.3.1.5 Υπολογισμός του σύνθετου δείκτη εκτίμησης της περιβαλλοντικής ευαισθησίας των περιοχών στην ερημοποίηση (ESAI)	50
B.3.2 Εκτίμηση των μεταβολών του βάθους του εδάφους από τη μηχανική διάβρωση	52
B.3.3 Εκτίμηση απωλειών εδάφους από υδατική διάβρωση	53
B.3.4 Εκτίμηση του κινδύνου αλάτωσης	54
B.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ AQUACROP	57
B.4.1 Το έδαφος και η εδαφική υγρασία στο ριζόστρωμα	60
B.4.2 Η φυσιολογία του φυτού από το φύτευμα μέχρι τη συγκομιδή	61
B.4.3 Η ανάπτυξη του φυτού υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης	62
B.4.4 Χρήση δεδομένων που αφορούν την ατμόσφαιρα	63



ΑΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΑ

B.4.5	Δεδομένα που αφορούν τους καλλιεργητικούς χειρισμούς	64	Γ.3.2	Παραγωγή σε επίπεδο περιοχής μελέτης	108
B.4.6	Εξαγόμενα αποτελέσματα	66	Γ.3.2.1	Καλλιέργεια σιταριού	108
B.5	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ	67	Γ.3.2.2	Καλλιέργεια αραβοσίτου	111
B.5.1	Σε επίπεδο περιοχής μελέτης	67	Γ.3.2.3	Καλλιέργεια βαμβακιού	114
B.5.2	Σε επίπεδο περιφέρειας	68	Γ.3.3	Παραγωγή σε επίπεδο περιφέρειας	116
Γ.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	69	Δ.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ	121
Γ.1	ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	69	Δ.1	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	121
Γ.1.1	Θερμοκρασία του αέρα	69	Δ.2	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	123
Γ.1.1.1	Σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΜΥ	69	Δ.3	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ	127
Γ.1.1.2	Σύγκριση με τα δεδομένα του μετεωρολογικού μοντέλου	71	Δ.4	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ	133
Γ.1.2	Βροχόπτωση	74	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	139	
Γ.1.2.1	Σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΜΥ	74	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	149	
Γ.1.2.2	Σύγκριση με τα δεδομένα του μετεωρολογικού μοντέλου	75			
Γ.1.3	Δυνητική εξατμισοδιαπνοή	76			
Γ.1.3.1	Σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΜΥ	76			
Γ.1.3.2	Σύγκριση με τα δεδομένα του μετεωρολογικού μοντέλου	77			
Γ.1.4	Συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα	79			
Γ.2	ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	79			
Γ.2.1	Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης	79			
Γ.2.1.1	Περιοχή Σωτηρίου	79			
Γ.2.1.2	Περιοχή Ζαπείου	80			
Γ.2.1.3	Περιοχή Τρικάλων	83			
Γ.2.2	Εκτίμηση της μεταβολής του βάθους του εδάφους	87			
Γ.2.3	Εκτίμηση του κινδύνου αλάτωσης	90			
Γ.3	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ	92			
Γ.3.1	Αποδόσεις	92			
Γ.3.1.1	Καλλιέργεια σιταριού	94			
Γ.3.1.2	Καλλιέργεια αραβοσίτου	98			
Γ.3.1.3	Καλλιέργεια βαμβακιού	103			



ΑΚΑΔΗΜΙΑ
ΑΘΗΝΩΝ

ΕΠΙΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους εδαφικούς πόρους και στις αροτραίες καλλιέργειες της Θεσσαλίας. Η επιλογή της περιφέρειας έγινε με βάση την εξέχουσα βαρύτητα που έχει στη γεωργική παραγωγή της χώρας μας, η οποία βασίζεται κυρίως στις αροτραίες καλλιέργειες (βαμβάκι, σιτάρι, αραβόσιτος). Για να υπάρξει μια κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αντιπροσωπευτικότητα της υπό εξέταση περιφέρειας, η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής εστιάστηκε κατ' αρχάς σε τρεις περιοχές, οι οποίες εκφράζουν σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες που επικρατούν στη Θεσσαλία από κλιματολογικής και εδαφολογικής πλευράς. Συγκεκριμένα επελέγησαν οι περιοχές Τρικάλων του Δήμου Τρικκαίων, Ζαπτείου του Δήμου Κιλελέρ και Σωτηρίου του Δήμου Κιλελέρ. Σε καθεμία από τις τρεις περιοχές μελετήθηκαν τετραγωνικές εκτάσεις με πλευρά 11 km, δηλαδή επιφάνειες 12100 ha. Στις εκτάσεις αυτές έγινε εκτίμηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στους εδαφικούς πόρους και στη συμπεριφορά των καλλιεργειών. Ακολούθησε εκτίμηση της παραγωγής των τριών καλλιεργειών σε επίπεδο περιφέρειας.

Ως βάση για την εκτίμηση των αλλαγών του κλίματος επελέγησαν δύο σενάρια εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, τα RCP4.5 (ενδιάμεσο) και RCP8.5 (δραστηκής αύξησης εκπομπών). Για κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων υψηλής χωρικής διακριτικής ανάλυσης (της τάξης των 11 × 11 km). Οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιούνται πραγματοποιήθηκαν με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RCA4 με χρήση αρχικών και οριακών συνθηκών από το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο MPI-ESM-LR, από τις οποίες εξήχθησαν στα σημεία ενδιαφέροντος οι ημερήσιες τιμές των ακόλουθων κλιματικών παραμέτρων: θερμοκρασία (μέση, μέγιστη, ελαχίστη), βροχόπτωση, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου για την περίοδο αναφοράς 1981-2000, καθώς και για δύο μελλοντικές περιόδους: 2041-2060 (εγγύς μέλλον) και 2081-2100 (απώτερο μέλλον).



ΑΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΑΙ

Για την εκτίμηση της ποιότητας των εδαφικών πόρων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του εδαφολογικού χάρτη της Ελλάδος για την περιφέρεια Θεσσαλίας, ενώ για τον προσδιορισμό του βαθμού τρωτότητας των γαιών υπολογίστηκε ο δείκτης των περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών (ESAI) για κάθε εδαφική χαρτογραφική μονάδα. Από τα στοιχεία αυτά υπολογίστηκαν οι απώλειες εδάφους μέσω μηχανικής και υδατικής διάβρωσης, καθώς και ο βαθμός επικινδυνότητας σε αλάτωση.

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των καλλιεργειών χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη έκδοση του μοντέλου προσομοίωσης καλλιεργειών AquaCrop. Το μοντέλο αυτό, το οποίο εφαρμόζεται σε ετήσιες καλλιέργειες, συνιστάται από τον FAO ως κατάλληλο για περιοχές με υδατικά ελλείμματα. Το μοντέλο παρέχει εκτιμήσεις των αποδόσεων των καλλιεργειών. Στους υπολογισμούς ενσωματώθηκαν οι προβλεπόμενες για κάθε σενάριο εκπομπής συγκεντρώσεις CO₂, καθώς και τα στοιχεία που προέκυψαν από τις εκτιμήσεις των μεταβολών στο βάθος του εδάφους, ώστε τα αποτελέσματα των αποδόσεων που θα προκύψουν να έχουν τον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό αξιοπιστίας.

Σύμφωνα με το μετεωρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, οι εκτιμήσεις ως προς τη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα θα παρουσιάσουν στο σενάριο RCP4.5 αύξηση κατά 1,63 °C στην περίοδο 2041-2060 και κατά 1,85 °C στο διάστημα 2081-2100 κατά μέσο όρο σε όλες τις περιοχές μελέτης, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Στο σενάριο RCP8.5 οι αντίστοιχες μέσες αυξήσεις προβλέπονται να φθάσουν 2,26 °C το 2041-2060 και να ανέλθουν σε 4,98 °C το 2081-2100. Οι αντίστοιχες αυξήσεις στις ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα εκτιμώνται σε 1,60 και 1,84 °C κατά το 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5, και σε 2,25 και 4,84 °C κατά το 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5. Σε ό,τι αφορά τη βροχόπτωση, οι διαφοροποιήσεις σε σχέση με την περίοδο αναφοράς παρουσίασαν αυξομειώσεις στο σενάριο RCP4.5. Για το 2041-2060 έδειξαν αύξηση κατά 8,69% έως μείωση κατά 4,01%, ενώ για το 2081-2100 από αύξηση κατά 8,1% μέχρι μείωση κατά 2,32%. Αντίθετα, για το σενάριο RCP8.5 παρατηρήθηκαν μειώσεις στη βροχόπτωση σε όλες τις περιπτώσεις: από 5,82% μέχρι 13,58% κατά το 2041-2060 και από 19,11% μέχρι 26,67% κατά το 2081-2100. Δεν παρουσιάστηκε συστηματική τάση διαφοροποίησης μεταξύ των περιοχών. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή παρου-

σίασε αύξηση σε όλες τις περιπτώσεις. Στο σενάριο RCP4.5 οι ημερήσιες αυξήσεις το 2041-2060 κυμάνθηκαν από 8,3% μέχρι 17,3%, ενώ και το 2081-2100 κυμάνθηκαν σε ανάλογα επίπεδα. Οι αυξήσεις ήταν σαφώς μεγαλύτερες στο σενάριο RCP8.5 και κυμάνθηκαν από 11,4% μέχρι 20,4% το 2041-2060 και από 25,3% μέχρι 33,9% το 2081-2100. Τις μικρότερες τιμές στις αυξήσεις της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής παρουσίαζε συστηματικά η περιοχή του Ζαπτείου. Γενικά, στο σενάριο RCP4.5 θα αναπτυχθούν στην περιφέρεια υδατικά ελλείμματα μέσω εξατμισοδιαπνοής, ενώ στο σενάριο RCP8.5 προβλέπονται πολύ υψηλότερα ως συνδυασμένο αποτέλεσμα της μειωμένης βροχόπτωσης και της αυξημένης εξατμισοδιαπνοής.

Η αλλαγή του κλίματος προβλέπεται ότι θα προκαλέσει σαφείς διαφοροποιήσεις στον βαθμό τρωτότητας των εδαφικών μονάδων μεταξύ των τριών περιοχών μελέτης, με βάση τις διαχρονικές μεταβολές στις τιμές του δείκτη ESAI. Για το σενάριο RCP4.5 φαίνεται ότι στην πεδινή περιοχή των Τρικάλων τα ποσοστά των εδαφών που υπόκεινται σε κίνδυνο ερημοποίησης βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα και δεν διατρέχουν κίνδυνο περαιτέρω υποβάθμισης έως τα τέλη του αιώνα. Αντίθετα, στη λοφώδη περιοχή του Ζαπτείου τα ήδη μεγάλα ποσοστά εδαφών υψηλού κινδύνου ερημοποίησης (62%), μεταξύ των οποίων πολλά στο ανώτατο επίπεδο κινδύνου, θα αυξηθούν περαιτέρω μέχρι το 2041-2060. Για την περιοχή του Σωτηρίου τα υφιστάμενα ποσοστά εδαφών υψηλού κινδύνου (27%) δεν αναμένεται να αυξηθούν έως το 2100. Η εικόνα διαφοροποιείται ριζικά και προς το χειρότερο στο σενάριο RCP8.5, αφού σε όλες τις περιοχές αναμένεται σημαντική αύξηση στα ποσοστά των εδαφών που θα εκτεθούν σε αυξημένο κίνδυνο ερημοποίησης. Η απώλεια εδάφους λόγω μηχανικής και υδατικής διάβρωσης που προβλέπεται να συντελεστεί και στις τρεις περιοχές στα μέσα και στα τέλη του αιώνα εντοπίζεται κυρίως στα εδάφη με βάθος μικρότερο από 80 cm, δηλαδή σε εδάφη επικλινών περιοχών που έχουν ήδη υποστεί διάβρωση εδώ και αρκετές δεκαετίες. Το υψηλότερο ποσοστό των εδαφών αυτών εντοπίζεται στο Ζάππειο, όπου επικρατούν λοφώδεις σχηματισμοί. Στη συγκεκριμένη περιοχή το ποσοστό των εδαφών με βάθος μικρότερο από 60 cm προβλέπεται να φθάσει το 38% του συνόλου το 2060 και το 68,94% το 2100. Είναι χαρακτηριστικό ότι, τόσο στην ίδια περιοχή όσο και στο Σωτήριο και στα Τρίκαλα, δεν προβλέπεται διαχρονικά μείωση βάθους στις πεδινές εδαφικές μονάδες με βάθος μεγαλύτερο από 80 cm.

Εκτός από τη διάβρωση, σημαντικός παράγοντας που συντελεί στην ερημοποίηση είναι η αλάτωση του εδάφους. Εκτίμηση του κινδύνου αλάτωσης πραγματοποιήθηκε μόνο στην περιοχή του Σωτηρίου, επειδή τα υδρομορφικά χαρακτηριστικά των εδαφικών μονάδων στα χαμηλότερα σημεία του πεδίου ευνοούν συσσώρευση αλάτων μέσω φυσικών διεργασιών (πρωτογενής αλάτωση). Με βάση τον δείκτη αλάτωσης SR, η κλιματική αλλαγή θα επιδράσει στον κίνδυνο αλάτωσης των εδαφών μέσω της αύξησης στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και με μια αναμενόμενη αύξηση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού άρδευσης λόγω υφαλμύρωσης. Προβλέπεται σημαντική μείωση στα ποσοστά εδαφών με μηδενικό έως μέτριο κίνδυνο κατά 60% και μια ταυτόχρονη αύξηση των ποσοστών υψηλού και πολύ υψηλού κινδύνου από μηδενικές τιμές στην περίοδο αναφοράς σε 13,21 και 46,91% αντίστοιχα έως το 2041-2060. Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ανάμεσα στα μέσα και στα τέλη του αιώνα.

Η αλλαγή του κλίματος προβλέπεται να αυξήσει τις αποδόσεις του σιταριού και να μειώσει τις αποδόσεις του αραβοσίτου και του βαμβακιού. Σε εδάφη με μεγάλο βάθος (>100 cm), όπου δεν υπάρχει περιορισμός του ριζικού συστήματος, οι αυξήσεις των αποδόσεων στο σιτάρι συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς εκτιμάται ότι θα κυμανθούν από 17,4 έως 68,6% ανάλογα με το σενάριο εκπομπής και τη χρονική περίοδο. Στον αραβόσιτο θα παρατηρηθούν μειώσεις από 6,5 έως 29,3%, ενώ στο βαμβάκι θα κυμανθούν από μικρή αύξηση 6% έως μείωση κατά 29,6%. Στην προφανή γενική τάση μείωσης των αποδόσεων όσο μειώνεται το βάθος του εδάφους παρατηρήθηκαν διαβαθμίσεις μεταξύ των τριών καλλιεργειών που εξετάστηκαν. Το σιτάρι εμφανίζεται πιο ανεκτικό σε εδάφη με μειωμένο βάθος, σε αντίθεση με τον αραβόσιτο και το βαμβάκι, όπου η αρνητική αλληλεπίδραση του μειωμένου βάθους με την ένταση της κλιματικής αλλαγής γίνεται πολύ πιο εμφανής, ιδιαίτερα προς τα τέλη του αιώνα. Ο αραβόσιτος παρουσιάζει σημαντική μείωση των αποδόσεων σε πολύ χαμηλά επίπεδα, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά το 80% των αποδόσεων σε βαθιά εδάφη. Το βαμβάκι παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, αφού οι αποδόσεις μηδενίζονται σε εδάφη με βάθος 25-35 cm στα μέσα και στα τέλη του αιώνα. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει ότι η ένταση της αλλαγής του κλίματος, η οποία θα είναι πιο εμφανής στην περίοδο 2081-2100 και στο δυσμενές σενάριο RCP8.5, θα επιδράσει πολύ πιο αρνητικά

στο βαμβάκι και εν συνεχεία στον αραβόσιτο στα πιο αβαθή εδάφη, ενώ οι ανάλογες αρνητικές επιδράσεις στο σιτάρι προβλέπονται πιο ήπιες. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μεταξύ των τριών καλλιεργουμένων ειδών ερμηνεύονται με βάση τις διαφορετικές τους αντιδράσεις στα αυξημένα επίπεδα CO₂, τις θερμικές τους απαιτήσεις και τη διαμόρφωση του ριζικού τους συστήματος.

Κατά την εκτίμηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών, συνεκτιμήθηκαν οι διαφοροποιήσεις των αποδόσεων σε εδάφη με διαφορετικό βάθος λόγω κυρίως της επίδρασης των διαβρώσεων, όσο και ο κίνδυνος αλάτωσης. Προέκυψαν σημαντικές μειώσεις συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς στο Σωτήριο και στις τρεις καλλιέργειες κατά τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100, οι οποίες οφείλονται στην εκτιμώμενη απώλεια καλλιεργήσιμου εδάφους λόγω αλάτωσης. Η περιοχή του Ζαπείου, με πολλές επικλινείς εκτάσεις, παρουσιάζει επίσης μειώσεις στην παραγωγή αραβοσίτου και βαμβακιού, οι οποίες όμως οφείλονται στη μείωση του βάθους του εδάφους λόγω μηχανικής και υδατικής διάβρωσης, όπως δείχνουν οι συγκρίσεις των αυξομειώσεων της παραγωγής μεταξύ εδαφών που δεν έχουν και εδαφών που έχουν υποστεί διάβρωση. Στην περιοχή αυτή οι αποδόσεις του σιταριού παρουσιάζονται ελαφρά αυξημένες σε σχέση με την περίοδο αναφοράς στο σενάριο RCP4.5 και περισσότερο στο σενάριο RCP8.5. Η περιοχή των Τρικάλων, με εδάφη πεδινά και μεγάλου βάθους, παρουσιάζει τις λιγότερο αρνητικές επιδράσεις στην παραγωγή λόγω διάβρωσης.

Η παραγωγή της καλλιέργειας του σιταριού ευνοείται περισσότερο στο σενάριο RCP8.5 συγκριτικά με το RCP4.5, προφανώς μέσω της αύξησης των αποδόσεων λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης του CO₂. Το αντίθετο συμβαίνει στις καλλιέργειες του αραβοσίτου και του βαμβακιού, όπου παρατηρείται σαφής ποσοστιαία μείωση της παραγωγής στο σενάριο RCP8.5 και στην περίοδο 2081-2100. Η τάση αυτή ερμηνεύεται τόσο από τις αντίστοιχες προβλεπόμενες μειώσεις στις αποδόσεις όσο και από τη μειωμένη ανεκτικότητα των καλλιεργειών αυτών σε εδάφη μικρού βάθους. Οι μειώσεις στην παραγωγή είναι περισσότερο εμφανείς στο Ζάππειο και στο Σωτήριο, όπου το ποσοστό των ευάλωτων γαιών στην επιφάνεια μελέτης είναι σημαντικό.

Σε επίπεδο περιφέρειας, υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής με το πιο ήπιο σενάριο εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (RCP4.5), η παραγωγή

του σιταριού προβλέπεται να αυξηθεί κατά 5,48% το 2041-2060 και κατά 13,37% το 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί διάβρωση. Στην ίδια κατηγορία εδαφών η εφαρμογή του πιο έντονου σεναρίου εκπομπής RCP8.5 έδωσε μικρή μείωση κατά 4,86% στα μέσα, αλλά σημαντική αύξηση κατά 35,69% στα τέλη του αιώνα. Η παραγωγή του αραβοσίτου προβλέπεται να υποστεί μειώσεις έως 25,85% στο σενάριο RCP4.5, οι οποίες θα φθάσουν το 41,66% στο σενάριο RCP8.5. Μεγαλύτερες μειώσεις από τον αραβόσιτο αναμένεται να υποστεί η βαμβακοκαλλιέργεια στο ήπιο σενάριο κατά το 2041-2060 (34,96%). Εν τούτοις, οι προβλεπόμενες μειώσεις τόσο κατά το 2081-2100 όσο και στο πιο έντονο σενάριο εκπομπής RCP8.5 είναι χαμηλότερες από εκείνες του αραβοσίτου (από 17,9 μέχρι 34,15%). Η διάβρωση του εδάφους προβλέπεται να προκαλέσει περαιτέρω μειώσεις στην παραγωγή των καλλιεργειών, οι οποίες αναμένεται να είναι έως 3,6% χαμηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες των μη διαβρωμένων εδαφών. Οι μεγαλύτερες μειώσεις προβλέπονται για τον αραβόσιτο και το βαμβάκι στο σενάριο RCP4.5.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι από τις τρεις επικρατούσες στη Θεσσαλία αροτραίες καλλιέργειες μόνο το σιτάρι προβλέπεται να αντιδράσει θετικά. Ως χειμερινή καλλιέργεια θα διέλθει σημαντικό μέρος του βιολογικού του κύκλου υπό μέτρια χαμηλές θερμοκρασίες και θα αποφύγει τις αυξημένες θερμοκρασίες που θα επικρατήσουν μετά τα μέσα της άνοιξης. Παράλληλα, θα ευνοηθεί από τις προβλεπόμενες υψηλές συγκεντρώσεις CO₂. Τα ευρήματα έδειξαν σημαντική ανεκτικότητα της σιτοκαλλιέργειας και επίτευξη επαρκών αποδόσεων ακόμη και σε εδάφη με μικρό βάθος, όπου ο αραβόσιτος και κυρίως το βαμβάκι αποδίδουν ελάχιστα. Το γεγονός αυτό καθιστά το βαμβάκι κατάλληλο για επικερδή καλλιέργεια ακόμη και σε λοφώδεις και επικλινείς εκτάσεις, οι οποίες έχουν ήδη διαβρωθεί σε σημαντικό βαθμό. Στις εκτάσεις αυτές η καλλιέργεια του βαμβακιού και του αραβοσίτου κρίνεται ασύμφορη τόσο από πλευράς οικονομικής όσο και από πλευράς συνεπειών στην περαιτέρω υποβάθμιση των εδαφών. Ο τρόπος καλλιέργειας των φυτών αυτών (σπορά σε μεγάλες αποστάσεις, ένταση εδαφοκατεργασίας, αρδεύσεις κ.ά.) εντείνει τη μηχανική και υδατική διάβρωση και θα οδηγήσει σε οριστική απώλεια των οριακών αυτών εδαφών για καλλιέργεια. Αντιθέτως, η συγκέντρωση της

καλλιέργειας αραβοσίτου και βαμβακιού στις πεδινές εκτάσεις της περιφέρειας Θεσσαλίας και σε εδάφη με μεγάλο βάθος θα διασφαλίσει υψηλές αποδόσεις και τα αντίστοιχα οικονομικά οφέλη στους καλλιεργητές.

Οι άκρως ανησυχητικές προβλέψεις για τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στους εδαφικούς πόρους απαιτούν εγρήγορση και άμεση δραστηριοποίηση με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για τη διατήρηση και αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης των εδαφών. Για την αντιμετώπιση και τον μετριασμό του ρυθμού διάβρωσης υπάρχουν πολλά διαθέσιμα καλλιεργητικά μέτρα, τα οποία αναλύονται λεπτομερειακά στο τελευταίο μέρος της μελέτης. Εκτίθενται επίσης μέτρα αντιμετώπισης των κινδύνων αλάτωσης των εδαφών, εξοικονόμησης και αποτελεσματικής διαχείρισης των υδατικών πόρων, καθώς και μέτρα προσαρμογής καλλιεργητικών τεχνικών στις νέες συνθήκες.



Α. Ι. ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ
Ομότ. Καθηγητής Γεωργίας ΓΠΑ, μέλος της ΕΜΕΚΑ

Κ. ΚΟΣΜΑΣ
Ομότ. Καθηγητής Εδαφολογίας ΓΠΑ

Δ. ΒΟΛΟΥΔΑΚΗΣ
Επιστημονικός συνεργάτης, Ακαδημία Αθηνών

Ο. ΚΑΪΡΗΣ
ΕΔΙΠ, Εργαστήριο Εδαφολογίας ΓΠΑ

Ι. ΚΑΨΩΜΕΝΑΚΗΣ
Εντεταλμένος Ερευνητής, Ακαδημία Αθηνών,
Κέντρον Ερεύνης Φυσικής της Ατμοσφαιρας και Κλιματολογίας (ΚΕΦΑΚ)

ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE IMPACTS
ON SOIL RESOURCES AND FIELD CROPS IN THESSALY,
CENTRAL GREECE

EXECUTIVE SUMMARY

THE STUDY aims at the assessment of climate change impacts on soil resources and field crops in the Region of Thessaly, Central Greece. The Region was chosen in view of its importance on the national agricultural productivity, mainly based on the production of field crops (cotton, wheat, and maize). Three areas were chosen, representing to a significant extent the climatological and soil conditions of Thessaly: Trikala, Zappeio, and Sotirio. Squared study areas with dimensions of 11×11 km (12100 ha) were located within each one of the three selected areas, in which the assessment of climate change impacts on soil resources and crop behaviour was performed.

Two GHG emission scenarios, RCP4.5 (intermediate) and RCP8.5 (the most aggressive), were chosen. Simulations of high local resolution (11×11 km squares) of the EUROCORDEX programme covering on a daily basis the period 1970-2100 were implied within each scenario. The simulations were executed using the regional climate model RCA4 with initialization and boundary conditions taken from the Earth System model MPI-ESM-LR. The daily values of the following climatic parameters were derived at the study areas for the reference period 1981-2000 as well as for the middle (2041-2060) and the end of this century (2081-2100): air temperature (maximum, minimum, average), precipitation, relative humidity, solar irradiance and wind speed.

The detailed data from the Greek Soil Map for Thessaly were used for soil quality assessment. Soil desertification risks were determined for each soil map unit using the Environmentally Sensitive Areas Index (ESAI). On the account of the relevant information, soil loss through mechanical and water erosion, as well as the salinization risk (SR), were estimated.



AKAΔHMIA

AOHNHN

The most recent edition of the crop simulation model AquaCrop was used for the assessment of crop yields under climate change. This model, suitable for annual crops, is recommended by the FAO for areas facing water deficits and allows for the inclusion of the increasing CO₂-concentration. In an effort to increase the credibility of crop yields derived from the model, the changes in soil depth caused by erosion were taken into account, apart from the standard initial values of the soil properties required as inputs.

According to the meteorological model outputs, the average maximum daily air temperatures for the RCP4.5 scenario are expected to rise by 1.63 °C in 2041-2060 and 1.85 °C in 2081-2100 on the average for all study areas, in comparison with the reference period. For the RCP8.5 scenario the corresponding average rise will reach 2.26 °C in 2041-2060 and 4.98 °C in 2081-2100. The expected increases in the average minimum daily air temperatures were 1.60 and 1.84 °C in 2041-2060 and 2081-2100 for RCP4.5 and 2.25 and 4.84 °C in 2041-2060 and 2081-2100 for RCP8.5 respectively. Average annual precipitation exhibits minor fluctuations in comparison with the reference period, either increases up to 8.69% or decreases up to 4.01% for the scenario RCP4.5. For the RCP8.5, however, consistently lower values by 5.82 to 13.58% are expected in 2041-2060 and by 19.11 to 26.67% in 2081-2100 over the three study areas. Average daily potential evapotranspiration is expected to rise in comparison with the reference period in both scenarios. For the RCP4.5 increases between 8.3 to 17.3% are expected in the middle and the end of the century. For the RCP8.5 increases will reach 11.4 to 20.4% in 2041-2060 and 25.3 to 33.9% in 2081-2100. It seems that potential evapotranspiration will be responsible for the development of water deficits under RCP4.5, whereas more intense water deficits are foreseen under RCP8.5, due to both reduced precipitation and higher potential evapotranspiration.

On the account of the ESAI, climate change is expected to induce clear differentiations in soil vulnerability among the three study areas in the course of the century. Under the RCP4.5, the proportion of the areas experiencing desertification risks is very low in the plain area of Trikala up to the end of the century. To the other end, the already high proportion of land under high desertification risk (62%) in the hilly area of Zappeion will

be further increased by the middle of the century. In Sotirio, the current proportion of land under high risk (27%) is not expected to increase by the end of the century. The situation will be considerably worsened under RCP8.5, since a substantial increase in the proportion of soils experiencing high desertification risk is expected in most cases. Soil loss induced by mechanical and water erosion, that is expected to occur by the middle and the end of the century, will be more severe in soils with a depth smaller than 80 cm in hilly areas already affected by erosion during the past decades. The highest proportion of this group of land is located in Zappeion, where the proportion of soils with a depth smaller than 60 cm is expected to reach 38% by 2060 and 68.94% by 2100. On the other hand, flat soils with depth higher than 80 cm are not expected to become shallower in all study areas.

Apart from erosion, salinization is another factor contributing to soil desertification. Salinization risks were assessed only in the area of Sotirio, where soil hydromorphic characteristics in the lowlands favour salt accumulation towards soil surface (primary salinization). On the account of the index SR, climate change is expected to increase salinization risk by means of the increased potential evapotranspiration enhancing upward soil water movement and the concomitant increase in soil water electrical conductivity caused by sea water intrusion. A substantial increase in the proportion of land under high and very high salinization risk from zero in the reference period to 13.21% and 46.91% respectively by 2041-2060 is foreseen. No difference was found either between the emission scenarios or between the middle and the end of the century, indicating the current critical situation of this land.

Climate change is expected to increase the yields of wheat and decrease those of cotton and maize. In soils deeper than 100 cm, where root system is not restricted, the increases in wheat yields, as compared with the reference period, will range from 17.4 to 68.6%, depending on the emission scenario and the period considered. In maize, yields will be decreased by 6.5 to 29.3%. In cotton, yields are expected to fluctuate from an increase by 6% down to a decrease by 29.6%. Important differentiations among the three crop species were observed in the general trend of decreasing yields with decreasing soil depth. Thus, wheat yields were more resilient in shallower soils in comparison with maize and cotton, where the negative interaction

between the decreased soil depth and climate change intensity was more pronounced towards the end of the century. Maize yields in shallow soils are expected to drastically fall to levels as much as 80% compared with those in deep soils. Cotton will exhibit the highest sensitivity, in view of the absolute yield extinction in soils with a depth of 25-35 cm in the middle and the end of the century. Such differentiations among crop species are discussed in terms of their different responses in the elevated CO₂-concentrations, their different thermal requirements and their root system morphology.

Yield differentiations with soil depth as well as salinization risks were taken into account when estimating crop productivity, both at the study areas and the whole region. Clear reductions in the productions of all three species in comparison with the reference period both in 2041-2060 and 2081-2100 were observed in Sotirio, due to the loss of cultivated land by salinization. Reduced values of maize and cotton production are also foreseen at the hilly area of Zappeio, mainly caused by soil loss through erosion. On the other hand, wheat production is positively affected, more under the RCP8.5 scenario. Crop production in the plain area of Trikala, consisting of deep soils, is expected to be less affected by soil erosion. Wheat production will be favoured more under the RCP8.5 than the RCP4.5-scenario, probably by means of the higher yields attained at the elevated CO₂-levels. On the contrary, maize and cotton production will be more adversely affected under RCP8.5 and at the end of the century, because of their lower yields and their poor performance in shallow soils.

On a regional basis, wheat production under RCP4.5 is expected to increase by 5.48% in 2041-2060 and 13.37% in 2081-2100 in comparison with the reference period in non-eroded soils. In the same group of soils, the adoption of the RCP8.5-scenario produced a slight reduction by 4.86% in 2041-2060 but a substantial increase by 35.69% in 2081-2100. Maize production is expected to decrease by 25.85% under RCP4.5 and by 41.66% under RCP8.5. Cotton production will be more adversely affected than maize under RCP4.5 (decrease by 34.96%). However, cotton exhibits smaller reductions than maize (from 17.9 to 34.15%) under the more intense emission scenario in 2081-2100.

It is concluded that only wheat crop is expected to react positively under climate change in Thessaly. It will thrive under the winter moderately

low temperatures and will mostly escape the middle and late-spring high temperatures. At the same time, it will be positively affected by the elevated CO₂-levels and it will behave satisfactorily in shallow soils, where maize and, in particular, cotton minimize their yields. Hence, wheat crop can be profitable even in hilly and eroded lands, where maize and cotton cultivation are both low-yielding and inducing further soil degradation. On the other hand, maize and cotton crops are expected to be more suitable and productive in the plain and deep lands of Thessaly.

The alarming predictions of the climate change impacts on soil resources require immediate action for the adoption and implementation of the necessary adaptive measures for soil conservation. There are many cultivation measures to mitigate soil erosion, which are analyzed in the last part of this study. In addition, other adaptation measures to face climate change, such as the management of water resources, soil desalinization, adoption of proper management practices etc., are also reported in detail.



ΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΑ

Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΒΑΡΥΝΟΥΣΑΣ ΣΗΜΑΣΙΑΣ της γεωργίας στις εθνικές οικονομίες όλων των χωρών, αλλά και του κομβικού της ρόλου στην αντιμετώπιση του επισιτιστικού προβλήματος του ραγδαία αυξανόμενου πληθυσμού της γης, η αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργική παραγωγή αποτέλεσε αντικείμενο πολυάριθμων ερευνών και μελετών ήδη από τη δεκαετία του 1990 (για ανασκόπηση των ευρημάτων βλ., ενδεικτικά, Adams et al., 1998· Parry et al., 2001). Τα περισσότερα αποτελέσματα των ερευνών σε πλανητικό ή περιφερειακό επίπεδο δείχνουν ότι η λεκάνη της Μεσογείου αποτελεί μία από τις περιοχές που θα επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από την αλλαγή του κλίματος (Schellnhuber et al., 2014· Ciscar et al., 2018· IPCC, 2018). Σύμφωνα με τα ευρήματα του ευρωπαϊκού προγράμματος PESETA προβλέπονται, ανάλογα με το σενάριο εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, για τη νότια Ευρώπη από μηδενικές μεταβολές έως 27% μείωση, ενώ για τη βόρεια και κεντρική Ευρώπη αύξηση της γεωργικής παραγωγής έως και 40% (Iglesias et al., 2009).

Οι σοβαρές επιπτώσεις στη γεωργική παραγωγή που προβλέπονται από την αλλαγή του κλίματος στην Ανατολική Μεσόγειο επιβάλλουν την προσεκτική μελέτη του προβλήματος στην Ελλάδα. Οι Karetanaki & Rosenzweig (1997) προέβλεψαν έως το 2050 μείωση των αποδόσεων του αραβοσίτου στην κεντρική (Θεσσαλία) και στη βόρεια Ελλάδα (Μακεδονία και Θράκη) μέχρι και 20%. Από προκαταρκτικά στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ προέκυψε ότι η παραγωγή αραβοσίτου θα μειωθεί κατά 55%, η παραγωγή σκληρού σιταριού θα παρουσιάσει μεγάλη διαφοροποίηση από -67% έως +15%, ανάλογα με το σενάριο, το βαμβάκι θα παρουσιάσει μείωση κατά 29% στη Μακεδονία και στη Θεσσαλία αλλά αύξηση κατά 21% στη Θράκη, τα αμπελοκομικά προϊόντα αυξομειώσεις από -59 έως +55% ανάλογα με την περιοχή, ενώ οι επιπτώσεις στις δενδροκομικές καλλιέργειες προβλέπονται αρνητικές στη νότια Ελλάδα και στην Κρήτη. Για την Ελλάδα συνολικά έως το 2031-2060 οι Giannakopoulos et al. (2009) προέβλεψαν, ανάλογα με το σενάριο εκπομπής, αύξηση στις αποδόσεις των χειμερινών σιτηρών κατά 4,4 έως 12,5%, σταθερότητα έως ελαφρά



ΑΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΑ

μείωση κατά 0,6% στις αποδόσεις του αραβοσίτου, στα ψυχανθή και στις ανοιξιάτικες καλλιέργειες C3 φυτών μείωση των αποδόσεων κατά 7% έως αύξηση κατά περίπου 1%, ενώ στις κονδυλώδεις-βολβώδεις καλλιέργειες μείωση κατά 9,3% έως αύξηση κατά 4,4%.

Μια ιδιαίτερα λεπτομερής έρευνα για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία της χώρας μας περιλαμβάνεται στην Έκθεση της Επιτροπής Μελέτης για τις Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής της Τράπεζας της Ελλάδος (ΕΜΕΚΑ) (Karamanos et al., 2011). Η Ελλάδα διαιρέθηκε σε 11 κλιματικές ζώνες, στις οποίες μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε έναν μεγάλο αριθμό καλλιεργειών στα μέσα και στα τέλη του αιώνα (2041-2050 και 2091-2100 αντιστοίχως) με βάση τρία σενάρια εκπομπών (A2, A1B, B2). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αλλαγή του κλίματος θα επηρεάσει θετικά ή λιγότερο αρνητικά (αναλόγως με το σενάριο και το είδος της καλλιέργειας) τις βορειότερες περιοχές της χώρας (Μακεδονία και Θράκη) και εν συνεχεία τη δυτική Ελλάδα. Αντιθέτως, οι επιδράσεις γίνονται πιο αρνητικές στην κεντρική και ανατολική χώρα, και ιδιαίτερες στις νοτιότερες περιοχές και στα νησιά. Από τα τρία σενάρια, το πιο ευνοϊκό για τη φυτική παραγωγή ήταν το ηπιότερο (B2) και το πιο αρνητικό το A2, ενώ οι επιδράσεις προβλέπονταν πιο δυσμενείς προς τα τέλη του αιώνα. Από τις αροτραίες καλλιέργειες, τις θετικότερες επιδράσεις στην παραγωγή παρουσίαζε το βαμβάκι. Ο αραβόσιτος και το σιτάρι παρουσίαζαν περίπου ανάλογη συμπεριφορά (μειώσεις που σπάνια ξεπερνούσαν το 10% της παραγωγής, συγκριτικά με την περίοδο 1991-2000). Η επίπτωση των κλιματικών μεταβολών στην παραγωγή των δενδρωδών καλλιεργειών έως τα μέσα του αιώνα αναμένεται από ουδέτερη έως θετική. Ωστόσο, η εικόνα αυτή θα μεταβληθεί προς το αρνητικό στα τέλη του αιώνα, ιδίως στη νότια και νησιωτική χώρα. Σε πιο λεπτομερείς έρευνες (Voloudakis et al., 2015, 2018) βρέθηκε ότι, συγκριτικά με την περίοδο 1961-1990, οι αποδόσεις του βαμβακιού μπορεί να αυξηθούν μέχρι 30% περίπου σε περιοχές της δυτικής και κεντρικής Ελλάδας έως τα τέλη του αιώνα, ενώ οι αποδόσεις του αραβοσίτου προβλέπεται να παρουσιάσουν μικρές μεταβολές μέχρι τα μέσα του αιώνα (από -5 μέχρι +5%) στις περισσότερες περιοχές που εξετάστηκαν. Αντιθέτως, προς τα τέλη του αιώνα προβλέπονται κυρίως μειώσεις έως 5%.

Σε μεταγενέστερη έρευνα, οι Georgoroulou et al. (2017) μελέτησαν τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στις αποδόσεις καλλιεργειών σε 12

κλιματικές ζώνες της Ελλάδας στην περίοδο 2021-2050 για το σενάριο A1B. Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1961-1990 προβλέπονται αυξήσεις στις αποδόσεις του σιταριού κατά 4,3-26,7%, του βαμβακιού κατά 9,8-46,5% και του ρυζιού κατά 14,9-29,9%, ανάλογα με την περιοχή μελέτης. Σαφής μείωση στις αποδόσεις προβλέπεται για τα φασόλια (7-47,5%) και τον ηλιάνθο (64-65,3%), ενώ για τα κηπευτικά, την ελιά και την άμπελο προέκυψαν σημαντικές (θετικές ή αρνητικές) επιδράσεις στις αποδόσεις, ανάλογα με την περιοχή μελέτης.

Σε μια προσπάθεια ερμηνείας των παραπάνω ευρημάτων προκύπτει ότι η αλλαγή του κλίματος φαίνεται να ευνοεί τα φυτά της μεταβολικής ομάδας C3, τα οποία αξιοποιούν αποτελεσματικότερα την αυξημένη συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα που θα επικρατήσει σύμφωνα με όλα τα σενάρια εκπομπών, και έτσι υπερβαίνουν τις αρνητικές επιπτώσεις από την άνοδο της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, τα φυτά της μεταβολικής ομάδας C4 (κυρίως θερμοφιλα αγρωστώδη, όπως ο αραβόσιτος και το σόργο) δεν μπορούν να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά την περίσσεια του CO₂ στη φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα και ωφελούνται μόνο από την εξοικονόμηση νερού μέσω μείωσης της διαπνοής τους που προκαλεί η αύξηση του CO₂.

Είναι προφανές ότι όλες οι ανωτέρω προβλέψεις ενέχουν το στοιχείο της αβεβαιότητας, επειδή βασίζονται σε σενάρια εκπομπών και σε πληθώρα μετεωρολογικών μοντέλων, αλλά και στους τρόπους προσέγγισης της συμπεριφοράς των καλλιεργειών μέσω της εφαρμογής μοντέλων προσομοίωσης ή άλλων μεθόδων. Ενδεικτικά, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς τα μοντέλα CERES-Maize (Jones & Kiniry, 1986) για τον αραβόσιτο, CropSyst (Stockle et al., 2003), DSSAT (Jones et al., 2003) και AquaCrop (Steduto et al., 2009) για διάφορα ετήσια φυτά, VineLOGIC (Godwin et al., 2002) για την άμπελο κ.ά. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί πολλαπλές παλινδρομήσεις μεταξύ της απόδοσης και πολλών μετεωρολογικών παραμέτρων από δεδομένα μακράς σειράς ετών (Georgoroulou et al., 2017), κυρίως για πολυετείς καλλιέργειες. Πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση του οποιουδήποτε μοντέλου προσομοίωσης δεν πρέπει να γίνεται χωρίς να εκτιμηθεί εκ των προτέρων η αξιοπιστία του σε συνάρτηση με πραγματικά δεδομένα ανάπτυξης και απόδοσης καλλιεργειών στις περιοχές μελέτης. Επιπλέον, για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων πρέπει να συνεκτιμάται η επίδραση της συγκέντρωσης του CO₂, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγικό-

τητα των καλλιεργειών, αφού μάλιστα τα περισσότερα μοντέλα περιλαμβάνουν μεταξύ των προαπαιτούμενων για την εφαρμογή τους κλιματικών παραμέτρων και τη συγκέντρωση του CO₂.

Εφόσον τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προβλέψεις των μοντέλων προσομοίωσης χρησιμοποιούνται σε σύγκριση με αντίστοιχα δεδομένα μιας συγκεκριμένης περιόδου αναφοράς, είναι αναπόφευκτο κατά την εφαρμογή των μοντέλων να θεωρούνται δεδομένοι και για το μέλλον καλλιεργητικοί χειρισμοί όπως εφαρμόζονται σήμερα, π.χ. χρόνος και εποχή σποράς, λιπάνσεις, αντιμετώπιση ζιζανίων, εχθρών και ασθενειών. Σε ό,τι αφορά ζιζάνια, εχθρούς και ασθένειες, υπάρχουν μόνο ενδείξεις για αλλαγές στη σύνθεση του πληθυσμού των ειδών, στους τρόπους ανταγωνισμού και στην επιδημιολογία, γεγονός που δεν επιτρέπει ασφαλείς προβλέψεις για την επίδρασή τους. Εξαιρετικά δύσκολες και μη προβλέψιμες είναι επίσης οι επιπτώσεις από ακραία καιρικά φαινόμενα, αφού η εκτίμηση των ζημιών στις καλλιέργειες είναι συνάρτηση όχι μόνο της έντασης και της συχνότητας εμφάνισής τους, αλλά, το κυριότερο, του χρόνου που θα εμφανιστούν σε συνάρτηση με το είδος και το στάδιο ανάπτυξης της κάθε καλλιέργειας.

Όλα σχεδόν τα μοντέλα προσομοίωσης περιλαμβάνουν στοιχεία που συνυπολογίζουν εδαφικές ιδιότητες, κυρίως τη μηχανική σύσταση, και ορισμένα επιπλέον το βάθος, την υδραυλική αγωγιμότητα, την υδατοϊκανότητα, το σημείο μόνιμης μάρανσης κ.ά. Κατά την εφαρμογή των μοντέλων, τα στοιχεία αυτά θεωρούνται αμετάβλητα με την πάροδο του χρόνου. Εν τούτοις, μία ακριβέστερη αποτύπωση της μελλοντικής κατάστασης θα απαιτούσε να εκτιμηθούν και πιθανές αλλαγές σε εδαφικά στοιχεία, όπως αυτές θα προκύψουν από την αλλαγή του κλίματος σε συνδυασμό και με την αθροιστική επίδραση των πρακτικών διαχείρισης. Για παράδειγμα, η διάβρωση του εδάφους, ως αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης κλιματικών παραγόντων και τρόπου διαχείρισης, οδηγεί σε απώλεια εδάφους και μείωση του διαθέσιμου βάρους για την ανάπτυξη του ριζοστρώματος. Το στοιχείο αυτό, μαζί με άλλα που οδηγούν στην ερημοποίηση των εδαφών, όπως η αλάτωση, πρέπει να συνεκτιμηθούν κατά την εφαρμογή όσων μοντέλων προσομοίωσης το επιτρέπουν, ώστε η τελική εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς των καλλιεργειών να προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα.

Το τελικό ζητούμενο σε μια οποιαδήποτε προσπάθεια πρόβλεψης επιπτώσεων από την αλλαγή του κλίματος δεν είναι η απόδοση των καλλιεργειών, αλλά η εκτίμηση της παραγωγής τους σε επίπεδο περιφέρειας ή χώρας. Η τελευταία συνδέεται άρρηκτα με τη διαθέσιμη επιφάνεια και την ποιότητα των καλλιεργουμένων γαιών. Από την προηγηθείσα ανασκόπηση προκύπτει ότι μόνο η μελέτη της ΕΜΕΚΑ προχώρησε στην εκτίμηση της παραγωγής των καλλιεργειών και δεν περιορίστηκε στην εκτίμηση των αποδόσεων. Η εκτίμηση έλαβε υπόψη της τα στοιχεία της πορείας ερημοποίησης των εδαφών στην Ελλάδα (Yassoglou & Kosmas, 2004) και έκανε ευθύγραμμη προβολή των δεδομένων αυτών ανά κλιματική ζώνη για τις δύο περιόδους μελέτης, 2041-2050 και 2091-2100 (Karamanos et al., 2011). Με βάση πιο πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα, που βασίζονται σε γενικά αποδεκτούς δείκτες τρωτότητας των γαιών (ενδεικτικά, Kosmas et al., 2006· Ferrara et al., 2020), είναι δυνατόν να εκτιμηθούν με πιο αντικειμενικά κριτήρια οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ένταση ερημοποίησης των εδαφών και στην καταλληλότητά τους για καλλιέργεια σε βάθος χρόνου.

Είναι επομένως απαραίτητο, με βάση και τις προηγούμενες επισημάνσεις, να συνεχιστούν και να επικαιροποιηθούν οι προσπάθειες για μία κατά το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία της χώρας μας, συνεκτιμώμενων και στοιχείων ειδικών ερευνών αναφορικά με τις επιδράσεις της μεταβολής του κλίματος στην ερημοποίηση και στη διατήρηση της καταλληλότητας των εδαφών για καλλιέργεια. Στο πλαίσιο της ήδη δρομολογηθείσας επικαιροποίησης της μελέτης της ΕΜΕΚΑ του 2011, θεωρήθηκε σκόπιμο να ερευνηθεί ως ξεχωριστή πιλοτική έρευνα η μελέτη των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος στη γεωργική παραγωγή της Θεσσαλίας, μιας περιφέρειας της χώρας με προεξάρχουσα τη συμβολή του αγροτικού τομέα στην οικονομική της δραστηριότητα.

Η Θεσσαλία παράγει το 14,2% της φυτικής παραγωγής της χώρας σε καλλιεργούμενες γαίες συνολικής έκτασης 4.160.000 στρεμμάτων (ΕΛΣΤΑΤ, 2018). Η έκταση αυτή καλύπτεται κατά 83,3% από αροτράιες καλλιέργειες, στις οποίες επικρατούν τα σιτηρά και το βαμβάκι. Είναι χαρακτηριστικό ότι στη Θεσσαλία παράγεται το 37,5% των σιτηρών και το 35,8% του βαμβακιού επί του συνόλου της χώρας. Για τον λόγο αυτόν,

αντικείμενο της μελέτης θα αποτελέσουν οι δύο επικρατούσες καλλιέργειες σιτηρών (σιτάρι και αραβόσιτος) και το βαμβάκι. Η επιλογή αυτή καλύπτει τις δύο βασικές εναλλακτικές τροφοδοσίας των καλλιεργειών με νερό (ξηρικές – αρδευόμενες καλλιέργειες), καθώς και τις δύο κατηγορίες φυτών από πλευράς θερμικών απαιτήσεων (ψυχρόφιλα – θερμόφιλα φυτά).

Τα κύρια προβλήματα που έχουν προκύψει από τη μονοκαλλιέργεια και τις ως επί το πλείστον μη ορθές καλλιεργητικές πρακτικές στην άσκηση της γεωργίας εντοπίζονται τόσο στην υφαλμύρωση των υπογείων υδάτων λόγω υπεράντλησης και κακής χρήσης του νερού στις αρδευόμενες καλλιέργειες, όσο και στην υποβάθμιση του εδάφους λόγω διάβρωσης στις λοφώδεις περιοχές αλλά και στη νιτρορύπανση λόγω υπερλίπανσης. Είναι βέβαιο ότι η επερχόμενη αλλαγή του κλίματος θα προστεθεί στα ανωτέρω προβλήματα, αν δεν εκτιμηθούν επακριβώς οι επιδράσεις της στη γεωργική παραγωγή και δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα πρόληψης και προσαρμογής.

Σύμφωνα με τη μελέτη της ΕΜΕΚΑ (Karamanos et al., 2011), στην κλιματική ζώνη της κεντρικής και ανατολικής Ελλάδας, όπου περιλαμβάνεται η Θεσσαλία, προβλέπονται τα εξής (συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1961-1990): 1) αύξηση της παραγωγής βαμβακιού περισσότερο στα μέσα και στα τέλη του αιώνα μόνο στο ηπιότερο σενάριο εκπομπής (B2). Στο μέτριο (A1B) και στο έντονο (A2) σενάριο προβλέπεται σταθερότητα στα μέσα και μείωση της παραγωγής κάτω του 10% στα τέλη του αιώνα. 2) Για το σιτάρι προβλέπεται σταθερότητα στην παραγωγή στο ηπιότερο σενάριο και μείωση, που μπορεί να ξεπεράσει το 10%, στα σενάρια A2 και A1B. 3) Στον αραβόσιτο, σε όλες τις περιπτώσεις, προβλέπεται μικρή αύξηση έως 10%, και μόνο στο σενάριο A1B μείωση περισσότερο από 10% στα τέλη του αιώνα.

Ειδικότερα στη Θεσσαλία επικεντρώθηκε η εργασία των Καραμάνου και Βολουδάκη (2017) αναφορικά με εκτιμήσεις αποδόσεων σιταριού, αραβοσίτου και βαμβακιού σε τέσσερις περιοχές (Αλμυρό, Καρδίτσα, Λάρισα και Τρίκαλα) στις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 με σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5. Η εισήγηση ανακοινώθηκε στο συνέδριο με θέμα «Κλιματική αλλαγή. Αυτοδιοίκηση και Θεσσαλία μπροστά στην παγκόσμια πρόκληση» (Καρδίτσα, 9-10 Ιουνίου 2017). Τα ευρήματα

έδειξαν ότι η καλλιέργεια του σιταριού θα παρουσιάσει αύξηση των αποδόσεων μεγαλύτερη του 20% σε όλες τις περιοχές και στα δύο σενάρια συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Για το βαμβάκι εκτιμήθηκε μικρότερη αύξηση των αποδόσεων, μέχρι 10-20%, με ελάχιστες τιμές στον Αλμυρό και υψηλότερες στην Καρδίτσα. Οι εκτιμήσεις για τον αραβόσιτο έδειξαν σταθερότητα έως μείωση κατά 10%, με δυσμενέστερες προοπτικές προς τα τέλη του αιώνα.

Τα στοιχεία αυτά δικαιολογούν μια λεπτομερέστερη προσέγγιση εστιασμένη αποκλειστικά στη Θεσσαλία, η οποία χρησιμοποίησε πιο πρόσφατα ερευνητικά εργαλεία και συμπεριέλαβε στους υπολογισμούς τον παράγοντα έδαφος, έναν πολύτιμο και δύσκολα ανανεώσιμο φυσικό πόρο με τεράστια επίδραση στη διαμόρφωση της φυτικής παραγωγής. Συγκεκριμένα, θα αξιοποιηθούν οι δυνατότητες χρήσης προσομοιώσεων υψηλής χωρικής ανάλυσης (σε επίπεδα της τάξης των 11 × 11 km) που παρέχουν συγκεκριμένα προγράμματα στο πλαίσιο συγκεκριμένων περιοχικών μετεωρολογικών μοντέλων. Επιπλέον, θα αξιολογηθούν με ακριβή ποσοτικά κριτήρια (βάσει δεικτών) οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στην ένταση ερημοποίησης και στον βαθμό διάβρωσης των εδαφικών μονάδων των επιμέρους περιοχών με χρήση των δεδομένων χαρτογράφησης των εδαφών της Θεσσαλίας.

Το γεγονός ότι οι αροτράιες καλλιέργειες κυριαρχούν στον γεωργικό χάρτη της Θεσσαλίας διευκολύνει τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης, τα οποία έχουν δομηθεί με προσανατολισμό αποκλειστικά προς ετήσια φυτά. Από τα υφιστάμενα μοντέλα, θα χρησιμοποιηθεί η πιο πρόσφατη και βελτιωμένη έκδοση του AquaCrop, ενός μοντέλου που συνιστά ο FAO ως κατάλληλου για περιοχές με υδατικά ελλείμματα (Steduto et al., 2009). Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται ευρέως και σε χώρες της Μ. Ανατολής (Αίγυπτο, Ιράκ, Υεμένη). Για το AquaCrop υπάρχουν δεδομένα ικανοποιητικής αξιολόγησης στον ελλαδικό χώρο και για τις τρεις καλλιέργειες που θα εξεταστούν, δηλαδή για το σιτάρι, τον αραβόσιτο και το βαμβάκι (Karamanos et al., 2011). Στους υπολογισμούς θα ενσωματωθούν οι προβλεπόμενες για κάθε σενάριο εκπομπής συγκεντρώσεις CO₂, καθώς και τα στοιχεία που θα προκύψουν από τις εκτιμήσεις των μεταβολών στο βάθος του εδάφους, ώστε τα αποτελέσματα των αποδόσεων που θα προκύψουν να έχουν τον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό αξιοπιστίας.

Οι εκτιμήσεις της παραγωγής των επιμέρους καλλιεργειών θα βασιστούν στα εξαγόμενα των αποδόσεων από την εφαρμογή του AquaCrop, τα οποία στη συνέχεια θα αναχθούν στο σύνολο της υπό μελέτη επιφάνειας. Για τον υπολογισμό της τελευταίας θα εκτιμηθεί η διαχρονική μεταβολή της καταλληλότητας των γαιών με βάση τα εξαγόμενα από την προβλεπόμενη ένταση ερημοποίησης και υποβάθμισης των εδαφών. Η εκτίμηση της παραγωγής θα γίνει σε επίπεδο των επιλεγμένων επιφανειών μελέτης, αλλά και σε επίπεδο περιφέρειας με βάση τη σχετική κατανομή των τριών καλλιεργειών στις περιφερειακές ενότητες από στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ καθώς και από στοιχεία του εδαφολογικού χάρτη, κυρίως τη σχετική κατανομή των γαιών με βάση την κλίση των εδαφών.

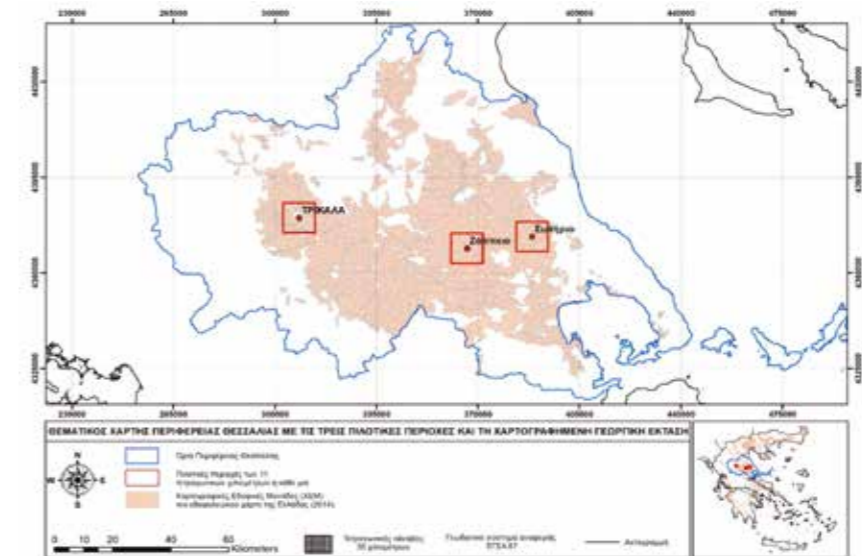
Τα ευρήματα από τις εκτιμήσεις των επιδράσεων της αλλαγής του κλίματος στη φυτική παραγωγή πρέπει να αποτελέσουν το ερέθισμα για τον προγραμματισμό και την εφαρμογή προτάσεων αντιμετώπισης, προσαρμογής και μετριασμού των επιπτώσεων. Το προσδοκώμενο οικονομικό όφελος από την υιοθέτηση μέτρων προσαρμογής και μετριασμού για την οικονομία της χώρας συνολικά είναι σημαντικό και ανέρχεται σε 150-265 δισεκατομμύρια ευρώ σωρευτικά έως το 2100 (ΕΜΕΚΑ, 2011). Στο πλαίσιο της Εθνικής Στρατηγικής για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (άρθρα 42-45 του ν. 4414/2016) και των συγκεκριμένων μέτρων που προβλέπονται για τον αγροτικό τομέα, θα καταβληθεί προσπάθεια ώστε να υπάρξει εξειδίκευση προτάσεων προσαρμογής και μετριασμού προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, ώστε να εξαλειφθούν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό οι αναμενόμενες αρνητικές επιπτώσεις στην πρωτογενή παραγωγή της Θεσσαλίας.

Β. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Β.1 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

ΓΙΑ ΝΑ ΥΠΑΡΞΕΙ μια κατά το δυνατόν μεγαλύτερη αντιπροσωπευτικότητα της υπό εξέταση περιφέρειας, η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής έγινε σε τρεις περιοχές, οι οποίες εκφράζουν σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες που επικρατούν στη Θεσσαλία από κλιματολογικής και εδαφολογικής πλευράς. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε σε εκτάσεις που καλύπτονται με αροτραίες καλλιέργειες, δηλαδή τις επικρατούσες καλλιέργειες στη Θεσσαλία, και, ως εκ τούτου, δεν συμπεριελήφθησαν ορεινές περιοχές.

Συγκεκριμένα επελέγησαν οι περιοχές Τρικάλων του Δήμου Τρικκαίων, Ζαπτείου του Δήμου Κιλελέρ και Σωτηρίου του Δήμου Κιλελέρ. Σε καθεμία από τις τρεις περιοχές μελετήθηκαν τετραγωνικές εκτάσεις με πλευρά 11 km, δηλαδή επιφάνειες 12100 ha (Εικ. 1). Οι συντεταγμένες των περιοχών μελέτης είναι: για την περιοχή Τρικάλων 43° 75' 00'' - 43° 85' 00'' Β, 30° 25' 00'' - 31° 35' 00'' Δ, για την περιοχή Σωτηρίου 43° 67' 50'' - 43° 78' 00'' Β, 38° 30' 00'' - 39° 40' 00'' Δ, και για την περιοχή Ζαπτείου 43° 64' 00'' - 43° 79' 00'' Β, 36° 15' 00'' - 37° 15' 00'' Δ.



Εικόνα 1. Η αποτύπωση των περιοχών μελέτης στον χάρτη της Θεσσαλίας. Οι χρωματισμένες περιοχές αντιστοιχούν με τις χαρτογραφημένες εδαφικές μονάδες στον εδαφολογικό χάρτη της Ελλάδας (ΟΠΕΚΕΠΕ, 2014).

B.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Οι εκτιμήσεις των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών βασίζονται σε σενάρια της πιθανής εξέλιξης των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο της 5ης Έκθεσης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή του ΟΗΕ (IPCC), αναπτύχθηκαν τέσσερα πιθανά σενάρια εξέλιξης των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, με βάση διαφορετικές πιθανές εξελίξεις του παγκόσμιου πληθυσμού, της οικονομικής δραστηριότητας, του τρόπου ζωής, της κατανάλωσης ενέργειας, των πρότυπων χρήσης της γης, της τεχνολογίας και της πολιτικής για το κλίμα. Τα σενάρια αυτά καλούνται Αντιπροσωπευτικές Διαδρομές Συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways – RCP) και στην παρούσα μελέτη οι εκτιμήσεις του μελλοντικού κλίματος γίνονται με βάση δύο από αυτά τα σενάρια: το RCP4.5 (ενδιάμεσο σενάριο) και το RCP8.5 (σενάριο δραστηρικής αύξησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου), τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των σεναρίων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
RCP4.5	Αναπτύχθηκε από την ομάδα GCAM του Ινστιτούτου Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI) των Ηνωμένων Πολιτειών. Πρόκειται για ένα σενάριο σταθεροποίησης, κατά το οποίο το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας σταθεροποιείται μετά το 2100, χωρίς να υπερβαίνει τον μακροπρόθεσμο στόχο (Clarke et al., 2007). Το συγκεκριμένο σενάριο λαμβάνει υπόψη ότι θα υλοποιηθούν προγράμματα αναδάσωσης και ότι θα πραγματοποιηθούν αλλαγές στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Επιπλέον οι εκπομπές μεθανίου αναμένονται να είναι σταθερές, ενώ οι εκπομπές CO ₂ επιτρέπεται να αυξηθούν με αργούς ρυθμούς έως το 2040 και να αρχίσουν να μειώνονται εφεξής. Το RCP4.5 αντιπροσωπεύει γενική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας και στη χρήση ορυκτών καυσίμων, ενώ υποθέτει αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της χρήσης πυρηνικής ενέργειας (Thomson et al., 2011).

RCP8.5	Αναπτύχθηκε με χρήση του μοντέλου MESSAGE και του IIASA Integrated Assessment Framework του International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) στην Αυστρία. Το σενάριο αυτό χαρακτηρίζεται από αυξανόμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και οδηγεί σε υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου (Riahi et al., 2007). Αναπαριστά μία μελλοντική κατάσταση, κατά την οποία δεν θα υλοποιηθούν πολιτικές μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και οι εκπομπές μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου θα αυξηθούν με ταχείς ρυθμούς μέχρι τα τέλη του αιώνα. Θα αυξηθεί η χρήση γης λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού, καθώς και η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και για τη μετακίνηση (Riahi et al., 2011).
--------	---

Για το κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη τα αποτελέσματα προσομοιώσεων υψηλής χωρικής διακριτικής ανάλυσης (της τάξης των 11 × 11 km) του προγράμματος EURO-CORDEX (<https://euro-cordex.net/>), οι οποίες καλύπτουν σε ημερήσια χρονική ανάλυση μία συνεχή χρονική περίοδο από το 1970 έως το 2100. Οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιούνται πραγματοποιήθηκαν με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RCA4 (Samuelsson et al., 2011) με χρήση αρχικών και οριακών συνθηκών από το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013), από τις οποίες εξήχθησαν στα σημεία ενδιαφέροντος οι ημερήσιες τιμές των ακόλουθων κλιματικών παραμέτρων: θερμοκρασία (μέση, μέγιστη, ελαχίστη), βροχόπτωση, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου για την περίοδο αναφοράς 1981-2000, καθώς και για δύο μελλοντικές περιόδους: 2041-2060 (εγγύς μέλλον) και 2081-2100 (απώτερο μέλλον).

Β.3 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Τα εδαφικά δεδομένα έχουν ληφθεί από τον εδαφολογικό χάρτη της Θεσσαλίας σύμφωνα με τη χαρτογράφηση του 2014 (ΟΠΕΚΕΠΕ, 2014, 336-343). Οι επιμέρους χαρτογραφικές εδαφικές μονάδες έχουν ταυτοποιηθεί με βάση 14 χαρακτηριστικά. Καθένα από τα χαρακτηριστικά αυτά κωδικοποιείται με σύμβολα (γράμματα και αριθμούς), οι συνδυασμοί των οποίων διαφοροποιούν τις εδαφικές μονάδες. Με τη σειρά εμφάνισής τους τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής: υδρομορφία, κοκκομετρική σύσταση σε βάθη 25-75 cm, 75-150 cm και 0-25 cm, κλίση επιφάνειας, βάθος εδάφους, περιεκτικότητα σε αδρομερή υλικά στην επιφάνεια, μητρικό υλικό, βαθμός διάβρωσης, περιεκτικότητα σε ανθρακικά άλατα, παρουσία περιοριστικού ορίζοντα, ηλεκτρική αγωγιμότητα, αλκαλικότητα, σύστημα ταξινόμησης κατά FAO (2006). Η αντιστοίχιση των κλάσεων του κάθε χαρακτηριστικού με σύμβολα περιγράφεται λεπτομερώς από τους Kairis et al. (2020).

Β.3.1 Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης των γαιών με χρήση της μεθοδολογίας ESA (Environmental Sensitive Areas)

Η εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης έγινε στις εδαφικές μονάδες των τριών υπό μελέτη περιοχών με βάση τη μεθοδολογία ESA, που περιγράφεται παρακάτω, και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο πλαίσιο του κοινοτικού ερευνητικού προγράμματος MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) (Kosmas et al., 1999). Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, οι διάφορες περιοχές του μεσογειακού περιβάλλοντος κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ευαισθησία τους στην υποβάθμιση και στην ερημοποίηση. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται εφικτή με τη βοήθεια ενός σύνθετου δείκτη (ESAI), ο οποίος βασίζεται σε ένα σύνολο επιμέρους δεικτών που συναρτώνται με την ποιότητα των εδαφών, την ποιότητα του κλίματος, την ποιότητα της βλάστησης και την ποιότητα της διαχείρισης των γαιών.

Οι Περιβαλλοντικά Ευαίσθητες Περιοχές (ΠΕΠ) (Environmentally Sensitive Areas, ESA) στην ερημοποίηση γύρω από τη Λεκάνη της Μεσογείου παρουσιάζουν διαφορετική ευαισθησία στο φαινόμενο, αναλόγως

με το είδος των επικίνδυνων παραγόντων που αντιμετωπίζουν. Παραδείγματος χάριν, κάποιες περιοχές παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο εξαιτίας του μικρού ποσοστού φυτοκάλυψης των εδαφών τους κατά τις περιόδους ακραίων φαινομένων βροχόπτωσης, άλλες λόγω της περιορισμένης αποθηκευτικής ικανότητας του εδάφους σε νερό (μικρό ενεργό βάθος εδάφους), άλλες λόγω συγκεκριμένου τρόπου χρήσης και διαχείρισης της γης (όπως π.χ. η καλλιέργεια σιτηρών σε εδάφη μητρικού πετρώματος μάργας σε λοφώδεις περιοχές) και ορισμένες επειδή αντιμετωπίζουν ειδικό κίνδυνο, όπως αυτός των πυρκαγιών. Η περιγραφόμενη μεθοδολογία συνεκτιμά τις τέσσερις ποιοτικές κατηγορίες κινδύνων (έδαφος, κλίμα, βλάστηση και διαχείριση) σε περιοχές της Λεκάνης της Μεσογείου οι οποίες, στην ακραία τους έκφραση, μπορούν να οδηγήσουν στην ερημοποίηση των γαιών.

Β.3.1.1 Δείκτης ποιότητας του εδάφους

Το έδαφος αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα των χερσαίων οικοσυστημάτων στις ημίξηρες και ξηρές κλιματικές ζώνες, κυρίως μέσω της επίδρασής του στην παραγωγή φυτικής βιομάζας. Το φαινόμενο της ερημοποίησης μπορεί να εμφανιστεί σε περιοχές όπου τα εδάφη δεν είναι ικανά να παράσχουν στα φυτά τον απαραίτητο χώρο ανάπτυξης του ριζοστρώματος ή τις αναγκαίες ποσότητες ύδατος και θρεπτικών συστατικών. Οι συνήθεις περιοριστικοί παράγοντες των εδαφών στις περιοχές των δύο προαναφερόμενων κλιματικών ζωνών είναι το βάθος και το διαθέσιμο νερό. Οι δείκτες της ποιότητας του εδάφους που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία των ΠΕΠ (ESA) σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού και την αντίσταση του εδάφους στη διάβρωση. Συγκεκριμένα, οι δείκτες αυτοί προέρχονται από απλές εδαφικές ιδιότητες που περιγράφονται σε μια τυπική εδαφολογική μελέτη, όπως το βάθος του εδάφους, η κοκκομετρική του σύσταση, το καθεστώς υδρομορφίας, το μητρικό υλικό, ο βαθμός κλίσης της επιφάνειας και το ποσοστό των αδρομερών υλικών του επιφανειακού ορίζοντα.

Η χρησιμοποίηση των προαναφερόμενων εδαφικών ιδιοτήτων για τον καθορισμό και τη χαρτογράφηση των ΠΕΠ απαιτεί τον ορισμό ευδιάκριτων κλάσεων με γνώμονα τον βαθμό προστασίας των γαιών από την ερημοποίηση. Οι κλάσεις των εδαφικών ιδιοτήτων και οι προσδιδόμενοι συντελεστές βαρύτητάς τους (Σ. Β.) παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:



Πίνακας 2. Κλάσεις και συντελεστές βαρύτητας (Σ. Β.) των ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ποιότητας του εδάφους.

Ιδιότητα	Περιγραφή κλάσεως	Εύρος τιμών κλάσεως	Σ. Β.
Κοκκομετρική σύσταση*		L, SCL, SL, LS, CL	1
		SC, SiL, SiCL	1,2
		Si, C, SiC	1,6
		S	2
Μητρικό υλικό		Σχιστόλιθος, σχίστης, βασικά και υπερβασικά πετρώματα, κροκαλοπαγή, ψαθυρές αποθέσεις	1
		Ασβεστόλιθος, μάρμαρο, γρανίτης, ρυόλιθος, ιγκνιμβρίτης, γνεύσιος, ιλυόλιθος, ψαμμίτης	1,7
		Μάργες**, πυροκλαστικά	2
Βάθος εδάφους	Βαθιά	> 75 cm	1
	Μετρίως βαθιά	30-75 cm	2
	Ρηχά	15-30 cm	3
	Πολύ ρηχά	< 15 cm	4
Κλίση εδάφους	Σχεδόν επίπεδα	< 6%	1
	Ελαφρώς κεκλιμένα	6-18%	1,2
	Απότομα	18-35%	1,5
	Πολύ απότομα	> 35%	2
Αδρομερή υλικά επιφάνειας	Πολύ πετρώδη	> 60%	1
	Πετρώδη	20-60%	1,3
	Ακάλυπτα έως ελαφρώς πετρώδη	< 20	2

Υδρομορφία	Καλώς αποστραγγιζόμενα		1
	Ατελώς αποστραγγιζόμενα		1,2
	Κακώς αποστραγγιζόμενα		2
Ποιότητα εδάφους	Περιγραφή ποιότητας	Δείκτης ποιότητας εδάφους (Soil Quality Index – SQI)	
	Υψηλή	< 1,13	
	Μέτρια	1,14-1,45	
	Χαμηλή	> 1,45	

* S: άμμος, Si: ιλύς, C: άργιλος, L: πηλός. Ο χαρακτηρισμός κάθε εδάφους γίνεται με βάση τις εκατοστιαίες αναλογίες άμμου, ιλύος και αργίλου σύμφωνα με το σύστημα του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (USDA).

** Στις περιπτώσεις αειθαλούς βλάστησης και μητρικού υλικού μαργών, ο συντελεστής βαρύτητας λαμβάνει την τιμή 1.

Αναφορικά με τον Πίν. 2, η κοκκομετρική σύσταση σχετίζεται με τη διαβρωσιμότητα των εδαφών, την ικανότητά τους για συγκράτηση ύδατος, την τάση για δημιουργία επιφανειακής κρούστας και τη σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων. Το διαθέσιμο εδαφικό νερό συνδέεται τόσο με την κοκκομετρική σύσταση όσο και με τη δομή και το βάθος των εδαφών. Εδάφη τα οποία περιέχουν υψηλό ποσοστό ιλύος τείνουν να διατηρούν υψηλότερα επίπεδα εδαφικού νερού, ενώ αντίθετα αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν τη μικρότερη ικανότητα αποθήκευσης ύδατος. Τα αμμώδη εδάφη είναι πιο ευαίσθητα στην ξηρασία, καθώς διατηρούν λιγότερο νερό στην υδατοϊκανότητά τους (field capacity) και το νερό που αποθηκεύεται καταναλώνεται ταχύτερα από τα φυτά. Στον Πίν. 2 οι κλάσεις της κοκκομετρικής σύστασης ομαδοποιούνται σύμφωνα με την ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει νερό. Τα μητρικά υλικά ταξινομούνται σύμφωνα με την ευαισθησία τους στην ερημοποίηση. Τα αδρομερή υλικά στην επιφάνεια του εδάφους ομαδοποιούνται σε τρεις

κλάσεις, ανάλογα με την προστασία που παρέχουν ενάντια στη διάβρωση και με την ικανότητα που προσδίδουν στα εδάφη να διατηρούν το εδαφικό νερό. Η κλίση του εδάφους ομαδοποιήθηκε σε τέσσερις κατηγορίες σύμφωνα με την επίδρασή της στη διάβρωση. Η κατάσταση της υδρομορφίας του εδάφους χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης, που προκαλείται από την αλάτωση των εδαφών των χαμηλότερων σημείων του τοπογραφικού αναγλύφου και περιγράφεται σε τρεις κλάσεις. Τέλος, ο δείκτης της ποιότητας των εδαφών (Soil Quality Index – SQI) υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των προαναφερόμενων έξι εδαφικών ιδιοτήτων σύμφωνα με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

$$SQI = (\Sigma. B. \text{ κοκκομετρικής σύστασης} \times \Sigma. B. \text{ μητρικού υλικού} \times \Sigma. B. \text{ αδρομερών υλικών} \times \Sigma. B. \text{ βάθους εδάφους} \times \Sigma. B. \text{ κλίσης εδάφους} \times \Sigma. B. \text{ υδρομορφίας})^{1/6} \quad (1)$$

B.3.1.2 Δείκτης ποιότητας του κλίματος

Η ποιότητα του κλίματος εκτιμάται με τη χρήση παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά, όπως η ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η θερμοκρασία του αέρα και η ξηρασία, καθώς και οποιοδήποτε ακραίο φαινόμενο, όπως ο παγετός. Για την εκτίμηση της ποιότητας του κλίματος σύμφωνα με τη μεθοδολογία των ΠΕΠ χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα κλιματικά δεδομένα (Πίν. 3):

Πίνακας 3. Κλάσεις και συντελεστές βαρύτητας (Σ. Β.) των ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ποιότητας του κλίματος.

Ιδιότητα	Περιγραφή κλάσεως	Εύρος τιμών κλάσεως	Σ. Β.
Μέση ετήσια βροχόπτωση		> 650 mm	1
		280-650 mm	2
		< 280 mm	4

Μέση μηνιαία θερμοκρασία	Χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του δείκτη ξηρότητας		
Βιοκλιματικός δείκτης ξηρότητας		≥ 1,00	1,00
		1,00-0,75	1,05
		0,75-0,65	1,15
		0,50-0,65	1,25
		0,35-0,50	1,35
		0,20-0,35	1,45
		0,10-0,20	1,55
		0,03-0,10	1,75
		< 0,03	2,00
Έκθεση της κλίσης των εδαφών		Βορειοδυτικές και βορειοανατολικές εκθέσεις NW-NE	1
		Νοτιοδυτικές και νοτιοανατολικές εκθέσεις SW-SE	2
Ποιότητα κλίματος	Περιγραφή ποιότητας	Δείκτης ποιότητας κλίματος (Climate Quality Index – CQI)	
	Υψηλή ποιότητα	< 1,15	
	Μέτρια ποιότητα	1,15-1,81	
	Χαμηλή ποιότητα	> 1,81	

Η άνιση ετήσια και εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων και τα ακραία εκτός εποχής φαινόμενα βροχόπτωσης στις ημίξηρες και ξηρές κλιματικές ζώνες της Μεσογείου αποτελούν τις κύριες παραμέτρους του κλίματος που συντελούν στην υποβάθμιση των γαιών. Όταν, λόγω των κλιματικών συνθηκών, η εδαφική υγρασία δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών της βλάστησης, τότε αυτή υποβαθμίζεται σταδιακά, με συνακόλουθη μείωση και της οργανικής ουσίας του εδάφους, γεγονός που επιφέρει μείωση της σταθερότητας των εδαφικών συσσωματωμάτων και

ως εκ τούτου προσδίδει μεγάλη ευαισθησία του επιφανειακού οριζοντα στη διάβρωση. Ο πιο αποτελεσματικός υπολογισμός του διαθέσιμου νερού του εδάφους προκύπτει αν αφαιρεθούν η εξατμισοδιαπνοή και η επιφανειακή απορροή από τη βροχόπτωση, κάτι που όμως απαιτεί αρκετά δεδομένα εδαφικής υγρασίας, ανάπτυξης βλάστησης κ.ά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, και για λόγους απλούστευσης των διαδικασιών, χρησιμοποιείται ο δείκτης ξηρότητας (DI) (Barrow, 1992):

$$DI = \Sigma P / \Sigma ET_0 \quad (2)$$

όπου ΣP η ετήσια βροχόπτωση και ΣET_0 η ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή, που υπολογίστηκε από την τροποποιημένη μέθοδο των Penman και Monteith (Monteith, 1965).

Ο DI υποδιαιρέθηκε σε κλάσεις και χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα από τους Ferrara et al. (2020) για τον προσδιορισμό εδαφών ευάλωτων στη διάβρωση και στην ερημοποίηση σε πλανητικό επίπεδο.

Όσον αφορά την έκθεση της κλίσης των εδαφών, είναι γνωστό ότι η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων και το χρονικό διάστημα της επαφής τους με την επιφάνεια του εδάφους είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με αυτή την ιδιότητα. Σε μεσογειακές συνθήκες, οι γαίες με νοτιοανατολικές και νοτιοδυτικές εκθέσεις είναι θερμότερες και παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς εξατμίσου και μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους σε νερό.

Ο δείκτης της ποιότητας του κλίματος (Climate Quality Index – CQI) υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των προαναφερθεισών ιδιοτήτων στον Πίν. 3 σύμφωνα με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

$$CQI = (\Sigma. B. \text{ μηνιαίας βροχόπτωσης} \times \Sigma. B. \text{ δείκτη ξηρότητας} \times \Sigma. B. \text{ έκθεσης της κλίσης των εδαφών})^{1/3} \quad (3)$$

B.3.1.3 Δείκτης ποιότητας της βλάστησης

Ο κύριος βιοτικός παράγοντας που καθορίζει το φαινόμενο της ερημοποίησης των γαιών είναι η φυτική κάλυψη των εδαφών, επειδή συναρτάται άμεσα με τα φαινόμενα της επιφανειακής υδατικής απορροής και της διάβρωσης. Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας των ΠΕΠ (ESA), η ποιό-

τητα της βλάστησης οριοθετείται από τέσσερις ιδιότητες της γεωργικής ή της δασικής φυτικής κάλυψης που αφορούν τον κίνδυνο πυρκαγιάς και τη δυνατότητα αναβλάστησης, την παρεχόμενη προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, την ανθεκτικότητα στην ξηρασία και το ποσοστό κάλυψης ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους (Πίν. 4).

Πίνακας 4. Κλάσεις και συντελεστές βαρύτητας (Σ. Β.) των ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ποιότητας της βλάστησης.

Ιδιότητα	Περιγραφή κλάσεως	Είδος βλάστησης	Σ. Β.
Κίνδυνος πυρκαγιάς	Μικρός	Ακάλυπτες εκτάσεις, πολυετείς γεωργικές καλλιέργειες, ετήσιες γεωργικές καλλιέργειες (καλαμπόκι, καπνός, ηλιάνθος)	1
	Μέτριος	Ετήσιες γεωργικές καλλιέργειες (δημητριακά, λειμώνες), φυλλοβόλες δρύες, μεικτή μεσογειακή φρυγανώδης και αιθαλή δάση	1,3
	Υψηλός	Μεσογειακή φρυγανώδης	1,6
	Πολύ υψηλός	Δάση πεύκης	2
Προστασία από τη διάβρωση	Πολύ υψηλή	Μεικτή μεσογειακή φρυγανώδης και αιθαλή δάση	1
	Υψηλή	Μεσογειακή φρυγανώδης, δάση πεύκης, μόνιμοι λειμώνες, αιθαλείς πολυετείς γεωργικές καλλιέργειες	1,3
	Μέτρια	Φυλλοβόλα δάση	1,6
	Μικρή	Φυλλοβόλες πολυετείς γεωργικές καλλιέργειες (οπωρώνες)	1,8
	Πολύ μικρή	Ετήσιες γεωργικές καλλιέργειες (δημητριακά), ετήσιοι λειμώνες, αμπελώνες	2

Ανθεκτικότητα στην ξηρασία	Πολύ υψηλή	Μεικτή μεσογειακή φρυγανώδης και αειθαλή δάση, μεσογειακή φρυγανώδης	1
	Υψηλή	Κωνοφόρα, φυλλοβόλα, ελαιώνες	1,2
	Μέτρια	Πολυτεείς γεωργικοί δενδρώνες (αμπελώνες, αμυγδαλώνες, οπωρώνες)	1,4
	Μικρή	Πολυτεείς λειμώνες	1,7
	Πολύ μικρή	Ετήσιες γεωργικές καλλιέργειες, ετήσιοι λειμώνες	2
Ποσοστό φυτοκάλυψης	Περιγραφή κλάσεως	Ποσοστό (%)	Σ. Β.
	Υψηλό	> 40	1
	Μικρό	10-40	1,8
	Πολύ μικρό	< 10	2
Ποιότητα βλάστησης	Περιγραφή ποιότητας	Δείκτης ποιότητας βλάστησης (Vegetation Quality Index – VQI)	
	Υψηλή	1-1,13	
	Μέτρια	1,14-1,38	
	Χαμηλή	> 1,38	

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μία από τις πιο σημαντικές αιτίες υποβάθμισης των γαιών στις λοφώδεις περιοχές της Μεσογείου. Έχει παρατηρηθεί ότι η συχνότητα των πυρκαγιών είναι μικρότερη στους λειμώνες και στις εκτάσεις μεικτής βλάστησης η οποία αποτελείται από μεσογειακή φρυγανώδη και αειθαλή δάση. Μολονότι η μεσογειακού τύπου βλάστηση είναι ιδιαίτερα εύφλεκτη λόγω της ύπαρξης ειδών με υψηλή περιεκτικότητα σε ρητίνες και αιθέρια έλαια, παρουσιάζει υψηλή ικανότητα αποκατάστασης, που περιορίζει τον χρόνο ύπαρξης περιβαλλοντικών προβλημάτων σε λίγα

χρόνια (Trabaud, 1981). Βέβαια, οι υψηλής συχνότητας πυρκαγιές ενδέχεται να μην επιτρέψουν την αποκατάσταση και να δημιουργήσουν ιδιαίτερα υποβαθμισμένες περιοχές. Είναι αυτονόητο ότι καθοριστικοί παράγοντες για τη ζημιά που προκαλείται από οποιαδήποτε πυρκαγιά είναι το είδος της βλάστησης και η ένταση της πυρκαγιάς.

Η βλάστηση και ο τύπος χρήσης της γης αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες για τις διεργασίες της επιφανειακής υδατικής απορροής και της διάβρωσης (Bryan & Campbell, 1986· Mitchell, 1990). Δεδομένα διαβρώσεων οκτώ περιοχών έρευνας της Βόρειας Μεσογείου, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, καταδεικνύουν ότι σε μεσογειακού τύπου χρήσεις γης (δημητριακά, ελαιώνες, αμπελώνες, φυσική βλάστηση) οι μεγαλύτεροι ρυθμοί επιφανειακής απορροής και απώλειας εδαφικού ιζήματος παρατηρήθηκαν στους αμπελώνες (Kosmas et al., 1997).

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαχρονική εξέλιξη της μεσογειακής βλάστησης σχετίζονται με τη μη κανονική και συχνά ανεπαρκή τροφοδοσία των φυτών με νερό, με τη μακρά διάρκεια της ξηρής περιόδου, καθώς και με τις πυρκαγιές και τη βόσκηση (Clark, 1996). Η τυπική αντίδραση των φυτών σε έντονες συνθήκες ξηρασίας είναι η μείωση του φυλλώματός τους ως μία βίαιη και αναγκαία λύση προκειμένου να μειωθεί η λειτουργία της διαπνοής τους. Αυτό, όπως είναι φυσικό, έχει δυσμενείς συνέπειες στην εδαφική διάβρωση στις περιπτώσεις που ραγδαίες βροχοπτώσεις θα συναντήσουν ακάλυπτο από την προστατευτική φυτική κάλυψη σημαντικό τμήμα του εδάφους. Από την επικρατούσα πολυετή γεωργική φυτοκάλυψη της Μεσογείου οι ελαιώνες παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή προσαρμοστικότητα και αντίσταση σε συνθήκες ξηρασίας μεγάλης διάρκειας (Margaris et al., 1995).

Η σημασία της φυτικής κάλυψης των εδαφών στον έλεγχο της υδατικής διάβρωσης είναι κοινώς αποδεκτή. Βραχυπρόθεσμα η βλάστηση επηρεάζει τη διάβρωση κυρίως λόγω της μείωσης της κινητικής ενέργειας των σταγόνων της βροχής και της διακοπής της απορροής. Μακροπρόθεσμα επηρεάζει τις ροές του νερού και του εδαφικού ιζήματος αυξάνοντας τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων και τη συνοχή του εδάφους και βελτιώνοντας τη διήθηση. Αυτή η πολύπλοκη σχέση μεταξύ του ποσοστού φυτοκάλυψης και του ρυθμού απορροής έχει περιγραφεί ως αρνητική εκθετική συνάρτηση (Zuazo & Pleguezuelo, 2009).

Ο δείκτης της ποιότητας της βλάστησης (Vegetation Quality Index – VQI) υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των προαναφερόμενων (Πίν. 4) ιδιοτήτων σύμφωνα με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

$$VQI = (\Sigma. B. \text{κινδύνου πυρκαγιάς} \times \Sigma. B. \text{αντιδιαβρωτικής προστασίας} \times \Sigma. B. \text{ανθεκτικότητας στην ξηρασία} \times \Sigma. B. \text{ποσοστού φυτοκάλυψης})^{1/4} \quad (4)$$

B.3.1.4 Δείκτης ποιότητας της διαχείρισης

Ο ορισμός των ΠΕΠ στην ερημοποίηση απαιτεί, εκτός από τις ιδιότητες του φυσικού περιβάλλοντος, την παράλληλη χρήση παραγόντων που περιγράφουν τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις σε αυτό. Οποιαδήποτε έκταση γης, ανεξάρτητα από το μέγεθός της, χαρακτηρίζεται από μία συγκεκριμένη χρήση. Η χρήση αυτή σχετίζεται με έναν τύπο διαχείρισης ο οποίος καθορίζεται από περιβαλλοντικούς, κοινωνικοοικονομικούς, τεχνοκρατικούς και πολιτικούς παράγοντες. Ανάλογα με τον τύπο της διαχείρισης, οι γαίες υπόκεινται σε κάποιο επίπεδο διαταραχής ή μη της λειτουργικότητας και της αειφορίας τους εξαιτίας των ανθρωπίνων παρεμβάσεων. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει αναλυτικά τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της διαχείρισης με βάση την κατηγορία της γης και τις μεταχειρίσεις που επιδέχεται (Πίν. 5).

Πίνακας 5. Κλάσεις και συντελεστές βαρύτητας (Σ. Β.) των ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ποιότητας της διαχείρισης.

Χρήση γης	Ιδιότητα	Δείκτης χαρακτηρισμού	Περιγραφή κλάσεως	Σ. Β.
Γεωργία	Ένταση χρήσης γης		Μικρή	1
			Μέτρια	1,5
			Υψηλή	2
Βοσκότοποι	Πυκνότητα βόσκησης		Μικρή (ASR < SSR)	1
			Μέτρια (ASR = SSR έως 1,5 SSR)	1,5
			Υψηλή (ASR > 1,5 SSR)	2

Φυσικές περιοχές		Παραγωγή φυτικής βιομάζας	Μικρή (A/S = 0)	1
			Μέτρια (A/S < 1)	1,2
			Υψηλή (A/S ≥ 1)	2
Περιοχές αναψυχής		Αριθμός επισκεπτών	Μικρή (A/P > 1)	1
			Μέτρια (1 < A/P < 2,5)	1,5
			Υψηλή (A/P > 2,5)	2
Περιοχές εξόρυξης		Μέτρα ελέγχου της διάβρωσης	Μικρή (Επαρκής εφαρμογή μέτρων)	1
			Μέτρια (Μέτρια εφαρμογή μέτρων)	1,5
			Υψηλή (Μικρή εφαρμογή μέτρων)	2
	Εφαρμογή των μέτρων πολιτικής	Βαθμός εφαρμογής	Ολικός (> 75% της περιοχής προστατεύεται)	1
			Μερικός (25%-75% της περιοχής προστατεύεται)	1,5
			Ατελής (< 25% της περιοχής προστατεύεται)	2
Ποιότητα διαχείρισης	Περιγραφή ποιότητας	Δείκτης ποιότητας διαχείρισης (Management Quality Index – MQI)		
		Υψηλή	1-1,25	
		Μέτρια	1,26-1,50	
		Χαμηλή	> 1,51	

Η ένταση χρήσης της γης μιας γεωργικής περιοχής καθορίζεται από ορισμένα χαρακτηριστικά που αφορούν τον τρόπο καλλιέργειας, όπως οι εισροές αγροχημικών και λιπασμάτων, ο βαθμός εκμηχάνισης, η συχνότητα των αρδεύσεων κ.ά. Κατ' αναλογία, η ένταση χρήσης της γης μιας φυσικής περιοχής καθορίζεται από τον λόγο της πραγματικής παραγωγής (A) προς την αειφορική παραγωγή φυτικής βιομάζας (S) και η ένταση χρήσης γης ενός βοσκότοπου από τον λόγο της αειφορικής πυκνότητας (SSR) προς την πραγματική πυκνότητα βόσκησης (ASR).

Ιδιαίτερες περιπτώσεις αποτελούν οι χώροι αναψυχής και οι περιοχές εξόρυξης, όπου τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ένταση χρήσης τους είναι ο λόγος του πραγματικού αριθμού των επισκεπτών (A) προς τον επιτρεπόμενο αριθμό επισκεπτών (P) και η εφαρμογή μέτρων προστασίας των εδαφών από τη διάβρωση, αντιστοίχως. Τα μέτρα πολιτικής για την προστασία του περιβάλλοντος κατηγοριοποιούνται αναλόγως με τον βαθμό που επιβάλλονται από την Πολιτεία ή υιοθετούνται από τους χρήστες της γης.

Ο δείκτης της ποιότητας διαχείρισης των γαιών (Management Quality Index – MQI) υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των προαναφερόμενων (Πίν. 5) ιδιοτήτων σύμφωνα με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

$$MQI = (\Sigma. B. \text{έντασης χρήσης} \times \Sigma. B. \text{εφαρμογής πολιτικής})^{1/2} \quad (5)$$

B.3.1.5 Υπολογισμός του σύνθετου δείκτη εκτίμησης της περιβαλλοντικής ευαισθησίας των περιοχών στην ερημοποίηση (ESAI)

Στη μεθοδολογία της εκτίμησης του κινδύνου ερημοποίησης κατά ESA, όλες οι ιδιότητες που συνθέτουν τις επιμέρους ποιότητες των εδαφών, του κλίματος, της βλάστησης και της διαχείρισης εξάγονται από τη βάση δεδομένων των διανυσματικών πολυγωνικών αρχείων (shp files) σε ειδική μορφή αρχείου (Esri-Grid) η οποία είναι απαραίτητη για τη χρήση της εφαρμογής «raster calculator» του λογισμικού ArcGIS. Η εφαρμογή αυτή παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης αλγεβρικών πράξεων μεταξύ ιδιοτήτων

που απεικονίζονται σε χάρτες και με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός των ποιοτήτων της μεθοδολογίας ESA με τη βοήθεια των αλγορίθμων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Το τελικό βήμα της διαδικασίας που περιγράφεται στην παρούσα ενότητα αφορά τη σύνθεση των διαφορετικών ποιοτήτων του φυσικού περιβάλλοντος (ποιότητα εδάφους, ποιότητα κλίματος, ποιότητα βλάστησης) και της ποιότητας της διαχείρισης για τον ορισμό των διάφορων τύπων της ευαισθησίας των περιοχών στην ερημοποίηση. Όπως και στους επιμέρους δείκτες, ο σύνθετος δείκτης εκτίμησης της περιβαλλοντικής ευαισθησίας των περιοχών στην ερημοποίηση υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των τεσσάρων προαναφερθέντων δεικτών σύμφωνα με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

$$ESAI = (SQI \times CQI \times VQI \times MQI)^{1/4} \quad (6)$$

Τα εύρη τιμών του σύνθετου δείκτη ESAI που ορίζουν την κάθε κλάση περιβαλλοντικής ευαισθησίας στην ερημοποίηση, καθώς και οι αντίστοιχες υποκλάσεις, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίν. 6).

Πίνακας 6. Κλάσεις και συντελεστές βαρύτητας (Σ. Β.) των ιδιοτήτων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ποιότητας της διαχείρισης.

Κλάση	Υποκλάση ESA ή ΠΕΠ	Εύρος τιμών σύνθετου δείκτη ESAI
Κρίσιμες περιοχές	C3	> 1,53
	C2	1,42-1,53
	C1	1,38-1,41
Ευαίσθητες περιοχές	F3	1,33-1,37
	F2	1,27-1,32
	F1	1,23-1,26
Δυνητικά απειλούμενες περιοχές	P	1,17-1,22
Μη απειλούμενες περιοχές	N	< 1,17

B.3.2 Εκτίμηση των μεταβολών του βάθους του εδάφους από τη μηχανική διάβρωση

Η μηχανική διάβρωση προκαλείται από τη μηχανική κατεργασία του εδάφους με καλλιεργητικά εργαλεία και θεωρείται εξίσου σημαντική ή και σημαντικότερη από την υδατική διάβρωση. Κατά τη μηχανική κατεργασία του εδάφους, λαμβάνει χώρα βαθμιαία μετακίνηση του επιφανειακού εδαφικού υλικού κυρίως προς τα κατάντη. Αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας είναι η μείωση του βάθους του εδάφους στα ανώτερα και μεσαία τμήματα της πλαγιάς του λόφου και η αύξησή του στα κατώτερα τμήματα. Έχει μάλιστα αποδειχθεί ότι η μηχανική κατεργασία του εδάφους μπορεί να αυξήσει την υδατική διάβρωση του εδάφους ακόμη και στις μικρές κλίσεις (Κοσμάς, 2014).

Η μετατόπιση του εδάφους (Q_s , kg m^{-1}) κατά τη μηχανική διάβρωση θεωρείται ως μια διαδικασία διάχυσης του εδάφους και σχετίζεται γραμμικά με το βάθος άροσης (D , m), το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους (BD , kg m^{-3}), την κλίση της επιφάνειας του εδάφους (G , %) και τον συντελεστή διάχυσης (B), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Govers et al., 1994):

$$Q_s = D \times BD \times G \times B \quad (7)$$

Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι το γεωργικό μηχάνημα οργώνει παράλληλα προς την κλίση (κάθετα προς τις ισοϋψείς καμπύλες του εδάφους) με βάθος άροσης 0,20-0,25 m. Μέση τιμή του φαινομένου ειδικού βάρους για όλους τους τύπους των εδαφών θεωρήθηκε ίση προς 1200 kg m^{-3} . Η κλίση της επιφάνειας του εδάφους εκτιμήθηκε ως μέσος όρος της κλίσης της εδαφικής χαρτογραφικής μονάδας από τον εδαφολογικό χάρτη. Ο συντελεστής B υπολογίστηκε σε 0,54 από την κλίση της καμπύλης της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ της εδαφικής μετατόπισης και της κλίσης της επιφάνειας του εδάφους για βάθος άροσης 0,20-0,25 m (Gerontidis et al., 2001).

Έχοντας ως υπόβαθρο τον τοπογραφικό χάρτη, η επιφάνεια κάθε χαρτογραφικής εδαφικής μονάδας διαιρέθηκε σε τετράγωνα με πλευρά 20

μέτρων και εκτιμήθηκε η μορφή κάθε τετραγώνου όσον αφορά την καμπυλότητα με βάση το ανάγλυφο της επιφάνειας. Για κάθε τετράγωνο υπολογίστηκε η διαφορά μεταξύ απώλειας εδαφικού υλικού στο κατώτερο τετράγωνο και προσθήκης εδαφικού υλικού από το υπερκείμενο τετράγωνο με βάση την εξ. (7). Σε τετράγωνα με κυρτή επιφάνεια ή ευθύγραμμη επιφάνεια το τελικό αποτέλεσμα μετά από μια άροση ήταν συνήθως η απώλεια εδαφικού υλικού, ενώ σε τετράγωνα με κοίλη επιφάνεια εδάφους το τελικό αποτέλεσμα ήταν η προσθήκη εδαφικού υλικού. Γενικά σε μια πλαγιά ενός λόφου τα ανώτερα τμήματά του (κυρτά και ευθύγραμμα) χάνουν εδαφικό υλικό, ενώ τα κατώτερα τμήματα της πλαγιάς με κοίλη επιφάνεια δέχονται εδαφικό υλικό από τα ανώτερα τμήματα του λόφου.

Η μείωση ή αύξηση του βάθους του εδάφους (h) σε μια θέση υπολογίστηκε από την εξίσωση $h = W / (S \times BD)$, όπου W είναι το βάρος του εδάφους σε kg, S είναι η επιφάνεια που γίνεται ο υπολογισμός σε m^2 . Ο υπολογισμός έγινε σε επιφάνεια 1 m^2 , το βάρος του εδάφους θεωρήθηκε ίσο με το Q_s και έγινε αναγωγή στα 20 m^2 . Τέλος, για πρακτικούς λόγους εκτιμήθηκε η μέση απώλεια εδάφους σε κάθε χαρτογραφική εδαφική μονάδα ανά χρονική περίοδο.

B.3.3 Εκτίμηση απωλειών εδάφους από υδατική διάβρωση

Η υδατική διάβρωση προκαλείται από το νερό που απορρέει μετά από μια ισχυρή βροχή από την επιφάνεια του εδάφους και παρασύρει τα εδαφικά τεμαχίδια. Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες λοφώδεις και ορεινές περιοχές. Περίπου το 49% της επιφάνειας της χώρας χαρακτηρίζεται από κλίσεις μεγαλύτερες του 10%, ενώ μόνο το 36% χαρακτηρίζεται ως πεδινό με κλίσεις μικρότερες του 5%. Ο συνδυασμός των μεγάλων κλίσεων με την ανεπαρκή φυτοκάλυψη σε αρκετές περιπτώσεις έχει συντελέσει σημαντικά στη διάβρωση, υποβάθμιση και ερημοποίηση αυτών των περιοχών.

Η διάβρωση των γεωργικών εδαφών έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες λόγω εντατικοποίησης της γεωργίας. Μετρήσεις σε λοφώδεις περι-

οχές της Θήβας και της Χαλκιδικής που καλλιεργήθηκαν με σιτηρά τις τελευταίες δεκαετίες έδειξαν ότι η ετήσια διάβρωση του εδάφους κυμάνθηκε από 0-52 τόνους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (Kosmas et al., 1997). Τα σιτηρά καταλαμβάνουν μεγάλες λοφώδεις εκτάσεις που καλύπτουν διάφορες περιοχές της χώρας. Το έδαφος στις περιοχές αυτές είναι ιδιαίτερα επιρρεπές στη διάβρωση κατά τη χειμερινή περίοδο, όταν το έδαφος είναι ακάλυπτο ή μερικώς ακάλυπτο από βλάστηση, κυρίως όταν η ετήσια βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη των 380 mm.

Η εκτίμηση της υδατικής διάβρωσης των εδαφών στην παρούσα μελέτη έγινε με την εφαρμογή εμπειρικής εξίσωσης η οποία προέκυψε από μακράς διάρκειας πειραματικά δεδομένα. Μετρήσεις διάβρωσης εδάφους πραγματοποιήθηκαν σε περιοχές της Μεσογειακής Ευρώπης (Πορτογαλία, Ισπανία, Ελλάδα, Ιταλία και Γαλλία), στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων MEDALUS ή εθνικών προγραμμάτων, σε μια ποικιλία εδαφικών, τοπογραφικών και κλιματικών συνθηκών τις προηγούμενες δεκαετίες. Οι χρήσεις γης που μελετήθηκαν ήταν καλλιέργειες με σιτηρά, αμπέλια και ελιές, καθώς και κάλυψη με ευκαλύπτους και φυσική θαμνώδη βλάστηση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα σιτηρά έδειξαν ότι η ετήσια υδατική διάβρωση σε $g\ m^{-2}\ yr^{-1}$ είναι συνάρτηση της ετήσιας βροχόπτωσης σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Kosmas et al., 1997):

$$\text{Απώλεια εδάφους (g m}^{-2}\ yr^{-1}) = -12.7 + 0.046 R + 0.000083 R^2 \quad (8)$$

όπου R η ετήσια βροχόπτωση σε mm.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση και αφότου χρησιμοποιήθηκε η ετήσια βροχόπτωση κάθε περιόδου μελέτης, υπολογίστηκε η συνολική απώλεια εδάφους σε cm, ξεχωριστά για κάθε περιοχή μελέτης.

B.3.4 Εκτίμηση του κινδύνου αλάτωσης

Η αλάτωση του εδάφους είναι μια σημαντική διεργασία υποβάθμισης και ερημοποίησης της γης, η οποία συντελείται όταν συντρέχουν συγκε-

κριμένα χαρακτηριστικά του εδάφους, της τοπογραφίας, του κλίματος και της διαχείρισης της γης. Για παράδειγμα, τα κακώς στραγγιζόμενα εδάφη που βρίσκονται στα χαμηλότερα σημεία ενός αλλουβιακού πεδίου με χαμηλή ποιότητα υπόγειων υδάτων είναι πολύ ευαίσθητα στην αλάτωση σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα. Το κλίμα επιδρά άμεσα στην αλάτωση του εδάφους μέσω υψηλών ποσοστών εξάτμισης του νερού, τα οποία προκαλούν ανοδική κίνηση του εδαφικού νερού προς την επιφάνεια του εδάφους.

Η αλάτωση του εδάφους μπορεί να διακριθεί ως πρωτογενής ή δευτερογενής διεργασία. Η πρωτογενής αλάτωση περιλαμβάνει τη συσσώρευση αλάτων μέσω φυσικών διεργασιών, όπως η ανοδική κίνηση υπογείου νερού κακής ποιότητας μέσα στο έδαφος. Η δευτερογενής αλάτωση προκαλείται από ακατάλληλες πρακτικές άρδευσης, όπως η χρήση νερού άρδευσης πλούσιου σε άλατα. Στην παρούσα μελέτη θα γίνει εκτίμηση μόνο της πρωτογενούς αλάτωσης και σε μία μόνο από τις τρεις περιοχές, στην περιοχή του Σωτηρίου, όπου κυρίως συντρέχουν οι προϋποθέσεις υποβάθμισης του εδάφους λόγω πρωτογενούς αλάτωσης, επειδή η στράγγιση του εδάφους είναι ανεπαρκής.

Για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος που διατρέχει μια περιοχή να υποστεί αλάτωση μέσω του δείκτη SR χρησιμοποιούνται επιμέρους δείκτες που σχετίζονται με το φυσικό περιβάλλον ή τα κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο παρακάτω αλγόριθμος, που προέκυψε από τη στατιστική ανάλυση 49 περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών δεικτών οι οποίοι μελετήθηκαν σε περιοχές της Ελλάδας, της Ευρώπης και της Αφρικής (Kosmas et al., 2014; Kairis et al., 2014):

$$SR = 0,224 + 0,225ET_o + 0,346WQ + 1,497GWE + 0,413DR - 0,295FF + 0,152FO + 0,297DFS + 0,836IPAL - 0,573 PD \quad (9)$$

όπου ET_o = η δυνητική ετήσια εξατμισοδιαπνοή (mm νερού), WQ = η ποιότητα νερού άρδευσης (μS), GWE = ο βαθμός εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού, DR = η στράγγιση εδάφους, FF = η συχνότητα πλημμύρας (χρόνος), FO = το ιδιοκτησιακό καθεστώς της γης, DFS = η απόσταση

από την ακτογραμμή (km), IPAL = το εκατοστιαίο ποσοστό αρδευόμενης γεωργικής γης, PD = η πυκνότητα πληθυσμού (άνθρωποι / τετραγωνικό χιλιόμετρο).

Για την εφαρμογή του παραπάνω αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές μεταβλητών: Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (ET_0) υπολογίστηκε ως η μέση ετήσια εκάστης περιόδου μελέτης σε χιλιοστά. Η ποιότητα νερού (WQ) εκτιμήθηκε με ηλεκτρική αγωγιμότητα: 400-800 μS για την περίοδο 1981-2000 και $> 1500 \mu S$ για τις περιόδους 2040-2060 και 2080-2100. Η εκμετάλλευση του υπόγειου νερού (GWE) χαρακτηρίστηκε με μικρά προβλήματα υπερεκμετάλλευσης για την περίοδο 1980-2000 και με μέτρια προβλήματα υπερεκμετάλλευσης για τις δύο μελλοντικές περιόδους. Η στράγγιση του εδάφους (DR) εκτιμήθηκε από τον εδαφολογικό χάρτη της περιοχής και θεωρήθηκε η ίδια για όλες τις περιόδους της μελέτης. Η συχνότητα πλημμύρας (FF) εκτιμήθηκε ως σπάνια στην περιοχή με συχνότητα εμφάνισης 1 ανά 10 έτη για όλες τις περιόδους. Το ιδιοκτησιακό καθεστώς (FO) χαρακτηρίστηκε ως ιδιοκτησία παραγωγών για όλες τις περιόδους. Η απόσταση από την ακτογραμμή (DFS) μετρήθηκε από τον τοπογραφικό χάρτη. Το εκατοστιαίο ποσοστό αρδευόμενης γεωργικής γης (IPAL) θεωρήθηκε μεγαλύτερο του 50% για την περίοδο 1980-2000 και 25-50% για τις μελλοντικές περιόδους. Η πυκνότητα πληθυσμού (PD) στην ευρύτερη περιοχή εκτιμήθηκε σε 50-100 ανθρώπους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο για όλες τις περιόδους μελέτης.

Με βάση τις τιμές του δείκτη SR, ο κίνδυνος αλάτωσης συγκεκριμένου εδάφους διακρίνεται στις εξής κατηγορίες (Πίν. 7):

Πίνακας 7. Διαβάθμιση του κινδύνου αλάτωσης των εδαφών με βάση τις τιμές του δείκτη αλάτωσης SR.

Τιμή του SR	Κίνδυνος αλάτωσης
1,5 <	Κανένας
1,5-2,5	Μικρός
2,5-3,5	Μέτριος
3,5-4,5	Υψηλός
> 4,5	Πολύ υψηλός

B.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ AQUACROP

Στη μελέτη αυτή θα εκτιμηθούν οι αποδόσεις των κύριων αροτραίων καλλιεργειών της Θεσσαλίας, δηλαδή του σιταριού (*Triticum* sp.), του βαμβακιού (*Gossypium hirsutum* L.) και του αραβοσίτου (*Zea mays* L.), με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης AquaCrop (έκδοση 6.0, 2018).

Το AquaCrop είναι ένα πρότυπο (μοντέλο) προσομοίωσης καλλιεργειών που βασίζεται κυρίως στην επίδραση του νερού στην ανάπτυξη των φυτών και στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας. Αποτελεί επιστημονικό εργαλείο που στηρίχθηκε στην αναθεωρημένη έκθεση του FAO (Doorenbos & Kassam, 1979). Σε σύγκριση με αντίστοιχα μοντέλα, το AquaCrop απαιτεί σημαντικά μικρότερο αριθμό παραμέτρων, ενώ ταυτόχρονα είναι πιο απλό στη χρήση, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα και έχει μικρότερες πιθανότητες σφάλματος σε σύγκριση με πραγματικά δεδομένα (Steduto et al., 2009).

Η υδατική κατάσταση του εδάφους στη ζώνη ανάπτυξης του ριζικού συστήματος προσομοιάζεται από την καταγραφή της ροής ύδατος στα όρια της συγκεκριμένης ζώνης, λαμβανομένου υπόψιν του εδάφους, υποδιαιρούμενου σε διάφορες ζώνες, ως αποθηκευτικού χώρου για το νερό. Αντί για τη χρήση του δείκτη φυλλώματος (LAI), το AquaCrop χρησιμοποιεί την εδαφοκάλυψη της φυτείας (canopy ground cover). Η αύξηση της συστάδας, η αγωγιμότητα των στοματίων, η γήρανση του φυλλώματος και ο δείκτης συγκομιδής (harvest index) αποτελούν τα βασικά στοιχεία εκτίμησης της φυσιολογικής αντίδρασης του φυτού σε σχέση με το νερό. Η εξατμισοδιαπνοή εξομοιώνεται με τη διαπνοή του φυτού και την εξάτμιση νερού από το έδαφος και χρησιμοποιείται για τη συναγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων όσον αφορά την παραγόμενη βιομάζα. Η εξομάλυνση των δεδομένων που αφορούν την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και τη συγκέντρωση CO_2 χρησιμεύει στη βελτίωση της εφαρμογής του μοντέλου σε διαφορετικές τοποθεσίες και για διαφορετικές εποχές και επιπλέον το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε διάφορα μελλοντικά κλιματικά σενάρια. Το AquaCrop προσαρμόζεται σε όλα τα υδατικά καθεστώτα, από την πλήρως ξηρική και ελλειμματική αρδευόμενη έως την πλήρως αρδευόμενη καλλιέργεια. Η προσομοίωση της εξέλιξης της καλλιέργειας γίνεται τόσο

σε ημερολογιακές ημέρες όσο και σε θερμοημέρες και μπορεί να συμπεριλάβει και επιδράσεις από τη θρεπτική κατάσταση και την αλατότητα του εδάφους (Steduto et al., 2009). Η πολυπλοκότητα της μαθηματικής εξήγησης των φυσιολογικών αντιδράσεων του φυτού που προκαλούνται από την υδατική καταπόνηση οδήγησε στη χρήση συναρτήσεων που στηρίχθηκαν σε εμπειρικές παρατηρήσεις. Μεταξύ των πιο σημαντικών συναρτήσεων ήταν και αυτή των Doorenbos & Kassam (1979) (εξ. 10), η οποία χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει την αντίδραση της παραγωγικότητας μιας καλλιέργειας στην έλλειψη νερού.

$$(Y_x - Y_a) / Y_x = k_y (ET_x - ET_a) / ET_x \quad (10)$$

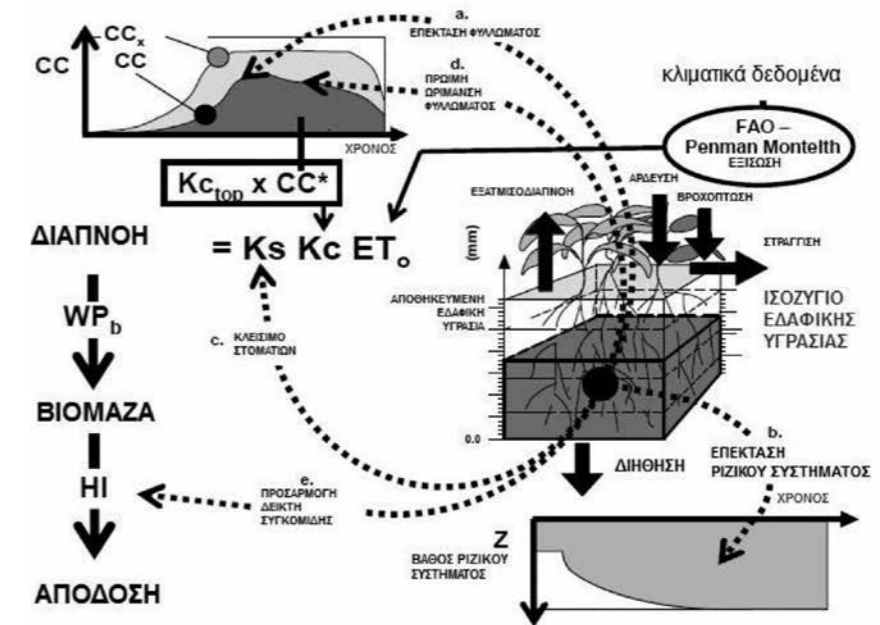
όπου Y_x και Y_a είναι η μέγιστη και η πραγματική απόδοση της καλλιέργειας αντιστοίχως, ET_x και ET_a είναι η μέγιστη και η πραγματική αναφοράς εξατμισοδιαπνοή και k_y είναι μια σταθερά που περιγράφει την αναλογία μεταξύ της σχετικής μείωσης της απόδοσης και της σχετικής μείωσης της εξατμισοδιαπνοής. Το AquaCrop εξελίχθηκε έχοντας μεν ως αφετηρία την εξ. (10), αλλά αξιοποιώντας επιπλέον: α) τον διαχωρισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_a σε εξατμισμό της εδαφικής υγρασίας E_s και στη διαπνοή του φυτού T_a και β) τον διαχωρισμό της τελικής απόδοσης (Y) σε βιομάζα (B) και δείκτη συγκομιδής (HI). Οι παραπάνω αλλαγές περιγράφονται από την εξ. (11), η οποία αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία του AquaCrop:

$$B = WP * \Sigma T_a \quad (11)$$

όπου T_a είναι η διαπνοή του φυτού σε mm και WP είναι η υδατική παραγωγικότητα, η οποία εκφράζεται σε γραμμάρια βιομάζας ανά mm νερού. Τόσο η εξ. (10) όσο και η εξ. (11) περιγράφουν την επίδραση του νερού στην τελική απόδοση μιας καλλιέργειας. Ωστόσο, η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η εξ. (10) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εποχικές ή για μεγάλης διάρκειας παρατηρήσεις, ενώ αντίθετα η εξ. (11), στην οποία βασίζεται και το μοντέλο AquaCrop, μπορεί να υπολογίσει σε καθημερινή βάση την αντίδραση του φυτού στα υδατικά ελλείμματα (Steduto, 2003). Σχηματικά η λειτουργία του μοντέλου αποτυπώνεται στο σχεδιάγραμμα της Εικ. 2.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η εξ. (11) αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίχθηκε η λειτουργία του AquaCrop. Συγκεκριμένα, η χρησιμότητά της γίνεται εμφανής όταν ενσωματωθεί σε μια ομάδα δεδομένων που μπορούν να κάνουν το μοντέλο περισσότερο λειτουργικό, αφού είναι το βασικό εργαλείο που συνδέει αυτά τα δεδομένα. Αναλυτικότερα, τα δεδομένα που αποτελούν τη δομή του AquaCrop αφορούν: i) το έδαφος και την εδαφική υγρασία, ii) το φυτό με τις φυσιολογικές του δραστηριότητες από το στάδιο του φυτρώματος μέχρι τη συγκομιδή, iii) την ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, του ύψους βροχόπτωσης, της εξατμισοδιαπνοής και της συγκέντρωσης CO_2 . Επιπλέον, λαμβάνονται υπ' όψιν και κάποιες καλλιεργητικές τεχνικές, όπως η λίπανση και η άρδευση, παράγοντες που συμβάλλουν στην ανάπτυξη και στην τελική παραγωγή μιας καλλιέργειας (Raes et al., 2009).

Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του AquaCrop



Εικόνα 2. Οι φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού που επηρεάζονται από την υδατική καταπόνηση φαίνονται με τα γράμματα a-e. K_s είναι ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης, K_c είναι ο συντελεστής ανάπτυξης του φυτού, $K_{c_{top}}$ είναι ο μέγιστος συντελεστής ανάπτυξης του φυτού, CC είναι η φυλλική επικάλυψη, CC_x είναι η μέγιστη φυλλική επικάλυψη, ET_0 είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, WP_b είναι η υδατική παραγωγικότητα βιομάζας και HI είναι ο δείκτης συγκομιδής (Raes et al., 2009).

B.4.1 Το έδαφος και η εδαφική υγρασία στο ριζόστρωμα

Το AquaCrop προσομοιάζει το ισοζύγιο του εδαφικού νερού συνυπολογίζοντας παραμέτρους που αφορούν κλίμα, έδαφος, φυτό και καλλιεργητικές τεχνικές. Το ισοζύγιο του εδαφικού νερού υπολογίζεται σε καθημερινό επίπεδο λαμβανομένων υπ' όψιν των υδατικών εισροών (αρδεύσεων, βροχοπτώσεων) και των εκροών (εξατμισοδιαπνοής, στράγγισης, διήθησης). Η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στο ριζόστρωμα εκφράζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$W_r = 1000 \cdot \theta \cdot z_r \quad (12)$$

$$D_r = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta) \cdot z_r = W_{rFC} - W_r \quad (13)$$

όπου W_r : η υδατοπεριεκτικότητα στο ριζόστρωμα εκφρασμένη σε ισοδύναμο βάθος (mm)

W_{rFC} : η υδατοπεριεκτικότητα στο ριζόστρωμα στην υδατοϊκανότητα (mm)

D_r : η εδαφική υγρασία στο ριζόστρωμα σε mm

θ : η κατ' όγκον υδατοπεριεκτικότητα στο ριζόστρωμα ($m^3 m^{-3}$)

θ_{FC} : η κατ' όγκον υδατοπεριεκτικότητα στο ριζόστρωμα στην υδατοϊκανότητα ($m^3 m^{-3}$)

z_r : το βάθος του ενεργού ριζοστρώματος (m)

Η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος και βρίσκεται μεταξύ της υδατοϊκανότητας (Field Capacity – FC) και του μόνιμου σημείου μάρανσης (Permanent Wilting Point – PWP) είναι το συνολικά διαθέσιμο νερό (Total Available Water – TAW) και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$TAW = 1000 \cdot (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \cdot z_r \quad (14)$$

όπου TAW: συνολικά διαθέσιμο νερό στο ριζόστρωμα (mm)

θ_{FC} : η κατ' όγκον υδατοπεριεκτικότητα στο ριζόστρωμα στην υδατοϊκανότητα ($m^3 m^{-3}$)

θ_{PWP} : η κατ' όγκον υδατοπεριεκτικότητα στο ριζόστρωμα στο σημείο μόνιμης μάρανσης ($m^3 m^{-3}$)

z_r : το βάθος του ενεργού ριζοστρώματος (m)

Τέλος το AquaCrop αντιμετωπίζει το έδαφος ως ένα σύστημα με μεταβλητό βάθος, το οποίο μπορεί να αποτελείται από στρώματα διαφορετικής σύνθεσης. Ως σύστημα αναφοράς το πρόγραμμα θέτει την εδαφική κατάταξη που ορίζει το Υπουργείο Γεωργίας των ΗΠΑ (USDA), δίνοντας όμως τη δυνατότητα στον διαχειριστή να εισαγάγει και τα δικά του δεδομένα. Ανάλογα με το εδαφικό προφίλ που επιλέγει ο χρήστης, προσδιορίζονται και κάποια υδραυλικά χαρακτηριστικά, όπως ο συντελεστής στράγγισης (drainage coefficient) (T), η υδραυλική αγωγιμότητα στο σημείο κορεσμού (k_{sat}), η υδατοπεριεκτικότητα κατά τον κορεσμό (θ_{sat}), η υδατοϊκανότητα (θ_{FC}) και το σημείο μόνιμης μάρανσης (θ_{WP}).

B.4.2 Η φυσιολογία του φυτού από το φύτευμα μέχρι τη συγκομιδή

Η προσομοίωση της ανάπτυξης του φυτού στο AquaCrop εδράζεται στις βασικές αρχές της φωτοσύνθεσης. Μέσω της φωτοσύνθεσης και της διαπνοής παράγεται βιομάζα. Η αθροιστική επιφανειακή παραγωγή βιομάζας (B) εκφράζεται ως μια συνάρτηση που συνδέει τον καθημερινό ρυθμό διαπνοής του φυτού (T_r) και καθορίζεται από τη φυλλική επικάλυψη (CC) και την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o):

$$B = WP \cdot \sum_{t=1}^n (T_{r_i} / ET_{o,i}) \quad (15)$$

$$Y = HI \cdot B \quad (16)$$

όπου B: αθροιστική επιφανειακή παραγωγή βιομάζας ($g m^{-2}$)

WP: υδατική παραγωγικότητα του φυτού, προσαρμοσμένη στην ET_o και στη συγκέντρωση CO_2 ($g m^{-2}$)

T_{r_i} : συνολική διαπνοή του φυτού ανά ημέρα ($mm day^{-1}$)

$ET_{o,i}$: εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ανά ημέρα ($mm day^{-1}$)

n: αριθμός ημερών που απαιτούνται για να παραχθεί η βιομάζα

Y: απόδοση ($g m^{-2}$)

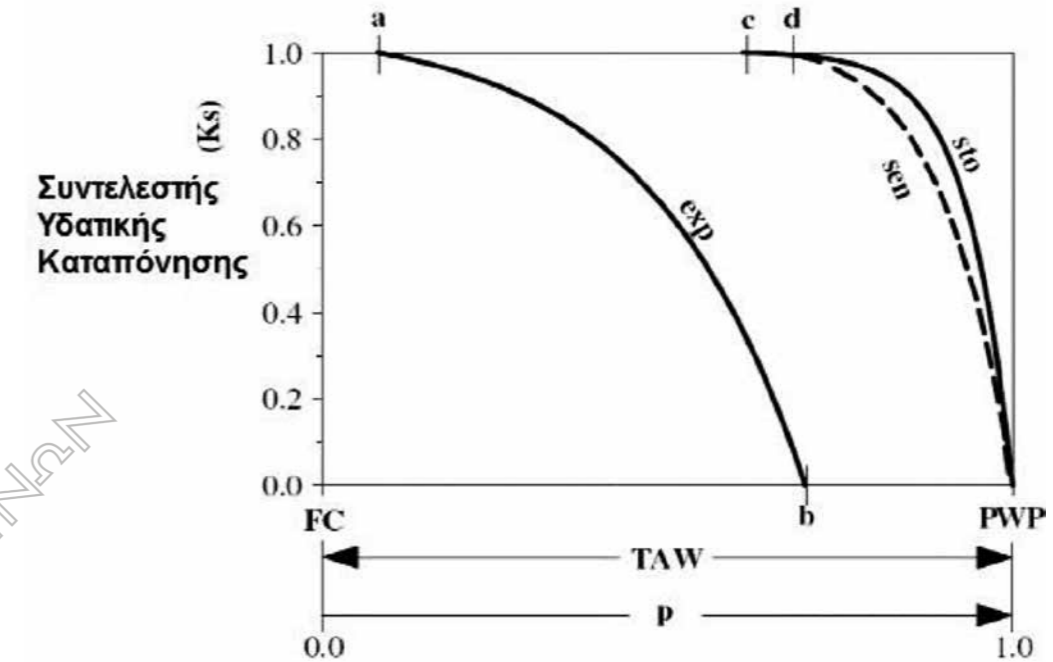
HI: δείκτης συγκομιδής

Η WP αναφέρεται στην αναλογία παραγόμενης βιομάζας και νερού που καταναλώθηκε κατά την εξατμισοδιαπνοή ($kg m^{-3}$). Για να προσο-

μοιώσει τη βιομάζα ενός φυτού σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό μέρος το AquaCrop χρησιμοποιεί τον συντελεστή αυτόν, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στο τοπικό κλίμα (μέσω της εξατμισοδιαπνοής) και στη συγκέντρωση CO₂ (εξ. 15) (Steduto et al., 2009). Η προσομοίωση της απόδοσης (Υ) εκφράζεται με τη βοήθεια του δείκτη συγκομιδής (HI), ο οποίος επηρεάζεται από την ύπαρξη υδατικής καταπόνησης. Η τελική απόδοση υπολογίζεται ως γινόμενο της τελικής βιομάζας Β και του προσαρμοσμένου στην καλλιέργεια δείκτη συγκομιδής (εξ. 16).

B.4.3 Η ανάπτυξη του φυτού υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης

Το νερό που έχει αποθηκευτεί στο έδαφος χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του υπέργειου τμήματος του φυτού και του ριζικού συστήματος και, επομένως, επηρεάζει αποφασιστικά την τελική απόδοση. Και τα τρία αυτά αγρονομικά χαρακτηριστικά επηρεάζονται αρνητικά εφόσον επικρατούν συνθήκες υδατικού ελλείμματος. Η αντίδραση του φυτού στην υδατική καταπόνηση έχει ως συνέπεια τρεις μεγάλες αλλαγές, οι οποίες είναι η μείωση του ρυθμού αύξησης του φυλλώματος, το κλείσιμο των στοματίων και η αύξηση του ρυθμού γήρανσης του φυλλώματος. Αυτό συμβαίνει όταν η ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένο στο έδαφος πέσει κάτω από συγκεκριμένα κρίσιμα σημεία. Αυτά τα σημεία (p) εκφράζονται ως κλάσμα του συνολικού διαθέσιμου νερού του εδάφους (TAW) και διακρίνονται σε μέγιστο κρίσιμο σημείο (p_{upper}), μετά το οποίο ξεκινά το φαινόμενο της ανασχεσης, και ελάχιστο κρίσιμο σημείο (p_{low}), κάτω από το οποίο σταματά εντελώς η ανάπτυξη του φυτού. Ανάλογα με το επίπεδο της υδατικής καταπόνησης, η τιμή του συντελεστή υδατικής καταπόνησης (Ks) κυμαίνεται από 0 έως 1. Όσο το κρίσιμο σημείο p προσεγγίζει το μόνιμο σημείο μάρανσης (PWP = 1), τόσο ο συντελεστής υδατικής καταπόνησης Ks προσεγγίζει το 0. Με αυτή τη λογική, το Ks μπορεί να επιμεριστεί στις φυσιολογικές διαδικασίες που επηρεάζονται από την υδατική καταπόνηση, δηλαδή στην αύξηση του φυλλώματος (Ks_{exp}), στο κλείσιμο των στοματίων (Ks_{sto}) και στην πρόωμη γήρανση του φυλλώματος (Ks_{sen}). Στην Εικ. 3 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι πορείες των επιμέρους Ks σε διάφορους βαθμούς έντασης της υδατικής καταπόνησης (Steduto et al., 2009).



Εικόνα 3. Η πορεία των συντελεστών υδατικής καταπόνησης (Ks) σε σχέση με την ανάπτυξη των φύλλων (exp), την αγωγιμότητα των στοματίων (sto) και τη γήρανση των φύλλων (sen) συναρτήσει της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας (TAW, p) (Steduto et al., 2009).

Κάτω από ιδανικές συνθήκες (χωρίς υδατική καταπόνηση και έλλειψη θρεπτικών στοιχείων), η φυλλική επιφάνεια σχηματίζεται κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης της φυτείας, φθάνοντας στο μέγιστο (CC_x) και παραμένοντας εκεί μέχρι το στάδιο που ξεκινά η γήρανση των φύλλων. Οι ρυθμοί με τους οποίους αυξάνεται και μειώνεται η φυλλική επιφάνεια εκφράζονται αντιστοίχως από τον συντελεστή αύξησης φυλλώματος (Canopy Growth Coefficient – CGC) και τον συντελεστή μείωσης φυλλώματος (Canopy Decline Coefficient – CDC).

B.4.4 Χρήση δεδομένων που αφορούν την ατμόσφαιρα

Τα κλιματικά δεδομένα που συλλέγονται και χρησιμοποιούνται στη λειτουργία του προτύπου σε ημερήσια βάση είναι τα κάτωθι:

Α) Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρος (T_{max} και T_{min}), οι τιμές των οποίων χρησιμεύουν στον υπολογισμό βαθμοημερών που καθορίζουν

την ανάπτυξη και τη φαινολογία της καλλιέργειας, όπως επίσης και τις διορθώσεις στην παραγωγή βιομάζας κατά τις καταστροφικές περιόδους με χαμηλές θερμοκρασίες. Σε περίπτωση απουσίας καθημερινών τιμών, το πρόγραμμα μπορεί να δεχθεί τιμές δεκαήμερου ή μηνιαίες, τις οποίες στη συνέχεια ανάγει σε ημερήσια βάση.

Β) Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0), που προσδιορίζεται μέσω της διαδικασίας η οποία περιγράφεται από τους Allen et al. (1998), σύμφωνα με την εξίσωση Penman – Monteith. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι: μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (C°), ατμοσφαιρική υγρασία (%), ταχύτητα ανέμου ($m s^{-1}$) σε ύψος 2 m από το έδαφος, ώρες ηλιοφάνειας ή ένταση ακτινοβολίας ($W m^{-2}$), γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να έχουν καθημερινή συχνότητα ή εναλλακτικά τιμές δεκαήμερου ή μηνιαίες. Η επεξεργασία των προαναφερθέντων δεδομένων γίνεται με τη χρήση του λογισμικού ET_0 Calculator (v. 3.2, FAO 2012).

Γ) Βροχόπτωση, η τιμή της οποίας μπορεί να προκύψει από την ποσότητα νερού που συλλέγεται σε βροχόμετρα στον αγρό ή από τις καταγεγραμμένες τιμές από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Σε περίπτωση έλλειψης καθημερινών τιμών, το πρόγραμμα μπορεί να δεχθεί τιμές δεκαήμερου ή μηνιαίες.

Δ) Μέση ετήσια συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), εκπεφρασμένη σε μέρη στο εκατομμύριο (ppm). Ως τιμή αναφοράς για το πρόγραμμα θεωρείται η συγκέντρωση 369,47 ppm, η οποία μετρήθηκε το έτος 2000 από το σταθμό Mauna Loa της Χαβάης. Η τιμή της συγκέντρωσης CO_2 θεωρείται η ίδια για όλο τον πλανήτη.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για τις παραπάνω μεταβλητές προέκυπταν από την υποκλιμάκωση των κλιματικών μοντέλων στις προσδιορισμένες περιοχές έρευνας (βλ. παραπάνω υποκεφ. Β.2) και υφίσταντο επεξεργασία σε ηλεκτρονικά αρχεία με την απαιτούμενη μορφή χρήσης από τα λογισμικά προγράμματα ET_0 Calculator και AquaCrop.

B.4.5 Δεδομένα που αφορούν τους καλλιεργητικούς χειρισμούς

Τα δεδομένα που αφορούν καλλιεργητικούς χειρισμούς χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: αυτά που αφορούν γενικότερους χειρισμούς και αυτά

που έχουν να κάνουν ειδικότερα με τη διαχείριση του νερού. Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, αυτή επικεντρώνεται περισσότερο στη θρεπτική κατάσταση της καλλιέργειας ή στις παρεμβάσεις λίπανσης που θα γίνουν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επίσης μπορεί να αφορά και άλλα στοιχεία, όπως την κάλυψη του εδάφους με φυτικά υπολείμματα (επιστρώματα) για τη μείωση της εξάτμισης νερού από το έδαφος ή τη δημιουργία αναχωμάτων για την αποφυγή της υδατικής απορροής. Η δεύτερη κατηγορία αφορά ειδικά τη διαχείριση του νερού και, πιο συγκεκριμένα, το αν η καλλιέργεια είναι αρδευόμενη ή όχι, και, εφόσον είναι αρδευόμενη, την ποσότητα, τον τρόπο και το βάθος άρδευσης.

Για την ορθή λειτουργία του μοντέλου, πρέπει να δοθούν στοιχεία για τις εξής παραμέτρους:

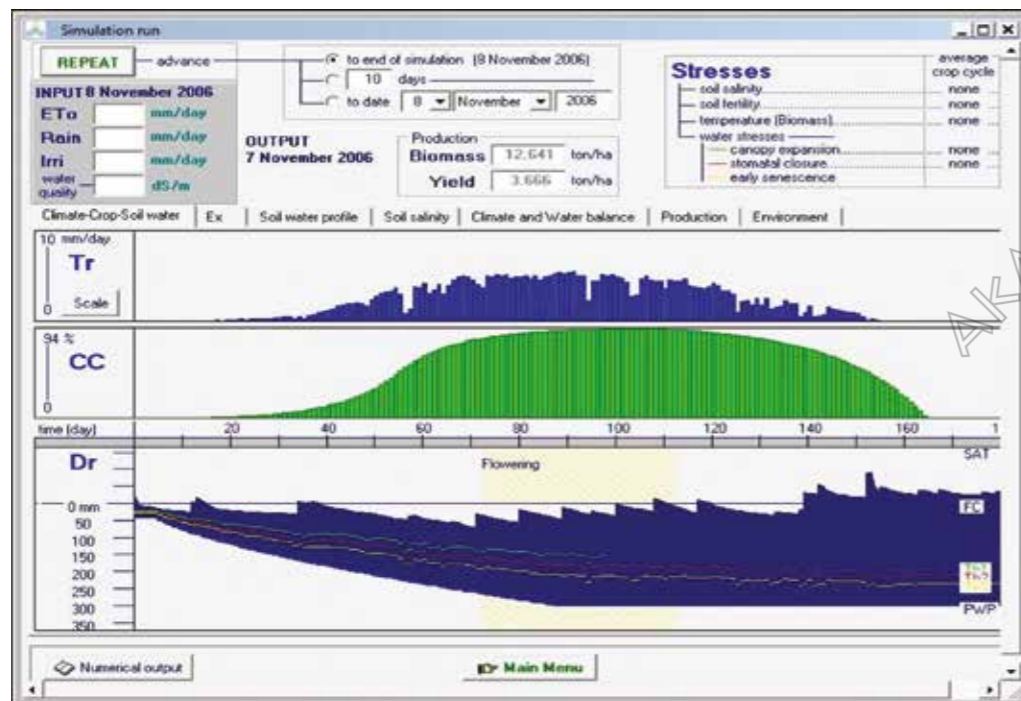
- τον αριθμό φυτών ανά εκτάριο
- τον χρόνο έως τη μέγιστη φυλλική επικάλυψη
- την αρχική φυλλική επικάλυψη (CC_0)
- τη μέγιστη φυλλική επικάλυψη (CC_x)
- τον συντελεστή ανάπτυξης φυλλώματος
- τον συντελεστή μείωσης φυλλώματος
- τον χρόνο έναρξης γήρανσης
- τον χρόνο έναρξης άνθησης
- τη διάρκεια περιόδου άνθησης
- τον χρόνο από τη σπορά έως το φύτευμα
- τον χρόνο από τη σπορά έως την ωρίμανση
- το βάθος μέγιστου ενεργού ριζοστρώματος
- τον χρόνο από τη σπορά έως το μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος
- την τιμή αναφοράς δείκτη συγκομιδής
- τη ρυθμισμένη υδατική παραγωγικότητα
- το είδος υδατικής διαχείρισης
- την ποσότητα νερού άρδευσης
- τις ημερομηνίες εφαρμογής αρδεύσεων
- τους συντελεστές επέκτασης επικάλυψης φυλλώματος
- τον συντελεστή κλεισίματος στοματίων
- τον συντελεστή πρώιμης γήρανσης επικάλυψης φυλλώματος
- τους συντελεστές εδαφικής αλατότητας



ΚΑΔΗΜΙΑ

B.4.6 Εξαγόμενα αποτελέσματα

Αφού εισαχθούν τα ανωτέρω δεδομένα και σχηματιστούν οι σωστοί φακέλοι οι οποίοι αποτυπώνουν τα προαναφερθέντα σύνθετα συστήματα του κλίματος (climate), της καλλιέργειας (crop), των καλλιεργητικών χειρισμών (management) και του εδάφους (soil), το πρότυπο είναι πλέον έτοιμο να δώσει ως εξαγόμενα αποτελέσματα την απόδοση (yield) και τη βιομάζα (biomass) σε τόνους / εκτάριο, καθώς και την εκτιμώμενη ημερομηνία συγκομιδής. Επιπλέον παρουσιάζεται μια αναλυτική εικόνα της πορείας της διαπνοής (T_r), της φυλλικής επικάλυψης (CC) και της εδαφικής υγρασίας του ριζοστρώματος (D_r) στη διάρκεια του βιολογικού κύκλου της καλλιέργειας (Εικ. 4). Υπάρχει, επίσης, δυνατότητα να αποτυπωθούν στην πορεία της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας οι αντίστοιχες πορείες όταν η έλλειψη νερού στο ριζόστρωμα οδηγεί σε μείωση κάτω από το όριο για την ανάπτυξη του φυλλώματος, στην έναρξη του κλεισίματος των στοματιών και στη γήρανση του φυλλώματος αντίστοιχα.



Εικόνα 4. Το γραφιστικό περιβάλλον του προτύπου AquaCrop σχετικά με τα εξαγόμενα αποτελέσματα καλλιέργειας βαμβακιού υπό συνθήκες πλήρους άρδευσης.

B.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

B.5.1 Σε επίπεδο περιοχής μελέτης

Η εκτίμηση της παραγωγής των καλλιεργειών ανά περιοχή μελέτης (τετράγωνα επιφάνειας 12100 ha) προκύπτει ως το γινόμενο της απόδοσης επί την καλλιεργούμενη επιφάνεια.

Με δεδομένο ότι σε κάθε περιοχή μελέτης υπήρχαν γαίες με διαφορετικό βάθος εδάφους, οι αποδόσεις ανά καλλιέργεια υπολογίστηκαν με βάση το εκάστοτε βάθος ανά εδαφική μονάδα, όπως αυτό προέκυπτε από τους αντίστοιχους εδαφολογικούς χάρτες. Για διευκόλυνση των υπολογισμών, τα εδάφη ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες, βαθιά, μέτριου βάθους και αβαθή (βλ. και Πίν. 9 παρακάτω), και οι αποδόσεις διαφοροποιήθηκαν ανάλογα με το αντίστοιχο εκάστοτε μέγιστο βάθος ριζοστρώματος (Y_1 , Y_2 , Y_3 για τα βαθιά, μέτριου βάθους και αβαθή εδάφη αντίστοιχως).

Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η παραγωγή στο σύνολο της επιφάνειας κάθε κατηγορίας εδάφους. Αυτή προέκυψε ως το γινόμενο της απόδοσης επί τη συνολική επιφάνεια που καταλάμβανε κάθε κατηγορία εδάφους (A_1 , A_2 , A_3 για τα βαθιά, μέτριου βάθους και αβαθή εδάφη αντίστοιχως). Έτσι, για κάθε καλλιέργεια υπολογιζόταν αρχικά συνολική παραγωγή (P) για όλη την επιφάνεια μελέτης, που προέκυπτε ως το άθροισμα των επιμέρους παραγωγών ($Y_1 \cdot A_1$, $Y_2 \cdot A_2$, $Y_3 \cdot A_3$) για τις αντίστοιχες επιφάνειες εδαφών με διαφορετικά βάθη.

Για μία ρεαλιστική προσέγγιση της επιφάνειας που καταλαμβάνει η κάθε καλλιέργεια στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές βαρύτητας (κ_σ , κ_α , κ_β για το σιτάρι, τον αραβόσιτο και το βαμβάκι αντίστοιχως), οι οποίοι προέκυπταν από τα ποσοστά καλλιεργούμενων εκτάσεων που καταλάμβανε η κάθε καλλιέργεια επί του συνόλου των καλλιεργειών σε επίπεδο νομού. Τα στοιχεία αυτά ελήφθησαν από τα δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ των ετών 2014-2018.

Έτσι, η παραγωγή ανά καλλιέργεια σε επίπεδο περιοχής μελέτης για καθεμία από τις τρεις καλλιέργειες (P_v) δίνεται από τον τύπο:

$$P_v = (Y_1 \cdot A_1 + Y_2 \cdot A_2 + Y_3 \cdot A_3) \cdot \kappa_v \quad (17)$$

όπου κ_v ο συντελεστής βαρύτητας για κάθε καλλιέργεια.

Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται ο υπολογισμός της παραγωγής σε εδάφη που προβλέπεται να μειωθεί το βάθος τους λόγω μηχανικής και υδατικής διάβρωσης.

Β.5.2 Σε επίπεδο περιφέρειας

Ο εδαφολογικός χάρτης της Θεσσαλίας (ΟΠΕΚΕΠΕ, 2014) παρέχει τη δυνατότητα ομαδοποίησης των εδαφών της περιφέρειας ανά βάθος εδάφους. Έτσι, οι εκτάσεις των γαιών ταξινομήθηκαν σε τρεις ομάδες: < 45 cm, 45-100 cm και > 100 cm. Ακολούθως έγινε αναγωγή των εκτάσεων του εδαφολογικού χάρτη στα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ του 2018 και καταμερισμός της συνολικής καλλιεργούμενης έκτασης ανά καλλιέργεια με συντελεστές βαρύτητας, ανάλογα με τον καταμερισμό που δίνουν τα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ. Για τον υπολογισμό της παραγωγής χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των αποδόσεων της κάθε καλλιέργειας, με βάση τις αποδόσεις που υπολογίστηκαν για κάθε περιοχή μελέτης.

Για τον υπολογισμό της παραγωγής ακολουθήθηκε διαδικασία ανάλογη με εκείνη που εκτέθηκε στο Β.5.1 παραπάνω για την περιφέρεια στο σύνολό της.

Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Γ.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΣΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΥΤΟ παρατίθενται τα κλιματικά στοιχεία ως μέσοι όροι των περιόδων 2041-2060 και 2081-2100, όπως προκύπτουν από τη χρήση του περιοχικού μοντέλου RCA4 για τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5. Το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει δεδομένα των κύριων μετεωρολογικών παραμέτρων σε ημερήσια βάση έως το τέλος του 2100. Τα δεδομένα που θα παρουσιαστούν αφορούν τις παραμέτρους εκείνες που επηρεάζουν αποφασιστικά τη φυτική παραγωγή και χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του AquaCrop, δηλαδή τις ημερήσιες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα, το ύψος βροχής και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Τα δεδομένα αυτά θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα της ιστορικής περιόδου αναφοράς 1981-2000. Για την περίοδο αυτή θα χρησιμοποιηθούν τόσο τα στοιχεία της ΕΜΥ για τους σταθμούς Λάρισας (περιοχές Σωτηρίου και Ζαπτείου) και Τρικάλων, όσο και στοιχεία υπολογισμένα από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Γ.1.1 Θερμοκρασία του αέρα

Γ.1.1.1 Σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΜΥ

Στην Εικ. 5 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία του αέρα για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5:



Εικόνα 5. Οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{max}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Από τα δεδομένα προκύπτει ότι στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται να υπάρξει αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 1,75, 2,44 και 3,37°C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2081-2100 οι αυξήσεις προβλέπεται να είναι 1,96, 2,63 και 3,64 °C για το Σωτήριο, το Ζάππειο και τα Τρίκαλα.

Στην Εικ. 6 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ευρήματα για το σενάριο RCP8.5:



Εικόνα 6. Οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{max}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Φαίνεται ότι στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται να υπάρξει αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 2,39, 3,09 και 3,99°C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2081-2100 οι αυξήσεις προβλέπεται να είναι 5,01, 5,80 και 6,82°C για το Σωτήριο, το Ζάππειο και τα Τρίκαλα.

Τα ευρήματα για τις μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5 παρουσιάζονται στην Εικ. 7:



Εικόνα 7. Οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{min}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Προκύπτει ότι στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται να υπάρξει αύξηση στην ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 1,11 και 1,67 στο Σωτήριο και στο Ζάππειο αντιστοίχως, και ελάττωση κατά 0,25°C στα Τρίκαλα. Για την περίοδο 2081-2100 οι αυξήσεις προβλέπονται να είναι 1,34, 1,88 και 0,02 °C για το Σωτήριο, το Ζάππειο και τα Τρίκαλα, αντιστοίχως.

Στην Εικ. 8 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ευρήματα για το σενάριο RCP8.5:



Εικόνα 8. Οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{min}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Οι προβλέψεις δείχνουν ότι στην εικοσαετία 2041-2060 θα υπάρξει αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 1,76, 2,30 και 0,38°C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, κατ' αντιστοιχία. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες αυξήσεις προβλέπονται να είναι 4,32, 4,88 και 3,02°C.

Γ.1.1.2 Σύγκριση με τα δεδομένα του μετεωρολογικού μοντέλου

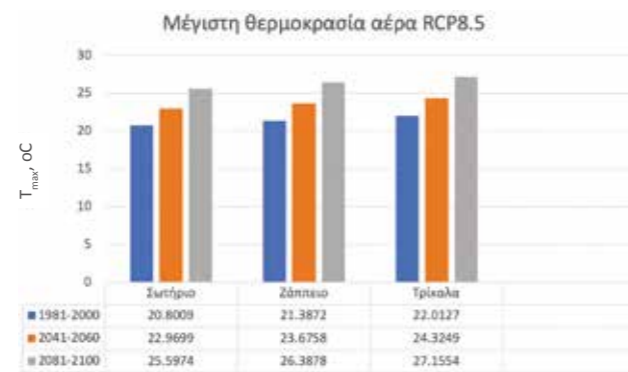
Στην Εικ. 9 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία του αέρα για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5.

Φαίνεται ότι στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται να υπάρξει αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 1,53, 1,63 και 1,69°C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2018-2100 οι αντίστοιχες αυξήσεις προβλέπεται να είναι 1,75, 1,83 και 1,96 °C.



Εικόνα 9. Οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{max}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Στην Εικ. 10 παρουσιάζονται τα ευρήματα για το σενάριο RCP8.5:



Εικόνα 10. Οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{max}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται να υπάρξει αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 2,17, 2,29 και 2,31 °C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, κατ' αντιστοιχία. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες αυξήσεις προβλέπονται να είναι 4,80, 5,00 και 5,14 °C.

Τα ευρήματα για τις μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5 παρουσιάζονται στην Εικ. 11:



Εικόνα 11. Οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{min}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Προκύπτει ότι στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται να υπάρξει αύξηση στην ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 1,57, 1,58 και 1,66 °C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, κατ' αντιστοιχία. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες αυξήσεις προβλέπεται να είναι 1,80, 1,79 και 1,93 °C.

Στην Εικ. 12 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ευρήματα για το σενάριο RCP8.5:



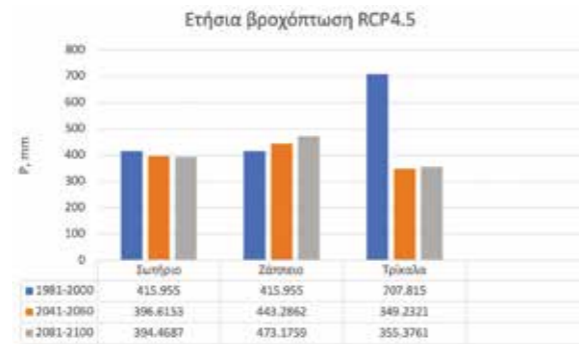
Εικόνα 12. Οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες του αέρα (T_{min}) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Οι προβλέψεις δείχνουν ότι στην εικοσαετία 2041-2060 θα υπάρξει αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα κατά 2,22, 2,22 και 2,30 °C στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες αυξήσεις προβλέπεται να είναι 4,79, 4,79 και 4,93 °C.

Γ.1.2 Βροχόπτωση

Γ.1.2.1 Σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΜΥ

Στην Εικ. 13 παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη μέση ετήσια βροχόπτωση για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5:



Εικόνα 13. Η μέση ετήσια βροχόπτωση (P) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Για την περίοδο 2041-2060 παρατηρείται μικρή μείωση στη βροχόπτωση κατά 19,34 mm (4,65%) στο Σωτήριο και μεγάλη μείωση στα Τρίκαλα (358,58 mm ή 50,66%). Αντίθετα, στο Ζάππειο παρατηρείται αύξηση 27,33 mm (6,57%). Για την περίοδο 2081-2100 παρατηρείται στο Σωτήριο μείωση κατά 21,49 mm (5,17%) και στα Τρίκαλα κατά 352,44 mm (49,79%). Στο Ζάππειο παρατηρείται αύξηση κατά 57,22 mm (13,76%).

Στην Εικ. 14 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5:

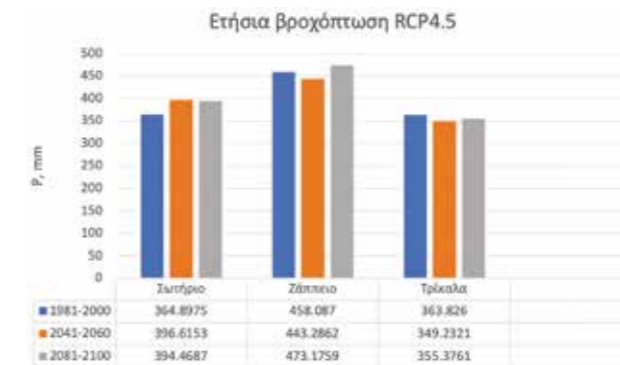


Εικόνα 14. Η μέση ετήσια βροχόπτωση (P) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Για το σενάριο RCP8.5 προβλέπονται μειώσεις και στις τρεις περιοχές. Συγκεκριμένα, για την περίοδο 2041-2060 προβλέπονται μειώσεις κατά 72,31 mm (17,38%), 20,06 mm (4,82%) και 383,65 mm (54,20%) στο Σωτήριο, στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα, αντιστοίχως. Οι αντίστοιχες μειώσεις για τις τρεις περιοχές για την περίοδο 2081-2100 είναι 120,79 mm (29,04%), 80,06 mm (19,25%) και 459,17 mm (64,87%).

Γ.1.2.2 Σύγκριση με τα δεδομένα του μετεωρολογικού μοντέλου

Στην Εικ. 15 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5:



Εικόνα 15. Η μέση ετήσια βροχόπτωση (P) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Για την περίοδο 2041-2060 προβλέπεται για το Σωτήριο αύξηση κατά 31,72 mm (8,69%). Αντίθετα, για το Ζάππειο και τα Τρίκαλα προβλέπονται μειώσεις κατά 14,80 mm (3,23%) και 14,59 mm (4,01%) αντιστοίχως. Για την εικοσαετία 2081-2100 προβλέπονται αυξήσεις κατά 29,57 mm (8,1%) στο Σωτήριο και κατά 15,09 mm (3,29%) στο Ζάππειο και μείωση κατά 8,45 mm (2,32%) για τα Τρίκαλα.

Στην Εικ. 16 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5:



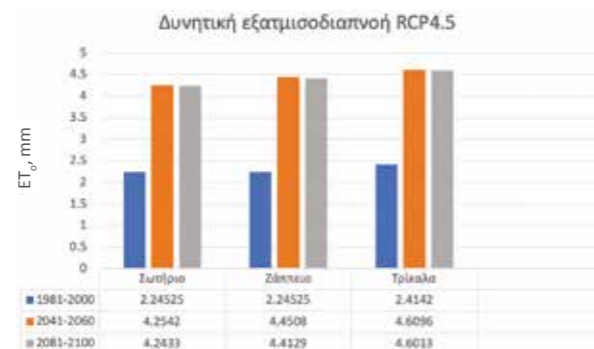
Εικόνα 16. Η μέση ετήσια βροχόπτωση (P) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Τα στοιχεία δείχνουν σαφή μείωση στη βροχόπτωση σε όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, για την περίοδο 2041-2060 προβλέπεται μείωση κατά 21,25 mm (5,82%), 62,19 mm (13,58%) και 39,66 mm (10,90%) για το Σωτήριο, το Ζάππειο και τα Τρίκαλα, κατ' αντιστοιχία. Οι αντίστοιχες μειώσεις για την περίοδο 2081-2100 είναι 69,73 mm (19,11%), 122,19 mm (26,67) και 115,19 mm (31,66%).

Γ.1.3 Δυνητική εξατμισοδιαπνοή

Γ.1.3.1 Σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΜΥ

Στην Εικ. 17 παρουσιάζονται τα δεδομένα της μέσης ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε ετήσια βάση για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5:



Εικόνα 17. Η μέση ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ετήσια βάση (ET_p , mm H_2O) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Προβλέπεται και για τις τρεις περιοχές σημαντική αύξηση της ET_p στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 συγκριτικά με την ιστορική περίοδο αναφοράς. Για την περίοδο 2041-2060 η αύξηση ανέρχεται σε 2,01, 2,21 και 2,20 mm H_2O για το Σωτήριο, το Ζάππειο και τα Τρίκαλα, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες διαφορές είναι 2,00, 2,17 και 2,19 mm H_2O . Γενικά οι τιμές των περιόδων 2041-2060 και 2081-2100 κυμαίνονταν στα ίδια επίπεδα.

Τα δεδομένα της μέσης ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε ετήσια βάση για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5 παρουσιάζονται στην Εικ. 18.

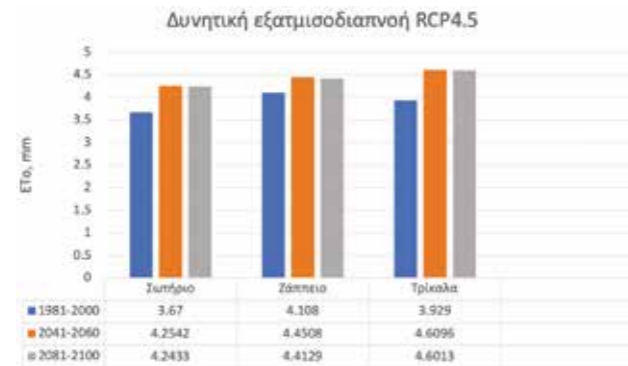
Και στην περίπτωση αυτή προβλέπεται και για τις τρεις περιοχές σημαντική αύξηση της ET_p στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 συγκριτικά με την ιστορική περίοδο αναφοράς. Για την περίοδο 2041-2060 παρατηρείται διαφορά 2,10, 2,33 και 2,32 mm H_2O στις περιοχές Σωτηρίου, Ζαππείου και Τρικάλων, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες διαφορές ανέρχονται σε 2,64, 2,90 και 2,84 mm H_2O .



Εικόνα 18. Η μέση ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ετήσια βάση (ET_p , mm H_2O) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από στοιχεία της ΕΜΥ.

Γ.1.3.2 Σύγκριση με τα δεδομένα του μετεωρολογικού μοντέλου

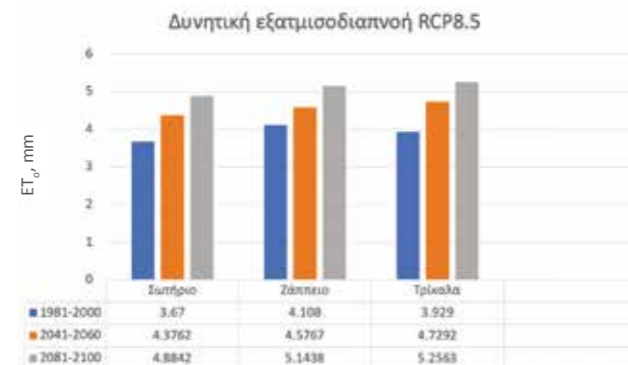
Τα δεδομένα της μέσης ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε ετήσια βάση για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5 παρουσιάζονται στην Εικ. 19:



Εικόνα 19. Η μέση ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ετήσια βάση (ET_0 , mm H_2O) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP4.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Και για τις τρεις περιοχές προβλέπεται αύξηση της ET_0 στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 συγκριτικά με την ιστορική περίοδο αναφοράς. Για την περίοδο 2041-2060 η αύξηση ανέρχεται σε 0,58, 0,34 και 0,68 mm H_2O για το Σωτήριο, το Ζάππειο και τα Τρίκαλα, κατ' αντιστοιχία. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες διαφορές είναι 0,57, 0,30 και 0,67 mm H_2O . Γενικά οι τιμές των περιόδων 2041-2060 και 2081-2100 κυμαίνονταν στα ίδια επίπεδα.

Στην Εικ. 20 παρουσιάζονται οι προβλέψεις της μέσης ημερήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε ετήσια βάση για τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5:



Εικόνα 20. Η μέση ημερήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε ετήσια βάση (ET_0 , mm H_2O) για τις τρεις περιόδους για το σενάριο εκπομπής RCP8.5. Τα δεδομένα για την περίοδο 1981-2000 προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο.

Προβλέπεται και για τις τρεις περιοχές σαφής αύξηση της ET_0 στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 συγκριτικά με την ιστορική περίοδο αναφοράς. Για την περίοδο 2041-2060 παρατηρείται διαφορά 0,71, 0,47 και 0,80 mm H_2O στις περιοχές Σωτηρίου, Ζαππείου και Τρικάλων, αντιστοίχως. Για την περίοδο 2081-2100 οι αντίστοιχες διαφορές είναι υψηλότερες και ανέρχονται σε 1,21, 1,04 και 1,33 mm H_2O .

Γ.1.4 Συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα

Στον Πίν. 8 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του CO_2 , όπως προκύπτουν από τα σενάρια εκπομπής RCP4.5 και RCP8.5. Για την περίοδο αναφοράς, τα στοιχεία έχουν ληφθεί από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO). Σε όλες τις περιπτώσεις, τα στοιχεία είναι ενσωματωμένα ως εξ αρχής (by default) παράμετροι στο μοντέλο προσομοίωσης AquaCrop για τον υπολογισμό των αποδόσεων των καλλιεργειών.

Πίνακας 8. Οι συγκεντρώσεις του CO_2 (ppm) κατά την περίοδο αναφοράς (1981-2000) και οι προβλεπόμενες μέσες τιμές για τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 από τα σενάρια εκπομπής RCP4.5 και RCP8.5.

1981-2000	Σενάριο εκπομπής	2041-2060	2081-2100
353,60	RCP4.5	487,2	534,2
	RCP8.5	545,4	850,1

Γ.2 ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Γ.2.1 Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης

Γ.2.1.1 Περιοχή Σωτηρίου

Στην Εικ. 21 παρουσιάζονται οι χάρτες με τις τιμές του δείκτη ESA_i στις διάφορες χαρτογραφικές μονάδες της υπό εξέταση περιοχής του Σωτηρίου για τις περιόδους 1981-2000 (αναφοράς), 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5:

Στην ιστορική περίοδο αναφοράς όλες οι εδαφικές μονάδες της περιοχής χαρακτηρίζονται κατά ποσοστό 84% ως ευαίσθητες (υποκλάσεις F1-F3) και σε μικρά ποσοστά (16%) ως εξαιρετικά ευάλωτες (κρίσιμες) στην ερημοποίηση (υποκλάσεις C1-C2). Στην περίοδο 2041-2060 οι εδαφικές μονάδες που είχαν αρχικά χαρακτηριστεί C1 έχουν υποβαθμιστεί στην υποκλάση C2, ενώ ένα μικρό μέρος των εδαφών της υποκλάσης F1 έχει υποβαθμιστεί στην υποκλάση F2. Συνολικά, έχει αυξηθεί το ποσοστό των εδαφών που εντάσσονται στην κρίσιμη κατηγορία C2 σε 16% (συγκριτικά με 4% στην περίοδο αναφοράς), καθώς και αυτών που χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητα στην ερημοποίηση (υποκλάση F2) σε 64% από 57% στην περίοδο αναφοράς. Στην περίοδο 2081-2100 δεν παρατηρείται διαφοροποίηση σε σχέση με την περίοδο 2041-2060.

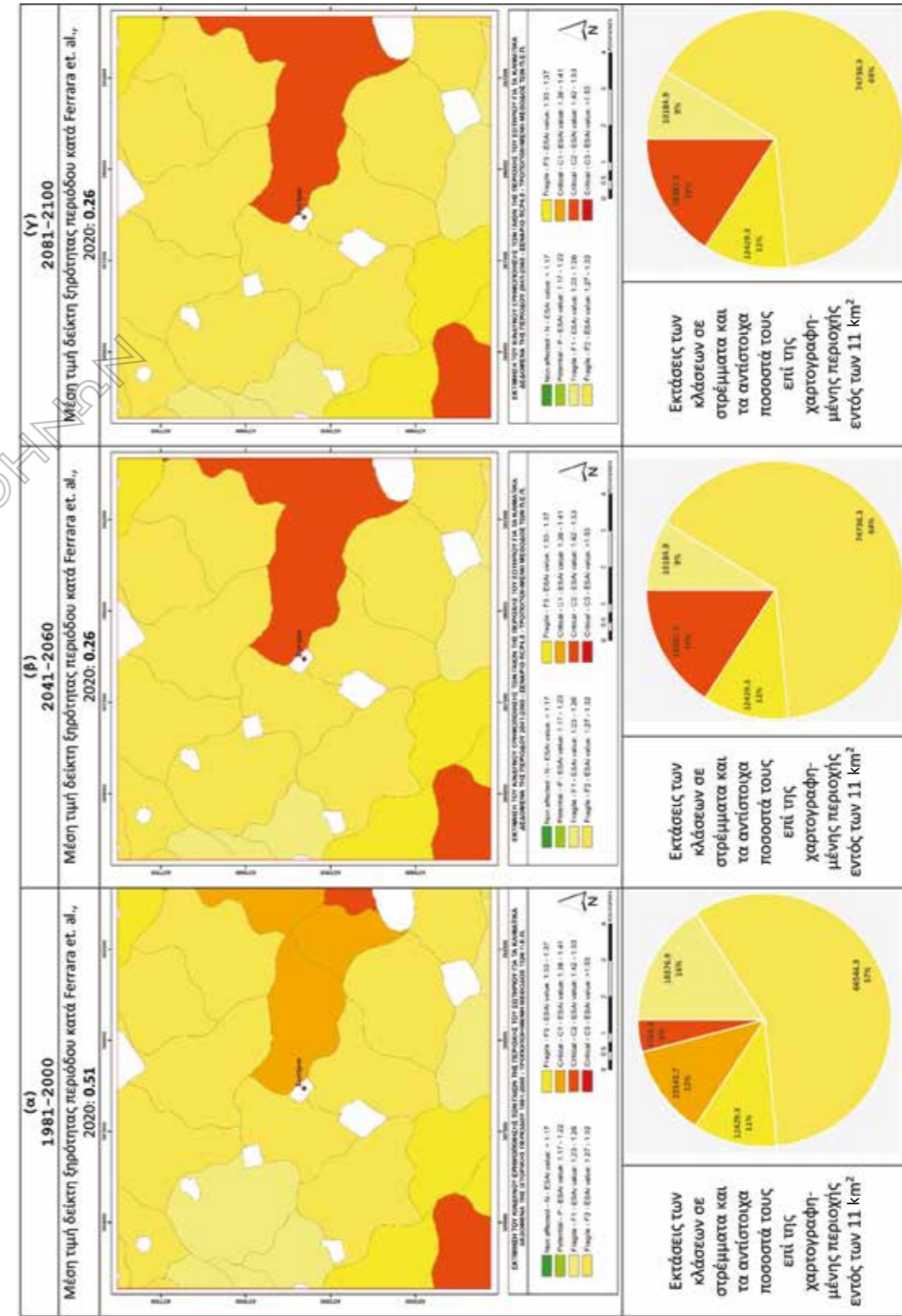
Στην Εικ. 22 παρουσιάζονται οι χάρτες με τις τιμές του δείκτη ESAI στις διάφορες χαρτογραφικές μονάδες του Σωτηρίου για τις περιόδους 1981-2000 (αναφοράς), 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5.

Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπεται υποβάθμιση εδαφικών μονάδων από την υποκλάση C1 σε C2, από F2 σε F3 και από F3 σε C1. Συνολικά έχει αυξηθεί το ποσοστό των εδαφών που εντάσσονται στην κρίσιμη κατηγορία C2 σε 16% από 4% στην περίοδο αναφοράς και το ποσοστό της ευάλωτης κατηγορίας F3 σε 29% συγκριτικά με 11% στην περίοδο αναφοράς. Αντιστοίχως, μειώθηκαν σημαντικά τα ποσοστά ευάλωτων εδαφών των κατηγοριών F1 (από 16% σε 1%) και F2 (από 57% σε 47%). Συγκριτικά με την περίοδο 2041-2060, στην εικοσαετία 2081-2100 τα ποσοστά της κρίσιμης κατηγορίας C2 δεν αυξάνονται, αλλά παρατηρείται αύξηση της υποβάθμισης στην κρίσιμη κατηγορία C1 (ποσοστό 11% από 7%) και στην ευάλωτη κατηγορία F3 (ποσοστό 39% από 29%), με αντίστοιχη μείωση της ευάλωτης κατηγορίας F2 σε 34% από 47%.

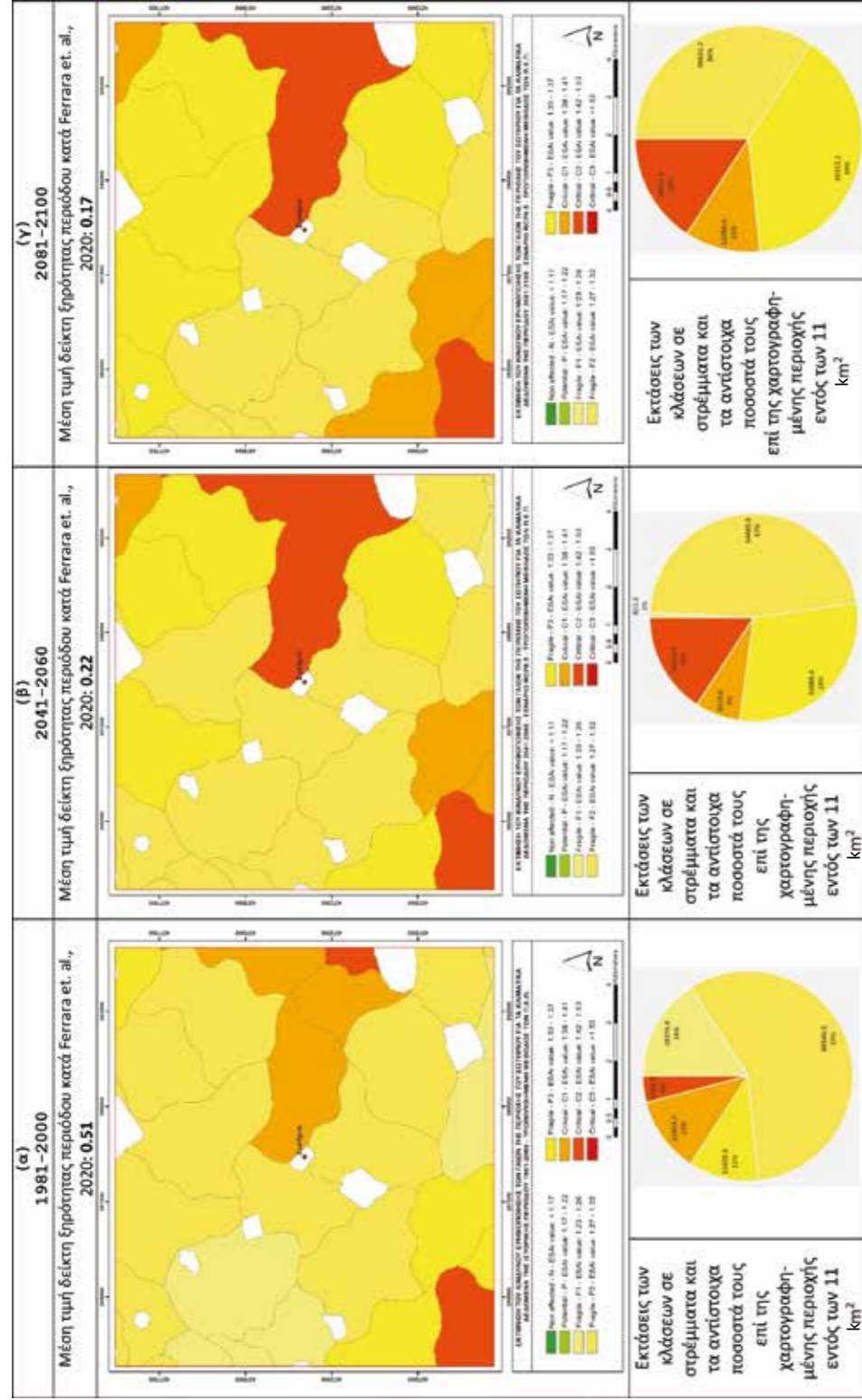
Γ.2.1.2 Περιοχή Ζαπτείου

Στην Εικ. 23 παρουσιάζονται οι προβλέψεις για τις τιμές του δείκτη ESAI στις διάφορες χαρτογραφικές μονάδες του Ζαπτείου για τις περιόδους 1981-2000 (αναφοράς), 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5.

Σε ό,τι αφορά την περίοδο αναφοράς, παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά εδαφικών μονάδων που χαρακτηρίζονται ως «κρίσιμα» στις υποκατηγορίες C1 και C2 (ποσοστά 31% και 24% αντίστοιχα). Συγκριτικά με την



Εικόνα 21. Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης εδαφών στην περιοχή Σωτηρίου στις περιόδους 1981-2000 (α), 2041-2060 (β) και 2081-2100 (γ) για το σενάριο RCP4.5. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε κλάσεις με διαφορετικές τιμές του δείκτη ESAI. Απεικονίζονται, επίσης, οι εκτάσεις των κλάσεων και τα ποσοστά τους στην υπό μελέτη περιοχή.



Εικόνα 22. Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης εδαφών στην περιοχή Σωτηρίου στις περιόδους 1981-2000 (α), 2041-2060 (β) και 2081-2100 (γ) για το σενάριο RCP8.5. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε κλάσεις με διαφορετικές τιμές του δείκτη ESAI. Απεικονίζονται, επίσης, οι εκτάσεις των κλάσεων και τα ποσοστά τους στην υπό μελέτη περιοχή.

περίοδο αυτή, στην περίοδο 2041-2060 προβλέπεται υποβάθμιση μίας μόνο ευάλωτης εδαφικής μονάδας από την υποκλάση F2 σε F3. Το δεδομένο αυτό επιφέρει αύξηση του ποσοστού της υποκλάσης F3 από 7% σε 10%, με αντίστοιχη μείωση της υποκλάσης F2 από 17% σε 14%. Για την περίοδο 2081-2100 δεν παρατηρείται μεταβολή στην τρωτότητα των εδαφικών μονάδων συγκριτικά με την περίοδο 2041-2060.

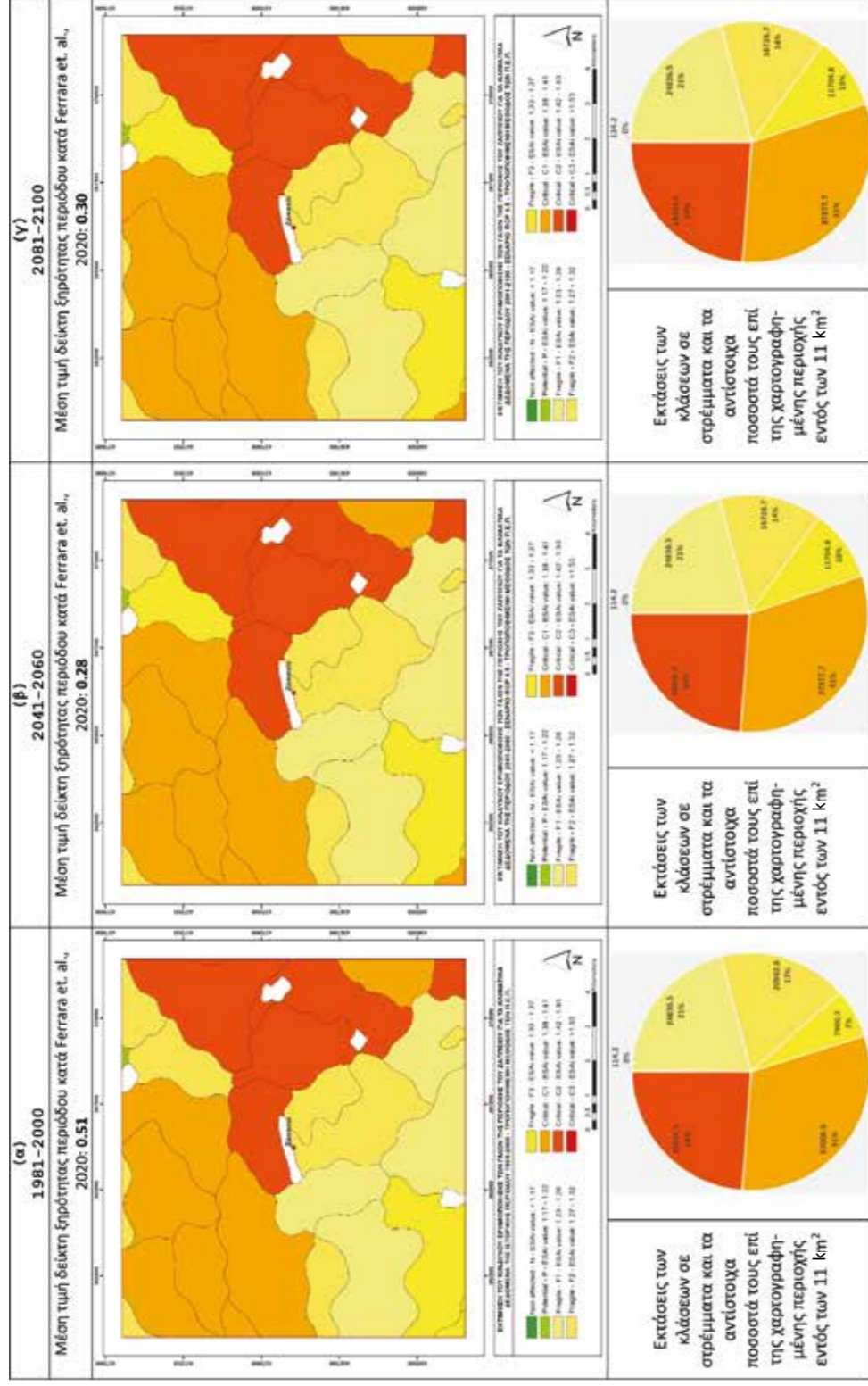
Στην Εικ. 24 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των τιμών του ESAI στις εδαφικές μονάδες του Ζαπείου για τις περιόδους 1981-2000 (αναφοράς), 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5.

Συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, την εικοσαετία 2041-2060 παρατηρείται περαιτέρω υποβάθμιση σε μεγάλο αριθμό εδαφικών μονάδων. Συγκεκριμένα, αρκετές μονάδες που χαρακτηρίζονται ως «κρίσιμες» και ανήκουν στην υποκλάση C1 υποβαθμίζονται στην υποκλάση C2 και μια ευάλωτη μονάδα που ανήκει στην υποκλάση F2 υποβαθμίζεται σε F3. Τα δεδομένα αυτά μεταβάλλουν σημαντικά προς το χειρότερο τα ποσοστά κατανομής του βαθμού τρωτότητας των εδαφικών μονάδων: τα ποσοστά της «κρίσιμης» υποκλάσης C2 υπερδιπλασιάζονται (από 24% σε 49%). Στην εικοσαετία 2081-2100 παρατηρείται επιπλέον υποβάθμιση σε σύγκριση με την περίοδο 2041-2060. Μία επιπλέον εδαφική μονάδα της «κρίσιμης» κατηγορίας υποβαθμίζεται από C1 σε C2, τρεις επιπλέον ευάλωτες εδαφικές μονάδες υποβαθμίζονται από F2 σε F3 και τέσσερις επιπλέον εδαφικές μονάδες υποβαθμίζονται από F1 σε F2. Τα ποσοστά επικινδυνότητας των εδαφικών μονάδων επιδεινώνονται περαιτέρω, συγκριτικά με την προηγούμενη εικοσαετία: η «κρίσιμη» υποκλάση C2 αυξάνεται σε 55% από 49%, η «ευάλωτη» υποκλάση F2 σε 24% από 14% και η «ευάλωτη» υποκλάση F3 σε 15% από 4%.

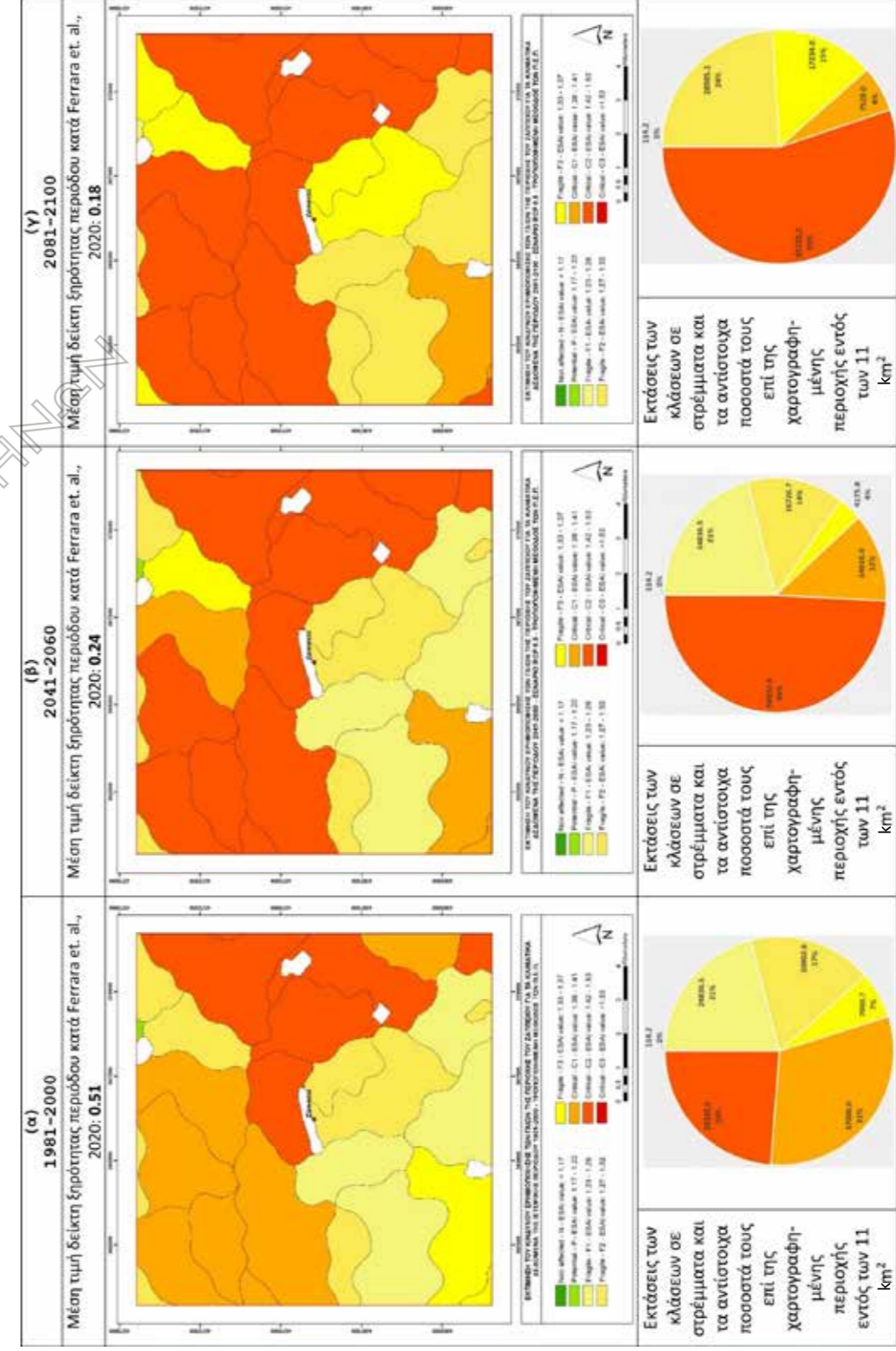
Γ.2.1.3 Περιοχή Τρικάλων

Οι προβλέψεις για τις τιμές του δείκτη ESAI στις διάφορες χαρτογραφικές μονάδες των Τρικάλων για τις περιόδους 1981-2000 (αναφοράς), 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP4.5 παρουσιάζονται στην Εικ. 25.

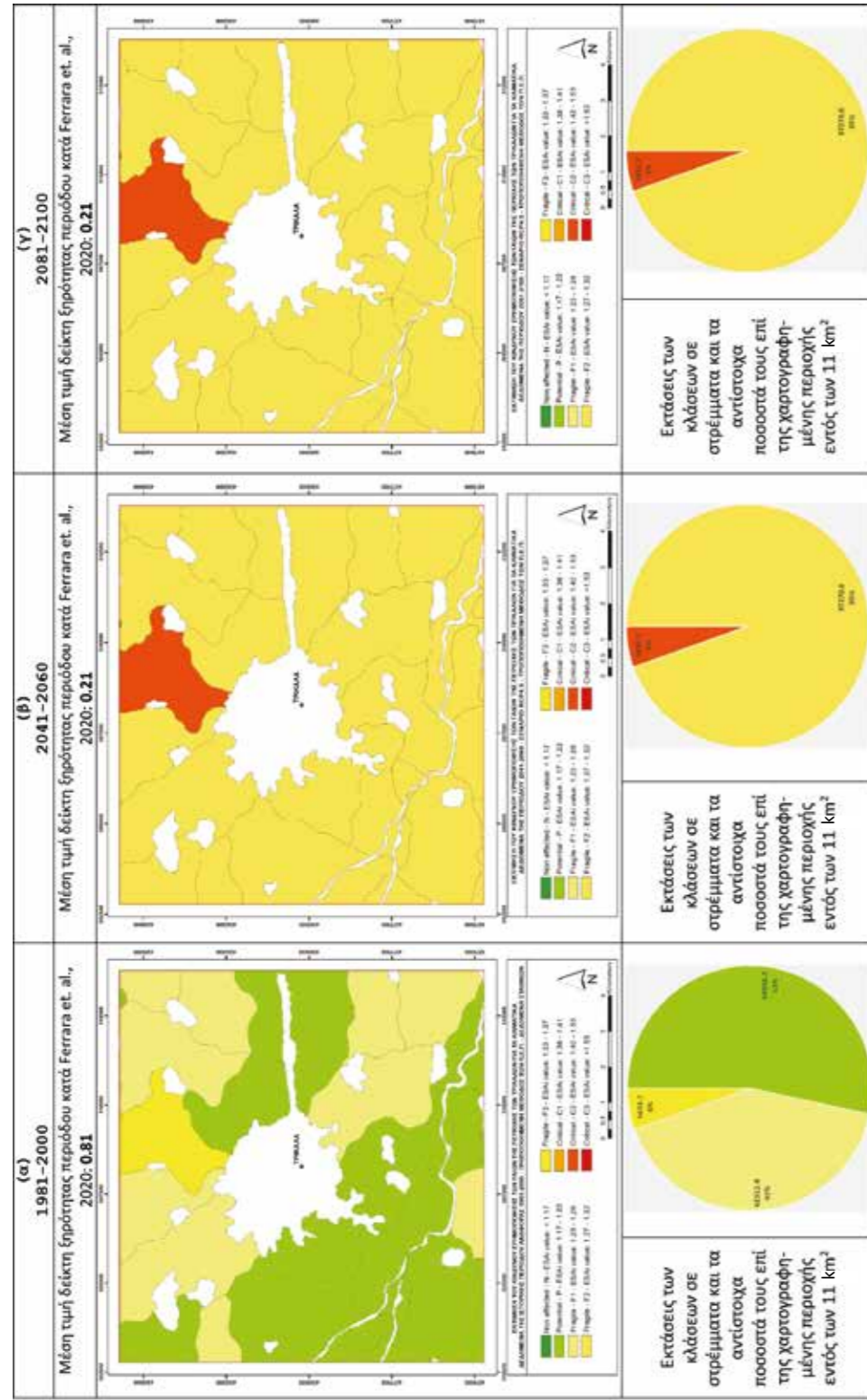
Τα δεδομένα για την περίοδο αναφοράς δείχνουν ένα ποσοστό εδαφών μεγαλύτερο του 50% να ανήκουν στην κατηγορία των δυνητικά ευάλωτων (υποκλάση P) και ένα εξίσου σημαντικό ποσοστό στην ηπιότερη κατη-



Εικόνα 23. Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης εδαφών στην περιοχή Ζαπτείου στις περιόδους 1981-2000 (α), 2041-2060 (β) και 2081-2100 (γ) για το σενάριο RCP4.5. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε κλάσεις με διαφορετικές τιμές του δείκτη ESAI. Απεικονίζονται, επίσης, οι εκτάσεις των κλάσεων και τα ποσοστά τους στην υπό μελέτη περιοχή.



Εικόνα 24. Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης εδαφών στην περιοχή Ζαπτείου στις περιόδους 1981-2000 (α), 2041-2060 (β) και 2081-2100 (γ) για το σενάριο RCP8.5. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε κλάσεις με διαφορετικές τιμές του δείκτη ESAI. Απεικονίζονται, επίσης, οι εκτάσεις των κλάσεων και τα ποσοστά τους στην υπό μελέτη περιοχή.



Εικόνα 25. Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης εδαφών στην περιοχή Τρικάλων στις περιόδους 1981-2000 (α), 2041-2060 (β) και 2081-2100 (γ) για το σενάριο RCP4.5. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε κλάσεις με διαφορετικές τιμές του δείκτη ESAI. Απεικονίζονται, επίσης, οι εκτάσεις των κλάσεων και τα ποσοστά τους στην υπό μελέτη περιοχή.

γορία των ευάλωτων εδαφών (υποκλάση F1). Συγκριτικά με την περίοδο αυτή, την περίοδο 2041-2060 παρατηρείται σημαντική υποβάθμιση, αφού μία εδαφική μονάδα της υποκλάσης F3 προβλέπεται να μεταπέσει σε C2, ενώ όλες οι άλλες μονάδες έχουν μεταπέσει στην υποκλάση F2. Τα σχετικά ποσοστά κατανομής διαμορφώνονται σε 5% για την υποκλάση C2 και 95% για την υποκλάση F2. Η ίδια εικόνα παραμένει αμετάβλητη για την περίοδο 2081-2100.

Στην Εικ. 26 παρουσιάζονται οι προβλέψεις για τις τιμές του δείκτη ESAI στις διάφορες χαρτογραφικές μονάδες των Τρικάλων για τις περιόδους 1981-2000 (αναφοράς), 2041-2060 και 2081-2100 για το σενάριο RCP8.5.

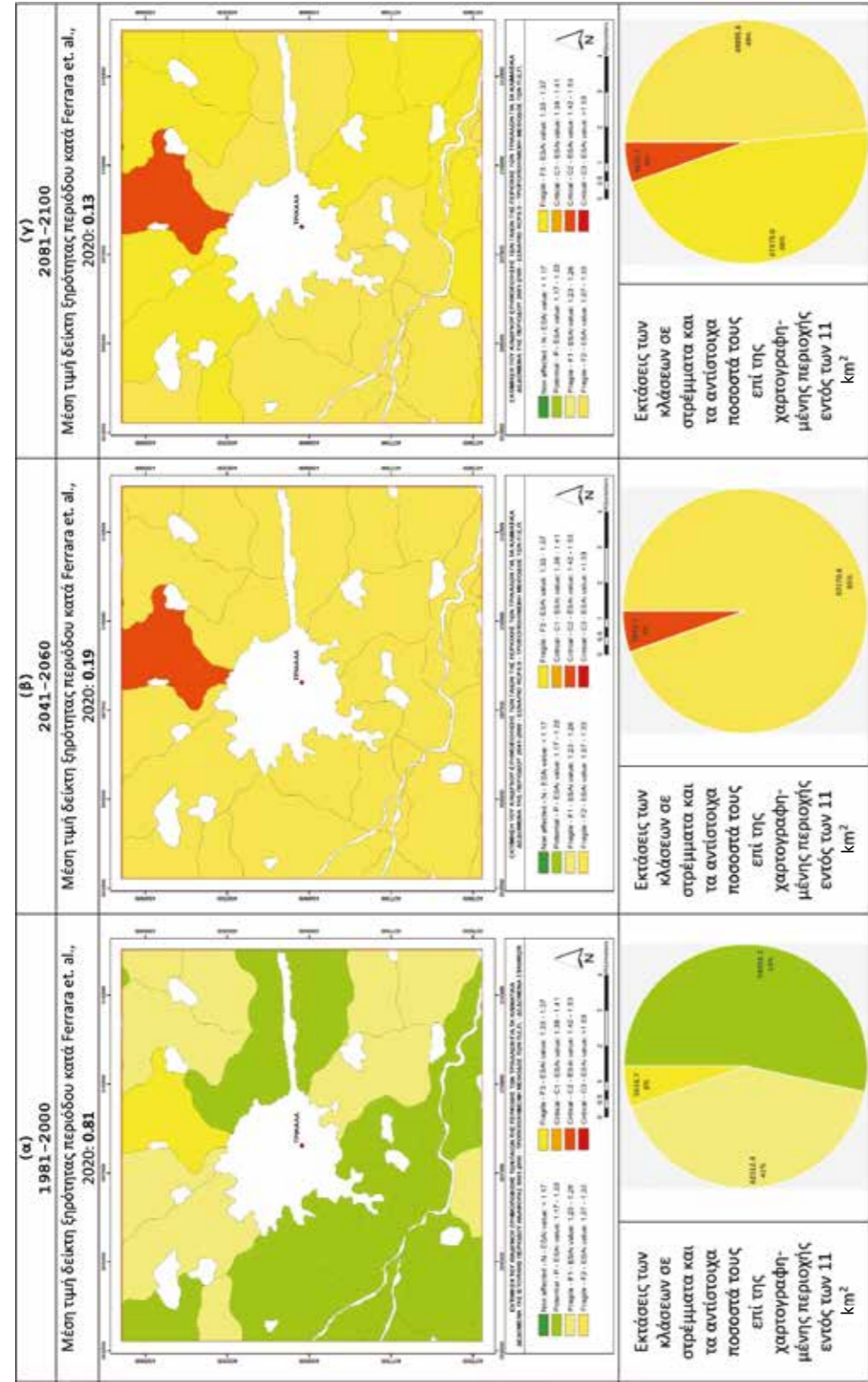
Συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, στην περίοδο 2041-2060 παρατηρείται σημαντική υποβάθμιση, αφού μία εδαφική μονάδα της υποκλάσης F3 προβλέπεται να μεταπέσει σε C2, ενώ όλες οι άλλες μονάδες έχουν μεταπέσει στην υποκλάση F2, όπως και στην περίπτωση του σεναρίου RCP4.5. Στην περίοδο 2081-2100 προβλέπεται υποβάθμιση οκτώ εδαφικών μονάδων από την υποκλάση F2 στην υποκλάση F3. Τα δεδομένα αυτά διαμορφώνουν τα ποσοστά κατανομής, συγκριτικά με την περίοδο 2041-2060, ως εξής: 5% παρέμεινε για την υποκλάση C2, 46% από 0% για την υποκλάση F3 και 49% από 95% για την υποκλάση F2.

Γ.2.2 Εκτίμηση της μεταβολής του βάθους του εδάφους

Η μηχανική και υδατική διάβρωση σε επικλινείς επιφάνειες προκαλεί μετακίνηση του εδάφους από τα ανάντη, μειώνοντας ταυτόχρονα το βάθος του εδάφους στα υψηλότερα σημεία και προκαλώντας συσσώρευση εδάφους στους πρόποδες.

Στο Παράρτημα παρουσιάζονται οι χάρτες με τις μεταβολές του βάθους των εδαφών στις υπό μελέτη περιοχές του Σωτηρίου (Εικ. Π1, Π2), του Ζαπείου (Εικ. Π3, Π4) και των Τρικάλων (Εικ. Π5, Π6).

Στην Εικ. 27 παρουσιάζονται συγκριτικά για τις τρεις περιοχές οι ποσοστιαίες αναλογίες των εκτάσεων των χαρτογραφικών εδαφικών μονάδων ανάλογα με τα βάθη των εδαφών, ταξινομημένα σε πέντε κλάσεις: μεγάλου βάθους (> 100 cm), βαθιά (81-100 cm), μέτριου βάθους (61-80 cm),



Εικόνα 26. Εκτίμηση του κινδύνου ερημοποίησης εδαφών στην περιοχή Τρικάλων στις περιόδους 1981-2000 (α), 2041-2060 (β) και 2081-2100 (γ) για το σενάριο RCP8.5. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε κλάσεις με διαφορετικές τιμές του δείκτη ESAI. Απεικονίζονται, επίσης, οι εκτάσεις των κλάσεων και τα ποσοστά τους στην υπό μελέτη περιοχή.



Εικόνα 27. Συγκριτική κατανομή των εκτάσεων γαιών (ποσοστά %) στις υπό εξέταση περιοχές, με βάση τα βάθη των εδαφών ταξινομημένα σε 5 κλάσεις (>100, 81-100, 61-80, 41-60 και 21-40 cm) στις επιμέρους χαρτογραφικές εδαφικές μονάδες σε τρεις χρονικές περιόδους (2020, 2060 και 2100). Δεν αναμένονται διαφορές μεταξύ των σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5 κατά το 2060 και το 2100.

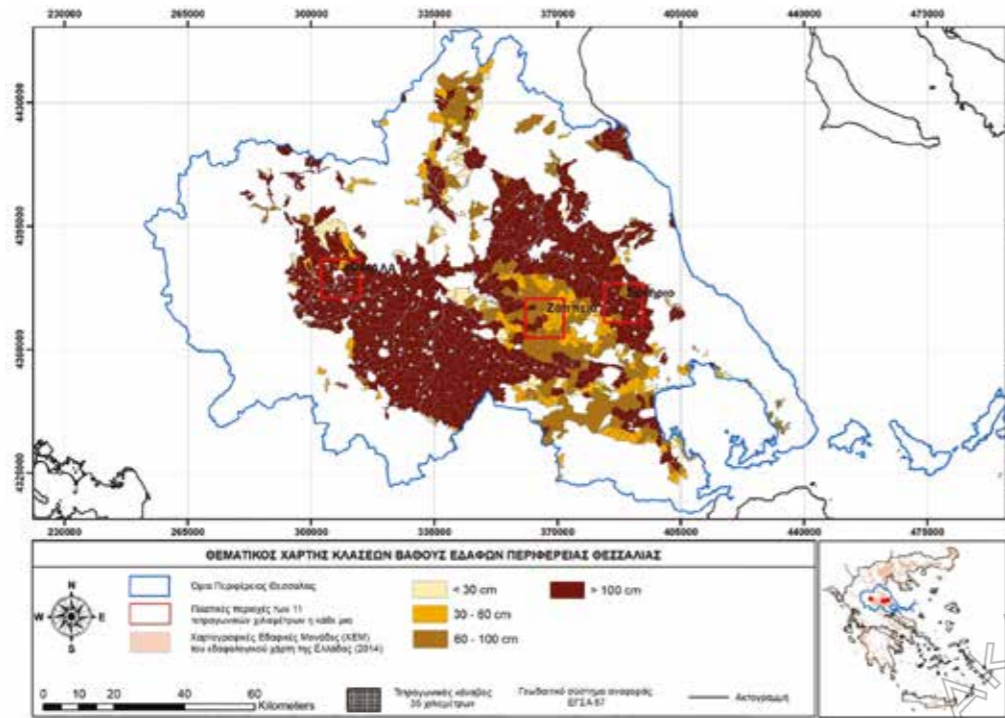
αβαθή (41-60 cm) και πολύ αβαθή (21-40 cm). Τα στοιχεία αφορούν τρεις χρονικές περιόδους: το παρόν, το 2060 και το 2100. Από τις συγκρίσεις μεταξύ των χρονικών περιόδων θα προκύψουν οι μεταβολές που προβλέπεται να επέλθουν στα βάθη των εδαφών ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης της μηχανικής και υδατικής διάβρωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των σεναρίων εκπομπής RCP4.5 και RCP8.5 στα ευρήματα τόσο του 2060 όσο και του 2100.

Με βάση τα σημερινά δεδομένα, προκύπτει αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των τριών περιοχών, ως αποτέλεσμα του διαφορετικού τους αναγλύφου. Έτσι, στο Ζάππειο, που χαρακτηρίζεται από μεγάλη αναλογία επικλινών εκτάσεων, εκτιμώνται μικρά ποσοστά (κάτω του 20%) εδαφών με μεγάλο βάθος (> 100 cm) και μεγάλα ποσοστά εδαφών (38-47%) με μέτρια (61-80 cm) και μικρά (41-60 cm) βάθη. Στο άλλο άκρο, στην περιοχή των Τρικάλων, όπου οι εκτάσεις είναι σχεδόν καθ' ολοκληρίαν επίπεδες, τα εδάφη έχουν μεγάλο βάθος σε ποσοστό άνω του 90%. Στο Σωτήριο, όπου υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό επικλινών εκτάσεων, το ποσοστό εδαφών με μεγάλο βάθος φθάνει το 84,5%, ενώ υπάρχουν μικρά ποσοστά με μέτρια και μικρά βάθη (12,1 και 3,4% αντίστοιχα) (Εικ. 28).

Το 2060 δεν προβλέπονται αλλαγές στα ποσοστά των εδαφών με βάθος > 100 cm και στις τρεις περιοχές. Παρατηρείται μόνο μείωση του ποσοστού

των εδαφών με μέτριο ή μικρό βάθος και ταυτόχρονη αύξηση του ποσοστού με πολύ μικρά βάθη (21-40 cm), λόγω της αναμενόμενης διάβρωσης.

Το 2100 τα ποσοστά εδαφών με μεγάλο βάθος εκτιμάται ότι θα παραμείνουν αμετάβλητα στα Τρίκαλα και στο Ζάππειο και θα μειωθούν ελαφρά κατά 6% στο Σωτήριο, μεταπίπτοντας με αντίστοιχα ποσοστά στην κλάση 81-100 cm. Τόσο στο Ζάππειο όσο και στο Σωτήριο αναμένεται τάση μεάπτωσης των εδαφών μέτριου βάθους σε αβαθή, λόγω της αναμενόμενης εδαφικής διάβρωσης.



Εικόνα 28. Χάρτης κλάσεων εδαφικών μονάδων Θεσσαλίας ανάλογα με το βάθος τους (βλ. υπόμνημα).

Γ.2.3 Εκτίμηση του κινδύνου αλάτωσης

Όπως προαναφέρθηκε, από τις τρεις περιοχές μελέτης κίνδυνο αλάτωσης διατρέχουν μόνο τα εδάφη του Σωτηρίου λόγω κακής στραγγίσης.

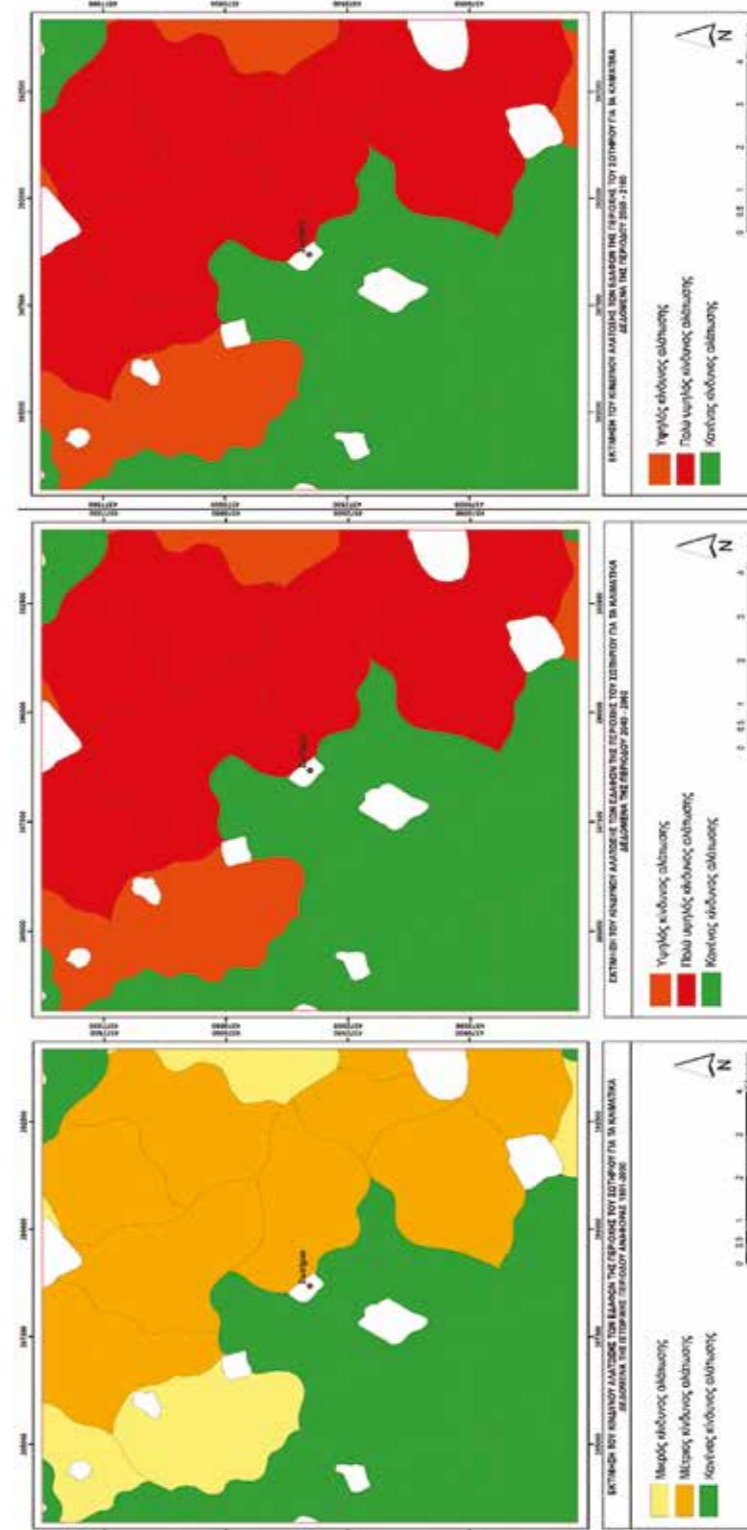
Στην Εικ. 29 παρουσιάζεται ο κίνδυνος αλάτωσης στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι εδαφικές μονάδες που παρουσιάζουν μικρό ή μέτριο κίνδυνο



(γ)

(β)

(α)



Εικόνα 29. Χωρική αποτύπωση του εκτιμώμενου κινδύνου αλάτωσης στις διάφορες εδαφικές μονάδες της υπό μελέτη περιοχής του Σωτηρίου την περίοδο αναφοράς (α), 2040-2060 (β) και 2080-2100 (γ). Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5. Οι επιμέρους διαβαθμίσεις του κινδύνου αλάτωσης βασίζονται στις τιμές του δείκτη αλάτωσης βάσει του Πίν. 7.

αλάτωσης κατά την περίοδο αναφοράς αναμένεται ότι θα μεταπέσουν σε υψηλό και πολύ υψηλό κίνδυνο, αντίστοιχα, από την περίοδο 2040-2060 και μετά. Αντίθετα, οι μονάδες που δεν διατρέχουν κίνδυνο κατά την περίοδο αναφοράς προβλέπεται ότι δεν θα επηρεαστούν δυσμενώς έως τα τέλη του αιώνα. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπήρξε διαφορά στις εκτιμήσεις για τις περιόδους 2040-2060 και 2080-2100 μεταξύ των σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5.

Συγκρίνοντας τη χωρική αποτύπωση της Εικ. 29 με τις Εικ. 1-2 στο Παράρτημα συνάγουμε ότι οι εδαφικές μονάδες που δεν διατρέχουν κίνδυνο αλάτωσης στην περίοδο αναφοράς (1981-2000) καταλαμβάνουν το 40,60% της εξεταζόμενης επιφάνειας (4695,4 ha) και αναμένεται ότι θα παραμείνουν στην ίδια κατηγορία έως το 2080-2100. Οι εκτάσεις που το 1981-2000 διέτρεχαν μικρό κίνδυνο αλάτωσης αποτελούσαν το 13,21% του συνόλου (1528,1 ha). Οι εκτάσεις αυτές από το 2040-2060 αναμένεται ότι θα υποβαθμιστούν κατά δύο κλάσεις σύμφωνα με τον Πίν. 7 και χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου. Οι εκτάσεις που το 1981-2000 διέτρεχαν μέτριο κίνδυνο αποτελούσαν το 46,19% του συνόλου (5342,8 ha) ενώ από το 2040-2060 αναμένεται ότι θα υποβαθμιστούν επίσης κατά δύο κλάσεις και χαρακτηρίζονται ως πολύ υψηλού κινδύνου.

Με βάση μόνο τα υδρομορφικά χαρακτηριστικά του εδάφους (μόνιμος υδροφόρος ορίζοντας σε βάθος μικρότερο από 150 cm από την επιφάνεια του εδάφους), τα εδάφη με δυσμενείς συνθήκες στράγγισης, που εκτίθενται σε υψηλό κίνδυνο αλάτωσης στη Θεσσαλία, καλύπτουν συνολική έκταση 31386,7 ha. Τα εδάφη αυτά τοποθετούνται κυρίως ανατολικά του κάμπου στην περιοχή της Κάρλας, μεταξύ Τρικάλων και Λαρίσης, σε μια ζώνη κυρίως κατά μήκος του Πηνειού ποταμού και σε διάσπαρτες μικρότερες θέσεις της περιοχής αυτής (Κοσμάς, προσωπική επικοινωνία).

Γ.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Γ.3.1 Αποδόσεις

Η χαρτογραφική αποτύπωση των γαιών των υπό μελέτη περιοχών μάς παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των αποδόσεων των καλλιεργειών

ανάλογα με το βάθος του εδάφους στο οποίο καλλιεργούνται, μεταβάλλοντας εκάστοτε την παράμετρο «μέγιστο βάθος ενεργού ριζοστρώματος» στο AquaCrop. Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατόν να συνεκτιμηθεί και η επίδραση της διάβρωσης (μηχανικής και υδατικής), μέσω της οποίας απομακρύνονται επιφανειακά στρώματα εδάφους και μειώνεται το διαθέσιμο βάθος για την ανάπτυξη του ριζοστρώματος (βλ. παραπάνω Γ.2.2 και Εικ. 27).

Για λόγους απλοποίησης, τα εδάφη ομαδοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες για κάθε περίοδο, όπως φαίνεται στον Πίν. 9. Η βαθμιαία μείωση του βάθους με την πάροδο του χρόνου αντικατοπτρίζει τις απώλειες εδάφους λόγω διάβρωσης.

Πίνακας 9. Τα βάθη ριζοστρώματος (cm) που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο AquaCrop για τον υπολογισμό των αποδόσεων σε κάθε χρονική περίοδο και η αντιστοίχισή τους με τις εδαφικές κλάσεις του υποκεφ. Γ.2.2 παραπάνω.

Κλάση εδάφους	1981-2000	2040-2060	2080-2100
Μεγάλου βάθους (> 100 cm)	125	115	105
Μέτριου βάθους (61-80 cm)	80	70	60
Αβαθή (41-60 cm)	45	35	
Πολύ αβαθή (21-40 cm)			25

Στον υπολογισμό των αποδόσεων, η εκτίμηση της διάβρωσης για κάθε εδαφική κλάση γίνεται με βάση τη μείωση του βάθους των εδαφών κατά τις περιόδους 2040-2060 και 2080-2100 συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000, όπου γίνεται η υπόθεση ότι τα εδάφη δεν έχουν διαβρωθεί.

Λόγω των παρεμφερών κλιματικών συνθηκών στις περιοχές Ζαπείου και Σωτηρίου, η εφαρμογή του AquaCrop παρήγαγε ίδιες αποδόσεις καλλιεργειών για τα αντίστοιχα βάθη εδάφους στις συγκεκριμένες περιοχές.

Γ.3.1.1 Καλλιέργεια σιταριού

Περιοχές Σωτηρίου και Ζαππείου

Στην Εικ. 30 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των αποδόσεων για καλλιέργεια σιταριού σε εδάφη με τρία διαφορετικά βάθη στα σενάρια RCP4.5 (Εικ. 30α) και RCP8.5 (Εικ. 30β). Για κάθε βάθος απεικονίζονται οι αποδόσεις σε εδάφη που θεωρείται ότι δεν έχουν υποστεί διάβρωση και σε εδάφη των οποίων το βάθος έχει μειωθεί λόγω διάβρωσης.

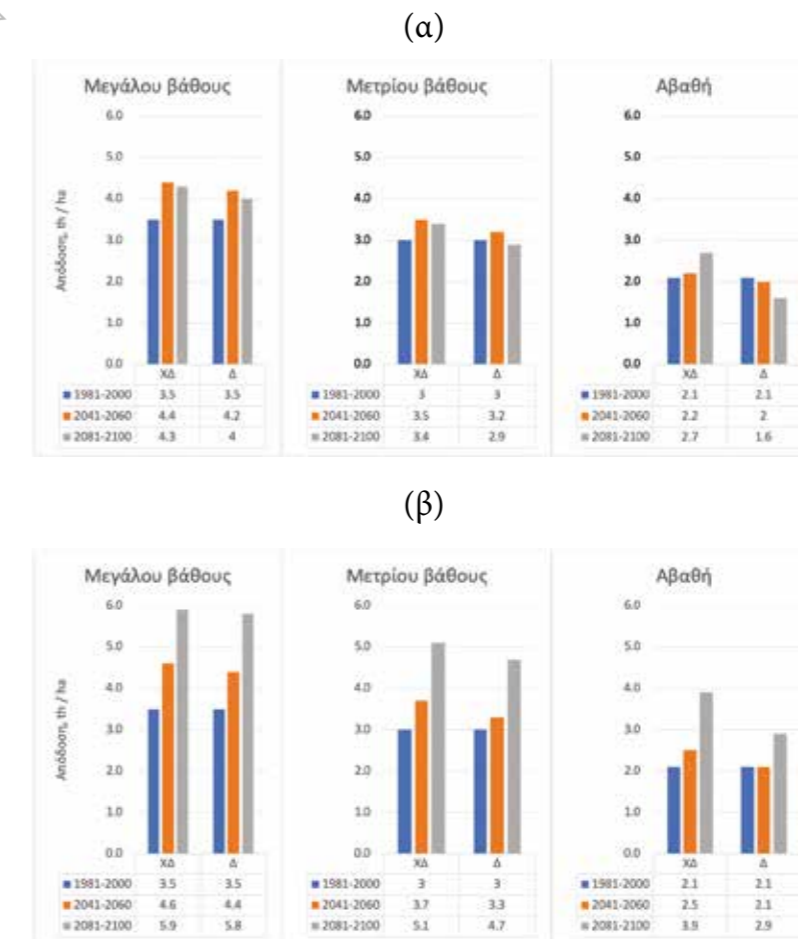
Για το σενάριο RCP4.5 (Εικ. 30α) παρατηρείται μια γενική τάση μείωσης των αποδόσεων από τα βαθύτερα προς τα αβαθέστερα εδάφη. Επίσης, παρατηρείται μια τάση μείωσης των αποδόσεων από τα μη διαβρωμένα προς τα διαβρωμένα εδάφη.

Συγκριτικά με τις αποδόσεις κατά την περίοδο αναφοράς, στα βαθιά και στα μετρίου βάθους εδάφη προβλέπεται αύξηση των αποδόσεων κατά την περίοδο 2041-2060. Από τον Πίν. 10 φαίνεται ότι η αύξηση είναι μεγαλύτερη στα βαθιά εδάφη (25,7% στα μη διαβρωμένα και 20% στα διαβρωμένα) και μικρότερη στα μετρίου βάθους εδάφη (16,7% στα μη διαβρωμένα και 6,7% στα διαβρωμένα). Στα αβαθή εδάφη παρατηρείται μικρή αύξηση των αποδόσεων (5%) στα μη διαβρωμένα και μικρή μείωση (4,8%) στα διαβρωμένα. Κατά την περίοδο 2081-2100, στα βαθιά εδάφη παρατηρείται αύξηση των αποδόσεων κατά 22,9% στα μη διαβρωμένα και κατά 14,3% στα διαβρωμένα εδάφη. Αυξήσεις παρατηρούνται στα μη διαβρωμένα μεσαίου βάθους και αβαθή εδάφη, κατά 13,3% και 28,6% αντιστοίχως. Αντιθέτως, στα διαβρωμένα μεσαίου βάθους και στα αβαθή εδάφη προβλέπονται μειώσεις κατά 3,3% και 23,8% αντιστοίχως.

Για το σενάριο RCP8.5 (Εικ. 30β) παρατηρείται επίσης μια γενική τάση μείωσης των αποδόσεων τόσο από τα βαθύτερα προς τα αβαθέστερα εδάφη, όσο και από τα μη διαβρωμένα προς τα διαβρωμένα εδάφη.

Συγκριτικά με τις αποδόσεις κατά την περίοδο 1981-2000, σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες των εδαφών προβλέπονται αξιόλογες αυξήσεις των αποδόσεων κατά την περίοδο 2041-2060. Σύμφωνα με τον Πίν. 10, οι αυξήσεις είναι μεγαλύτερες στα βαθιά εδάφη (31,4% στα μη διαβρωμένα και 25,7% στα διαβρωμένα) και μικρότερες στα μετρίου βάθους (23,3 στα μη διαβρωμένα και 10% στα διαβρωμένα). Στα αβαθή εδάφη, οι αποδόσεις

ήταν υψηλότερες κατά 19% στα μη διαβρωμένα, ενώ στα διαβρωμένα δεν υπήρξε διαφοροποίηση. Οι αυξήσεις των αποδόσεων κατά την περίοδο 2081-2100, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, ήταν σημαντικά υψηλότερες από εκείνες της περιόδου 2041-2060 σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Έτσι, στα βαθιά εδάφη προβλέπονται αυξήσεις από 68,6% έως 65,7% ανεξαρτήτως βαθμού διάβρωσης, ενώ στα μετρίου βάθους αύξηση 70% στα μη διαβρωμένα και 56,7% στα διαβρωμένα. Στα αβαθή, οι προβλεπόμενες αυξήσεις είναι 85,7% στα μη διαβρωμένα και 38,1% στα διαβρωμένα εδάφη.



Εικόνα 30. Προβλεπόμενες αποδόσεις για καλλιέργεια σιταριού στις περιοχές Σωτηρίου και Ζαππείου για τρεις κατηγορίες εδαφών διαφορετικού βάθους και τρεις χρονικές περιόδους (1981-2000, 2041-2060, 2081-2100). Σε κάθε κατηγορία εδάφους παρουσιάζονται αποτελέσματα χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και μετά από απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5.

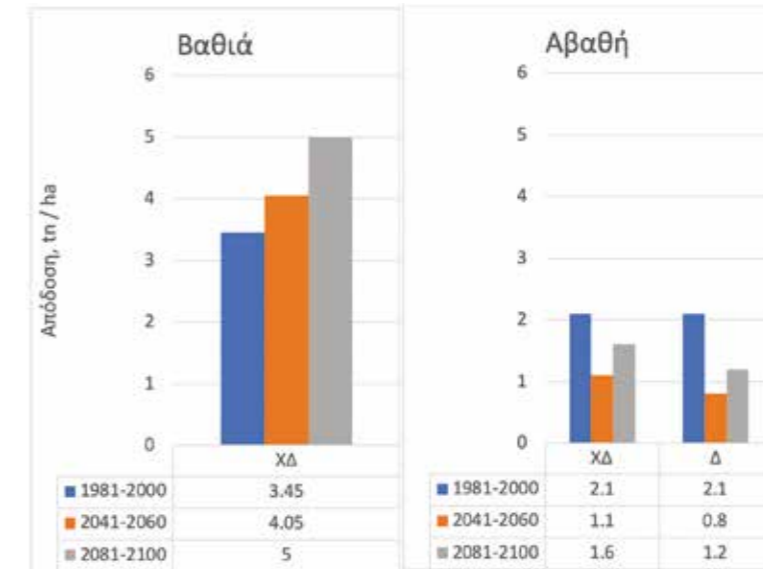
Πίνακας 10. Προβλεπόμενες ποσοστιαίες (%) μεταβολές αποδόσεων σε καλλιέργειες σιταριού συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000 για τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στις περιοχές Σωτηρίου-Ζαπείου (πάνω) και Τρικάλων (κάτω) κατά τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100. Αποτελέσματα για εδάφη βαθιά (> 100 cm), μετρίου βάθους (61-80 cm) και αβαθή (41-60 cm), μη διαβρωμένα (ΧΔ) και μετά από διάβρωση (Δ).

Σωτήριο και Ζάππειο						
RCP4.5						
	Βαθιά		Μετρίου βάθους		Αβαθή	
	ΧΔ	Δ	ΧΔ	Δ	ΧΔ	Δ
2041-2060	+25,7	+20,0	+16,7	+6,7	+5,0	-4,8
2081-2100	+22,9	+14,3	+13,3	-3,3	+28,6	-23,8
RCP8.5						
2041-2060	+31,4	+25,7	+23,3	+10,0	+19,0	0
2081-2100	+68,6	+65,7	+70,0	+56,7	+85,7	+38,1
Τρίκαλα						
RCP4.5						
2041-2060	+17,4				-47,6	-61,9
2081-2100	+44,9				-23,8	-42,9
RCP8.5						
2041-2060	+20,3				-23,8	-47,6
2081-2100	+50,7				0	-38,1

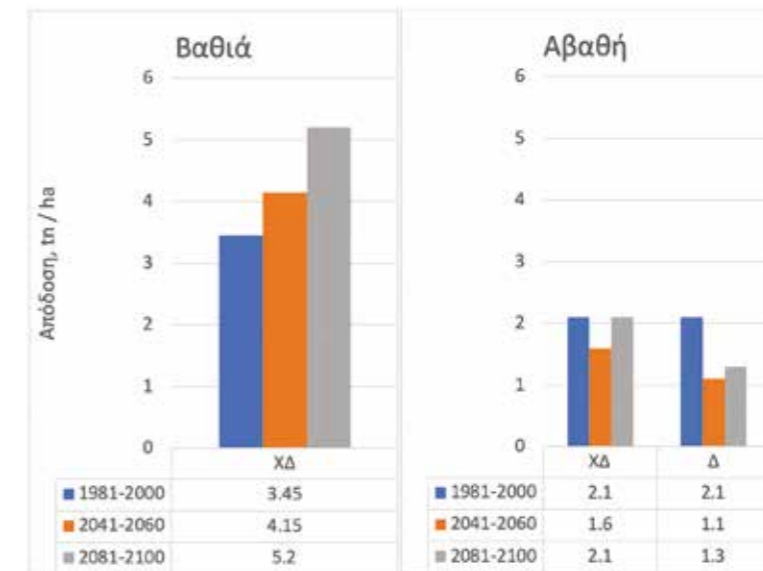
Περιοχή Τρικάλων

Στην Εικ. 31 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των αποδόσεων για καλλιέργεια σιταριού σε εδάφη με δύο διαφορετικά βάθη, μεγάλου βάθους και αβαθή, στα σενάρια RCP4.5 (Εικ. 31α) και RCP8.5 (Εικ. 31β). Δεν καταγράφηκαν εδάφη μετρίου βάθους στη συγκεκριμένη περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα εδάφη μεγάλου βάθους, τα οποία είναι επίπεδα στην περιοχή αυτή, δεν διατρέχουν κίνδυνο διάβρωσης. Ως εκ τούτου, για τα εδάφη αυτά δεν παρουσιάζονται στοιχεία αποδόσεων με διάβρωση.

(α)



(β)



Εικόνα 31. Προβλεπόμενες αποδόσεις για καλλιέργεια σιταριού στην περιοχή Τρικάλων για δύο κατηγορίες εδαφών διαφορετικού βάθους και τρεις χρονικές περιόδους (1981-2000, 2041-2060, 2081-2100). Στα αβαθή εδάφη παρουσιάζονται αποτελέσματα χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και μετά από απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5.

Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, οι αποδόσεις μειώνονται από τα βαθιά προς τα αβαθή εδάφη. Στα τελευταία παρατηρείται μέτρια επιπλέον μείωση από τα μη διαβρωμένα στα διαβρωμένα εδάφη.

Συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, προβλέπεται αύξηση των αποδόσεων κατά 17,4% στην εικοσαετία 2041-2060 στα βαθιά εδάφη για το σενάριο RCP4.5 (Εικ. 31α, Πίν. 10). Στα αβαθή εδάφη την ίδια χρονική περίοδο παρατηρείται σημαντική μείωση κατά 47,6% χωρίς διάβρωση και κατά 61,9% μετά από διάβρωση. Την περίοδο 2081-2100 η αύξηση των αποδόσεων στα βαθιά εδάφη είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την προηγούμενη περίοδο (44,9%). Επίσης, η μείωση των αποδόσεων στα αβαθή εδάφη είναι μικρότερη από την περίοδο 2041-2060, κατά 23,8% χωρίς διάβρωση και 42,9% μετά από διάβρωση.

Οι θετικές επιπτώσεις στις αποδόσεις στα μέσα και στα τέλη του αιώνα προβλέπονται μεγαλύτερες στο σενάριο RCP8.5 (Εικ. 30β, Πίν. 10). Σε σύγκριση με την περίοδο 1981-2000, στην περίοδο 2041-2060 η αύξηση ανέρχεται σε 20,3% στα βαθιά εδάφη. Στα αβαθή παρατηρήθηκε μείωση κατά 23,8% στα μη διαβρωμένα εδάφη και κατά 47,6% μετά από διάβρωση. Στην περίοδο 2081-2100 η αύξηση στα βαθιά εδάφη ανήλθε σε 50,7%. Στα αβαθή, οι αποδόσεις σε μη διαβρωμένα εδάφη δεν διέφεραν από εκείνες της περιόδου αναφοράς, ενώ μετά από διάβρωση μειώθηκαν κατά 38,1%.

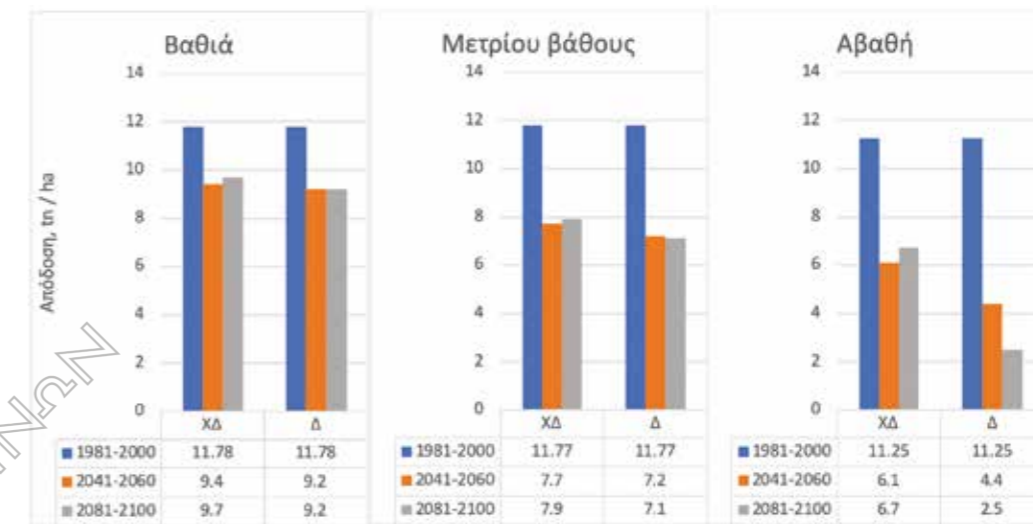
Γ.3.1.2 Καλλιέργεια αραβοσίτου

Περιοχές Σωτηρίου και Ζαππείου

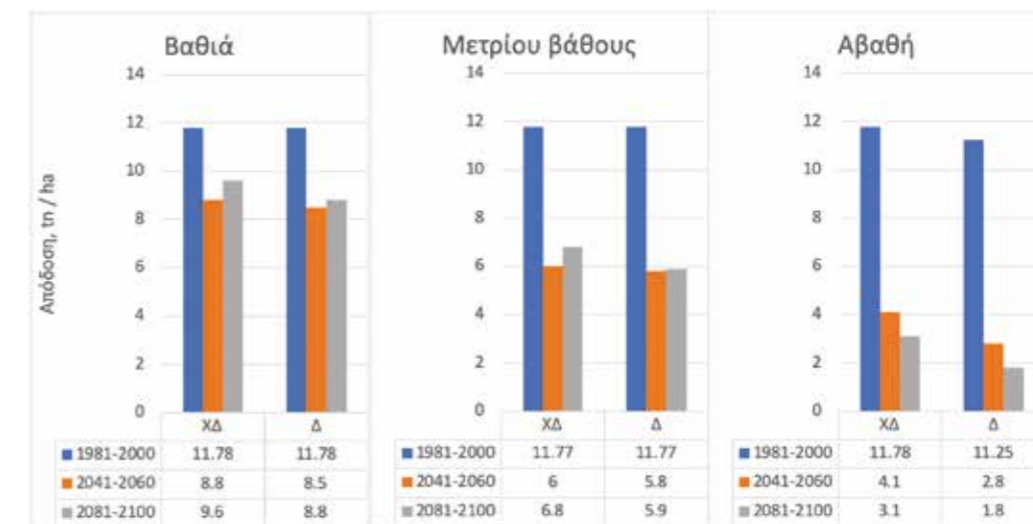
Στην Εικ. 32 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των αποδόσεων για καλλιέργεια αραβοσίτου σε εδάφη με τρία διαφορετικά βάθη στα σενάρια RCP4.5 (Εικ. 32α) και RCP8.5 (Εικ. 32β). Για κάθε βάθος απεικονίζονται οι αποδόσεις σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί διάβρωση και σε εδάφη των οποίων το βάθος έχει μειωθεί λόγω διάβρωσης.

Ενώ οι αποδόσεις κατά την περίοδο αναφοράς (1981-2000) παρουσιάζουν αξιοσημείωτη σταθερότητα και διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα (μεταξύ 11,25-11,78 tn ha^{-1}) ανεξάρτητα από το βάθος του εδάφους, οι αποδόσεις τόσο στα μέσα όσο και στα τέλη του αιώνα επηρεάζονται αρνητικά από το βάθος και τον βαθμό διάβρωσης του εδάφους.

(α)



(β)



Εικόνα 32. Προβλεπόμενες αποδόσεις για καλλιέργεια αραβοσίτου στις περιοχές Σωτηρίου και Ζαππείου για τρεις κατηγορίες εδαφών διαφορετικού βάθους και τρεις χρονικές περιόδους (1981-2000, 2041-2060, 2081-2100). Σε κάθε κατηγορία εδάφους παρουσιάζονται αποτελέσματα χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και μετά από απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5.

Στην εικοσαετία 2041-2060 προβλέπονται σημαντικές μειώσεις των αποδόσεων συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για το σενάριο RCP4.5. Από τον Πίν. 11 προκύπτει ότι στα βαθιά εδάφη η μείωση των αποδόσεων, ανεξάρτητα από τον βαθμό διάβρωσης, προβλέπεται να φθάσει το 20,2-21,9%. Στα μετρίου βάθους οι αποδόσεις θα μειωθούν κατά 34,6% στα χωρίς διάβρωση και κατά 38,8% στα διαβρωμένα εδάφη. Στα ρηχά εδάφη οι μειώσεις των αποδόσεων θα είναι ακόμα μεγαλύτερες: 45,8 και 66,9% στα μη διαβρωμένα και στα διαβρωμένα εδάφη, αντιστοίχως.

Για την περίοδο 2081-2100, οι μειώσεις των αποδόσεων σε σχέση με την περίοδο αναφοράς προβλέπεται να κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα με εκείνες της περιόδου 2041-2060 στα βαθιά και μετρίου βάθους εδάφη, χωρίς αξιόλογη επίδραση του βαθμού διάβρωσης. Στα αβαθή όμως και διαβρωμένα εδάφη, η μείωση των αποδόσεων προβλέπεται να είναι πολύ υψηλότερη συγκριτικά με την περίοδο 2041-2060 και να φθάσει έως 77,8%.

Πίνακας 11. Προβλεπόμενες ποσοστιαίες (%) μεταβολές αποδόσεων σε καλλιέργειες αραβοσίτου συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000 για τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στις περιοχές Σωτηρίου-Ζαπείου (πάνω) και Τρικάλων (κάτω) κατά τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100. Αποτελέσματα για εδάφη βαθιά (> 100 cm), μετρίου βάθους (61-80 cm) και αβαθή (41-60 cm, 21-40 cm), μη διαβρωμένα (ΧΔ) και μετά από διάβρωση (Δ).

Σωτήριο και Ζάππειο						
RCP4.5						
	Βαθιά		Μετρίου βάθους		Αβαθή	
	ΧΔ	Δ	ΧΔ	Δ	ΧΔ	Δ
2041-2060	-20,2	-21,9	-34,6	-38,8	-45,8	-66,9
2081-2100	-17,7	-21,9	-32,9	-39,7	-40,4	-77,8
RCP8.5						
2041-2060	-25,3	-27,8	-49,0	-50,7	-65,2	-75,1
2081-2100	-18,5	-25,3	-42,2	-49,9	-73,7	-84,0
Τρίκαλα						
RCP4.5						
2041-2060	-21,9				-47,2	-66,5
2081-2100	-6,5				-43,1	-57,3
RCP8.5						
2041-2060	-28,4				-88,8	-86,8
2081-2100	-29,3				-	-

Για το σενάριο RCP8.5 (Εικ. 32β) προβλέπεται σταδιακή μείωση στις αποδόσεις όσο μειώνεται το βάθος του εδάφους. Η επίδραση του βαθμού διάβρωσης σε συγκεκριμένο βάθος φαίνεται να είναι μικρή στα βαθιά και στα μετρίου βάθους εδάφη, αλλά σημαντικά μεγάλη στα αβαθή εδάφη.

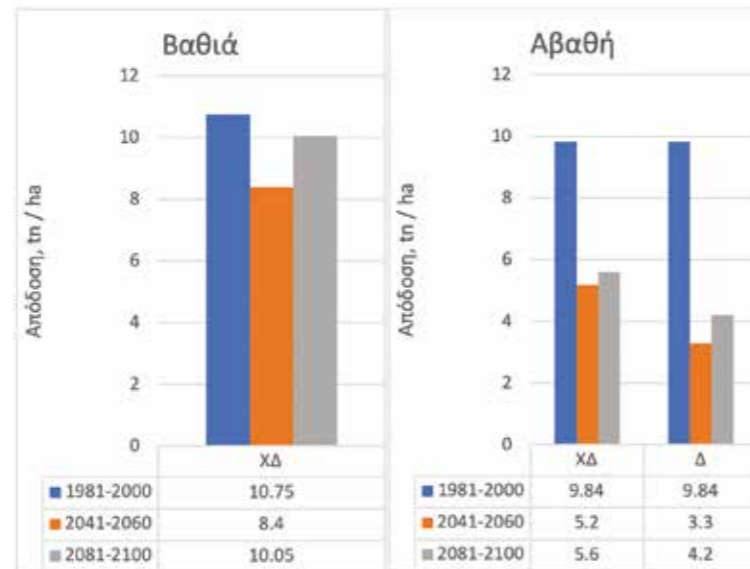
Στην περίοδο 2041-2060 προβλέπεται, σύμφωνα με τον Πίν. 11, μείωση των αποδόσεων στα βαθιά εδάφη κατά 25,3-27,8%, με μικρή επίδραση του βαθμού διάβρωσης. Στα μεσαίου βάθους, η μείωση αυξάνεται σε μη διαβρωμένα εδάφη σε 49% και σε διαβρωμένα σε 50,7%. Στα αβαθή εδάφη, η μείωση προβλέπεται να φθάσει 65,2% χωρίς διάβρωση και 75,1% με διάβρωση. Στην περίοδο 2081-2100, οι μειώσεις στα βαθιά εδάφη προβλέπεται να φθάσουν το 18,5% και το 25,3% στα μη διαβρωμένα και στα διαβρωμένα εδάφη αντιστοίχως, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς. Στα μετρίου βάθους, οι αντίστοιχες μειώσεις θα φθάσουν το 42,2 έως 49,9%. Στα αβαθή εδάφη, οι μειώσεις στις αποδόσεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες και φθάνουν το 73,7 και 84% στα μη διαβρωμένα και στα διαβρωμένα εδάφη κατ' αντιστοιχία.

Περιοχή Τρικάλων

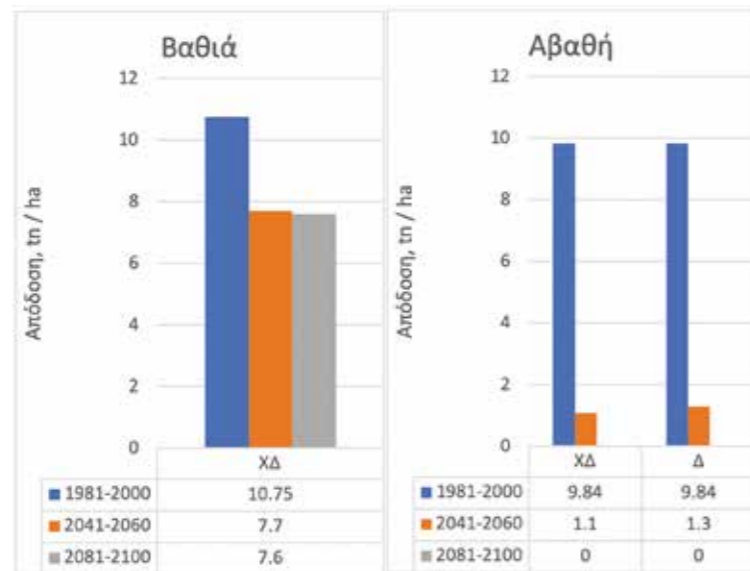
Στην Εικ. 33 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των αποδόσεων για καλλιέργεια αραβοσίτου σε εδάφη με δύο διαφορετικά βάθη, μεγάλου βάθους και αβαθή, στα σενάρια RCP4.5 (Εικ. 33α) και RCP8.5 (Εικ. 33β). Δεν καταγράφηκαν εδάφη μετρίου βάθους στη συγκεκριμένη περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα εδάφη μεγάλου βάθους, τα οποία είναι επίπεδα στην περιοχή αυτή, δεν διατρέχουν κίνδυνο διάβρωσης. Ως εκ τούτου, για τα εδάφη αυτά δεν παρουσιάζονται στοιχεία αποδόσεων με διάβρωση.

Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, οι αποδόσεις μειώνονται από τα βαθιά προς τα αβαθή εδάφη. Η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στα αβαθή εδάφη στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100. Αντιθέτως, η διαφορά στις αποδόσεις είναι μικρή μεταξύ των δύο κατηγοριών εδαφών κατά την περίοδο αναφοράς.

(α)



(β)



Εικόνα 33. Προβλεπόμενες αποδόσεις για καλλιέργεια αραβοσίτου στην περιοχή Τρικάλων για δύο κατηγορίες εδαφών διαφορετικού βάθους και τρεις χρονικές περιόδους (1981-2000, 2041-2060, 2081-2100). Στα αβαθή εδάφη παρουσιάζονται αποτελέσματα χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και μετά από απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5.

Στην εικοσαετία 2041-2060 και για το σενάριο RCP4.5 (Εικ. 33α) προβλέπεται μείωση των αποδόσεων κατά 21,9% στα βαθιά εδάφη, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (Πίν. 11). Στα ρηχά εδάφη η αντίστοιχη μείωση είναι πολύ μεγαλύτερη: 47,2% στα μη διαβρωμένα και 66,5% στα διαβρωμένα εδάφη. Την περίοδο 2081-2100 οι μειώσεις στις αποδόσεις είναι μικρότερες σε σύγκριση με την περίοδο 2041-2060: στα βαθιά εδάφη 6,5%, ενώ στα αβαθή 43,7% και 57,3% σε μη διαβρωμένα και διαβρωμένα αντιστοίχως.

Οι αρνητικές επιπτώσεις στα μέσα και στα τέλη του αιώνα προβλέπονται εντονότερες στο σενάριο RCP8.5 (Εικ. 33β). Σε σύγκριση με την περίοδο 1981-2000, στην περίοδο 2041-2060 η μείωση θα ανέλθει σε 28,4% στα βαθιά εδάφη, ενώ στα αβαθή θα αυξηθεί δραματικά σε 88,8% σε μη διαβρωμένα και σε 86,8% σε διαβρωμένα εδάφη. Στην περίοδο 2081-2100, η μείωση βρίσκεται περίπου στα επίπεδα της προηγούμενης περιόδου (29,3%) στα βαθιά εδάφη, ενώ στα αβαθή οι αποδόσεις μηδενίζονται.

Γ.3.1.3 Καλλιέργεια βαμβακιού

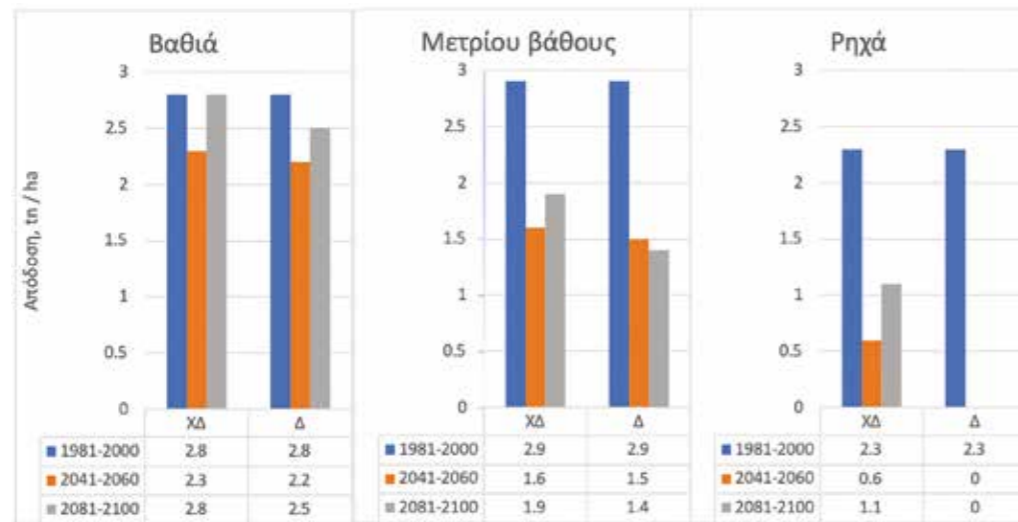
Περιοχές Σωτηρίου και Ζαπείου

Στην Εικ. 34 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των αποδόσεων για καλλιέργεια βαμβακιού σε εδάφη με τρία διαφορετικά βάθη στα σενάρια RCP4.5 (Εικ. 34α) και RCP8.5 (Εικ. 34β). Για κάθε βάθος απεικονίζονται οι αποδόσεις σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί διάβρωση και σε εδάφη που έχει μειωθεί το βάθος τους λόγω διάβρωσης.

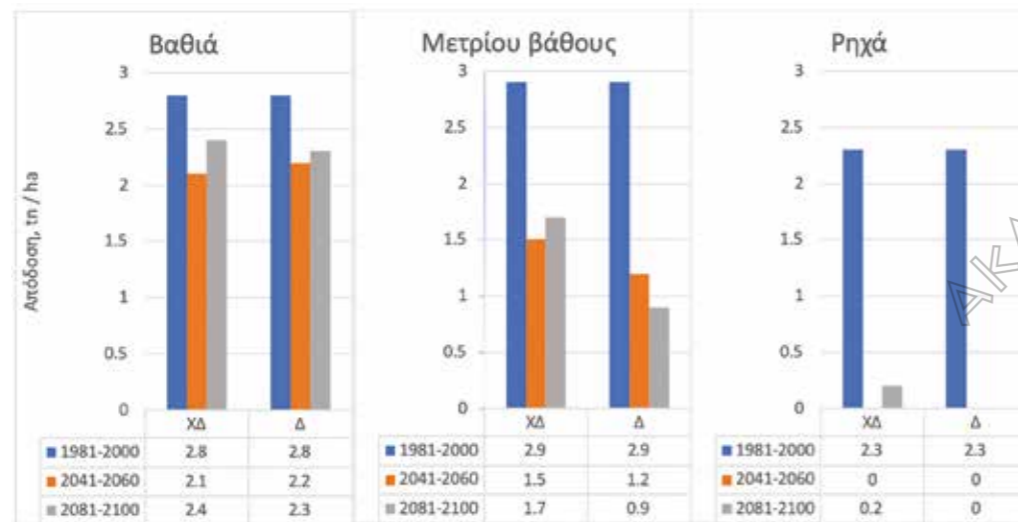
Και στα δύο σενάρια κατά την περίοδο αναφοράς οι αποδόσεις παραμένουν σταθερές στα βαθιά και στα μεσαίου βάθους εδάφη και μειώνονται μόνο στα ρηχά. Στα μέσα και στα τέλη του αιώνα η επίδραση της μείωσης του βάθους και του βαθμού διάβρωσης προκαλεί σημαντικές μειώσεις, έως και εκμηδενισμό των αποδόσεων της καλλιέργειας (Εικ. 34).

Στο σενάριο RCP4.5 (Εικ. 34α) κατά την περίοδο 2041-2060 προβλέπεται μείωση των αποδόσεων στα βαθιά εδάφη κατά 17,9% και 21,4% χωρίς και με διάβρωση αντιστοίχως, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (Πίν. 12). Στα μετρίου βάθους εδάφη οι αντίστοιχες μειώσεις είναι πολύ

(α)



(β)



Εικόνα 34. Προβλεπόμενες αποδόσεις για καλλιέργεια βαμβακιού στις περιοχές Σωτηρίου και Ζαπτείου για τρεις κατηγορίες εδαφών διαφορετικού βάθους και τρεις χρονικές περιόδους (1981-2000, 2041-2060, 2081-2100). Σε κάθε κατηγορία εδάφους παρουσιάζονται αποτελέσματα χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και μετά από απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5.

μεγαλύτερες, 44,8% και 48,3%. Στα αβαθή εδάφη οι μειώσεις φθάνουν το 73,9% σε μη διαβρωμένα, ενώ οι αποδόσεις μηδενίζονται στα διαβρωμένα εδάφη. Κατά την περίοδο 2081-2100, οι μειώσεις των αποδόσεων είναι γενικά μικρότερες από τις προβλεπόμενες για την προηγούμενη περίοδο. Έτσι, στα βαθιά εδάφη είναι μηδενικές όταν δεν υπάρχει διάβρωση και μειώνονται κατά 10,7% σε εδάφη με διάβρωση. Στα μετρίου βάθους, οι αποδόσεις μειώνονται κατά 34,5% χωρίς και κατά 51,7% με διάβρωση. Στα αβαθή εδάφη, η μείωση, όταν δεν υπάρχει διάβρωση, φθάνει το 52,2%, ενώ οι αποδόσεις μηδενίζονται στα εδάφη με διάβρωση.

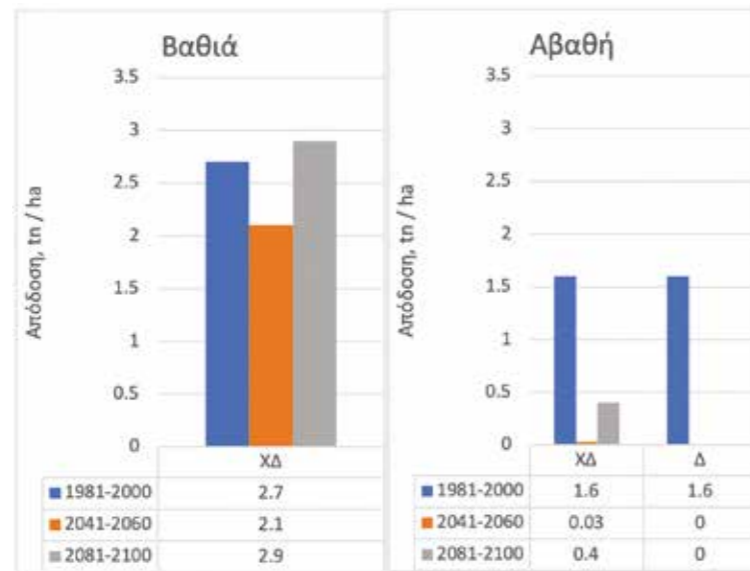
Στο σενάριο RCP8.5 (Εικ. 34β), συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, οι αποδόσεις στα βαθιά εδάφη κατά την περίοδο 2041-2060 μειώνονται κατά 25% και 21,4% χωρίς και με διάβρωση αντιστοίχως (Πίν. 12). Στα μεσαίου βάθους η μείωση χωρίς διάβρωση ανέρχεται σε 48,3%, ενώ σε εδάφη με διάβρωση αυξάνεται περαιτέρω σε 58,6%. Στα ρηχά εδάφη οι αποδόσεις της καλλιέργειας μηδενίζονται. Στην περίοδο 2081-2100 οι μειώσεις των αποδόσεων στα βαθιά εδάφη είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της προηγούμενης περιόδου: φθάνουν το 14,3% χωρίς διάβρωση και το 17,9% με διάβρωση. Στα μεσαίου βάθους, οι μειώσεις αυξάνονται σημαντικά και φθάνουν το 41,4% και το 69% σε εδάφη χωρίς και με διάβρωση αντιστοίχως. Στα ρηχά εδάφη παρατηρείται μια στοιχειώδης απόδοση $0,2 \text{ tn ha}^{-1}$ (μείωση κατά 91,3%), όταν τα εδάφη δεν είναι διαβρωμένα, και μηδενισμός της απόδοσης σε διαβρωμένα εδάφη.

Περιοχή Τρικάλων

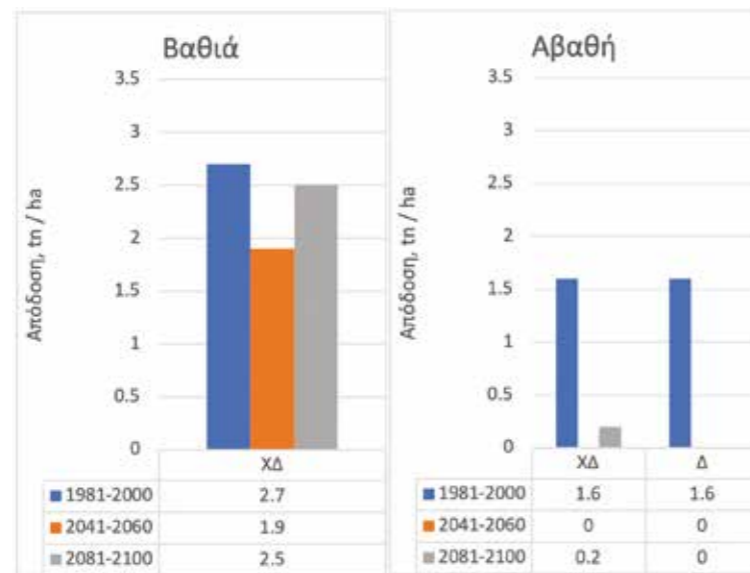
Στην Εικ. 35 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των αποδόσεων για καλλιέργεια βαμβακιού σε εδάφη με δύο διαφορετικά βάθη, μεγάλου βάθους και αβαθή, στα σενάρια RCP4.5 (Εικ. 35α) και RCP8.5 (Εικ. 35β). Δεν καταγράφηκαν εδάφη μετρίου βάθους στη συγκεκριμένη περιοχή, ενώ τα εδάφη μεγάλου βάθους, τα οποία είναι επίπεδα στη συγκεκριμένη περιοχή, δεν διατρέχουν κίνδυνο διάβρωσης. Ως εκ τούτου, για τα εδάφη αυτά δεν παρουσιάζονται στοιχεία αποδόσεων με διάβρωση.

Και στα δύο σενάρια κατά την περίοδο αναφοράς οι αποδόσεις τείνουν να μειώνονται σημαντικά από τα βαθιά στα αβαθή εδάφη. Στα μέσα και

(α)



(β)



Εικόνα 35. Προβλεπόμενες αποδόσεις για καλλιέργεια βαμβακιού στην περιοχή Τρικάλων για δύο κατηγορίες εδαφών διαφορετικού βάθους και τρεις χρονικές περιόδους (1981-2000, 2041-2060, 2081-2100). Στα αβαθή εδάφη παρουσιάζονται αποτελέσματα χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και μετά από απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5.

στα τέλη του αιώνα η επίδραση της μείωσης του βάθους και του βαθμού διάβρωσης ουσιαστικά εκμηδενίζει τις αποδόσεις.

Στο σενάριο RCP4.5, κατά την περίοδο 2041-2060 προβλέπεται μείωση των αποδόσεων στα βαθιά εδάφη κατά 22,2% συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς (Πίν. 12). Στα αβαθή εδάφη, οι αποδόσεις σχεδόν εκμηδενίζονται (μείωση κατά 98,1%) στα μη διαβρωμένα και μηδενίζονται στα διαβρωμένα εδάφη. Κατά την περίοδο 2081-2100 παρατηρείται αύξηση των αποδόσεων κατά 7,4% στα βαθιά εδάφη. Στα αβαθή εδάφη, η μείωση φθάνει το 75%, όταν δεν υπάρχει διάβρωση, ενώ οι αποδόσεις μηδενίζονται στα εδάφη με διάβρωση.

Πίνακας 12. Προβλεπόμενες ποσοστιαίες (%) μεταβολές αποδόσεων σε καλλιέργειες βαμβακιού συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000 για τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 στις περιοχές Σωτηρίου-Ζαπείου (πάνω) και Τρικάλων (κάτω) κατά τις εικοσαετίες 2041-2060 και 2081-2100. Αποτελέσματα για εδάφη βαθιά (> 100 cm), μετρίου βάθους (61-80 cm) και αβαθή (41-60 cm, 21-40 cm), μη διαβρωμένα (ΧΔ) και διαβρωμένα (Δ).

Σωτήριο και Ζάππειο						
RCP4.5						
	Βαθιά		Μετρίου βάθους		Αβαθή	
	ΧΔ	Δ	ΧΔ	Δ	ΧΔ	Δ
2041-2060	-17,9	-21,4	-44,8	-48,3	-73,9	-
2081-2100	0	-10,7	-34,5	-51,7	-52,2	-
RCP8.5						
2041-2060	-25,0	-21,4	-48,3	-58,6	-	-
2081-2100	-14,3	-17,9	-41,4	-69,0	-91,3	-
Τρίκαλα						
RCP4.5						
2041-2060	-22,2				-98,1	-
2081-2100	+7,4				-75,0	-
RCP8.5						
2041-2060	-29,6				-	-
2081-2100	-7,4				-87,5	-

Στο σενάριο RCP8.5, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, οι αποδόσεις στα βαθιά εδάφη κατά την περίοδο 2041-2060 μειώνονται κατά 29,6%, ενώ στα αβαθή μηδενίζονται (Πίν. 12). Στην περίοδο 2081-2100, οι μειώσεις των αποδόσεων στα βαθιά εδάφη είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της προηγούμενης περιόδου και φθάνουν το 7,4%. Στα αβαθή, οι αποδόσεις μειώνονται κατά 87,5% σε μη διαβρωμένα και μηδενίζονται στα διαβρωμένα εδάφη.

Γ.3.2 Παραγωγή σε επίπεδο περιοχής μελέτης

Γ.3.2.1 Καλλιέργεια σιταριού

Στον Πίν. 13 παρουσιάζονται οι μεταβολές της παραγωγής της καλλιέργειας σιταριού στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά % σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1981-2000), σύμφωνα με τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 στις τρεις περιοχές μελέτης, δηλαδή σε επιφάνεια 12100 ha ανά περιοχή.

Πίνακας 13. Οι μεταβολές της παραγωγής της καλλιέργειας σιταριού στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε απόλυτες τιμές (tn) και σε ποσοστά (%) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1981-2000), σύμφωνα με τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 στις περιοχές μελέτης. Αποτελέσματα για εδάφη χωρίς (α) και μετά την απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (β). Στο Σωτήριο έχει συνυπολογιστεί απώλεια εδάφους έκτασης 5342,80 ha λόγω αλάτωσης και στις δύο περιπτώσεις.

(α)

Περιοχές	Σενάριο	1981-2000 tn	2041-2060		2081-2100	
			tn	%	tn	%
Σωτήριο	RCP4.5	11530,24	7360,29	-36,16	7253,43	-37,09
	RCP8.5		7734,70	-32,92	9954,52	-13,67
Ζάππειο	RCP4.5	10909,56	11011,76	+0,94	10746,12	-1,50
	RCP8.5		11845,46	+8,58	15395,44	+41,12
Τρίκαλα	RCP4.5	4039,68	4588,95	+13,60	5680,93	+40,63
	RCP8.5		4788,45	+18,54	5963,21	+47,62

(β)

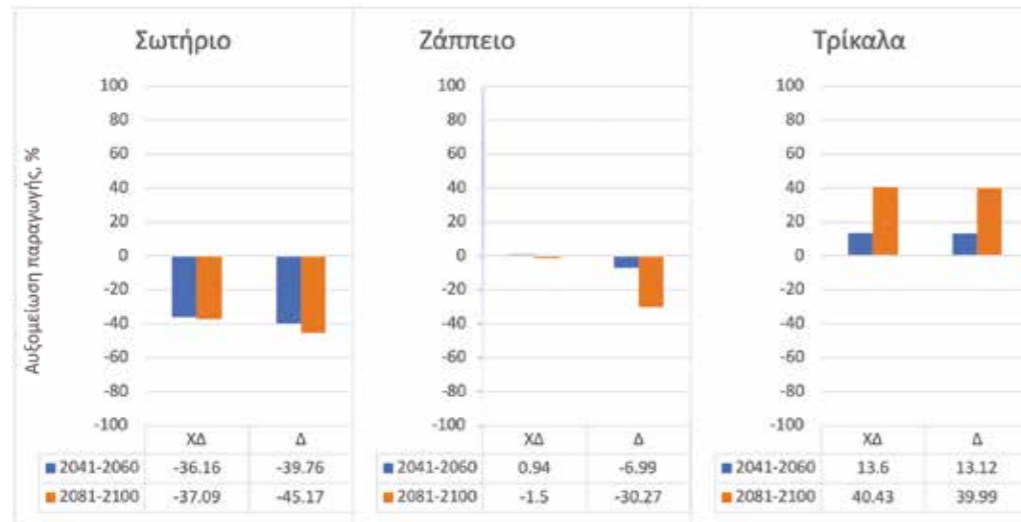
Περιοχές	Σενάριο	1981-2000 tn	2041-2060		2081-2100	
			tn	%	tn	%
Σωτήριο	RCP4.5	11530,24	6945,31	-39,76	6321,50	-45,17
	RCP8.5		7266,50	-36,98	9450,19	-18,04
Ζάππειο	RCP4.5	10909,56	10147,43	-6,99	7607,73	-30,27
	RCP8.5		10551,22	-3,28	12705,75	+16,46
Τρίκαλα	RCP4.5	4039,68	4569,66	+13,12	5655,20	+39,99
	RCP8.5		4700,51	+16,36	5884,76	+45,67

Τα δεδομένα εκτίθενται ξεχωριστά σε εδάφη χωρίς διάβρωση και σε εκείνα που έχουν υποστεί μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Στο Σωτήριο έχει επιπλέον εκτιμηθεί απώλεια καλλιεργήσιμου εδάφους έκτασης 5342,80 ha, το οποίο για τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 προβλέπεται να έχει επιβαρυνθεί με υψηλά επίπεδα αλάτωσης που θα το καταστήσουν ακατάλληλο για καλλιέργεια (βλ. Γ.2.3 παραπάνω).

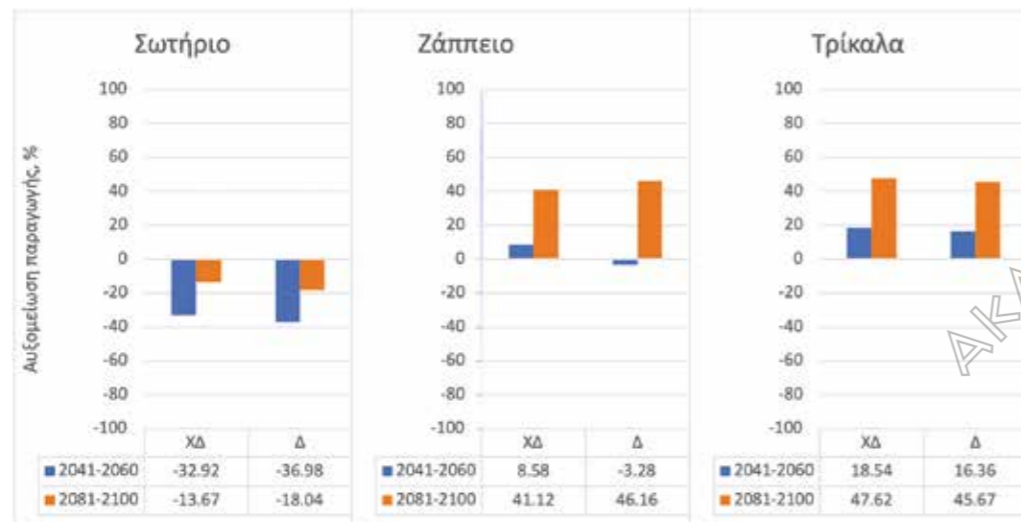
Στο Σωτήριο, σύμφωνα και με την Εικ. 36α, κατά την περίοδο 2041-2060 στο σενάριο RCP4.5 και σε εδάφη χωρίς διάβρωση προβλέπεται μείωση της παραγωγής κατά 36,16% σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Στα Τρίκαλα προβλέπεται αύξηση κατά 13,60%, ενώ στο Ζάππειο προβλέπεται οριακή αύξηση 0,94%. Σε εδάφη διαβρωμένα (Πίν. 13β), οι μειώσεις της παραγωγής στο Σωτήριο και στο Ζάππειο προβλέπεται να είναι 39,76% και 6,99 αντίστοιχα. Αντιθέτως, στα Τρίκαλα προβλέπεται αύξηση κατά 13,12%. Στην περίοδο 2081-2100, στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 13α) προβλέπεται μείωση κατά 37,09% στο Σωτήριο και οριακή μείωση κατά 1,50% στο Ζάππειο. Στα Τρίκαλα προβλέπεται αύξηση κατά 40,63%, πολύ μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίοδο. Στα διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 13β), η μείωση προβλέπεται να φθάσει στο Σωτήριο 45,17% και στο Ζάππειο 30,27%. Στα Τρίκαλα προβλέπεται αύξηση κατά 39,99%.

Στο σενάριο RCP8.5 (Εικ. 36β) η γενική εικόνα δείχνει λιγότερο αρνητικές και περισσότερο θετικές επιδράσεις, ανάλογα με την περιοχή, συγκριτικά με το ηπιότερο σενάριο. Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, το 2041-2060 στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 13α), προβλέπεται μείωση κατά 36,98% στο Σωτήριο, ενώ στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα αυξήσεις

(α)



(β)



Εικόνα 36. Προβλεπόμενες μεταβολές παραγωγής (ποσοστά % της περιόδου 1981-2000) για καλλιέργεια σιταριού στις περιοχές Σωτηρίου, Ζαππείου και Τρικάλων στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε εδάφη χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και με απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5. Στο Σωτήριο έχει συνυπολογιστεί απώλεια εδάφους έκτασης 5342,80 ha λόγω αλάτωσης, τόσο στα μη διαβρωμένα όσο και στα διαβρωμένα εδάφη.

κατά 8,58% και 18,54%, αντιστοίχως. Στα διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 13β), προβλέπονται μειώσεις κατά 36,98% στο Σωτήριο και 3,28% στο Ζάππειο, ενώ στα Τρίκαλα προβλέπεται αύξηση κατά 16,36%. Την περίοδο 2081-2100, στο Σωτήριο προβλέπεται μείωση κατά 18,04%, αλλά στο Ζάππειο και στα Τρίκαλα αυξήσεις κατά 16,46% και 45,67%, κατ' αντιστοιχία.

Γ.3.2.2 Καλλιέργεια αραβοσίτου

Στον Πίν. 14 παρουσιάζονται οι μεταβολές της παραγωγής της καλλιέργειας αραβοσίτου στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά % σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1981-2000), σύμφωνα με τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 στις τρεις περιοχές μελέτης, δηλαδή σε επιφάνεια 12100 ha ανά περιοχή. Τα δεδομένα εκτίθενται ξεχωριστά σε εδάφη χωρίς διάβρωση και σε εκείνα που έχουν υποστεί μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Στο Σωτήριο έχει επιπλέον εκτιμηθεί απώλεια καλλιεργήσιμου εδάφους έκτασης 5342,80 ha, το οποίο για τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 προβλέπεται να έχει επιβαρυνθεί με υψηλά επίπεδα αλάτωσης που θα το καταστήσουν ακατάλληλο για καλλιέργεια (βλ. Γ.2.3 παραπάνω).

Σύμφωνα με τον Πίν. 14α και την Εικ. 37α, κατά την περίοδο 2041-2060, στο σενάριο RCP4.5 και σε εδάφη χωρίς διάβρωση, προβλέπεται μείωση της παραγωγής κατά 60,09%, 36,48% και 23,13% σε Σωτήριο, Ζάππειο και Τρίκαλα, αντιστοίχως, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Σε εδάφη διαβρωμένα (Πίν. 14β), οι αντίστοιχες μειώσεις της παραγωγής είναι ελαφρά μεγαλύτερες: 61,68%, 44,34% και 24,10% σε Σωτήριο, Ζάππειο και Τρίκαλα. Στην περίοδο 2081-2100, στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 14α), οι μειώσεις στην παραγωγή προβλέπονται αντίστοιχες ή ελαφρά χαμηλότερες από την προηγούμενη περίοδο, κατά 59,17% στο Σωτήριο, 36,52% στο Ζάππειο και 8,34% στα Τρίκαλα. Στα διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 14β), η μείωση θα ανέρχεται σε 64,17% στο Σωτήριο, 60,53% στο Ζάππειο και 9,06% στα Τρίκαλα.

Στο σενάριο RCP8.5 (Εικ. 37β), η γενική εικόνα δείχνει πιο έντονες μειώσεις της παραγωγής συγκριτικά με το σενάριο RCP4.5. Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, το 2041-2060 στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 14α) προβλέπονται μειώσεις κατά 64,29% στο Σωτήριο, 50,70% στο Ζάππειο και 31,40% στα Τρίκαλα. Στα διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 14β), οι μειώσεις είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στο Σωτήριο (65,84%) και στο Ζάππειο (56,17%), ενώ στα Τρίκαλα βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα με τα μη διαβρωμένα εδάφη

(31,30%). Την περίοδο 2081-2100, οι μειώσεις είναι ελαφρά μειωμένες ή μεγαλύτερες από την προηγούμενη περίοδο και ανέρχονται σε 62,11%, 59,59% και 32,85% σε Σωτήριο, Ζάππειο και Τρίκαλα αντιστοίχως, στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 14α). Στα διαβρωμένα (Πίν. 14β) παρατηρούνται μειώσεις περίπου ανάλογες με εκείνες της προηγούμενης περιόδου στο Σωτήριο (66,70%) και στα Τρίκαλα (32,85%), και αρκετά μεγαλύτερες στο Ζάππειο (69,62%).

Πίνακας 14. Οι μεταβολές της παραγωγής της καλλιέργειας αραβοσίτου στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε απόλυτες τιμές (tn) και σε ποσοστά (%) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1981-2000), σύμφωνα με τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 στις περιοχές μελέτης. Αποτελέσματα για εδάφη πριν (α) και μετά την απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (β). Στο Σωτήριο έχει συνυπολογιστεί απώλεια εδάφους έκτασης 5342,80 ha λόγω αλάτωσης και στις δύο περιπτώσεις.

(α)

Περιοχές	Σενάριο	1981-2000 tn	2041-2060		2081-2100	
			tn	%	tn	%
Σωτήριο	RCP4.5	5162,28	2060,13	-60,09	2107,81	-59,17
	RCP8.5		1843,29	-64,29	1956,05	-62,11
Ζάππειο	RCP4.5	5235,47	3325,49	-36,48	3323,64	-36,52
	RCP8.5		2580,92	-50,70	2115,54	-59,59
Τρίκαλα	RCP4.5	16368,15	12582,49	-23,13	15002,23	-8,34
	RCP8.5		11228,23	-31,40	10991,89	-32,85

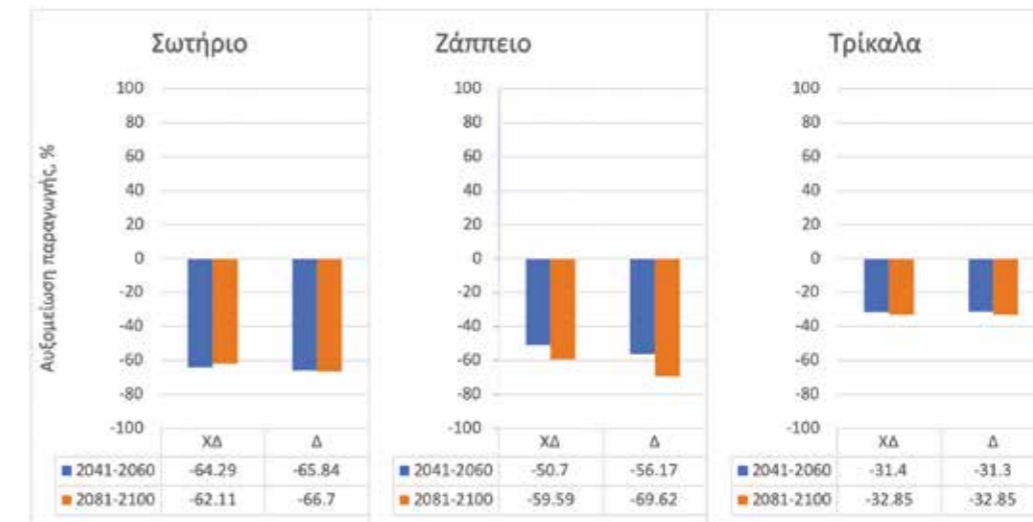
(β)

Περιοχές	Σενάριο	1981-2000 tn	2041-2060		2081-2100	
			tn	%	tn	%
Σωτήριο	RCP4.5	5162,28	1978,02	-61,68	1849,57	-64,17
	RCP8.5		1763,44	-65,84	1719,20	-66,70
Ζάππειο	RCP4.5	5235,47	2913,82	-44,34	2066,50	-60,53
	RCP8.5		2294,50	-56,17	1590,61	-69,62
Τρίκαλα	RCP4.5	16368,15	12424,07	-24,10	14885,50	-9,06
	RCP8.5		11244,91	-31,30	10991,89	-32,85

(α)



(β)



Εικόνα 37. Προβλεπόμενες μεταβολές παραγωγής (ποσοστά % της περιόδου 1981-2000) για καλλιέργεια αραβοσίτου στις περιοχές Σωτηρίου, Ζαππειού και Τρικάλων στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε εδάφη χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και με απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5. Στο Σωτήριο έχει συνυπολογιστεί απώλεια εδάφους έκτασης 5342,80 ha λόγω αλάτωσης, τόσο στα μη διαβρωμένα όσο και στα διαβρωμένα εδάφη.

Γ.3.2.3 Καλλιέργεια βαμβακιού

Στον Πίν. 15 παρουσιάζονται οι μεταβολές της παραγωγής της καλλιέργειας βαμβακιού στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε απόλυτες τιμές και ως ποσοστά % σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1981-2000), σύμφωνα με τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 στις τρεις περιοχές μελέτης, δηλαδή σε επιφάνεια 12100 ha ανά περιοχή. Τα δεδομένα εκτίθενται ξεχωριστά σε εδάφη χωρίς διάβρωση και σε εκείνα που έχουν υποστεί μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Στο Σωτήριο έχει επιπλέον εκτιμηθεί απώλεια καλλιεργήσιμου εδάφους έκτασης 5342,80 ha, το οποίο για τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 προβλέπεται να έχει επιβαρυνθεί με υψηλά επίπεδα αλάτωσης, που θα το καταστήσουν ακατάλληλο για καλλιέργεια (βλ. Γ.2.3 παραπάνω).

Σύμφωνα με τον Πίν. 15α και την Εικ. 38α, κατά την περίοδο 2041-2060, στο σενάριο RCP4.5 και σε εδάφη χωρίς διάβρωση, προβλέπεται σημαντική μείωση της παραγωγής κατά 61,17% στο Σωτήριο και κατά 50,11% στο Ζάππειο, ενώ στα Τρίκαλα προβλέπεται μικρότερη (26,52%). Σε εδάφη διαβρωμένα (Πίν. 15β), οι μειώσεις στα Τρίκαλα βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα (26,58%), ενώ στο Σωτήριο (65,41%) και στο Ζάππειο (68,01%) είναι πιο αυξημένες σε σχέση με τα μη διαβρωμένα εδάφη. Στην περίοδο 2081-2100, στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 5), οι μειώσεις στην παραγωγή προβλέπονται χαμηλότερες από την προηγούμενη περίοδο στο Σωτήριο (53,83%) και στο Ζάππειο (44,07%), ενώ στα Τρίκαλα προβλέπεται αύξηση κατά 4,69%. Στα διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 15β), προβλέπονται σημαντικές μειώσεις κατά 77,31% στο Ζάππειο και κατά 62,40% στο Σωτήριο και αύξηση κατά 3,86% στα Τρίκαλα.

Στο σενάριο RCP8.5 (Εικ. 38β) η γενική εικόνα παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερες μειώσεις στην παραγωγή συγκριτικά με το σενάριο RCP4.5. Σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, το 2041-2060, στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 15α), προβλέπονται μειώσεις κατά 64,50% στο Σωτήριο, 61,54% στο Ζάππειο και 31,95% στα Τρίκαλα. Στα διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 15β) οι μειώσεις, συγκριτικά με τα μη διαβρωμένα, είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στο Σωτήριο (65,66%) και στο Ζάππειο (66,25%), αλλά στα Τρίκαλα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (31,95%). Την περίοδο 2081-2100 οι μειώσεις

είναι μικρότερες από την προηγούμενη περίοδο στο Σωτήριο (62,38%) και στα Τρίκαλα (10,05%), αλλά μεγαλύτερες (70,91%) στο Ζάππειο στα μη διαβρωμένα εδάφη (Πίν. 15α). Στα διαβρωμένα (Πίν. 15β), προβλέπονται μειώσεις ανάλογες (Σωτήριο, 66,44%), σημαντικά μικρότερες (Τρίκαλα, 10,47%) και σημαντικά μεγαλύτερες (Ζάππειο, 81,43%) σε σχέση με εκείνες της προηγούμενης περιόδου.

Πίνακας 15. Οι μεταβολές της παραγωγής της καλλιέργειας βαμβακιού στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε απόλυτες τιμές (tn) και σε ποσοστά (%) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1981-2000), σύμφωνα με τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 στις περιοχές μελέτης. Αποτελέσματα για εδάφη πριν (α) και μετά την απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (β).

(α)

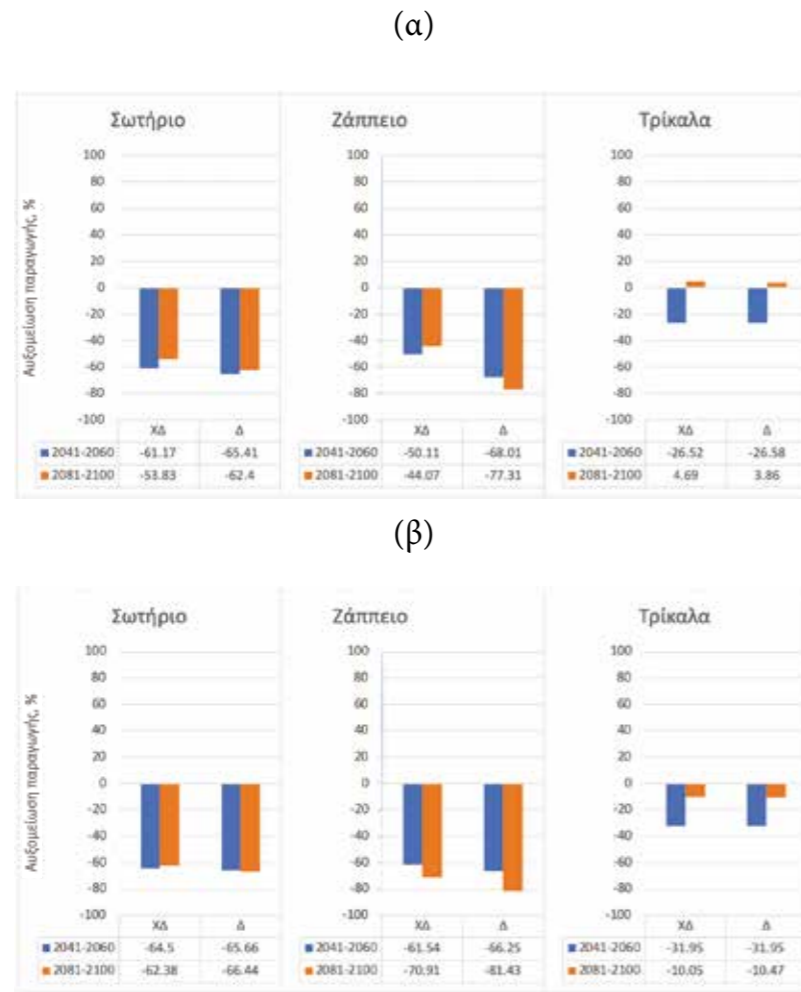
Περιοχές	Σενάριο	1981-2000 tn	2041-2060		2081-2100	
			tn	%	tn	%
Σωτήριο	RCP4.5	4330,99	1681,87	-61,17	1999,67	-53,83
	RCP8.5		1537,69	-64,50	1629,11	-62,38
Ζάππειο	RCP4.5	4242,33	2116,42	-50,11	2372,69	-44,07
	RCP8.5		1631,48	-61,54	1234,03	-70,91
Τρίκαλα	RCP4.5	4741,81	3484,27	-26,52	4963,97	+4,69
	RCP8.5		3226,60	-31,95	4265,11	-10,05

(β)

Περιοχές	Σενάριο	1981-2000 tn	2041-2060		2081-2100	
			tn	%	tn	%
Σωτήριο	RCP4.5	4330,99	1497,90	-65,41	1628,36	-62,40
	RCP8.5		1487,31	-65,66	1453,57	-66,44
Ζάππειο	RCP4.5	4242,33	1357,30	-68,01	962,59	-77,31
	RCP8.5		1431,94	-66,25	787,71	-81,43
Τρίκαλα	RCP4.5	4741,81	3481,33	-26,58	4924,81	+3,86
	RCP8.5		3226,60	-31,95	4245,53	-10,47

Γ.3.3 Παραγωγή σε επίπεδο περιφέρειας

Η παραγωγή των τριών καλλιεργειών σε επίπεδο Περιφέρειας υπολογίστηκε στη συνολική επιφάνεια των εκτάσεων της Θεσσαλίας που έχουν χαρτογραφηθεί (Εικ. 28), με αναγωγή στα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ του 2018.



Εικόνα 38. Προβλεπόμενες μεταβολές παραγωγής (ποσοστά % της περιόδου 1981-2000) για καλλιέργεια αραβοσίτου στις περιοχές Σωτηρίου, Ζαπτείου και Τρικάλων στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε εδάφη χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και με απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5. Στο Σωτήριο έχει συνυπολογιστεί απώλεια εδάφους έκτασης 5342,80 ha λόγω αλάτωσης, τόσο στα μη διαβρωμένα όσο και στα διαβρωμένα εδάφη.

Πίνακας 16. Προβλέψεις της παραγωγής των καλλιεργειών σιταριού, αραβοσίτου και βαμβακιού (tn) στην Περιφέρεια Θεσσαλίας κατά τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 στα σενάρια εκπομπής RCP4.5 και RCP8.5, καθώς και οι ποσοστιαίες μεταβολές τους (%) συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000. (α) Εδάφη χωρίς διάβρωση, με συνυπολογισμό απωλειών λόγω αλάτωσης. (β) Μετά από απώλεια εδάφους λόγω αλάτωσης και διάβρωσης.

(α)

Καλλιέργειες	1981-2000 tn	RCP4.5				RCP8.5			
		2041-2060 tn	%	2081-2100 tn	%	2041-2060 tn	%	2081-2100 tn	%
Σιτάρι	323878,7	341633,2	+5,48	367177,3	+13,37	308146,6	-4,86	439471,1	+35,69
Αραβόσπος	240539,9	178370,5	-25,85	183785,9	-23,59	140339,2	-41,66	146928,0	-38,92
Βαμβάκι	219803,4	142961,3	-34,96	180268,4	-17,99	144746,0	-34,15	148859,3	-32,28

(β)

Καλλιέργειες	1981-2000 tn	RCP4.5				RCP8.5			
		2041-2060 tn	%	2081-2100 tn	%	2041-2060 tn	%	2081-2100 tn	%
Σιτάρι	323878,7	339130,0	+4,71	367177,3	+13,37	300533,4	-7,21	427797,5	+32,09
Αραβόσπος	240539,9	174693,4	-27,37	177499,4	-26,21	138133,0	-42,57	143725,4	-40,25
Βαμβάκι	219803,4	138103,9	-37,17	172320,0	-21,60	144746,0	-34,15	145826,5	-33,66

Η Εικ. 39 και ο Πίν. 16 περιλαμβάνουν τις προβλέψεις της παραγωγής στα μέσα και στα τέλη του αιώνα, καθώς και τις ποσοστιαίες μεταβολές τους σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαθέσιμες καλλιεργήσιμες εκτάσεις για τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 έχουν μειωθεί κατά 31386,7 ha, όσο υπολογίζονται οι γαίες που θα έχουν υποβαθμιστεί με υψηλό βαθμό αλάτωσης σε ολόκληρη τη Θεσσαλία. Η έκταση αυτή εντοπίζεται σε κυρίως εδάφη κακώς στραγγιζόμενα, πεδινά και με βάθος μεγαλύτερο από 100 cm.

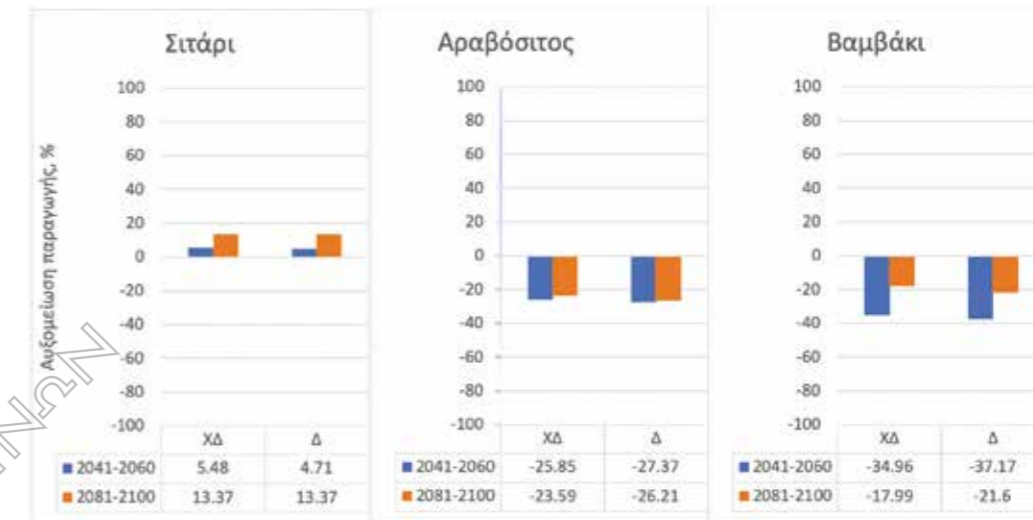
Οι προβλέψεις δείχνουν αύξηση της παραγωγής κατά κανόνα στο σιτάρι και σαφή μείωση στον αραβόσιτο και στο βαμβάκι. Στο σενάριο RCP4.5 παρατηρείται αύξηση της παραγωγής σιταριού κατά 5,48% και 13,37%

κατά το 2041-2060 και 2081-2100 αντιστοίχως σε εδάφη χωρίς διάβρωση (Πίν. 16α). Η παραγωγή της καλλιέργειας αραβοσίτου προβλέπεται να μειωθεί κατά 25,85% και 23,59%, ενώ του βαμβακιού κατά 34,96% και 17,99% στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους. Οι υπολογισμοί για εδάφη που έχουν υποστεί και διάβρωση (Πίν. 16β) δείχνουν ίσες ή μικρότερες αυξήσεις στην παραγωγή σιταριού κατά το 2041-2060 (4,71% το 2041-2060 και 13,37% το 2081-2100) και μεγαλύτερες μειώσεις στην παραγωγή αραβοσίτου (27,37% και 26,21%) και βαμβακιού (37,17% και 21,60%) κατά το 2041-2060 και 2081-2100, αντιστοίχως, σε σύγκριση με τα μη διαβρωμένα εδάφη.

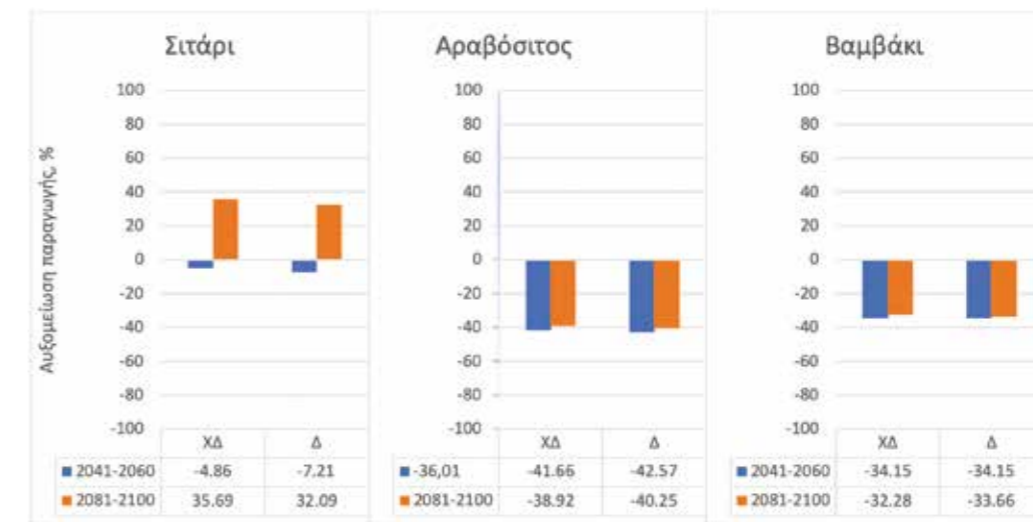
Για το σενάριο RCP8.5, σε μη διαβρωμένα εδάφη, προβλέπεται μικρή μείωση στην παραγωγή του σιταριού (4,86%) κατά το 2041-2060, αλλά σημαντική αύξηση (35,69%) κατά το 2081-2100 (Πίν. 16α). Οι μειώσεις στην παραγωγή αραβοσίτου προβλέπονται μεγαλύτερες απ' ό,τι στο σενάριο RCP4.5, 41,66% και 38,92% κατά το 2041-2060 και 2081-2100, κατ' αντιστοιχία. Το ίδιο περίπου ισχύει και για τις μειώσεις στην παραγωγή βαμβακιού (34,15% και 32,28%, αντιστοίχως). Όταν συνυπολογίζεται η διάβρωση (Πίν. 16β), η μείωση στην παραγωγή σιταριού είναι ελαφρώς μεγαλύτερη (7,21% το 2041-2060) και η αύξηση μικρότερη (32,09% το 2081-2100) απ' ό,τι στα μη διαβρωμένα εδάφη. Στον αραβόσιτο και στο βαμβάκι οι μειώσεις είναι ίσες ή ελαφρώς μεγαλύτερες συγκριτικά με τα μη διαβρωμένα εδάφη.

Η Εικ. 39 δείχνει συνοπτικά τις ποσοστιαίες μεταβολές στην παραγωγή των τριών καλλιεργειών στη Θεσσαλία συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1981-2000. Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι στο σενάριο RCP4.5 (Εικ. 39α) για την καλλιέργεια σιταριού, του οποίου η παραγωγή γενικά θα αυξηθεί, η θετική επίδραση προβλέπεται μεγαλύτερη το 2081-2100. Για τις καλλιέργειες αραβοσίτου και βαμβακιού, οι προβλεπόμενες μειώσεις θα είναι μικρότερες το 2081-2100 συγκριτικά με το 2041-2060. Ανάλογη παρατήρηση ισχύει για το σενάριο RCP8.5 (Εικ. 39β), όπου όμως η θετική επίδραση στα τέλη του αιώνα είναι σημαντικά μεγαλύτερη για το σιτάρι, ενώ οι προβλεπόμενες μειώσεις μεταξύ των περιόδων 2041-2060 και 2081-2100 τείνουν να εξισωθούν.

(α)



(β)



Εικόνα 39. Προβλεπόμενες μεταβολές παραγωγής (ποσοστά % της περιόδου 1981-2000) των καλλιεργειών σιταριού, αραβοσίτου και βαμβακιού στην περιφέρεια Θεσσαλίας στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 σε εδάφη χωρίς διάβρωση (ΧΔ) και με απώλεια εδάφους λόγω διάβρωσης (Δ). (α) Σενάριο RCP4.5. (β) Σενάριο RCP8.5. Έχει συνυπολογιστεί απώλεια εδάφους έκτασης 31386,7 ha λόγω αλάτωσης, τόσο στα μη διαβρωμένα όσο και στα διαβρωμένα εδάφη.

Δ. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Δ.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

ΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ των κύριων μετεωρολογικών παραμέτρων έδειξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιόδων μελέτης και των σεναρίων εκπομπής. Οι διαφοροποιήσεις ήταν κατά κανόνα σημαντικά μικρότερες μεταξύ των περιοχών μελέτης.

Σε σύγκριση με την περίοδο αναφοράς, οι μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα στο σενάριο RCP4.5 προβλέπονται να αυξηθούν κατά 1,63 °C στην περίοδο 2041-2060 και κατά 1,85 °C το 2081-2100 κατά μέσο όρο σε όλες τις περιοχές. Στο σενάριο RCP8.5 οι αντίστοιχες αυξήσεις προβλέπονται να φθάσουν 2,26 °C το 2041-2060 και να ανέλθουν δραματικά σε 4,98 °C το 2081-2100.

Η αύξηση των ελαχίστων θερμοκρασιών προβλέπεται να κυμανθεί στα ίδια επίπεδα με αυτά των μεγίστων, δηλαδή κατά 1,60 και 1,84 °C κατά το 2041-2060 και 2081-2100 αντιστοίχως για το σενάριο RCP4.5 και κατά 2,25 και 4,84 °C κατά το 2041-2060 και 2081-2100 αντιστοίχως για το σενάριο RCP8.5.

Από τις τρεις περιοχές που μελετήθηκαν, η περιοχή των Τρικάλων παρουσίασε ελαφρά μεγαλύτερες αυξήσεις της θερμοκρασίας από τις άλλες δύο, οι οποίες δεν διαφοροποιήθηκαν μεταξύ τους.

Σε ό,τι αφορά τη βροχόπτωση, οι διαφοροποιήσεις κυμάνθηκαν σε χαμηλά επίπεδα στο σενάριο RCP4.5: για το 2041-2060 από αύξηση κατά 31,72 mm (8,69%) έως μείωση κατά 14,80 mm (4,01%), ενώ για το 2081-2100 από αύξηση κατά 29,57 mm (8,1%) μέχρι μείωση κατά 8,45 mm (2,32%). Αντιθέτως, για το σενάριο RCP8.5 παρατηρήθηκαν μειώσεις στη βροχόπτωση σε όλες τις περιπτώσεις. Για το 2041-2060 οι μειώσεις κυμάνθηκαν από 21,25 (5,82%) μέχρι 62,19 mm (13,58%), ενώ για το 2081-2100 σε σαφώς υψηλότερα επίπεδα, δηλαδή από 69,73 (19,11%) μέχρι 122,19 mm (26,67%). Δεν παρουσιάστηκε κάποια συστηματική τάση διαφοροποίησης ως προς τη βροχόπτωση μεταξύ των περιοχών.

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή παρουσίασε αύξηση σε όλες τις περιπτώσεις. Στο σενάριο RCP4.5 οι ημερήσιες αυξήσεις το 2041-2060 κυμάνθηκαν από 0,34 (8,3%) μέχρι 0,68 mm (17,3%), ενώ το 2081-2100 σε ανάλογα επίπεδα (από 0,30 μέχρι 0,67 mm). Οι αυξήσεις ήταν σαφώς μεγαλύτερες στο



ΑΚΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΑΙ

σενάριο RCP8.5 και κυμάνθηκαν από 0,47 (11,4%) μέχρι 0,80 mm (20,4%) το 2041-2060 και από 1,04 (25,3%) μέχρι 1,33 mm (33,9%) το 2081-2100. Γενικά τις μικρότερες τιμές στις αυξήσεις της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής παρουσίαζε συστηματικά η περιοχή του Ζαπτείου.

Για την περίοδο αναφοράς, η σύγκριση των κλιματικών στοιχείων που προέρχονται από το μοντέλο με τα αντίστοιχα δεδομένα της ΕΜΥ οδηγεί στα εξής συμπεράσματα: αναφορικά με τις θερμοκρασίες του αέρα, τα στοιχεία της ΕΜΥ βρίσκονται πολύ κοντά σε εκείνα του μοντέλου, τόσο ως προς τις μέγιστες όσο και ως προς τις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες. Τα στοιχεία της ΕΜΥ δίνουν μέγιστες θερμοκρασίες ελαφρώς χαμηλότερες κατά 0,1 έως 1,5 °C συγκριτικά με το μοντέλο, ενώ οι ελάχιστες θερμοκρασίες κυμαίνονταν από υψηλότερες κατά 0,6 έως χαμηλότερες κατά 1,85 °C συγκριτικά με το μοντέλο. Σε ό,τι αφορά τη βροχόπτωση, τα στοιχεία της ΕΜΥ δεν αποκλίνουν σημαντικά από τα αντίστοιχα του μοντέλου για τις περιοχές του Σωτηρίου (διαφορά +51,06 mm ή 12,3%) και του Ζαπτείου (διαφορά -42,13 mm ή 10,1%). Σημαντική απόκλιση παρατηρήθηκε όμως στα Τρίκαλα, όπου οι υπολογισμοί του μοντέλου υστερούσαν κατά 343,98 mm έναντι εκείνων της ΕΜΥ. Για τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, παρατηρήθηκε συστηματική υστέρηση (από 1,43 μέχρι 1,86 mm) των δεδομένων που προέκυπταν από τους υπολογισμούς βάσει των στοιχείων της ΕΜΥ συγκριτικά με εκείνα που υπολογίζονταν από το μοντέλο.

Συμπερασματικά, για το σενάριο RCP4.5 οι αναμενόμενες διαφοροποιήσεις σε βάθος χρόνου εστιάζονται κυρίως στις μεταβολές τις θερμοκρασίας, οι οποίες αναμένονται να προσεγγίσουν τους 2 °C έως τα τέλη του αιώνα. Οι επιδράσεις στο υδατικό ισοζύγιο θα συντελεστούν κυρίως μέσω της αύξησης της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, η οποία θα προκαλέσει αυξημένες απώλειες νερού από τις καλλιέργειες, δεδομένου ότι δεν αναμένονται σημαντικές μειώσεις στο ετήσιο ύψος βροχής. Αντιθέτως, για το σενάριο RCP8.5 οι αυξήσεις στις μέγιστες και στις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες αναμένονται ιδιαίτερα έντονες τόσο στα μέσα (θα ξεπεράσουν τους 2 °C) όσο και στα τέλη του αιώνα (θα προσεγγίσουν τους 5 °C). Παράλληλα, αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά τα υδατικά ελλείμματα ως αποτέλεσμα τόσο της μείωσης στη βροχόπτωση όσο και της αύξησης στις απώλειες νερού, με αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

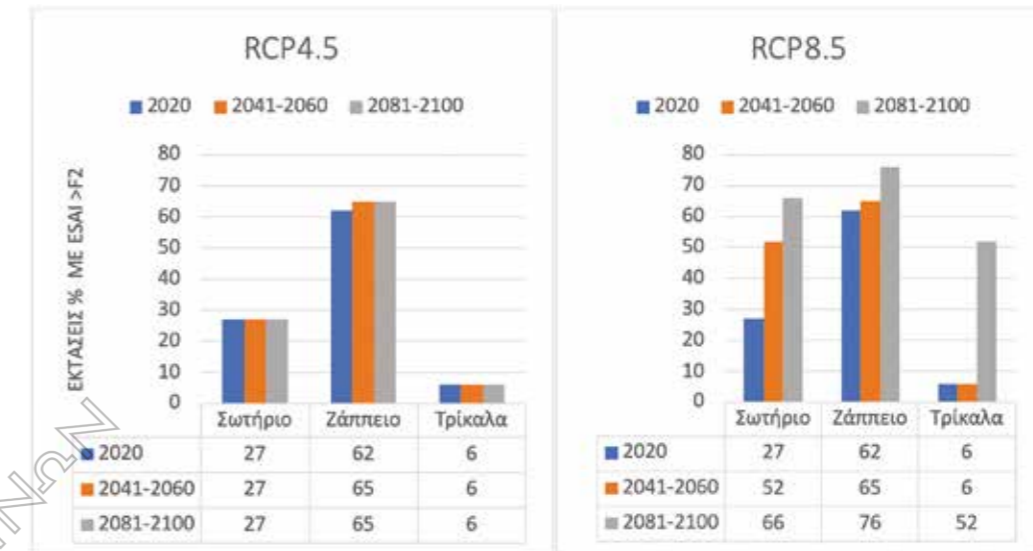
Δ.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ερημοποίηση των εδαφών είναι το αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης παραγόντων που σχετίζονται με χαρακτηριστικά του εδάφους, του κλίματος, της βλάστησης και του τρόπου διαχείρισης (Kosmas et al., 1999). Επομένως, η αλλαγή του κλίματος αναμένεται να επηρεάσει και την πορεία υποβάθμισης των εδαφικών πόρων τόσο άμεσα όσο και έμμεσα, μέσω των μεταβολών στη βλάστηση (φυσική ή/και καλλιεργειών) και στη διαχείριση. Ο τύπος της αυτοφυούς βλάστησης, αλλά και σημαντικά χαρακτηριστικά της, όπως ο βαθμός φυτοκάλυψης και η έκταση του ριζικού συστήματος, συνδέονται άμεσα με το κλίμα που θα επικρατήσει. Με το κλίμα επίσης συνδέεται και η επιλογή του είδους της καλλιέργειας, καθώς και ο τρόπος διαχείρισής της (π.χ. ξηρική ή αρδευόμενη, χειμερινή ή ανοιξιάτικη, ετήσια ή πολυετής κτλ.). Είναι προφανές ότι οποιαδήποτε προσπάθεια μελλοντικής εκτίμησης και ερμηνείας των επιδράσεων του κλίματος στην ποιότητα των γαιών πρέπει να συνεκτιμήσει όλους τους παραπάνω παράγοντες. Λεπτομερείς αναλύσεις των τρόπων με τους οποίους η αλλαγή του κλίματος αναμένεται να εντείνει τους ρυθμούς ερημοποίησης των εδαφών εκτίθενται, ενδεικτικά, στις εργασίες των Williams & Balling (1996) και Sivakumar (2007). Ωστόσο, συγκεκριμένα παραδείγματα αλληλεπίδρασης της κλιματικής αλλαγής με στοιχεία που περιγράφουν την ένταση υποβάθμισης των γαιών απουσιάζουν μέχρι στιγμής από τη βιβλιογραφία.

Σημαντικά εργαλεία, που μας επιτρέπουν στην παρούσα εργασία μια περισσότερο ποσοτική εκτίμηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στην ένταση ερημοποίησης, αποτελούν αφ' ενός η δυνατότητα πρόβλεψης των κλιματικών παραμέτρων σε βάθος χρόνου με τη βοήθεια ενός σύγχρονου περιοχικού μετεωρολογικού μοντέλου και αφ' ετέρου η αξιοποίηση του σύνθετου δείκτη εκτίμησης της περιβαλλοντικής ευαισθησίας περιοχών στην ερημοποίηση (ESAI). Έτσι, είναι δυνατή και μια εκτίμηση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος στον βαθμό περιβαλλοντικής ευαισθησίας των γαιών, όπως αυτός καθορίζεται στον Πίν. 6. Ένα εξίσου σημαντικό εργαλείο στη συναγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων αποτελούν τα λεπτομερή στοιχεία που μας παρέχουν οι υφιστάμενοι εδαφολογικοί χάρτες για τις εδαφικές μονάδες που περιλαμβάνονται και στις τρεις υπό μελέτη περιοχές της Θεσσαλίας.

Από τις Εικ. 21-26 προκύπτουν διαφορές στις εκτιμήσεις των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στον βαθμό τρωτότητας των εδαφικών μονάδων, ανάλογα με την εξεταζόμενη περιοχή και το σενάριο εκπομπών. Ένας τρόπος απεικόνισης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στον βαθμό ερημοποίησης των εδαφών είναι μέσω της μεταβολής των ποσοστών των εδαφικών μονάδων που μεταπίπτουν σε βάθος χρόνου σε υψηλότερη κατηγορία κινδύνου από αυτήν στην οποία είχαν αρχικά ενταχθεί με βάση τα δεδομένα του Πίν. 6. Στην Εικ. 40 παρουσιάζονται τα ποσοστά αυτά για περιοχές με τιμές του ESAI μεγαλύτερες του 1,32, δηλαδή για τις υποκλάσεις F3, C1, C2 και C3 (περιοχές κρίσιμες και ακραία ευαίσθητες για ερημοποίηση).

Για το σενάριο RCP4.5 φαίνεται ότι στην πεδινή περιοχή των Τρικάλων τα ποσοστά των εδαφών που υπόκεινται σε κίνδυνο ερημοποίησης βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα και δεν διατρέχουν κίνδυνο περαιτέρω υποβάθμισης έως τα τέλη του αιώνα. Αντίθετα, στη λοφώδη περιοχή του Ζαππείου τα ήδη μεγάλα ποσοστά εδαφών υψηλού κινδύνου ερημοποίησης (62%), μεταξύ των οποίων πολλά στο ανώτατο επίπεδο, θα αυξηθούν περαιτέρω μέχρι το 2041-2060. Για την περιοχή του Σωτηρίου τα υφιστάμενα σχετικά υψηλά ποσοστά (27%) δεν αναμένεται να αυξηθούν έως το 2100. Η εικόνα διαφοροποιείται ριζικά και προς το χειρότερο στο σενάριο RCP8.5, αφού σε όλες τις περιοχές αναμένεται σημαντική αύξηση στα ποσοστά των εδαφών που θα εκτεθούν σε αυξημένο κίνδυνο ερημοποίησης. Ακόμη και στην πεδινή περιοχή των Τρικάλων προβλέπεται σημαντική αύξηση του ποσοστού των εδαφικών μονάδων που χαρακτηρίζονται ως ακραία ευαίσθητες (υποκλάση F3) στην περίοδο 2081-2100. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι ο συνδυασμός των υψηλών θερμοκρασιών και των αυξημένων υδατικών ελλειμμάτων που συνεπάγεται το σενάριο αυτό θα συντελέσει στη δραματική αύξηση των κινδύνων υποβάθμισης των εδαφών μέσω αυξημένης διάσπασης της οργανικής ουσίας, μείωσης της μικροβιακής δραστηριότητας, υποβάθμισης της εδαφικής δομής, αύξησης της υδατικής απορροής, αύξησης της αλάτωσης και μείωσης της φυτοκάλυψης (Le Houérou, 1996· Sivakumar, 2007· Webb et al., 2017). Στους παράγοντες αυτούς πρέπει να προστεθεί και ο ανορθολογικός τρόπος διαχείρισης των γαιών, ο οποίος έχει ήδη προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των εδαφών σε πολλές περιοχές της χώρας μας (Kosmas et al., 1997).



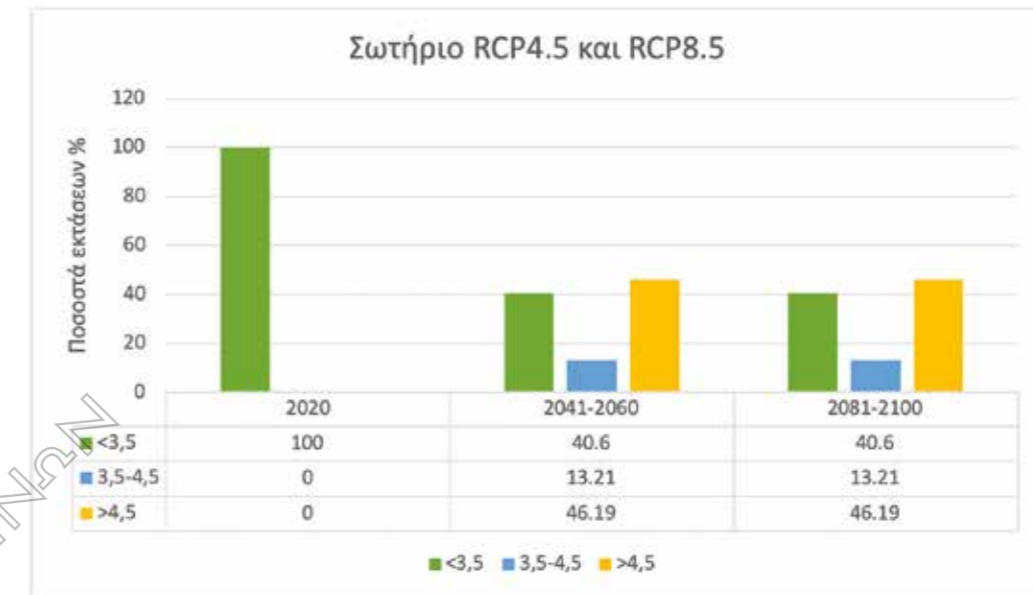
Εικόνα 40. Τα ποσοστά εδαφικών μονάδων στις τρεις περιοχές μελέτης (%) με τιμές του δείκτη ESAI > 1,32 (υποκλάσεις F3, C1, C2, C3) με τα σημερινά δεδομένα, καθώς και τα προβλεπόμενα στις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100 για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5.

Στην ένταση του φαινομένου της ερημοποίησης συντελούν η μηχανική και η υδατική διάβρωση, οι οποίες οδηγούν στη μείωση του βάθους του εδάφους και στην υποβάθμιση της γονιμότητάς του μέσω της απομάκρυνσης του γόνιμου επιφανειακού στρώματος. Από την ανάλυση που βασίστηκε στην κατανομή των γαιών των περιοχών έρευνας ανάλογα με το βάθος τους (Εικ. 27) προέκυψε ότι η απώλεια εδάφους που προβλέπεται να υπάρξει και στις τρεις περιοχές στα μέσα και στα τέλη του αιώνα εντοπίζεται κυρίως στα εδάφη με βάθος μικρότερο από 80 cm, δηλαδή σε εδάφη επικλινών περιοχών που είχαν ήδη υποστεί διάβρωση εδώ και αρκετές δεκαετίες. Το υψηλότερο ποσοστό των εδαφών αυτών εντοπίζεται στο Ζάππειο, όπου επικρατούν λοφώδεις σχηματισμοί (Εικ. 28). Στη συγκεκριμένη περιοχή, το ποσοστό των εδαφών με βάθος μικρότερο από 60 cm προβλέπεται να φθάσει το 38% του συνόλου το 2060 και το 68,94% το 2100. Είναι χαρακτηριστικό ότι, τόσο στην ίδια περιοχή όσο και στο Σωτήριο και στα Τρίκαλα, δεν προβλέπεται διαχρονικά μείωση βάθους στις πεδινές εδαφικές μονάδες με βάθος μεγαλύτερο από 80 cm. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να υπάρξει ειδική διαχείριση των επικλινών γαιών, ώστε να αποφευχθεί η πλήρης υποβάθμιση και η εν τέλει εγκατάλειψή τους. Το γεγονός ότι η προοδευτική μείωση του εδαφικού βάθους στις ευάλωτες

γαίες δεν παρουσίασε διαφοροποίηση μεταξύ των δύο σεναρίων εκπομπής υποδηλώνει ότι το φαινόμενο της διάβρωσης δεν οφείλεται τόσο στις μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων, όσο κυρίως στον διαχρονικά προβληματικό τρόπο διαχείρισης των γαιών αυτών, η αρνητική επίδραση του οποίου δρα σωρευτικά έως τα τέλη του αιώνα.

Εκτός από τη διάβρωση, σημαντικός παράγοντας που συντελεί στην ερημοποίηση είναι η αλάτωση του εδάφους. Στην παρούσα εργασία έγινε εκτίμηση του κινδύνου αλάτωσης μόνο στην περιοχή του Σωτηρίου, επειδή τα υδρομορφικά χαρακτηριστικά των εδαφικών μονάδων στα χαμηλότερα σημεία του αλλουβιακού πεδίου (ατελής ή κακή αποστράγγιση) ευνοούν συσσώρευση αλάτων μέσω φυσικών διεργασιών (πρωτογενής αλάτωση). Τον κίνδυνο αλάτωσης στη συγκεκριμένη περιοχή αυξάνει δυσανάλογα η μικρή απόστασή της από την ακτογραμμή, η οποία είναι πολύ μικρότερη από τις άλλες δύο περιοχές μελέτης (Εικ. 1 και 28), γεγονός που ευνοεί και την υφαλμύρωση του εδαφικού νερού. Τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στην Εικ. 29 καταδεικνύουν τον κίνδυνο υποβάθμισης που διατρέχουν οι εδαφικές μονάδες στη συγκεκριμένη περιοχή. Με βάση τον υπολογισμό του δείκτη αλάτωσης SR (εξ. 9), η κλιματική αλλαγή θα επιδράσει στον κίνδυνο αλάτωσης των εδαφών μέσω της αύξησης στη δυνητική εξατμισοδιαπνοή και με μια αναμενόμενη αύξηση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού άρδευσης (βλ. παραπάνω Β.3.4). Στην Εικ. 41 παρουσιάζεται η διαχρονική πορεία των ποσοστών των εκτάσεων με διαφορετικό βαθμό κινδύνου αλάτωσης.

Προκύπτει σημαντική μείωση των ποσοστών μηδενικού έως μέτριου κινδύνου κατά 60% και ταυτόχρονη αύξηση των ποσοστών υψηλού και πολύ υψηλού κινδύνου από μηδενικές τιμές σε 13,21 και 46,91%, αντιστοίχως, έως το 2041-2060. Όπως και στην περίπτωση της διάβρωσης, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο σεναρίων εκπομπής. Επίσης, δεν παρατηρούνται διαφορές ανάμεσα στα μέσα και στα τέλη του αιώνα. Τα δύο αυτά στοιχεία υποδηλώνουν την υψηλή τρωτότητα των ευάλωτων εδαφικών μονάδων στην περιοχή (μικρού και μέτριου κινδύνου με τα σημερινά δεδομένα), οι οποίες, ακόμη και στις προβλεπόμενες ηπιότερες κλιματικές συνθήκες της περιόδου 2041-2060 και του ηπιότερου σεναρίου εκπομπής, μεταπίπτουν ραγδαία στις κατηγορίες υψηλού και πολύ υψηλού κινδύνου, με αποτέλεσμα να καταστούν εν τέλει ακατάλληλες για



Εικόνα 41. Ποσοστά εκτάσεων (%) εδαφικών μονάδων στην περιοχή Σωτηρίου με διαφορετική διαβάθμιση κινδύνου αλάτωσης με βάση τον συντελεστή SR κατά τον παρόντα χρόνο και τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100. Απεικονίζονται εδάφη με μηδενικό έως μέτριο ($SR < 3,5$), υψηλό ($SR = 3,5-4,5$) και πολύ υψηλό κίνδυνο ($SR > 4,5$).

καλλιέργεια. Με βάση τα στοιχεία αυτά, οι εκτάσεις πολύ υψηλού κινδύνου αλάτωσης δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς παραγωγής των καλλιεργειών στην περιοχή του Σωτηρίου, αλλά και της περιφέρειας Θεσσαλίας συνολικά κατά τα μέσα και τα τέλη του αιώνα.

Δ.3 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Από τις Εικ. 30-35 και τους Πίν. 10-12 προκύπτει ότι η αλλαγή του κλίματος προβλέπεται να αυξήσει τις αποδόσεις του σιταριού και να μειώσει τις αποδόσεις του αραβοσίτου και του βαμβακιού. Σε εδάφη με μεγάλο βάθος (> 100 cm), όπου δεν υπάρχει περιορισμός του ριζικού συστήματος, οι αυξήσεις των αποδόσεων στο σιτάρι εκτιμάται ότι θα κυμανθούν από 17,4 έως 68,6% ανάλογα με το σενάριο εκπομπής και τη χρονική περίοδο. Στον αραβόσιτο θα παρατηρηθούν μειώσεις από 6,5 έως 29,3%. Στο βαμβάκι θα κυμανθούν από μικρή αύξηση 6% έως μείωση κατά 29,6%.

Θετικές επιδράσεις στις αποδόσεις του σιταριού σε ανάλογα ποσοστά έχουν αναφερθεί για την ίδια περιοχή και τα ίδια σενάρια εκπομπής αλλά με διαφορετικά κλιματικά μοντέλα από τους Καραμάνο & Βολουδάκη (2017). Παρόμοια ευρήματα, με χαμηλότερα όμως ποσοστά αυξήσεων, αναφέρονται από τους Giannakopoulos et al. (2009) και Georgoroulou et al. (2017). Οι αρνητικές προβλέψεις για τον αραβόσιτο στη Θεσσαλία είχαν αναφερθεί για πρώτη φορά από τις Karetanaki & Rosenzweig (1997), με μέγιστη προβλεπόμενη μείωση της απόδοσης κατά 8,8% το 2050. Ανάλογου μεγέθους μειώσεις αναφέρθηκαν από τους Georgoroulou et al. (2017), από τους Καραμάνο & Βολουδάκη (2017) και από τους Voloudakis et al. (2018) για τη Θεσσαλία, ενώ σχετική σταθερότητα σε επίπεδο χώρας ανέφεραν οι Giannakopoulos et al. (2009). Τα αποτελέσματα που παρατίθενται για το βαμβάκι είναι περισσότερο αρνητικά από όσα αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία για τη συγκεκριμένη περιοχή. Οι Voloudakis et al. (2015, 2018) προβλέπουν στο διάστημα 2021-2050 μεταβολές στην απόδοση από -3 έως +3% και στο διάστημα 2071-2100 από -11 έως +28% για το σενάριο A1B. Για το έντονο σενάριο A2 οι επιπτώσεις είναι σαφώς θετικές και κυμαίνονται σε αυξήσεις από 9 έως 37% για το 2021-2050 και από 12,5 έως 24,5% για το 2071-2100. Αυξήσεις 10 έως 20% εκτίμησαν επίσης οι Καραμάνος & Βολουδάκης (2017) και 9,8% οι Georgoroulou et al. (2017). Οι αποκλίσεις των αριθμητικών εκτιμήσεων της παρούσας εργασίας από τα ευρήματα άλλων εργασιών πιθανότατα οφείλονται στη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης AquaCrop που προσιδιάζει καλύτερα στο μεσογειακό περιβάλλον, αλλά και πιο σύγχρονων περιφερειακών μετεωρολογικών μοντέλων πρόβλεψης της αλλαγής του κλίματος.

Είναι γνωστό ότι ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με CO₂ ευνοεί τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης (Gaastra, 1963) και προκαλεί αύξηση στις αποδόσεις καλλιεργούμενων φυτών (Kimball, 1983). Η θετική αυτή επίδραση εξαρτάται από τη μεταβολική οδό δέσμευσης του CO₂ και είναι εντονότερη στα φυτά της κατηγορίας C3, ενώ είναι σημαντικά ασθενέστερη στα φυτά της κατηγορίας C4 (Lawlor, 1997). Τα δεδομένα αυτά εξηγούν τις προβλεπόμενες αυξήσεις στις αποδόσεις του σιταριού, ενός ψυχρόφιλου φυτού C3, και τις μειώσεις στην απόδοση του αραβοσίτου (θερμόφιλο C4) υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής που σημειώθηκαν και στην παρούσα εργασία. Η παρατηρηθείσα οριακή έως και αρνητική αντίδραση του

βαμβακιού στην κλιματική αλλαγή, επίσης φυτού C3 αλλά θερμόφιλου, οπωσδήποτε ηπιότερη από την αντίστοιχη του αραβοσίτου, θα μπορούσε να ερμηνευθεί μέσω μιας αρνητικής αλληλεπίδρασης του υψηλού επιπέδου του CO₂ με τις σημαντικά αυξημένες θερμοκρασίες άνοιξης και θέρους (Morison & Lawlor, 1999; Allen, 2019). Είναι εξάλλου γνωστό ότι οι αυξημένες θερμοκρασίες, ιδιαίτερα της νύχτας, ευνοούν την κατανάλωση σημαντικών ποσών φωτοσυνθετικών προϊόντων που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια της ημέρας μέσω της αναπνοής σκότους και μειώνουν αισθητά τη συσσώρευση ξηράς ουσίας στις καλλιέργειες (Καραμάνος, 2012).

Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα είναι τα στοιχεία που προκύπτουν από τη συνεκτίμηση του βάθους των γαιών στον υπολογισμό των αποδόσεων σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής. Στην προφανή γενική τάση μείωσης των αποδόσεων όσο μειώνεται το βάθος του εδάφους υπάρχουν διαβαθμίσεις μεταξύ των τριών καλλιεργειών που εξετάστηκαν. Οι διαβαθμίσεις αυτές γίνονται πιο έντονες σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής στα μέσα και ιδίως στα τέλη του αιώνα. Το σιτάρι εμφανίζεται πιο ανεκτικό σε εδάφη με μειωμένο βάθος και διατηρεί αποδόσεις μεταξύ 1,5 και 2,5 tn/ha στο Σωτήριο και στο Ζάππειο και κοντά στον 1 tn/ha στα Τρίκαλα στα τέλη του αιώνα. Στον αραβόσιτο και στο βαμβάκι η αρνητική αλληλεπίδραση του μειωμένου βάθους με την ένταση της κλιματικής αλλαγής γίνεται πολύ πιο εμφανής, ιδιαίτερα προς τα τέλη του αιώνα. Συγκεκριμένα, ο αραβόσιτος παρουσιάζει σημαντική μείωση των αποδόσεων σε πολύ χαμηλά επίπεδα, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά το 80% των αποδόσεων σε βαθιά εδάφη. Το βαμβάκι παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, αφού οι αποδόσεις μηδενίζονται σε εδάφη με βάθος 25-35 cm στα μέσα και στα τέλη του αιώνα. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει ότι η ένταση της αλλαγής του κλίματος, η οποία θα είναι πιο εμφανής στην περίοδο 2081-2100 και στο δυσμενές σενάριο RCP8.5, θα επιδράσει πολύ πιο αρνητικά στο βαμβάκι και εν συνεχεία στον αραβόσιτο στα πιο αβαθή εδάφη, ενώ οι ανάλογες αρνητικές επιδράσεις στο σιτάρι προβλέπονται πιο ήπιες.

Οι διαφοροποιήσεις αυτές μεταξύ των τριών καλλιεργούμενων ειδών μπορεί να ερμηνευθούν με τη διαφορετική διαμόρφωση του ριζικού τους συστήματος. Το πασσαλώδες ριζικό σύστημα του βαμβακιού (Oosterhuis, 1990), το οποίο είναι διαμορφωμένο να λειτουργεί σε εδάφη με μεγάλο βάθος, υστερεί λειτουργικά συγκριτικά με το θυσανώδες και πιο πλούσιο



ριζικό σύστημα του σιταριού και του αραβοσίτου σε εδάφη περιορισμένου βάθους, και αυτό αντανakλά στην πενιχρή έως μηδενική απόδοση του βαμβακιού στα αβαθή εδάφη. Η μεγαλύτερη από το σιτάρι αρνητική επίδραση του μειωμένου βάθους στον αραβόσιτο πιθανότατα οφείλεται στις κατά πολύ μεγαλύτερες ανάγκες της καλλιέργειας του αραβοσίτου σε νερό και ανόργανα θρεπτικά συστατικά (κυρίως άζωτο) από την καλλιέργεια του σιταριού (Καραμάνος, 1987, 1999). Επομένως, η εξάντληση νερού και θρεπτικών συστατικών σε περιορισμένο όγκο εδάφους συντελείται ταχύτερα σε καλλιέργεια αραβοσίτου και αυτό επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη και τις αποδόσεις της καλλιέργειας αυτής συγκριτικά με το σιτάρι. Επιπλέον, όπως δείχνουν τα ευρήματα, το σιτάρι ως φυτό C3 επωφελείται περισσότερο από τα αυξημένα επίπεδα του CO₂ συγκριτικά με τον C4 αραβόσιτο στα τέλη του αιώνα υπό τις αυξημένες εκπομπές του σεναρίου RCP8.5.

Στο σιτάρι παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές στις αυξήσεις των αποδόσεων στα εδάφη διαφορετικού βάθους στο σενάριο RCP8.5 συγκριτικά με το RCP4.5. Οι μεταβολές αυτές στο σενάριο RCP8.5 ήταν υψηλότερες κατά το 2081-2100 συγκριτικά με το 2041-2060. Αυτά τα δεδομένα υποδηλώνουν την ευνοϊκή επίδραση των υψηλών συγκεντρώσεων του CO₂ στην καλλιέργεια σιταριού, η οποία ξεπερνά τις αρνητικές συνέπειες των υψηλότερων θερμοκρασιών. Το μετεωρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε προβλέπει για το σενάριο RCP8.5 υψηλές τιμές συγκέντρωσης CO₂ για τα τέλη του αιώνα (850 ppm, Πίν. 8). Η τιμή αυτή βρίσκεται εντός του ανώτατου ορίου των 700-1000 ppm, στο οποίο έχουν παρατηρηθεί υψηλές θετικές επιδράσεις στις αποδόσεις του σιταριού (Allen et al., 1971· Kimball, 1983· Mitchell et al., 1995· Lawlor, 1997). Η θετική αυτή επίδραση του CO₂ δεν παρατηρήθηκε στις άλλες δύο καλλιέργειες, όπου οι ποσοστιαίες μειώσεις των αποδόσεων ήταν κατά πολύ μεγαλύτερες υπό συνθήκες αυξημένων συγκεντρώσεων CO₂, δηλαδή στα τέλη του αιώνα και στο σενάριο των αυξημένων εκπομπών. Ιδιαίτερα στο C3 βαμβάκι, οι όποιες αναμενόμενες ευνοϊκές επιδράσεις του CO₂ φαίνεται ότι εξουδετερώθηκαν από τις αυξημένες θερμοκρασίες της άνοιξης και του θέρους, καθώς και από τον περιορισμό του ριζικού συστήματος σε μικρότερα βάθη εδάφους. Παρά το γεγονός ότι τόσο ο αραβόσιτος όσο και το βαμβάκι είναι θερμοφιλά φυτά, οι προβλεπόμενες σημαντικές αυξήσεις στη

μέγιστη και στην ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα, που αναμένονται να φθάσουν τους 3-4,8 °C και τους 5-6 °C αντιστοίχως στο σενάριο RCP8.5 το 2081-2100, θα υπερβούν το εύρος των άριστων θερμοκρασιών των ειδών αυτών και θα έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην αύξηση και στις αποδόσεις τους (Baker et al., 1989).

Η εκτίμηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών σε επίπεδο περιοχής μελέτης ή περιφέρειας είναι συνάρτηση της απόδοσης και της επιφάνειας των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Όπως προαναφέρθηκε, η αλλαγή του κλίματος προβλέπεται να επηρεάσει τις αποδόσεις των καλλιεργειών τόσο μέσω των επιδράσεων του εναέριου περιβάλλοντος όσο και μέσω των επιδράσεων στην τρωτότητα του εδάφους. Οι τελευταίες έχουν τεκμηριωθεί από τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής (βλ. παραπάνω Γ.2.1) και εκφράζονται τόσο με τη μείωση του βάθους του εδάφους λόγω μηχανικής και υδατικής διάβρωσης όσο και με την αύξηση του κινδύνου αλάτωσης. Οι επιδράσεις της μείωσης του βάθους του εδάφους έχουν ήδη συνεκτιμηθεί και σχολιαστεί στον υπολογισμό των αποδόσεων. Παρά το γεγονός ότι η μείωση του βάθους κάτω από τα 35 cm μπορεί να προκαλέσει τεράστια μείωση ή και μηδενισμό των αποδόσεων, όπως π.χ. στον αραβόσιτο και στο βαμβάκι, οι αντίστοιχες, κυρίως επικλινείς, εκτάσεις δεν εκτιμήθηκαν ως οριστικά απολεσθείσες για τη γεωργία. Και τούτο διότι είναι δυνατόν, όπως φάνηκε, οι εκτάσεις αυτές να στηρίζουν καλλιέργεια σιταριού με μειωμένες μέχρι ανεκτού ορίου αποδόσεις ή άλλες εναλλακτικές μη διαβρωτικές καλλιέργειες. Αντιθέτως, τα εδάφη που προβλέπεται να διατρέξουν πολύ υψηλό κίνδυνο αλάτωσης είναι παντελώς ακατάλληλα για καλλιέργεια, αν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, και επομένως δεν περιλαμβάνονται στις διαθέσιμες για καλλιέργεια εκτάσεις κατά την εκτίμηση της παραγωγικότητας των τριών αροτραίων καλλιεργειών.

Από την εκτίμηση της παραγωγής στις υπό μελέτη περιοχές προέκυψαν σημαντικές μειώσεις συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς στο Σωτήριο και στις τρεις καλλιέργειες κατά τις περιόδους 2041-2060 και 2081-2100, οι οποίες οφείλονται στην απώλεια καλλιεργήσιμου εδάφους λόγω αλάτωσης. Η περιοχή του Ζαππείου, με πολλές επικλινείς εκτάσεις, παρουσιάζει επίσης μειώσεις στην παραγωγή αραβοσίτου και βαμβακιού, οι οποίες όμως οφείλονται στη μείωση του βάθους του εδάφους λόγω μηχανικής και υδατικής διάβρωσης, όπως δείχνουν οι συγκρίσεις



ΠΑΡΑΔΗΜΙΑ

ΑΘΗΝΑ

των αυξομειώσεων της παραγωγής μεταξύ εδαφών που δεν έχουν υποστεί και αυτών που έχουν υποστεί διάβρωση (Πίν. 13-15, Εικ. 36-38). Στην περιοχή αυτή οι αποδόσεις του σιταριού παρουσιάζονται ελαφρά αυξημένες σε σχέση με την περίοδο αναφοράς στο σενάριο RCP4.5 και περισσότερο στο σενάριο RCP8.5. Η περιοχή των Τρικάλων, με εδάφη πεδινά και μεγάλου βάθους, παρουσιάζει τις λιγότερο αρνητικές επιδράσεις στην παραγωγή λόγω διάβρωσης.

Η συνεκτίμηση της επιφάνειας των καλλιεργήσιμων γαιών για τον προσδιορισμό της παραγωγής αλλάζει την εικόνα που διαμορφώθηκε κατά την εκτίμηση των αποδόσεων ανά καλλιέργεια. Έτσι, η υπεροχή των αποδόσεων του σιταριού σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής που σημειώθηκε στις περιοχές Σωτηρίου και Ζαπτείου δεν μεταφράστηκε και σε ανάλογη υπεροχή της παραγωγής, λόγω της μείωσης των διαθέσιμων εκτάσεων και της διάβρωσης. Αντιθέτως, στα Τρίκαλα η αυξημένη παραγωγή της σιτοκαλλιέργειας συμβαδίζει με τις προσδοκώμενες αυξημένες αποδόσεις, επειδή οι εδαφικοί πόροι δεν αναμένεται να επηρεαστούν αρνητικά. Για τους ίδιους λόγους, στις καλλιέργειες αραβοσίτου και βαμβακιού οι αρνητικές προβλέψεις για τις αποδόσεις στα μέσα και στα τέλη του αιώνα συνήθως μεγεθύνονται κατά τον υπολογισμό της παραγωγής στο Σωτήριο και στο Ζάππειο και παραμένουν περίπου στα ίδια επίπεδα με τις αυξομειώσεις των αποδόσεων στα Τρίκαλα.

Η ένταση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, όπως αποτυπώνεται στις προβλεπόμενες επιδράσεις των δύο σεναρίων εκπομπής στην παραγωγή των καλλιεργειών, οδηγεί στη συναγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Τα στοιχεία δείχνουν ότι η παραγωγή της καλλιέργειας του σιταριού ευνοείται περισσότερο στο σενάριο RCP8.5 συγκριτικά με το RCP4.5, προφανώς μέσω της αύξησης των αποδόσεων λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης του CO₂. Το αντίθετο συμβαίνει στις καλλιέργειες του αραβοσίτου και του βαμβακιού, όπου παρατηρείται σαφής ποσοστιαία μείωση της παραγωγής στο σενάριο RCP8.5 και στην περίοδο 2081-2100. Η τάση αυτή ερμηνεύεται τόσο από τις αντίστοιχες προβλεπόμενες μειώσεις στις αποδόσεις όσο και από τη μειωμένη ανεκτικότητα των καλλιεργειών αυτών σε εδάφη μικρού βάθους. Οι μειώσεις στην παραγωγή είναι εμφανέστερες στο Ζάππειο και στο Σωτήριο, όπου το ποσοστό των ευάλωτων γαιών στην επιφάνεια μελέτης είναι σημαντικό.

Σε επίπεδο περιφέρειας, οι προβλέψεις για την παραγωγή των τριών αροτραίων καλλιεργειών δεν αποκλίνουν από εκείνες που ισχύουν για τις περιοχές μελέτης. Έτσι, υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής με το πιο ήπιο σενάριο εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (RCP4.5), η παραγωγή του σιταριού προβλέπεται να αυξηθεί κατά 5,48% το 2041-2060 και κατά 13,37% το 2081-2100 συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί διάβρωση. Στην ίδια κατηγορία εδαφών, η εφαρμογή του πιο έντονου σεναρίου εκπομπής RCP8.5 έδωσε μικρή μείωση κατά 4,86% στα μέσα, αλλά σημαντική αύξηση κατά 35,69% στα τέλη του αιώνα. Η παραγωγή του αραβοσίτου προβλέπεται να υποστεί μειώσεις έως 25,85% στο σενάριο RCP4.5, οι οποίες θα φθάσουν το 41,66% στο σενάριο RCP8.5. Μεγαλύτερες μειώσεις από τον αραβόσιτο αναμένεται να υποστεί η βαμβακοκαλλιέργεια στο ήπιο σενάριο κατά το 2041-2060 (34,96%). Εν τούτοις, οι προβλεπόμενες μειώσεις τόσο το 2081-2100 όσο και στο πιο έντονο σενάριο είναι χαμηλότερες από εκείνες του αραβοσίτου (από 17,9% μέχρι 34,15%). Η διάβρωση του εδάφους προβλέπεται να προκαλέσει περαιτέρω μειώσεις στην παραγωγή των καλλιεργειών, οι οποίες αναμένεται να είναι έως 3,6% χαμηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες των μη διαβρωμένων εδαφών. Οι μεγαλύτερες μειώσεις προβλέπονται για τον αραβόσιτο και το βαμβάκι στο σενάριο RCP4.5 (Πίν. 16).

Δ.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

Οι διαπιστώσεις από τα ευρήματα της εργασίας θα είναι χρήσιμες για την πρόταση και την υιοθέτηση συγκεκριμένων μέτρων προσαρμογής στην αλλαγή του κλίματος.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι, από τις τρεις επικρατούσες στη Θεσσαλία αροτραίες καλλιέργειες, μόνο το σιτάρι προβλέπεται να αντιδράσει θετικά. Ως χειμερινή καλλιέργεια θα διέλθει σημαντικό μέρος του βιολογικού του κύκλου υπό μέτρια χαμηλές θερμοκρασίες και θα αποφύγει τις αυξημένες θερμοκρασίες που θα επικρατήσουν μετά τα μέσα της άνοιξης. Παράλληλα, θα ευνοηθεί από τις προβλεπόμενες υψηλές συγκεντρώσεις CO₂. Τα ευρήματα έδειξαν σημαντική ανεκτικότητα της σιτοκαλλιέργειας και επίτευξη επαρκών αποδόσεων ακόμη και σε εδάφη

με μικρό βάθος, όπου ο αραβόσιτος και κυρίως το βαμβάκι αποδίδουν ελάχιστα. Το γεγονός αυτό καθιστά το σιτάρι κατάλληλο για επικερδή καλλιέργεια ακόμη και σε λοφώδεις και επικλινείς εκτάσεις, οι οποίες έχουν ήδη διαβρωθεί σε σημαντικό βαθμό. Στις εκτάσεις αυτές η καλλιέργεια του βαμβακιού και του αραβοσίτου κρίνεται ασύμφορη τόσο από πλευράς οικονομικής όσο και από πλευράς συνεπειών στην περαιτέρω υποβάθμιση των εδαφών. Ο τρόπος καλλιέργειας των φυτών αυτών (σπορά σε μεγάλες αποστάσεις, ένταση εδαφοκατεργασίας, αρδεύσεις κ.ά.) εντείνει τη μηχανική και την υδατική διάβρωση και θα οδηγήσει σε οριστική απώλεια των οριακών αυτών εδαφών για καλλιέργεια. Αντιθέτως, η συγκέντρωση της καλλιέργειας αραβοσίτου και βαμβακιού στις πεδινές εκτάσεις της περιφέρειας και σε εδάφη με μεγάλο βάθος θα διασφαλίσει υψηλές αποδόσεις και τα αντίστοιχα οικονομικά οφέλη στους καλλιεργητές.

Οι άκρως ανησυχητικές προβλέψεις για τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στους εδαφικούς πόρους απαιτούν εγρήγορη και άμεση δραστηριοποίηση με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για τη διατήρηση και την αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης των εδαφών. Για την αντιμετώπιση και τον μετριασμό του ρυθμού διάβρωσης, υπάρχουν πολλά διαθέσιμα καλλιεργητικά μέτρα. Ενδεικτικά: 1) αξιοποίηση των φυτικών υπολειμμάτων είτε για αύξηση της οργανικής ουσίας του εδάφους (ενσωμάτωση) είτε για διατήρηση του επιφανειακού πορώδους (επιφανειακό επίστρωμα). Οπωσδήποτε η καύση των φυτικών υπολειμμάτων αποτελεί καταστρεπτική πρακτική, αφού συνιστά σοβαρό παράγοντα υποβάθμισης των εδαφών και επιπλέον επιδεινώνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω αυξημένων εκπομπών CO₂. 2) Εφαρμογή αντιδιαβρωτικών μέτρων στις επικλινείς περιοχές, όπως καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς και διατήρηση φυτικών υπολειμμάτων στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και διατήρηση φυτοκάλυψης κατά το φθινόπωρο και τον χειμώνα με σπορά ενδιάμεσων καλλιεργειών. 3) Αμειψισπορές με καλλιέργειες που δεν ευνοούν τη διάβρωση, δηλαδή διασφαλίζουν καλή φυτοκάλυψη του εδάφους και δεν απαιτούν έντονη και συχνή εδαφοκατεργασία.

Για την αντιμετώπιση των καταστρεπτικών συνεπειών από την αλάτωση και τη συνακόλουθη απώλεια καλλιεργήσιμου εδάφους, επιβάλλεται η εκτέλεση έργων στράγγισης στα παθογενή εδάφη στα οποία εντοπίζεται το πρόβλημα. Προληπτικά επιβάλλεται η αποφυγή άρδευσης με νερό με

υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αν το νερό άρδευσης είναι υφάλμυρο, καλό είναι να μη χρησιμοποιούνται αρδευόμενες αλλά ξηρικές, κυρίως χειμερινές καλλιέργειες.

Το θέμα της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων στη γεωργία κυριαρχεί στην περιφέρεια Θεσσαλίας και θα οξυνθεί ακόμη περισσότερο στο μέλλον εν όψει των προβλεπόμενων αυξημένων υδατικών ελλειμμάτων λόγω της αλλαγής του κλίματος. Η επέκταση των αρδευόμενων καλλιεργειών τα τελευταία χρόνια, η ανεπάρκεια ή η κακή χρήση των επιφανειακών υδάτων και η ληστική εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων οδήγησαν σε ταχεία πτώση της στάθμης του νερού στο υπέδαφος και σε υφαλμύρωσή του σε συγκεκριμένες περιοχές που βρίσκονται πλησιέστερα προς την ακτογραμμή. Κατά συνέπεια, επιβάλλεται η άμεση χάραξη και εφαρμογή συγκεκριμένης στρατηγικής διαχείρισης του νερού. Συγκεκριμένα: 1) σχεδιασμός για συλλογή και αποθήκευση του πλεονάζοντος νερού σε επιφανειακούς ταμιευτήρες, ώστε να ελαττωθεί η περαιτέρω εξάντληση του υπόγειου νερού. 2) Εξοικονόμηση νερού άρδευσης με εκλογίκευση του όλου συστήματος, όπως: α) συντήρηση των αρδευτικών δικτύων για αποφυγή απωλειών κατά την άντληση ή μεταφορά του νερού, οι οποίες μπορεί να φθάσουν σε πολύ υψηλά επίπεδα (έως και 45% της συνολικής ποσότητας: Karamanos, Aggelides & Londra, 2005). β) Άρδευση σύμφωνα με τις ανάγκες των καλλιεργειών, για την αποφυγή φαινομένων υπεράρδευσης. Με την εφαρμογή των νέων τεχνολογιών καθίστανται προσβάσιμα όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον ακριβή υπολογισμό των αναγκών σε νερό από μετεωρολογικά στοιχεία της κάθε περιοχής και είναι δυνατή η συλλογή πληροφοριών για την υδατική κατάσταση των καλλιεργειών και του εδάφους μέσω τηλεπισκόπησης και αισθητήρων αντιστοίχως. Για το συγκεκριμένο θέμα είναι απολύτως απαραίτητη η ενημέρωση και η τεχνική στήριξη του αγροτικού πληθυσμού. γ) Επιλογή συστήματος άρδευσης με υψηλή αποτελεσματικότητα για ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού μέσω εξάτμισης ή επιφανειακής απορροής. δ) Εφαρμογή συστημάτων ελλειμματικής άρδευσης, τα οποία έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά, όταν η διαθεσιμότητα νερού είναι περιορισμένη (Fererres & Soriano, 2007· Mushtaq & Moghaddasi, 2007· Κωτούλας, 2010). Προκαταρκτική μελέτη με χρήση του AquaCrop και στα δύο σενάρια εκπομπής με μείωση της δόσης άρδευσης κατά 10% δεν έδειξε σημαντική μείωση στις αποδόσεις του βαμβακιού και του αραβοσίτου στη Θεσσαλία στα μέσα

και στα τέλη του αιώνα (Καραμάνος & Βολουδάκης, 2017). 3) Επιλογή του κατάλληλου βιολογικού υλικού. Υπό συνθήκες έλλειψης νερού συνιστάται η επιλογή μη υδροβόρων καλλιεργειών, ειδών και ποικιλιών, με μικρότερο βιολογικό κύκλο ή με διαπιστωμένη προσαρμοστικότητα σε συνθήκες έλλειψης νερού.

Η αλλαγή της ημερομηνίας σποράς μπορεί επίσης να αποτελέσει εναλλακτικό χειρισμό προσαρμογής. Οι αναμενόμενες αυξημένες θερμοκρασίες πιθανότατα θα επιτρέψουν την πρωιμότερη σπορά των ανοιξιάτικων καλλιεργειών και τη σύντμηση του βιολογικού τους κύκλου. Με τον τρόπο αυτό θα επιτευχθεί και πρωιμότερη συγκομιδή και θα αποφευχθούν απώλειες και ποιοτική υποβάθμιση της παραγωγής το φθινόπωρο. Κατάλληλες ρυθμίσεις του χρόνου σποράς μπορούν επίσης να γίνουν και στις χειμερινές καλλιέργειες.

Οι πρόσφατες καταστρεπτικές πλημμύρες ανέδειξαν την αναγκαιότητα για άμεσο επανασχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων σε όλες τις λεκάνες απορροής της περιφέρειας. Η αυξημένη συχνότητα και σφοδρότητα των πλημμυρών αποτελούν καθοριστικό στοιχείο της αλλαγής του κλίματος, που δεν επιδέχεται αμφισβήτηση. Έργα διευθέτησης ορεινών χειμάρρων, διαπλάτυνσης και εκβάθυνσης κοιτών ποταμών και χειμάρρων, ισχυροποίησης πρανών, φραγμάτων και γεφυρών επιβάλλεται να επανασχεδιαστούν και να διευθετηθούν με βάση τα νέα δεδομένα. Έτσι, θα μειωθούν οι πιθανότητες για εκτεταμένες καταστροφές της γεωργικής παραγωγής.

Η πολιτική βούληση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποτελεσματική εφαρμογή των μέτρων προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Η υλοποίηση των μέτρων αναμφισβήτητα συνεπάγεται οικονομικό κόστος. Ενδεικτικά, η εκστρατεία ενημέρωσης, η θέσπιση κινήτρων για εφαρμογή των μέτρων, η τεχνική στήριξη των αγροτών σε επιλεγμένους τομείς, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των αναγκαίων έργων υποδομής, η καθιέρωση δικτύων παρακολούθησης ποιοτικών στοιχείων παρακολούθησης (όπως για τους εδαφικούς και τους υδατικούς πόρους, νέα ζιζάνια, έντομα και ασθένειες), η αναθεώρηση του πλαισίου ασφάλισης της γεωργικής παραγωγής έναντι των νέων κινδύνων, αποτελούν συνιστώσες του οικονομικού κόστους. Το αναμενόμενο όμως οικονομικό όφελος από την εφαρμογή έχει τεκμηριωθεί ότι είναι κατά πολύ ανώτερο της απαιτούμενης δαπάνης (ΕΜΕΚΑ, 2011).



ΑΘΗΝΩΝ

ΠΑΡΑΔΗΜΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S. & Leary, N. (1998). Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. *Climate Research* 11, 19-30.
- Allen Jr., L. H. (2019). Simplifying crop growth response to rising CO₂ and elevated temperature. *Agricultural & Environmental Letters* 4, 1-4.
- Allen Jr., L. H., Jensen, S. E. & Lemon, E. R. (1971). Plant response to carbon dioxide enrichment under field conditions: a simulation. *Science* 173, 256-258.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation & Drainage Paper 56. UN-FAO, Rome.
- Baker, J. T., Allen Jr., L. H., Boote, K. J., Jones, P. H. & Jones, J. W. (1989). Response of soybean to air temperature and carbon dioxide concentration. *Crop Science* 29, 98-105.
- Barrow, C. J. (1992). *World Atlas of Desertification* (Ed. by N. Middleton and D. S. G. Thomas), United Nations Environment Programme, London.
- Bryan, R. B. & Campbell, I. A. (1986). Runoff and sediment discharge in a semi-arid ephemeral drainage basin. *Zeitschrift für Geomorphologie* 58, 121-143.
- Ciscar, J. C., Feyen, L., Ibaretta, D. & Soria, A. (Coordinators) (2018). *Climate Impacts in Europe: an integrated economic assessment. Final Report of the JRC PESETA III Project*, EU, Luxembourg.
- Clark, S. C. (1996). Mediterranean ecology and an ecological synthesis of the field sites. In C. J. Brandt and J. B. Thornes (Eds.), *Mediterranean Desertification and Land Use*, 271-302, J. Wiley & Sons.



AKAΔHMIA

ΑΘΗΝΑΙΝΩΝ

- Clarke, L. E., Edmonds, J. A., Jacoby, H. D., Pitcher, H., Reilly, J. M. & Richels, R. (2007). *Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. Sub-report 2.1a of Synthesis and Assessment Product 2.1*. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington DC.
- Doorenboos, J. & Kassam, A. H. (1979). *Yield response to water*, FAO Irrigation and Drainage, Paper 33, Rome.
- Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ) (2018). Ετήσια Γεωργική Έρευνα, Αθήνα.
- Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ) (2011). *Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα*, Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα (= *The Environmental, Economic and Social Impacts of Climate Change in Greece*, Bank of Greece, Athens).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2006). *World Reference Base for Soil Resources 2006. A Framework for International Classification, Correlation and Communication*, FAO, Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2012). ET_c calculator (v. 3.2). <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>, Rome.
- Fereres, E. & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58, 147-159.
- Ferrara, A., Kosmas, C., Salvati, L., Padula, A., Mancino, G. & Nolè, A. (2020). Environmentally sensitive areas to land degradation and desertification (LDD) at the global level: updating the MEDALUS-ESA framework for worldwide LDD assessment. *Land Degradation and Development Journal*. <https://doi.org/10.1002/ldr.3559>.
- Gaastera, P. (1963). Climatic control of photosynthesis and respiration. In L. T. Evans (Ed.) *Environmental Control of Plant Growth*, 113-138, Academic Press, New York.

- Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Vitaliotou, M., Lalas, D. P., Theodoridis, I., Giannoulaki, K.-D., Dimopoulos, D. & Zavras, V. (2017). Climate change impacts and adaptation options for the Greek agriculture in 2021-2050: a monetary assessment. *Climate Risk Management* 16, 164-182. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.002>.
- Gerontidis, St., Kosmas, C., Detsis, V., Marathianou, M., Zafriou, Th. & Tsara, M. (2001). The effect of moldboard plow on tillage erosion along a hillslope. *Journal of Soil and Water Conservation* 56, 147-152.
- Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E. & Goodess, C.M. (2009). Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. *Global and Planetary Change* 68, 209-224. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.06.001>.
- Giorgetta, M., et al. (2013). Climate change from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>.
- Godwin, D. C., White, R. J. G., Sommer, K. J., Walker R. R., Goodwin, I. & Clingeleffer, P. R. (2002). VineLOGIC, a model of grapevine growth, development and water use. In C. Dundon et al. (Eds.) *Managing Water*, 46-50, Australian Society of Viticulture and Oenology Inc., Adelaide.
- Govers, G., Vandaele, K., Desmet, P., Poesen, J. & Bunte, K. (1994). The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *European Journal of Soil Science* 45, 469-478.
- Iglesias, A., Garrote, L., Quiroga, S. & Moneo, M. (2009). *Impacts of climate change in agriculture in Europe. PESETA-Agriculture study*, JRC Scientific and Technical Reports, European Commission, Luxembourg.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). *Special Report. Global Warming of 1.5°C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jones, C. A. & Kiniry, J. R. (1986). *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*, Texas A & M University Press, College Station, TX.



ΑΚΑΔΗΜΙΑ
ΑΘΗΝΩΝ

- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J. & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235-265.
- Kairis, O., Kosmas, C., Karavitis, Ch., Ritsema, C., Salvati, L. et al. (2014). Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: types of degradation, causes and implications for management. *Environmental Management* 54, 971-982. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0110-0>.
- Kairis, O., Dimitriou, V., Aratzioglou, Ch., Gasparatos, D., Yassoglou, N., Kosmas, C. & Moustakas, N. (2020). A comparative analysis of a detailed and semi-detailed soil mapping for sustainable land management using conventional and currently applied methodologies in Greece. *Land* 9, 154. <https://doi.org/10.3390/land9050154>.
- Kapetanaki, G. & Rosenzweig, C. (1997). Impact of climate change on maize yield in Central and Northern Greece: a simulation study with CERES-Maize. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 1, 251-271. <https://doi.org/10.1023/B:MITI.0000018044.48957.28>.
- Καραμάνος, Α.Ι. (1987). *Τα σιτηρά των ευκράτων κλιμάτων*, Αθήνα.
- Καραμάνος, Α.Ι. (1999). *Τα σιτηρά των θερμών κλιμάτων. Αραβόσιτος-Σόργο-Ρύζι-Κεχρί*, Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα.
- Καραμάνος, Α.Ι. (2012). *Γενική γεωργία. Αρχές φυτικής παραγωγής στις αροτραίες καλλιέργειες*, Εκδ. Παπαζήση, Αθήνα.
- Karamanos, A., Aggelides, S. & Londra, P. (2005). Irrigation systems performance in Greece. In N. Lamaddalena et al. (Eds.), *Irrigation Systems Performance*, Options Méditerranéennes, B 52, 99-110.
- Karamanos, A., Skourtos, M., Voloudakis, D., Kontoyianni, A. & Machleras, A. (2011). Impacts of climate change on agriculture. In *The Environmental, Economic and Social Impacts of Climate Change in Greece*, 186-196, C. C. I. S. Committee, Bank of Greece, Athens.
- Καραμάνος, Α. & Βολουδάκης, Δ. (2017). Προβλέψεις και μέτρα προσαρμογής σχετικά με τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στις

κύριες αροτραίες καλλιέργειες της Θεσσαλίας. Εισήγηση στο Περιφερειακό Συνέδριο Δήμων Θεσσαλίας *Κλιματική Αλλαγή. Αυτοδιοίκηση και Θεσσαλία μπροστά στην Παγκόσμια Πρόκληση*, Καρδίτσα. http://www.pedthessalias4clima.gr/media/ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ,ΒΟΛΟΥΔΑΚΗΣ-ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ_ΑΛΛΑΓΗ_ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ_ΚΑΙ_ΜΕΤΡΑ.pdf.

- Kimball, B. A. (1983). Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal* 75, 779-788.
- Κοσμάς, Κ. (2014). *Υποβάθμιση και ερημοποίηση της γης*, Επιστημονικές Εκδόσεις Παριζιάνου, Μεταμόρφωση Αττικής.
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L. H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J. M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D. & Vacca, A. (1997). The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena* 29, 45-59.
- Kosmas, C., Kirkby, M. & Geeson, N. (1999). *The Medalus project. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. Project Report*. European Commission, Energy, Environment and Sustainable Development, EUR 18882.
- Kosmas, C., Tsara, M., Moustakas, N., Kosma, D. & Yassoglou, N. (2006). Environmental sensitive areas and indicators of desertification. *Desertification in the Mediterranean Region. A Security Issue*. NATO Security Through Science Series, 3, Brussels.
- Kosmas, C., Kairis, O., Karavitis, Ch., Ritsema, C., Salvati, L. et al. (2014). Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach. *Environmental Management* 54, 951-970. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0109-6>.
- Κωτούλας, Β. (2010). Μελέτη των επιδράσεων της ελλειμματικής άρδευσης στο βαμβάκι (*Gossypium hirsutum L., cv. Celia*), Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Παν/μιο Αθηνών.



ΑΚΑΔΗΜΙΑ
ΑΘΗΝΩΝ

- Lawlor, D. W. (1997). Response of crops to environmental change conditions. *Journal of Agricultural Meteorology* 52, 769-778.
- Le Houérou, H. N. (1996). Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments* 34, 133-185.
- Margaris, N., Koutsidou, E., Giourga, Ch., Loumou, A., Theodorakis, M. & Hatzitheodoridis, P. (1995). Managing desertification. In *MEDALUS II Project 3, Managing Desertification*, 83-110, EV5V-CT92-0165.
- Mitchell, D. J. (1990). The use of vegetation and land use parameters in modelling catchment sediment yields. In J. B. Thornes (Ed.), *Vegetation and Erosion, Processes and Environments*, 289-314, J. Wiley & Sons, Chichester.
- Mitchell, R. A. C., Lawlor, D. W., Mitchell, V. J., Gibbard, C. L., White, E. M. & Porter, J. R. (1995). Effects of elevated CO₂ concentration and increased temperature on winter wheat: test of ARCWHEAT1 simulation model. *Plant, Cell & Environment* 18, 736-748.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19, 205-234.
- Morison, J. I. L. & Lawlor, D. W. (1999). Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant, Cell & Environment* 22, 659-682.
- Mushtaq, S. & Moghaddasi, M. (2011). Evaluating the potentials of deficit irrigation as an adaptive response to climate change and environmental demand. *Environmental Science and Policy* 14, 1139-1150.
- Oosterhuis, D. M. (1990). Growth and development of a cotton plant. In W. N. Milney & D. M. Oosterhuis (Eds.), *Nitrogen Nutrition of Cotton: Practical Issues*, 1-24, American Society of Agronomy, Madison Wisc.
- ΟΠΕΚΕΠΕ (2014). Ανάπτυξη ενιαίου συστήματος γεωπληροφοριακών εδαφολογικών δεδομένων και οριοθέτησης αγροτικών ζωνών της Χώρας. Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. https://iris.gov.gr/SoilServices/js/pdf/SOIL_MAP_OF_GREECE_e-SOILBOOK.pdf.

- Parry, M. L., Arnell, N. W., McMichael, A. I., Nicholls, R. J., Martens, P., Kovats, R. S., Livermore, M. T. J., Rosenzweig, C., Iglesias, A. & Fischer, G. (2001). Millions at risk: defining critical climate change threats and targets. *Global Environmental Change* 11, 181-183.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. & Fereres, E. (2009). AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water. II: main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101, 438-447.
- Riahi, K., Grübler, A. & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting Social Change* 74, 887-935.
- Riahi, K., Krey, V., Rao, S., Chirkov, V., Fischer, G., Kolp, P., Kindermann, G. E., Nakicenovic, N. & Rafai, P. (2011). RCP-8.5: exploring the consequence of high emission trajectories. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
- Samuelsson, P., Jones, C. G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, C., Kjellström, E., Nikulin, G. & Wyser, K. (2011). The Rossby Centre Regional Climate Model RCA3: model description and performance. *Tellus Series A* 63, 4-23.
- Schellnhuber, H. J., Reyer, C., Hare, B., Waha, K., Otto, I. M., Serdeczny, O. et al. (2014). *Turn down the Heat: Confronting the New Climate Normal 3*, World Bank, Washington, DC.
- Sivakumar, M. V. K. (2007). Interactions between climate and desertification. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 143-155.
- Steduto, P. (2003). *Biomass Water-Productivity. Comparing the Growth-Engines of Crop Models*. FAO Expert Consultation on Crop Water Productivity under Deficient Water Supply, Rome.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. & Fereres, E. (2009). AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water, I. Concepts. *Agronomy Journal* 101, 426-437.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Howell, T. A., Evett, S. R., Rojas-Lara, B. A., Farahani, H. J., Izzi, G., Oweis, T. Y., Wani, S. P., Hoogeveen, J. & Geerts, S. (2009). Concepts and applications of



ΑΓΡΟΝΟΜΙΑ

- AquaCrop: the FAO crop productivity model. In W. Cao et al. (Eds.), *Crop Modeling and Decision Support*, 175-191, Springer, Berlin/Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_19.
- Stockle, C. O., Donatelli, M. & Nelson R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E. & Edmonds J. A. (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109, 77-94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>.
- Trabaud, L. (1981). Man and fire: impacts on Mediterranean vegetation. In F. di Castri, D.W. Goodall & R.L. Specht (Eds.), *Mediterranean-type Shrublands. Ecosystems of the World*, II, 523-537, Elsevier, Amsterdam.
- Voloudakis, D., Karamanos, A., Economou, G., Kalivas, D., Vahamidis, P., Kotoulas, V., Kapsomenakis, J. & Zerefos, C. (2015). Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis. *Agricultural Water Management* 147, 116-128.
- Voloudakis, D., Karamanos, A., Economou, G., Kapsomenakis, J. & Zerefos, C. (2018). A comparative estimate of climate change impacts on cotton and maize in Greece. *Journal of Water & Climate Change* 9, 643-656. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.022>.
- Webb, N. P., Marshall, N. A., Stringer, L. C., Reed, M. S., Chapell, A. & Herrick, J. E. (2017). Land degradation and climate change: building climate resilience in agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment* 15, 450-459.
- Williams, M. A. J. & Balling, R. C. (1996). *Interactions of Desertification and Climate*, WMO/UNEP, Arnold Press, London.
- Yassoglou, N. & Kosmas, K. (2004). Desertification. In O. Varelidis, N. Yassoglou & S. Liveris (Eds.), *Desertification. Scientific Works of Greek Authors*, 25-30, Ministry of Rural Development and Food, Athens.

- Zuazo, V.H.D. & Pleguezuelo, C. R. R. (2009). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: a review. In E. Lichtfouse et al. (Eds.), *Agronomy for Sustainable Development*, 785-811, Springer, The Netherlands.



ΑΘΗΝΩΝ

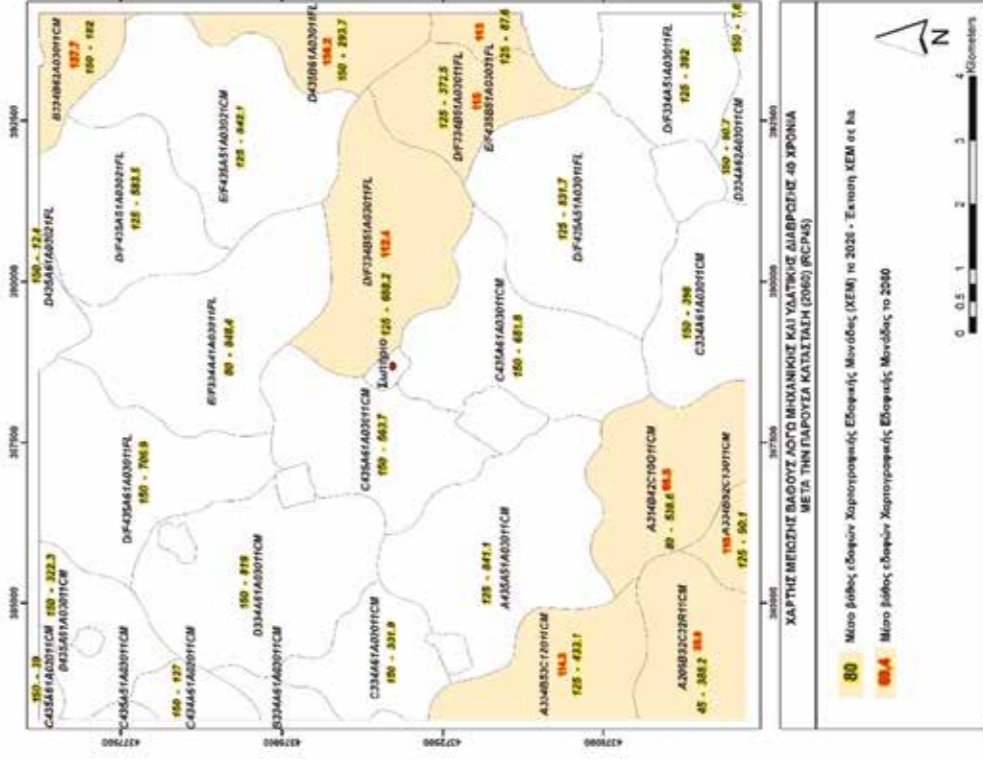
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

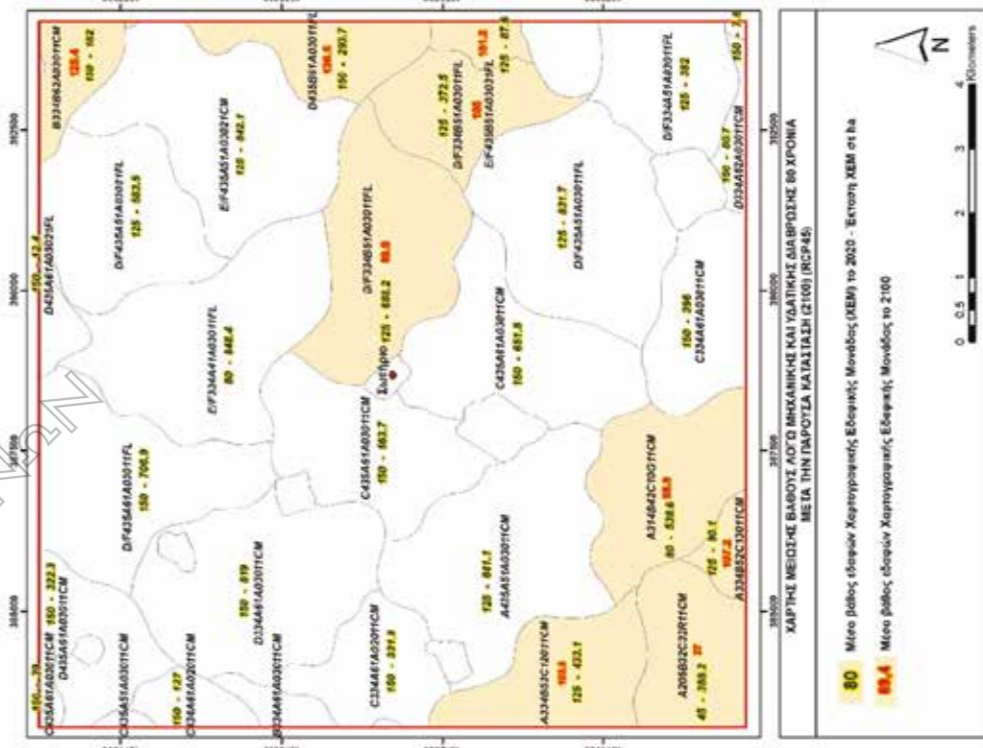




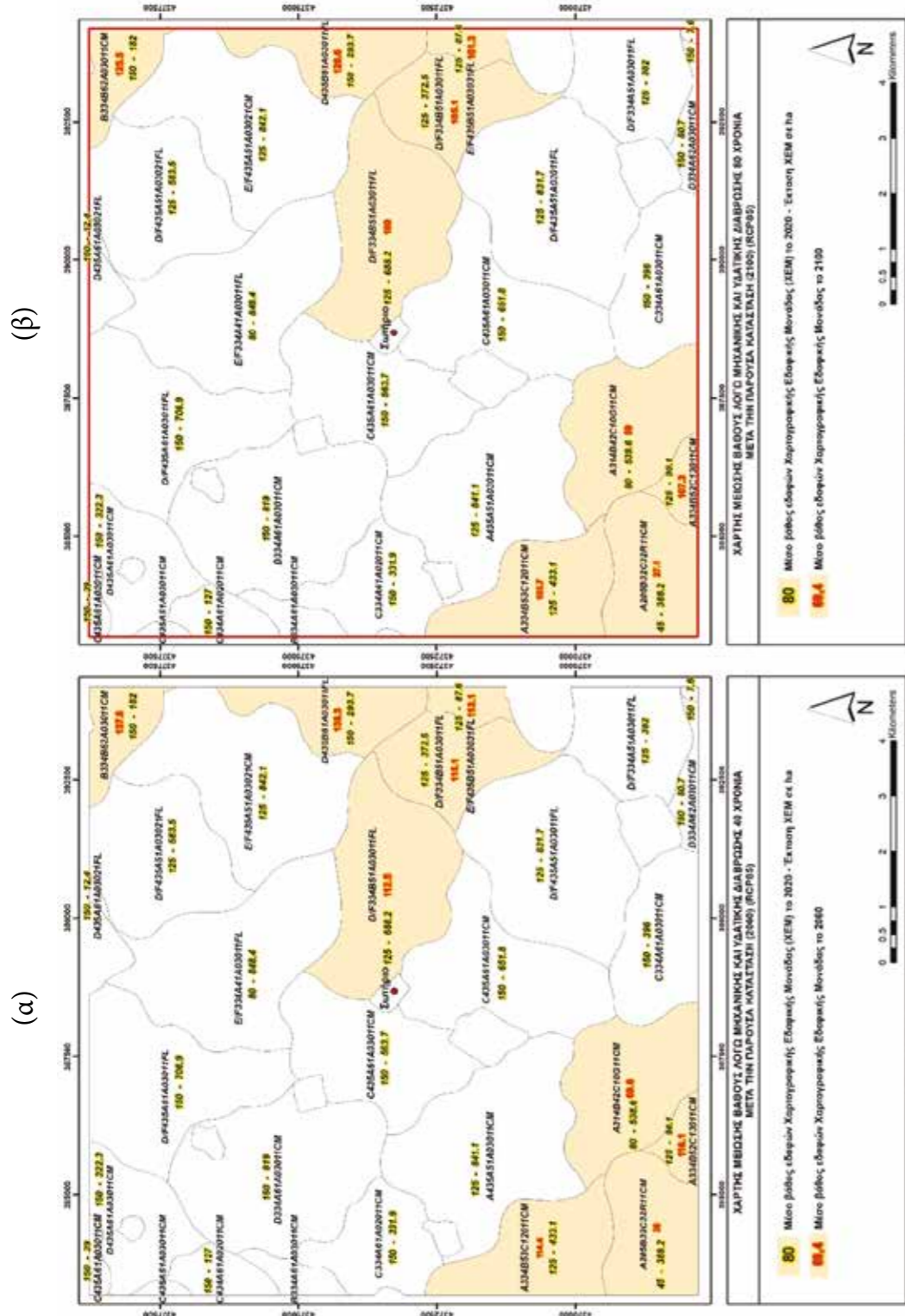
(α)



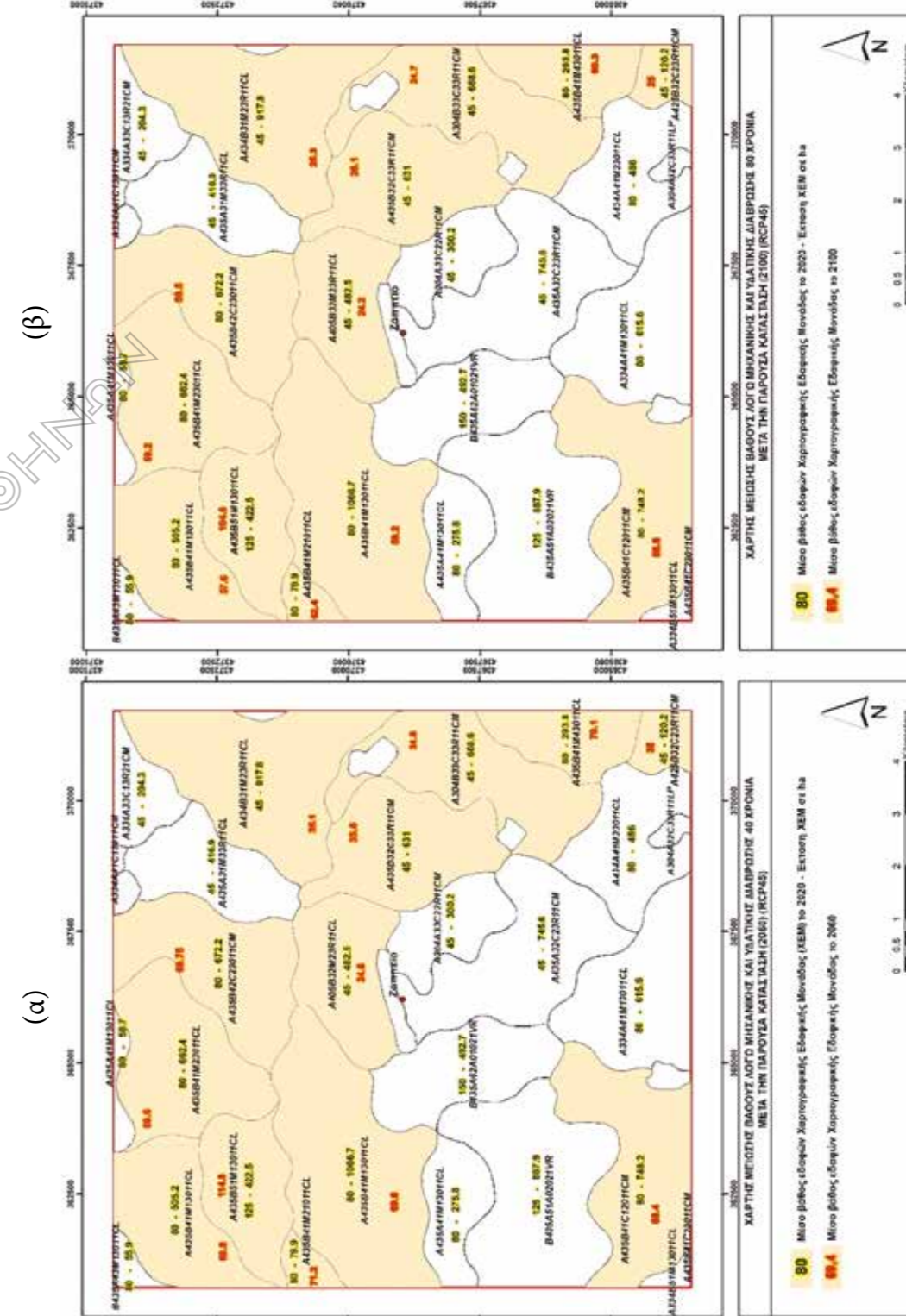
(β)



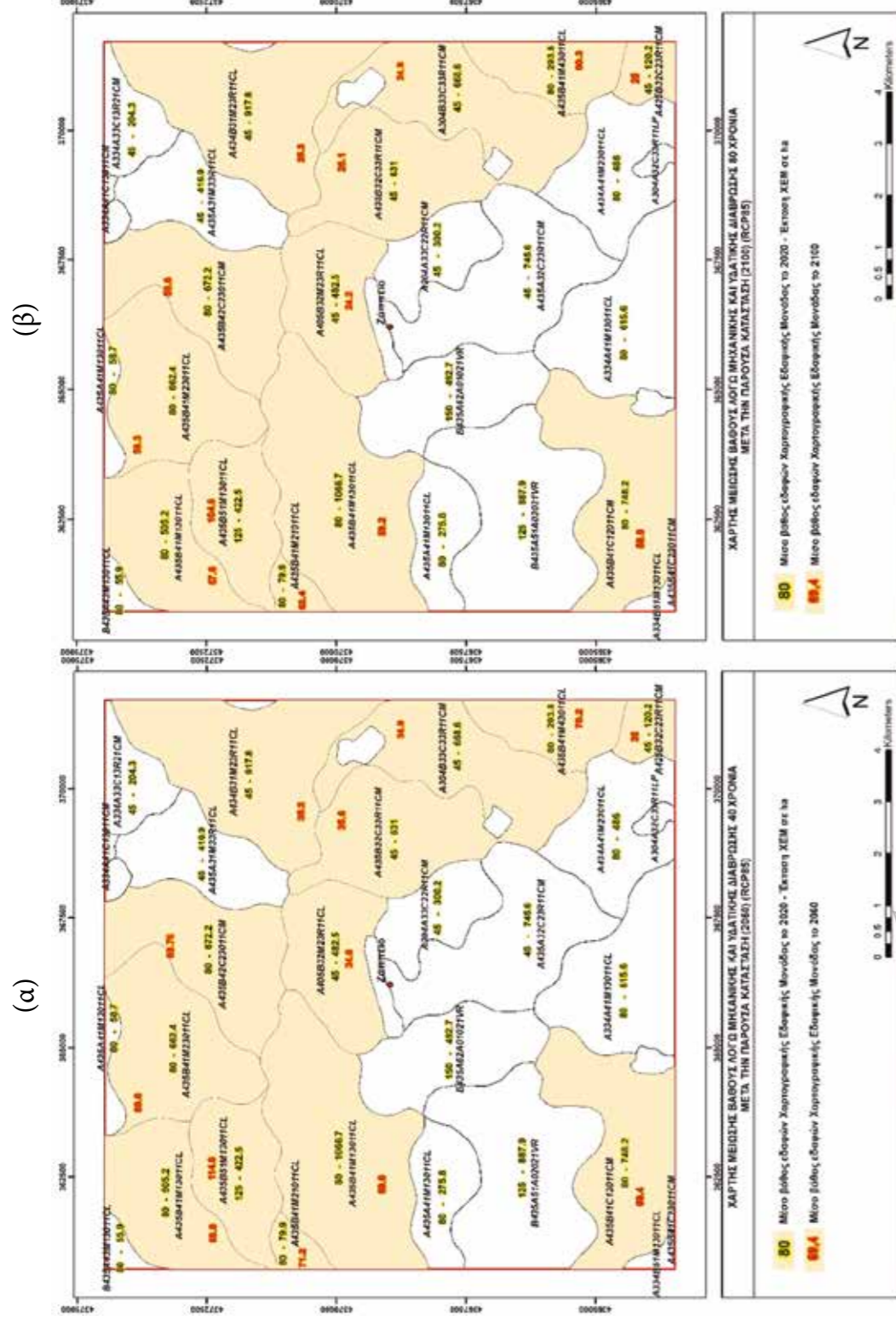
Εικόνα Π1. Χωρική αποτύπωση των εδαφικών χαρτογραφικών μονάδων στην υπό μελέτη περιοχή του Σωτηρίου, με αριθμητικές ενδείξεις για τα βάθη (cm) και την έκταση (ha) της κάθε μονάδας για το σενάριο RCP4.5 (α) κατά το έτος 2060, (β) κατά το έτος 2100. Οι χρωματισμένες μονάδες υποδηλώνουν μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Οι μαύρες αριθμητικές ενδείξεις απεικονίζουν τα βάθη κατά τον τρέχοντα χρόνο, ενώ οι κόκκινες τα βάθη κατά το 2060 (α) ή το 2100 (β).



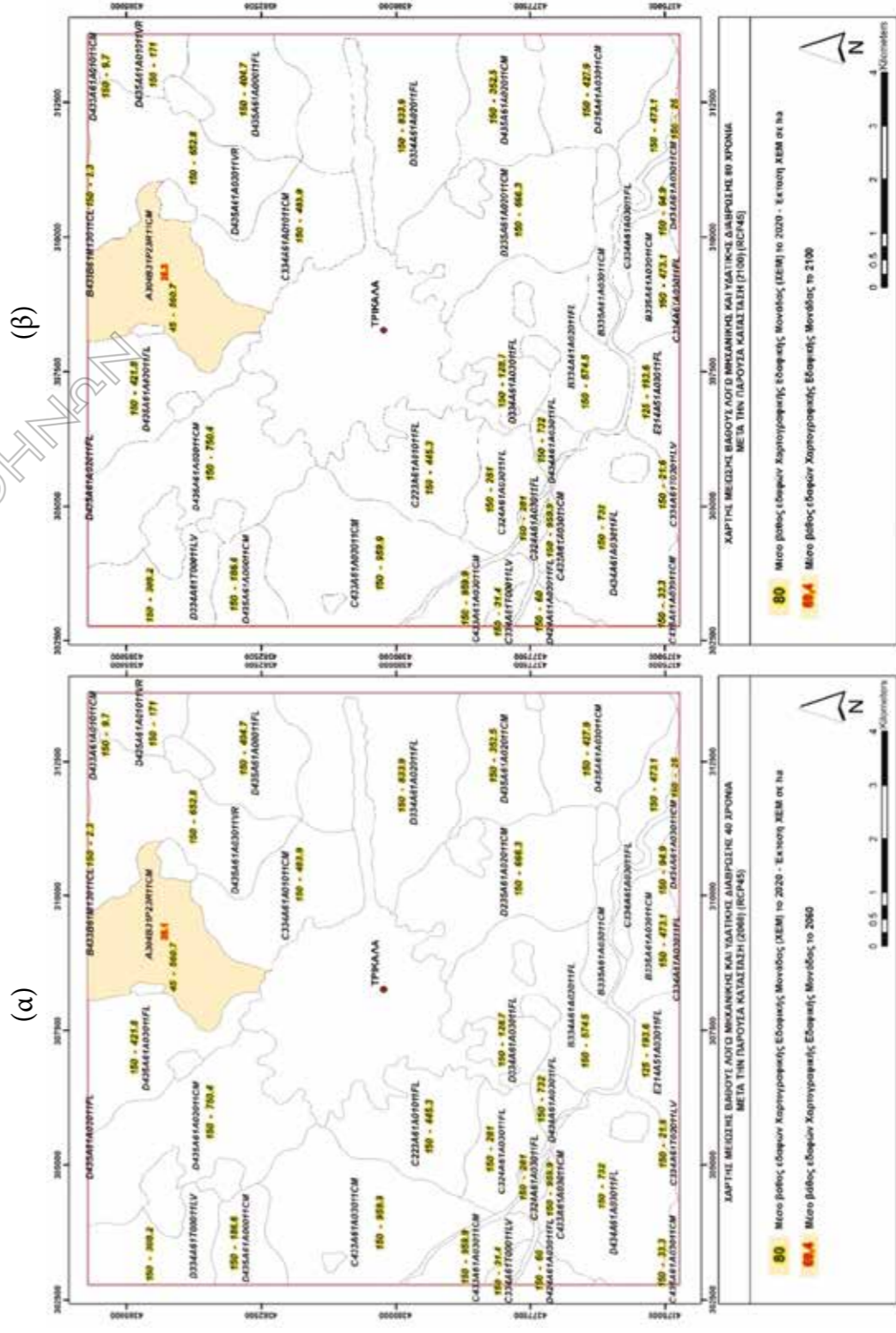
Εικόνα Π2. Χωρική αποτύπωση των εδαφικών χαρτογραφικών μονάδων στην υπό μελέτη περιοχή του Σωτηρίου, με αριθμητικές ενδείξεις για τα βάθη (cm) και την έκταση (ha) της κάθε μονάδας για το σενάριο RCP8.5 (α) κατά το έτος 2060, (β) κατά το έτος 2100. Οι χρωματισμένες μονάδες υποδηλώνουν μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Οι μάρκες αριθμητικές ενδείξεις απεικονίζουν τα βάθη κατά τον τρέχοντα χρόνο, ενώ οι κόκκινες τα βάθη κατά το 2060 (α) ή το 2100 (β).



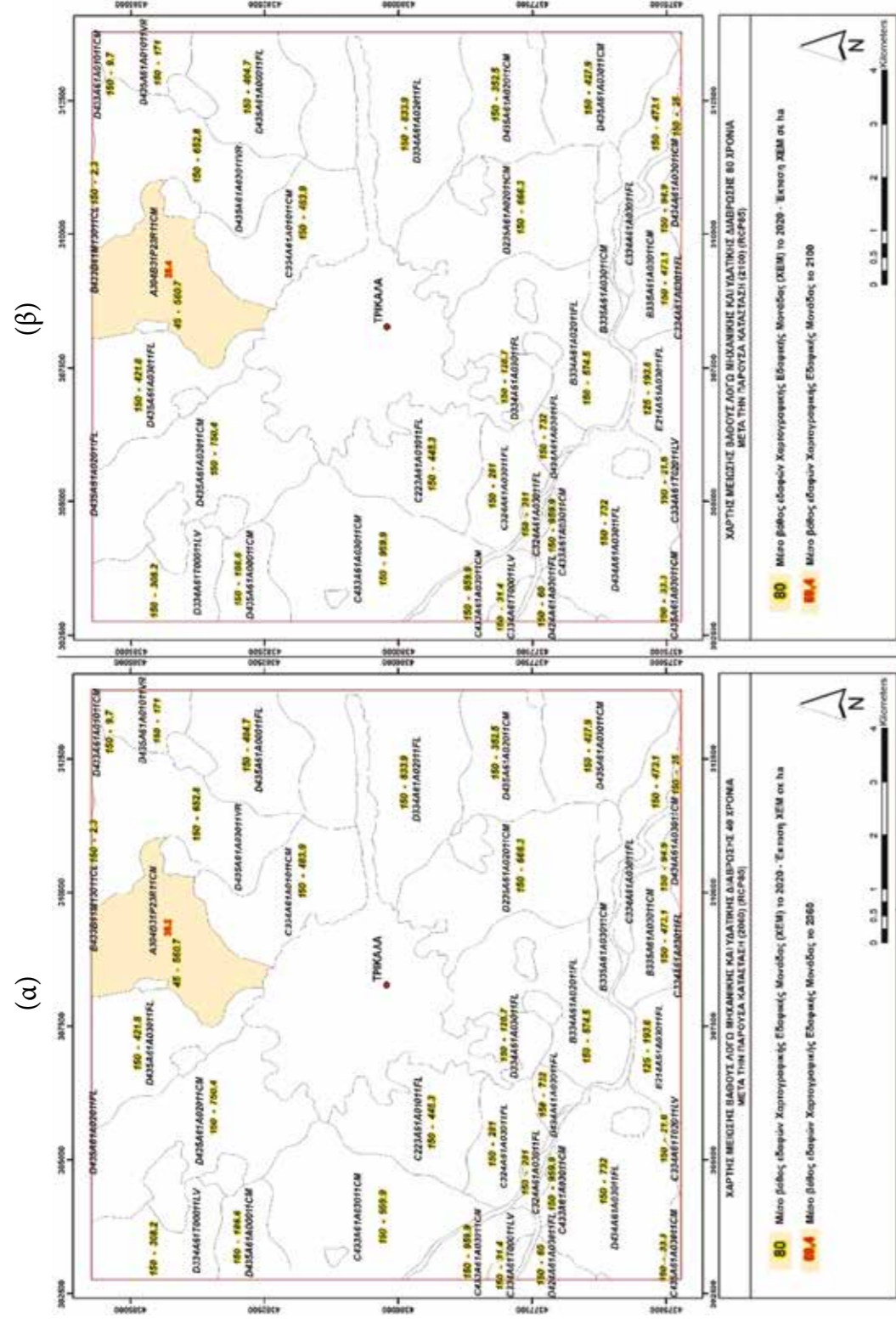
Εικόνα Π3. Χωρική αποτύπωση των εδαφικών χαρτογραφικών μονάδων στην υπό μελέτη περιοχή του Ζαπτείου, με αριθμητικές ενδείξεις για τα βάθη (cm) και την έκταση (ha) της κάθε μονάδας για το σενάριο RCP4.5 (α) κατά το έτος 2060, (β) κατά το έτος 2100. Οι χρωματισμένες μονάδες υποδηλώνουν μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Οι μάρκες αριθμητικές ενδείξεις απεικονίζουν τα βάθη κατά τον τρέχοντα χρόνο, ενώ οι κόκκινες τα βάθη κατά το 2060 (α) ή το 2100 (β).



Εικόνα Π4. Χωρική αποτύπωση των εδαφικών χαρτογραφικών μονάδων στην υπό μελέτη περιοχή του Ζαπτείου, με αριθμητικές ενδείξεις για τα βάθη (cm) και την έκταση (ha) της κάθε μονάδας για το σενάριο RCP8.5 (α) κατά το έτος 2060, (β) κατά το έτος 2100. Οι χρωματισμένες μονάδες υποδηλώνουν μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Οι μαύρες αριθμητικές ενδείξεις απεικονίζουν τα βάθη κατά τον τρέχοντα χρόνο, ενώ οι κόκκινες τα βάθη κατά το 2060 (α) ή το 2100 (β).



Εικόνα Π5. Χωρική αποτύπωση των εδαφικών χαρτογραφικών μονάδων στην υπό μελέτη περιοχή των Τρικάλων, με αριθμητικές ενδείξεις για τα βάθη (cm) και την έκταση (ha) της κάθε μονάδας για το σενάριο RCP4.5 (α) κατά το έτος 2060, (β) κατά το έτος 2100. Οι χρωματισμένες μονάδες υποδηλώνουν μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Οι μαύρες αριθμητικές ενδείξεις απεικονίζουν τα βάθη κατά τον τρέχοντα χρόνο, ενώ οι κόκκινες τα βάθη κατά το 2060 (α) ή το 2100 (β).



Εικόνα Π6. Χωρική αποτύπωση των εδαφικών χερτογραφικών μονάδων στην υπό μελέτη περιοχή των Τρικάλων με αριθμητικές ενδείξεις για τα βάθη (cm) και την έκταση (ha) της κάθε μονάδας για το σενάριο RCP8.5 (α) κατά το έτος 2060, (β) κατά το έτος 2100. Οι χρωματισμένες μονάδες υποδηλώνουν μείωση του βάθους λόγω διάβρωσης. Οι μαύρες αριθμητικές ενδείξεις απεικονίζουν τα βάθη κατά τον τρέχοντα χρόνο, ενώ οι κόκκινες τα βάθη κατά το 2060 (α) ή το 2100 (β).



ΑΘΗΝΩΝ

ΑΚΑΔΗΜΙΑ



ΑΘΗΝΩΝ

