



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**  
**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

*Μεταπτυχιακή διατριβή*

**«Μελέτη επίπτωσης της ξηρασίας στους  
μεσογειακούς βοσκοτόπους  
υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής»**



Εκπονήθηκε για την εκπλήρωση των υποχρεώσεων για την απόκτηση  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος  
από την

***Παναγέα Ιωάννα***



**Χανιά 2016**

---



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον Καθηγητή Ιωάννη Τσάνη για την ανάθεση της εργασίας αυτής, την επίβλεψη και την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στο εργαστήριο του.

Ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής για την βοήθεια τους και την συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Ιωάννη Δαλιακόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου δείχνει, τη βοήθεια και την καθοδήγησή του καθώς επίσης και για όλες τις δυνατότητες που μου έχει δώσει κατά της διάρκεια της συνεργασίας μας.

## Περίληψη

Η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις άνυδρες περιοχές όπως η Μεσόγειος αποτελεί σημαντικό αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια καθώς είναι εξαιρετικά απρόβλεπτες και επηρεάζονται από ακραία καιρικά φαινόμενα όπως η ξηρασία. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και η μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων αναμένεται να επηρεάσει την διακύμανση της ξηρασίας και κατά συνέπεια την παραγωγικότητα των οικοσυστημάτων. Η πρόβλεψη της απόκρισης της βλάστησης στις ξηρασίες μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία στρατηγικών και λήψη αποφάσεων για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται εννέα διαφορετικά κλιματικά μοντέλα πρόβλεψης κάτω από δύο σενάρια συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου. Λόγω των συστηματικών σφαλμάτων που παρουσιάζουν τα κλιματικά μοντέλα, ακολουθεί διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας για περιορισμό των υπαρχόντων αβεβαιοτήτων. Με βάση τα παραπάνω γίνεται (α) πρόβλεψη της διακύμανσης της ξηρασίας με τους δείκτες ξηρασίας SPI, που λαμβάνει υπόψη μόνο την βροχόπτωση, και RDI, που συνυπολογίζει και την αλλαγή της θερμοκρασίας, και (β) πρόβλεψη των φαινομένων ξηρότητας με χρήση του δείκτη ξηρότητας της UNEP. Η σχετική αλλαγή της απόκρισης της βλάστησης των βοσκοτόπων στην αλλαγή του κλίματος υπολογίζεται με την συνάρτηση καλλιέργειας-ύδατος παραγωγής όπου προτείνεται από το FAO.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται για 2 μελλοντικές περιόδους μελέτης στην ευρωπαϊκή περιοχή της Μεσογείου καθώς και 4 περιοχές ενδιαφέροντος του ευρωπαϊκού προγράμματος CASCADE που υπόκεινται σε διαφορετικούς βαθμούς κτηνοτροφικής εκμετάλλευσης. Έπειτα από την χωρική ανάλυση παρατηρήθηκε ότι στο μέλλον, τα φαινόμενα ξηρασίας σταδιακά αυξάνονται τόσο σε ένταση και δριμύτητα αλλά και σε χωρική έκταση με τις περισσότερες περιοχές της Μεσογείου να μεταβαίνουν τουλάχιστον σε μία πιο ξηρή κλάση κατηγοριοποίησης. Αυτό έχει ως αντίκτυπο τη μείωση της σχετικής απόδοσης της βλάστησης των βοσκοτόπων μέχρι και 100%, σε μεμονωμένες βέβαια περιοχές, καθιστώντας τους εντελώς μη παραγωγικούς. Αντίθετα, παρατηρείται αύξηση της απόδοσης σε περιοχές όπου υπάρχουν ορεινοί όγκοι και σήμερα χαρακτηρίζονται πιο υγρές. Τα μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα μέχρι το 2050, με την αβεβαιότητα να αυξάνεται ως το 2100, και με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. Η χρονική ανάλυση στις περιοχές ενδιαφέροντος καταδεικνύει τάση για αύξηση της θερμοκρασίας, της εξατμισοδιαπνοής, της ξηρότητας και έντασης των φαινομένων ξηρασίας, ενώ αντίθετα μείωση των κατακρημνίσεων.

## Abstract

The study of climate change effects on drylands, like the Mediterranean, constitutes an important research field the last decades, due to their remarkably unpredictable character and their influence from extreme events such as drought. The increase of mean temperature, as well as the precipitation variability is predicted to affect the fluctuation of drought and consequently the productivity of ecosystems. The projection of yield response to droughts may be especially useful, by providing sustainable solutions through the creation of strategies and decisions making for the stakeholders. In this work, climate model data is obtained from 9 GCMs under two greenhouse gas concentration trajectories, RCP2.6 and RCP8.5 of the 5th phase of the Coupled Model Intercomparison Project, and corrected for biases. The derived dataset is used for the projection of the fluctuation of drought, using two drought indices, SPI and RDI. The former only takes into account precipitation while the latter takes also considers the change in temperature. For the prediction of aridity, the UNEP aridity index ( $AI_{IJ}$ ) from Precipitation ( $P$ ) and Potential Evapotranspiration ( $PET$ ), is used. The relative yield response of the pasturelands to climate change is estimated by the crop-water production function proposed by FAO.

Results are analyzed for two future study periods, within a domain that includes the entire European Mediterranean and four CASCADE FP7 Project Study Sites. A gradual increase in the intensity and severity of the drought events, as well as in their spatial extend is observed, with the majority of the Mediterranean areas to drop at least one class in the aridity gradient. This reflects on the grazing lands yield, as a reduction in the relative yield response up to 100% in individual regions, which may render them totally unproductive for the current species. On the other hand, an increase of yield is observed in mountainous areas which are currently characterized wet. The models projections show similar results up to 2050. However, uncertainty increases from then until 2100 and with the increase of latitude. The temporal analysis in the four study areas indicates an increasing trend in temperature, evapotranspiration, aridity and intensity of drought events, while precipitation shows a decreasing trend.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Περιεχόμενα.....	1
Περιεχόμενα πινάκων .....	3
Περιεχόμενα εικόνων.....	4
1 Εισαγωγή .....	7
1.1 Ξηρότητα και ξηρασία .....	7
1.2 Απόκριση απόδοσης καλλιεργειών στην έλλειψη ύδατος .....	9
1.3 Κλιματική αλλαγή, καλλιέργειες και βοσκότοποι.....	10
Κλιματική αλλαγή.....	10
Κτηνοτροφία, γεωργία και βοσκότοποι.....	11
Άνυδρες περιοχές.....	12
1.4 Κλιματικά μοντέλα και κλιματικά σενάρια .....	16
1.5 Σκοπός της εργασίας .....	18
2 Μεθοδολογία .....	21
2.1 Δείκτης ξηρότητας.....	21
2.2 Δείκτες ξηρασίας .....	23
Γενικά   23	
Standardized Precipitation Index – SPI.....	25
Standardized Reconnaissance Drought Index – RDIs.....	27
2.3 Σχετική απόδοση καλλιέργειας.....	27
Συντελεστής απόκρισης απόδοσης καλλιέργειας.....	28
2.4 Εξατμισοδιαπνοή.....	29
Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.....	30
Δυνητική εξατμισοδιαπνοή.....	31
Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας .....	32
Πραγματική εξατμισοδιαπνοή .....	32
2.5 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας .....	32
3 Περιοχή μελέτης.....	35
3.1 Περιοχή και περίοδοι μελέτης .....	35
3.2 Επιλογή δεδομένων .....	38

Δεδομένα παρατηρήσεων.....	38
Δεδομένα κλιματικών μοντέλων.....	39
3.3 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας .....	40
3.4 Δείκτης ξηρότητας.....	41
3.5 Δείκτες ξηρασίας .....	41
3.6 Σχετική απόδοση καλλιεργειών .....	42
4 Αποτελέσματα.....	46
4.1 Ξηρότητα .....	46
4.2 Ξηρασία .....	51
4.3 Χρονική εξέλιξη των παραμέτρων στις 4 περιοχές μελέτης .....	53
4.4 Απόδοση βλάστησης βοσκοτόπων .....	60
5 Συμπεράσματα .....	65
6 Βιβλιογραφία.....	68

## Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 2.1 Δείκτες ξηρότητας.....	22
Πίνακας 2.2 Κλιματική κατάταξη βάση δείκτη ξηρότητας UNEP.....	23
Πίνακας 2.3: Δείκτες ξηρασίας (Μ: μετεωρολογική ξηρασία, Υ: υδρολογική ξηρασία, Α: αγροτική ξηρασία, Τ: τηλεπισκόπισης, Σ: συνδυασμός).....	24
Πίνακας 2.4 Κατηγοριοποίηση έντασης φαινομένου βάση δείκτη SPI (Mckee et al. 1993; WMO 2012). ....	26
Πίνακας 2.5: Κατηγοριοποίηση απόκρισης καλλιεργειών βάση του συντελεστή απόκρισης. ....	28
Πίνακας 2.6: Συντελεστές απόκρισης διαφορετικών καλλιεργειών.....	29
Πίνακας 2.7: Μέσο ημερήσιο ποσοστό ετήσιας διάρκειας ημέρας ανά γεωγραφικό πλάτος. ....	31
Πίνακας 3.1 Βασικά χαρακτηριστικά περιοχών μελέτης .....	35
Πίνακας 3.2 Πληροφορίες σχετικά με τα GCMs που χρησιμοποιήθηκαν. ....	39
Πίνακας 3.3 Κωδικοί CORINECLC2006 όπου επιλέχθηκαν στην περιοχή μελέτης .....	44
Πίνακας 3.4 Συντελεστής απόκρισης για κάθε κωδικό χρήσης γης που επιλέχθηκε. ....	45



## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1: Παγκόσμια αλλαγή θερμοκρασίας (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) συγκριτικά με την περίοδο 1986-2005 (αριστερά) (Knutti & Sedlacek, 2013). Συγκέντρωση CO <sub>2</sub> σύμφωνα με τα σενάρια RCP (δεξιά) (Vuuren et al., 2011). .....	18
Εικόνα 3.1 Περιοχές μελέτης του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος CASCADE που σχετίζονται με βοσκότοπους.....	35
Εικόνα 3.2 : Γενική άποψη της περιοχής μελέτης Albaterra (Φωτογραφία: S. Bautista) .....	36
Εικόνα 3.3: Τυπική βλάστηση στην περιοχή του Castelsaraceno (Φωτογραφία: G. Quaranta) .....	36
Εικόνα 3.4: Τυπικός βοσκότοπος στην περιοχή της Μεσσαράς (Φωτο.: Ι. Δαλιακόπουλος). 37	
Εικόνα 3.5: Γενική άποψη της περιοχής μελέτης Πισσούρι, Κύπρου (Φωτο.: Κ. Themistokleous) .....	38
Εικόνα 3.6: Τυπική βλάστηση στην περιοχή μελέτης της Κύπρου (Φωτο.: Κ. Themistokleous) .....	38
Εικόνα 3.7 : Μετεωρολογικοί σταθμοί από του οποίους λήφθηκαν τα δεδομένα της βάσης δεδομένων E-OBS-v7.....	39
Εικόνα 3.8 Αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας για την μέση μηνιαία θερμοκρασία (επάνω), και για την μέση μηνιαία βροχόπτωση (κάτω). Με γκρι χρώμα παρουσιάζονται τα αδιόρθωτα από σφάλματα μεροληψίας δεδομένα του μοντέλου, με μπλε οι παρατηρημένες τιμές και με ροζ οι διορθωμένες για σφάλματα μεροληψίας τιμές.....	41
Εικόνα 3.9 Χάρτης χρήσεων γης όπου επιλέχθηκαν στην περιοχή μελέτης. ....	42
Εικόνα 4.1 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (πάνω) για την περίοδο αναφοράς (1961-2000). ....	46
Εικόνα 4.2 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (πάνω), για την πρώτη περίοδο μελέτης (2011-2050) υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26.....	47
Εικόνα 4.3 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (πάνω), για τη δεύτερη περίοδο μελέτης υπό το σενάριο RCP826.....	47
Εικόνα 4.4 Ποσοστιαία αλλαγή του δείκτη ξηρότητας συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (πάνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26. ....	48

Εικόνα 4.5 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (πάνω) για την πρώτη περίοδο μελέτης υπό το σενάριο RCP85.....	49
Εικόνα 4.6 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (πάνω), για την δεύτερη περίοδο μελέτης υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85. ....	49
Εικόνα 4.7 Ποσοστιαία αλλαγή του δείκτη ξηρότητας συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (πάνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85. ....	50
Εικόνα 4.8 Boxplot του δείκτη ξηρότητας για το σενάριο RCP26(πάνω) και RCP85 (κάτω). Με μαύρο χρώμα παρουσιάζεται η δεύτερη περίοδος μελέτης(2061-2100), με ροζ η πρώτη περίοδος μελέτης (2011-2050) και με γαλάζιο η περίοδος αναφοράς (1961-2000) .....	51
Εικόνα 4.9 Ποσοστό μηνών όπου σύμφωνα με τον SPI παρουσιάζονται σοβαρά (τιμές μικρότερες από -1) (πάνω) και ακραία (μικρότερες από -2) (κάτω) φαινόμενα ξηρασίας την περίοδο αναφοράς.....	52
Εικόνα 4.10 Ποσοστό μηνών όπου σύμφωνα με τον SPI παρουσιάζονται σοβαρά (τιμές μικρότερες από -1) (πάνω) και ακραία (μικρότερες από -2) (κάτω) φαινόμενα ξηρασίας τις δύο περιόδους μελέτης για κάθε το σενάριο RCP26 αριστερά και RCP85 δεξιά.....	53
Εικόνα 4.11 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή της Μεσσαράς Κρήτης, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς, στην μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIst και SPI.....	56
Εικόνα 4.12 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή του δάσους Randi, Κύπρο, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς, στην μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIst και SPI.....	57
Εικόνα 4.13 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή Albaterra της Ισπανίας, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς, στην	

μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIs και SPI.....	58
Εικόνα 4.14 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή Castelsaraceno της Ιταλίας, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς, στην μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIs και SPI.....	59
Εικόνα 4.15 Χωρική κατανομή των συντελεστών απόκρισης απόδοσης των καλλιεργειών όπως επιλέχθηκαν.....	60
Εικόνα 4.16 Η διάμεσος τιμή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (πάνω) για την περίοδο αναφοράς (1961-2000).....	61
Εικόνα 4.17 Η διάμεσος τιμή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω) για την πρώτη περίοδο μελέτης (άνω σετ) και την δεύτερη (κάτω σετ). Αριστερά για το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85.....	62
Εικόνα 4.18 Ποσοστιαία αλλαγή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (άνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26. ....	64
Εικόνα 4.19 Ποσοστιαία αλλαγή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (άνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85. ....	64

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ξηρότητα και ξηρασία

Η ξηρότητα (aridity) ορίζεται από την έλλειψη υγρασίας (Agnew & Anderson, 1992) και περιγράφει μια μόνιμη κλιματική κατάσταση με πολύ χαμηλές ετήσιες ή εποχιακές βροχοπτώσεις (WMO 1992). Αποτελεί συνάρτηση περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή. Η ξηρότητα είναι συνήθως αποτέλεσμα μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικών και θαλάσσιων κυκλοφοριακών μοτίβων, τοπογραφίας και γεωγραφίας και οι αιτίες της είναι σημαντικές στα πλαίσια της κλιματικής αλλαγής στο βαθμό που αυτή επηρεάζει αυτά τα μοτίβα. Ο Thornthwaite (1948) αναγνωρίζει ότι η ξηρότητα κλίματος εξαρτάται από την επάρκεια του ύψους των βροχοπτώσεων σε σχέση με το ύψος του ύδατος που απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες εξατμισοδιαπνοής. Σημαντικοί παράγοντες είναι επίσης η κατανομή των βροχοπτώσεων μέσα στο έτος και η διακύμανση της θερμοκρασίας. Έτσι η, ξηρότητα μπορεί να εκτιμηθεί είτε με βάση τις κλιματικές μεταβλητές (Aridity indices) είτε μετρώντας των αριθμό των ημερών όπου το ισοζύγιο του ύδατος ευνοεί την ανάπτυξη των φυτών (μήκος καλλιεργητικής περιόδου) (Kassas, 2008).

Ξηρά περιβάλλοντα μπορούν να υπάρξουν στους πόλους, κατά μήκος του ισημερινού, σε βουνά, σε περιοχές με υψόμετρο κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, κατά μήκος των ακτών και μέσα στις ηπείρους, ενώ μπορεί να έχουν ζεστό ή κρύο κλίμα. Οι ξηρές ζώνες είναι εκτάσεις με ασαφή όρια, ενώ η όποια βλάστηση είναι συνήθως ξηροφυλική και αποτελείται από θάμνους και παχύφυτα. Σε τέτοια περιβάλλοντα εμφανίζονται αρνητικά υδατικά ισοζύγια στα οποία η δυνητική εξατμισοδιαπνοή όπου είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας ξεπερνάει τη βροχόπτωση. Τέτοιες κλιματικές καταστάσεις μπορεί να πυροδοτήσουν μία φυσική μεταστροφή όπου ονομάζεται ερημοποίηση (Stadler, 2005).

Σε αντίθεση με την ξηρότητα κλίματος, η ξηρασία είναι ένα παροδικό φαινόμενο κατά το οποίο οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι είναι λιγότεροι από το μέσο όρο μιας αρκετά μεγάλης χρονοσειράς παρελθόντων ετών (Kassas, 2008). Είναι ένα φαινόμενο που έχει σταδιακές επιπτώσεις σε πολλούς τομείς της οικονομίας και πολλές διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η American Meteorological Society (1997) ορίζει τέσσερις μορφές ξηρασίας.

- Μετεωρολογική ξηρασία: ορίζεται με βάση την απόκλιση των τιμών βροχόπτωσης από τις αναμενόμενες σύμφωνα με το κλίμα της περιοχής.

- Υδρολογική ξηρασία: όταν παρατηρούνται χαμηλά επίπεδα απορροής υδάτων σε ρέματα, υδάτινους ταμιευτήρες κλπ., και το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινώνεται. Λαμβάνει χώρα κυρίως μετά από πολλούς μήνες μετεωρολογικής ξηρασίας.
- Καλλιεργητική ξηρασία: όταν από τις παραπάνω καταστάσεις επηρεάζονται και οι καλλιέργειες, και είναι αποτέλεσμα της ανεπάρκειας της εδαφικής υγρασίας να καλύψει τις ανάγκες εξατμισοδιαπνοής των φυτών.
- Κοινωνικοοικονομική ξηρασία: συνδυάζει όλες τις προηγούμενες μορφές ξηρασίας και ορίζεται ως η αρνητική τιμή της διαφοράς κάθε μορφής προσφοράς και ζήτησης ύδατος (πόσιμο νερό, νερό άρδευσης, γεωργικά προϊόντα, υδροηλεκτρική ενέργεια κλπ.). Εκφράζει την τρωτότητα της κοινωνίας στην έλλειψη ύδατος και μπορεί να προκληθεί και μέσα από πολιτικές διαδικασίες όπως είναι οι διαμάχες μεταξύ περιοχών για την χρήση των υδάτων.

Εκτός από την μορφή, η ξηρασία χαρακτηρίζεται από τρία βασικά χαρακτηριστικά: (α) τη δριμύτητα, (β) τη διάρκεια και (γ) τη χωρική κατανομή. Επιπλέον χαρακτηριστικά είναι η συχνότητα, το μέγεθος του αθροιστικού ελλείμματος του ισοζυγίου, η προβλεψιμότητα, κ.α. (Yevjevich, 1967; Palmer, 1965; Wilhite, 2005).

Οι σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών μορφών ξηρασίας και η ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών τους, είναι πολύπλοκες και κατά συνέπεια η ξηρασία ορίζεται με διαφορετικούς τρόπους όπως: «παρατεταμένη απουσία ή ανεπάρκεια βροχοπτώσεων», «ανεπάρκεια βροχοπτώσεων που οδηγεί έλλειψη ύδατος για κάποια δραστηριότητα ή ομάδα», «παρατεταμένη περίοδος ασυνήθιστα ξηρών καιρικών συνθηκών όπου προκαλεί σοβαρή υδρολογική ανισορροπία» (American Meteorological Society, 1977; World Meteorological Organization, 1992).

Παραδείγματα φαινομένων ξηρασίας σε όλο τον κόσμο παρουσιάζονται εκτενώς στην βιβλιογραφία (Spinoni et al., 2015). Υπάρχουν δε αρκετές βάσεις δεδομένων, όπου καταγράφονται περιπτώσεις και γεγονότα ξηρασίας (UCI, 2016; EDC, 2016). Η ξηρασία χαρακτηρίζεται ως καταστροφικό φαινόμενο. Για παράδειγμα, η ξηρασία στην Κίνα μεταξύ 1876 και 1879 θεωρείται ως μία από τις 10 χειρότερες φυσικές καταστροφές όλων των εποχών, κατά την οποία οι ποταμοί στέρεψαν με αποτέλεσμα οι καλλιέργειες και τα ζώα να εξαλειφθούν, οι τιμές στα γεωργικά προϊόντα να φτάσουν έως και δεκαπλασιασμό με αποτέλεσμα πάνω από 20 εκατομμύρια άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους ή να μεταναστεύσουν (Zhixin et al., 2010). Στην Αφρική, μεταξύ 1981-1984, είκοσι χώρες υπέφεραν από σοβαρή ξηρασία με αποτέλεσμα πάνω από ένα εκατομμύριο άνθρωποι να

χάσουν τη ζωή τους (Galvin, 1992). Η ξηρασία στην Ισπανία το 2008 οδήγησε την περιοχή της Καταλονίας σε σημείο να εισάγει νερό από την Γαλλία, ενώ στην Αυστραλία μεταξύ 1995 και 2009, η “ξηρασία της χιλιετίας” οδήγησε την χώρα σε αυστηρά και ακριβά μέτρα προστασίας και αποκατάστασης (WRI, 2016). Τέλος, η εν εξελίξει ξηρασία στην Καλιφόρνια (State of California, 2016), θεωρείται η πιο έντονη ξηρασία όπου έχει καταγραφεί στην περιοχή. Σε συνδυασμό με την επικείμενη κλιματική αλλαγή, η ξηρασία έχει γίνει αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητών (Sousa et al., 2011; Ruffault et al., 2014; Dubrovský et al., 2014; Vrochidou et al., 2013; Koutroulis et al., 2011).

## 1.2 Απόκριση απόδοσης καλλιεργειών στην έλλειψη ύδατος

Η έλλειψη ύδατος στο φυτό και το στρες που προκαλείται έχει σημαντική επίπτωση στην κατανάλωση ύδατος και στη φυτική παραγωγή (Moutonnet et al., 1983). Η φυτική παραγωγή και τα ύδατα είναι δύο παράγοντες άρρηκτα συνδεδεμένοι. Το ύδωρ είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας της φυτικής παραγωγής σε πολλά μέρη του κόσμου όπου οι βροχοπτώσεις είναι ανεπαρκείς για την κάλυψη της αρδευτικής ζήτησης των καλλιεργειών, όπως και στις ημι-άνυδρες περιοχές με θερμά και ξηρά καλοκαίρια (Steduto et al., 2012; Kuslu et al., 2010). Ωστόσο, το δυναμικό της παραγωγής εξαρτάται και από τη γονιμότητα του εδάφους, τις κλιματικές συνθήκες και τις καλλιεργητικές πρακτικές διαχείρισης (Najarchi et al., 2011), παράγοντες που ποικίλουν καθ’ όλη την καλλιεργητική περίοδο ή ακόμα και μεταξύ ετών. Όταν οι παραπάνω παράγοντες είναι βέλτιστοι καθ’ όλη την καλλιεργητική περίοδο, η απόδοση φτάνει στη μέγιστη τιμή της.

Για την εξέταση των τρόπων αύξησης της παραγωγικότητας και αποτελεσματικότητας της χρήσης του ύδατος κάτι που θεωρείται αναγκαίο για τα επόμενα χρόνια (Mekonnen & Hoekstra 2016), πρέπει να είναι γνωστή η απόκριση της απόδοσης των καλλιεργειών σε αυτό. Η σχέση των καλλιεργειών με το ύδωρ, είναι μια σχέση πολύπλοκη στη φύση. Έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες απλοποίησής της μέσω μηχανιστικών και εμπειρικών υποθέσεων και προσεγγίσεων έτσι ώστε να χαρακτηρίζονται απλά και ορθά τα βασικά χαρακτηριστικά που την διέπουν. Η σχέση μεταξύ απόδοσης καλλιέργειας και εφαρμογής αρδευτικού ύδατος ονομάζεται συνάρτηση ύδατος-παραγωγής (water production function) ενώ η σχέση μεταξύ απόδοσης καλλιέργειας και εξατμισοδιαπνοής ονομάζεται συνάρτηση καλλιέργειας-ύδατος παραγωγής (Crop Water Production Function- CWPf) (Kirkorir et al., 2002) και είναι πολύ σημαντική για γεωπόνους, μηχανικούς, οικονομολόγους και σχεδιαστές υδάτινων πόρων (Kirkorir & Raes, 2002). Οι εμπειρικές σχέσεις είναι δύο ειδών: (α) αυτές που σχετίζουν την απόδοση της καλλιέργειας με την εποχιακή εξατμισοδιαπνοή

και (β) αυτές που σχετίζουν την απόκριση απόδοσης της καλλιέργειας με τη σχετική εξατμισοδιαπνοή σε συγκεκριμένα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Ο πιο χρήσιμος τρόπος έκφρασης της CWPF είναι εκφράζοντας τη σχετική απόδοση της καλλιέργειας, δηλαδή διαιρώντας την πραγματική απόδοση της καλλιέργειας με τη μέγιστη κάτω από τις υπάρχουσες καταστάσεις διαχείρισης και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή  $ET_{\alpha}$  με την εξατμισοδιαπνοή της εκάστοτε σοδειάς  $ET_c$ .

Οι επιπτώσεις του στρες σε διαφορετικά στάδια της καλλιέργειας αλληλεπιδρούν με ένα σύνθετο τρόπο. Απλοποιήσεις γίνονται υποθέτοντας ότι οι επιδράσεις είναι ανεξάρτητες σε κάθε στάδιο. Για την έκφραση των αλληλεπιδράσεων σε διαφορετικές περιόδους χρησιμοποιούνται πολλαπλασιαστικές ή προσθετικές διαδικασίες και πολλές συναρτήσεις παραγωγής χρησιμοποιούνται σε μοντέλα βελτιστοποίησης των μεθόδων άρδευσης. Για τον καθορισμό των παραμέτρων αυτών των συναρτήσεων απαιτούνται πειραματικά δεδομένα σε τοπική κλίμακα. Αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι εφικτό και για το λόγο αυτό οι Doorenbos & Kassam (1979) μελέτησαν τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση της παραγωγής στο ύδωρ και όρισαν εμπειρικούς συντελεστές απόκρισης απόδοσης καλλιέργειας για διαφορετικά στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών.

Η CWPF των Doorenbos & Kassam (1979) μεταξύ του ύδατος που εφαρμόζεται στο φυτό και της απόδοσης, μπορεί να μετρήσει την απόδοση ανά μονάδα ύδατος που εφαρμόζεται. Η σχέση αυτή μεταξύ της απόδοσης των καλλιεργειών και του ύδατος που καταναλώνεται, συνδέει τη σχετική απώλεια απόδοσης οποιασδήποτε καλλιέργειας (είτε ποώδης, είτε ξυλώδης) με τη σχετική μείωση της κατανάλωσης του ύδατος (π.χ. εξατμισοδιαπνοή). Είναι πάντα γραμμική (Doorenbos & Kassam, 1979) με κλίση που ονομάζεται συντελεστής απόκρισης καλλιέργειας  $K_y$ , ο οποίος είναι συγκεκριμένος για κάθε καλλιέργεια και καλλιεργητικό στάδιο. Η σχέση αυτή είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη μέχρι και σήμερα για διάφορες εφαρμογές. Είναι περισσότερο κατάλληλη για γενικό σχεδιασμό έργων καθώς και για σκοπούς γρήγορης εκτίμησης ως αρχική προσέγγιση στο πρόβλημα.

### 1.3 Κλιματική αλλαγή, καλλιέργειες και βοσκότοποι

#### Κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ορίζεται ως:

«μία αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί (π.χ. με στατιστικές μεθόδους) από τις αλλαγές στο μέσο όρο ή/και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του και που λαμβάνει χώρα για ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα (συνήθως δεκαετίες ή περισσότερο). Αναφέρεται σε οποιαδήποτε αλλαγή στο κλίμα σε βάθος χρόνου η οποία

*οφείλεται είτε στη φυσική μεταβλητότητα είτε στις δραστηριότητες του ανθρώπου» (IPCC, 2007b).*

Το κλίμα επηρεάζεται από έναν αριθμό τόσο φυσικών όσο και ανθρωπογενών παραγόντων με αποτέλεσμα την αλλαγή στην κατάστασή του, με την αυξανόμενη εκπομπή και συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου να αναφέρονται ως η κινητήρια δύναμη αυτής της αλλαγής (Sohoulande Djebou et al., 2015). Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών στη σύμβαση πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC, 1992) αναγνωρίζει ότι η αλλαγή του κλίματος και οι δυσμενείς επιπτώσεις του, είναι κοινά για την ανθρωπότητα και εκφράζει την ανησυχία ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, κάτι που εντείνει το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ενδεικτικά, η μέση θερμοκρασία από το 1880 μέχρι το 2012 έχει αυξηθεί κατά 0,85 °C, και βάση διαφορετικών σεναρίων, μέχρι το τέλος του τρέχοντος αιώνα αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω (Sohoulande Djebou et al., 2015), με τα φυσικά οικοσυστήματα και την ανθρωπότητα να επηρεάζονται δυσμενώς (UNFCCC, 1992). Σήμερα, τα περισσότερα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν μέση αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από 2 °C μέχρι το τέλος του αιώνα. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της διάσκεψης του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC, 2015), έλαβε χώρα η «Συμφωνία του Παρισιού» που ήρθε να αντικαταστήσει το «Πρωτόκολλο του Κιότο» που υπεγράφη το 1992. Σύμφωνα με αυτή τη νέα συμφωνία, οι μεγαλύτερες οικονομίες που πλανήτη συμφώνησαν να λάβουν μέτρα με στόχο τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε λιγότερο από 2 °C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα (UNFCCC, 2015).

### **Κτηνοτροφία, γεωργία και βοσκότοποι**

Η ανάγκη προσδιορισμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία και την κτηνοτροφία, οφείλεται στο γεγονός ότι η αλλαγή αυτή αναμένεται να μεταβάλλει τα αποθέματα τροφής σε παγκόσμιο επίπεδο. Είναι επιτακτική ανάγκη να προωθηθεί περαιτέρω η γνώση για την απόκριση των καλλιεργειών και βοσκοτόπων στην αλλαγή του κλίματος, τη μείωση των αβεβαιοτήτων και την αξιολόγηση των μελλοντικών κινδύνων (IPCC, 2007b). Η κλιματική αλλαγή και η μεταβλητότητα του κλίματος εγείρει ανησυχίες και οι ενδιαφερόμενοι φορείς έχουν συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις όσον αφορά την προσαρμογή των καλλιεργειών στις κλιματικές αλλαγές (Howden et al., 2007), καθώς υπάρχει περιορισμένη γνώση σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις του κλίματος με τους παράγοντες που επηρεάζουν τα αγροτικά και κτηνοτροφικά συστήματα (Thornton et al. 2009; Lesk et al. 2016).



Σημαντικές αλλαγές συμβαίνουν στα φυσικά και βιολογικά συστήματα λόγω της κλιματικής αλλαγής (Rosenzweig et al., 2008), μέσω της μεταβολής στη βροχόπτωση, της αύξησης της θερμοκρασίας και του CO<sub>2</sub>, της αύξησης των ακραίων καιρικών γεγονότων, και της μεταβολής στη διασπορά ασθενειών στις καλλιέργειες (Tubiello et al., 2007). Η αύξηση των γεγονότων ξηρασίας, πλημμυρών και θερμικού στρες εκτιμάται ότι είναι πιθανό (αν και δεν μπορεί να απεικονιστεί ικανοποιητικά με τα σημερινά δεδομένα) να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στις καλλιέργειες, το ζωικό κεφάλαιο και την παραγωγή (IPCC 2007b). Αυτές οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν αλλαγές στην παραγωγή των ξερικών καλλιεργειών και των κτηνοτροφικών φυτών, καθώς και στη διαθεσιμότητα και κατανομή των υδατικών πόρων (IPCC, 2007b). Αναμένεται ότι τα κτηνοτροφικά συστήματα με βάση την ελεύθερη βόσκηση (εκτατικά συστήματα) και τα μικτά συστήματα θα επηρεαστούν περισσότερο από την υπερθέρμανση του πλανήτη συγκριτικά με τα εντατικά συστήματα (Nardone et al., 2010). Έτσι, σημαντικές αλλαγές θα συμβούν στα συστήματα κτηνοτροφίας που σχετίζονται με τα είδη και την κατανομή των ζώων, των καλλιεργειών και των στρατηγικών παροχής πόρων. Η εκτίμηση της επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής στη βιοποικιλότητα προκειμένου να προσδιοριστεί η ευαισθησία των οικοσυστημάτων είναι αρκετά σημαντικό κομμάτι, αν και η προσαρμοστική ικανότητα των φυτών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η αλλαγή του κλίματος θεωρείται πιθανό να έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις σε όλα τα είδη φυτών, αλλά κυρίως σε εκείνα τα οποία εξαρτώνται από τη διατήρηση των σπόρων στο έδαφος όπως τα χορτολιβαδικά. Οι αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο αναμένεται να οδηγήσουν σε υψηλότερο κίνδυνο διάβρωσης και απόπλυσης των θρεπτικών συστατικών, ενώ η διαθέσιμη εδαφική υγρασία και η εποχικότητα θα είναι οι κύριοι παράγοντες περιορισμού της ανάπτυξης του φυτού (Cosentino et al., 2014).

### **Άνυδρες περιοχές**

Όπως δηλώνει το όνομά τους, οι άνυδρες περιοχές χαρακτηρίζονται από την έλλειψη ύδατος. Εξίσου σημαντική είναι και η διακύμανση των βροχοπτώσεων και η μεταβλητότητά της όσον αφορά την ποσότητα την ένταση και την τοποθεσία. Οι άνυδρες περιοχές είναι κλιματικά εξαιρετικά απρόβλεπτες και ακραία καιρικά φαινόμενα όπως ξηρασία λαμβάνουν χώρα συχνά (IUCN, 2010). Η αλλαγή του κλίματος είναι πιθανό να αποτελέσει μια σημαντική δρώσα δύναμη που θα επιφέρει οικολογική αλλαγή στις άνυδρες περιοχές του κόσμου, οι οποίες υπόκεινται ήδη σε υδατική καταπόνηση, υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλές και ακανόνιστες βροχοπτώσεις, υποβάθμιση των εδαφών και, ως εκ τούτου, υψηλά επίπεδα τρωτότητας (IUCN, 2010).

Παρά το γεγονός ότι οι προβλέψεις διαφέρουν μεταξύ των διαφόρων σεναρίων εκπομπών, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τα άνυδρα οικοσυστήματα (Sohoulande Djebou et al. 2015; Huang et al. 2016). Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (United Nations, 1992) αναγνωρίζει ότι χώρες με χαμηλό υψόμετρο, νησιωτικές, πεδινές παράκτιες, άνυδρες και ημι-άνυδρες περιοχές ή περιοχές εκτεθειμένες σε πλημμύρες, ξηρασία και ερημοποίηση, και αναπτυσσόμενες χώρες με ευπαθή ορεινά οικοσυστήματα είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στις δυσμενείς επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η κλιματική αλλαγή θα επιφέρει μείωση των βροχοπτώσεων και υψηλή ποικιλομορφία στις ξηρές και άνυδρες περιοχές (IPCC, 2014), κάτι που υποδηλώνει πολύπλοκες διαταραχές στο μελλοντικό υδρολογικό κύκλο (Sohoulande Djebou et al., 2015).

Τα τρία βασικά παραγωγικά συστήματα της γης στις άνυδρες περιοχές είναι οι αρδευόμενες γεωργικές εκτάσεις, όπου υπάρχουν διαθέσιμοι υδάτινοι πόροι (ποτάμια, υπόγειοι υδροφορείς), οι ξηρικές γεωργικές εκτάσεις (σε ημι-άνυδρες και ξηρές υπο-υγρές περιοχές) και οι λιβαδικές εκτάσεις. Σε αυτά μπορούν να προστεθούν οι θαμνώδεις και δασικές και οι ζώνες δένδρων που φυτεύονται ως ανεμοφράκτες για την προστασία του εδάφους και την καταπολέμηση της διάβρωσής του καθώς και για παροχή καύσιμης βιομάζας (Kassas, 2008).

Η βιολογική παραγωγικότητα σε όλα τα χερσαία οικοσυστήματα απαιτεί φως, ύδωρ και θρεπτικά συστατικά, καθώς και ένα κατάλληλο εύρος κλιματολογικών και εδαφικών χαρακτηριστικών. Ενώ οι απαιτήσεις άλλων οικοσυστημάτων μπορεί να περιορίζονται στο φως και τη θερμοκρασία, στα άνυδρα οικοσυστήματα εξ' ορισμού το ύδωρ είναι ο περιοριστικός παράγοντας ελέγχου της παραγωγικότητάς τους. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις άνυδρες περιοχές θα επηρεάσουν τη χρήση των φυσικών πόρων και την εποχιακή τους διακύμανση, όπως για παράδειγμα την επιλογή του συστήματος καλλιέργειας ή τα εποχιακά διαθέσιμα βοσκοτόπια. Η αγροτική παραγωγή αναμένεται να μειωθεί συνολικά στις ξηρές περιοχές (IPCC 2007a), κάτι το οποίο θα έχει σοβαρές επιπτώσεις στην επισιτιστική ασφάλεια, ειδικά στα ξερικά συστήματα (IPCC 2007a). Αυτό θέτει τις άνυδρες περιοχές, που σε σύγκριση με τα υπόλοιπα χερσαία οικοσυστήματα με εξαίρεση τα πολικά έχουν τη χαμηλότερη πρωτογενή παραγωγικότητα, σε μειονεκτική θέση, (Safriel, 2009) με μεγαλύτερο κίνδυνο για τις μη-αρδεύσιμες καλοκαιρινές καλλιέργειες (IPCC 2007a).

Οι άνυδρες περιοχές που χρησιμοποιούνται για κτηνοτροφία αποτελούν το 2/3 του συνόλου των άνυδρων περιοχών ανά τον κόσμο. Στα οικοσυστήματα αυτά, η βόσκηση είναι

η κύρια εκμετάλλευση της φυσικής βλάστησης (Neely et al., 2009). Έτσι, περιοχές αυτές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε υποβάθμιση και, καθώς είναι ιδιαίτερα κρίσιμες τόσο οικονομικά όσο και κοινωνικά, πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην διαχείριση των φυσικών τους πόρων. Οι αυξημένες βροχοπτώσεις σε ορισμένες ξηρές περιοχές θα μπορούσαν να ενθαρρύνουν την εξάπλωση της εκτατικής κτηνοτροφίας, ιδιαίτερα όπου οι βροχοπτώσεις είναι πολύ απρόβλεπτες για την στήριξη καλλιεργειών.

Η έγκαιρη παροχή ύδατος μέσω βροχόπτωσης για τις μη-αρδευόμενες καλλιέργειες είναι ζωτικής σημασίας, και η μελλοντική συμπεριφορά τέτοιων περιοχών είναι στενά συνδεδεμένη με τη μεταβλητότητα των βροχοπτώσεων όπως καθοδηγείται από την κλιματική αλλαγή (Sohoulande Djebou et al., 2015; Bussotti et al., 2014). Το υδατικό στρες στη βλάστηση είναι ένας τρόπος χαρακτηρισμού της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας. Ωστόσο, οι Maestre et al. (2012), επισημαίνουν πολλά γνωστικά κενά όσον αφορά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις ξηρές περιοχές και τονίζουν την ανάγκη για συστηματικό καθορισμό αυτών των επιπτώσεων, και την αντιμετώπιση των ελλείψεων στο δυναμικό της βλάστησης σε σχέση με τη μεταβλητότητα του κλίματος.

Η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει το εύρος πολλών ειδών, είτε προωθώντας είτε περιορίζοντάς τα, με τα πιο προσαρμοστικά χωροκατακτητικά είδη να είναι πιθανότατα αυτά που θα ευνοηθούν σε πολλές περιπτώσεις (IUCN, 2010). Έτσι, υπάρχουν φόβοι ότι ο ρυθμός της αλλαγής του κλίματος μπορεί να είναι αρκετός ώστε μερικά είδη να αφανιστούν, λόγω του σχετικά μικρότερου ρυθμού προσαρμογής τους. Στις άνυδρες περιοχές ο κίνδυνος αυτός είναι μεγαλύτερος, καθώς πολλά είδη βρίσκονται ήδη στο όριο της επιβίωσης.

Οι προκλήσεις για τις άνυδρες περιοχές λόγω κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν (IUCN, 2010):

- Ταχείς δημογραφικές αλλαγές, που θα επιδεινωθούν από την κλιματική αλλαγή θα κάνουν τη διαχείριση των πόρων δυσκολότερη (π.χ. η αύξηση της πίεσης επί των υπηρεσιών οικοσυστήματος)
- Αλλαγές στις χρήσεις γης που προκύπτουν από την ελλιπή κατανόηση των σημερινών πρακτικών χρήσης γης, θα οδηγήσει σε περαιτέρω υποβάθμιση του οικοσυστήματος μέσω της αλλαγής των ενδιαιτημάτων, της επικράτησης χωροκατακτητικών ειδών φυτών ή ζώων, της απώλειας βιοποικιλότητας ή της ρύπανσης.
- Αύξηση του πληθυσμού και κατακερματισμός της γης, το οποίο περιορίζει κάποιες ευκαιρίες για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

- Αμφισβητούμενο ή επισφαλές ιδιοκτησιακό καθεστώς που συμβάλλει στην αποθάρρυνση επενδύσεων και την υποβάθμιση της γης.
- Ασταθές κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον και ένοπλες συγκρούσεις σε πολλές άνυδρες περιοχές δεν επιτρέπουν την προσήλωση στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής.

Στη Μεσόγειο, οι ανθρωπογενείς μακροπρόθεσμες αλλαγές είναι πολύ σημαντικές, είτε από την άποψη των αναγκών σε ύδωρ, είτε στη γεωγραφία και την κάλυψη της γης. Η περιοχή της Μεσογείου είναι ένα πολύπλοκο μωσαϊκό διαφοροποιημένων τοπίων. Μεγάλο μέρος της είναι ημίξηρο και το έδαφος υπόκειται σε αλάτωση, μείωση παραγωγικότητας, και άλλων ειδών υποβάθμισης λόγω διαφόρων φυσικών (ξηρασίες, πλημμύρες, δασικές πυρκαγιές) και κυρίως ανθρώπινων δραστηριοτήτων (άροση, υπερ-εκμετάλλευση, υπερβόσκηση, πυρκαγιές, κ.α.) (Correal et al., 2003). Ως αποτέλεσμα αυτών των ανθρωπογενών πιέσεων και της κλιματικής αλλαγής, οι υδρολογικές συνθήκες και τα φυσικά χαρακτηριστικά μπορούν να εξελιχθούν σε περιπτώσεις ερημοποίησης (Cudennec et al., 2007).

Η φυσική κλιματική ποικιλομορφία στη λεκάνη της Μεσογείου είναι πολύ μεγάλη και η σχετική αβεβαιότητα στις κλιματικές προβλέψεις σημαντική. Τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCMs) ακόμα παρουσιάζουν σημαντική αβεβαιότητα και έχουν προβλήματα στην προσομοίωση της ακραίας μεταβλητότητας στο χώρο και το χρόνο. Αυτό τα εμποδίζει από το να προσομοιάζουν με ικανοποιητική ακρίβεια το Μεσογειακό κλίμα του παρελθόντος, του παρόντος και του μέλλοντος (Cudennec et al., 2007). Η κλιματική αλλαγή ωστόσο αναμένεται να επηρεάσει τα οικοσυστήματα της Μεσογείου περισσότερο από κάθε άλλη κλιματική ζώνη καθώς σε παγκόσμιο επίπεδο αναμένεται μια αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα μεταξύ 1.3 και 1.8 °C, ενώ για τη νότια Ευρώπη αυτή η αύξηση κυμαίνεται μεταξύ 2-3 °C (Christensen et al., 2007). Τα φυτά που αναπτύσσονται στην περιοχή της Μεσογείου σήμερα αναπτύσσονται κοντά στη βέλτιστη θερμοκρασία, και η αύξηση θα θέσει σε κίνδυνο τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και θα επηρεάσει την αύξηση και επιβίωσή τους (Bussotti et al., 2014). Η κατά μέσο όρο αύξηση της θερμοκρασίας και ο προβλεπόμενη αυξημένη συχνότητα φαινομένων ξηρασίας (Bussotti et al., 2014) πιθανώς να επιδεινώσει τις συνθήκες αυτές.

Στις μεσογειακές χώρες τα αροτραία συστήματα περιορίζονται κυρίως σε άνυδρες μη-αρδευόμενες περιοχές που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη νότια Ευρώπη, (Ισπανία, Πορτογαλία, Ιταλία και Ελλάδα). Η παραγωγικότητα τέτοιων συστημάτων σχετίζονται άμεσα με τη βροχόπτωση (Correal et al., 2003). Τα μοντέλα πρόβλεψης για την κλιματική

αλλαγή στη νότια Ευρώπη διαφέρουν από αυτά για τη βόρεια και κεντρική Ευρώπη, κυρίως όσον αφορά τη βροχόπτωση. Στη λεκάνη της Μεσογείου προβλέπεται μεγάλη μείωση των βροχοπτώσεων κυρίως λόγω της μείωσης της συχνότητάς τους. Προβλέπεται λοιπόν, επιπλέον πίεση στις Μεσογειακές άνυδρες περιοχές μέσω μια γενικότερης μείωσης των υδάτινων πόρων, ώστε και μια σχετικά μικρή αλλαγή θα αρκεί να ξεκινήσει ένας χωροχρονικός μετασχηματισμός των ημίξηρων περιοχών σε ξηρές άνυδρες καθώς επίσης και σε μία ολική μεταμόρφωση των μη άνυδρων σε άνυδρων όσον αφορά το κλίμα και την παραγωγικότητά τους (Safriel, 2009)

Το κλίμα έχει ήδη αλλάξει κατά το παρελθόν και τα φυτά είναι γνωστό ότι μπορούν να προσαρμόζονται στις αλλαγές μέσω των ανατομικών φυσικών και μοριακών συνθηκών. Για να επιβιώνουν και να αναπτύσσονται στις δύσκολες κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου τα φυτά έχουν αναπτύξει ένα ευρύ φάσμα προσαρμοστικών χαρακτηριστικών (Reyer et al., 2013; Petit et al., 2015). Τα επιστημονικά ερωτήματα που γεννώνται είναι (α) αν αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να ανταπεξέλθουν στους γρήγορους ρυθμούς αλλαγής του κλίματος στην περιοχή και (β) αν τα συστήματα βόσκησης και κυρίως η σκληρόφυλλη αειθαλή βλάστηση της Μεσογείου που έχει αργούς ρυθμούς προσαρμογής (Reyer et al. 2013; Petit et al. 2015) μπορούν να προσαρμοστούν στην αλλαγή του κλίματος (Correal et al., 2003).

#### 1.4 Κλιματικά μοντέλα και κλιματικά σενάρια

Η κλιματική αλλαγή πρέπει να εξετάζεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Όσο αφορά τη χωρική διερεύνησή της, η ανάλυση γίνεται είτε σε παγκόσμια είτε σε τοπική κλίμακα. Η τοπική αλλαγή του κλίματος μπορεί να διαφέρει ή/και να είναι αντίθετη από την παγκόσμια τάση, όπως στην περιοχή της Μεσογείου, όπου η επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι πιο έντονη. Η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος γίνεται με μοντέλα πρόβλεψης που βασίζονται σε πραγματικές τάσεις ή/και σενάρια (Spinoni, 2010).

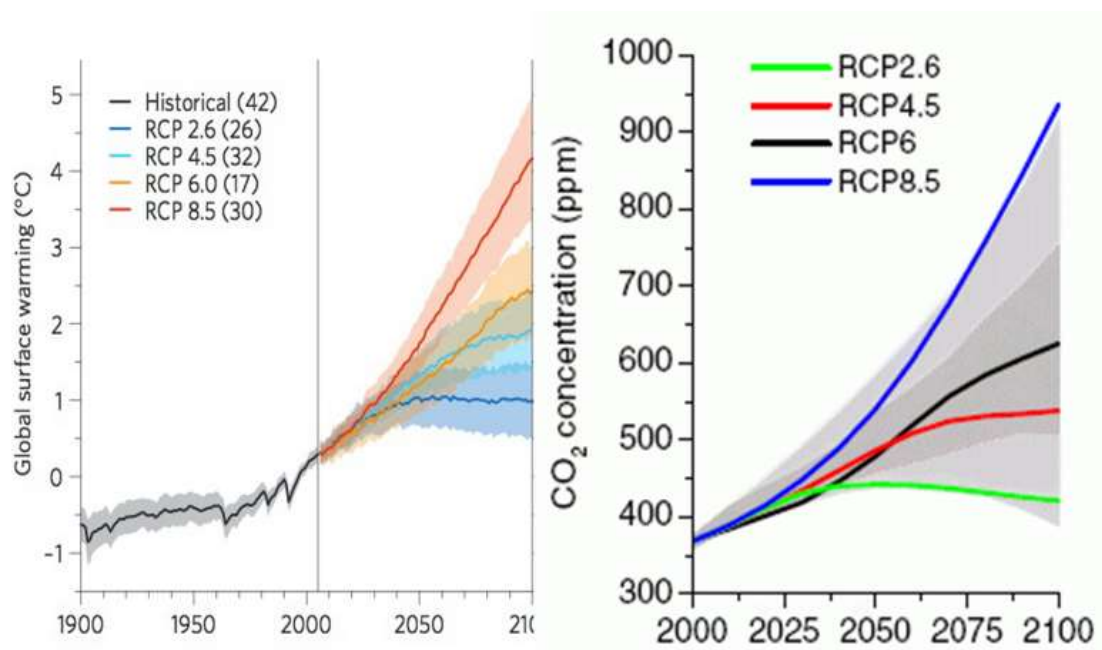
Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Coupled Atmospheric - Ocean General Circulation Models, AOGCMs). Πρόκειται για μοντέλα που βασίζονται στις βασικές φυσικές αρχές του γήινου συστήματος όπως οι βασικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών και της διάδοσης της ακτινοβολίας. Θεωρούνται το καλύτερο διαθέσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής από σενάρια όσον αφορά τα αέρια του θερμοκηπίου (Giorgi and Mearns, 2002). Τα AOGCMs χωρίζονται σε Ατμοσφαιρικά (AGCMs) και Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (OGCMs) ενώ μπορεί να είναι και συζευγμένα μεταξύ τους (AOGCMs), καθώς και με άλλα μοντέλα, όπως τα μοντέλα προσομοίωσης της παγοκάλυψης στην ξηρά και τη θάλασσα, της

βιόσφαιρας, κ.α. Τα AOGCMs που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του κλίματος και της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζουν ομοιότητες με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την καιρική πρόγνωση λίγων ημερών. Η διαφορά είναι ότι τα κλιματικά AOGCMs δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις διεργασίες του εδάφους, του ωκεανού και των παγετώνων, καθώς και στην ισορροπία των διεργασιών μεγάλης χρονικής κλίμακας, όπως ο υδρολογικός κύκλος.

Ο ρυθμός με τον οποίο θα εξελιχθούν στο μέλλον οι εκπομπές και κατά συνέπεια και οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, δε μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς. Για το σκοπό αυτό στα πλαίσια της τρίτης έκθεσης της IPCC διαμορφώθηκε ένας μεγάλος αριθμός σεναρίων (40 σενάρια) σχετικών με τη μελλοντική εξέλιξη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) (Nakicenović et al., 2000). Με την εξέλιξη της έρευνας, δημιουργήθηκε η ανάγκη για νέα σενάρια, κάτι το οποίο οδήγησε την IPCC να ζητήσει από τις επιστημονικές κοινότητες να αναπτύξουν μια νέα σειρά από σενάρια ώστε να διευκολύνουν τη μελλοντική αξιολόγηση της αλλαγής του κλίματος (Moss et al. 2010; Moss et al. 2008). Τα σενάρια εκπομπών εξελίχθηκαν στην λογική των τεσσάρων αντιπροσωπευτικών πορειών (μονοπάτια) για τις μελλοντικές συγκεντρώσεις των GHG (Representative Concentration Pathways – RCPs) (Moss et al. 2010; Moss et al. 2008). Η φιλοσοφία αυτών των σεναρίων στηρίζεται στον αντίκτυπο κλιματικής διέγερσης λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας (radiative forcings – σε  $\Delta W/m^2$ ), όπως αυτές προκύπτουν από μία σειρά από παράγοντες πέρα από τις συγκεντρώσεις και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, όπως τις χρήσεις γης, τις κοινωνικο-οικονομικές καταστάσεις και τις πολιτικές που ακολουθούνται για το περιβάλλον. Έτσι, διαφορετικά σενάρια μπορούν να ακολουθήσουν ίδιο RCP. Διακρίνονται τέσσερα βασικά RCPs, τα οποία πήραν τα ονόματά τους από τη διαφορά στη μέση δρώσα ακτινοβολία που θα έχουν επιτύχει έως το 2100. Τα σενάρια είναι τα RCP 2.6, 4.5, 6.0 και 8.5 που αντιστοίχως υποθέτουν  $2.6 W/m^2$ ,  $4.5 W/m^2$ ,  $6.0 W/m^2$  και  $8.5 W/m^2$  αύξηση στη μέση παγκόσμια ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους αντίστοιχα. Η προβλεπόμενη μελλοντική θερμοκρασία και συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τα RCPs παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1.

Τονίζεται ότι η γνώση ορισμένων φυσικών διεργασιών είναι ακόμα περιορισμένη. Για το λόγο αυτό στις κλιματικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται παραμετροποιήσεις και απλουστεύσεις ορισμένων φαινομένων. Ωστόσο δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια φαινόμενα που σχετίζονται με την επίδραση της τοπογραφίας σε τοπική και περιοχική κλίμακα για το λόγο αυτό παρουσιάζουν σημαντική αβεβαιότητα, μέσω της

ατελής κατανόησης της δυναμικής του κλίματος και λόγω θεμάτων κλίμακας. Ακόμη και μεταξύ των μοντέλων με παρόμοιες προσομοιώσεις θερμοκρασίας, οι προβλέψεις των τοπικών βροχοπτώσεων μπορεί να ποικίλουν σημαντικά κυρίως λόγω της χαοτικής φύσης του κλίματος και λόγω των προσεγγίσεων στην επίλυση του τοπικού κλίματος σε περιφερειακό επίπεδο (Soussana et al., 2010). Για το λόγο αυτό συνήθως, γίνεται χρήση διαφόρων κλιματικών μοντέλων κάτω από διαφορετικά σενάρια εκπομπών, τα οποία διορθώνονται ως προς το μεροληπτικό σφάλμα ώστε να αποφευχθούν η επιρροή των διαφορετικών σεναρίων εκπομπών, και των συστηματικών σφαλμάτων των μοντέλων.



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια αλλαγή θερμοκρασίας (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) συγκριτικά με την περίοδο 1986-2005 (αριστερά) (Knutti & Sedlacek, 2013). Συγκέντρωση CO<sub>2</sub> σύμφωνα με τα σενάρια RCP (δεξιά) (Vuuren et al., 2011).

### 1.5 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση των επιπτώσεων των φαινομένων ξηρασίας στους Μεσογειακούς βοσκότοπους. Οι προβλέψεις για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία και στα συστήματα κτηνοτροφίας είναι πιο αξιόπιστες σε μεγάλης κλίμακας προβλέψεις παρά σε τοπικό επίπεδο και είναι κυρίως ποιοτικές παρά ποσοτικές (Campbell et al., 1996). Η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει ποικιλοτρόπως τις χρήσεις γης, στα διάφορα σημεία ανά τον κόσμο ως αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κοινωνικο-οικονομικών και περιβαλλοντικών πιέσεων που καθορίζουν την ευπάθεια και την ανθεκτικότητα ενός παραγωγικού συστήματος (Nardone et al., 2010). Τα μοντέλα πρόβλεψης για την κλιματική αλλαγή στη λεκάνη της Μεσογείου προβλέπουν μεγάλη μείωση των βροχοπτώσεων κυρίως λόγω της μείωσης της συχνότητάς τους και

αυξημένη συχνότητα φαινομένων ξηρασίας. Οποιαδήποτε μείωση της διαθεσιμότητας του ύδατος στο έδαφος έχει επίπτωση στη διαθεσιμότητα ύδατος για τα φυτά και συνεπώς στην πραγματική παραγωγή και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Moutonnet et al. 1983) Για την μείωση των ζημιών από την ξηρασία, είναι ζωτικής σημασίας ο χαρακτηρισμός τους ώστε να είναι δυνατές κάποιες λειτουργίες όπως η έγκαιρη προειδοποίηση και η ανάλυση του κινδύνου τα οποία επιτρέπουν καλύτερη προετοιμασία και σχεδιασμό της έκτακτης ανάγκης (Zargar et al., 2011). Η πρόβλεψη της απόκρισης της καλλιέργειας στις ξηρασίες μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία στρατηγικών και λήψη αποφάσεων για τους αγρότες και τους συμβούλους τους, καθώς και ερευνητών. Η συνεχώς αυξανόμενη ανταγωνιστική ζήτηση των υδατικών πόρων σε συνδυασμό με τη συνεχόμενη αυξητική τάση για γεωργικά προϊόντα, η τάση για βελτίωση της παραγωγής και της αποτελεσματικότητας της χρήσης του ύδατος με σκοπό την εξασφάλιση της ασφάλειας παραγωγής καθώς και την αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή δεν ήταν ποτέ άλλοτε πιο επείγον.

Οι παραπάνω προβληματισμοί, αποτελούν κομμάτι του ερευνητικού έργου CASCADE (2012-2017) το οποίο χρηματοδοτείται από το 7ο Πρόγραμμα Πλαίσιο της ΕΕ και ασχολείται με τις αιφνίδιες και καταστροφικές μεταστροφές στα ξηρά οικοσυστήματα. Η προσέγγιση του έργου CASCADE χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό ερευνητικών μεθόδων για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης. Από τη μία πλευρά, εκτελούνται πειράματα σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες ενώ ταυτόχρονα, μαθηματικά μοντέλα και υπολογιστικές προσομοιώσεις δίνουν τη δυνατότητα να εξεταστούν σενάρια που θα περιγράφουν μεταβολές οικοσυστημάτων ώστε να σχεδιαστούν προληπτικές στρατηγικές περιβαλλοντικής διαχείρισης. Το CASCADE εκτελεί πειράματα σε έξι περιοχές μελέτης στη Νότια Ευρώπη, όπου έχουν παρατηρηθεί ή είναι πιθανό να παρατηρηθούν μεταβολές των οικοσυστημάτων, με αντίστοιχες συνέπειες για τη βλάστηση, την πανίδα και τον τοπικό πληθυσμό.

Απώτερος σκοπός είναι να δοθούν απαντήσεις και υπάρξει περαιτέρω γνώση σχετικά με τα παρακάτω ερωτήματα

- Για ποιον λόγο και πότε συντελούνται αιφνίδιες μεταστροφές σε οικοσυστήματα ή τοπία.
- Για ποιον λόγο ορισμένα οικοσυστήματα ή τοπία είναι περισσότερο ευπροσάρμοστα (λιγότερο πιθανό να μεταβληθούν) από ό,τι άλλα.
- Ποια μέτρα μπορούν να ληφθούν για την αποτροπή των αιφνίδιων μεταστροφών.
- Είναι δυνατή η αποκατάσταση υποβαθμισμένων οικοσυστημάτων ή τοπίων στην πρότερή τους κατάσταση.



- Κρίνεται οικονομικά σκόπιμη η αποκατάσταση οικοσυστημάτων ή τοπίων ή μήπως η προσπάθεια θα ήταν υπερβολικά δαπανηρή.

**Στη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία συνοπτικά θα εξεταστούν :**

1. Η μοντελοποίηση της απόκρισης της βλάστησης των Μεσογειακών βοσκότοπων στις κλιματικές συνθήκες
2. Η έρευνα ως αναφορά τους διαδεδομένους δείκτες ξηρότητας και ξηρασίας
3. Η χρήση σύγχρονων κλιματικών δεδομένων για την διερεύνηση των επιπτώσεων και ενδεχόμενων μεταβολών ως συνέπεια της κλιματικής αλλαγής στους μεσογειακούς βοσκότοπους.
4. Ο προσδιορισμός των περιοχικών συνθηκών και του ρόλου τους στις ενδεχόμενες μεταβολές με σκοπό την διερεύνηση δυνατοτήτων μετριασμού ή/και προσαρμογής.

## 2 Μεθοδολογία

### 2.1 Δείκτης ξηρότητας

Η έννοια της ταξινόμησης του κλίματος αναπτύχθηκε τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα από τους Köppen και Geiger. Από τότε, πολυάριθμες κλιματικές και βιολογικές ταξινομήσεις έχουν προταθεί για την ποσοτικοποίηση του βαθμού της ξηρότητας και του ορισμού των κλιματικών ζωνών (Maliva & Missimer, 2012; Stadler, 2005) αν και ο όρος *δείκτης ξηρότητας* αναφέρεται πρώτη φορά από τον Thornthwaite (1948).

Οι δείκτες ξηρότητας είναι ποσοτικοί δείκτες του βαθμού επάρκειας του ύδατος σε μία δεδομένη θέση (Stadler, 2005). Με τη χρήση των δεικτών ξηρότητας επιχειρείται να χαρακτηριστεί η κλιματική κατάσταση της εκάστοτε περιοχής καθώς και να ποσοτικοποιηθεί ο βαθμός της ξηρασίας. Ωστόσο, δεν υπάρχει συμφωνία σε μία προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των ορίων μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων ξηρασίας παρά μόνο στη γενική περιοχή που καλύπτουν οι ξηρές περιοχές (Agnew & Anderson, 1992). Οι οριακές τιμές που χρησιμοποιούνται για την κατηγοριοποίηση της ξηρότητας με κάθε δείκτη συνήθως οφείλονται σε παρατηρήσεις της βλάστησης. Για την πρακτική διαχείριση των υδάτινων πόρων οι δείκτες ξηρότητας δεν παίζουν σημαντικό ρόλο, ούτε υπάρχει ισχυρός λόγος προτίμησης του ενός έναντι στον άλλο. Ωστόσο, έχουν σημασία στην παρακολούθηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υδάτινους πόρους εάν υπάρχουν διαθέσιμα επαρκή δεδομένα σε τοπικό επίπεδο ώστε να παρατηρείται η αλλαγή των τιμών των δεικτών (Maliva & Missimer, 2012).

Οι δείκτες έχουν εφαρμοστεί σε ηπειρωτικό και υπο-ηπειρωτικό επίπεδο και συνηθέστερα σχετίζονται με την κατανομή της βλάστησης και των καλλιεργειών. Η διατύπωση δεικτών ξηρότητας δεν είναι απλή διαδικασία λόγω της πολύπλοκης φύσης της ξηρασίας. Ο ποιο απλός δείκτης ξηρότητας βασίζεται αποκλειστικά στην κατακρήμνιση που θεωρεί ότι μία ξηρή περιοχή δέχεται λιγότερο από 250 mm ανά έτος και ημίξηρη μεταξύ 250 και 500 mm. Η (IPCC 2007a) χρησιμοποιεί αυτό το κριτήριο ταξινόμησης ξηρότητας. Όμως, η ξηρότητα είναι μια συνάρτηση αλληλεπίδρασης της βροχόπτωσης, της εξατμισοδιαπνοής, της θερμοκρασίας, των χαρακτηριστικών του εδάφους και της φυτοκάλυψης, γι' αυτό και οι δείκτες οι οποίοι λαμβάνουν ευρείας αποδοχής λαμβάνουν άμεσα ή έμμεσα υπόψη τους περισσότερους παράγοντες (Stadler, 2005; Tsakiris & Vangelis, 2005). Από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ξηρότητα, η βροχόπτωση, η θερμοκρασία και η εξατμισοδιαπνοή σχετίζονται με το κλίμα, ενώ οι υπόλοιποι εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες, γι' αυτό και οι πρώτες παράμετροι χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατηγοριοποίηση της

βιοκλιματικής ξηρότητας (Tsakiris & Vangelis, 2005). Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιοι από τους δείκτες όπου εμφανίζονται στη βιβλιογραφία στο Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1 Δείκτες ξηρότητας

Συνάρτηση	Διευκρίνιση	Βασική βιβλιογραφία
$P/E$	Λόγος ετήσιας βροχόπτωσης προς ετήσιας εξάτμισης	Transeau (1905)
$P/T$	Λόγος ετήσιας βροχόπτωσης προς ετήσιας μέσης θερμοκρασίας	Lang (1920)
$P/(T + 10)$	Δείκτης βροχόπτωσης	De Martonne (1926)
$R/LT$	Ξηρότητα βάση δείκτη ακτινοβολίας. Λόγος μέσης ετήσιας ακτινοβολίας προς λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ύδατος επί θερμοκρασία	Budyko (1951)
$P \leq 2T$	Κατηγοριοποίηση βάση της διάρκειας και δριμύτητας των ξηρών μηνών	Gaussen (1955)
$P_p/PE$	Δείκτης διαθέσιμης υγρασίας: μηνιαία συνολική βροχόπτωση προς δυνητική εξατμισοδιαπνοή	Hargreaves (1971)
$P/ET$	Λόγος βροχόπτωσης προς εξατμισοδιαπνοή (Penman)	UNESCO (1977)
$P/ET$	Λόγος βροχόπτωσης προς εξατμισοδιαπνοή (Thornthwaite)	UNEP (1992)

Η UNESCO (1977) χρησιμοποιεί ένα δείκτη κατηγοριοποίησης που ορίζεται από το λόγο μέσης ετήσιας βροχόπτωσης προς τη μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή. Αυτή με τη σειρά της υπολογίζεται βάση της σχέσης Penman, η οποία απαιτεί δεδομένα που στις περισσότερες περιοχές δεν είναι διαθέσιμα. Αυτό οδήγησε την UNEP (1992) να προτείνει ένα παρόμοιο δείκτη ( $AI_u$ ) που ορίζεται ως ο λόγος της ετήσιας βροχόπτωσης προς την ετήσια εξατμισοδιαπνοή και υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τον Thornthwaite (1948). Οι United Nations Convention to Combat Desertification - UNCCD και ο FAO χρησιμοποιούν επίσης αυτόν το δείκτη για την κατηγοριοποίηση σε άνυδρες ξηρές και ημίξηρες περιοχές.

Ο δείκτης ξηρότητας που προτείνεται από την UNEP (1992) ορίζεται από το λόγο της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης προς τη μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή, με την τελευταία να υπολογίζεται από τη σχέση όπου προτείνεται από τον Thornthwaite (1948).

Ο δείκτης ονομάζεται UNEP Aridity Index και είναι της μορφής:

$$AI_u = \frac{P}{PET} \quad (1)$$

Τα όρια που ορίζουν το διαφορετικό βαθμό της ξηρότητας παρουσιάζονται στο Πίνακα 2.2 (UNEP, 1992).

Πίνακας 2.2 Κλιματική κατάταξη βάση δείκτη ξηρότητας UNEP.

Κλιματική κατάταξη		Δείκτης ξηρότητας UNEP
Hyperarid	Υπερξηρή	$AI_U < 0.05$
Arid	Ξηρή	$0.05 < AI_U < 0.20$
Semi-arid	Ημίξηρη	$0.20 < AI_U < 0.50$
Dry subhumid	Ξηρή ημίυγρη	$0.50 < AI_U < 0.65$

Οι Gao & Giorgi (2008) χρησιμοποιούν τρεις τρόπους μέτρησης της ξηρότητας στη Μεσόγειο, την κλιματική ταξινόμηση κατά Köppen, τον δείκτη ξηρότητας της UNEP και το δείκτη ξηρότητας του Budyko (Budyko 1974), για την εκτίμηση της ξηρότητας τον 21<sup>ο</sup> πρώτο αιώνα στη Μεσόγειο με χρήση περιοχικού κλιματικού μοντέλου υπό δύο διαφορετικά σενάρια εκπομπών (A2, A1, SRES). Συμπεραίνουν ότι μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα στην περιοχή της Μεσογείου μπορεί να παρουσιαστούν σημαντικές αυξήσεις στις ξηρές περιοχές κυρίως στις κεντρικές και νότιες περιοχές της Ιβηρικής, Ιταλικής και Ελληνικής χερσονήσου, στην Τουρκία, σε περιοχές της νοτιοανατολικής Ευρώπης (π.χ. Ρουμανία και Βουλγαρία), στη Βόρεια Αφρική και τα μεγάλα νησιά (Κορσική, Σαρδηνία και Σικελία) που βρίσκονται σε μεγάλο κίνδυνο για περιπτώσεις υδατικού στρες των οικοσυστημάτων και πιθανόν ερημοποίηση. Υπάρχει μια γενική συμφωνία σε αυτά μεταξύ του δείκτη UNEP και του Budyko, κάτι που ενισχύει την αξιοπιστία των μοντέλων. Οι Bannayan et al., (2010) χρησιμοποιούν το δείκτη ξηρότητας του UNEP συγκριτικά με την απόδοση διαφορετικών καλλιεργειών και βρίσκουν σημαντική συσχέτιση μεταξύ απόδοσης και  $AI_U$ , κάτι που επίσης ενισχύει την αξιοπιστία του δείκτη.

## 2.2 Δείκτες ξηρασίας

### Γενικά

Για τον χαρακτηρισμό της ξηρασία υπάρχουν αρκετές μεθοδολογίες, ωστόσο η χρήση των δεικτών ξηρασία κυριαρχεί (Tsakiris et al. 2007). Οι δείκτες ξηρασία είναι ποσοτικές μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τα επίπεδα ξηρασίας αφομοιώνοντας στοιχεία από μία ή περισσότερες κλιματικές μεταβλητές (εξατμισοδιαπνοή, βροχόπτωση) σε μία ενιαία αριθμητική τιμή, η οποία είναι πιο εύκολα αξιοποιήσιμη από ακατέργαστα κλιματικά δεδομένα. Οι δείκτες ξηρασίας μπορεί να αντανakλούν διαφορετικές συνθήκες ή γεγονότα:

ανωμαλίες του κλίματος όσον αφορά την ξηρασία, επιπτώσεις στην υδρολογία ή την γεωργία όπως είναι η απώλεια της εδαφικής υγρασίας ή την ταπείνωση του υδροφόρου.

Η κατηγοριοποίηση των δεικτών ξηρασίας γίνεται συνήθως με βάση το είδος των επιπτώσεων που σχετίζονται, είτε με βάση των μεταβλητών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούν (κλιματολογικά δεδομένα, εικόνες τηλεπισκόπησης) (Zargar et al., 2011). Έτσι η πιο δημοφιλής κατηγοριοποίηση είναι αυτή όπου εμπεριέχει τους γεωργικούς, υδρολογικούς και μετεωρολογικούς δείκτες, με τον Niemeyer (2008) να προτείνει ακόμα τρεις κατηγορίες, τους καθολικούς (χρησιμοποιούν ποικίλες γεωργικές μετεωρολογικές και υδρολογικές μεταβλητές, π.χ. Palmer Drought Severity Index-PDSI), τους συνδυασμένους (ενσωματώνουν διαφορετικούς υπάρχοντες δείκτες π.χ. US Drought Monitor) και τους δείκτες βασισμένους στην τηλεπισκόπηση (π.χ. NDVI), (Zargar et al., 2011).

Καθώς η ανάπτυξη ενός δείκτη ξηρασίας μπορεί εννοιολογικά να βασιστεί σε πολλούς παράγοντες, έχουν αναπτυχθεί περισσότεροι από 150 διαφορετικοί δείκτες. Λόγω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης, της ανάγκης να προσαρμόζονται σε διαφορετικές κλιματολογικές και υδρολογικές συνθήκες (Vicente-Serrano et al., 2009), καθώς επίσης και να καλύπτουν διαφορετικές εφαρμογές και επιπτώσεις (Niemeyer, 2008; Zargar et al., 2011) συνεχίζουν συνεχώς να αναπτύσσονται νέοι (Zargar et al., 2011). Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιοι από τους δείκτες όπου εμφανίζονται στη βιβλιογραφία στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Δείκτες ξηρασίας (Μ: μετεωρολογική ξηρασία, Υ: υδρολογική ξηρασία, Α: αγροτική ξηρασία, Τ: τηλεπισκόπησης, Σ: συνδυασμός).

Όνομα	Τύπος	Βασική βιβλιογραφία
Z-index	Μ	Palmer (1965)
Palmer Modified Drought Index (PMDI)	Μ	Palmer (1965)
Effective Drought Index (EDI)	Μ	Byun & Wilhite (1999)
Standardized Precipitation Index (SPI)	Μ	McKee et al. (1993)
Palmer Drought Severity Index (PDSI)	Μ	Palmer (1965)
Reconnaissance Drought Index (RDI)	Μ	Tsakiris & Vangelis (2005)
Palmer Hydrological Drought Index (PHDI)	Υ	Palmer (1965)
Crop Moisture Index (CMI)	Α	Palmer (1968)
Crop Water Stress Index (CWSI)	Α	Idso et al. (1981)
Normalized Difference Infrared Index (NDII)	Τ	Hardisky et al. (1983)
Normalized Difference Water Index (NDWI)	Τ	Gao (1996)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Τ	Ji & Peters (2003)
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	Μ	Vicente-Serrano et al. (2009)
Aggregate Drought Index (ADI)	Σ	Keyantash & Dracup (2004)
Normalized Multi-Band Drought Index (NMDI)	Τ	Wang & Qu (2001)

Hybrid Drought Index (HDI)

Σ Karamouz et al. (2009)

Spatially Normalized SPI (SN-SPI)

M Koutroulis et al. (2011)

**Standardized Precipitation Index – SPI**

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βροχόπτωσης (Standardized Precipitation Index – SPI) αναπτύχθηκε από τους McKee et al. (1993) για τον προσδιορισμό της σπανιότητας μίας περιόδου ξηρασίας για δεδομένη χρονική κλίμακα, δεδομένης της ύπαρξης επαρκών δεδομένων βροχόπτωσης. Υπολογίζεται με βάση την απόκλιση της υπό εξέταση τιμής βροχόπτωσης από το μέσο μίας κανονικοποιημένης Γάμμα κατανομής η οποία έχει προσαρμοστεί στα διαθέσιμα δεδομένα καθώς η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης δεν είναι κανονική (Waggoner 1989). Δηλαδή προκύπτει από την μετατροπή της αθροιστικής μορφής της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Γάμμα σε ίσης πιθανότητας τιμή της τυποποιημένης κανονικής κατανομής με μέσο όρο 0 και τυπική απόκλιση 1.

Σύμφωνα με τον Thom (1958) τα κλιματικά δεδομένα των βροχοπτώσεων ακολουθούν κατανομή τύπου Γάμμα της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίδεται από την εξίσωση:

$$g_x = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (2)$$

Όπου  $\alpha$  είναι η παράμετρος της μορφής της καμπύλης,  $\beta$  η παράμετρος της κλίμακας του σχήματος και  $x > 0$  είναι το ποσό της βροχόπτωσης και:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (3)$$

το ολοκλήρωμα της Γάμμα κατανομής. Οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  του κλάσματος της πιθανότητας της κατανομής υπολογίζονται για κάθε σημείο για το χρονικό διάστημα όπου επιλέγεται (1 μήνας, 3 μήνες, 12 μήνες, 48 μήνες κ.ο.κ. ) για κάθε μήνα του χρόνου. Σύμφωνα με τον Thom (1958) είναι:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

όπου:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (5)$$

και  $n$  είναι το πλήθος των παρατηρήσεων της βροχόπτωσης. Οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να βρεθεί η αθροιστική πιθανότητα ενός επεισοδίου βροχόπτωσης

για το επιθυμητό χρονικό διάστημα και για έναν ορισμένο μήνα για το καθορισμένο σημείο. Η συνάρτηση της αθροιστικής πιθανότητας υπολογίζεται από την Εξίσωση 6:

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}}\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x}{\hat{\beta}}} dx \quad (6)$$

όπου για  $t = x/\hat{\beta}$  η Εξίσωση 6 παίρνει τη μορφή της ελλιπούς συνάρτησης Γάμμα:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} dt \quad (7)$$

Η συνάρτηση Γάμμα δεν ορίζεται για  $x = 0$  ενώ η κατανομή της βροχόπτωσης μπορεί να πάρει την τιμή μηδέν η αθροιστική πιθανότητα μετατρέπεται στη μορφή της Εξίσωσης 8:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (8)$$

όπου  $q$  είναι η πιθανότητα της μηδενικής βροχόπτωσης.

Έτσι η αθροιστική πιθανότητα  $H(x)$  μετασχηματίζεται σε μία κανονικοποιημένη μεταβλητή  $z$ , της οποίας η μέση τιμή  $\bar{x}$  είναι μηδέν και η τυπική απόκλιση ένα. Η τιμή αυτή είναι ο δείκτης SPI. Θετικές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν βροχόπτωση περισσότερη από την ενδιάμεση ενώ αρνητικές μικρότερη. Με βάση την τιμή του SPI προκύπτει η κατηγοριοποίηση της έντασης του φαινομένου (υγρού ή ξηρού) κατά τους McKee et al. (1993) όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4 Κατηγοριοποίηση έντασης φαινομένου βάση δείκτη SPI (McKee et al. 1993; WMO 2012).

Δείκτης SPI	Χαρακτηρισμός της έντασης της ξηρασίας	
$\geq 2.00$	Εξαιρετικά υγρή	Extreme wet
1.50 - 1.99	Σημαντικά υγρή	Severe wet
1.00 - 1.49	Μετρίως υγρή	Moderate wet
0.00 - 0.99	Ήπια υγρή	Mild wet
0.00 - 0.99	Ήπια ξηρή	Mild drought
-1.00 - 1.49	Μετρίως ξηρή	Moderate Drought
-1.50 - 1.99	Σημαντικά ξηρή	Severe Drought
$\leq -2.00$	Εξαιρετική ξηρή	Extreme Drought

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η απλότητα, η άμεση εφαρμοσιμότητα και η συγκρισιμότητα μεταξύ περιοχών με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά είτε για μακροπρόθεσμες είτε βραχυπρόθεσμες εφαρμογές αφού μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικές χρονικές κλίμακες (συνήθως από 1 μήνα ως 48 μήνες). Ουσιαστικά με τον συγκεκριμένο δείκτη το συσσωρευμένο απόθεμα ξηρασίας μπορεί να μετρηθεί ως το

άθροισμα των δεικτών SPI για όλους τους μήνες σε ένα επεισόδιο ξηρασίας. Το αρνητικό της μεθόδου είναι ότι λαμβάνει υπόψη μόνο την βροχόπτωση και ότι τα αποτελέσματα της μεταβάλλονται με τον αριθμό των δεδομένων (WMO, 2012).

### **Standardized Reconnaissance Drought Index – RD1st**

Συμφωνά με τους (Vicente-Serrano et al. 2009), οι δείκτες που λαμβάνουν υπόψη μόνο την βροχόπτωση βασίζονται στην υπόθεση ότι η βροχόπτωση είναι η μεταβλητή οπου έχει μεγαλύτερη μεταβλητότητα από ότι άλλες παραμέτρους (όπως η θερμοκρασία ή η εξατμισοδιαπνοή) και ότι οι άλλες μεταβλητές είναι σταθερές. Δηλαδή θεωρούν ότι οι ξηρασίες συμβαίνουν μόνο ως αποτέλεσμα της έλλειψης βροχόπτωσης. Ωστόσο, εμπειρικές έρευνες έχουν δείξει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει άμεσα την δριμύτητα των φαινομένων ξηρασίας. Έτσι και σύμφωνα με το (WMO, 2012) δείκτες όπως ο SPI δεν είναι κατάλληλοι για την ανάλυση της κλιματικής αλλαγής και σύμφωνα με τους Tsakiris & Vangelis (2005), όσον αφορά την μετεωρολογική ξηρασία, η έλλειψη ύδατος πρέπει να προσεγγίζεται υπολογίζοντας τόσο τις εισροές όσο και τις εκροές από το σύστημα.

Οι Tsakiris & Vangelis (2005) προτείνουν τον Standardized Reconnaissance Drought Index – RD1st, ο οποίος βασίζεται τόσο σε δεδομένα βροχόπτωσης, αλλά συμπεριλαμβάνει και δεδομένα θερμοκρασίας μέσω του υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Ο RD1 υπολογίζεται από τον λόγο της βροχόπτωσης προς την δυνητική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με την Εξίσωση 9:

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j} \quad (9)$$

όπου  $P_j$  και  $PET_j$  είναι η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή για τον  $j$  μήνα του έτους.

Ο Standardized Reconnaissance Drought Index – RD1st, υπολογίζεται ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως στον SPI, αλλά αντί της βροχόπτωσης χρησιμοποιείται ο λόγος  $\frac{P}{PET}$ . Ο RD1st υπολογίζεται με την ίδια μεθοδολογία όπως ο SPI και ως εκ τούτου η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι παρόμοια με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια κατηγοριοποίηση όπως αυτή του SPI (Πίνακας 2.4). Ο δείκτης RDI είναι περισσότερο συνδεδεμένος με τις φυσικές διεργασίες, μπορεί να συσχετιστεί και με τον δείκτη ξηρότητας της UNEP, και να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του μελλοντικού κλίματος.

### **2.3 Σχετική απόδοση καλλιέργειας**

Το ανώτερο όριο για την απόδοση μια καλλιέργειας καθορίζεται από τη γονιμότητα του εδάφους, τις κλιματικές συνθήκες και τις πρακτικές διαχείρισης. Όταν όλα αυτά είναι βέλτιστα καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο η απόδοση καθώς και εξατμισοδιαπνοή φτάνουν στη μέγιστη τιμή τους. Οποιαδήποτε έλλειψη ύδατος έχει σημαντική επίπτωση



στην πραγματική απόδοση και την πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Οι Doorenbos & Kassam 1979 συμπεριλαμβάνουν αυτές τις παραμέτρους στον συντελεστή απόκρισης απόδοσης και συνδέουν την σχετική μείωση της απόδοσης της καλλιέργειας και της σχετικής μείωσης της εξατμισοδιαπνοής σύμφωνα με την Εξίσωση 10 όπως παρουσιάζεται από τον FAO:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_{max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad (10)$$

Όπου  $Y_a$  και  $Y_{max}$  είναι η πραγματική και η μέγιστη απόδοση της καλλιέργειας αντίστοιχα,  $ET_a$  και  $ET_{max}$  είναι η πραγματική και η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή αντίστοιχα και  $K_y$  είναι ο συντελεστής απόκρισης απόδοσης της καλλιέργειας. Η σχετική απόδοση των καλλιεργειών υπολογίζεται από την Εξίσωση 11:

$$\frac{Y_a}{Y_{max}} = 1 - K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad (11)$$

### Συντελεστής απόκρισης απόδοσης καλλιέργειας

Ο συντελεστής απόκρισης απόδοσης της καλλιέργειας ( $K_y$ ) είναι ένας παράγοντας ποσοτικοποίησης του κατά πόσο η καλλιέργεια είναι ανθεκτική ή όχι στην υδατική καταπόνηση (Singh et al., 2010; Lovelli et al., 2007) όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5. Συνδέει τη σχετική μείωση της απόδοσης με τη σχετική μείωση της εξατμισοδιαπνοής (Moutonnet et al., 1983) και μπορεί είτε να διακριτοποιείται ανά στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας είτε να χρησιμοποιείται ως συνολικός όλης της καλλιεργητικής περιόδου. Ο συνολικός συντελεστής απόκρισης βασίζεται στην επίπτωση της έλλειψης ύδατος για όλη την εποχή ανάπτυξης ενώ ο ανά στάδιο ανάπτυξης βασίζεται στην έλλειψη ύδατος ανά μεμονωμένο στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Οι Stanhill et al. (1985) αναφέρουν ότι οι διακυμάνσεις των τιμών του  $K_y$  μεταξύ των σταδίων ανάπτυξης μπορεί να είναι όσο μεγάλες είναι και μεταξύ εντελώς διαφορετικών καλλιεργειών. Συνήθως ευαίσθητα σε έλλειψη ύδατος είναι τα στάδια ανθοφορίας και σχηματισμού του καρπού, ενώ λιγότερη επίδραση έχει στο στάδιο ωρίμανσης και βλάστησης με την προϋπόθεση ότι η καλλιέργεια στα επόμενα στάδια θα ανακάμψει από το στρες (Steduto et al., 2012).

Πίνακας 2.5: Κατηγοριοποίηση απόκρισης καλλιεργειών βάση του συντελεστή απόκρισης.

$K_y$	Ερμηνεία
$> 1$	Η απόκριση της καλλιέργειας είναι πολύ ευαίσθητη στην έλλειψη ύδατος και μεγαλύτερη από αναλογική μείωση όταν η χρήση του ύδατος μειώνεται λόγω στρες.
1	Η μείωση της απόδοσης είναι ακριβώς ανάλογη με την μείωση του ύδατος. Η καλλιέργεια είναι ανθεκτική στην έλλειψη ύδατος και ανακάμπτει μερικώς από
$< 1$	κατάσταση στρες, παρουσιάζει μικρότερη από την αναλογική μείωση της απόδοσης με την μείωση του ύδατος.

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει με σκοπό τον υπολογισμό των συντελεστών απόκρισης απόδοσης διαφορετικών καλλιεργειών, είτε πειραματικά στο πεδίο χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Doorenbos & Kassam (1979) με καλλιέργειες υπό συνθήκες διαφορετικών πρακτικών αρδεύσεων και έλλειψης ύδατος σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης (Kuslu et al. 2010; Istanbuloglu 2009; E. . Kipkorir et al. 2002; Akhter et al. 2003; Lovelli et ;Moutonnet et al. 1983; Steduto et al. 2012), είτε χρησιμοποιώντας ήδη υπάρχουσες βάσεις δεδομένων απόκρισης των καλλιεργειών και επαλήθευσης στο πεδίο (Porona et al., 2006). Έτσι, βιβλιογραφικά υπάρχουν συντελεστές απόκρισης καλλιέργειας για διαφορετικά είδη φυτών (Πίνακας 2.6).

Πίνακας 2.6: Συντελεστές απόκρισης διαφορετικών καλλιεργειών.

Καλλιέργεια	Συντελεστής	Καλλιέργεια	Συντελεστής	Καλλιέργεια	Συντελεστής
Banana	1.2*	Sunflower	0.95*	Barley	1.1*
Cabbage	0.95*	Tomato	1.05*	Beans	1.15*†
Cotton	0.85*	Watermelon	1.1*	Spring wheat	1.15*†
Groundnuts	0.7*	Spring wheat	1.15*	Peas	1.15*†
Peas	1.15*	Soybean	0.85*	Alfalfa	1.1*, 1.33‡
Pepper	1.1*	Sugarcane	1.2*	Maize	1.25*, 1.21 <sup>§</sup>
Potato	1.1*	Sorghum	0.9*	Onion	1.1*, 1.28 <sup>§</sup>
Safflower	0.8*	Kallar grass	0.649*	Winter wheat	1.05*, 1.2 <sup>#</sup>
Sugarcane	1.2*	Sporobolus	1.06*		

Κύρια πηγή: \*Steduto et al. (2012); †Doorenbos & Kassam (1979); ‡Kuslu et al. (2010);  
§Kipkorir et al. (2002); # Najarchi et al. (2011)

## 2.4 Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή είναι μία συνδυασμένη διαδικασία που περιλαμβάνει τη διαπνοή από τα φυτά και την εξάτμιση από τα φύλλα, το έδαφος και τις διάφορες επιφάνειες. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι υπολογισμού που μπορεί να είναι είτε ακριβείς και αξιόπιστες είτε απλές προσεγγίσεις και εμπειρικές σχέσεις. Οι μέθοδοι υπολογισμού της περιλαμβάνουν: τα δοχεία εξάτμισης, τα λυσίμετρα, μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη μετεωρολογικές παραμέτρους, τη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου, και τέλος εμπειρικές σχέσεις από διαφορετικά κλιματικά δεδομένα που διαφέρουν ως προς την ακρίβεια και τις απαιτήσεις σε κλιματικά δεδομένα. Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί και προσεγγίσεις της εξατμισοδιαπνοής (Σακκάς, 2004; Τσακίρης, 1995).

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές μέθοδοι, όπου η καταλληλότητα και η ακρίβεια τους εξαρτάται από τις συνθήκες εφαρμογής τους. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη μέθοδος που να φέρεται ως κατάλληλη για όλες τις εφαρμογές. Έτσι η επιλογή κάθε μεθόδου πρέπει να γίνεται προσεκτικά ανάλογα τους περιορισμούς, τις απαιτήσεις σε δεδομένα και το υπόβαθρό της. Για παράδειγμα, η χρήση της εξίσωσης Penman (1948) για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε περιοχές με υψηλή βλάστηση μπορεί να οδηγήσει σε λάθη (Federer, 1982) και είναι ορθότερο να θεωρηθεί ότι υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ενώ η Penman-Monteith (1965) μπορεί να θεωρηθεί ότι υπολογίζει δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε δάση.

Βιβλιογραφικά υπάρχουν αρκετές μέθοδοι υπολογισμού τόσο της δυνητικής όσο και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, όπου με διαφορετικές υποθέσεις και τροποποιήσεις προσαρμόζονται στην κάθε έρευνα. Τέτοιες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι η μέθοδος Penman (Penman, 1948), Penman-Monteith (Monteith, 1965), FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998), Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), Blaney-Criddle (Blaney & Criddle 1950), και άλλες. Στην βιβλιογραφία συναντιούνται αρκετές μελέτες όπου συγκρίνουν διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής (Xu & Singh, 2002; Kashyap & Panda, 2001; McMahon et al., 2013; Xystrakis & Matzarakis, 2011; Kumar et al., 1987; Papadopoulou et al., 2003). Οι παραπάνω μέθοδοι παρέχουν είτε τη δυνητική είτε την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς. Στη φύση ωστόσο σπάνια υπάρχουν οι καταστάσεις που περιγράφονται από τα παραπάνω μοντέλα. Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται άλλες εμπειρικές σχέσεις όπως είναι η μέθοδος του Turc (Liang, 1982; Javier Sanchez San Roman, 2001; Τσακίρης, 1995) και η μέθοδος Coutagne (Javier Sanchez San Roman, 2001; Τσακίρης, 1995).

### **Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς**

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ΕΤο) εισάγεται πρώτη φορά από τους Doorenbos & Pruitt (1977) και είναι η ένταση με την οποία το ύδωρ εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μίας καλλιέργειας αναφοράς. Καλλιέργειες αναφοράς είναι ο χλοοτάπητας με ομοιόμορφο ύψος 8-15 cm ή η μηδική με μέσο ύψος 50 cm. Οι επιφάνειες των φύλλων της καλλιέργειας αναφοράς τυπικά δεν είναι υγρές. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς εκφράζεται ως ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου ύδατος ανά μονάδα χρόνου. Το πλεονέκτημα της ΕΤο είναι ότι περιγράφει τη γενική ιδέα της ΕΤ υπό ορισμένες συνθήκες και επιτρέπει η γενική ιδέα να είναι ανεξάρτητη από κάθε ιδιαίτερη μέθοδο υπολογισμού. Η Penman-Monteith, αποδέχεται ως η βέλτιστη σχέση προσδιορισμού της

εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (Kashyap & Panda 2001; Allen et al. 1998; FAO 1990; Oliveira et al. 2013). και χρησιμοποιείται ως η βασική μέθοδος για σύγκριση των υπολοίπων (Kashyap & Panda 2001; Heydari et al. 2015; Xu & Singh 2002).

### Δυνητική εξατμισοδιαπνοή

Δυνητική εξατμισοδιαπνοή ( $ET_p$ ) είναι ο μέγιστος ρυθμός απομάκρυνσης ύδατος από υγρό έδαφος και φυτικές επιφάνειες σε πλήρη διαθεσιμότητα. Δηλαδή, είναι το ύψος του υδάτινου στρώματος το οποίο εξατμίζεται ή/και διαπνέεται ανά ημέρα από μια εκτεταμένη «πλήρως» υγρή επιφάνεια υπό τις υφιστάμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Με τον όρο «πλήρως» υγρή επιφάνεια νοείται η επιφάνεια εκείνη για την οποία η διαθέσιμη προς εξάτμιση και διαπνοή ποσότητα ύδατος δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, ο οποίος έτσι μετατοπίζεται στις υφιστάμενες μικρό-μετεωρολογικές συνθήκες. Ο όρος εισήχθη πρώτη φορά από τον Thornthwaite (1948). Από τότε ο όρος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, με πολλούς ορισμούς και έχει αμφισβητηθεί ως ορισμός και έννοια (Allen et al., 1998). Η σύγχυση οφείλεται στο ότι οι πρώτοι ερευνητές τη θεωρούσαν αποκλειστική ιδιότητα των ατμοσφαιρικών συνθηκών ενώ στην πραγματικότητα είναι αλληλεπίδραση του εδάφους, της καλλιέργειας και των κλιματολογικών χαρακτηριστικών.

Αρκετοί ορισμοί και έννοιες επίσης έχουν δοθεί και για την εξατμισοδιαπνοή σε περιοχές με χαμηλή βλάστηση ( $ET$  αναφοράς,  $ET$  καλλιέργειας αναφοράς, δυνητική  $ET$ ). Η μέθοδος Blaney-Criddle (Blaney & Criddle, 1950), συνδυάζει γραμμικά την θερμοκρασία με την εξατμισοδιαπνοή, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής όπου γίνεται η εκτίμηση και υπολογίζεται από:

$$ET_p = p * (0.46 * T_{mean} + 8.13) \quad (12)$$

όπου,  $ET_p$  η δυνητική εξατμισοδιαπνοή,  $T_{mean}$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C) και  $p$  το μέσο ημερήσιο ποσοστό της ετήσιας διάρκειας της ημέρας όπου εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7: Μέσο ημερήσιο ποσοστό ετήσιας διάρκειας ημέρας ανά γεωγραφικό πλάτος.

Μήνας	Γεωγραφικό πλάτος (μοίρες)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Ιαν	0.267	0.264	0.261	0.257	0.252	0.246	0.239	0.231	0.220	0.209	0.195
Φεβ	0.269	0.268	0.266	0.264	0.261	0.257	0.253	0.248	0.243	0.236	0.228
Μαρ	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.269	0.268	0.268	0.268	0.267	0.266
Απρ	0.269	0.270	0.272	0.275	0.278	0.282	0.286	0.291	0.297	0.303	0.310
Μάι	0.271	0.273	0.276	0.281	0.287	0.294	0.303	0.312	0.322	0.334	0.346
Ιουν	0.274	0.280	0.285	0.291	0.298	0.307	0.316	0.328	0.341	0.355	0.371
Ιουλ	0.275	0.281	0.287	0.293	0.299	0.305	0.313	0.321	0.330	0.341	0.354
Αυγ	0.274	0.278	0.282	0.287	0.291	0.295	0.300	0.304	0.309	0.315	0.322
Σεπ	0.271	0.277	0.280	0.281	0.281	0.281	0.281	0.281	0.281	0.281	0.281
Οκτ	0.270	0.269	0.268	0.267	0.264	0.261	0.258	0.254	0.250	0.245	0.240

Νοε	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254	0.247	0.240	0.231	0.222	0.211	0.200
Δεκ	0.268	0.266	0.262	0.257	0.250	0.242	0.232	0.221	0.209	0.195	0.180

### Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ( $ET_c$  ή  $ET_{max}$ ) είναι η δυνητική μίας συγκεκριμένης καλλιέργειας και επιτυγχάνει το μέγιστο ανάπτυξης και απόδοσης στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Το ύδωρ που καταναλώνεται από μία καλλιέργεια που είναι ελεύθερη από ασθένειες, αναπτύσσεται σε μεγάλα χωράφια χωρίς περιορισμούς σε ύδωρ και θρεπτικά στοιχεία και επιτυγχάνει το μέγιστο της απόδοσης για το περιβάλλον που αναπτύσσεται, και εξαρτάται από το κλίμα και τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Κατά τον ορισμό αυτό είναι ίση με  $ET_{max}$ . Η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή ορίζεται από το FAO ως:

$$ET_{max} = ET_c = k_c ET_o \quad (13)$$

όπου  $k_c$  είναι ένας συντελεστής καλλιέργειας ο οποίος ενσωματώνει χαρακτηριστικά των καλλιεργειών και της εξάτμισης από το έδαφος και  $ET_o$  είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς όπου προτείνεται ο υπολογισμός της με την σχέση FAO Penman-Monteith.

### Πραγματική εξατμισοδιαπνοή

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή ( $ET_a$ ) είναι το ύδωρ που καταναλώνεται από μία καλλιέργεια κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες ενός χωραφίου (πλήρης ή μερική διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας, ασθένειες, γονιμότητα κλπ.). Το ανώτερο όριό της είναι η  $ET_c$  άρα ισχύει:  $ET_a \leq ET_c$ . Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (mm) μπορεί να υπολογιστεί από διαφορετικές μεθόδους (Trambouze et al. 1998; Fatideh 2009) και εμπειρικές εξισώσεις όπως του Turc (1961) ή του Coutagne (1968). Εδώ χρησιμοποιείται η μέθοδος που προτείνεται από τον Turc (1961) και ορίζεται ως:

$$ET_a = \frac{R}{\sqrt{c + \left(\frac{R}{L(T)}\right)^2}} \quad (14)$$

όπου  $R$  είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm),  $c$  είναι ένας συντελεστής συνήθως ίσος με 0,9 (Kaczmarek et al., 1996), και  $L$  είναι ένα θερμικός δείκτης που ορίζεται ως:

$$L(T) = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (14)$$

όπου  $T$  είναι η μέση θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) της χρονικής κλίμακας που εξετάζεται (συνήθως μηνιαία ή ετήσια).

## 2.5 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας

Παρά την εξέλιξη των κλιματικών μοντέλων και της ακρίβειας των προβλέψεων τους, υπάρχουν αβεβαιότητες που συνδέονται με τις προσομοιώσεις που καθιστούν αναγκαία τη βελτίωσή τους μέσω παρατηρούμενων δεδομένων (Sohoulande Djebou et al., 2015). Τα

αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων εμπεριέχουν σφάλματα μεροληψίας τα οποία αυξάνονται με την αύξηση του χρόνου ανάλυσης (μελλοντική περίοδος) και έχουν διαφορετική ένταση ανάλογα με την παράμετρο (Hansen et al., 2006; Sharma et al., 2010). Ως σφάλμα μεροληψίας ορίζεται η ανεξαρτήτου χρόνου συνιστώσα του σφάλματος (Haerter et al., 2011). Έχει αποδειχτεί ότι τόσο τα GCMs όσο και τα RCMs (Regional Climate Models) τείνουν να υπερεκτιμούν την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω κλιματικής αλλαγής (Boberg & Christensen, 2012) σε κλίματα με υγρούς χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια και κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες στη νότιο-ανατολική Ευρώπη (Christensen et al., 2008). Η παράμετρος της κατακρήμνισης συνήθως εμπεριέχει ακόμα μεγαλύτερα σφάλματα (Wood et al., 2004). Προκειμένου τα αποτελέσματα αυτά να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τα σφάλματα αυτά πρέπει να διορθωθούν. Οι Boberg & Christensen (2012), Haerter et al. (2011), Terink et al. (2009), Christensen et al. (2008) και Ruffault et al. (2014) καταδεικνύουν την αναγκαιότητα για διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρήσιμων σε εφαρμογές της υδρολογίας, της διαχείρισης υδατικών πόρων και της κλιματολογίας. Έτσι, είναι κατανοητό ότι πρέπει να προηγηθεί κάποιας μορφής προ-επεξεργασία για την εξάλειψη των υφιστάμενων σφαλμάτων μεροληψίας, ώστε τελικά να παραχθούν στατιστικά ορθές προβλέψεις και προσομοιώσεις. Η διόρθωση του αποτελέσματος ενός μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι συναφή με τα πραγματικά δεδομένα ονομάζεται στατιστική διόρθωση σφάλματος πόλωσης ή διόρθωση σφάλματος μεροληψίας. Είναι μια μαθηματική διαδικασία που χαρτογραφεί τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) των δεδομένων του μοντέλου επί των παρατηρούμενων δεδομένων (Haerter et al., 2011). Η μέθοδος ποικίλει ανάλογα τον τύπο, τη χρονική και τη χωρική κλίμακα των δεδομένων. Για να έχει νόημα η διόρθωση και για να είναι εφαρμόσιμα τα αποτελέσματα, πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις όπως: (α) η χρονική κλίμακα να είναι κατάλληλη και κοινή για όλα τα δεδομένα και (β) τα δεδομένα του μοντέλου να παρέχουν μια επαρκή εκπροσώπηση του φυσικού συστήματος (διότι με τη διαδικασία αυτή δεν διορθώνονται λανθασμένες παραστάσεις των δυναμικών ή/και φυσικών διαδικασιών). Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν κάποιας μορφής συνάρτηση μεταφοράς ή άλλες τεχνικές για την προσαρμογή των στατιστικών παραμέτρων μεταξύ των τιμών του μοντέλου και των παρατηρούμενων τιμών (Piani et al., 2010; Grillakis et al., 2013). Η διαδικασία στηρίζεται στα δεδομένα που περιέχονται στο κλιματικό μοντέλο τα οποία έχουν συνήθως μια συστηματική απόκλιση από τα παρατηρούμενα και συνεπώς δε μπορεί να διορθώσει τα θεμελιώδη ποιοτικά ελαττώματα του μοντέλου. Κάποιες μέθοδοι διόρθωσης εμπλέκουν μεθόδους ανάκτησης

στατιστικών χαρακτηριστικών από τα παρατηρούμενα δεδομένα και την εφαρμογή τους πάνω στα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ κάποιες άλλες πιο απλές εφαρμόζουν κάποιο συντελεστή διόρθωσης πάνω στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Με την διαδικασία διόρθωσης του μεροληπτικού σφάλματος επιχειρείται να ταιριάζουν οι διαφορετικές στατιστικές παράμετροι των δεδομένων που λαμβάνονται από τα κλιματικά μοντέλα, με αυτά που έχουν παρατηρηθεί. Με τις πιο απλές μεθοδολογίες διόρθωσης συνήθως γίνεται διόρθωση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης, ενώ με πιο εξελιγμένες περισσότερων στατιστικών παραμέτρων (Haerter et al. 2011; Leander & Buishand 2007).

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε την μέθοδο διόρθωσης σφάλματος μεροληψίας όπου παρουσιάζεται από τους Haerter et al. (2011) για τη διόρθωση των στατιστικών παραμέτρων της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των κλιματικών δεδομένων της μηνιαίας θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, ώστε να είναι ίσα με αυτά των παρατηρούμενων. Η συνάρτηση διόρθωσης δημιουργείται χρησιμοποιώντας δεδομένα από τα κλιματικά μοντέλα, και τις παρατηρούμενες τιμές για μία κοινή περίοδο. Όταν δημιουργηθεί η συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γίνει η διόρθωση μεροληψίας για τις μελλοντικές τιμές του μοντέλου, όπου δεν υπάρχουν δεδομένα παρατήρησης. Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για να μετατρέψει κάθε τιμή του μοντέλου σε μία τροποποιημένη, χωρίς σφάλμα μεροληψίας. Σύμφωνα με τους Haerter et al. (2011) στην περίπτωση όπου οι τιμές ακολουθούν κανονική κατανομή, η συνάρτηση μεταφοράς είναι πάντα γραμμική και είναι της μορφής που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 15:

$$\chi_{sc}^{cor} = (\chi_{mod}^{sc} - \overline{\chi_{mod}^{con}}) * \left( \frac{\sigma_{obs}^{con}}{\sigma_{mod}^{con}} \right) + \overline{\chi_{obs}^{con}} \quad (15)$$

όπου ο δείκτης mod (model) δηλώνει τιμές από το μοντέλο, ο δείκτης obs (observations) τις παρατηρούμενες τιμές, ο εκθέτης con (control) την περίοδο αναφοράς και ο εκθέτης sc (scenario), της περιόδου μελέτης. Η κλίση της συνάρτησης,  $\sigma_{obs}^{con}/\sigma_{mod}^{con}$ , είναι η αναλογία της τυπικής απόκλισης των παρατηρουμένων τιμών και των τιμών του μοντέλου για την κοινή περίοδο ελέγχου. Αυτός ο παράγοντας προσαρμόζει την κατανομή των δεδομένων του μοντέλου ώστε να ταιριάζει με αυτή των παρατηρούμενων τιμών.

### 3 Περιοχή μελέτης

#### 3.1 Περιοχή και περίοδοι μελέτης

Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περιοχή που εκτείνεται μεταξύ του γεωγραφικού πλάτους 34° N και 44° N και γεωγραφικό μήκος 10° W με 35° E που περιλαμβάνει το σύνολο της ευρωπαϊκής Μεσογείου. Επιπλέον, επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση οι περιοχές μελέτης Μεσσαρά (Messara), Albatera, Castesaraceno και Δάσος του Ράντι (Randi Forest) του Ευρωπαϊκού προγράμματος CASCADE (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 Περιοχές μελέτης του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος CASCADE που σχετίζονται με βοσκότοπους.

Βασικά χαρακτηριστικά για τις περιοχές μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1., ενώ αναλυτικότερα περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους .

Πίνακας 3.1 Βασικά χαρακτηριστικά περιοχών μελέτης

	Messara	Albatera	Castesaraceno	Randi forest
Υψόμετρο (m)	100-230	225-310	972-1284	90-230
Χρήσεις γης*	ΚΘ	ΚΘ	ΚΒΔ	ΚΘ
Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C)	17.9	18.0	9.1	19.5
Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	503	267	1289	489
Μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή (mm)	1632	1630	1230	1698
Δείκτης ξηρότητας	0.31	0.16	1.05	0.29
Κλιματική κατάταξη†	ΞΥΥ	ΗΞ	Υ	ΞΥΥ

\*Κ: Καλλιεργήσιμες εκτάσεις, Θ: Θαμνώδεις εκτάσεις, Β: Βοσκότοποι, Δ: Δασικές εκτάσεις

†Ξ: Ξηρή, ΗΞ: Ημίξηρη, Υ: Υγρή: ΥΥ: υπό-υγρή

Η περιοχή Albatera βρίσκεται στη νοτιοανατολική Ισπανία, μία από τις περιοχές της Ευρώπης που έχουν πληγεί περισσότερο από την ερημοποίηση. Ο πληθυσμός της περίπου 12,000 κάτοικοι, ασχολούνται κυρίως με την γεωργία και την βιομηχανία. Η φυσική βλάστηση στην περιοχή αποτελείται από ψηλούς θάμνους με βαθύ ριζικό σύστημα ειδικά προσαρμοσμένο στις καταστάσεις λειψυδρίας και τις ακραίες συνθήκες ξηρασίας. Τα κύρια είδη φυτών στην περιοχή είναι τα *Rhamnus lycioides*, *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*,



*Olea europaea ssp sylvestris*, *Juniperus oxycedrus*, *Osyris quadripartita*, *Ephedra fragilis*, *Chamaerops humilis* και *Witania frutescens*. Τα κύρια οικοσυστήματα είναι ημιάγονα και χρησιμοποιούνται περισσότερο για αναψυχή, και περιορισμένη βόσκηση από αιγοπρόβατα. Τα πιο πρόσφατα μέτρα αποκατάστασης του τοπίου ήταν η φύτευση δέντρων διαφόρων ειδών. (Tsanis & Daliakopoulos 2014)



Εικόνα 3.2 : Γενική άποψη της περιοχής μελέτης Albatera (Φωτογραφία: S. Bautista)

Το Castelsaraceno με πληθυσμό 1,500 κατοίκων βρίσκεται στην επαρχία της Ποτέντσα, στη νότια Ιταλία. Το ορεινό τμήμα της περιοχής με απέραντους βοσκότοπους για αιγοπρόβατα περιλαμβάνει επίσης καστανιές, αμπέλια και ελαιώνες. Βασικά είδη φυτών στην περιοχή αποτελούν τα *Eryngium campestre*, *Stipa austroitalica*, *Pteridium aquilinum* και *Prunus spinosa*. Οι βοσκοί αντιμετωπίζουν πολλές αυξανόμενες προκλήσεις που τους εμποδίζουν να εφαρμόσουν πλήρως τις παραδοσιακές πρακτικές τους. Σε αυτές περιλαμβάνονται η ξήρανση βοσκοτόπων λόγω της κλιματικής αλλαγής και η υποκατάσταση των βοσκοτόπων με θαμνολίβαδα και δασότοπους. (Tsanis & Daliakopoulos 2014)



*Eryngium campestre*



*Festuca circummediterranea*



*Stipa austroitalica*



*Pteridium aquilinum*



*Prunus spinosa*



*Pyrus amygdaliformis*

Εικόνα 3.3: Τυπική βλάστηση στην περιοχή του Castelsaraceno (Φωτογραφία: G. Quaranta)

Στη πεδιάδα της Μεσσαράς, στην νότια Κρήτη, με πληθυσμό περίπου 45,000 κατοίκων οι γεωργικές πρακτικές και οι πρακτικές βόσκησης προωθούσαν τη βιοποικιλότητα, είχαν θέσει υπό έλεγχο την εκμετάλλευση των δασικών περιοχών και απέτρεπαν την εγκατάλειψη της υπαίθρου ακολουθώντας τον παραδοσιακό τρόπο ζωής εδώ και αιώνες. Ωστόσο, η πρόσφατη ανάπτυξη της γεωργίας έχει αξιοσημείωτο αντίκτυπο στους φυσικούς υδάτινους πόρους, συμπεριλαμβανομένων των υπόγειων υδάτων, καθώς οι ανάγκες σε νερό αυξήθηκαν. Η φυσική βλάστηση της περιοχής αποτελείται κυρίως από αειθαλή φρύγανα (π.χ. *Pistacia lentiscus*, *Thymra capitata*, *Phlomis cretica*, *Sarcopoterium spinosum*), χαρουπιές (*Ceratonia Siliqua*) πάντα σε συνδυασμό με την ελιά (*Olea europaea*). Καθώς τα περισσότερα από τα είδη φυτών της περιοχής αποτελούν οικονομική πηγή ζωτροφής, η περιοχή έχει υποστεί υπερβόσκηση. (Tsanis & Daliakopoulos 2014)



Εικόνα 3.4: Τυπικός βοσκότοπος στην περιοχή της Μεσσαράς (Φωτο.: Ι. Δαλιακόπουλος)

Η περιοχή της Πάφου στην Κύπρο περιλαμβάνει την περιοχή Πισσούρι και το δάσος Ραντή. Αμφότεροι οι ξηρότοποι πλήττονται από την υπερβολική βόσκηση από αιγοπρόβατα στους λόφους και από τη ραγδαία αστική ανάπτυξη ή ανάπτυξη της υπαίθρου στις παράκτιες περιοχές. Η έλλειψη κατάλληλης διαχείρισης είχε ως αποτέλεσμα την υπερβολική βόσκηση και προκάλεσε υποβάθμιση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ανεπανόρθωτη. Τα φυσικά οικοσυστήματα κυριαρχούνται από φρύγανα και μακία. Οι περισσότεροι από τους θάμνους είναι σκληρόφυλλοι όπως τα *Calicotome villosa*, *Genista fasselata* και *Rhamnus oleoides*. Στην περιοχή υπάρχουν και διάσπαρτα δέντρα όπως ελιές (*Olea europaea*), χαρουπιές (*Ceratonia Siliqua*) και διαφορετικά είδη πεύκων (*Pinus spp*). (Tsanis & Daliakopoulos 2014)



Εικόνα 3.5: Γενική άποψη της περιοχής μελέτης Πισσούρι, Κύπρου (Φωτο.: K.Themistokleous)



*Calycotome villosa*



*Ceratonia siliqua*

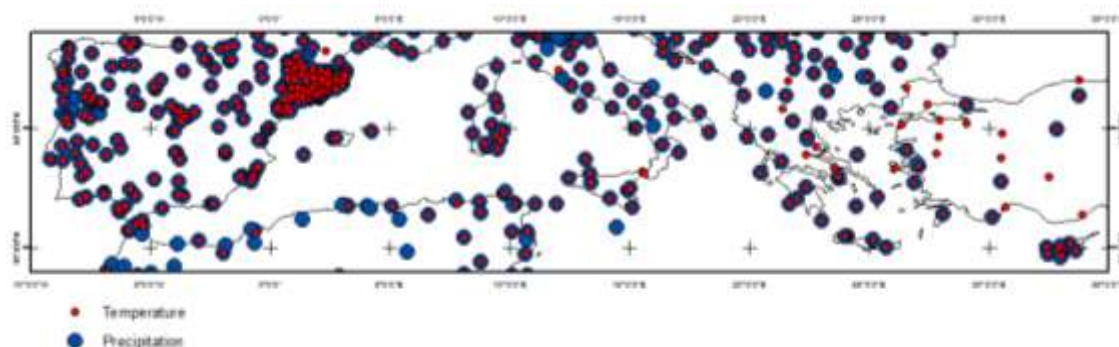
Εικόνα 3.6: Τυπική βλάστηση στην περιοχή μελέτης της Κύπρου (Φωτο.: K. Themistokleous)

## 3.2 Επιλογή δεδομένων

### Δεδομένα παρατηρήσεων

Για την παρατηρούμενη θερμοκρασία και βροχόπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές από τη βάση δεδομένων E-OBS-v7 η οποία διαθέτει ημερήσια δεδομένα για την μέση θερμοκρασία και κατακρήμνιση στο διάστημα 1950-2005 σε πλεγματική μορφή ανάλυσης ~25km (Haylock et al., 2008). Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από παρεμβολή δεδομένων από μετεωρολογικούς σταθμούς σε όλη την Ευρώπη (Εικόνα 3.7) και είναι βελτιωμένα συγκριτικά με τα προηγούμενα υπάρχοντα δεδομένα όσον αφορά τη χωρική ανάλυση, την έκταση, την χρονική περίοδο και τον αριθμό των σταθμών (~10,000 σταθμοί για την βροχόπτωση και ~4,500 για τη θερμοκρασία). Επιπλέον οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν έπειτα από προσεχτική αξιολόγηση για τον περιορισμό των σφαλμάτων και αβεβαιοτήτων. Τα δεδομένα σε μορφή πλέγματος έχουν δημιουργηθεί σε διαφορετικές χωρικές κατανομές και έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι δυνατή η άμεση συσχέτιση και η σύγκριση με τα κλιματικά μοντέλα (Haylock et al.,

2008). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων δημιουργήθηκε ως μέρος του προγράμματος ENSEMBLES EU FP6 της Ευρωπαϊκής ένωσης με σκοπό τη χρήση της για την μελέτη της κλιματικής αλλαγής. Στην Εικόνα 3.7 απεικονίζεται το δίκτυο σταθμών της βάσης E-OBS-v7.



Εικόνα 3.7 : Μετεωρολογικοί σταθμοί από του οποίους λήφθηκαν τα δεδομένα της βάσης δεδομένων E-OBS-v7.

### Δεδομένα κλιματικών μοντέλων

Για την προσομοίωση των κλιματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα κατακρήμνισης και θερμοκρασίας που προέρχονται από το Coupled Model Intercomparison Project – phase 5 (CMIP5) (Taylor et al. 2012) που αποτελεί την 5<sup>η</sup> φάση του προγράμματος σύγκρισης των συζευγμένων παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων υπό τα σενάρια συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίου RCPs. Το κλιματικό πείραμα του CMIP5 αποτελεί την αιχμή της έρευνας πάνω στο κλίμα σε παγκόσμια κλίμακα. Εδώ χρησιμοποιούνται 9 GCMs (Πίνακας 3.2) υπό τα σενάρια εκπομπών RCP2.6 και RCP8.5.

Πίνακας 3.2 Πληροφορίες σχετικά με τα GCMs που χρησιμοποιήθηκαν.

Μοντέλο	Ερευνητικό κέντρο	Βασική βιβλιογραφία
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	von Salzen et al. (2013)
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique	Voldoire et al. (2013)
CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	Rotstayn et al. (2012)
EC-EARTH	EC-EARTH consortium	Hazeleger et al. (2012)
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	Dufresne et al. (2013)
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research	Watanabe et al. (2011)



	Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	Jones et al. (2011)
MPI-ESM-MR	MaxPlanck Institute for Meteorology (MPI-M)	Stevens et al. (2013)
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies	Schmidt et al. (2006)

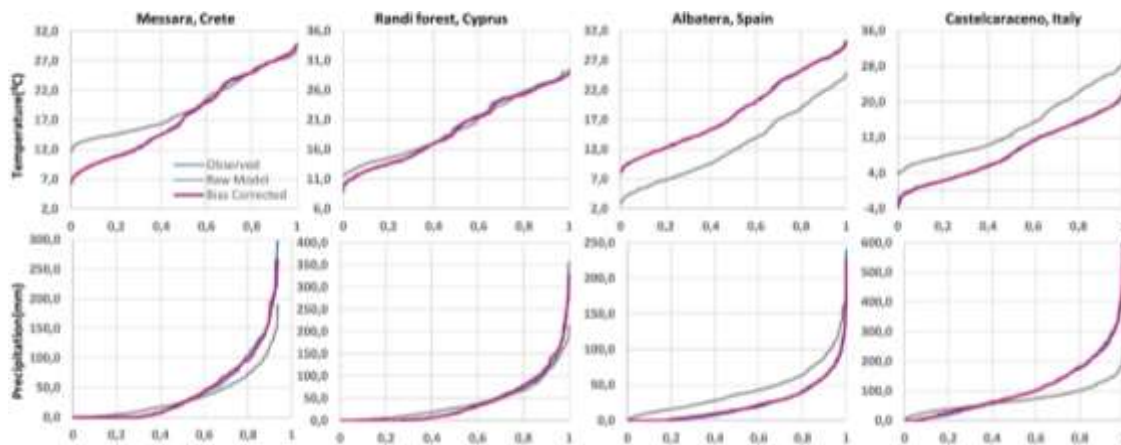
---

Στα κλιματικά δεδομένα των GCMs προηγήθηκε μετατροπή με τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής (Nearest Neighbor) ώστε να έχουν όλα ίδια χωρική ανάλυση με τα E-obs-v7 δηλαδή 0.25°.

### 3.3 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας

Τα διορθωμένα ως προς το σφάλμα μεροληψίας δεδομένα χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των επιλεγμένων δεικτών σε τρεις 40-ετείς περιόδους μελέτης. Αρχικά, για την ανάλυση του παρελθοντικού κλίματος, η περίοδος αναφοράς είναι μεταξύ Ιανουαρίου 1961 και Δεκεμβρίου 2000. Η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος γίνεται για 2 περιόδους: η πρώτη μεταξύ Ιανουαρίου 2011 και Δεκεμβρίου 2050 και η δεύτερη μεταξύ Ιανουαρίου 2061 και Δεκεμβρίου 2100.

Η διαδικασία διόρθωσης σφαλμάτων μεροληψίας εφαρμόστηκε ανά μήνα τόσο για τα δεδομένα της βροχόπτωσης όσο και για τα δεδομένα της θερμοκρασίας με περίοδο αναφοράς από τον Ιανουάριο του 1961 έως τον Δεκέμβριο του 2000. Αυτό έγινε μετά από την παρατήρηση ότι με την ανά μήνα επεξεργασία τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η διόρθωση μεροληψίας σύμφωνα με τους Haerter et al. (2011). Για το σύνολο των ίδιων μηνών (π.χ. όλοι οι Ιανουάριοι) της περιόδου αναφοράς υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των τιμών, και σύμφωνα με αυτές γίνεται η διόρθωση μεροληψίας των αντιστοίχων μηνών της περιόδου μελέτης σύμφωνα με την Εξίσωση 15. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζεται για κάθε περιοχή μελέτης, η συνάρτηση αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας για ένα κλιματικό μοντέλο (CNRM-CM5), για τα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας πριν και μετά την διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας, καθώς και οι παρατηρημένες τιμές για την περίοδο 1960 ως 2005. Παρατηρείται ότι μετά τη διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας, η συνάρτηση αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας των δεδομένων του μοντέλου παρουσιάζει μεγαλύτερη ταύτιση με αυτή των παρατηρημένων δεδομένων.



Εικόνα 3.8 Αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας για την μέση μηνιαία θερμοκρασία (άνω), και για την μέση μηνιαία βροχόπτωση (κάτω). Με γκρι χρώμα παρουσιάζονται τα αδιόρθωτα από σφάλματα μεροληψίας δεδομένα του μοντέλου, με μπλε οι παρατηρημένες τιμές και με ροζ οι διορθωμένες για σφάλματα μεροληψίας τιμές.

### 3.4 Δείκτης ξηρότητας

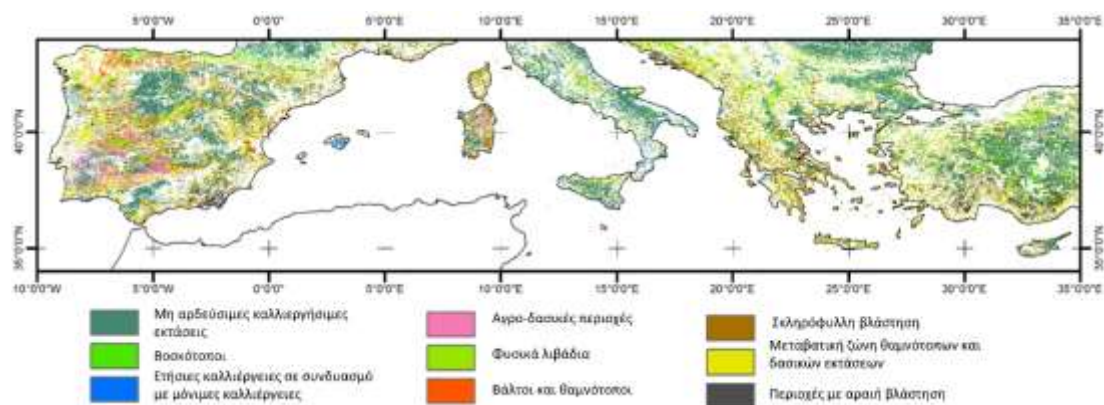
Για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρότητας AI χρησιμοποιούνται μηνιαία δεδομένα κατακρήμνισης και θερμοκρασίας. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιείται η μέθοδος του Thornthwaite (1948) όπως προτείνεται από τη από την UNEP, καθώς σύμφωνα με τον Goodwin (1991) για ξηρά και ημί-ξηρα κλίματα όπως αυτά όπου συναντώνται στην περιοχή μελέτης, η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής δίνει μη ακριβή αποτελέσματα και σύμφωνα με τους Palutikof et al. (1994) συνεχώς υποεκτιμημένα. Έτσι ο δείκτης χρησιμοποιείται ελαφρώς τροποποιημένος, με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή να υπολογίζεται από την σχέση Blaney Criddle καθώς σύμφωνα με τους Cruff & Thompson (1967) οι οποίοι υπολόγισαν και σύγκριναν 6 σχέσεις σε 25 ξηρές και ημίξηρες περιοχές και τους (Heydari et al. 2015; Heydari et al. 2013) όπου συνέκριναν διαφορετικές σχέσεις για ξηρά περιβάλλοντα η σχέση αυτή είναι καλύτερη για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε τέτοια περιβάλλοντα. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται με την Εξίσωση 12 όπως επιγράφηκε στην Ενότητα 2.4.

### 3.5 Δείκτες ξηρασίας

Τόσο για τον υπολογισμό του δείκτη SPI όσο και του δείκτη RDIST χρησιμοποιούνται μηνιαία κλιματικά δεδομένα. Οι υπολογισμοί γίνονται για χρονικό κατώφλι 48 μηνών, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη τα κλιματικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων 48 μηνών στον υπολογισμό του επομένου μήνα. Για των υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος σχέση Blaney-Criddle όπως παρουσιάζεται στην Ενότητα 2.4.

### 3.6 Σχετική απόδοση βοσκοτόπων

Όσον αφορά της απόκριση των βοσκοτόπων στην έλλειψη ύδατος υπολογίζεται ο λόγος της πραγματικής προς τη μέγιστη δυνατή παραγωγή σύμφωνα με την Εξίσωσης 11. Αρχικά επιλέγονται οι περιοχές που δύναται να χρησιμοποιηθούν ως βοσκοτόποι ή επηρεάζουν την κτηνοτροφική παραγωγή. Ως περιοχές για πηγή ζωοτροφών χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένοι κωδικοί από τον χάρτη χρήσεων γης CLC 2006 (ανάλυση 250 m) της τρίτης καταγραφής του προγράμματος CORINE Landcover, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.3. Έπειτα από την επιλογή των επιθυμητών κωδικών, ο χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9. Στην συνέχεια για κάθε είδος χρήσης γης επιχειρείται να αντιστοιχηθεί ένας συντελεστής απόκρισης έτσι ώστε να μπορέσει να υπολογιστεί η Εξίσωση 11.



Εικόνα 3.9 Χάρτης χρήσεων γης όπου επιλέχθηκαν στην περιοχή μελέτης.

Βιβλιογραφικά υπάρχουν συντελεστές απόκρισης για τα περισσότερα κηπευτικά είδη αλλά όχι για τα άγρια φυσιικά είδη. Έτσι, επιλέχθηκαν εμπειρικά συντελεστές από είδη όπου ανήκουν στην ίδια οικογένεια ή παρουσιάζουν παρόμοια φαινολογικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον για τα είδη γης όπου περιλαμβάνουν θάμνους και ποώδη βλάστηση επιλέγεται ο μικρότερος συντελεστής απόκρισης όπου βρέθηκε στην βιβλιογραφία καθώς είναι τα είδη που είναι πιο ανθεκτικά στην έλλειψη ύδατος. Οι δείκτες όπου επιλέχθηκαν για κάθε κωδικό χρήσης γης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Επίσης, ο συντελεστής καλλιέργειας  $k_c$ , θεωρείται μοναδιαίος (δλδ.  $k_c=1$ ) για λόγους απλούστευσης, καθώς το επίπεδο της χωρικής ανάλυσης είναι αρκετά μεγάλο, ενώ ο συντελεστής αυτός είναι εξειδικευμένος για κάθε είδος φυτού.

Όσον αφορά την μέγιστη εξατμισοδιαπνοή, η μέθοδος Penman-Monteith απαιτεί παραμέτρους για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα πρόβλεψης από τα κλιματικά μοντέλα και για τα οποία συνήθως γίνονται υποθέσεις και απλοποιήσεις (Rainy River Project, 2013),

κάτι το οποίο αυξάνει την ήδη υπάρχουσα αβεβαιότητα των προβλέψεων. Δεν υπάρχει βέλτιστη μέθοδος εκτίμησης της μελλοντικής ακτινοβολίας, με τα αποτελέσματα μεταξύ των μοντέλων να ποικίλουν μέχρι και περισσότερο από 100% (Bormann, 2011; Mckenney & Rosenberg, 1993), λόγω της διαθεσιμότητας των απαιτούμενων δεδομένων, αλλά και των διαφορετικών παραμέτρων όπου λαμβάνουν υπόψη. Έτσι για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε μελλοντικές καταστάσεις καλύτερο είναι να εξετάζεται σε τοπικό επίπεδο η αξιοπιστία των μεθόδων (Bormann, 2011). Για τους λόγους αυτούς στην συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Blaney-Criddle, αντί της FAO Penman-Monteith, για την οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, καθώς όπως παρουσιάστηκε, στην περιοχή μελέτης για το υπάρχον κλίμα παρουσιάζει καλύτερες εκτιμήσεις, κάτι το οποίο θεωρούμε ότι θα συμβεί και στις μελλοντικές συνθήκες. Η μέθοδος όπου ακολουθείτε παρουσιάζεται αναλυτικά στην Ενότητα 2.4.



Πίνακας 3.3 Κωδικοί CORINECLC2006 όπου επιλέχθηκαν στην περιοχή μελέτης

Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3	Κωδικός	Περιγραφή
2. Αγροτικές περιοχές	2.1 Καλλιεργήσιμες περιοχές	2.1.1 Μη αρδεύσιμες καλλιεργήσιμες εκτάσεις	12	Περιλαμβάνουν περιοχές με δημητριακά όσπρια, καλλιέργειες ζωοτροφών και περιοχές όπου γίνεται αγρανάπαυση. Είναι χώροι με αρωματικά, φαρμακευτικά και αρτυματικά φυτά. Δεν περιλαμβάνει μόνιμους βοσκότοπους
		2.3.1 Βοσκότοποι	18	Περιλαμβάνει περιοχές με πυκνή κάλυψη από γρασίδι ή σύνθεση αγρωστωδών φυτών κυρίως για βόσκηση και περιοχές με θάμνους.
	2.3 Βοσκότοποι			
		2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες σε συνδυασμό με μόνιμες καλλιέργειες	19	Μη μόνιμες καλλιέργειες (αρόσιμη γη ή βοσκότοποι) που συνδυάζονται με μόνιμη καλλιέργεια στο ίδιο αγροτεμάχιο.
	2.4 Ετερογενείς αγροτικές περιοχές	2.4.4 Αγρο-δασικές περιοχές	22	Ετήσιες καλλιέργειες ή βοσκότοποι υπό την κάλυψη δασικών ειδών (π.χ. χαρουπιές).
3. Δάση και ημι-φυσικές περιοχές	3.2 Θαμνώδεις και ποώδης βλάστηση	3.2.1 Φυσικά λιβάδια	26	Χαμηλής παραγωγικότητας λιβάδια. Συχνά βρίσκονται σε περιοχές με τραχύ και ανώμαλο έδαφος. Περιλαμβάνονται βραχώδεις περιοχές, περιοχές με αρωματικά και αγρωστώδη φυτά μέχρι 1.50 m
		3.2.2 Βάλτοι και θαμνώδεις εκτάσεις	26	Χαμηλή βλάστηση από θάμνους, ποώδη φυτά (ρείκι, σχοίνα, ακανθώδεις θάμνοι, κλπ.)
		3.2.3 Σκληρόφυλλη βλάστηση	28	Θαμνώδης σκληρόφυλλη βλάστηση όπου περιλαμβάνει φρύγανα και μακί
		3.2.4 Μεταβατική ζώνη θαμνωδών και δασικών εκτάσεων	29	Θαμνώδης ή ποώδης βλάστηση με διάσπαρτα δέντρα. Μπορεί να αντιπροσωπεύει είτε υποβαθμισμένο δάσος είτε δάσος όπου αναγεννιέται
	3.3 Ανοικτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	3.3.3 Περιοχές με αραιή βλάστηση	32	Περιλαμβάνει διάσπαρτη βλάστηση σε μεγάλο υψόμετρο από αγρωστώδη και ξυλώδη και/ή ημι-ξυλώδη είδη.

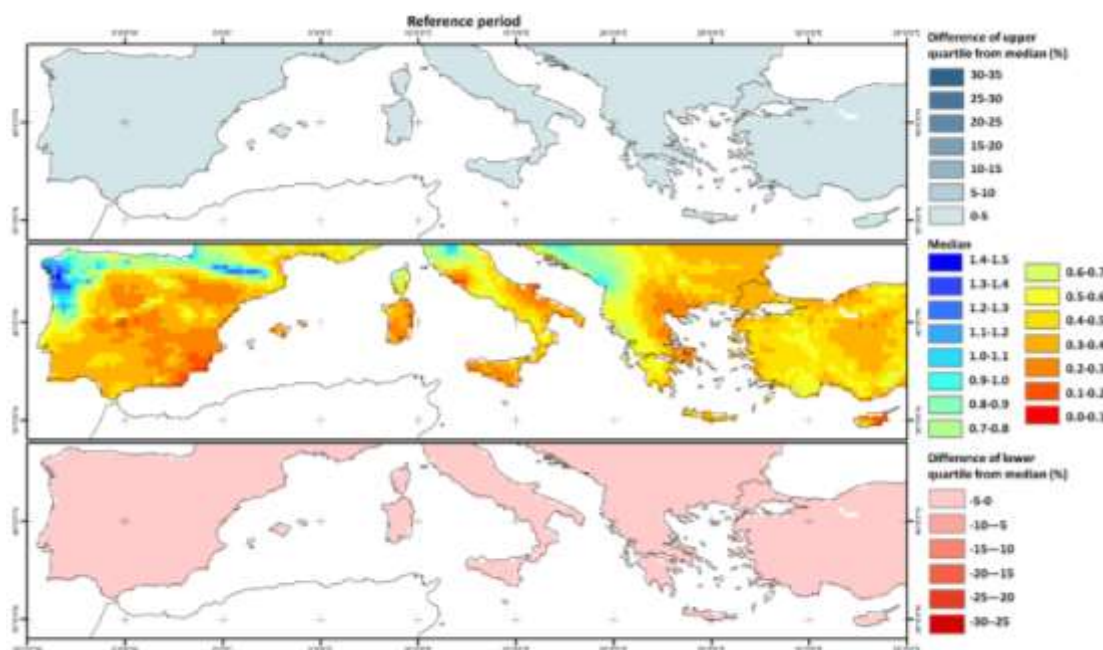
Πίνακας 3.4 Συντελεστής απόκρισης για κάθε κωδικό χρήσης γης που επιλέχθηκε.

Κωδικός CLC2006	Βασικά είδη /περιγραφή	$K_y$	Είδος με το οποίο αντιστοιχήθηκε ο συντελεστής απόκρισης κάθε κωδικού	Πηγή
211	Δημητριακά, όσπρια, καλλιέργειες ζωοτροφών	1.150	Alfalfa, Beans, Wheat, peas	Najarchi et al. (2011); Doorenbos & Kassam (1979)
231	Αγρωστώδη	0.649	Leptochloa fusca (Kallar grass)	Akhteret al. (2003)
241	Δημητριακά, όσπρια, καλλιέργειες ζωοτροφών	1.150	Beans, Wheat, Peas	Doorenbos & Kassam (1979)
244	Αγρωστώδη/ Δημητριακά	0.649	Leptochloa fusca (Kallar grass)	Akhteret al. (2003)
321	Αγρωστώδη	0.649	Leptochloa fusca (Kallar grass)	Akhteret al. (2003)
322	Θάμνοι, αρωματικά και ποώδη είδη	0.500		
323	Θάμνοι	0.500		
324	Θάμνοι, αρωματικά και ποώδη είδη	0.500		
333	Θάμνοι	0.500		

## 4 Αποτελέσματα

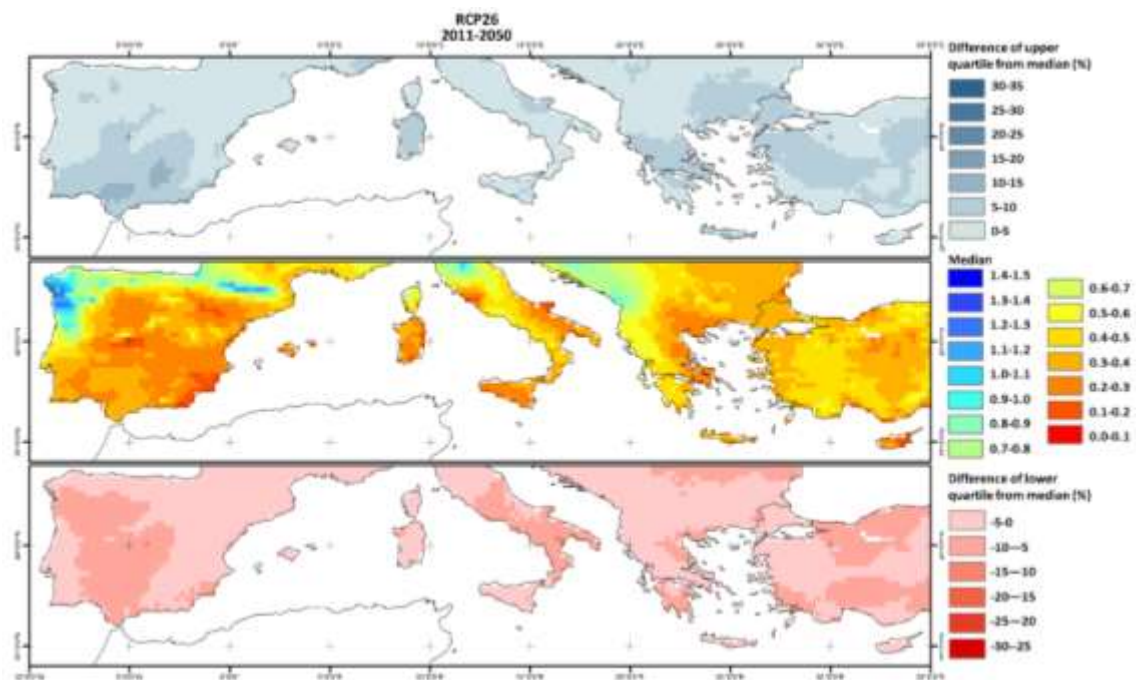
### 4.1 Ξηρότητα

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του δείκτη ξηρότητας παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες διαφορές του πρώτου (25%) και τρίτου (75%) τεταρτημόριου από τη διάμεσο τιμή (2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο-50%) όλων των μοντέλων για την υπό εξέταση χρονική περίοδο. Έτσι αποδίδεται εκτός από την διάμεσο τιμή και η αβεβαιότητα που οφείλεται στην χρήση πολλαπλών κλιματικών μοντέλων. Το πρώτο τεταρτημόριο αντιπροσωπεύει την διάμεσο τιμή του 50% των χαμηλότερων δεδομένων ενώ το τρίτο την διάμεσο τιμή του 50% υψηλότερων δεδομένων. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα παραπάνω αποτελέσματα για την περίοδο αναφοράς. Παρατηρείται ότι η διαφορά από την διάμεσο τιμή είναι σταθερή και μεταξύ  $\pm 0-5\%$ , κάτι το οποίο οφείλεται στην διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας για αυτή την περίοδο με παρατηρούμενα δεδομένα. Η μικρή αυτή διαφορά υφίσταται γιατί η διόρθωση επέρχεται στην μέση τιμή των δεδομένων, καθώς και επειδή τα δεδομένα που απεικονίζονται αποτελούν μέση τιμή και των 9 κλιματικών μοντέλων.

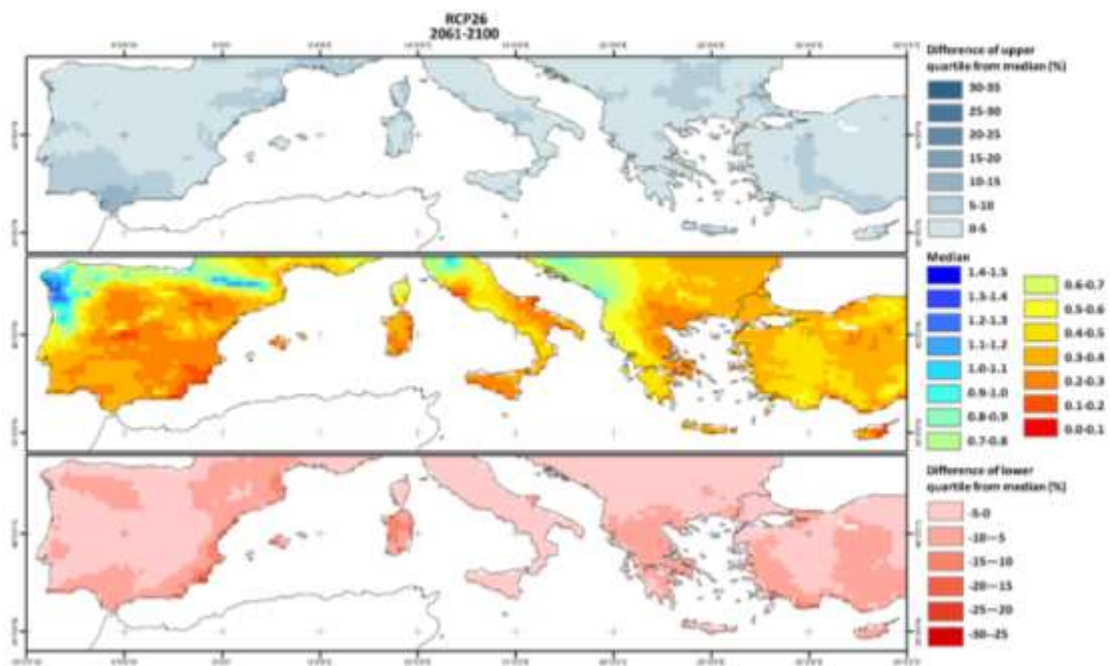


Εικόνα 4.1 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω) για την περίοδο αναφοράς (1961-2000).

Στην Εικόνα 4.2 και Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας καθώς και η ποσοστιαία διαφορά από το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο για τις δύο χρονικές περιόδους μελέτης για το σενάριο RCP26.



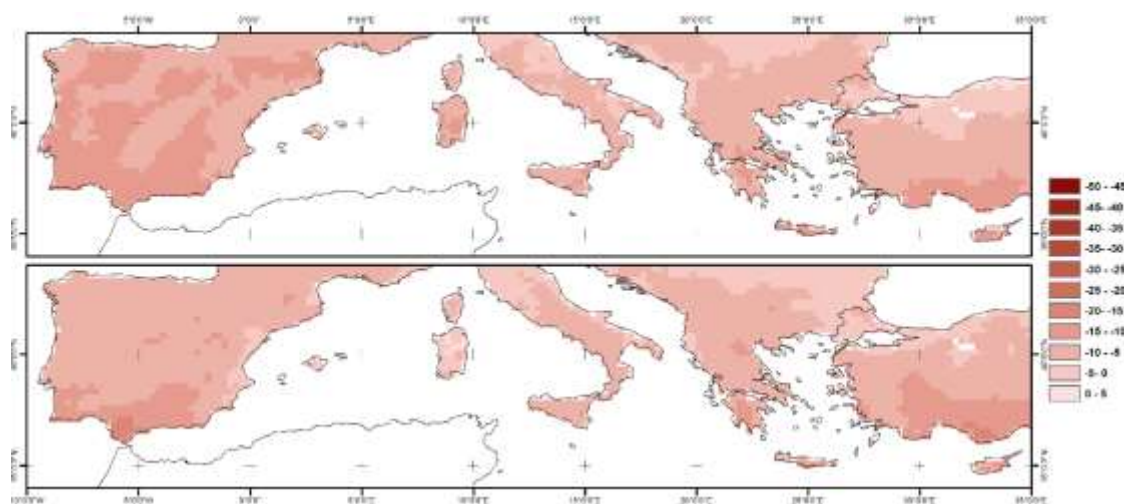
Εικόνα 4.2 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω), για την πρώτη περίοδο μελέτης (2011-2050) υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26.



Εικόνα 4.3 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω), για τη δεύτερη περίοδο μελέτης υπό το σενάριο RCP26.

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται για τις δύο περιόδους μελέτης, η ποσοστιαία διαφορά του δείκτη ξηρότητας από την περίοδο αναφοράς. Παρατηρείται ότι τόσο η διάμεσος όσο και η ποσοστιαία διαφορά και τις δύο περιόδους είναι παρόμοιες. Η περιοχή της Μεσογείου φαίνεται να επηρεάζεται από την αλλαγή του κλίματος και να γίνεται πιο ξηρή μέχρι και

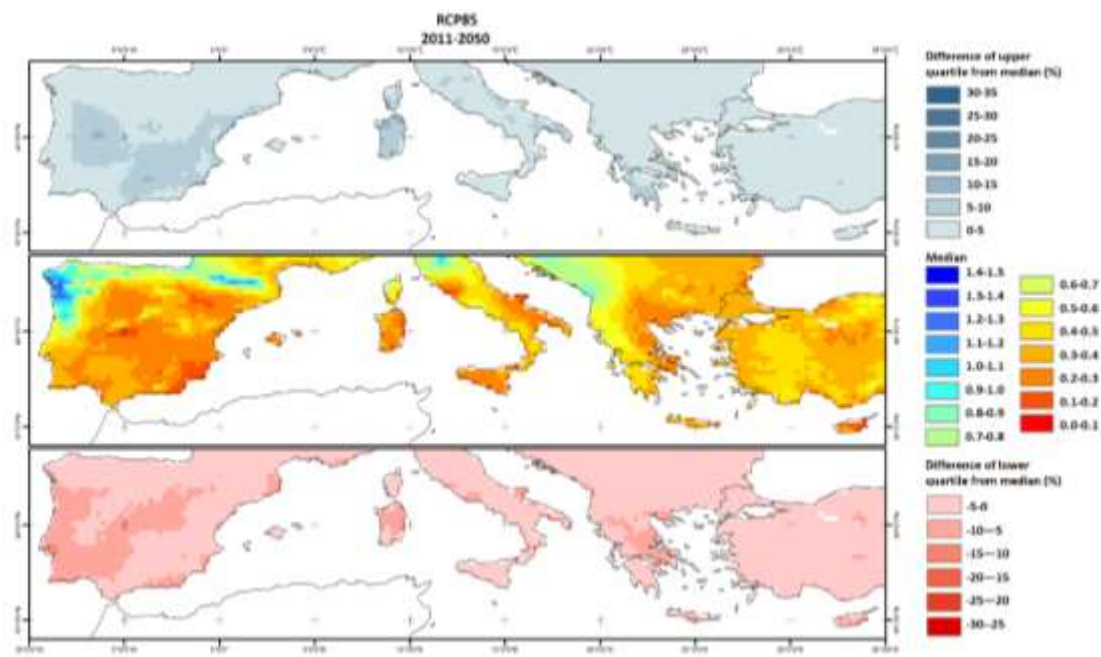
15% συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς. Ωστόσο παρατηρείται επίσης ότι η πρώτη περίοδος μελέτης παρουσιάζεται να είναι ελαφρώς (~5%) πιο ξηρή από την δεύτερη, εκτός από τις περιοχές της νότιας Ισπανίας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την φύση του σεναρίου, όπου αρχικά παρουσιάζει αύξηση της μέσης θερμοκρασίας μέχρι το 2050 κατά 1 °C, ενώ μετέπειτα και μέχρι το 2100 η αύξηση σταματά όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.1 ενώ ίδια τάση έχει και η συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου.



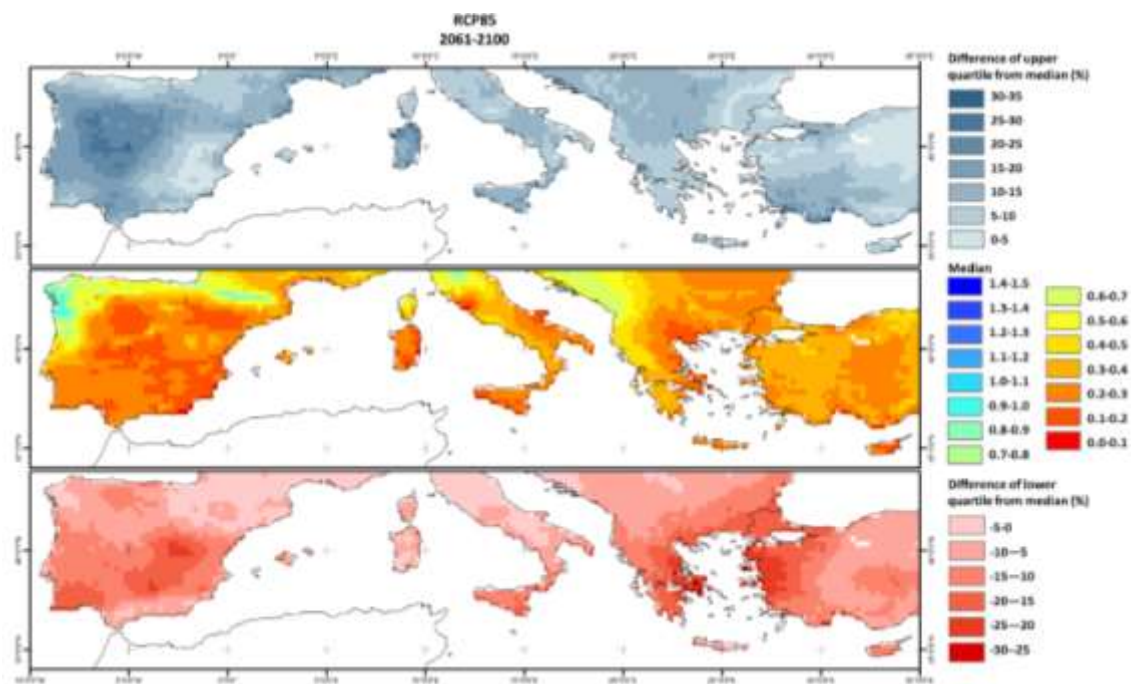
Εικόνα 4.4 Ποσοστιαία αλλαγή του δείκτη ξηρότητας συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (άνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26.

Στην Εικόνα 4.5 και Εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας καθώς και η ποσοστιαία διαφορά από το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο για τις δύο περιόδους μελέτης για το σενάριο RCP85. Στην Εικόνα 4.7, παρουσιάζονται για τις δύο περιόδους μελέτης, η ποσοστιαία διαφορά του δείκτη ξηρότητας από την περίοδο αναφοράς για το σενάριο RCP85. Τα αποτελέσματα μέχρι το 2050 παρουσιάζονται παρόμοια με αυτά του σεναρίου RCP26, ενώ την δεύτερη περίοδο μελέτης βλέπουμε ότι ακόμα και περιοχές όπου χαρακτηρίζονταν υγρές ( $AI > 0.65$ ) όπως στη βόρεια Ιβηρική και βαλκανική χερσόνησο μετατρέπονται σε ξηρές και ημίξηρες. Η περιοχή μελέτης γίνεται πιο ξηρή την δεύτερη περίοδο μελέτης μέχρι και 50% συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς. Επιπλέον παρατηρείται ότι την δεύτερη περίοδο αναφοράς η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο είναι αρκετά μεγάλη, κάτι που υποδηλώνει ότι τα διαφορετικά μοντέλα παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση συνεπώς και αυξημένη αβεβαιότητα στις προβλέψεις.

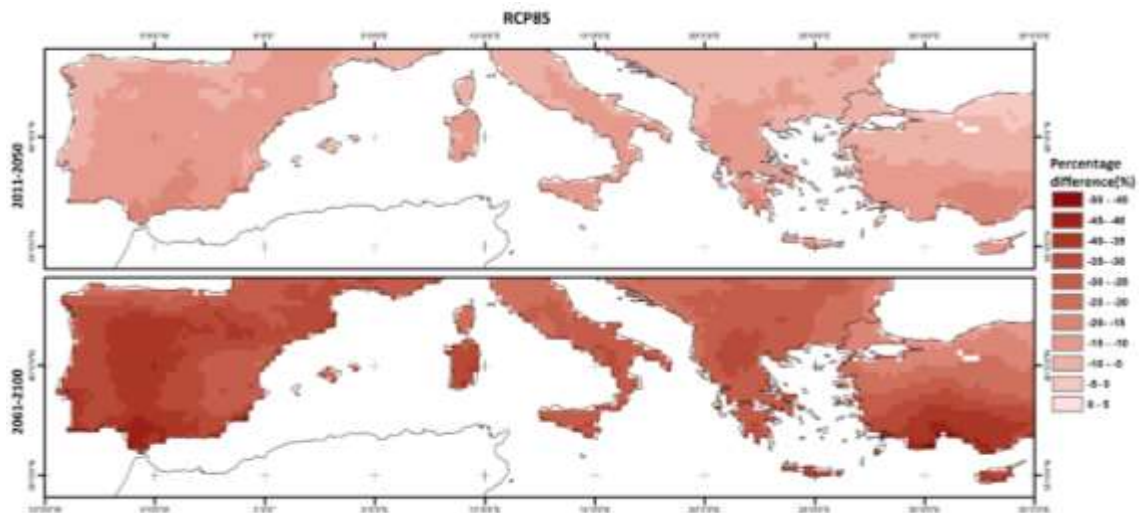




Εικόνα 4.5 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω) για την πρώτη περίοδο μελέτης υπό το σενάριο RCP85.

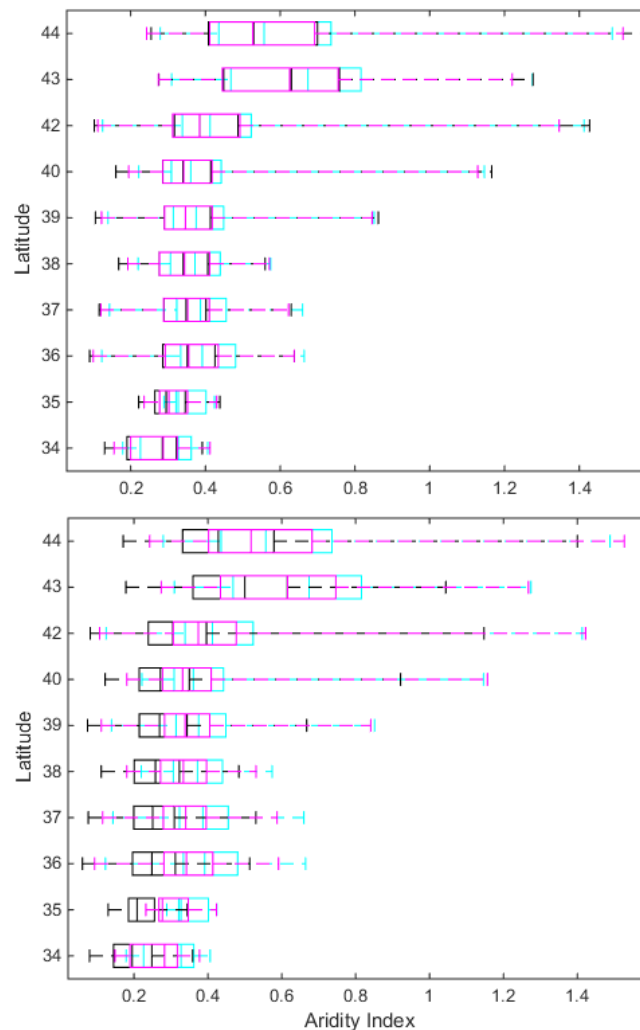


Εικόνα 4.6 Η διάμεσος τιμή του δείκτη ξηρότητας (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω), για την δεύτερη περίοδο μελέτης υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85.



Εικόνα 4.7 Ποσοστιαία αλλαγή του δείκτη ξηρότητας συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (πάνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85.

Τέλος, στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται για τα δύο σενάρια για κάθε περίοδο μελέτης για κάθε μοίρα γεωγραφικού πλάτους, σε μορφή θηκογραμμάτων (boxplots) ο δείκτης ξηρότητας. Το κουτί αντιπροσωπεύει το 50% των τιμών, ενώ τα γραμμές σφάλματος αντιστοιχούν σε περίπου  $\pm 2.7\sigma$  και περιλαμβάνουν περίπου το 99,3% των τιμών, αν τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή. Παρατηρείται αρχικά ότι στο 50% των τιμών ο δείκτης ξηρότητας κυμαίνεται από 0.2 μέχρι 0.5 στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζοντας την ευρωπαϊκή Μεσόγειο ως ημίξηρη. Παρατηρείται επίσης ότι και στα δύο σενάρια ο δείκτης ξηρότητας μειώνεται σε όλο το γεωγραφικό πλάτος της Μεσογείου, με τα πιο βόρεια να έχουν μεγαλύτερη διακύμανση από ότι τα νότια τα οποία είναι επίσης και πιο ξηρά κάτι που παρατηρείται και από τους Gao & Giorgi (2008). Η μικρότερη διακύμανση των τιμών μεταξύ των μοντέλων στα νότια γεωγραφικά πλάτη υποδηλώνει μικρότερη αβεβαιότητα στις προβλέψεις. Επίσης παρατηρείται ότι στο σενάριο RCP26 η διαφοράς στο δείκτη τις δύο μελλοντικές περιόδους μελέτης είναι παρόμοιες. Όσον αφορά το σενάριο RCP85 είναι εμφανής η σταδιακή μείωση του δείκτη και η μετάβαση της περιοχής μελέτης σε πιο ξηρή κατάσταση μέχρι το 2100. Παρόμοια συμπεράσματα αναφέρει στη μελέτη του και ο Safriel (2009).

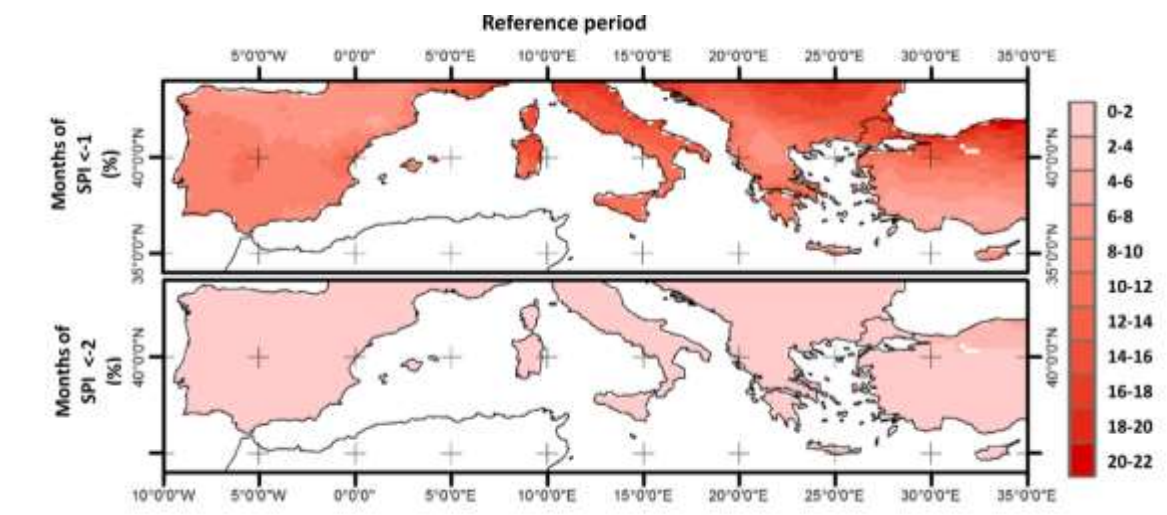


Εικόνα 4.8 Boxplot του δείκτη ξηρότητας για το σενάριο RCP26 (άνω) και RCP85 (κάτω). Με μαύρο χρώμα παρουσιάζεται η δεύτερη περίοδος μελέτης (2061-2100), με κόκκινο η πρώτη περίοδος μελέτης (2011-2050) και με γαλάζιο η περίοδος αναφοράς (1961-2000)

## 4.2 Ξηρασία

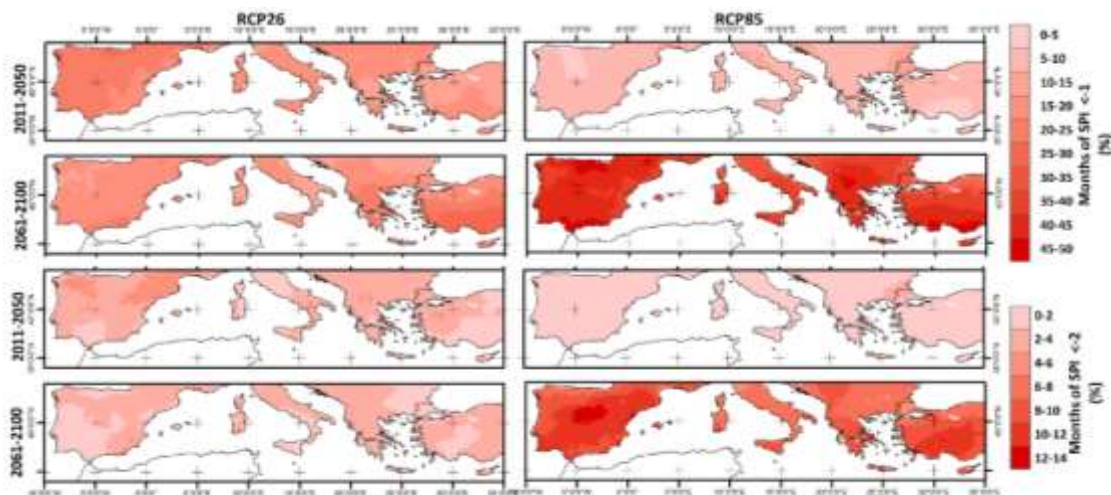
Τα αποτελέσματα του δείκτη ξηρασίας SPI παρουσιάζονται για κάθε σενάριο και περίοδο μελέτης (α) ως ποσοστό των μηνών οι οποίοι παρουσιάζουν  $SPI < -1$ , δηλαδή φαινόμενα πιο έντονα από ήπια ξηρασία, και (β) ως ποσοστό των μηνών οι οποίοι παρουσιάζουν  $SPI < -2$ , δηλαδή φαινόμενα εξαιρετικής ξηρασίας. Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζονται τα ποσοστά των μηνών κάθε περιόδου μελέτης όπου ο δείκτης SPI εμφανίζει τιμές μικρότερες από -1 και μικρότερες από -2 για την περίοδο αναφοράς. Παρατηρείται ότι κατά την περίοδο αναφοράς (1961-2000), το ποσοστό των μηνών κατά τους οποίους εμφανίστηκαν φαινόμενα ακραίας ξηρασίας κυμαίνεται μεταξύ 0-2% (~10 μήνες σε 40 χρόνια). Αντίστοιχα, το ποσοστό των μηνών κατά τους οποίους η ξηρασία χαρακτηρίζεται μέτρια ή/και σοβαρή κυμαίνονται σε κάποιες περιοχές όπως η βόρεια βαλκανική χερσόνησος και η Ιταλική χερσόνησος μέχρι και 22% (~105 μήνες σε 40 χρόνια).





Εικόνα 4.9 Ποσοστό μηνών όπου σύμφωνα με τον SPI παρουσιάζονται σοβαρά (τιμές μικρότερες από -1) (άνω) και ακραία (μικρότερες από -2) (κάτω) φαινόμενα ξηρασίας την περίοδο αναφοράς.

Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζονται για τις δύο μελλοντικές περιόδους μελέτης και για τα δύο σενάρια συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου το ποσοστό των μηνών όπου ο δείκτης SPI εμφανίζει τιμές μικρότερες από -1 και μικρότερες από -2. Συγκρίνοντας τα δύο σενάρια, παρατηρείτε ότι μέχρι το 2050 το σενάριο RCP26 εμφανίζει περισσότερα φαινόμενα ξηρών περιόδων από RCP85. Αντίθετα, το δυσμενέστερο σενάριο (RCP85) παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά μηνών με σοβαρά (<-1) και ακραία (<-2) κατά τη δεύτερη περίοδο μελέτης. Σύμφωνα με το σενάριο RCP26, τα ποσοστά των μηνών όπου ο δείκτης SPI είναι μικρότερος από -1 τόσο την πρώτη περίοδο μελέτης κυμαίνονται μέχρι και 25% στην Ιβηρική χερσόνησο ενώ την δεύτερη, σοβαρά φαινόμενα ξηρασίας με ποσοστό μηνών μέχρι και 25% προβλέπονται στην Ελλάδα και την νότια Ισπανία. Σύμφωνα με το σενάριο RCP85, τα ποσοστά των μηνών με  $SPI < -1$  τόσο την πρώτη περίοδο μελέτης κυμαίνονται μέχρι 15% ενώ κατά τη δεύτερη τα σοβαρά φαινόμενα ξηρασίας φτάνουν μέχρι και σε ποσοστό μηνών 50% της περιόδου μελέτης σε περιοχές της Ιβηρικής χερσονήσου.



Εικόνα 4.10 Ποσοστό μηνών όπου σύμφωνα με τον SPI παρουσιάζονται σοβαρά (τιμές μικρότερες από -1) (άνω) και ακραία (μικρότερες από -2) (κάτω) φαινόμενα ξηρασίας τις δύο περιόδους μελέτης για το σενάριο RCP26 αριστερά και RCP85 δεξιά.

Ωστόσο, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς είναι εμφανές ότι στο μέλλον θα αυξηθεί η δριμύτητα και η διάρκεια των φαινομένων ξηρασίας όπως επίσης και η χωρική έκτασή τους, ανεξαρτήτου σεναρίου συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου σε όλη την έκταση της περιοχής. Τα αποτελέσματα του RDIST είναι παρόμοια με αυτά του SPI και γι' αυτό οι χάρτες της χωρικής εξέλιξης της ξηρασίας βάση αυτού του δείκτη δεν παρουσιάζονται στην εργασία.

#### 4.3 Χρονική εξέλιξη των παραμέτρων στις 4 περιοχές μελέτης

Στην Εικόνα 4.11, Εικόνα 4.12, Εικόνα 4.13 και Εικόνα 4.14, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των δεικτών που υπολογίστηκαν, και των κλιματικών δεδομένων για τις τέσσερις περιοχές μελέτης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η αλλαγή (α) της θερμοκρασίας, (β) της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και (γ) της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς (άνω εικόνα), (δ) η διακύμανση του ετήσιου δείκτη ξηρότητας (μεσαία εικόνα), και (ε) η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας SPI και RDIST (κάτω εικόνα). Παρατηρείται ότι οι δείκτες RDIST και SPI, έχουν την ίδια τάση, με τον δείκτη RDIST να παίρνει πιο ακραίες τιμές καθώς συνυπολογίζει και την αλλαγή της θερμοκρασίας. Έτσι, οι δύο δείκτες θα σχολιαστούν παράλληλα ως δείκτες ξηρασίας.

Στην περιοχή της Μεσσαράς, σύμφωνα με το σενάριο RCP26 παρατηρείται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 2 °C και αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά 60 mm (3%) μέχρι το 2050. Μετά την περίοδο αυτή οι μεταβλητές παραμένουν σταθερές μέχρι το 2100. Σύμφωνα με το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85, η ετήσια θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι και 6 °C και η εξατμισοδιαπνοή μέχρι και 250 mm (15%) μέχρι το 2100. Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, η βροχόπτωση παρουσιάζει μείωση μέχρι το 2100 μέχρι και

100 mm (19%) ετησίως αλλά παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Σύμφωνα με το σενάριο RCP85, η βροχόπτωση εμφανώς μειώνεται μέχρι και 200 mm (39%). Όσον αφορά τον δείκτη ξηρότητας, σύμφωνα και με τα δύο σενάρια παρατηρείται μείωση του στην περιοχή της Μεσσαράς με το πρώτο σενάριο να κυμαίνεται από 0.6 ως 0.4. Αυτό σημαίνει σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της UNEP ότι η περιοχή από ξηρή ημί-υγρή μετατρέπεται σε ημίξηρη. Σύμφωνα με το σενάριο RCP85, ο δείκτης ξηρότητας μέχρι το 2100 παίρνει τιμές μικρότερες από 0.3 όπου χαρακτηρίζει την περιοχή ως ημίξηρη. Τέλος, σύμφωνα με τους δείκτες ξηρασίας φαίνεται ότι στην περιοχή αρχικά κυριαρχούσαν ήπια υγρά κλιματικά φαινόμενα σύμφωνα και με τα δύο σενάρια, ενώ σταδιακά και μετά το 2050 κυριαρχούν μετρίως ξηρά φαινόμενα.

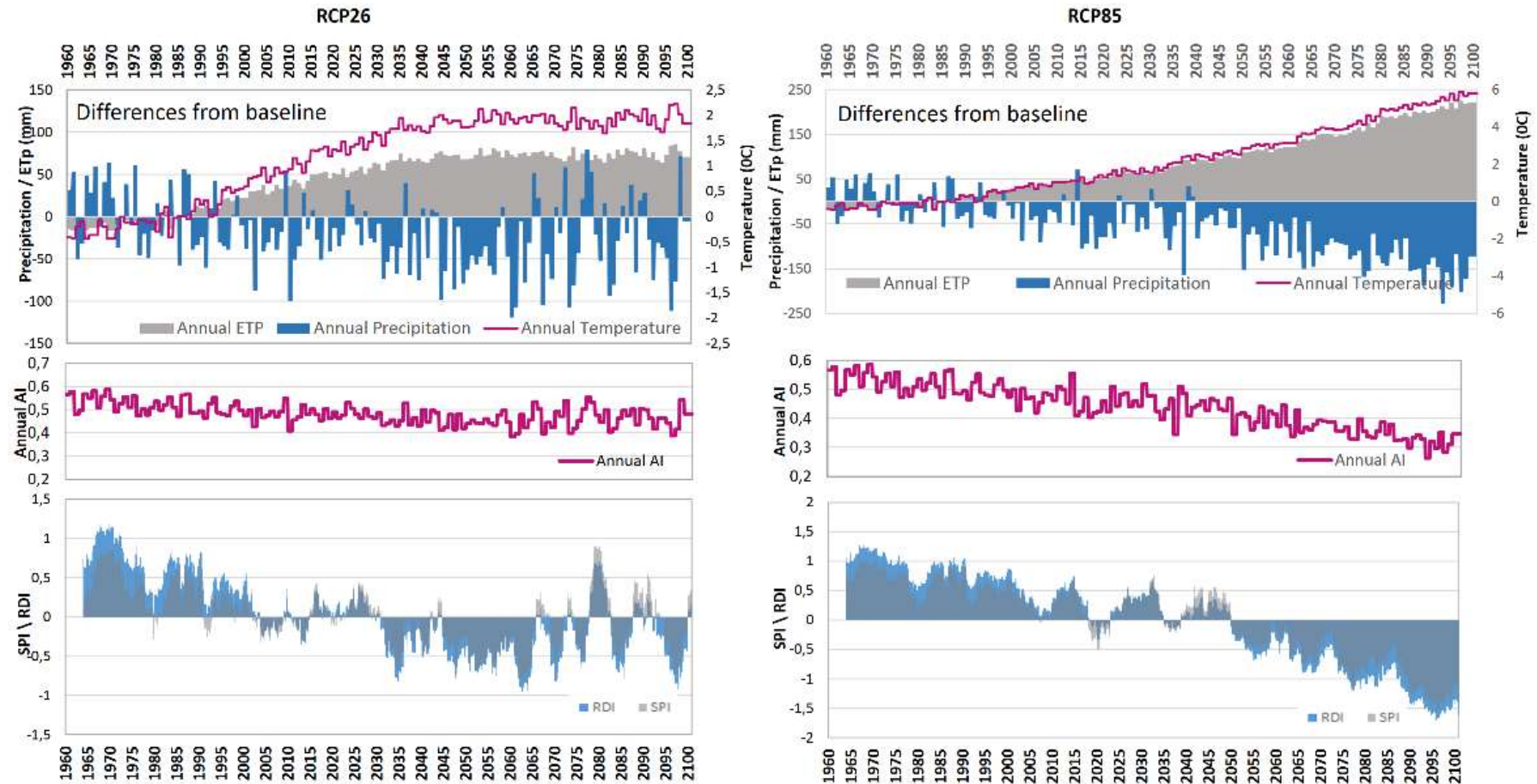
Στην περιοχή του δάσους Randi στην Κύπρο, σύμφωνα με το σενάριο RCP26 παρατηρείται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 2 °C και αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά 60 mm (3%) μέχρι το 2050, και μετέπειτα παραμένουν σταθερά μέχρι το 2100. Σύμφωνα με το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85, η ετήσια θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι και 6°C και η εξατμισοδιαπνοή μέχρι και 250 mm (15%) μέχρι το 2100. Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, η βροχόπτωση παρουσιάζει μείωση μέχρι το 2100 μέχρι και 150 mm (19%) ετησίως ενώ σύμφωνα με το σενάριο RCP85 μειώνεται μέχρι και 250 (93%) mm. Όσον αφορά τον δείκτη ξηρότητας σύμφωνα και με τα δύο σενάρια παρατηρείται μείωση του στην περιοχή του Randi με το πρώτο σενάριο να κυμαίνεται από 0.5 ως 0.3. Αυτό σημαίνει σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της UNEP ότι η περιοχή σήμερα χαρακτηρίζεται ως ημίξηρη. Σύμφωνα με το σενάριο RCP85, ο δείκτης ξηρότητας μέχρι το 2100 παίρνει τιμές μέχρι και 0.2 όπου χαρακτηρίζει την περιοχή ως οριακά ξηρή. Τέλος, σύμφωνα με τους δείκτες ξηρασίας φαίνεται ότι στην περιοχή αρχικά κυριαρχούσαν ήπια υγρά κλιματικά φαινόμενα σύμφωνα και με τα δύο σενάρια, ενώ σταδιακά και μετά το 2050 κυριαρχούν μετρίως ξηρά φαινόμενα.

Στην περιοχή Albaterra της νότιας Ισπανίας, σύμφωνα με το σενάριο RCP26 παρατηρείται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 1.5 °C και αύξηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά 60 mm (3%) μέχρι το 2050, και μετέπειτα παραμένουν σταθερά μέχρι το 2100. Σύμφωνα με το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85, η ετήσια θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι και 5.5 °C και η εξατμισοδιαπνοή μέχρι και 200 mm (11%) μέχρι το 2100. Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο η βροχόπτωση παρουσιάζει μείωση μέχρι το 2100 μέχρι και 70 mm (14%) ετησίως ενώ σύμφωνα με το σενάριο RCP85 μειώνεται μέχρι και 110 (22%) mm. Όσον αφορά τον δείκτη ξηρότητας σύμφωνα και με τα δύο σενάρια παρατηρείται μείωση του στην περιοχή, με το πρώτο σενάριο να κυμαίνεται από 0.35 ως 0.25. Αυτό

σημαίνει σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση της UNEP ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται ως ημίξηρη. Σύμφωνα με το σενάριο RCP85, ο δείκτης ξηρότητας μέχρι το 2100 παίρνει τιμές μέχρι και μικρότερες από 0.2 όπου σημαίνει ότι η περιοχή από ημίξηρη μετατρέπεται σε ξηρή. Τέλος, σύμφωνα με τους δείκτες ξηρασίας φαίνεται ότι στην περιοχή αρχικά κυριαρχούν ήπια υγρά κλιματικά φαινόμενα σύμφωνα και με τα δύο σενάρια, ενώ σταδιακά και μετά το 2050 κυριαρχούν μετρίως ξηρά φαινόμενα για το πρώτο σενάριο, ενώ σύμφωνα με το σενάριο RCP85 μέχρι το 2100 θα εμφανίζονται και σημαντικά φαινόμενα ξηρασίας.

Στην περιοχή Castelsaraceno της κεντρικής Ιταλίας, σύμφωνα με το σενάριο RCP26 παρατηρείται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 1.5 °C μέχρι το 2050, και μετέπειτα παραμένουν σταθερά μέχρι το 2100 ενώ η αύξηση σύμφωνα με το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85 φτάνει μέχρι και 2.5 °C. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή αυξάνεται μέχρι και 60 mm (4%) μέχρι το 2100 σύμφωνα και με τα δύο σενάρια. Σύμφωνα και με τα δύο σενάρια στην περιοχή η βροχόπτωση παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα. Όσον αφορά τον δείκτη ξηρότητας σύμφωνα με το πρώτο σενάριο κυμαίνεται από 0.6 ως 0.4 όπου 1σημαίνει ότι η περιοχή μετατρέπεται από ξηρή ημίυγρη σε ημίξηρη. Σύμφωνα με το σενάριο RCP85, ο δείκτης ξηρότητας κυμαίνεται από 0.8 ως 0.5 όπου χαρακτηρίζει την περιοχή ως ξηρή ημίυγρη. Τέλος, όπως και με την βροχόπτωση οι δείκτες ξηρασίας παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα στον χρόνο με την παρουσία φαινομένων τόσο ήπια υγρά όσο και ήπια ξηρά.

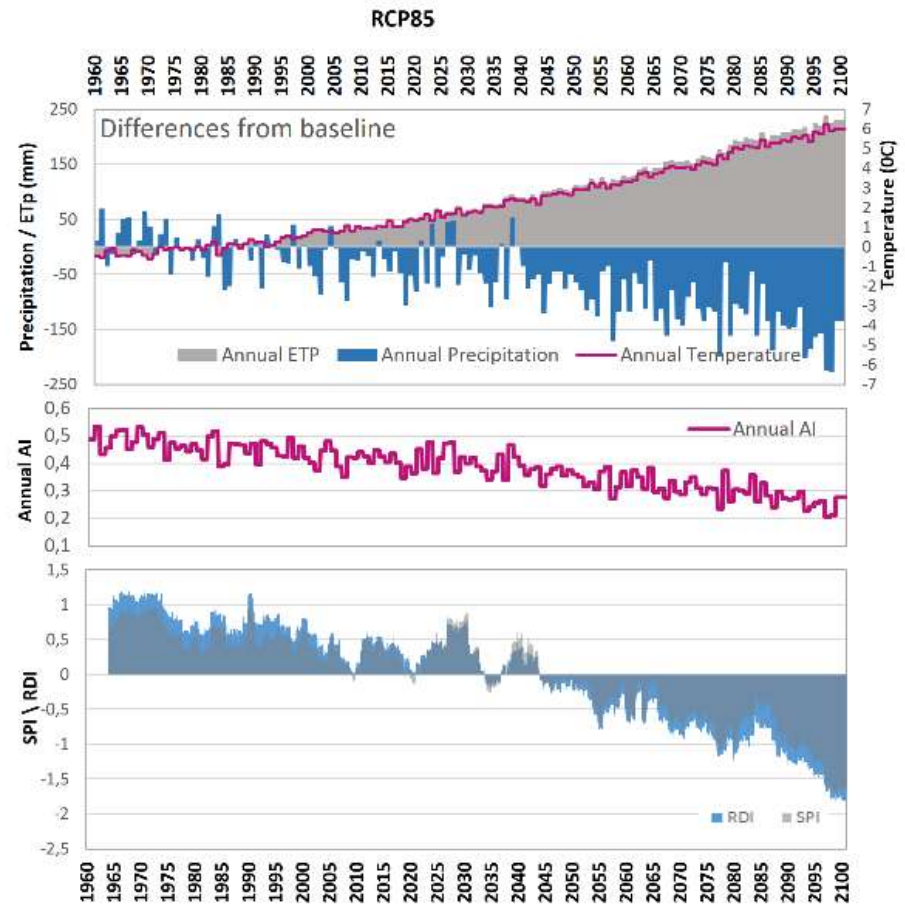
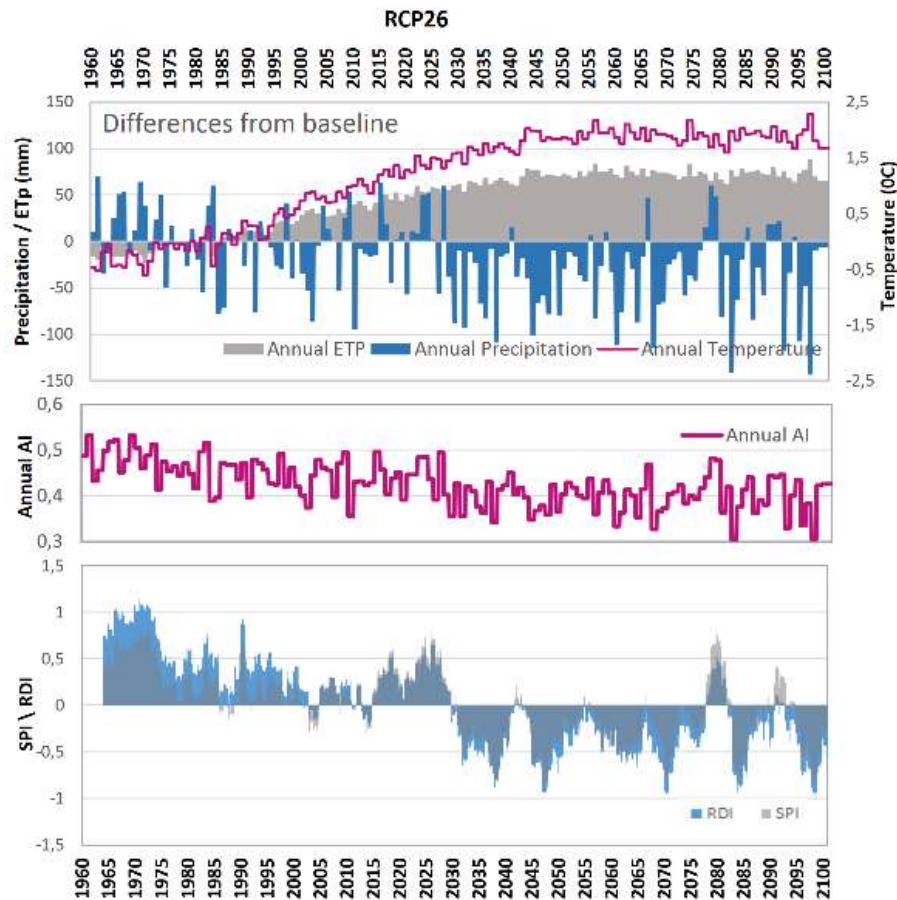
# Messara, Crete



Εικόνα 4.11 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή της Μεσσαράς Κρήτης, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς. Στη μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIst και SPI.

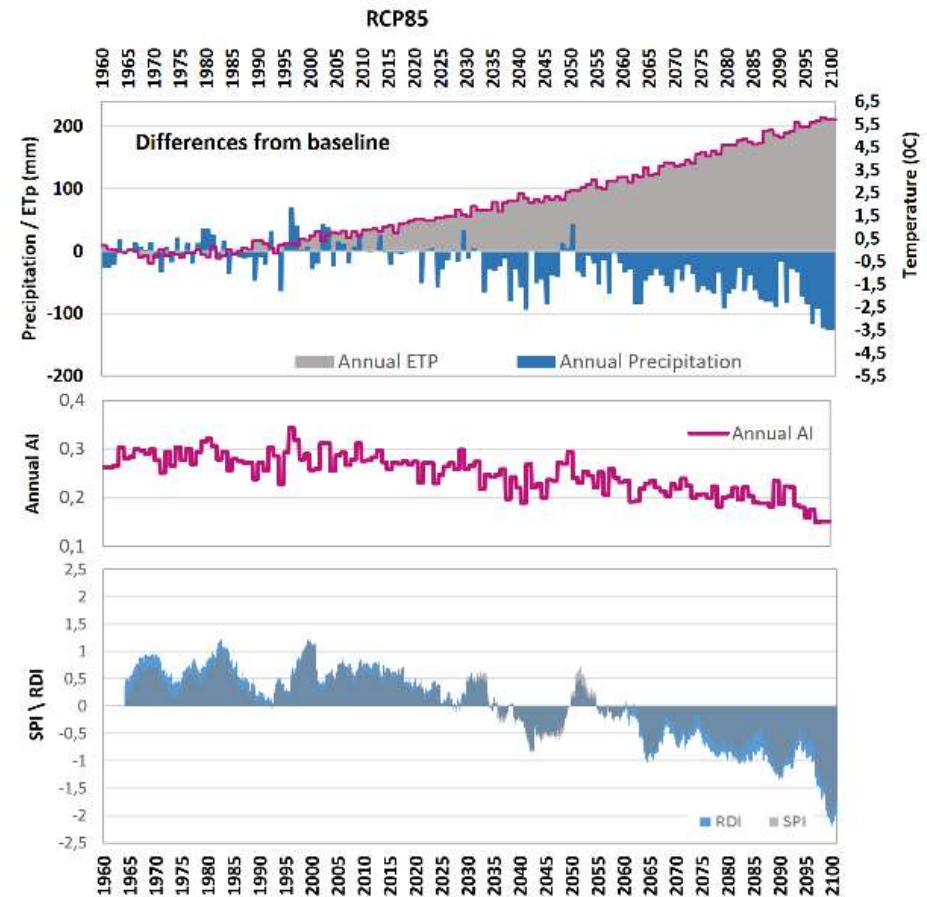
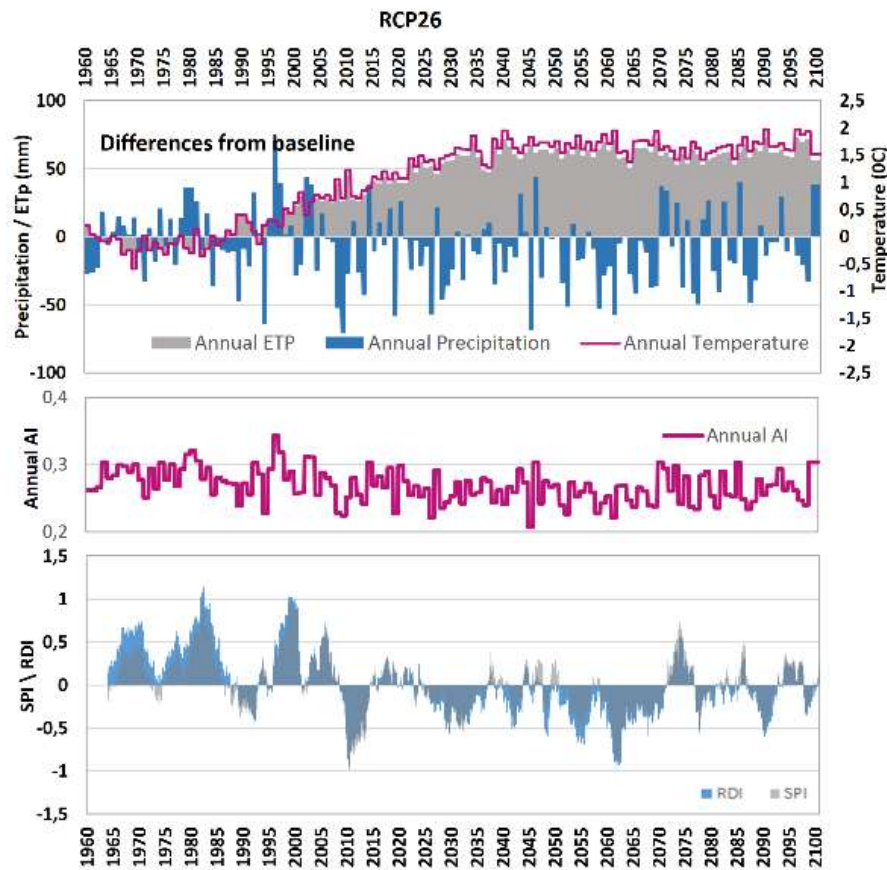


# Randi forest, Cyprus

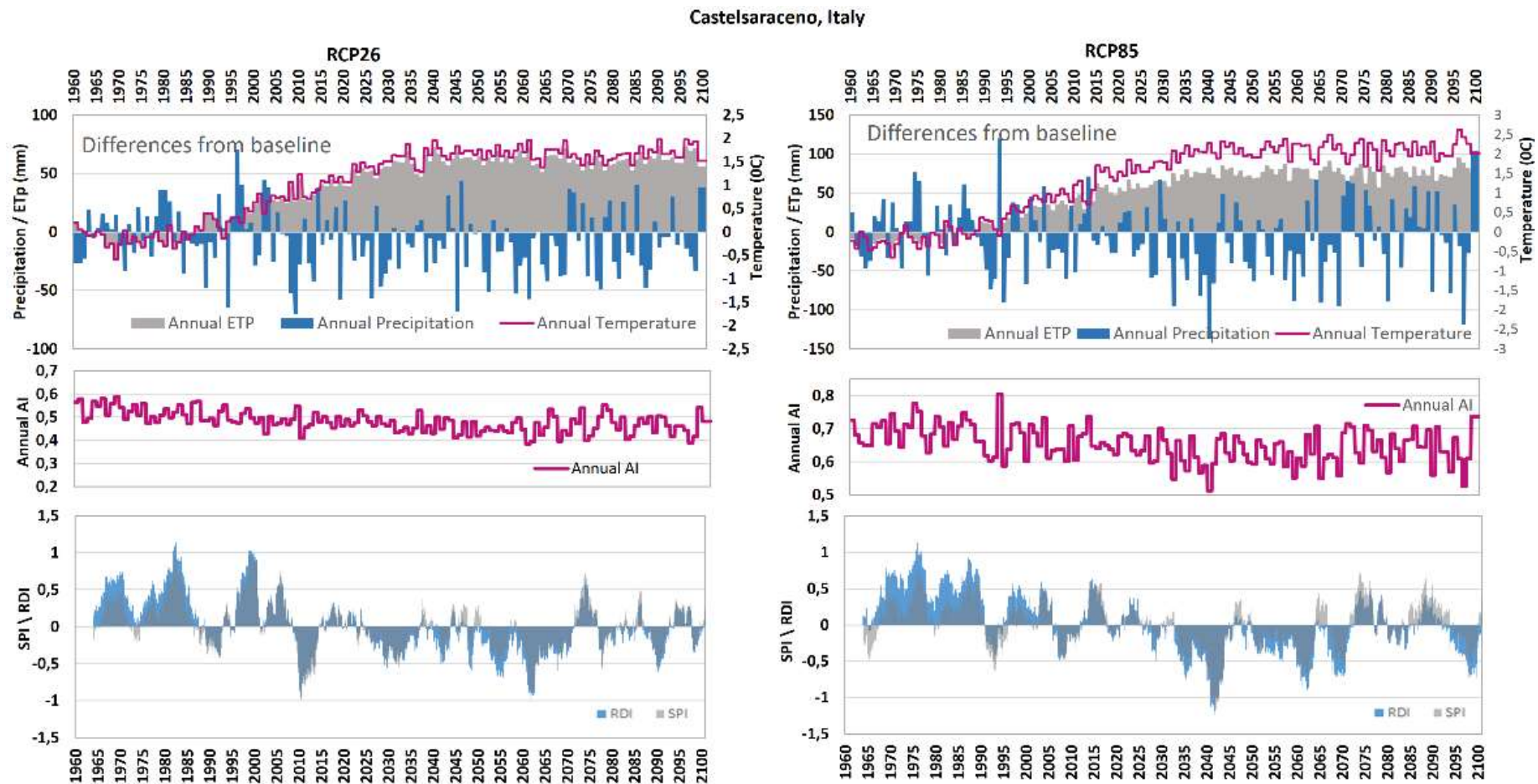


Εικόνα 4.12 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή του δάσους Randi, Κύπρο, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς Στη μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIst και SPI.

# Albatera, Spain



Εικόνα 4.13 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή Albatera της Ισπανίας, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς, Στη μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIst και SPI

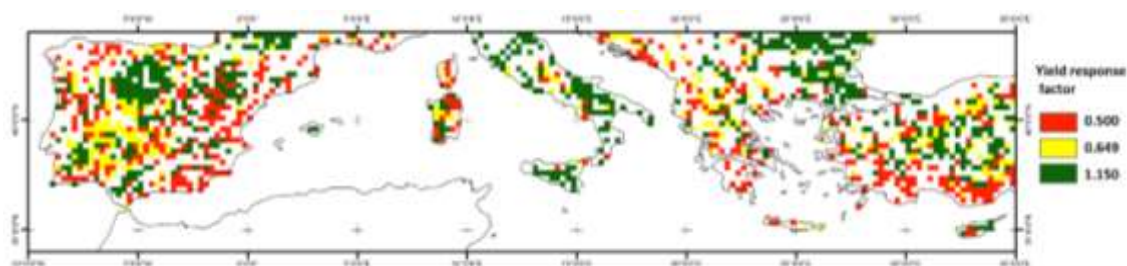


Εικόνα 4.14 Χρονική εξέλιξη των κλιματικών δεδομένων και των δεικτών που υπολογίστηκαν στην περιοχή Castelsaraceno της Ιταλίας, αριστερά υπό το σενάριο RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85. Επάνω η αλλαγή της θερμοκρασίας, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της βροχοπτώσεως από την μέση τιμή της περιόδου αναφοράς. Στη μέση η διακύμανση του δείκτη ξηρότητας και κάτω η διακύμανση των δεικτών ξηρασίας RDIst και SPI.



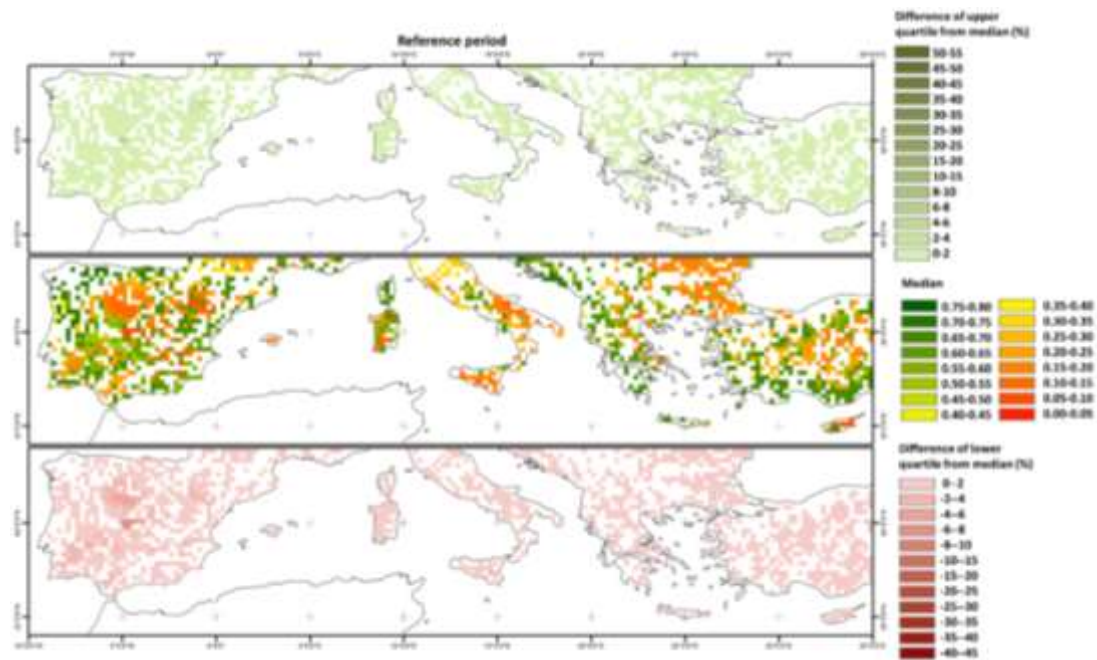
#### 4.4 Απόδοση βλάστησης βοσκοτόπων

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της απόκρισης της βλάστησης στην έλλειψη ύδατος, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι ποσοστιαίες διαφορές του 1<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> τεταρτημόριου από τη διάμεσο τιμή του λόγου της πραγματικής προς τη μέγιστη απόδοση. Οι παραπάνω τιμές έχουν υπολογιστεί για κάθε σενάριο συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου για τις τρεις περιόδους μελέτης. Παράλληλα έχει υπολογιστεί και η ποσοστιαία αλλαγή των μελλοντικών περιόδων συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς. Στην Εικόνα 4.15 παρουσιάζονται οι συντελεστές απόκρισης απόδοσης όπως θεωρήθηκαν για κάθε χρήση γης όπου χρησιμοποιείται ή δύναται να χρησιμοποιηθεί για κτηνοτροφικούς σκοπούς. Όπως φαίνεται στην εικόνα, το μεγαλύτερο μέρος των παράλιων περιοχών της νότιας Ευρώπης κυριαρχείται από βλάστηση με χαμηλό συντελεστή απόκρισης, που παραπέμπει σε ξηροφυτικά είδη, όπως η μακία βλάστηση. Εξαίρεση αποτελεί η Ιταλία. Αντίθετα, στις ηπειρωτικές περιοχές οι περιοχές κτηνοτροφικού ενδιαφέροντος κυριαρχούνται από μεσόφιλη βλάστηση.



Εικόνα 4.15 Χωρική κατανομή των συντελεστών απόκρισης απόδοσης των καλλιεργειών όπως επιλέχθηκαν.

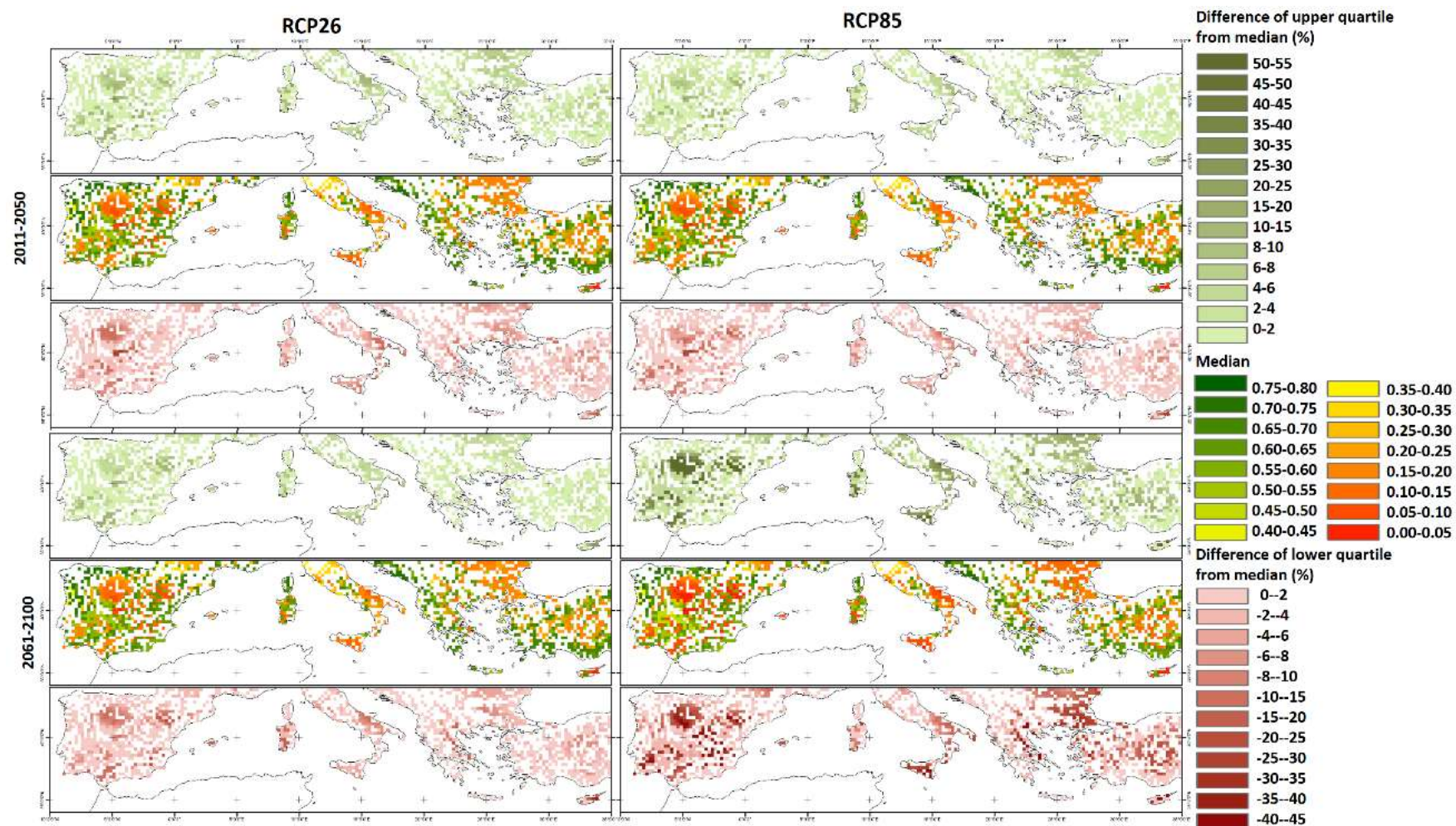
Στην Εικόνα 4.16 παρουσιάζονται για την περίοδο αναφοράς η διάμεσος τιμή της σχετικής απόκρισης της βλάστησης καθώς και η ποσοστιαία διαφορά από το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο της απόκρισης. Παρατηρείται ότι η σχετική απόκριση της βλάστησης στην έλλειψη ύδατος δεν μεταβάλλεται σημαντικά ( $\pm 5\%$ ) ανάμεσα στα σενάρια και τις περιόδους σε κάθε περιοχή. Εξαίρεση αποτελεί μια μικρή περιοχή της κεντρικής Ισπανίας όπου εμφανίζεται ελαφρώς αυξημένη αβεβαιότητα ( $< +10\%$ ) μεταξύ των μοντέλων. Η μέση τιμή της σχετικής απόκρισης αποτελεί σε αδρές γραμμές μια αντιστροφή της κατηγοριοποίησης της βλάστησης. Στα παράλια ο περιοριστικός παράγοντας είναι συχνότερα η έλλειψη ύδατος ενώ στις βορειότερες, ηπειρωτικές και ορεινότερες περιοχές είναι η έλλειψη αρκετά υψηλών θερμοκρασιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι εδώ η σχετική απόδοση δεν αποτελεί μέτρο σύγκρισης μεταξύ περιοχών με διαφορετική βλάστηση καθώς αναφέρεται μόνο στην απόκριση της βλάστησης σε σχέση με τη μέγιστη αναμενόμενη σε βέλτιστες κλιματικές συνθήκες.



Εικόνα 4.16 Η διάμεσος τιμή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω) για την περίοδο αναφοράς (1961-2000).

Στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζονται για τις δύο περιόδους μελέτης και για τα δύο σενάρια η διάμεσος τιμή της σχετικής απόκρισης της βλάστησης καθώς και η ποσοστιαία διαφορά από το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο της απόκρισης των καλλιεργειών.

Παρατηρείται ότι στις περιοχές όπου οι καλλιέργειες είναι πιο ευαίσθητες στην έλλειψη ύδατος (μεγαλύτερο συντελεστή απόκρισης) δηλαδή τις μεσοφιλικές καλλιέργειες, όπως στην βόρεια Ισπανία, την Ιταλία και τα ανατολικά βαλκάνια οι καλλιέργειες αποδίδουν λιγότερο από 50% της μέγιστης παραγωγής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα και εντονότερη αβεβαιότητα μεταξύ των μοντέλων λόγω κυρίως της μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων.



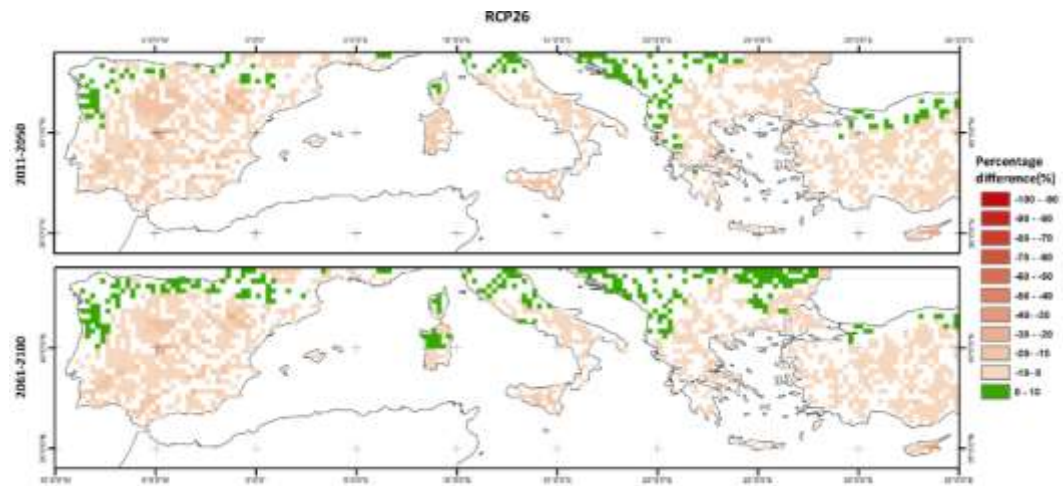
Εικόνα 4.17 Η διάμεσος τιμή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών (κέντρο) καθώς και η ποσοστιαία διαφορά της διαμέσου από το πρώτο (κάτω) και τρίτο τεταρτημόριο (άνω) για την πρώτη περίοδο μελέτης (άνω σελ) και την δεύτερη (κάτω σελ). Αριστερά για το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26 και δεξιά για το σενάριο RCP85.

Στην Εικόνα 4.18 και Εικόνα 4.19 παρουσιάζονται για τις δύο περιόδους μελέτης, η ποσοστιαία διαφορά της σχετικής απόκρισης της βλάστησης από την περίοδο αναφοράς για τα δύο σενάρια συγκεντρώσεων. Παρατηρείται ότι γενικά στο χώρο της Μεσογείου προβλέπεται μείωση της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών σύμφωνα με το σενάριο RCP26 μέχρι και 20%. Σημαντική ωστόσο, είναι η αύξηση της σχετικής απόδοσης στις βόρειες και ορεινές περιοχές όπου περιοριστικός παράγοντας είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες. Φαίνεται ότι με την αλλαγή του κλίματος και την αύξηση της θερμοκρασίας αυτές οι περιοχές ευνοούνται και η βλάστηση των βοσκοτόπων παρουσιάζει αύξηση, η οποία χωρικά μέχρι το 2100 επεκτείνεται όλο και νοτιότερα. Αύξηση της απόδοσης παρουσιάζεται επίσης στην Κορσική και Σαρδηνία.

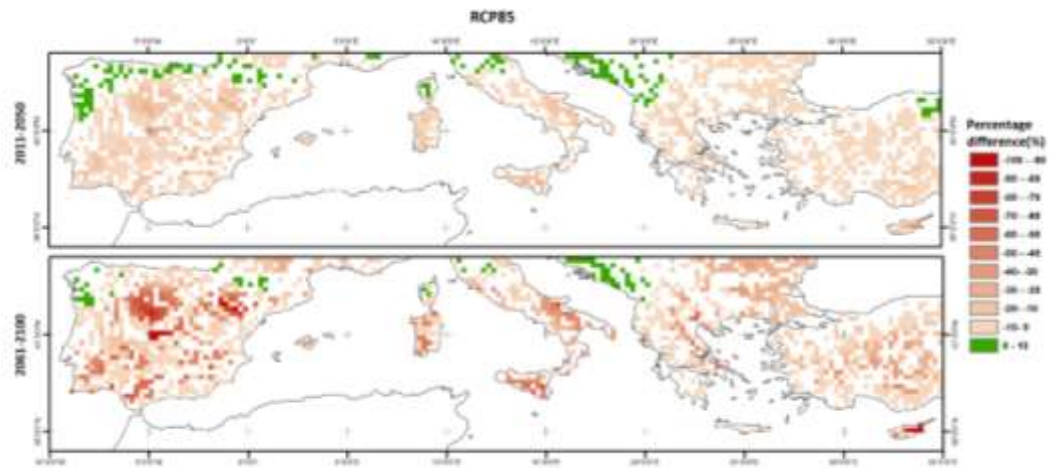
Σύμφωνα με το σενάριο RCP85 μέχρι η μείωση της σχετικής απόδοσης των βοσκοτόπων φτάνει μέχρι και 100% σε περιοχές της Κύπρου και της Κεντρικής Ισπανίας. Μεγάλη μείωση της σχετικής απόδοσης της βλάστησης παρατηρείται επίσης στις περισσότερες περιοχές της Ισπανίας της ανατολικής Ιταλίας της Σαρδηνίας και της Σικελίας όπως και της ανατολικής Ελλάδας όπου κυρίως καλύπτονται με μεσοφιλική βλάστηση. Σημαντικό είναι ότι σε βόρειες περιοχές της Ιβηρικής, Ιταλικής και Βαλκανικής χερσονήσου παρατηρείται αύξηση στην απόδοση των καλλιεργειών, κυρίως μέχρι το 2050. Στις περιοχές αυτές σχηματίζονται ορεινοί όγκοι που καθώς φαίνεται λόγω της κλιματικής αλλαγής και αύξησης της θερμοκρασίας τα χιόνια λιώνουν όπως παρουσιάζεται και από τους Gao & Giorgi (2008) με αποτέλεσμα να ευνοηθούν οι καλλιέργειες, συγκριτικά με τα προηγούμενα χρόνια όπου οι κλιματικές συνθήκες δεν ευνοούσαν τις υπάρχουσες καλλιέργειες. Ωστόσο, αυτή η αύξηση της απόδοσης παρουσιάζεται μόνο την πρώτη περίοδο μελέτης, αφού σύμφωνα με το δυσμενές σενάριο συγκεντρώσεων μέχρι το 2100, η αλλαγή του κλίματος θα επιφέρει μείωση της απόδοσης στο μεγαλύτερο ποσοστό της ευρωπαϊκής Μεσογείου, με τις νότιες περιοχές και περιοχές τις κεντρικής Ισπανίας να πλήττονται περισσότερο.

Τέλος σημαντικό είναι να τονιστεί η συσχέτιση της απόδοσης της βλάστησης με τον δείκτη ξηρότητας όπως παρουσιάστηκε και από τους (Bannayan et al. 2010). Παρατηρώντας τις εικόνες του δείκτη ξηρότητας για κάθε περίοδο (Εικόνα 4.2, Εικόνα 4.3, Εικόνα 4.5, Εικόνα 4.6) μελέτης και συγκρίνοντας με την Εικόνα 4.18 και Εικόνα 4.19, βλέπουμε ότι στις περιοχές όπου ο δείκτης ξηρότητας  $AI > 0.8$  παρατηρείται και αύξηση της απόδοσης της βλάστησης όπως για παράδειγμα στην βόρεια Ιβηρική και Ιταλική χερσόνησο. Αντίθετα στις περιοχές όπως η Κύπρος και η κεντρική Ισπανία όπου παρουσιάζεται  $AI < 0.2$  παρατηρείται και η μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης. Ωστόσο αξιοσημείωτη είναι η αύξηση της απόδοσης της βλάστησης στην βόρεια βαλκανική χερσόνησο όπου ο  $AI \approx 0.3$ .





Εικόνα 4.18 Ποσοστιαία αλλαγή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (άνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP26.



Εικόνα 4.19 Ποσοστιαία αλλαγή της σχετικής απόδοσης των καλλιεργειών συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την πρώτη (άνω) και την δεύτερη περίοδο μελέτης (κάτω), υπό το σενάριο συγκεντρώσεων RCP85.

## 5 Συμπεράσματα

Η διαθεσιμότητα ύδατος παίζει αναμφισβήτητα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ξηρότητας και ξηρασίας στη Μεσόγειο όσο και την εξέλιξη της βλάστησης. Στην παρούσα μελέτη, τα αποτελέσματα της αλλαγής του κλίματος, η διακύμανση της ξηρότητας και των φαινομένων ξηρασίας εξετάστηκαν με απώτερο σκοπό την διερεύνηση της εξέλιξης της βλάστησης των μεσογειακών βοσκοτόπων. Για την μοντελοποίηση της απόκρισης της βλάστησης των βοσκοτόπων χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση καλλιέργειας-ύδατος παραγωγής όπου προτείνεται από το FAO, ενώ για την μελέτη της εξέλιξης της ξηρότητας και των φαινομένων ξηρασίας χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί εμπειρικοί δείκτες. Η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος έγινε με την χρήση κλιματικών δεδομένων από 9 διαφορετικά παγκόσμια κλιματικά μοντέλα του προγράμματος CMIP5 κάτω από δύο διαφορετικά σενάρια συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου. Για την μείωση των αβεβαιοτήτων των δεδομένων των κλιματικών μοντέλων προηγήθηκε στατιστική διόρθωση των σφαλμάτων μεροληψίας σύμφωνα με παρατηρούμενα μετεωρολογικά δεδομένα. Η ανάλυση έγινε για 2 μελλοντικές περιόδους μελέτης (2011-2050 και 2061-2100) και η σύγκριση με τη περίοδο αναφοράς 1961-2000. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως μέση τιμή όλων των μοντέλων για κάθε σενάριο και περίοδο μελέτης. Επιπλέον έγινε λεπτομερής αναφορά και παρουσίαση των χρονοσειρών των κλιματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων για τέσσερις περιοχές μελέτης του ευρωπαϊκού προγράμματος CASCADE.

Όσον αφορά την ξηρότητα του κλίματος παρατηρείται ότι η Μεσόγειος γενικά χαρακτηρίζεται ως ημίξηρη. Σύμφωνα με το σενάριο RCP26, η εικόνα της Ευρώπης δεν αλλάζει σημαντικά, κάτι που δείχνει αν οι όροι της «Συμφωνίας του Παρισιού» τηρηθούν σε παγκόσμιο επίπεδο οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη βλάστηση θα είναι ελεγχόμενες. Αντίθετα, σύμφωνα με το σενάριο RCP85, το οποίο είναι λιγότερο αισιόδοξο, από το 2050 και έπειτα η εικόνα της περιοχής μελέτης αλλάζει σημαντικά. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, πολλές οι περισσότερες περιοχές θα μεταβαίνουν τουλάχιστον μία πιο ξηρή κλάση κατηγοριοποίησης, με κάποιες περιοχές στην Ισπανία, τη Κύπρο και την Ιταλία να βρίσκονται σε οριακή κατάσταση υπέρ-ξηρου κλίματος. Σημαντική είναι επίσης η ανά γεωγραφικό πλάτος κατηγοριοποίηση όπου παρατηρείται ότι ο δείκτης ξηρότητας μειώνεται από τα βόρεια προς τα νότια. Ωστόσο, η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων ακολουθεί αντίθετη τάση, με τα μοντέλα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση μεταξύ των τιμών του από τα νότια προς τα βόρεια. Σε περιοχές που ήδη βρίσκονταν υπό ξηρές συνθήκες, τα μοντέλα φαίνεται να συμφωνούν στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Αντίθετα, σε

βόρεια γεωγραφικά πλάτη όπου το κλίμα είναι σήμερα πιο υγρό, τα μοντέλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του μέλλοντος. Η διαφορά αυτή έγκειται στην αδυναμία συνεπούς πρόβλεψης της βροχόπτωσης μεταξύ των μοντέλων, κάτι που θα πρέπει να σημειωθεί ως αντικείμενο περεταίρω έρευνας στον χώρο των κλιματικών προσομοιώσεων.

Όσον αφορά τα φαινόμενα ξηρασίας, παρατηρείται ότι σταδιακά αυξάνονται τόσο σε ένταση και δριμύτητα αλλά και σε χωρική κατανομή, με το σενάριο RCP85 να προβλέπει τα σημαντικά ξηρά φαινόμενα να αυξάνονται ως και 50% μέχρι το 2100. Τα εξαιρετικά ξηρά φαινόμενα αυξάνονται μέχρι και 14% καταλαμβάνοντας όλη την έκταση της μεσογείου συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς όπου τέτοιας έντασης φαινόμενα περιορίζονταν σε περιοχές της Ιταλικής και βόρειας Βαλκανικής χερσονήσου.

Παρατηρώντας τις χρονοσειρές των δεικτών ξηρασίας που εξετάστηκαν, παρατηρείται ότι ο SPI και ο RDist εμφανίζουν την ίδια τάση και διάρκεια αλλά διαφορετική ένταση στα φαινόμενα ξηρασίας. Παρατηρείται ότι στον RDist όπου συνυπολογίζεται και η αλλαγή της θερμοκρασίας αλλάζει η ένταση των φαινομένων ξηρασίας με τις χρονοσειρές του RDist να . Έτσι συμπεραίνεται ότι η αλλαγή της θερμοκρασίας επηρεάζει τα φαινόμενα ξηρασίας εξίσου με την κατακρήμνιση, και κρίνεται σημαντικός ο συνυπολογισμός της στους δείκτες ξηρασίας.

Όσον αφορά τις περιοχές μελέτης στις περιοχές της Μεσσαράς, του δάσους Randi και Albaterra, όπου χαρακτηρίζονται πιο ξηρές παρατηρείται παρόμοια τάση με μια γενική αύξηση της θερμοκρασίας, εξατμισοδιαπνοής, ξηρότητας και έντασης των φαινομένων ξηρασίας, καθώς και μείωση της βροχόπτωσης. Εν αντιθέσει, στην περιοχή του Castesaraceno όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται ως πιο υγρό, αν και υπάρχει η ίδια τάση από τις χρονοσειρές παρατηρείται εντονότερη αβεβαιότητα.

Όσον αφορά την απόκριση της βλάστησης παρατηρείται αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ του AI και της απόδοσης της βλάστησης. Η πραγματική απόδοση των υπαρχόντων φυτικών ειδών των βοσκοτόπων της μεσογείου είναι ήδη μειωμένη συγκριτικά με την μέγιστη δυνατή. Ιδιαίτερα φυτικά είδη των οικογενειών των οσπρίων και δημητριακών δηλαδή μεσοφιλικές καλλιέργειες αποδίδουν κάτω από το 50% της δυνατής απόδοσης τους με τις συγκεκριμένες συνθήκες, καθιστώντας τα μη παραγωγικά στην περιοχή μελέτης. Οι περιοχές με σκληρόφυλλή βλάστηση και θάμνους παρατηρείται να αποδίδουν καλύτερα στις συνθήκες της Μεσογείου. Έτσι, αν και η αλλαγή του κλίματος παρουσιάζει μείωση μόνο μέχρι και 20% στην σχετική παραγωγή στην μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης, κρίνεται οριακή η απόδοση των βοσκοτόπων λόγω της ήδη δυσμενής κατάστασης τους.

Σημαντική είναι η επίπτωση της αλλαγής του κλίματος σε περιοχές της κεντρικής Ισπανίας και της Κύπρου όπου σύμφωνα με τα μοντέλα θα επέλθουν μειώσεις στην σχετική παραγωγή μέχρι και 100%, καθιστώντας τους βοσκοτόπους άγονους και την ερημοποίηση ένα ορατό ενδεχόμενο.

Αξιοσημείωτο είναι ότι περιοχές όπου χαρακτηρίζονται ως πιο υγρές ( $AI > 0.7$ ), λόγω της κάλυψης από χιόνι όπως ορεινοί όγκοι των βόρειων περιοχών της Ιβηρικής, Ιταλικής και Βαλκανικής χερσονήσου, παρουσιάζουν βελτίωση των κλιματικών συνθηκών για τις υπάρχουσες μορφές φυτοκάλυψης. Έτσι, σύμφωνα με τα μοντέλα η βλάστηση στις περιοχές αυτές θα παρουσιάσει αύξηση της σχετικής απόδοσής της μέχρι και 10%.

Γενικότερα παρατηρείται ότι τα μοντέλα φαίνεται να συμφωνούν αρκετά μέχρι το 2050 με την αβεβαιότητα να αυξάνεται την δεύτερη περίοδο μελέτης και ιδιαίτερα κάτω από το σενάριο RCP85. Η αβεβαιότητα των μοντέλων επίσης αυξάνεται με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. Αυτό υποδηλώνει με μεγαλύτερη σιγουριά ότι οι νότιες περιοχές της μεσογείου κινδυνεύουν και πρόκειται να επηρεαστούν περισσότερο από την ξηρασία και την ξηρότητα μέχρι το τέλος του αιώνα. Τα αποτελέσματα εγείρουν ερωτήματα και ανησυχία για τους δυνατούς τρόπους μετριασμού, τις απαιτούμενες ενέργειες και μέτρα όπου πρέπει να ληφθούν έτσι ώστε να μην αποτελέσει η μεσόγειος μέρος της καταστροφικής μεταστροφής όπου ήδη προβλέπεται (Cudennec et al. 2007; Bussotti et al. 2014; Safriel 2009).



## 6 Βιβλιογραφία

- Agnew, C. & Anderson, E.W., 1992. *Water Resources in the Arid Realm*, Routledge: London.
- Akhter, J. et al., 2003. Comparative water-use efficiency of *Sporobolus arabicus* and *Leptochloa fusca* and its relation with carbon-isotope discrimination under semi-arid conditions. *Plant and Soil*, 249(2), pp.263–269.
- Allen, R. et al., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, (56), p.300. Available at: <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>.
- American Meteorological Society, 1977. Meteorological drought-Policy statement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, pp.847–849.
- Bannayan, M. et al., 2010. Association between climate indices, aridity index, and rainfed crop yield in northeast of Iran. *Field Crops Research*, 118(2), pp.105–114. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.04.011>.
- Blaney, H.F. & Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA Soil Conservation Service Tech.*, (96), p.48.
- Boberg, F. & Christensen, J.H., 2012. Overestimation of Mediterranean summer temperature projections due to model deficiencies. *Nature Climate Change*, 2(6), pp.433–436. Available at: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate1454> [Accessed July 19, 2013].
- Bormann, H., 2011. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. , pp.729–753.
- Budyko, M.I., 1974. *Climate and life*, New York, USA: Academic Press.
- Budyko, M.I., 1951. On climatic factors of runoff. *Prob. Fiz. Geogr.*, (16).
- Bussotti, F. et al., 2014. The challenge of Mediterranean sclerophyllous vegetation under climate change: From acclimation to adaptation. *Environmental and Experimental Botany*, 103, pp.80–98. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.013>.
- Byun, H.R. & Wilhite, D.A., 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J. Clim.*, 12, pp.2747–2756.
- Campbell, B.D. et al., 1996. Impacts of atmospheric composition and climate change on temperate and tropical pastoral agriculture.
- Christensen, J.H. et al., 2007. No Title. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Christensen, J.H. et al., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35(20), p.L20709. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008GL035694> [Accessed May 28, 2013].
- Correal, E. et al., 2003. Mediterranean dryland mixed sheep-cereal systems. , 11, pp.2–4.
- Cosentino, S.L. et al., 2014. European grasslands overview: Mediterranean region. In *EGF at 50: The Future of European Grasslands*. Aberystwyth, Wales: Organising Committee of the 25th General Meeting of the European Grassland Federation IBERS, Aberystwyth University, Gogerddan, SY23 3EE, UK, p. 66–.

- Coutagne, A., 1968. Les variations de debit en periode non in-fluencée par les précipitations. *La Houille Blanche*, pp.416–436.
- Cruff, R.W. & Thompson, T.H., 1967. A Comparison of Methods of Estimating Potential Evapotranspiration From Climatological Data in Arid and Subhumid Environments. *Geological Survey Water-Supply Paper 1839-M*, United States Government Printing Office Washington.
- Cudennec, C., Leduc, C. & Koutsoyiannis, D., 2007. Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 52(6), pp.1077–1087. Available at: <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.6.1077>.
- Doorenbos, J. & Kassam, A., 1979. Yield response to water. In *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*. Rome: FAO.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O., 1977. Background and Development of Methods to Predict Reference Crop Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). Appendix II in FAO-ID-24. , pp.108–119.
- Dubrovský, M. et al., 2014. Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change*, 14(5), pp.1907–1919. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10113-013-0562-z>.
- Dufresne, J.-L. et al., 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9-10), pp.2123–2165. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>.
- EDC, 2016. European Drought Centre. Available at: <http://www.geo.uio.no/edc/droughtdb/index.php> [Accessed January 11, 2016].
- FAO, 1990. *Report on the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements* F. and A. O. of the U. Nations, ed., Food and Agriculture Organization of the United Nations, Land and Water Development Division, 1991.
- Fatideh, M., 2009. Evaluation of runoff and the effect of external factors on the potentials of water resources – Case study: Eastern, western and central regions of Guilan Province located in the southwestern coasts of the Caspian Sea in Iran. *Food, Agriculture and Environment*, 7(2), pp.777–787.
- Federer, C.A., 1982. Transpirational supply and demand: Plant, soil, and atmospheric effects evaluated by simulation. *Water Resources Research*, 18(2), pp.355–362. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR018i002p00355> [Accessed September 21, 2015].
- Galvin, K.A., 1992. Nutritional ecology of pastoralists in dry tropical Africa. *American Journal of Human Biology*, 4(2), pp.209–221. Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/ajhb.1310040206>.
- Gao, B.C., 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.*, 58(3), pp.257–256.
- Gao, X. & Giorgi, F., 2008. Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Global and Planetary Change*, 62(3-4), pp.195–209.
- Gaussen, H., 1955. Expression des milieux par des formules écologiques. Leur représentation cartographique. *Ann. Biol.*, 31, pp.257–269.
- Goodwin, C.R., 1991. Tidal-Flow, Circulation, and Flushing Changes Caused by Dredge and Fill in Hillsborough Bay, Florida. *US Geological Survey Water-Supply Paper 2376*, p.49.
- Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G. & Tsanis, I.K., 2013. Multisegment statistical bias correction of daily GCM precipitation output. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

- Haerter, J.O. et al., 2011. Climate model bias correction and the role of timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), pp.1065–1079. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1065/2011/> [Accessed May 31, 2013].
- Hansen, J.W. et al., 2006. Translating climate forecasts into agricultural terms: Advances and challenges. *Climate Research*, 33(1), pp.27–41.
- Hardisky, M., Klemas, V. & Smart, R., 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 49, pp.77–83.
- Hargreaves, G., 1971. Precipitation, dependability and potential for agricultural production in northeast Brazil. *EMBRAPA and Utah State Uni*, 74-D159, p.123.
- Haylock, M.R. et al., 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research*, 113(D20), p.D20119. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JD010201>.
- Hazeleger, W. et al., 2012. EC-Earth V2.2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate Dynamics*, 39(11), pp.2611–2629. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>.
- Heydari, M.M. et al., 2013. Comparison of Evapotranspiration Models for Estimating Reference Evapotranspiration in Arid Environment. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 15(9), pp.1331–1337.
- Heydari, M.M., Abbasi, A. & Heydari, M., 2015. Performance of Some Evapotranspiration Equations in an Arid Region. *Walailak Journal of Science and Technology*, 12(1), pp.95–109.
- Howden, S. et al., 2007. Adapting agriculture to climate change. *National Academy of Sciences, USA*, (104), pp.19691–19696.
- Huang, J. et al., 2016. Accelerated dryland expansion under climate change. , 6(February).
- Idso, S. et al., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol*, 24, pp.45–55.
- IPCC, 2007a. Climate change 2007. Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. , p.104.
- IPCC, 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M. L. Parry et al., eds., Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: [https://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-FrontMatterB\\_FINAL.pdf](https://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-FrontMatterB_FINAL.pdf) [Accessed September 8, 2015].
- Istanbulluoglu, A., 2009. Effects of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 96(12), pp.1792–1798.
- IUCN, 2010. IUCN-ESARO Drylands Situation Analysis. , (July), pp.1–53.
- Javier Sanchez San Roman, F., 2001. Evapotranspiración. , pp.1–7.
- Ji, L. & Peters, A., 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sens. Environ.*, 87(1), pp.85–98.

- Jones, C.D. et al., 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci. Model Dev.*, 4(3), pp.543–570. Available at: <http://www.geosci-model-dev.net/4/543/2011/>.
- Kaczmarek, Z. et al., 1996. *Water resources management in the face of climatic/hydrologic uncertainties*, Springer.
- Karamouz, M., Rasouli, K. & Nazif, S., 2009. Development of a hybrid index for drought prediction: case study. *J. Hydrol. Eng.*, 14(6), pp.617–627.
- Kashyap, P.S. & Panda, R.K., 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1), pp.9–25.
- Kassas, M., 2008. Aridity, Drought and Desertification. In M. Tolba & N. Saab, eds. *Arab environment: Future challenges*. Beirut, Lebanon: Published with Technical Publications and Environment & Development magazine, pp. 95–110.
- Keyantash, J.A. & Dracup, J.A., 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40(9).
- Kipkorir, E., Raes, D. & Massawe, B., 2002. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion. *Agricultural Water Management*, 56, pp.229–240.
- Kipkorir, E.C. & Raes, D., 2002. Transformation of yield response factor into Jensen ' s sensitivity index. *Irrigation and Drainage Systems 16: 47-52*, pp.47–52. Available at: <http://www.springerlink.com/index/B9RKV56X8E5HRNKK.pdf>.
- Kipkorir, E.C., Raes, D. & Massawe, B., 2002. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. *Agricultural Water Management*, 56(3), pp.229–240.
- Knutti, R. & Sedlacek, J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Clim. Change*, 3(4), pp.369–373. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1716>.
- Koutroulis, A.G., Vrohidou, A.-E.K. & Tsanis, I.K., 2011. Spatiotemporal Characteristics of Meteorological Drought for the Island of Crete. *Journal of Hydrometeorology*, 12(2), pp.206–226. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JHM1252.1>.
- Kumar, K.K., Kumar, K.R. & Rakhecha, P.R., 1987. Comparison of Penman and Thornthwaite methods of estimating potential evapotranspiration for Indian conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(3), pp.140–146.
- Kuslu, Y. et al., 2010. Determining water-yield relationship, water use efficiency, seasonal crop and pan coefficients for alfalfa in a semiarid region with high altitude. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16(4), pp.482–492.
- Lang, W.T., 1920. *Verwitterung und Bodenbildung als Einfuehrung in de Bodenkunde*: Stuttgart.
- Leander, R. & Buishand, T.A., 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332(3), pp.487–496.
- Lesk, C., Rowhani, P. & Ramankutty, N., 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), pp.84–87. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nature16467>.
- Liang, G., 1982. Net radiation, potential and actual evapotranspiration in Austria. *Archives*

- for *Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B*, 31(4), pp.379–390.
- Lovelli, S. et al., 2007. Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. *Agricultural Water Management*, 92(1-2), pp.73–80.
- Maestre, F.T., Salguero-Gómez, R. & Quero, J.L., 2012. It is getting hotter in here: determining and projecting the impacts of global environmental change on drylands. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 367(1606), pp.3062–3075. Available at: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/367/1606/3062.abstract>.
- Maliva, R. & Missimer, T., 2012. Arid Lands Water Evaluation and Management. *Arid Lands Water Evaluation and Management SE - 8*, (1948), p.1076. Available at: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_8).
- De Martonne, E., 1926. L' Indice d'aridité. *Bull. Assoc. Geogr. France*, 8.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. , (January), pp.17–22.
- Mckenney, M.S. & Rosenberg, N.J., 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. , 64, pp.81–110.
- McMahon, T. a. et al., 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4), pp.1331–1363.
- Mekonnen, M.M. & Hoekstra, A.Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. , (February), pp.1–7.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, pp.205–234.
- Moss, R. et al., 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*, Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change,.
- Moss, R.H. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), pp.747–756. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>.
- Moutonnet, P., Atomic, I. & Agency, E., 1983. Yield response factors of field crops to deficit irrigation. *Advances*, pp.11–15.
- Najarchi, M. et al., 2011. Determination of the yield response factor for field crop deficit irrigation. *African Journal of Agricultural Research*, 6(16), pp.3700–3705.
- Nakićenović, N. et al., 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. *Cambridge University Press*.
- Nardone, a. et al., 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130(1-3), pp.57–69. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>.
- Neely, C., Bunning, S. & Wilkes, A., 2009. *Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change*, Rome. Available at: [http://www.fao.org/uploads/media/LWdisc\\_paper8\\_temp.pdf](http://www.fao.org/uploads/media/LWdisc_paper8_temp.pdf).
- Niemeyer, S., 2008. New drought indices. , (80), pp.267–274.
- Oliveira, K.M.G. et al., 2013. FAO Penman-Monteith equation for reference evapotranspiration from missing data. *IDESIA*, 31(3), pp.39–48.

- Palmer, W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 21, pp.156–161.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. *Weather Bureau Research US Department of Commerce, Washington, DC.*, 45, p.58.
- Palutikof, J.P., Goodess, C.M. & Guo, X., 1994. Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the mediterranean basin. *International Journal of Climatology*, 14, pp.853–869.
- Papadopoulou, E. et al., 2003. Estimating Potential Evapotranspiration and Its Spatial Distribution in Greece Using Empirical Methods. *8th International Conference on Environmental Science and Technology*, (September), pp.8–10.
- Penman, H.L., 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193(1032), pp.120–145. Available at: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/193/1032/120.abstract>.
- Petit, R., Hampe, A. & Cheddadi, R., 2015. Climate Changes and Tree Phylogeography in the Mediterranean. *Taxon*, pp.877–885. Available at: [http://www.jstor.org/stable/25065474?origin=crossref&seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/25065474?origin=crossref&seq=1#page_scan_tab_contents) [Accessed September 8, 2015].
- Piani, C. et al., 2010. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395, pp.199–215.
- Popova, Z., Eneva, S. & Pereira, L.S., 2006. Model Validation, Crop Coefficients and Yield Response Factors for Maize Irrigation Scheduling based on Long-term Experiments. *Biosystems Engineering*, 95(1), pp.139–149.
- Rainy River Project, 2013. *PROJECTED CLIMATE CHANGE EFFECTS ON THE WATER BALANCE RAINY RIVER PROJECT Final Environmental Assessment Report*,
- Reyer, C.P.O. et al., 2013. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global change biology*, 19(1), pp.75–89. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3857548&tool=pmcentrez&rendertype=abstract> [Accessed August 14, 2015].
- Rosenzweig, C. et al., 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193), pp.353–357. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nature06937>.
- Rotstayn, L.D. et al., 2012. Aerosol- and greenhouse gas-induced changes in summer rainfall and circulation in the Australasian region: a study using single-forcing climate simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(14), pp.6377–6404. Available at: <http://www.atmos-chem-phys.net/12/6377/2012/>.
- Ruffault, J. et al., 2014. Projecting future drought in Mediterranean forests: bias correction of climate models matters! *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1-2), pp.113–122. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-013-0992-z>.
- Safriel, U.N., 2009. Status of Desertification in the Mediterranean Region. *Water Scarcity, Land Degradation and Desertification in the Mediterranean Region*, pp.33–73. Available at: <Go to ISI>://000267002300003.
- von Salzen, K. et al., 2013. The Canadian Fourth Generation Atmospheric Global Climate Model (CanAM4). Part I: Representation of Physical Processes. *Atmosphere-Ocean*, (January), pp.37–41.

- Schmidt, G.A. et al., 2006. Present-Day Atmospheric Simulations Using GISS ModelE: Comparison to In Situ, Satellite, and Reanalysis Data. *Journal of Climate*, 19(2), pp.153–192. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3612.1>.
- Sharma, M., Coulibaly, P. & Dibike, Y., 2010. Assessing the Need for Downscaling RCM Data for Hydrologic Impact Study. *Journal of Hydrologic Engineering, in press*. Available at: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000349](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000349).
- Singh, Y., Rao, S.S. & Regar, P.L., 2010. Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 97(7), pp.965–970. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.028>.
- Sohoulande Djebou, D.C., Singh, V.P. & Frauenfeld, O.W., 2015. Vegetation response to precipitation across the aridity gradient of the southwestern United states. *Journal of Arid Environments*, 115, pp.35–43. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196315000063>.
- Sousa, P.M. et al., 2011. Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(1), pp.33–51. Available at: <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/33/2011/>.
- Soussana, J.F., Graux, A.I. & Tubiello, F.N., 2010. Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *Journal of Experimental Botany*, 61(8), pp.2217–2228.
- Spinoni, J., 2010. *1961-90 High resolution temperature, precipitation and solar radiation climatologies for Italy*, Milano: UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI.
- Spinoni, J. et al., 2015. Journal of Hydrology : Regional Studies The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, pp.509–524. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.01.001>.
- Stadler, J.S., 2005. Aridity indexes. In *New Scientist*. p. 49.
- Stanhill, G., Lake, J. V & Rudd-Jones, D., 1985. The Water Resource for Agriculture [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 310(1144), pp.161–173. Available at: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/310/1144/161.abstract>.
- State of California, 2016. California Drought. Available at: <http://ca.gov/drought/> [Accessed January 12, 2016].
- Steduto, P. et al., 2012. *Crop yield response to water* FAO., Rome.
- Stevens, B. et al., 2013. Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), pp.146–172. Available at: <http://dx.doi.org/10.1002/jame.20015>.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), pp.485–498. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Terink, W. et al., 2009. Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model application to the Rhine basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(4), pp.5377–5413. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/5377/2009/>.
- Thom, H.C.S., 1958. A Note on the Gamma Distribution. *Monthly Weather Review*, 86(4), pp.117–122.



- Thornthwaite, C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), pp.55–94.
- Thornton, P.K. et al., 2009. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems*, 101(3), pp.113–127. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2009.05.002>.
- Trambouze, W., Bertuzzi, P. & Voltz, M., 1998. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3–4), pp.193–208. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192398000720>.
- Transeau, E.N., 1905. Forest centers of eastern America. *Amer. Naturalist*, 39, pp.875–889.
- Tsakiris, G. et al., 2007. Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component]. In A. Iglesias, M. Moneo, & A. López-Francos, eds. *Drought management guidelines technical annex*. Zaragoza : CIHEAM / EC MEDA Water, pp. 85–102.
- Tsakiris, G. & Vangelis, H., 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), pp.3–11.
- Tsanis, I.K. & Daliakopoulos, I.N., 2014. *Historical evolution of dryland ecosystems. CASCADE Project Deliverable 2.1. CASCADE Report 04.*
- Tubiello, F.N., Soussana, J.-F. & Howden, S.M., 2007. Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50), pp.19686–19690.
- Turc, L., 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron*, 12, pp.13–49.
- UCI, 2016. The Global Integrated Drought Monitoring and Prediction System (GIDMaPS). *University of California*. Available at: <http://drought.eng.uci.edu/> [Accessed November 1, 2016].
- UNEP, 1992. *World Atlas of Desertification*. A. Edward, ed., London, UK.
- UNESCO, 1977. *Map of the world distribution of arid regions Explanatory note MAB Technical Notes 7*, Paris.
- UNFCCC, 2015. United nations conference on climate change. COP21/CMP11.
- UNFCCC, 1992. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. , 62220.
- Vicente-Serrano, S., Begueria, S. & Lopez-Moreno, J., 2009. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming : The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, pp.1696–1718.
- Voldoire, A. et al., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9-10), pp.2091–2121. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>.
- Vrochidou, a.-E.K. et al., 2013. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. *Journal of Hydrology*, 476, pp.290–301. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169412009468>.
- Vuuren, D.P. et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), pp.5–31. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0148-z> [Accessed August 6, 2013].

- Waggoner, P., 1989. Anticipating the frequency distribution of precipitation if climate change alters its mean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 47(2-4), pp.321–337.
- Wang, L. & Qu, J., 2001. A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophys. Res. Lett*, 34(20), p.L20405.
- Watanabe, S. et al., 2011. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, 4(4), pp.845–872. Available at: <http://www.geosci-model-dev.net/4/845/2011/>.
- Wilhite, D.A. ed., 2005. *Drought and Water Crises, Science, Technology and management Issues*, CRC Press.
- WMO, 1992. *International Meteorological Vocabulary* 2d ed., World Meteorological Organization.
- WMO, 2012. *Standardized Precipitation Index User Guide*, World Meteorological Organization. Available at: [http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice\\_display&id=13682](http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=13682).
- Wood, A. et al., 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62, pp.189–216.
- WRI, 2016. World Resources Institute. Available at: <http://www.wri.org/blog/2015/06/global-tour-7-recent-droughts> [Accessed January 12, 2016].
- Xu, C.Y. & Singh, V.P., 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16(3), pp.197–219.
- Xystrakis, F. & Matzarakis, A., 2011. Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(4), pp.211–222.
- Yevjevich, V., 1967. *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic driughts*, Fort Collins Colorado: Hydrology Papers, Colorado State University.
- Zargar, A. et al., 2011. A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), pp.333–349.
- Zhixin, H.A.O. et al., 2010. 1876 – 1878 severe drought in North China : Facts , impacts and. , 55(26), pp.3001–3007.
- Σακκας, Ι., 2004. *Τεχνική Υδρολογία Τομος 1* Δευτερη έκ., Θεσσαλονίκη: Αϊβαζι.
- Τσακίρης, Γ., 1995. *Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*, Αθήνα: Συμμετρία.

## Acknowledgements

1. We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) and the data providers in the ECA&D project (<http://www.ecad.eu>)
2. We acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Coupled Modelling, which is responsible for CMIP, and we thank the climate modeling groups (listed in Table 3.3 of this report) for producing and making available their model output.

For CMIP the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison provides coordinating support and led development of software infrastructure in partnership with the Global Organization for Earth System Science Portals.