



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΧΩΡΟΧΡΟΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ
ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΞΗΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ
ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ SPI ΚΑΙ SPEI*

Εκπόνηση εργασίας: Πούλιου Βασιλική (Α.Μ: 2013050047)

Επιβλέπων καθηγητής: Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Χανιά, 2018

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ν. Παρανυχιανάκη για την άψογη συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθειά του για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και την οικογένειά μου για την συνεχή στηριξή της όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η ξηρασία αποτελεί αδιαμφισβήτητα ένα πολύπλοκο και πολυπαραγοντικό φαινόμενο, το οποίο εμφανίστηκε έντονα τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο και συνδέεται με σημαντικές επιπτώσεις σε πολλούς τομείς και ιδιαίτερα σε αυτόν της αγροτικής παραγωγής. Η περιοχή της Μεσογείου αντιμετωπίζει συχνά φαινόμενα ξηρασίας και θεωρείται ως μία από τις περισσότερο ‘ευπαθείς’ περιοχές, όσον αφορά στις μελλοντικές ακραίες συνθήκες βροχοπτώσεων, εφόσον βρίσκεται στη μεταβατική ζώνη, ανάμεσα στη Βόρειο Αφρική και τη Νότια Ευρώπη. Για αυτούς τους λόγους, ο προβληματισμός για την κατανόηση της ξηρασίας, τη μείωση των πιθανών κινδύνων που ελοχεύει αλλά και την προσαρμογή του σύγχρονου ανθρώπου σε μελλοντικά ενδεχόμενα φαινόμενα, απασχολεί όλο και πιο έντονα την επιστημονική κοινότητα. Επιπλέον, ο συνδυασμός φαινομένων καύσωνα και ξηρασίας μπορεί να ενισχύσει τη σοβαρότητα της κατάστασης, όπως εξηγείται. Στο πλαίσιο αυτό, με στόχο την παρακολούθηση και ταυτοποίηση του φαινομένου της ξηρασίας, δίνεται έμφαση στη χρήση και αξιολόγηση των κατάλληλων δεικτών ξηρασίας, καθένας από τους οποίους υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη μία ή και περισσότερες μετεωρολογικές παραμέτρους. Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται ο τρόπος ανταπόκρισης των δεικτών SPI και SPEI στη μεταβολή των φαινομένων ξηρασίας, σε επιλεγμένες περιοχές της Κρήτης. Για τον υπολογισμό των δεικτών, χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο 2006-2017

και με τη χρήση του στατιστικού πακέτου 'R' SPEI, διεξήχθησαν διαγράμματα απεικόνισης της κλιματικής μεταβλητότητας για χρονικές κλίμακες 1, 3 και 12 μηνών για τις περιοχές των Χανίων, Παλαιόχωρας, Ρεθύμνου, Ηρακλείου, Μοιρών, Αγίου Νικολάου, Ιεράπετρας και Σητείας. Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα πραγματοποιήθηκαν γραφήματα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας του μέσου όρου των ετών 2011-2017, για κάθε μία περιοχή, με στόχο την εκτενέστερη εξήγηση ξηρών ή υγρών περιόδων. Τα αποτελέσματα των χρονοσειρών SPI και SPEI, παρατίθενται στη συνέχεια, παρουσιάζοντας ομοιότητες και διαφορές στον τρόπο αντίδρασης των δύο δεικτών. Οι δύο δείκτες εμφανίζουν να συμβαδίζουν αρκετά, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να θεωρούνται και οι δύο κατάλληλοι για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών μιας ξηρασίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις βέβαια, ο δείκτης SPEI είναι πιο αντιπροσωπευτικός, καθώς μπορεί να ανταποκριθεί στις περιπτώσεις αυξημένης θερμοκρασίας, επισημαίνοντας τον καθοριστικό ρόλο της εξατμισοδιαπνοής. Συνολικά, από τα αποτελέσματα, τα τελευταία έτη, τεκμηριώνεται μία τάση αυξημένης έντασης γεγονότων ξηρασίας, γεγονός ιδιαίτερα ανησυχητικό ως προς τη μείωση των αποθεμάτων των διαθέσιμων υδάτινων πόρων (αποθήκευση στο έδαφος και διαθεσιμότητα υδατικών πόρων). Τα ευρήματα αυτά κρούουν τον κώδωνα κινδύνου για τη λήψη των κατάλληλων μέτρων μείωσης των πιθανών επιπτώσεων της ξηρασίας στην γεωργική παραγωγή, τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους, και γενικότερα την ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων με μεθόδους διαχείρισης και προσαρμογής στα καινούρια κλιματικά δεδομένα.

Abstract

Droughts constitute, arguably, a complicated phenomenon that depends on a wide range of factors and appeared in the last decades very intensely and globally. It is related to many dramatic effects in many fields and especially in the field of agriculture. The Mediterranean countries face drought events very often and they could be called as the most drought-vulnerable areas, in the matter of future extreme rainfall events, due to the transitional zone that own, between North Africa and South Europe. For these reasons, the interest of deeper understanding drought events, the decrease of potential dangers that may be occurred as well as the adaptation of people in future potential events, are undoubtedly some of the most critical issues that concern the scientific society. Additionally, the combination of heatwaves and droughts could intensify the severity of impacts. In an effort to monitor and identify a drought event, we emphasize in the use of drought indices. Drought indices could be estimated based on more than one meteorological variables. In the present study, we examine the respond of SPEI and SPI indices to the variability of drought events that have occurred in 8 areas of Crete in 2006-2017 period. For the calculation of drought indices, we used monthly rainfall and temperature data for the aforementioned period. The climate variability figures conducted with the use of statistical 'R' SPEI package, for 1, 3, 12-month timescales in the regions of Chania, Palaiochora, Heraklion, Moires, Agios Nikolaos, Rethimnon, Ierapetra and Siteia. According to the data, the figures of the average of rainfall and temperature for each region during the period of 2011-2017, were carried out for the purpose of better understanding of dry and wet periods. The results of the timescales depict similarities and also differences in

the way that SPI and SPEI react under special circumstances. SPI consistent with the SPEI considerably, without significant differences between them and can be appropriate for the estimation of the drought's characteristics. The advantage of SPEI to respond in the temperature variability in different regions and to note the important role of evapotranspiration, make it more representative under climate conditions in which high variability of temperature dominates. Generally, in accordance with the results, last years, there is an increased trend in the frequency of drought events, which is very alarming as regards the expected deficit of available water resources (storages of surface water and ground water). It is critical for all drought-prone nations to take steps in decision-making process in drought risk management, to reduce vulnerability to agricultural drought and generally, to enhance the resilience of the ecosystems in terms of the new climatic conditions.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<i>ΑΦΙΕΡΩΣΗ.....</i>	<i>2</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>3</i>
<i>Abstract.....</i>	<i>5</i>
<i>1. Εισαγωγή</i>	<i>8</i>
<i>1.1.α Κλιματική αλλαγή και Συχνότητα, Ένταση Διάρκεια Γεγονότων Ξηρασίας.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.β Κλιματική αλλαγή και Συχνότητα, Ένταση Διάρκεια Γεγονότων Καύσωνα</i>	<i>21</i>
<i>1.2 Ρόλος των δεικτών στη μελέτη των φαινομένων ξηρασίας</i>	<i>25</i>
<i>1.3 Αντικείμενα και Σκοπός της Εργασίας.....</i>	<i>33</i>
<i>2. Μεθοδολογία</i>	<i>35</i>
<i>3. Αποτελέσματα και συζήτηση</i>	<i>42</i>
<i>3.1 Διαγράμματα μεταβολής δείκτη SPI στο χρονικό διάστημα 2006-2018 σε περιοχές της Κρήτης</i>	<i>42</i>
<i>3.2 Μεταβολή δείκτη SPEI στο χρονικό διάστημα 2006-2018 σε περιοχές της Κρήτης</i>	<i>60</i>
<i>4. Συζήτηση.....</i>	<i>75</i>
<i>4.1 Μέτρα διαχείρισης των συνεπειών των φαινομένων ξηρασίας</i>	<i>81</i>
<i>Συμπεράσματα</i>	<i>86</i>
<i>6. Βιβλιογραφία</i>	<i>89</i>

1. Εισαγωγή

Το κλίμα αποτελεί ένα μεταβαλλόμενο φαινόμενο. Καθορίζεται από την ταξινόμηση κατά Köppen, που υιοθετεί διαφορετικές κλιματικές ζώνες με βάση τη βλάστηση κάθε περιοχής, ενώ οι παράγοντες που συμβάλλουν στη μεταβλητότητα του κλίματος από τόπο σε τόπο, είναι το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, το ανάγλυφο και η φυτοκάλυψη του εδάφους, η κατανομή των αέριων μαζών και η γειτνίαση ξηράς και θάλασσας.

Η κλιματική μεταβλητότητα, αποτελεί μια κατάσταση του κλίματος, η οποία χαρακτηρίζεται από αλλαγές στο μέσο όρο και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων της, και η οποία επιμένει για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο, συνήθως δεκαετίες ή περισσότερο (Δαλέζιος, 2015). Συμπεριλαμβάνει αλλαγές των ιδιοτήτων του κλίματος με την πάροδο του χρόνου, όπως της θερμοκρασίας και της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, της συχνότητας και της έντασης των κατακρημνίσεων, της ταχύτητας των ανέμων και άλλων μετεωρολογικών χαρακτηριστικών. Οι ιδιότητες του κλίματος αλληλοεπιδρούν με τον άνθρωπο σε ατομικό, κοινωνικό και πολιτικό επίπεδο (Δαλέζιος, 2015). Για αυτό το λόγο, η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ κλίματος και ανθρώπου, κρίνεται μεγάλης σημασίας με σκοπό την ομαλή διακύμανση της ζωής του σε κάθε πλαίσιο. Η κλιματική αλλαγή συνοδεύεται από πολύπλευρες συνέπειες και ακραία καιρικά φαινόμενα. Μερικές από

αυτές αποτελούν, η καταστροφή της χλωρίδας και της πανίδας, η διαταραχή του υδρολογικού κύκλου και της τροφικής αλυσίδας με σοβαρό αντίκτυπο στην υγεία και το βιοτικό επίπεδο του ανθρώπου. Πιο περίπλοκα φαινόμενα, αποτελούν η ξηρασία και τα κύματα καύσωνα, για τα οποία δεν υπάρχει σταθερή αιτία πρόκλησής τους, αλλά πλήττουν ολόένα και περισσότερες περιοχές του πλανήτη. Τα φαινόμενα αυτά, αποδεικνύεται, από επιστημονικές μελέτες, ότι οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ανθρώπινη δραστηριότητα μέσω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου που συνεισφέρει στο φαινόμενο της πλανητικής θέρμανσης. Ακολούθως, η πλανητική θέρμανση είναι συνυφασμένη με την αύξηση του υετού και του περιεχομένου των υδρατμών της ατμόσφαιρας, την αύξηση της περιεχόμενης θερμότητας των ωκεανών και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, τη μείωση της έκτασης παγετώνων και χιονοκάλυψης, τον περιορισμό των εποχών πάγου σε λίμνες και ποτάμια, και τη συστηματική μείωση του εαρινού και θερινού πάγου στις αρκτικές περιοχές (Δαλέζιος, 2015). Τα τελευταία 150 χρόνια, έχει παρατηρηθεί μια αυξητική τάση της θερμοκρασίας ($0,5-2^{\circ}\text{C}$) (Jones and Moberg, 2003), ενώ, ανάλογα αποτελέσματα έχουν ληφθεί από μοντέλα πρόβλεψης του κλίματος τα οποία καταδεικνύουν εξίσου σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα (Solomon et al., 2007). Η αύξηση της θερμοκρασίας εκτιμάται ότι θα επιτείνει την ξηρασία και ταυτόχρονα τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε νερό για τη διατήρηση οικονομικά αποδεκτών αποδόσεων από τις καλλιέργειες (Vicente-Serrano et al., 2010). Πρόσφατη μελέτη για την περίοδο 2046-2065, αποδεικνύει με σαφήνεια τη δεδομένη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας κατά $2,5^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με το διάστημα 1961-1990 και καταδεικνύει ως πιο ευαίσθητες περιοχές τη Β.Ελλάδα και λιγότερο την

Πελλοποννήσο, τα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη. Ακόμη, προβλέπει μείωση του ύψους των βροχοπτώσεων στη Μεσόγειο κατά 14-22%, αύξηση των περιόδων καύσωνα ($> 35^{\circ}\text{C}$) κατά 10 ημέρες την περίοδο 2021-2050 και άνοδο της στάθμης της θάλασσας κατά 0.25-1m που επηρεάζει κυρίως ορισμένα νησιά, συμπεριλαμβανομένης και της Κρήτης (διαΝΕΟσις, 2017). Οι συνέπειες αυτής της κατάστασης είναι πολλές, καθώς πλήττουν όχι μόνο το φυσικό περιβάλλον, αλλά και την ελληνική οικονομία συνολικά.

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της εποχής είναι η διασφάλιση τροφίμων, στέγης και νερού με ταυτόχρονη αποφυγή ρύπανσης των υδάτων και της ατμόσφαιρας, υποβάθμισης των εδαφών, της βιοποικιλότητας και κατ'επέκταση του βιοτικού επιπέδου. Η αγροτική παραγωγή επηρεάζεται άμεσα από τη μεταβλητότητα του κλίματος, είτε θετικά είτε αρνητικά, ανάλογα με την τοποθεσία και το είδος των καλλιεργειών. Με αυτόν τον τρόπο, ενδέχεται να υπάρξουν επιπτώσεις στη χωρική κατανομή της παραγωγής, καθώς επίσης, όσον αφορά στις γεωργικές πρακτικές, μεταβολές στις απαιτήσεις αρδευτικού νερού, στις γεωργικές εισροές, στα λιπάσματα, στους ψεκασμούς κ.α. Έχει παρατηρηθεί στις Η.Π.Α ότι, η γεωργική παραγωγή είναι περισσότερο χωρικά συγκεντρωμένη τη σημερινή εποχή σε σχέση με το 1930, γεγονός που ενδέχεται να ενισχύσει τις ευαισθησίες στο γεωργικό τομέα. Η συγκεκριμένη επιστημονική μελέτη υποστηρίζει ότι, παρόλες τις πρωτοποριακές αλλαγές σε θέματα πρακτικών διαχείρισης της γεωργίας (ελεγχόμενη άρδευση), αυτή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές μεταβολές και εκτιμάται ότι μελλοντικά θα υπάρξει πιο ευάλωτη σε περιόδους ξηρασίας (Glotter and Elliott, 2016). Η θερμοκρασία, η

προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, το νερό και η διαθεσιμότητα θρεπτικών είναι οι κύριοι παράγοντες που γενικά καθορίζουν τη γεωργική παραγωγή. Έτσι, ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως ξηρασίες και καύσωνες με ταυτόχρονη προσβολή από έντομα που βρίσκονται σε έξαρση, τυφώνες και έντονες βροχοπτώσεις είναι δυνατόν να καταστούν αιτίες υποβάθμισης ή αποτυχίας σοδειάς για πολλές καλλιέργειες με σημαντικές επιπτώσεις στην παραγωγή τροφίμων, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των σιτηρών στις Μεσογειακές χώρες. Στην Κρήτη, καλλιέργειες, όπως ελιές, αμπέλια και οπωροφόρα δένδρα, είναι ιδιαίτερα σημαντικές και μπορούν να υποβαθμιστούν ή και να καταστραφούν από φαινόμενα, όπως χαλάζι και καταιγίδες. Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, οι επιπτώσεις σχετίζονται με τη συχνότητα αναπλήρωσης του νερού των εδαφών, τη διάβρωση των εδαφών, καθώς και τον περιορισμό της δυνατότητας αποκατάστασης των καλλιεργειών. Άλλωστε, είναι γνωστό ότι, το νερό που έχουν ανάγκη τα στερεά τεμαχίδια που περιλαμβάνονται στο έδαφος, απορροφάται από τις ρίζες και πρέπει περιοδικά να αναπληρώνεται από τη βροχή ή την άρδευση για την εξασφάλιση πετυχημένης παραγωγής (Θεοχάρης, “ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ”, Τ.Ε.Ι. Ηπείρου, Άρτα, 2012). Ακόμη, τα δασικά είδη επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή, είτε λόγω των πυρκαγιών εξαιτίας ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων είτε και λόγω μεταβολών στη γεωγραφική εξάπλωση κάποιων ειδών δένδρων (Δαλέζιος, 2015). Κρίνεται, λοιπόν απαραίτητη η προσαρμογή των γεωργών και η υιοθέτηση νέων πρακτικών διαχείρισης του εδάφους αλλά και των υδατικών πόρων που χρησιμοποιούνται προς άρδευση, κυρίως στις Μεσογειακές χώρες που χαρακτηρίζονται από λίγες βροχοπτώσεις και υψηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες, με στόχο την αειφόρο ανάπτυξη

της γεωργικής παραγωγής στα πλαίσια μεταβλητότητας του κλίματος στο μέλλον.

Η παρούσα διατριβή διαπραγματεύεται τη μεταβλητότητα του κλίματος σε βάθος χρόνου 12 ετών στη Νήσο της Κρήτης, βασιζόμενη σε δεδομένα συχνότητας και έντασης βροχοπτώσεων και σε δεδομένα θερμοκρασιών, συγκεκριμένων μετεωρολογικών σταθμών που καλύπτουν όλη την εκτεταμένη περιοχή. Ουσιαστικά, μελετώνται χαρακτηριστικά όπως, η διάρκεια, η συχνότητα και η ένταση του φαινομένου ξηρασίας, με τη βοήθεια κατάλληλων για την περιοχή δεικτών ξηρασίας, με σκοπό την καλύτερη εκτίμηση των αιτιών και των συνεπειών τους στον αγροτικό τομέα καθώς και τη σωστή διαχείριση αυτού του τομέα σε πιθανές παρόμοιες μελλοντικές συνθήκες.

1.1.α Κλιματική αλλαγή και Συχνότητα, Ένταση Διάρκεια

Γεγονότων Ξηρασίας

Το φαινόμενο της ξηρασίας είναι πολυσύνθετο, γεγονός που δυσχεραίνει την παρακολούθηση και κατανόησή του. Η ξηρασία αντικατοπτρίζει την έλλειψη υδάτινων πόρων, εξετάζεται σε βάθος μεγάλων χρονικών περιόδων και επιδρά σε πολλούς τομείς με κοινωνικοοικονομικό υπόβαθρο (Van Loon, 2015). Τα χαρακτηριστικά της ξηρασίας είναι αρκετά σημαντικά και βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της. Το πρώτο χαρακτηριστικό της είναι η ένταση της ξηρασίας, η οποία τις περισσότερες φορές αναφέρεται στη μείωση των βροχοπτώσεων και τη σημασία του ελλείμματός της. Το δεύτερο χαρακτηριστικό αφορά στη διάρκεια μιας ξηρασίας. Πιο ειδικά, μπορεί ένα γεγονός ξηρασίας να διαρκέσει μικρό χρονικό διάστημα, όπως μερικές εβδομάδες ή μήνες από τη στιγμή που είναι αντιληπτό το έλλειμμα βροχόπτωσης, όμως, είναι δυνατό να συνεχιστεί η διάρκειά της για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμη και έτη, λόγω των συνεπειών της στην περιοχή και σε συνδυασμό με τις χαμηλές τάσεις βροχοπτώσεων. Για παράδειγμα, όταν η έναρξη μιας ξηρής περιόδου συμβαίνει προς το τέλος του φθινοπώρου, συνεχίζοντας μέσα στο χειμώνα, το πιο πιθανό είναι να μην επιφέρει σημαντικές συνέπειες σε μία περιοχή. Παρόλα αυτά, εφόσον η περίοδος ξηρασίας επεκταθεί μέσα στην άνοιξη και τις αρχές καλοκαιριού, θα έχει δραματικές συνέπειες ως προς την αυξημένη ζήτηση νερού για την κάλυψη αγροτικών και αστικών αναγκών. Οι συνθήκες ξηρασίας που διαρκούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, περισσότερο από μία περίοδο παραγωγής, έχουν σαν αποτέλεσμα ραγδαία μείωση τόσο των επιφανειακών, όσο και των

υπόγειων αποθεμάτων νερού και συνολικά τη διαταραχή του υδρολογικού κύκλου (Karampatakis, 2018). Το τρίτο χαρακτηριστικό ενός φαινομένου ξηρασίας είναι η χωρική απεικόνιση, καθώς περιοχές που έχουν στο ιστορικό τους σοβαρές ξηρασίες, είναι περισσότερο ευαίσθητες σε μία νέα σοβαρή και μεγάλης διάρκειας ξηρασία (Karampatakis, 2018). Με αυτόν τον τρόπο, η παρατήρηση και ο έλεγχος ενός τέτοιου φαινομένου, είναι σημαντικό να διαμορφώνονται σε πολλαπλά χρονικά διαστήματα, καθώς τις περισσότερες φορές μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα από την άφιξη υδάτινων εισροών έως τη διαθεσιμότητα και εκμετάλλευσή τους από κάποιον διαθέσιμο πόρο (Kleist et al., 1993). Με αυτή τη λογική επίσης, η ξηρασία διακρίνεται σε 4 διαφορετικούς τύπους, τη μετεωρολογική (όταν ξηρές συνθήκες επικρατούν στην περιοχή, όπως αύξηση θερμοκρασίας, μείωση βροχοπτώσεων, μείωση υγρασίας εδάφους κ.α), η υδρολογική (όταν η μειωμένη παροχή νερού αποτυπώνεται σε χειμάρρους, πηγές, ταμιευτήρες, υπόγεια νερά), η αγροτική (μείωση σοδειάς) και η κοινωνικοοικονομική (τουριστικό αντίκτυπο, αύξηση ενεργειακών αναγκών, κ.α.) (NOAA, Definition of Drought). Οι χρήσιμοι υδάτινοι πόροι, συμπεριλαμβάνουν την υγρασία του εδάφους, την αποθήκευση του νερού της επιφανειακής απορροής και του υπόγειου, και το νερό που προέρχεται από τις χιονοπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, σε περίπτωση που η ζήτηση σε νερό υπερβαίνει τη διαθέσιμη παροχή του, κάποιος ή και περισσότεροι από τους παραπάνω υδάτινους πόρους βρίσκεται σε έλλειψη, γεγονός που αποτυπώνεται σε συγκεκριμένο διάστημα με ανάλογες συνέπειες είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε στους υπόγειους υδροφορείς. Για παράδειγμα, μία ξηρασία που πλήττει τον αγροτικό τομέα και συμπεριλαμβάνει ελλιπή υγρασία του εδάφους, προφανώς, εκδηλώνεται σε

αρκετά πιο σύντομο χρονικό διάστημα σε σχέση με μία υδρολογική ξηρασία (Kleist et al., 1993). Επομένως, η εξέταση μιας ξηρασίας βραχυπρόθεσμα (3 μήνες) συνδέεται με την υγρασία του εδάφους και την απελευθέρωση υδάτινων αποθεμάτων από πηγές ποταμών, σε χρονικό διάστημα περίπου 6-12 μήνες συνδέεται με μεταβολές σε φυσικά υδατικά συστήματα (λίμνες) ή τεχνητά συστήματα (φράγματα) αποθήκευσης νερού και σε μεγάλο χρονικό διάστημα (12-24 μήνες) με μεταβολές αποθήκευσης υπόγειου νερού.

Οι δείκτες ξηρασίας αποτελούν τα εργαλεία που συμπεριλαμβάνουν όλους αυτούς τους παράγοντες που καθορίζουν ένα φαινόμενο ξηρασίας και βοηθούν στην παρακολούθησή του και την κατανόησή του σε βάθος χρόνου.

Από τις διαθέσιμες έρευνες και δημοσιεύσεις σχετικά με την κλιματική αλλαγή και συγκεκριμένα το φαινόμενο της ξηρασίας, μπορούμε να αποφανθούμε ότι τις τελευταίες δεκαετίες (1990-2010), παρουσιάζονται συχνότερα μακρές περίοδοι καύσωνα (Kelley et al., 2017), σε περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου, των Η.Π.Α και στο Βορειοδυτικό κυρίως τμήμα της Κίνας.

Στις Η.Π.Α, στατιστική έρευνα που εστίασε στα φαινόμενα ξηρασίας και καύσωνα και τον τρόπο που αυτά συνδέονται για τα έτη 1960-2010, κατέληξε στο γεγονός ότι παρόλο που το διάστημα αυτό, δεν παρουσιάστηκε σημαντική τάση για φαινόμενα ξηρασίας μεμονομένα, η χρονική σύμπτωση ξηρασιών και κυμάτων καύσωνα έδειξε, εμφανώς, σημαντική αύξηση και συχνότητα (Mazdiyasni and AghaKouchak, 2015). Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι, η συνδυαστική δράση αυξημένης θερμοκρασίας και χαμηλών βροχοπτώσεων μπορεί να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα

και την κοινωνία, από ότι αν δρούσαν μεμονωμένα αυτά τα δύο μετεωρολογικά φαινόμενα. Ειδικότερα στη γεωργία, μία ξηρασία έχει σαν συνέπεια τη μείωση της παραγωγής των καλλιεργειών που στη συνέχεια μπορεί να συνοδευτούν από αύξηση των τιμών της παγκόσμιας αγοράς σε προϊόντα κατανάλωσης τροφής (Mazdiyasni and AghaKouchak, 2015). Η οικονομική δυσχέρεια αγοράς τροφίμων, έχει επίδραση στο βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων και συγκεκριμένα στην υγεία τους. Η οικονομική ζημία, παγκοσμίως, από φαινόμενα ξηρασίας αγγίζει τα $7 \times 10^9 \$$ με σοβαρές επιπτώσεις στην κτηνοτροφία, δυσχέρειες στη μεταφορά μέσω ποταμών, με δυσκολίες στην εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η υδροδυναμική και η βιοενέργεια, με αποτέλεσμα την αύξηση κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας (Mazdiyasni and AghaKouchak, 2015).

Επιπλέον, μελέτη προσομοίωσης της σύγχρονης γεωργίας σε συνθήκες ισχυρής ξηρασίας, όπως στην περίπτωση του Dust Bowl, το οποίο και συνέβη το 1930 στις Η.Π.Α, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αν και υπάρχουν βελτιώσεις στα γεωργικά μηχανήματα και στις εφαρμογές της γεωργίας, οι αποδόσεις των ετήσιων καλλιεργειών παραμένουν ακόμη αρκετά επιρρεπείς στην επικράτηση παρόμοιων φαινομένων. Η ύπαρξη ενός παρόμοιου γεγονότος, σήμερα, θα επιφέρει διαφορετικές επιπτώσεις και ταυτόχρονα αρκετά ζημιογόνες, μειώνοντας την παραγωγή κατά 50% σε σύγκριση με αυτής της περιόδου ξηρασίας του 2012 (Glatter and Elliott, 2016). Πιο αναλυτικά, το φαινόμενο Dust Bowl, στιγμάτισε την περιοχή των Η.Π.Α και κυρίως την παραγωγή των αγροτικών καλλιεργειών, με αποτέλεσμα ακόμη και η μερική αύξηση της θερμοκρασίας να αποτελεί απειλή για την περιοχή. Πρέπει να τονιστεί, ωστόσο, ότι οι επιπτώσεις της ξηρασίας εξαρτώνται από

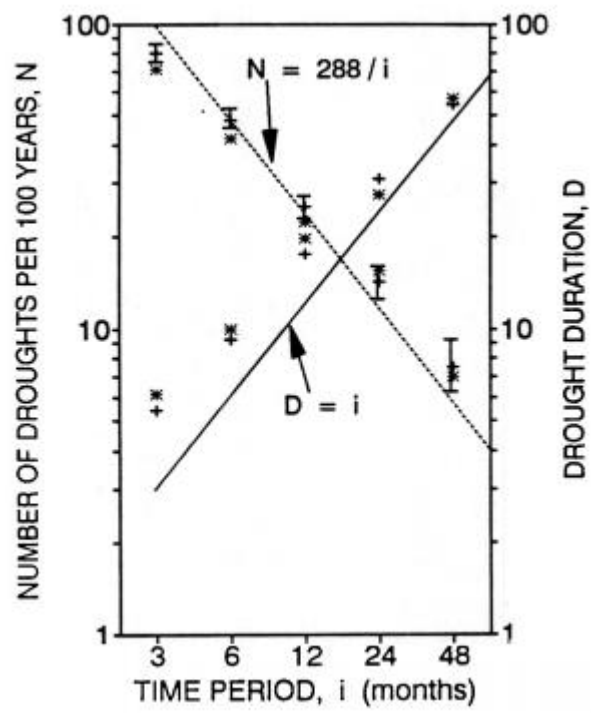
την τοποθεσία και τη χρονική στιγμή σε κάθε περίπτωση. Ακόμη, ο βαθμός ευαισθησίας και η ικανότητα επαναφοράς έπειτα από μια ξηρασία, εξαρτάται από τον τρόπο διαχείρισης και λειτουργίας των κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της περιοχής στο παρελθόν (Vicente-Serrano et al., 2018). Στη συγκεκριμένη μελέτη, αξιολογήθηκε η παραγωγή σόγιας, αραβόσιτου και σιταριού κατά τη διάρκεια των τριών περιόδων που καθόρισαν το Dust Bowl και οι οποίες έλαβαν χώρα τις χρονικές περιόδους 1930–31, 1933–34 και 1936. Έτσι, παρόλο που το 1934 πραγματοποιήθηκε πιο έντονη ξηρασία, το έτος 1936, θεωρήθηκε, πιο ζημιογόνο για τις καλλιέργειες. Το 1934, η αυξημένη βροχόπτωση τη σωστή χρονική στιγμή (Ιούλιο, που λαμβάνει χώρα η άνθηση και οι σοδειές είναι πιο ευαίσθητες στη ξηρασία) στις δυτικές πολιτείες της Αμερικής, βοήθησε ώστε να αποφευχθούν σημαντικές ζημιές στις καλλιέργειες σόγιας και αραβόσιτου, αλλά αποδείχθηκε σημαντικά ζημιογόνα για τους παραγωγούς σιταριού στις κεντρικές νοτιοδυτικές περιοχές των Η.Π.Α. (Glottter and Elliott, 2016).

Ακόμη ένα αξιοσημείωτο γεγονός ξηρασίας, που έλαβε χώρα στην περιοχή της Συρίας και διερευνήθηκε για διάρκεια τριών ετών (2007-2010), οδήγησε σε σοβαρές επιπτώσεις στη γεωργική παραγωγή. Στη δεδομένη περίπτωση, τα αίτια είναι πολύπλοκα και περιλαμβάνουν τόσο την ανθρώπινη επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον όσο και τη φυσική μεταβλητότητα. Ως κυριότερη αιτία σε αυτήν την περίπτωση αξιολογήθηκε η ανθρώπινη επίδραση. Αυτό οφείλεται σε μία σειρά γεγονότων που συμπεριλαμβάνει αποφάσεις της Συριακής κυβέρνησης, με σκοπό να κερδίσει την εύνοια των Σύριων που αφορούσε τη δημιουργία νέων αρδευτικών προγραμμάτων για την ανάπτυξη του αγροτικού τομέα,σε επιδοτήσεις σε καύσιμα για την τροφοδότηση νέων μηχανημάτων

γεωργίας και στην ανακατανομή γης, δίχως να λάβει υπόψη του την αυξημένη τάση της περιοχής σε φαινόμενα ξηρασίας την ελλειπή βροχόπτωση (βροχοπτώσεις στα 2/3 της Συρίας, κυρίως στο Βόρειο τμήμα και στις περιοχές των Μεσογειακών ακτών) και ταυτόχρονα τη μειωμένη διαθεσιμότητα αποθεμάτων νερού. Η κατάχρηση των αποθεμάτων υπόγειου νερού, οδήγησε σε ξήρανση του ποταμού Khabur, στην καταστροφή της βλάστησης και των καλλιεργειών σιταριού, και κατ'επέκταση στην πρόκληση σημαντικών διατροφικών ελλείψεων και ασθενειών σε άτομα μικρής κυρίως ηλικίας. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου, η ξαφνική απαίτηση σε πόρους, η υποβάθμιση της γεωργίας και της κτηνοτροφίας και η οικονομική αστάθεια δημιούργησαν ένα μεταναστευτικό 1,5 εκ. ανθρώπων στα αστικά κέντρα της Συρίας. Η ξαφνική αύξηση πληθυσμού επιδείνωσε τα ήδη σοβαρά κοινωνικά προβλήματα (φτώχεια, ανεργία, εγκληματικότητα, ανισότητα) και πιθανώς οδήγησε τελικά σε πόλεμο το 2011. Είναι προφανές ότι, η συγκεκριμένη ξηρασίαπροξένησε σοβαρές επιπτώσεις αν και οι δεκαετίες 1950, 1980 και 1990 χαρακτηρίστηκαν από έντονες βροχοπτώσεις, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας της περιοχής σε φαινόμενα ξηρασίας (Kelley et al., 2015).

Στην περιοχή της Ανατολικής Ασίας και συγκεκριμένα στην Κίνα, όπου το κλίμα και το έδαφος παρουσιάζουν μεγάλες χωρικές διαφοροποιήσεις, ένα φαινόμενο ξηρασίας το 2009, επηρέασε 157x103στρ καλλιεργειας, με σημαντική μείωση στην παραγωγή σιτηρών (Zhao et al.,2017). Την περίοδο 2009-2010 συνέβησαν ξηρασίες σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη ΒΔ Κίνα.

Με βάση τα κυριότερα χαρακτηριστικά μιας ξηρασίας (συχνότητα και διάρκεια) και με τη βοήθεια διαγραμμάτων που έχουν διεξαχθεί από έρευνες, φαίνεται ότι σε μακρές χρονικές περιόδους εξέτασης ξηρασίας, λόγω συσσωρευμένης έλλειψης υδάτινων πόρων, αυξάνεται η διάρκεια (χρονική περίοδος εξέτασης) και μειώνεται η συχνότητα (αριθμός των ξηρασιών). Το αντίθετο συμβαίνει, όμως, όσο μικρότερη είναι η χρονοπερίοδος, καθώς τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση που έχει κάθε μήνας που προστίθεται στο μέσο όρο των βροχοπτώσεων, άρα και ο δείκτης ξηρασίας που χρησιμοποιείται μεταβάλλεται ταχύτερα από τιμές ξηρών σε τιμές υγρών συνθηκών. Αυτό υποστηρίζεται από το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της διάρκειας ξηρασίας (D) και της χρονικής περιόδου (I) και του αριθμού των ξηρασιών (N) με βάση τη χρονική περίοδο εξέτασης της ξηρασίας. Έτσι, η διακεκομμένη γραμμή συμφωνεί με τη σχέση $N = \frac{C}{I}$ και η μαύρη γραμμή συμφωνεί με τη σχέση $D \approx I$ (Mckee et al., 1993).



Γραφήμα 1: Σχέση συχνότητας και διάρκειας ξηρασίας (McKee et al., 1993).

1.1.β Κλιματική αλλαγή και Συχνότητα, Ένταση

Διάρκεια Γεγονότων Καύσωνα

Ο καύσωνας ή αλλιώς το κύμα καύσωνα είναι ένα ακραίο μετεωρολογικό φαινόμενο, το οποίο χαρακτηρίζεται από ασυνήθιστα υψηλή θερμοκρασία με διάρκεια μεγαλύτερη των 2 ημερών. Μια περιοχή, θεωρείται ότι πλήττεται από καύσωνα, όταν οι θερμοκρασίες είναι υπερβολικά υψηλότερες σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία που έχει επικρατήσει στο παρελθόν. Με αυτόν τον τρόπο, επικρατεί ετερογένεια, αναλόγως το ιστορικό θερμοκρασιών κάθε περιοχής. Ένα ακραίο κύμα καύσωνα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις τόσο την κοινωνία όσο και το περιβάλλον, με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στην ποιότητα της ατμόσφαιρας και την πρωτογενή παραγωγή (Mazdiasni and AghaKouchak, 2015).

Στην Ευρώπη και ειδικότερα στη Γαλλία, ένα ασυνήθιστο κύμα καύσωνα, το 2003, προκάλεσε το θάνατο 15.000 ανθρώπων. Το φαινόμενο έλαβε χώρα στις αρχές Αυγούστου, με διάρκεια 8 ημερών και η θερμοκρασία ξεπέρασε τους 40°C. Οι συνέπειες ήταν δραματικές, όπως η αύξηση συγκεντρώσεων όζοντος, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η αύξηση των πυρκαγιών και ταυτόχρονα

την οικονομική εξασθένιση, η απώλεια νερού μέσω της αυξημένης ET, η χαμηλή παραγωγή σιτηρών και άλλων προϊόντων, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και τέλος για τον άνθρωπο η πρόκληση καρδιοαναπνευστικών κυρίως προβλημάτων υγείας. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν πρωτοφανή και δυσβάσταχτα για την κοινωνία της Γαλλίας, καθώς το γεγονός ότι επικρατούσε ήδη περίοδος ξηρασίας στην περιοχή, δυσχέρυνε την κατάσταση (Mazdiyasni and AghaKouchak, 2015).

Στις Η.Π.Α, και κυρίως στις νοτιοδυτικές ακτές της Αμερικής συμβαίνουν αρκετά συχνά φαινόμενα καύσωνα. Για παράδειγμα, στα τέλη Ιουνίου του 2012, ένα σοβαρό κύμα καύσωνα προκλήθηκε από ένα υψηλό σύστημα πίεσης, που μετακινήθηκε από το Μεξικό. Στη συνέχεια, καθώς αυξανόταν, εγκαταστάθηκε ανάμεσα στις GreatPlains, που βρίσκονται στο δυτικό τμήμα της (NOAA, 2013). Παρόμοιο γεγονός, έλαβε χώρα πρόσφατα τον Ιούνιο του 2017, το οποίο και διήρκησε μία εβδομάδα στις ΝΔ πολιτείες των Η.Π.Α, κατά το οποίο η θερμοκρασία έφθασε τους 51°C στην περιοχή της Καλιφόρνια, ενώ στα τέλη του φαινομένου θερμές μάζες αέρα μετατοπίστηκαν προς τα βορειοδυτικά τμήματα, πλήττοντας την πόλη της Washington με θερμοκρασία 53°C , προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις (diLiberto, 2017). Παρόλα αυτά, κύματα καύσωνα παρατηρήθηκαν και στα ανατολικά των Η.Π.Α στα τέλη Φεβρουαρίου του 2018 με διάρκεια δύο ημερών και θερμοκρασίες που άγγιξαν τους 27°C στην πόλη του Charleston, ενώ ταυτόχρονα οι δυτικές περιοχές παρουσίαζαν θερμοκρασίες μέχρι και 10°C (4°C υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με παρόμοιο προηγούμενο φαινόμενο) (diLiberto, 2018). Ο λόγος πρόκλησης του φαινομένου ήταν, ένα πολύ ισχυρό και υψηλής ταχύτητας κύμα ανέμου, που μετέφερε θερμότητα

από τα νότια προς τα βόρεια και ανατολικά τμήματα και αντίθετα ψύχρανε τη δυτική πλευρά των Η.Π.Α.

Η Ινδία, αν και συνηθισμένη σε υψηλές θερμοκρασίες, πρόσφατα, αντιμετώπισε κύμα καύσωνα, που κατατάσσεται από το ινστιτούτο έρευνας επιδημιολογίας των φυσικών καταστροφών EM-DAT, ως ένα από τα 5 πιο θανατηφόρα στην παγκόσμια ιστορία. Συγκεκριμένα, η διάρκειά του ήταν 6 ημέρες και σε συνδυασμό με υψηλή υγρασία προκάλεσε τοθάνατο 2.300 ανθρώπων, οι περισσότεροι εκ των οποίων ήταν ηλικιωμένοι και παιδιά. Προβλέψεις ερευνητών, αποδεικνύουν ότι τα φαινόμενα καύσωνα θα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια, συχνότητα και ένταση στη χώρα της Ινδίας. Επίσης, κατά το τέλος του 21^{ου} αιώνα, πιθανολογείται διπλασιασμός στη συχνότητα πρόκλησης ακραίων θερμοκρασιών, γεγονός που στηρίζεται στη συσσώρευση υψηλών συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Όσον αφορά στις Μεσογειακές χώρες, αυτές πλήττονται, την τελευταία δεκαετία, από ισχυρούς καύσωνες, καθώς η μεταβολή της θερμοκρασίας και η ανακατανομή των βροχοπτώσεων τις καθιστούν ιδιαίτερα επιρρεπείς στην ανάπτυξη ανάλογων φαινομένων. Με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, το διάστημα 2001-2016 όλοι οι θερινοί μήνες στην Αθήνα εμφάνισαν μέσες θερμοκρασίες υψηλότερες από το μέσο όρο των καλοκαιριών των ετών 1961-1990. Στην Ανατολική πλευρά της Μεσογείου, η θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά 4° C, γεγονός αρκετά ανησυχητικό για το μέλλον, εάν λάβουμε υπόψη ότι, παγκοσμίως, η μέση αύξηση θερμοκρασίας είναι 1°C (Ζερέφος, 2017). Βάσει του μεσογειακού κλίματος, παρατηρείται έλλειψη βροχοπτώσεων κατά τους θερινούς μήνες, με

αποτέλεσμα, να παρατηρούνται φαινόμενα έλλειψης νερού λόγω ανακατανομής των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Στην Ελλάδα, οι θερινοί μήνες της τελευταίας δεκαετίας 2007-2017, χαρακτηρίζονται ως οι πιο θερμοί σε σχέση με μετρήσεις που έχουν καταγραφεί από το 1860. Ένα από τα πιο σοβαρά κρούσματα καύσωνα, ήταν αυτό του Ιουλίου και Αυγούστου του 2007 που σε συνδυασμό με τους ισχυρούς ανέμους, προξένησε πολλές πυρκαγιές στον Ελλαδικό χώρο. Συμπερασματικά, στην ανατολική Μεσόγειο, είναι επιστημονικά τεκμηριωμένο, ότι ο ρυθμός και η διάρκεια των καυσώνων έχει αυξηθεί δραματικά, τα τελευταία 15 χρόνια. Η Κρήτη και ιδιαίτερα η πόλη του Ηρακλείου, προβλέπεται ότι είναι μία από τις μεγαλουπόλεις της Ελλάδας, που κινδυνεύει από συχνά κύματα καύσωνα και ό,τι αυτό συνεπάγεται. Η Νήσος Κρήτη, έχει το πλεονέκτημα της θαλάσσιας αύρας και σε μερικές περιοχές, κυρίως των Χανίων, συγκεντρώνει σημαντική ποσότητα πράσινου. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, αποτελούν, αδιαμφισβήτητα, φυσικά κλιματιστικά σε περιόδους καύσωνα (Σανταμούρης, 2017).

1.2 Ρόλος των δεικτών στη μελέτη των φαινομένων

ξηρασίας

Οι δείκτες ξηρασίας κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο και την ευκολία χρήσης τους σε μετεωρολογικούς (AAI, SPI, EDI), υγρασίας εδάφους (SMA, ETDI, SMDI), υδρολογικούς (SDI, PHDI, ADI), τηλεανίχνευσης (EVI, TCI, NDVI), μικτούς ή πρότυπους (CDI, MSDI, GLDAS) (Handbook of Drought Indicators and Indices, 2016). Για την επιλογή των κατάλληλων δεικτών σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται, έρευνα και αναλυτική προσέγγιση, για την τελική απόφαση. Πιο αναλυτικά, με σκοπό να βρεθεί ο δείκτης που ταιριάζει σε βέλτιστο βαθμό με τον τύπο κλίματος της περιοχής, τη θέση και τη χρονική περίπτωση, τίθενται ερωτήματα που σχετίζονται με την καταλληλότητα και τη σταθερότητα των διαθέσιμων δεδομένων, με το κλίμα και το χωρόχρονο, για την κατανόηση της έναρξης και της λήξης του φαινομένου και την ικανότητα μακροπρόθεσμης παρακολούθησης του φαινομένου. Συνήθως, επιλέγονται παραπάνω του ενός δείκτες για τον προσδιορισμό του φαινομένου. Σε γενικό βαθμό, ένας δείκτης θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε πλήθος περιοχών και με αντικειμενικότητα στις εκάστοτε συνθήκες ξηρασίας, καθώς και να παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισής του στις εκάστοτε περιοχές εφαρμογής του (Mckee et al., 1993).

Για τη βελτίωση του βαθμού ακρίβειας των δεικτών ξηρασίας, οι επιστήμονες κατέταξαν την ξηρασία σε 4 βασικά επίπεδα (καθόλου, ήπια, μέση και σοβαρή ξηρασία), βασιζόμενοι στην υγρασία του εδάφους, με στόχο την εκτίμηση της χωρικής κατανομής και της παροδικής διαφοροποίησής της στην περιοχή. Πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της διάρκειας των διαφορετικών επιπέδων ξηρασίας και της συχνότητας τους στο διάστημα 1982-2010 και διαπιστώθηκε, ότι εξαιτίας της αχανούς ερήμου στο ΒΔ τμήμα της Κίνας, το ποσοστό συχνότητας ξηρασίας φτάνει το 80%, ενώ μικρότερο του 20% διαπιστώθηκε στα νοτιότερα και βορειότερα τμήματά της. Με τη χρήση των δεικτών ξηρασίας mTVDI, TVDI, αποδείχτηκε και πάλι ότι η συχνότητα σοβαρών ξηρασιών το διάστημα 1999-2010 αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς καθώς και ότι το διάστημα 2000-2012 υπήρξε σημαντική ανοδική τάση σοβαρών ξηρασιών, κατά 4,86%. Ο δείκτης mTVDI λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες υψομέτρου, που παίζει καθοριστικό ρόλο σε περιοχές μεγάλης έκτασης (Zhao et al., 2017).

Η λεκάνη της Μεσογείου είναι μια ιδιαίτερα ευαίσθητη ζώνη στην κλιματική αλλαγή, καθώς αποτελεί το σύνορο της εύκρατης ζώνης με το πιο ζεστό κλίμα της Αφρικής (Ελαφρός, 2017). Συγκεκριμένα, η νήσος της Κρήτης παρουσιάζεται αρκετά ευάλωτη απέναντι σε ακραία καιρικά φαινόμενα, γεγονός πολύ ανησυχητικό κυρίως για τον αγροτικό τομέα και χρήζει προσεκτικής αξιολόγησης για τη λήψη αναγκαίων μέτρων προστασίας. Η μείωση της υγρασίας του εδάφους μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας επηρεάζει αδιαμφισβήτητα τις καλλιέργειες. Μελέτες προσομοίωσης έχουν δείξει ότι κινδυνεύουν να υποβαθμιστούν μεγάλες εκτάσεις καλλιεργήσιμης γης, κυρίως στις ανατολικές και νότιες περιοχές της Κρήτης.

1.2α Οι δείκτες ξηρασίας SPI και SPEI

Με τη βοήθεια των δεικτών ξηρασίας δίνεται η δυνατότητα, βελτιωμένης παρακολούθησης, έγκυρης προειδοποίησης και προστασίας των ακραίων γεγονότων ξηρασίας. Οι δείκτες ξηρασίας παρέχουν επιλογές αναγνώρισης της σοβαρότητας, της τοποθεσίας, της χρονικής διάρκειας καθώς και της χρονικής στιγμής που ξεκινά και διακόπτεται, προσεγγιστικά, μια ξηρασία. Το γεγονός ότι οι ξηρασίες κάνουν έντονη την παρουσία τους με σοβαρές επιπτώσεις σε σημαντικά αργό χρονικό διάστημα, παρέχει τη δυνατότητα σημαντικού ελέγχου των βροχοπτώσεων, της υγρασίας του εδάφους, της θερμοκρασίας σε μία περιοχή. Ίσως, είναι τα μόνα φαινόμενα, τα οποία αφήνουν τόσα ίχνη πριν από την «επίθεση» τους, με διακυμάνσεις των υδρομετεωρολογικών παραγόντων από τους οποίους εξαρτώνται, προειδοποιώντας, έτσι, τον άνθρωπο με στόχο την ελαχιστοποίηση των πιθανών επιπτώσεων, μέσω κατάλληλων πλάνων διαχείρισης.

Όπως, προαναφέρθηκε, η ξηρασία είναι ένα φαινόμενο που εντοπίζεται σε βάθος χρόνου με την ένδειξη συσσωρευμένης έλλειψης νερού. Με αυτό το σκοπό, ίσως το πιο καθοριστικό στοιχείο ενός δείκτη, είναι η ικανότητα υπολογισμού του σε πολλαπλά χρονικά περιθώρια, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο μια μακροσκοπική διάσταση των συνεπειών μίας ξηρασίας σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων (Angelidis et al., 2012). Ο

δείκτης SPI είναι πολύ εύχρηστος, καθώς έχει το παραπάνω πλεονέκτημα (Van der Schrier et al, 2018). Για παράδειγμα, τιμές του δείκτη για 6 μήνες ή και λιγότερο, είναι χρήσιμες για τον έλεγχο των επιπτώσεων του φαινομένου στη γεωργία, ενώ τιμές του για 1 χρόνο ή και περισσότερο, για την παρατήρηση των υδρολογικών επιπτώσεων. και το μοναδικό κριτήριο χρήσης του είναι η βροχόπτωση. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι η βροχόπτωση αποτελεί κύριο παράγοντα καθορισμού έναρξης, διάρκειας, έντασης και λήξης ξηρασίας (Mckee et al., 1993). Βάσει αυτού και με δεδομένο ότι, ο δείκτης SPI βασίζεται για τον υπολογισμό του μόνο σε δεδομένα βροχόπτωσης, μπορεί να χαρακτηριστεί πολύ απλός και ταυτόχρονα εύχρηστος. Εκτός του ότι παρέχει πληροφορίες έλλειψης βροχοπτώσεων, μπορεί να υπολογίσει το ποσοστό του μέσου όρου των βροχοπτώσεων και της πιθανότητάς τους σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Τέλος, είναι ευέλικτος, λόγω της προσαρμοστικότητάς του σε μεγάλο εύρος περιοχών διαφορετικού κλίματος. Για οποιαδήποτε χρονική περίοδο που διερευνάται, ένα φαινόμενο ξηρασίας λαμβάνει χώρα και απεικονίζεται στα αποτελέσματα του δείκτη, όταν παρουσιάζονται σε συνεχόμενη διάρκεια αρνητικές τιμές που υπερβαίνουν το -1. Παρόλα αυτά υπάρχουν και περιπτώσεις κατά τις οποίες ερευνητές επιλέγουν τιμές κατωφλιού ξηρασίας μικρότερες του -1. Στις περισσότερες περιπτώσεις φαινομένων ξηρασίας, συμβαίνει οι τιμές του SPI, να κυμαίνονται μεταξύ 0 και -2. Το μέγεθος μιας ξηρασίας, μπορεί να υπολογιστεί μέσω του SPI, μέσω της παρακάτω σχέσης (Mckee et al, 1993) :

$$DM = -(\sum_{j=1}^x SPI_{ij})$$

Όπου,

DM= μέγεθος ξηρασίας σε μήνες

j = ο πρώτος μήνας ξηρασίας

x=οτελευταίος μήνας ξηρασίας

i= χρονικό διάστημα εξέτασηςφαινομένου ξηρασίας

Με βάση την παραπάνω σχέση, συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επικρατεί έλλειμμα νερού σε μια περιοχή, χωρίς σημαντική ανατροφοδότησή της, τόσο μεγαλύτερη διάρκεια έχει και πιο έντονη είναι η ξηρασία. Επιπλέον, παρατηρούμε, ότι, το μέγεθος μιας ξηρασίας (μήνες) είναι αριθμητικά ίδιο με τη διάρκεια της ξηρασίας,εφόσον ο δείκτης ισούται με -1 για κάθε μήνα διάρκειας του φαινομένου.

Παρόλα αυτά, ο SPI μειονεκτεί ως προς το εύρος των παραμέτρων που περιλαμβάνει, καθώς δεν ενσωματώνει το θερμοκρασιακό παράγοντα, που είναι απαραίτητος για τη διατήρηση του υδρολογικού κύκλου και κατ'επέκταση της διαθέσιμης ποσότητας του ύδατος σε μία περιοχή. Αυτό το σενάριο καθιστά δύσκολη τη σύγκριση γεγονότων (βροχοπτώσεων) παρόμοιων τιμών του δείκτη σε περιοχές διαφορετικών θερμοκρασιών, για μικρά χρονικά διαστήματα (Handbook of Drought Indicators and Indices, 2016). Εμπειρικές μελέτες έχουν δείξει ότι, οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες επηρεάζουν καθοριστικά τη σοβαρότητα ενός φαινομένου ξηρασίας, καθώς επιφέρουν παρόμοιες συνέπειες με αυτές του ελλείμματος βροχοπτώσεων (Russelletal.,2000). Σε περιοχές που βιώνουν συνθήκες ξηρασίας, ένα κύμα καύσωνα μπορεί να επιδεινώσει τη σοβαρότητα της κατάστασης και να προκαλέσει ανεπανόρθωτες φυσικές καταστροφές, όπως συνέβει στην

ανατολική Ρωσία και Ευρώπη το καλοκαίρι του 2010 (Rasmijn et al., 2010). Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας με ταυτόχρονη έλλειψη των βροχοπτώσεων επιφέρει σοβαρές οικολογικές συνέπειες, όπως η καταστροφή των δασών, αλλά και υδρολογικές, λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε νερό, ως αποτέλεσμα του αυξημένου ρυθμού της ET (Handbook of Drought Indicators and Indices, 2016).

SPI Values	Drought Category	Time in Category
0 to -0.99	mild drought	~24%
-1.00 to -1.49	moderate drought	9.2%
1.50 to -1.99	severe drought	4.4%
≤ -2.00	extreme drought	2.3%
		~40%

Πίνακας 1. Αντιστοίχιση των τιμών του δείκτη SPI ανάλογα με τις κατηγορίες έντασης μίας ξηρασίας.

Ο δείκτης SPEI, επιτρέπει τη σύγκριση της σοβαρότητας της κατάστασης ξηρασίας χρονικά και χωρικά και αναγνωρίζει την έναρξη και το τέλος αυτής, αφού μπορεί να υπολογιστεί όπως και ο SPI για διάφορα κλίματα περιοχών (Vicente-Serrano et al., 2010). Όμως, ένα σημαντικό πλεονέκτημα του SPEI σε σχέση με τον SPI, είναι ότι λαμβάνει υπόψη και την παράμετρο της ET, η οποία εξαιτίας των πολλαπλών χαρακτηριστικών της, παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στην αναγνώριση των διαφορετικών τύπων ξηρασίας, όσο και των συνεπειών της (Vicente-Serrano et al., 2010). Οι διακυμάνσεις της ET, εξαρτώνται από το θερμοκρασιακό παράγοντα, ο οποίος, όπως αναφέρθηκε,

δεν συνυπολογίζεται από τον SPI. Είναι σημαντικόν αναφερθεί και η χρησιμότητα του δείκτη sc-PDSI, ο οποίος είναι κατάλληλος για κλιματικές προβλέψεις, αφού παρουσιάζει ευαισθησία στις διακυμάνσεις της εξάτμισης που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, αλλά περιορίζεται σε μια χρονική περίοδο για τον υπολογισμό του (Vicente-Serrano et al., 2008). Έτσι, ο δείκτης SPEI συνδυάζοντας την απλότητα του SPI και την ευαισθησία του sc-PDSI στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, είναι δυνατόν να εξηγήσει τις πιθανές επιδράσεις της θερμοκρασιακής μεταβλητότητας σε συνδυασμό με τις μεταβολές των βροχοπτώσεων, εξετάζοντας το υδατικό ισοζύγιο και επιτρέποντας όσο το δυνατόν πιο ουσιαστική εξέταση φαινομένων ξηρασίας και καύσωνα (Latorre et al., 2013).

Συμπερασματικά, ο SPEI είναι ο πιο κατάλληλος δείκτης, σε περιπτώσεις αγροτικής ξηρασίας αφού μπορεί να καταγράψει το έλλειμμα των βροχοπτώσεων σε μια περιοχή και να αναγνωρίσει τις συνέπειες της ξηρασίας στη βλάστηση, αποκαλύπτοντας την περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού του εδάφους για τα φυτά (Vicente-Serrano et al., 2018). Για τον υπολογισμό του, χρειάζονται δεδομένα βροχοπτώσεων και θερμοκρασίας.

Με στόχο τον υπολογισμό του πλεονάζοντος ή ελλειπόντος νερού για το μήνα που ερευνάται σε μια περίοδο ξηρασίας, χρησιμοποιούνται σειρές D_i , οι οποίες αποτελούν τη διαφορά της μέσης βροχόπτωσης για το συγκεκριμένο μήνα από τη μέση εξατμισοδιαπνοή αντίστοιχα. Στη συνέχεια, για τη μοντελοποίηση των D_i τιμών, οι οποίες συγκεντρώθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, χρησιμοποιούνται η γ-κατανομή δύο παραμέτρων και η log-logistic κατανομή τριών παραμέτρων, για τον SPI και για τον SPEI

αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η log-logistic κατανομή προσαρμόζεται πολύ καλά σε D-χρονοσειρές και βρίσκει εφαρμογή και για αρνητικές τιμές.

Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν οι μετεωρολογικοί δείκτες SPI και SPEI. Με σκοπό τον υπολογισμό του ελλείματος της βροχόπτωσης σε μηνιαία βάση, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας την περίοδο 2006-2018. Ημερήσιες τιμές του ελλείματος των βροχοπτώσεων συγκεντρώθηκαν και παρουσιάστηκαν πάνω σε μηνιαίες τιμές με στόχο τον υπολογισμό του δείκτη SPEI ανά μήνα, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους εξέτασης (1, 3 και 12-μηνών) με τη βοήθεια του πακέτου 'R' SPEI (R package 'SPEI') για κάθε περιοχή ξεχωριστά. Οσον αφορά τον όρο 'έλλειμμα βροχοπτώσεων', που λαμβάνει υπόψη ο δείκτης, καθορίζεται ως η διαφορά του ελλείματος βροχόπτωσης από την ET, της οποίας η διακύμανση εξαρτάται μόνο από τα θερμοκρασιακά δεδομένα που υπάρχουν στη διάθεσή μας. Επίσης, το ίδιο πακέτο χρησιμοποιήθηκε και για τον SPI, για τον οποίο τα δεδομένα εισόδου του είναι μόνο τιμές βροχοπτώσεων ανά μήνα.

1.3 Αντικείμενα και Σκοπός της Εργασίας

Η συγκεκριμένη μελέτη αποσκοπεί στην κατανόηση της συμπεριφοράς των φαινομένων ξηρασίας, στη μελέτη της εξέλιξής τους κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών και στη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κρισιμότητα της κατάστασης καθώς και των πιθανών επιπτώσεων στη νήσο της Κρήτης. Τα φαινόμενα ξηρασίας εξαρτώνται από πολλούς μετεωρολογικούς και κλιματικούς παράγοντες, για αυτό και η εξέλιξή τους θα πρέπει να διερευνάται μακροπρόθεσμα. Οι παράγοντες, επιδεινώνουν τις βροχοπτώσεις, μειώνουν την υγρασία του εδάφους ή την διαθεσιμότητα του νερού σε υπόγεια κλίμακα, δημιουργώντας αρκετά ξηρές συνθήκες σε σχέση με τις συνηθισμένες.

Τα αντικείμενα της παρούσας διατριβής μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- Με δεδομένη την έλλειψη αξιόπιστων κλιματικών δεδομένων στη νήσο Κρήτη για μεγάλες χρονικές περιόδους ή τη διαθεσιμότητα μόνο δεδομένων βροχόπτωσης ή θερμοκρασίας, πραγματοποιούμε μία σύγκριση της συμπεριφοράς των δεικτών SPI και SPEI σε περιοχές με

διαφορετικές κλιματικές συνθήκες ώστε να δούμε τις πιθανές αποκλίσεις στην αξιολόγηση των ξηρασιών μεταξύ των δύο δεικτών.

- Να αξιολογήσουμε την εξέλιξη των φαινομένων ξηρασίας τα τελευταία έτη όσον αφορά στην ένταση και στη διάρκεια τους και να πραγματοποιήσουμε μία προκαταρκτική μελέτη των επιπτώσεων τους στη γεωργική παραγωγή, την υδρολογία και γενικότερα την οικολογική σταθερότητα της Κρήτης.

2. Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν:

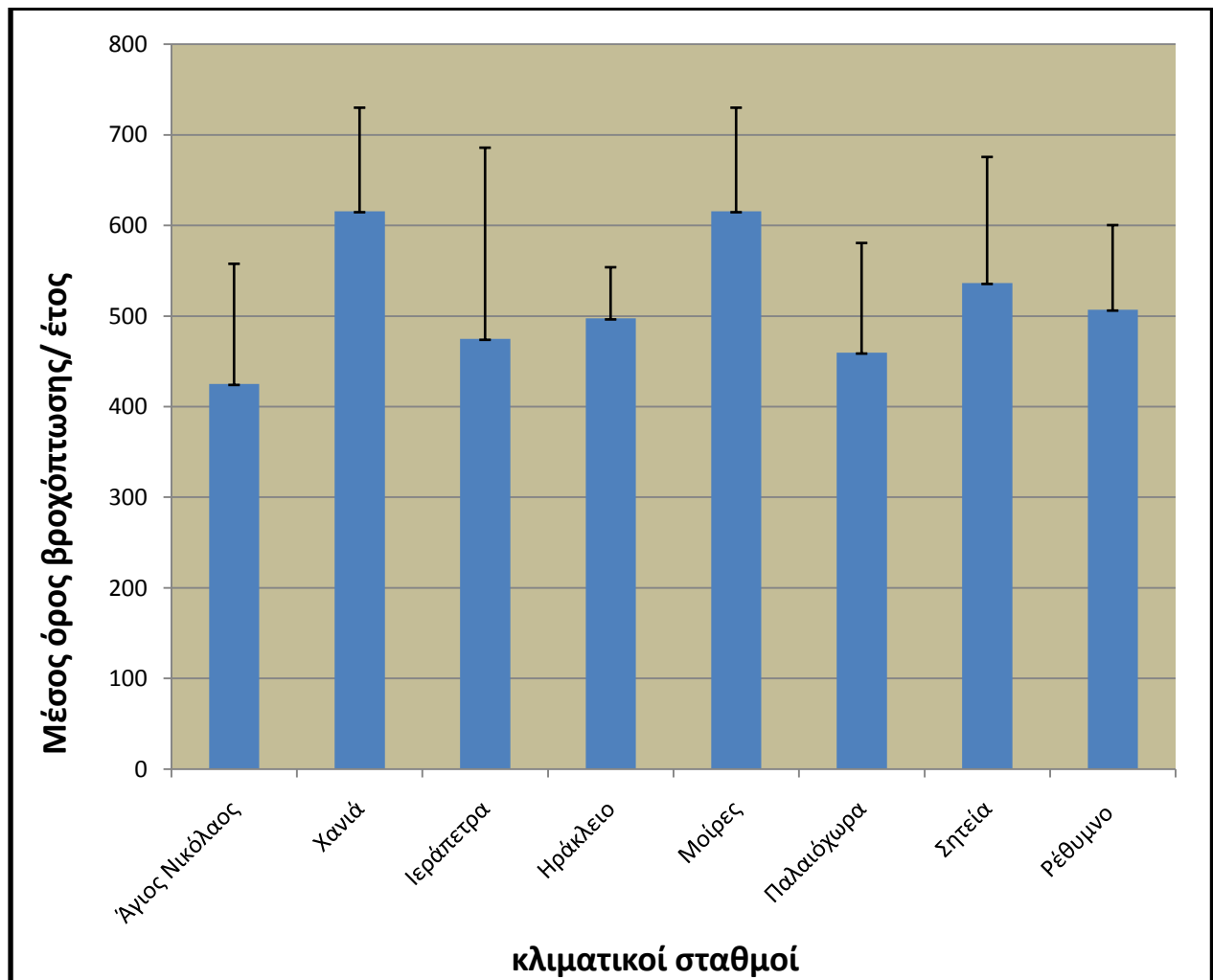
- Μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για 8 περιοχές της Κρήτης, οι οποίες καταλαμβάνουν τόσο το βόρειο όσο και το νότιο τμήμα του νησιού. Οι κλιματικοί σταθμοί που επιλέχθηκαν για τη συλλογή των δεδομένων βρίσκονται, στην πόλη των Χανίων, την περιοχή της Παλαιόχωρας, του Ρεθύμνου, του Ηρακλείου, των Μοιρών, του Αγίου Νικολάου, της Ιεράπετρας και της Σητείας. Ωστόσο, τα δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας καλύπτουν τη χρονική περίοδο 2006-2017 με κάποιους σταθμούς να καταγράφουν για μικρότερες χρονικές περιόδους, όπως αυτός της Σητείας, 2010-2017, της Ιεράπετρας 2008-2017, του Ρεθύμνου 2007-2017, των Μοιρών και του Αγίου Νικολάου 2009-2017. Στη συνέχεια, με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς της ξηρασίας μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα, ορίσαμε για κάθε περιοχή εξέτασης χρονοσειρές του 1, 3 και 12 μηνών, με τη βοήθεια των δεικτών SPEI και SPI.

<p>Πίνακας 2. Αντιστοίχιση των επιλεγμένων κλιματικών σταθμών στην περιοχή της Κρήτης με τις χρονικές περιόδους εξέτασης.</p>	
<i>Περιοχή μελέτης</i>	<i>Χρονική περίοδος</i>
Χανιά	1/10/2010– 31/12/2017
Ρέθυμνο	1/5/2007– 31/12/2017
Ηράκλειο	1/5/2006– 31/12/2017
Άγιος Νικόλαος	1/11/2009– 31/12/2017
Σητεία	1/6/2010– 31/12/2017
Παλαιόχωρα	1/10/2006– 31/12/2017
Μοίρες	1/10/2010– 31/12/2017
Ιεράπετρα	1/3/2008– 31/12/2017

Οι περιοχές μελέτης χαρακτηρίζονταν από διαφορές στο μέσο όρο των τιμών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας όπως εμφανίζεται στα γραφήματα 3 και 4 αντίστοιχα, τα οποία παρατίθενται με στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των μεταβολών της θερμοκρασίας και βροχόπτωσης σε κάθε περιοχή και την μελέτη αξιοπιστίας των δεικτών SPI και SPEI όσον αφορά στην αποτύπωση των γεγονότων ξηρασίας.

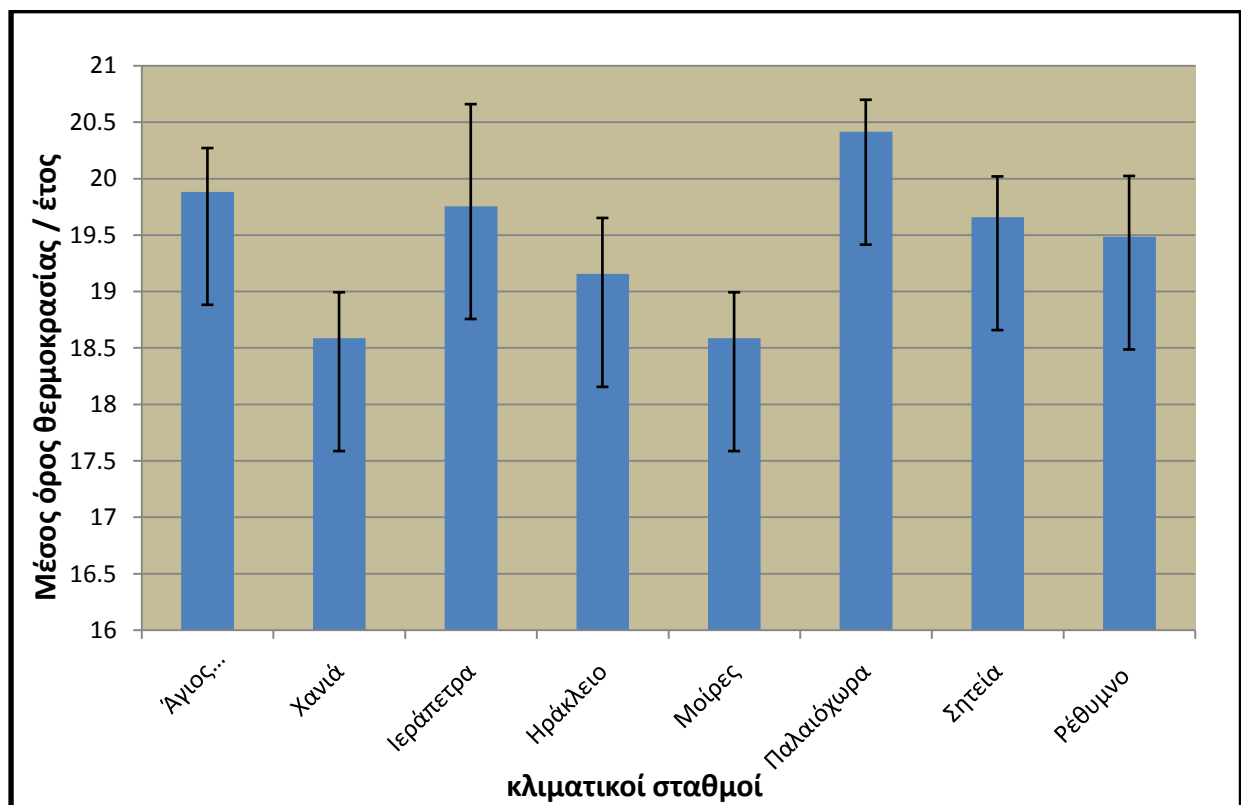
Παρατηρώντας το μέσο όρο των βροχοπτώσεων για κάθε περιοχή για το χρονικό διάστημα 2011-2017, συμπεραίνουμε ότι οι περιοχές των Χανίων και των Μοιρών παρουσιάζουν το μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές, ακολούθούν η Σητεία, το Ρέθυμνο και το Ηράκλειο με παρόμοιο ρυθμό βροχοπτώσεων. Το εύρος των τυπικών αποκλίσεων βροχόπτωσης, επίσης, για τα Χανιά και τις Μοίρες είναι μικρό, γεγονός που φανερώνει μια σταθερότητα στις τιμές. Το χαμηλότερο αριθμό βροχοπτώσεων κατά μέσο όρο, διαπιστώνεται να παρουσιάζει η περιοχή του Αγίου Νικολάου με μέσο όρο τιμών περίπου 420 mm, ενώ ανάμεσα στα 450-500mm κυμαίνεται ο μέσος όρος για Ιεράπετρα και Σητεία. Επιπλέον, παρατηρείται έντονη διακύμανση τιμών μεγαλύτερων της διαμέσου για την Ιεράπετρα, σε αντίθεση με το Ηράκλειο που χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη διακύμανση τιμών βροχοπτώσεων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιοχές. Κρίνοντας τα αποτελέσματα οι βόρειες και κυρίως δυτικές περιοχές της Κρήτης δέχονται μεγαλύτερο αριθμό βροχοπτώσεων σε σχέση με τις ανατολικές και νότιες.

Ωστόσο, ίσως, ο Άγιος Νικόλαος, αν και βρίσκεται στη βόρειοανατολική ακτογραμμή, επηρεάζεται από το κλίμα της Ιεράπετρας.



Γράφημα 2. Απεικόνιση του μέσου όρου βροχόπτωσης το χρονικό διάστημα 2011-2017 για τους 8 επιλεγμένους κλιματικούς σταθμούς - τυπική απόκλιση

Είναι προφανές από το γράφημα 4, ότι οι θερμοκρασιακές τιμές για τις υπό μελέτη περιοχές της Κρήτης δεν παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση . Από τους μέσους όρους τιμών θερμοκρασίας, συμπεραίνουμε ότι η Παλαιόχωρα λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές, έπειτα ακολουθεί ο Άγιος Νικόλαος και στη συνέχεια η Ιεράπετρα και η Σητεία. Επομένως υψηλότερο μέσο όρο θερμοκρασιών παρουσιάζουν οι περιοχές της ανατολικής πλευράς της Κρήτης, όσο και η νοτιοδυτική περιοχή της Παλαιοχωρας. Το χαμηλότερο μέσο όρο διαπιστώνεται να εμφανίζουν τα Χανία και οι Μοίρες.



Γράφημα 3. Απεικόνιση του μέσου όρου θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα 2011-2017, για τους 8 επιλεγμένους κλιματικούς σταθμούς - τυπική απόκλιση

Συμπερασματικά και από τα δύο γραφήματα (Γραφήματα 3 και 4), οι βόρειες περιοχές της Κρήτης και ιδιαίτερα τα Χανιά δέχονται αρκετές βροχοπτώσεις και αντιμετωπίζουν χαμηλό μέσο όρο θερμοκρασιών ετησίως, με εξαίρεση τον Άγιο Νικόλαο που ιδιαίτερα τα δύο τελευταία έτη δέχεται σημαντικά χαμηλότερα ύψη βροχοπτώσεων και ο μέσος όρος θερμοκρασίας είναι σχετικά υψηλός. Το μεγαλύτερο πρόβλημα, όμως, φαίνεται να αντιμετωπίζει η περιοχή της Παλαιόχωρας με πολύ υψηλές θερμοκρασίες και συγχρόνως χαμηλό μέσο όρο βροχοπτώσεων, ιδιαίτερα τα δύο τελευταία έτη. Τέλος, καλύτερες συνθήκες ως προς το εύρος των τιμών βροχόπτωσης επικρατούν και στην Ιεράπετρα..

- Για τη διεξαγωγή των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το πακέτο SPEI (SPEI package), το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο λειτουργιών και ενδείκνυται για τον υπολογισμό της ET και άλλων δεικτών (SPI), συμπεριλαμβανομένου και του SPEI. Με αυτόν τον τρόπο οι λειτουργίες των SPEI και SPI, υπολογίζουν τους δείκτες ξηρασίας SPEI και SPI. Και οι δύο λειτουργίες είναι πανομοιότυπες, καθώς στην πραγματικότητα ο SPI αποτελεί απλώς ‘επικάλυμμα’ του SPEI, αλλά υπολογίζονται ξεχωριστά για λόγους σαφήνειας. Οι δύο δείκτες καθορίζονται για μηνιαία δεδομένα. Συγκεκριμένα για τον SPI, μια σειρά δεδομένων τιμών βροχόπτωσης και για τον SPEI σειρά δεδομένων του υδατικού ισοζυγίου (βροχόπτωση-δυναμική εξατμισοδιαπνοή). Ένα βασικό πλεονέκτημα των δύο δεικτών είναι ο υπολογισμός τους σε πολλές χρονοσειρές (1, 3, 12 μήνες στην περίπτωση μας), με αποτέλεσμα και οι δύο δείκτες να λειτουργούν μνημονικά και παλαιότερες τιμές δεδομένων να αποκτούν βαρύτητα

στον υπολογισμό του δείκτη. Για παράδειγμα, στο τέλος του έτους 2010, το μήνα Δεκέμβριο θα ληφθούν υπόψη οι τιμές και των προηγούμενων 11 μηνών, εφόσον εξετάζουμε για χρονοσειρά 12 μηνών. Οι δείκτες αποτελούν σταθερές μεταβλητές και για αυτό μπορούν να συγκριθούν με άλλες τιμές SPI και SPEI, σε διαφορετικό χώρο και χρόνο. Επιπλέον, οι λειτουργίες (functions) των δεικτών SPI και SPEI ακολουθούν τις κατανομές πιθανοτήτων 2 παραμέτρων gamma και 3 παραμέτρων log-logistic αντίστοιχα, με σκοπό τη μοντελοποίηση των δεδομένων εισόδου, βροχόπτωσης και βροχόπτωση-δυνητική ET σε κάθε περίπτωση δείκτη και για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (Vicente-Serrano, et al., 2009).

3. Αποτελέσματα και συζήτηση

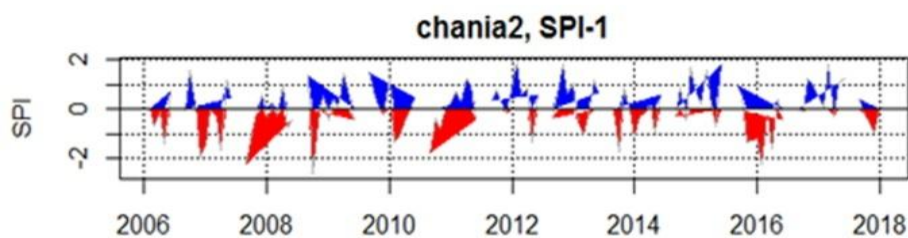
Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στην εξέλιξη των γεγονότων ξηρασίας, όπως αυτά αποτυπώνονται με τη χρήση των δεικτών SPEI και SPI, σε χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών και σε επιλεγμένες περιοχές της Κρήτης.

3.1 Διαγράμματα μεταβολής δείκτη SPI στο χρονικό διάστημα 2006-2018 σε περιοχές της Κρήτης

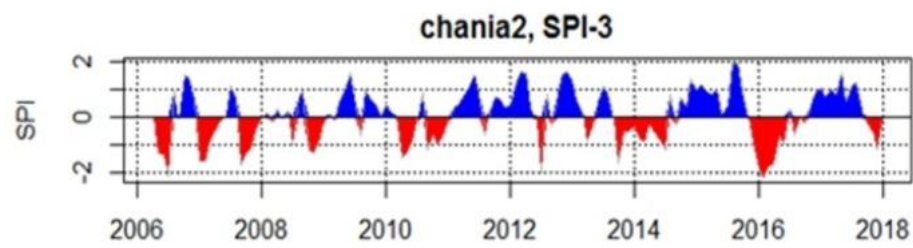
Ο δείκτης SPI αποτελεί έναν από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες για την αποτύπωση της έντασης και διάρκειας των γεγονότων ξηρασίας (Handbook of Drought Indicators and Indices). Ωστόσο, με δεδομένο ότι ο υπολογισμός του λαμβάνει υπόψη μόνο δεδομένα βροχόπτωσης, προξενεί αμφιβολίες σε σχέση με την αποτύπωση της έντασης των γεγονότων ξηρασίας (McKee et.al, 1993). Επίσης, η εκτίμηση του δείκτη ξηρασίας SPI σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα παρέχει συμπληρωματική πληροφορία σχετικά με τις επιπτώσεις της ξηρασίας σε διαφορετικούς τομείς (γεωργία, υδατικούς πόρους, οικολογία, κοινωνικοοικονομικούς τομείς) (Rasmijn et.al, 2018).

Στην περιοχή των Χανίων η εποχιακή μεταβολή του δείκτη SPI για την περίοδο 2010-2017 για διαφορετικά διαστήματα (1, 3, 12 μήνες) παρουσιάζεται στα γραφήματα 1a, 1b και 1c. Συγκρίνοντας τις τιμές του SPI για τα διαφορετικά διαστήματα παρατηρούμε ότι για τη μικρότερη χρονική

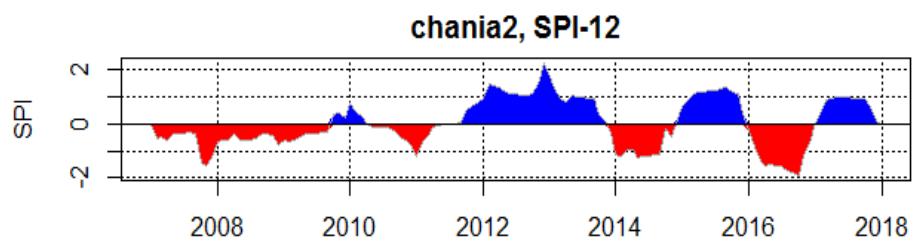
περίοδο, ο δείκτης SPI ακολουθεί το πρότυπο των βροχοπτώσεων του κάθε μήνα, ενώ αύξηση του χρονικού διαστήματος σε 3 ή 12 μήνες οδηγεί σε πιο αργή απόκριση στις αλλαγές των βροχοπτώσεων, με αποτέλεσμα οι περίοδοι για τις οποίες ο δείκτης παίρνει αρνητικές ή θετικές τιμές να μειώνονται σε αριθμό, αλλά να αυξάνονται σε διάρκεια (Γράφημα 1b και 1c). Σχετικά, με την ένταση και διάρκεια των γεγονότων ξηρασίας διαπιστώνονται μέσω του SPI-3 πολύ αρνητικές τιμές και σχετικά μικρής διάρκειας την περίοδο 2006-2009, ενώ ηπιότερα γεγονότα καταγράφονται την περίοδο 2010-2015 για να ακολουθήσει ένα ακόμη ισχυρό γεγονός ξηρασίας την περίοδο 2016-2017. Μελέτη της ξηρασίας με βάση τον SPI-12, αποκάλυψε μία διαφοροποίηση όσον αφορά στα ετήσια πρότυπα ξηρασίας με μία ήπια, αλλά μεγάλης διάρκειας ξηρασία να λαμβάνει χώρα την περίοδο 2006-2009 ενώ δύο μεγαλύτερης έντασης αλλά μικρότερης διάρκειας ξηρασίες έλαβαν χώρα την περίοδο 2013-2014 και 2015-2016. Γενικά, ο SPI-12 έδειξε μία μεταβολή προς ισχυρότερης διάρκειας γεγονότα την μελετούμενη περίοδο με πιθανές σοβαρές επιπτώσεις στην διαθεσιμότητα υδατικών πόρων, αλλά και στην απόδοση των γεωργικών καλλιεργειών.



1a



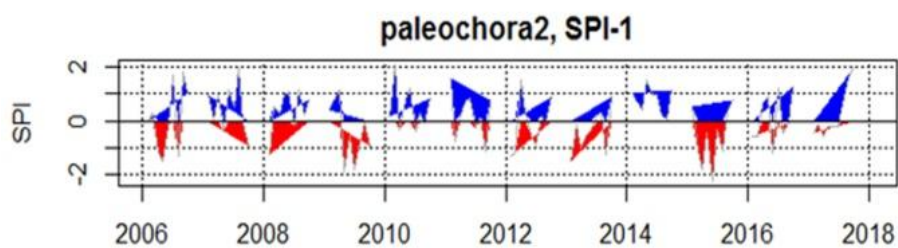
1b



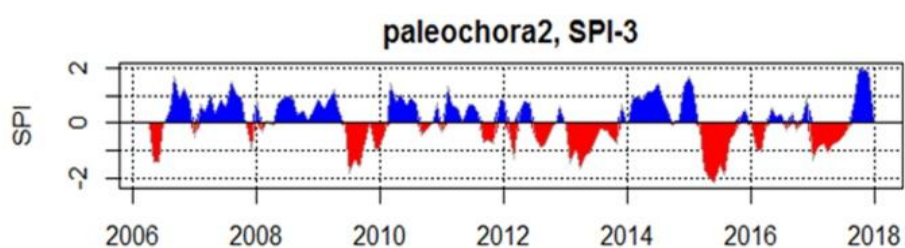
1c

Γράφημα 4 : Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2010-2017, στην περιοχή των Χανίων για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

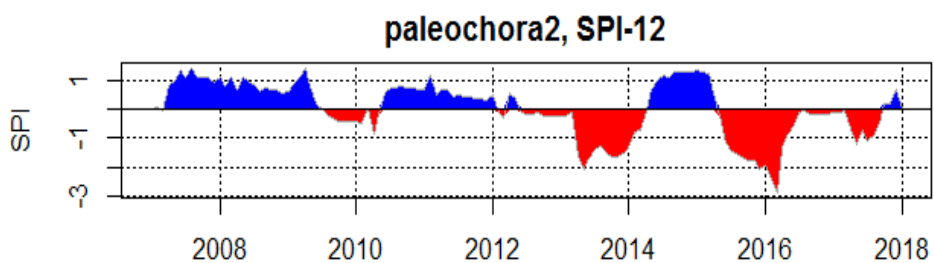
Όσον αφορά στην Παλαιόχωρα, η οποία και βρίσκεται στη νοτιοδυτική Κρήτη, παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση της χρονικής μεταβολής του δείκτη SPI (Γραφήματα 2a, 2b, και 2c). Ειδικότερα για τον SPI-1, αυτός ακολούθησε το πρότυπο των βροχοπτώσεων των επιμέρους μηνών. Από τον SPI-3 διαπιστώθηκε ότι το έτος 2009 μία σοβαρή ξηρασία έπληξε την περιοχή, ακολουθώντας το 2010 με μία μέτρια, ενώ μέσα στο 2013 και 2014 διαπιστώθηκε ξανά η επικράτηση έντονων και μεγαλύτερης διάρκειας φαινομένων ξηρασίας, τα οποία διαδέχεται περίοδος βροχοπτώσεων μέχρι το 2015, στη διάρκεια του οποίου και επικράτησε σοβαρή μείωση βροχοπτώσεων. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι, παρόλο που υπήρξαν μερικές βροχοπτώσεις, το φαινόμενο της ξηρασίας από το 2015 υπήρξε ιδιαίτερα έντονο ($SPI < -2$) (Γραφήματα 2a, 2b, 2c). Η μεταβολή στο πρότυπο των βροχοπτώσεων αποτυπώθηκε πιο καθαρά στον SPI-12, όπου κατά το μελετούμενο διάστημα (2007-2017) επικράτησε μία αυξανόμενη ένταση και διάρκεια των φαινομένων ξηρασίας (Γράφημα 2c). Τα παραπάνω αποτελέσματα τεκμηριώνουν σημαντικές επιπτώσεις στην παραγωγή των καλλιεργειών καθώς και την αναγκαιότητα λήψης μέτρων που αφορούν στην διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων αναγκών.



2a



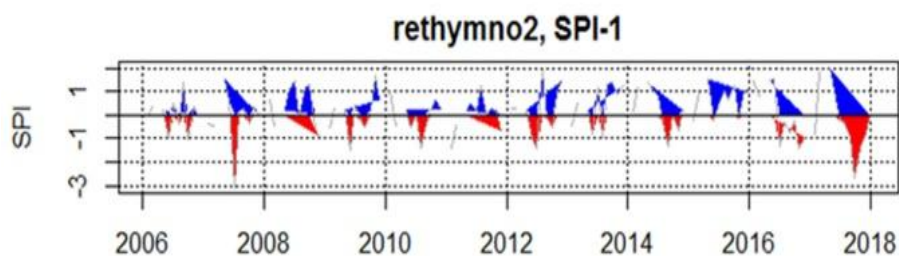
2b



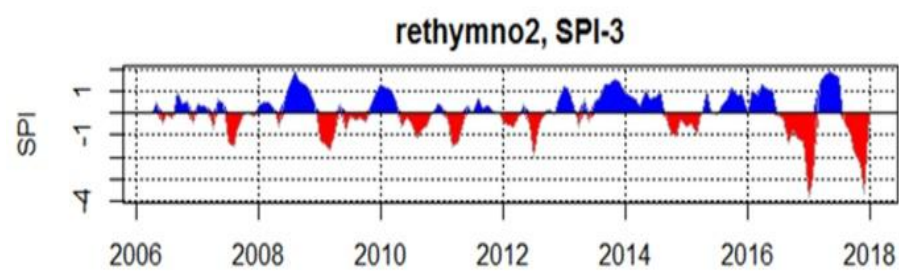
2c

Γράφημα 5: Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2006-2017, στην περιοχή της Παλαιόχωρας για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

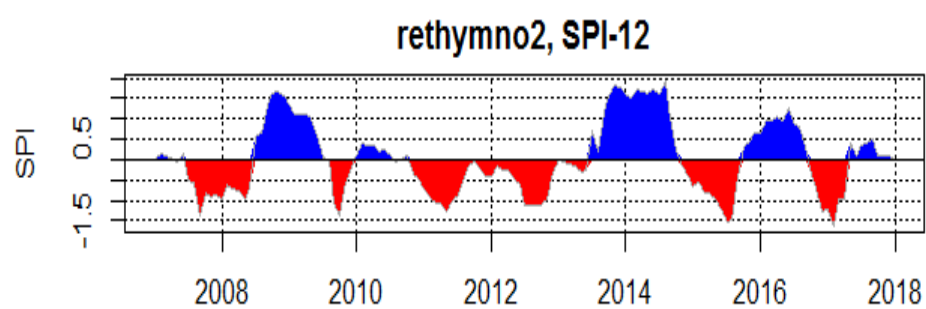
Για την περιοχή της πόλης του Ρεθύμνου, παρατηρείται μία περίοδος μικρής σχετικά έντασης και διάρκειας γεγονότων ξηρασίας για τον SPI-3 την περίοδο 2007-2015, ενώ εντονότερα φαινόμενα και ενδεικτικά σοβαρών επιπτώσεων για την παραγωγή των καλλιεργειών έλαβαν χώρα την περίοδο 2015-2017, όπου οι τιμές του δείκτη SPI-3 προσέγγισαν τις μέγιστες τιμές του (Γράφημα3a). Σχετικά με τον SPI-12, τη μελετούμενη περίοδο διαπιστώθηκε αύξηση της έντασης των φαινομένων ξηρασίας που το 2017 έφθασαν την μέγιστη τιμή τους (Γράφημα 3c). Είναι προφανές, ότι τα τελευταία χρόνια λαμβάνουν χώρα όχι μόνο ακραία φαινόμενα ξηρασίας αλλά και έντονες διακυμάνσεις στο κλίμα, αφού έντονες βροχοπτώσεις διαδέχονται έντονη ξηρασία σε επαναλαμβανόμενο μοτίβο.



3a



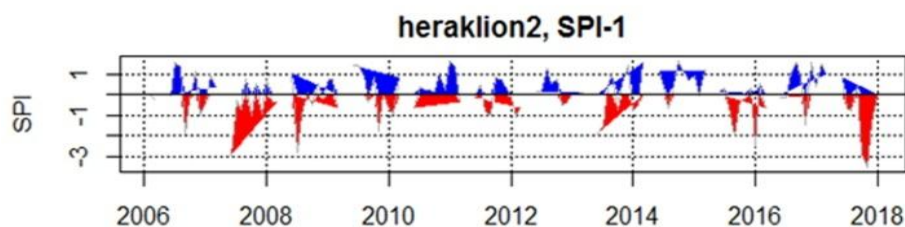
3b



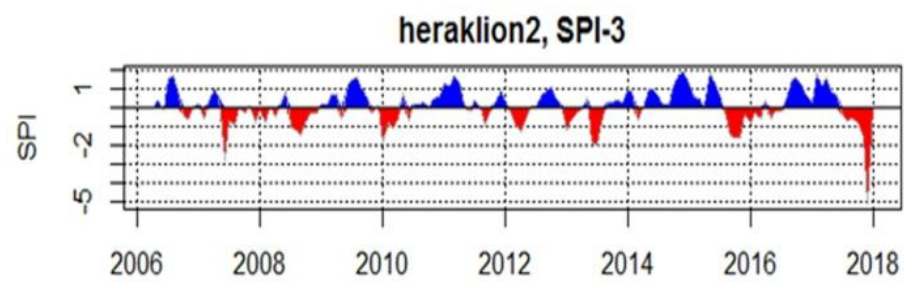
3c

Γράφημα 6: Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2007-2017, στην περιοχή του Ρεθύμνου για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

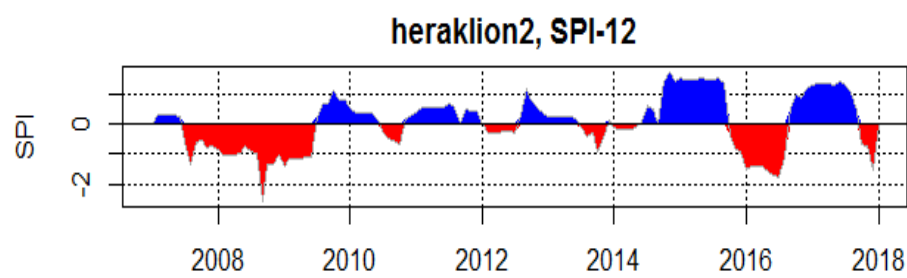
Στην περιοχή της πόλης του Ηρακλείου, ο SPI-3 έδειξε την επικράτηση γενικά μικρής διάρκειας και έντασης ξηρασιών την περίοδο 2007-2018, με την μεγαλύτερη σε ένταση ξηρασία πολύ μικρής, όμως, διάρκειας να λαμβάνει χώρα την περίοδο 2017 (Γράφημα 4b). Όσον αφορά στη μεταβολή του SPI-12, διαπιστώθηκε η επικράτηση μίας ξηρασίας μεγάλης διάρκειας (2 έτη) την περίοδο 2007-2009. Μεταγενέστερα, παρατηρήθηκε μία περίοδος όπου σχεδόν δεν καταγράφηκαν σοβαρά γεγονότα ξηρασίας (2009-2015) για να ακολουθήσει ένα ισχυρό γεγονός σε ένταση και διάρκεια ξηρασία το 2016 (Γράφημα 4c). Συμπερασματικά, και συγκριτικά με τις προαναφερόμενες περιοχές στην περιοχή του Ηρακλείου τα τελευταία χρόνια, έχουν λάβει χώρα ηπιότερα γεγονότα ξηρασίας.



4a



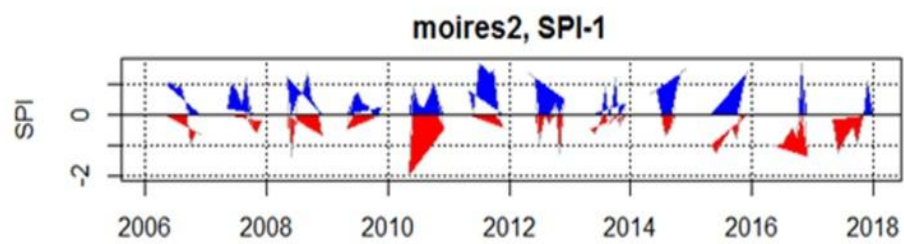
4b



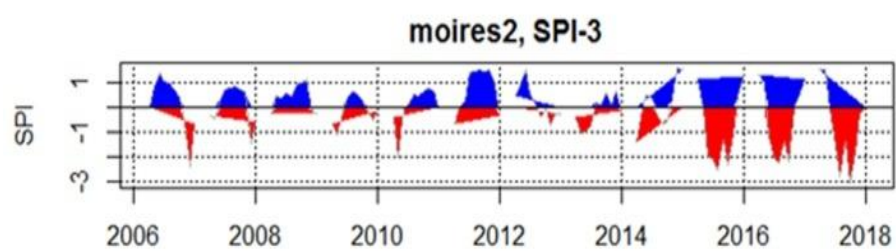
4c

Γράφημα 7: Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2006-2017, στην περιοχή του Ηρακλείου για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

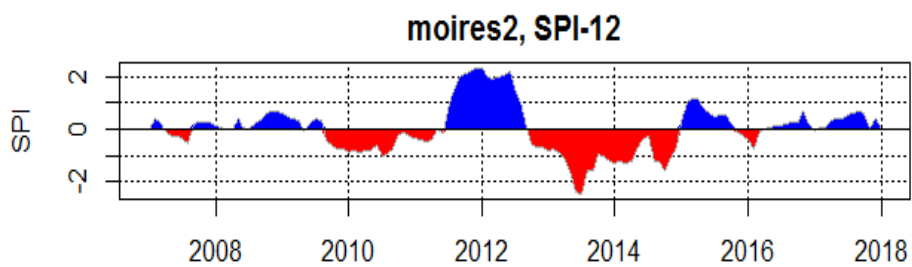
Η ευρύτερη περιοχή των Μοιρών χαρακτηρίζεται από την επικράτηση υψηλών θερμοκρασιών και χαμηλού ύψους βροχοπτώσεων. Οι δείκτες SPI-3 και SPI-12 αποκάλυψαν αντιφατικά ευρήματα. Ειδικότερα, ο δείκτης SPI-3 έδειξε αυξημένες τιμές την περίοδο 2015-2017 ενδεικτικές για επιπτώσεις στην παραγωγή των ξηρικών καλλιεργειών ενώ, ο δείκτης SPI-12 έδειξε μία την ισχυρότερη ξηρασία για την περίοδο 2013-2014 που χαρακτηρίστηκε από μεγάλη διάρκεια και σχετικά μικρής έντασης (Γράφημα 5c). Είναι προφανές ότι, η συγκεκριμένη ξηρασία παρουσίασε πολύ μεγάλη διάρκεια και ένταση, λόγω της σοβαρής έλλειψης βροχοπτώσεων του 2012, με τις πιθανές συνέπειες να εκτείνονται πέρα από τον αγροτικό τομέα, στην διαθεσιμότητα για παράδειγμα υδατικών πόρων. Ωστόσο, όπως φαίνεται τις επόμενες περιόδους, η αύξηση των ύψους των βροχοπτώσεων εκτιμάται ότι περιόρισε τις επιπτώσεις αυτές όπως τουλάχιστον καταγράφεται από τις τιμές του SPI-3. Γενικά, στη περιοχή των Μοιρών διαπιστώνεται μία αύξηση των βροχοπτώσεων τα τελευταία έτη, οι οποίες έχουν συνεισφέρει στην ανάσχεση της επικράτησης μεγάλης έντασης ξηρασιών τουλάχιστον σε επίπεδο υδρολογικού έτους. Συγκρίνοντας με το Ηράκλειο, τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των Μοιρών, υπάρχει σημαντική άνοδος των βροχοπτώσεων που επισκιάζουν ακόμα και σοβαρές περιόδους ξηρασίας, όπως είναι προφανές για το διάστημα 2015-2017 στα μεγαλύτερης διάρκειας διαγράμματα (Γραφήματα 5b και 5c).



5a



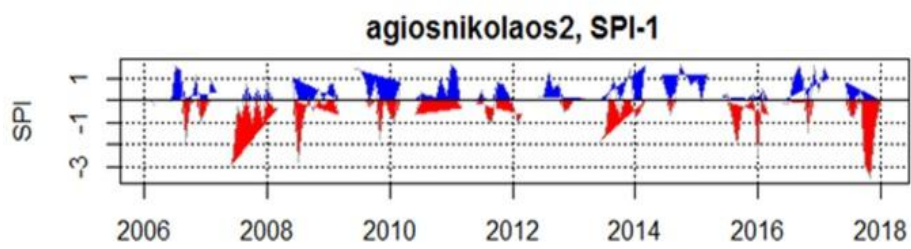
5b



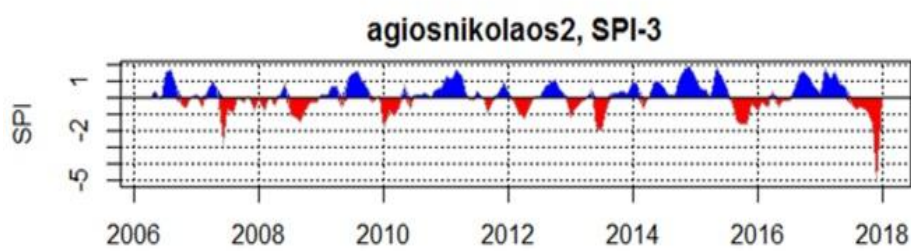
5c

Γράφημα 8: Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2010-2017, στην περιοχή των Μοιρών για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

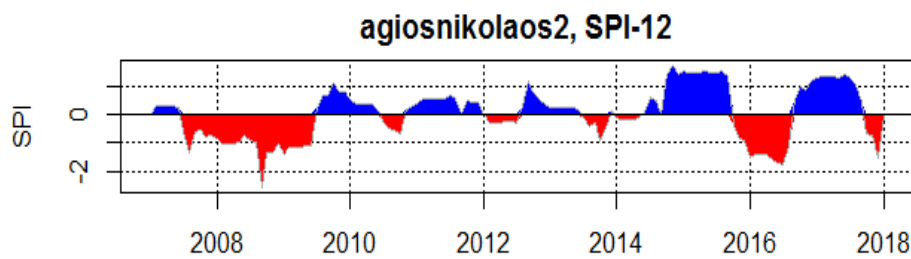
Η περιοχή του Αγίου Νικολάου, καταγράφηκε ως περιοχή αρκετών βροχοπτώσεων με κάποια ενδιάμεσα έντονα φαινόμενα ξηρασίας (Γραφήματα 6a-6c). Γενικά, τη μελετούμενη περίοδο διαπιστώθηκαν μικρής διάρκειας περίοδοι ξηρασίας αλλά σχετικά υψηλής έντασης εναλλασσόμενες από υγρές περιόδους για τον δείκτη SPI-3 (Γράφημα 6b). Το ισχυρότερο γεγονός ξηρασίας έλαβε χώρα το 2007 και χαρακτηρίστηκε από υψηλή ένταση, ουσιαστικά τη μεγαλύτερη που καταγράφηκε σε όλες τις μελετούμενες περιοχές. Συγκεκριμένα, το έτος 2007 παρατηρείται μία μέτριας μορφής ξηρασία, η οποία σε συνδυασμό με τη συνεχή έλλειψη βροχοπτώσεων, είχε σαν αποτέλεσμα το 2009 ο SPI να προσεγγίσει τις μέγιστες τιμές του (Γραφήματα 6a-6b-6c). Τα επόμενα έτη, παρατηρήθηκε ανοδική τάση των βροχοπτώσεων, με τη χρονιά του 2015 να μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πιο υγρή, ενώ επίσης στο μεσοδιάστημα, μέχρι και τότε, δεν καταγράφηκαν σοβαρά φαινόμενα ξηρασίας. Το 2016-2017, και στον Άγιο Νικόλαο, πραγματοποιήθηκε μεταβολή προς ισχυρότερης διάρκειας γεγονότα ξηρασίας, ακολούθησαν βροχοπτώσεις και στα τέλη του 2017 καταγράφηκε ξανά έντονη ξηρασία, μικρότερης όμως διάρκειας (Γράφημα 6c). Συγκρίνοντας τις περιοχές του Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου, φαίνεται η ομοιότητα στις εναλλαγές του κλίματος και ειδικότερα τα τελευταία χρόνια (Γράφημα 6c), γεγονός αναμενόμενο, λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο περιοχών και της παρόμοιας μορφολογίας τους .



6a



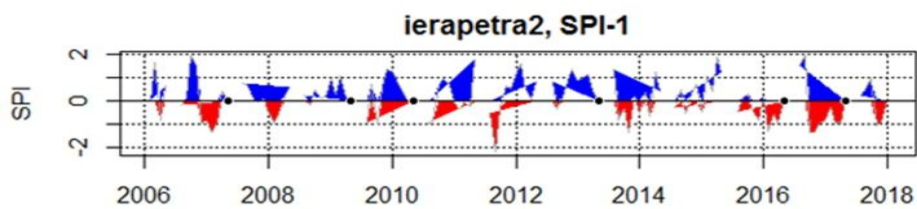
6b



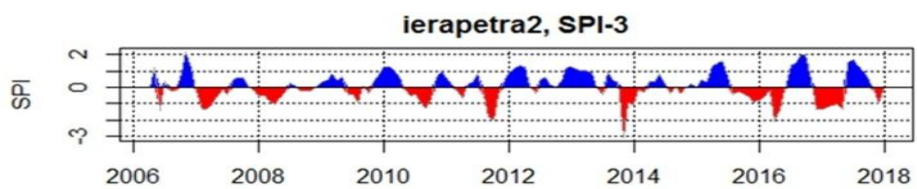
6c

Γράφημα 9: Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2009-2017, στην περιοχή του Αγίου Νικολάου για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

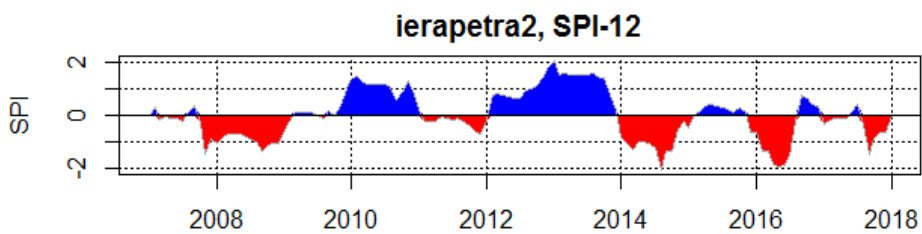
Η Ιεράπετρα ανήκει στο Ν. Λασιθίου και βρίσκεται 100 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά από το Ηράκλειο, 242 χιλιόμετρα από τα Χανιά και 36 χιλιόμετρα νότια από τον Άγιο Νικόλαο και χαρακτηρίζεται από ξηροθερμικό κλίμα. Από το δείκτη SPI-3 διαπιστώνονται περιοδικές ξηρασίες υψηλής έντασης (=2) λόγω της έλλειψης βροχοπτώσης κατά τους θερινούς μήνες (Γράφημα 7b). Από το SPI-12, το διάστημα 2008-2009 εκδηλώνεται μεγάλης διάρκειας και μέτρια φαινόμενα ξηρασίας, λόγω της συνεχούς έλλειψης υετών, τα οποία, ωστόσο, διαδέχονται τα επόμενα έτη (2010-2011) μια περίοδο πολλών βροχοπτώσεων (Γραφήματα 7b-7c). Στη συνέχεια , προς τα τέλη του 2011, είναι φανερό, ότι η περιοχή αντιμετώπισε μία πολύ έντονη ξηρασία, μικρής διάρκειας (Γραφήματα 7a-7b). Επιπλέον, το 2013 μπορεί να χαρακτηριστεί πολύ υγρό έτος, ενώ τα επόμενα έτη βάσει του SPI-12, αδιαμφισβήτητα, πλήττονται από ισχυρή έντασης και διάρκειας ξηρασίας (Γράφημα 7c). Μια ξηρασία που μπορεί να είναι μέτρια, είναι δυνατόν να προκαλέσει σοβαρές συνέπειες σε μια περιοχή εφόσον συνδυαστεί με μικρή συχνότητα των βροχοπτώσεων τα προηγούμενα χρόνια, όπως φαίνεται πιο ξεκάθαρα στο διάγραμμα 7c. Επομένως, και εδώ παρατηρείται τα τελευταία χρόνια σημαντική εποχιακή μεταβολή, με αύξηση του αριθμού και της διάρκειας των ξηρασιών, δεδομένο άκρως ανησυχητικό και συνυφασμένο με την ερημοποίηση της περιοχής, μακρυπρόθεσμα, αλλά και τη μείωση της παραγωγικότητας, κυρίως της ελιάς, βραχυπρόθεσμα.



7a



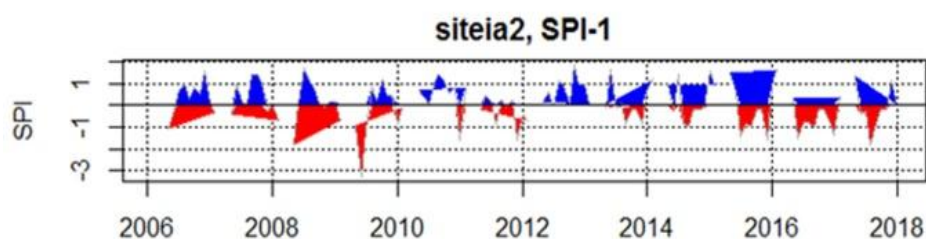
7b



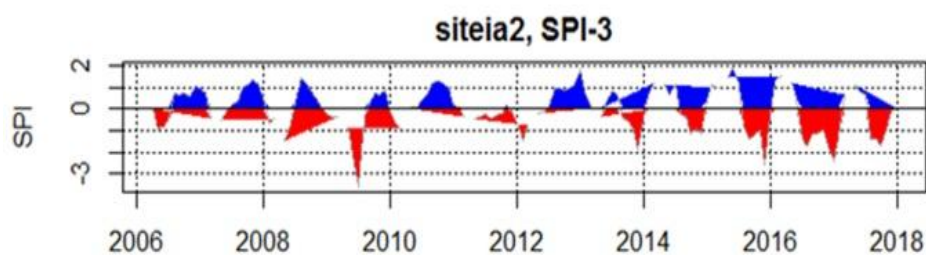
7c

Γράφημα 10 : Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2008-2017, στην περιοχή της Ιεράπετρας για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

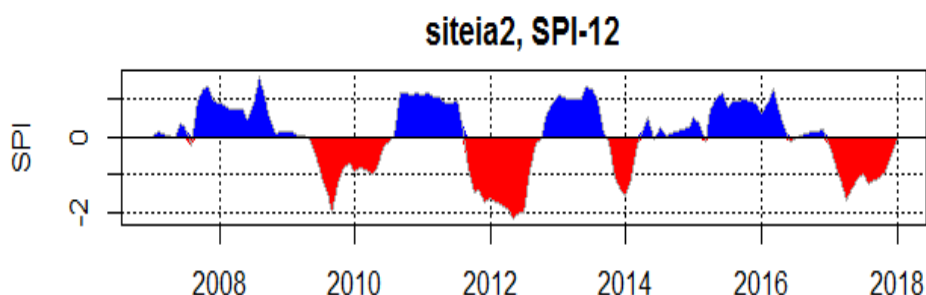
Στην περιοχή της Σητείας, αποκαλύπτονται (Διάγραμμα 8c) περίοδοι μεγάλης ξηρασίας, όπως αυτές του 2009-2010 και 2011-2012 καθώς και μικρότερης διάρκειας, όπως αυτή το έτος 2014. Κατά τη διάρκεια αυτών των χρόνων, λαμβάνουν χώρα περίοδοι βροχοπτώσεων που ενισχύουν το υδατικό δυναμικό της περιοχής, όπως τα 2011 και 2013. Από τους δείκτες SPI-1 και SPI-3, διαπιστώνονται πολύ έντονες βροχοπτώσεις, ειδικά το 2015 με τον SPI να λαμβάνει αρκετά θετικές τιμές, γεγονός που επικάλυψε δύο ξηρασίες με τη μία αρκετά σοβαρή, όπως τελικά φαίνεται στο 8c διάγραμμα. Όμως, όπως διαπιστώνεται πιο έντονα από το διάγραμμα 8c, οι σταθερά αρνητικές τιμές του δείκτη SPI, αλλά και σημαντική εξασθένηση των βροχοπτώσεων, με συνέπεια τη μείωση αποθεμάτων νερού και την πραγματοποίηση σοβαρής ξηρασίας που διαδέχεται μία μικρότερης έντασης και συνολικά αρκετής διάρκειας, τα δύο τελευταία χρόνια.



8^α



8b



8c

Γράφημα 11 : Μεταβολή του δείκτη SPI κατά την περίοδο 2010-2017, στην περιοχή της Σητείας για χρονικά διαστήματα 1(a), 3(b), 12(c) μηνών.

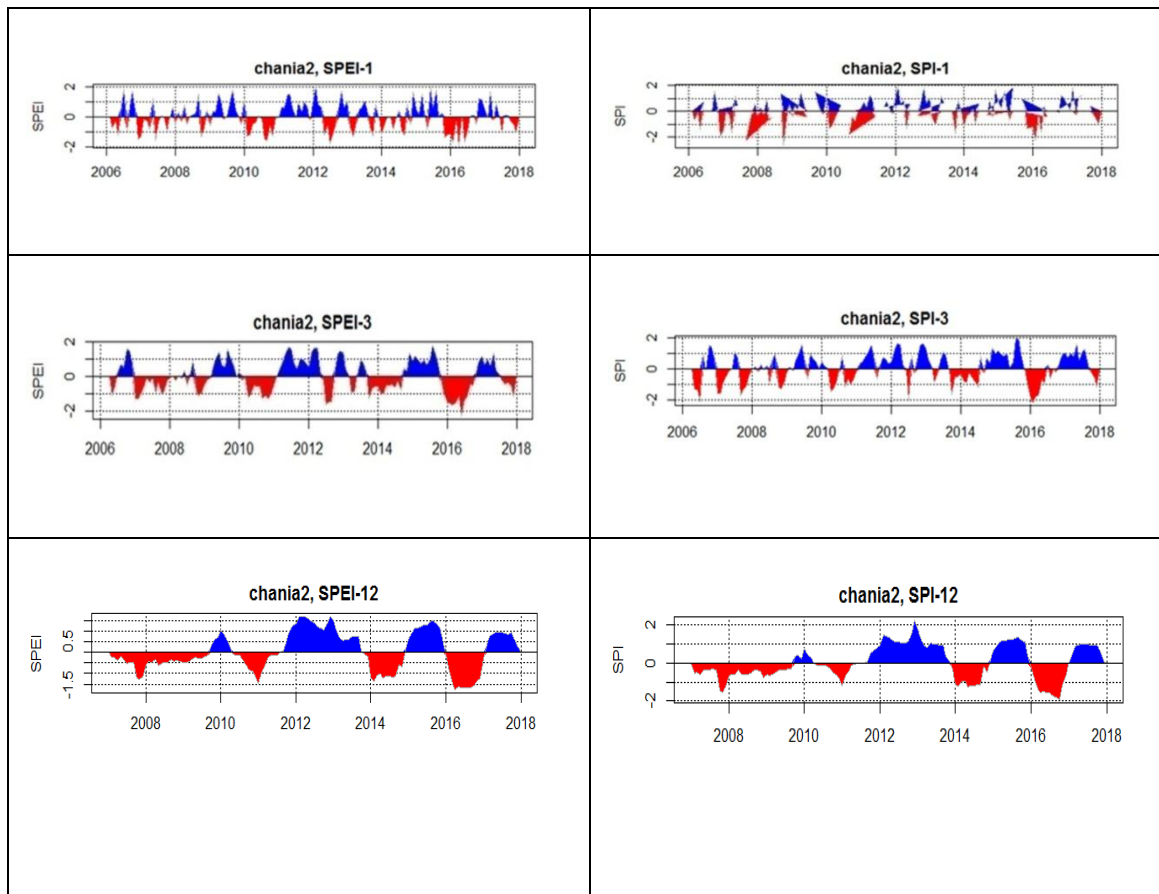
Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις περιοχές της βόρειας πλευράς του νησιού (Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Άγιος Νικόλαος, Σητεία), φαίνεται ότι στα Χανιά παρά το μεγαλύτερο ύψος βροχοπτώσεων λαμβάνουν χώρα ανάλογης έντασης και διάρκειας περιόδους ξηρασιών, ενώ τα τελευταία χρόνια η ένταση των ξηρασιών δείχνει σε όλες σχεδόν τις περιοχές μία αυξητική τάση. Από την άλλη πλευρά, αν και οι περιοχές του Ηρακλείου και του Αγίου Νικολάου, φαίνεται να αντιμετωπίζουν ηπιότερα φαινόμενα ξηρασίας, τα τελευταία χρόνια ακολουθούν το ίδιο μοτίβο, με την παρουσία μεγάλης διάρκειας ξηρασίας και SPI κοντά στο -2 το χρονικό διάστημα 2016-2017. Επιπλέον, η

περιοχή της Σητείας, αντιμετωπίζει πρόβλημα, κυρίως τα 2 τελευταία έτη, αφού παρατηρήθηκε ραγδαία μεταβολή προς σοβαρότερα γεγονότα ξηρασίας. Μία κοινή παρατήρηση, επομένως, εξετάζοντας ανά 12 μήνες (Διαγράμματα c), αποτελεί το γεγονός ότι το 2017 και σε γενικό βαθμό τα δύο τελευταία χρόνια, σε όλη τη βόρεια πλευρά, παρατηρούνται έντονα φαινόμενα ξηρασίας με τιμές του SPI \approx -2. Επίσης, η κατάσταση στην περιοχή του Ρεθύμνου κρούει τον κώδωνα του κινδύνου. Όσον αφορά στη νότια πλευρά του νησιού, σε αντίθεση από ότι αναμένονταν δεν διαπιστώθηκε σημαντική διαφοροποίηση στην ένταση των ξηρασιών. Η αύξηση της βροχοπτώσης στην περιοχή των Μοιρών τα τελευταία χρόνια, οδήγησε στην ανάσχεση της έντασης των ξηρασιών όπως αποτυπώνεται από τις τιμές του δείκτη SPI. Αντίθετα, στην Ιεράπετρα η ξηρασία επιδεινώθηκε, πιθανόν και λόγω των επανελλειμένων ξηρών συνθηκών ως προς τις αυξημένες τιμές θερμοκρασίας κατά μέσο όρο. Η Παλαιόχωρα, αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα έλλειψης βροχοπτώσεων τα τελευταία χρόνια, και ταυτόχρονα πλήττεται συμπληρωματικά από έντονες μορφές ξηρασίας. Είναι γνωστό, ότι στην πιο ανατολική και νότια Κρήτη ο αριθμός και η ένταση των βροχοπτώσεων είναι αρκετά μικρός, λόγω της γεωμορφολογίας της και αναμένεται να προκύψουν σοβαρά προβλήματα λυψειδρίας εφόσον συνεχιστεί η παρούσα κατάσταση. Σε γενικό βαθμό, τόσο η βόρεια, όσο και η νότια πλευρά του Ηρακλείου και η περιοχή του Αγίου Νικολάου, φαίνεται να μην αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της ξηρασίας μεγεθυντικά, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιοχές της Κρήτης, τα τελευταία χρόνια σύμφωνα με το δείκτη SPI.

3.2 Μεταβολή δείκτη SPEI στο χρονικό διάστημα 2006-2018 σε περιοχές της Κρήτης

Με σκοπό την εξέταση της εξέλιξης του κλιματικού φαινομένου της ξηρασίας την τελευταία δεκαετία με μεγαλύτερη ακρίβεια, συνυπολογίζεται και ο θερμοκρασιακός παράγοντας με τη βοήθεια του δείκτη SPEI. Η θερμοκρασία διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο, λόγω της επίδρασης της στον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής. Ο δείκτης SPEI, λαμβάνει υπόψη την ET μέσω των θερμοκρασιακών δεδομένων και έχει τη δυνατότητα υπολογισμού σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευέλικτος ως προς τις περιοχές μελέτης και εύχρηστος (Vicente-Serrano et al.,2010). Τα παρακάτω γραφήματα του SPEI πραγματοποιήθηκαν για διάφορα χρονικά διαστήματα (1-μηνια, 3-μηνια, 12-μηνια), αποκαλύπτουν τις διαφορές σε σχέση με αυτά του δείκτη SPI και βοηθούν στην κατανόηση του ρόλου της θερμοκρασίας στο πεδίο μελέτης ξηρασιών. Ο δείκτης SPEI ενσωματώνοντας το θερμοκρασιακό παράγοντα και συνδυάζοντας τις μεταβολές των βροχοπτώσεων, επιτρέπει τη δημιουργία μίας πιο σφαιρικής εκτίμησης της έντασης της ξηρασίας. Στην περίπτωση των Χανίων και λαμβάνοντας υπόψη και τα θερμοκρασιακά δεδομένα αποκαλύπτεται μια μεγάλη περίοδος (2007-2009) ήπιων ξηρασιών με κορύφωση το έτος 2007, κατά την οποία και οι δύο δείκτες ανταποκρίνονται παρόμοια. Η προφανής έλλειψη των βροχοπτώσεων, υποδηλώνει τις αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια και παράλληλα την αύξηση της ET. Από το SPEI-3, αποκαλύπτεται πιο έντονα σε σχέση με το διάγραμμα SPI-3, η ξηρασία του 2017, τονίζοντας τη σημασία της θερμοκρασίας στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το 2017 ο SPEI-12 λαμβάνει τιμές ίσες με -2 για μεγαλύτερο

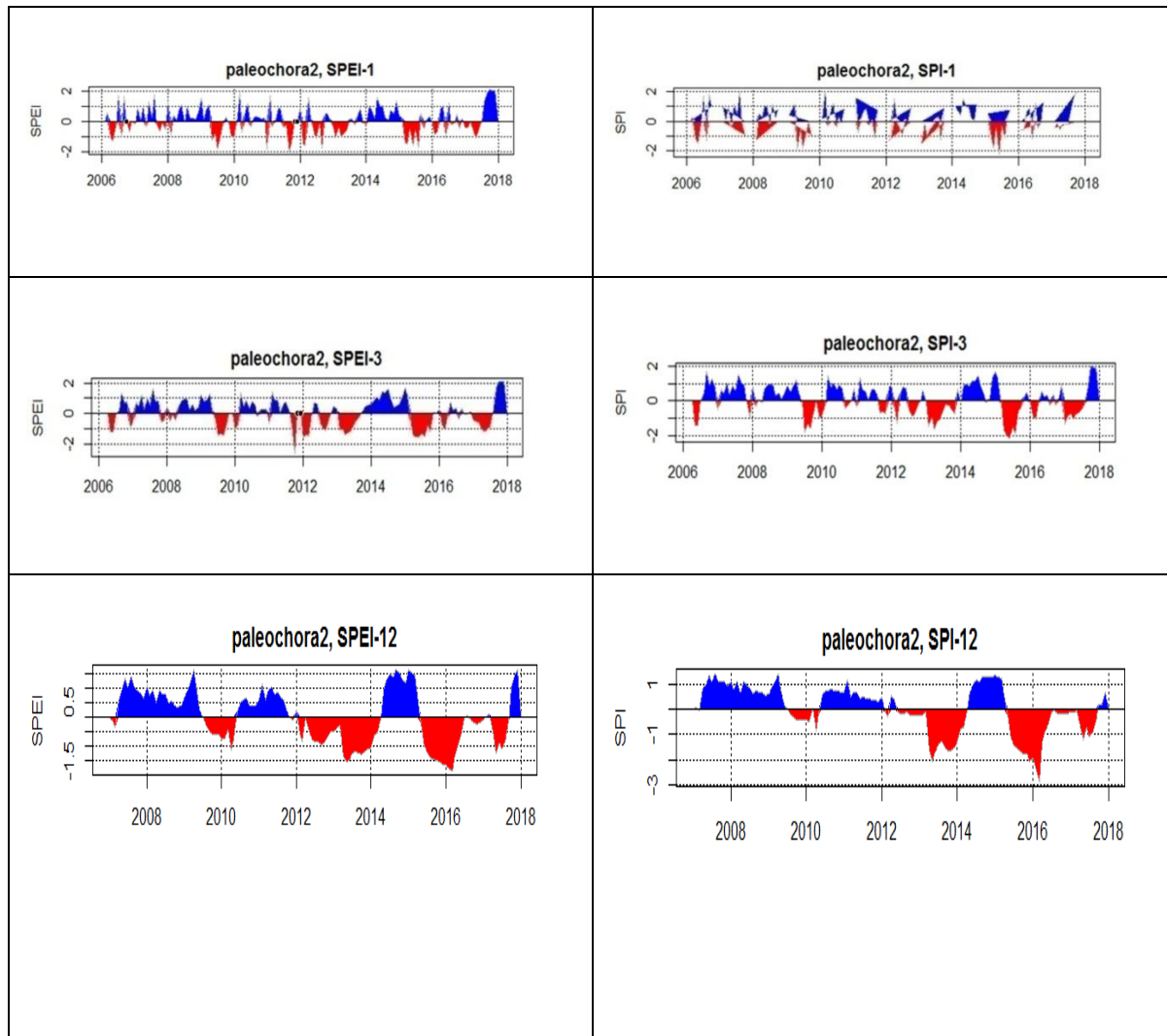
χρονικό διάστημα σε σχέση με τον SPI-12, δεδομένο που αποκαλύπτει ότι η θερμοκρασία ήταν αρκετά υψηλή και ενίσχυσε τη σοβαρότητα της κατάστασης.



Γράφημα 12: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή των Χανίων το χρονικό διάστημα 2010-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

Στην περιοχή της Παλαιόχωρας, είναι προφανές ότι μέσω του SPEI, διακρίνονται περισσότερες ξηρασίες, όπως αυτή στις αρχές του 2006 που στο διάγραμμα του SPI-12 δεν είναι ορατή. Ο παράγοντας της θερμοκρασίας είναι καθοριστικός, καθώς διαπιστώνεται ότι ο SPEI λαμβάνει πιο αρνητικές τιμές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το γενικότερο πρότυπο της διάρκειας και έντασης της ξηρασίας δεν διαφοροποιείται ισχυρά. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι μέσω του SPI, δεν είναι ορατή η έναρξη της ξηρασίας από το έτος 2012, αλλά μόνο το 2013, όπου ο SPI λαμβάνει ξαφνικά ακραίες τιμές. Μέσω του SPEI-12, γίνεται καλύτερα αντιληπτή η εξέλιξη και επιδείνωση της ξηρασίας, η οποία ξεκινά από το 2012 και κλιμακώνεται μέχρι και το 2014. Όσον αφορά στην περίοδο 2016 και 2017, παρατηρούμε και από τα 3-μηνια χρονοδιαγράμματα, ότι ο SPI λαμβάνει πολύ πιο ακραίες τιμές σε σχέση με τον SPEI. Αυτή η διαφορά, πιθανόν να εξηγείται στο γεγονός ότι το 2015 οι βροχοπτώσεις, με βάση τον SPEI, παρουσιάστηκαν πιο έντονες και πιο πολλές, με αποτέλεσμα το υδατικό ισοζύγιο να εξισορροπήθηκε και να μετρίασε την ξηρασία που ακολούθησε. Συνολικά, όπως φαίνεται από τα μεγαλύτερης διάρκειας χρονοδιαγράμματα των 12 μηνών, ο SPEI μπόρεσε να ανταποκριθεί στην άνοδο της θερμοκρασίας σε αντίθεση με τον SPI, αποκαλύπτοντας ξηρασίες μεγαλύτερου μεγέθους και διάρκειας. Η αυξημένη τάση της θερμοκρασίας φαίνεται από τον SPEI κυρίως τη χρονική περίοδο 2013-2014, με την επικράτηση τελικά μεγάλης διάρκειας περιόδου ξηρασίας. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, δείχνουν να ανταποκρίνονται με παρόμοιο τρόπο και οι δύο δείκτες, γεγονός που μας αποκαλύπτει ότι υπήρξε χαμηλή

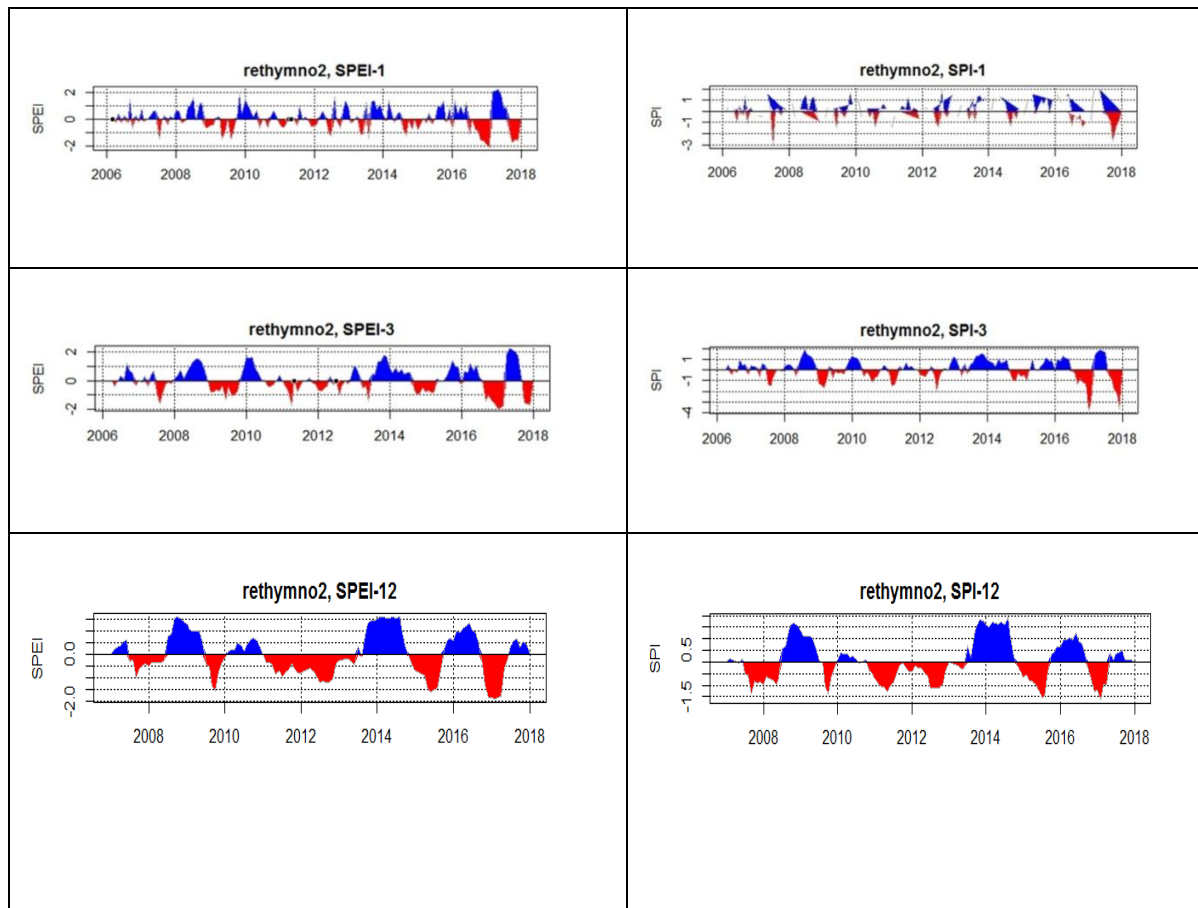
μεταβλητότητα στη θερμοκρασία και καθοριστικό ρόλο έπαιξαν οι διακυμάνσεις των βροχοπτώσεων.



Γράφημα 13: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή της Παλαιόχωρας το χρονικό διάστημα 2006-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

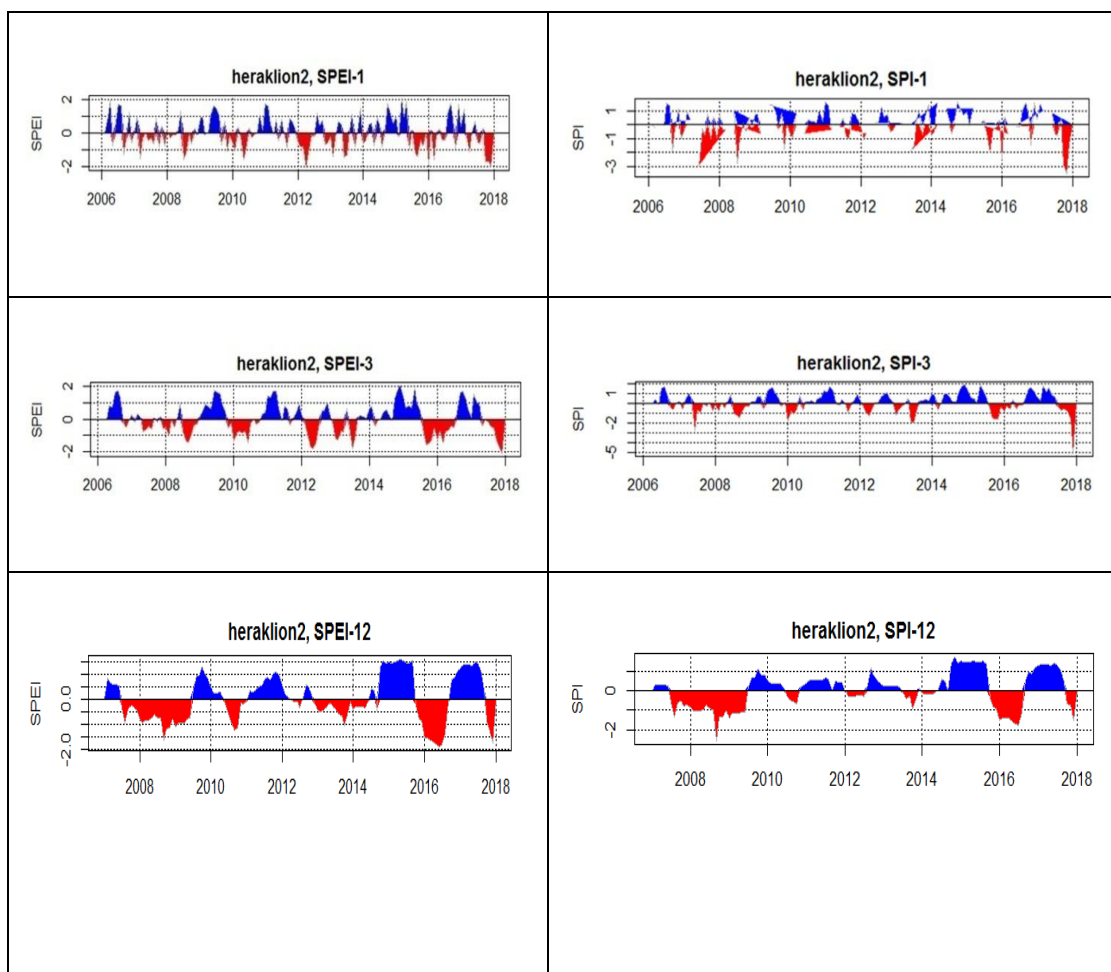
Παρατηρώντας τον SPI-3, στην περιοχή του Ρεθύμνου, για τα έτη 2017 και 2018, στα οποία έλαβαν χώρα δύο πολύ έντονες ξηρασίες ,παρατηρείται ότι ο δείκτης προσεγγίζει την τιμή -4, σε αντίθεση με τον SPEI που πλησιάζει το -2. Με βάση τον SPI, θεωρώντας μόνο το ύψος και τη συχνότητα των βροχοπτώσεων, συμπεραίνεται ο ελάχιστος αριθμός των βροχοπτώσεων και με βάση τον SPEI, πιθανόν ο συνδυασμός των ελάχιστων βροχοπτώσεων με υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, με συνέπεια η βαρύτητα των φαινομένων αυτών να ελαχιστοποιείται ως έναν βαθμό (SPEI-3) και να εξελίσσεται στη διάρκεια του χρόνου πιο ομαλά σε σχέση με τον SPI-3. Είναι, έτσι κατανοητή η σημασία της βροχόπτωσης στην ξηρασία, αλλά εξίσου και η συμβολή της θερμοκρασίας στην εξομάλυνση ή χειροτέρευση της κατάστασης. Επιπλέον, παρατηρείται από τα 12-μηνα χρονοδιαγράμματα, ότι το διάστημα 2014-2018, ακολουθούν παρόμοιο ρυθμό, που σημαίνει ότι χωρίς τα θερμοκρασιακά δεδομένα και μόνο με τον δείκτη SPI, τα αποτελέσματα είναι αρκετά κατατοπιστικά και έγκυρα. Μέσα στο διάστημα 2009-2013, όμως, ο αριθμός των ξηρασιών που απεικονίζονται στον SPEI-12 είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τον SPI-12, καθώς επίσης ο SPI λαμβάνει πιο αρνητικές τιμές και

εναλλάσσεται απότομα. Σε αυτήν την περίπτωση, λοιπόν, ο SPEI είναι περισσότερο αντικειμενικός, δίνοντας αποτελέσματα τα οποία φαίνονται πιο αντιπροσωπευτικά στην πραγματικότητα.



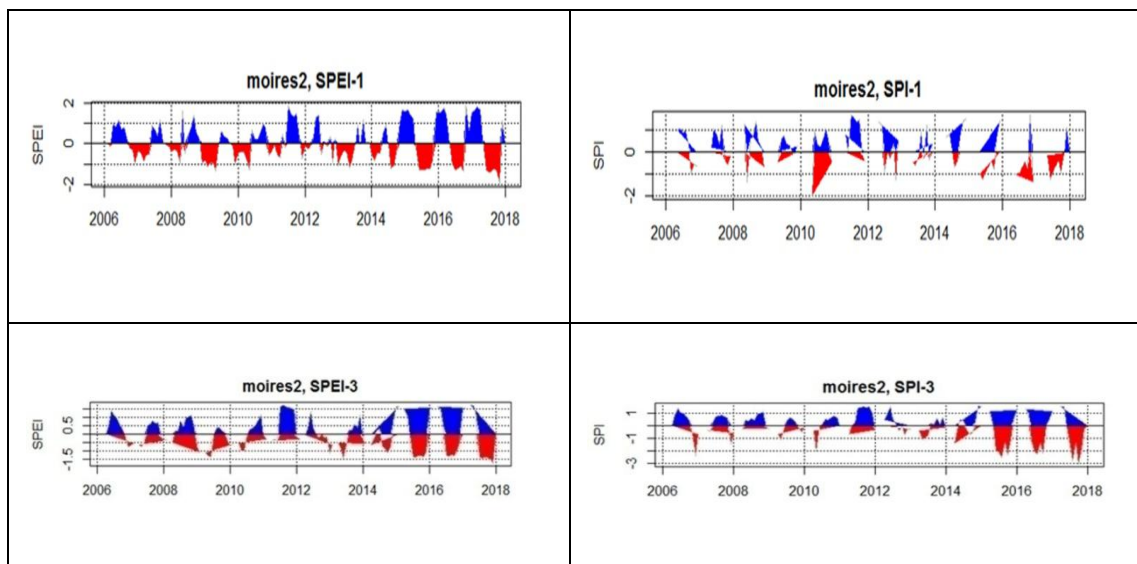
Γράφημα 14: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή του Ρεθύμνου το χρονικό διάστημα 2007-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

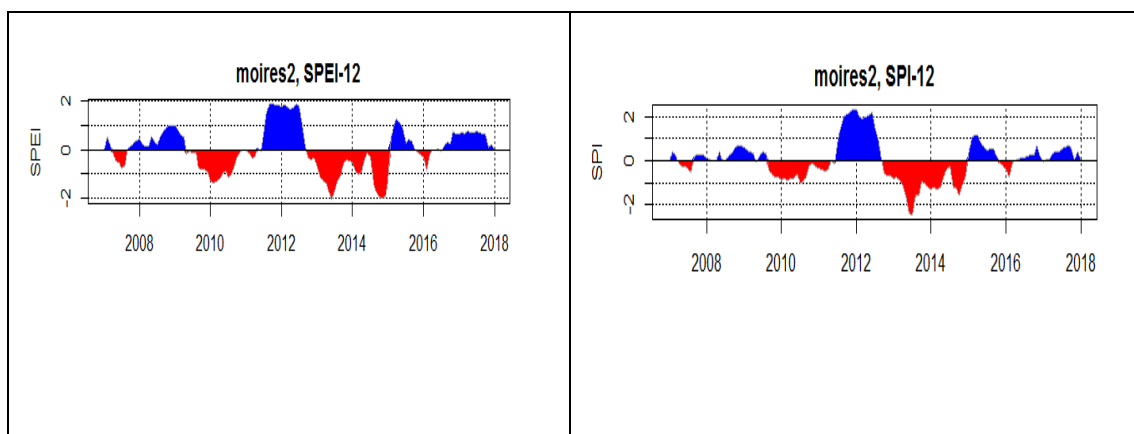
Για το Ηράκλειο, ανάμεσα στα SPI-1 και SPEI-1 διαπιστώνονται διαφορές ως προς το μέγεθος και τον αριθμό των ξηρασιών που λαμβάνουν χώρα ανά μήνα. Παρόλο που και οι δύο δείκτες έχουν το πλεονέκτημα ότι ανταποκρίνονται γρήγορα από υγρές σε ξηρές συνθήκες, ο SPEI συνυπολογίζοντας τη θερμοκρασία είναι πιο έγκυρος στα αποτελέσματα, καθώς αποκαλύπτει περισσότερες ξηρασίες. Συνυπολογίζοντας τους δείκτες SPEI-1 και SPI-1, είναι αναμενόμενο να αυξάνεται ο αριθμός των ξηρασιών και να μειώνεται η διάρκειά τους. Αυτά τα διαγράμματα, μπορούν να φανούν χρήσιμα για την εξέταση της συμπεριφοράς των επιφανειακών υδάτων, αφού ο κάθε μήνας που προστίθεται είναι πολύ σημαντικός στη διεξαγωγή των συμπερασμάτων. Σύμφωνα με τον SPEI-1 φαίνεται ότι το 2012 και 2013 συνέβησαν τρεις σοβαρές ξηρασίες, οι οποίες δεν είναι εμφανείς στο αντίστοιχο διάγραμμα του SPI. Σε γενικό βαθμό, η διακύμανση της θερμοκρασίας ανά μήνα φαίνεται ότι δημιουργεί μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα των δύο δεικτών. Με την αύξηση των χρονικών περιόδων εξέτασης, η ξηρασία του 2012-2013 φαίνεται μόνο από τον SPEI-12, ο οποίος φανερώνει μεταβολές προς ισχυρότερης μοργής ξηρασίας, καθώς επίσης και σε συνολικό βαθμό, το μέγεθος καταγραφής των γεγονότων παρουσιάζεται πιο μεγάλο σε σχέση με τον SPI-12. Έτσι, γίνεται αντιληπτή η ανοδική θερμοκρασιακή τάση στην περιοχή μόνο από τον SPEI, ο οποίος μπορεί να παρέχει πληροφορίες τόσο σε μικρότερες όσο και σε μεγαλύτερες περιόδους εξέτασης.



Γράφημα 15: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή του Ηρακλείου το χρονικό διάστημα 2006-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

Τα χρονοδιαγράμματα SPI-1 και SPEI-1 για τους δύο δείκτες και για την περιοχή των Μοιρών παρουσιάζουν κάποιες διαφορές, ιδιαίτερα όσον αφορά στην ένταση των ξηρασιών του διαστήματος 2014-2018, όπου ο δείκτης SPEI εξηγεί με μεγαλύτερη σαφήνεια και πληρότητα τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα SPI-3 και SPEI-3 παρουσιάζουν διαφορές το χρονικό διάστημα 2006-2010 και 2012-2014, όπου ο SPEI αποκαλύπτει μεγαλύτερες ξηρασίες. Το ίδιο συμβαίνει και στα μεγαλύτερης διάρκειας χρονοδιαγράμματα των 12 μηνών, τα οποία, αν και δεν έχουν κάποια διαφορά στον αριθμό των ξηρασιών, η αλλαγές στην ένταση των ξηρασιών και των βρχοπτώσεων είναι προφανείς, γεγονός που οφείλεται στην ευαισθησία του δείκτη SPEI στις θερμοκρασιακές μεταβολές που έλαβαν χώρα εκείνο το διάστημα στην περιοχή των Μοιρών. Έτσι, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί καλύτερη αξιολόγηση μέσω του SPEI και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα και πρωτοβουλίες από τις αρμόδιες αρχές.

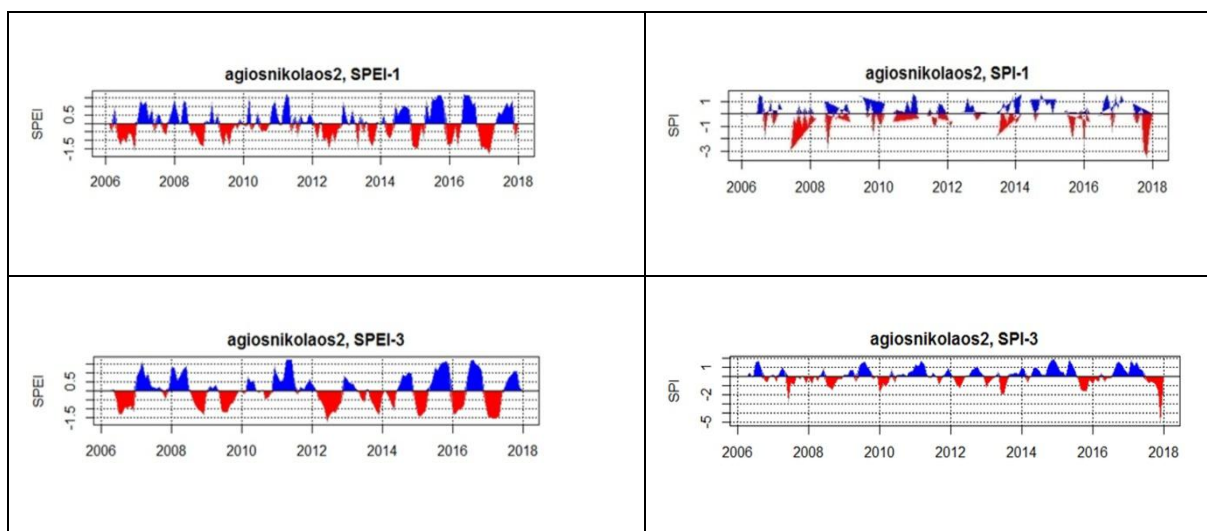


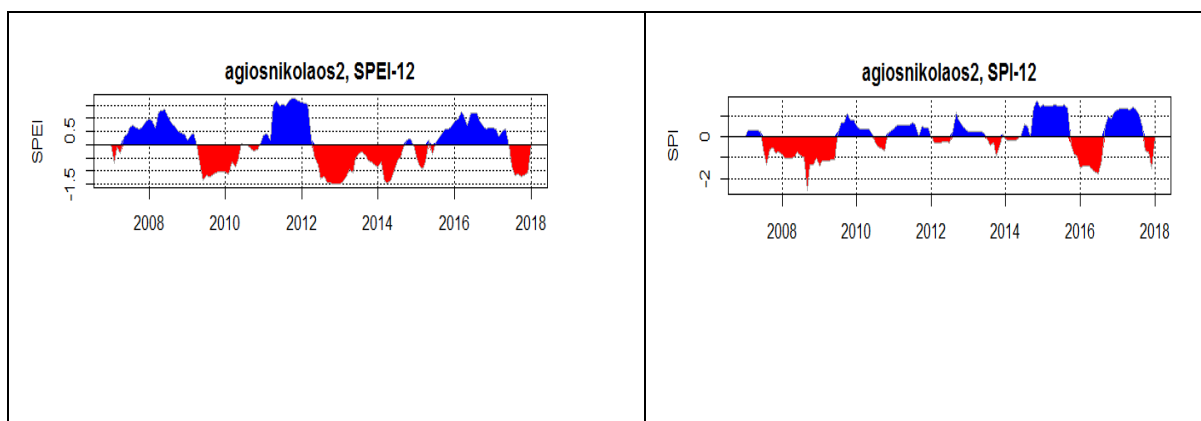


Γράφημα 16: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή των Μοιρών το χρονικό διάστημα 2010-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

Όπως είναι προφανές και για τα 3 χρονοδιαγράμματα ανάμεσα στους δύο δείκτες, υπάρχουν σημαντικές διαφορές που δεν ήταν αναμενόμενες. Πιο συγκεκριμένα, για τα SPEI-1 και SPI-1, η περίοδος των βροχοπτώσεων στα μέσα του 2015 είναι εμφανής και στα δύο διαγράμματα, όμως, φτάνοντας στο 2017, η έντονη ξηρασία που διακρίνεται από τον SPEI, δεν φαίνεται να επηρεάζει τον SPI. Επιπλέον, η ξηρασία του 2007 που αποτυπώνεται από το SPEI-3 με τιμές του δείκτη κοντά στο -2, μέσω του SPI-3 δεν καταγράφεται τόσο έντονη, αφού πλησιάζει το -1.5. Αυτό, βέβαια, γίνεται ακόμα πιο

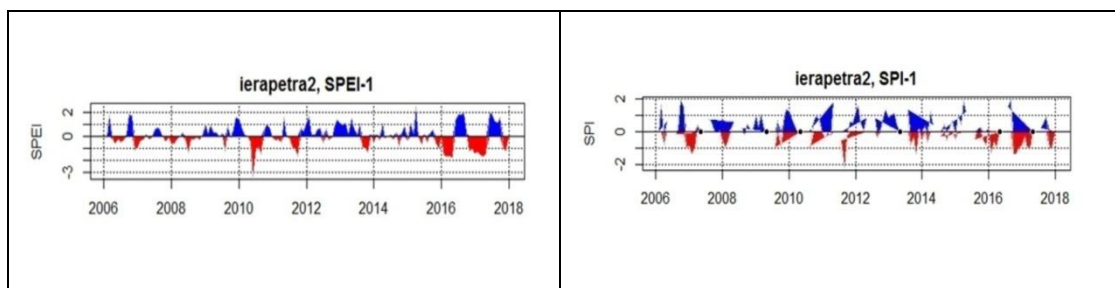
προφανές από τα χρονοδιαγράμματα μεγαλύτερης διάρκειας, όπου την περίοδο 2007-2009 ο SPI φανερώνει πολύ σοβαρή και με έντονη διάρκεια ξηρασία, ενώ ο SPEI δέχεται μόνο θετικές τιμές. Σε γενικό βαθμό, τα τελευταία χρονοδιαγράμματα είναι ανόμοια, εκτός από 2017 όπου και τα δύο αποφαίνονται περίοδο βροχοπτώσεων και στη συνέχεια φαινόμενο μέτριας ξηρασίας. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά του κλίματος, στην περίπτωση του Αγίου Νικολάου, ο δείκτης SPI δείχνει να μην ανταποκρίνεται, ειδικότερα σε βάθος χρόνου, στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Στην περίπτωσή μας, για το λόγο ότι το αντικείμενο μελέτης μας είναι ο γεωργικός τομέας, η εξέταση των επιπτώσεων της ξηρασίας με τη βοήθεια των δεικτών αρκείται στους 6 και λιγότερο μήνες. Επομένως, ο SPI θα μπορούσε να ανταποκριθεί στο χρονοδιάγραμμα μικρότερης χρονικής περιόδου (3 μήνες) με εξαίρεση τα τελευταία χρόνια, όπου αρχίζει να διαφέρει από τον SPEI.

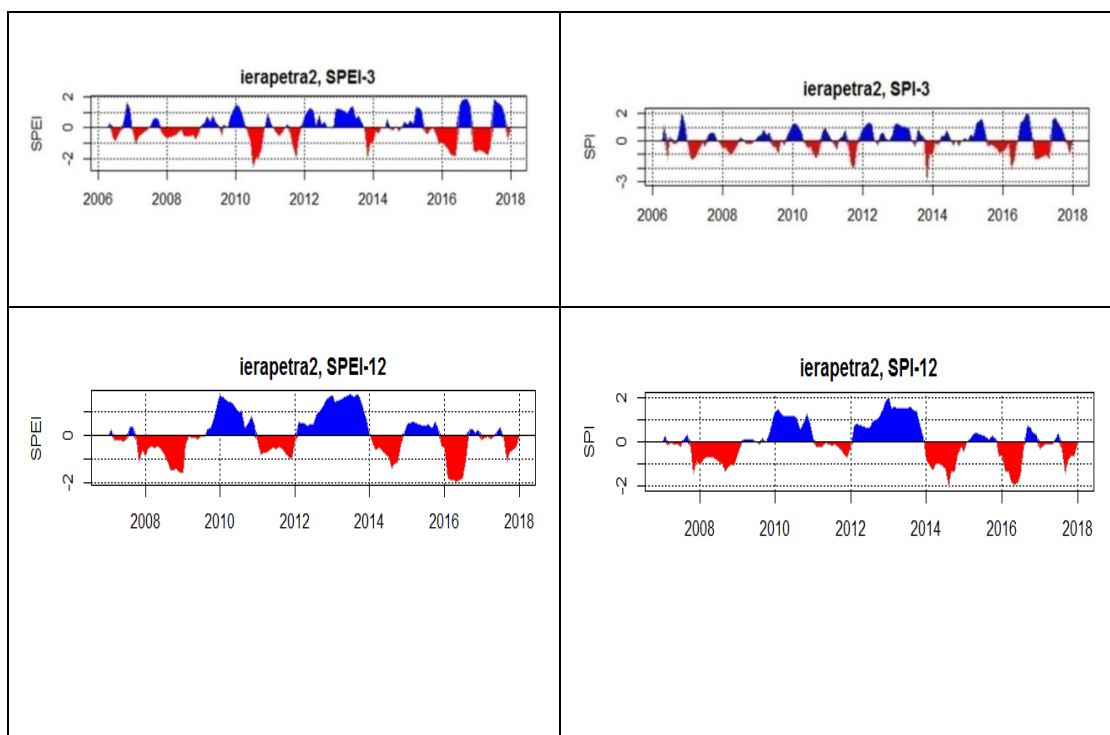




Γράφημα 17: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή του Αγίου Νικολάου το χρονικό διάστημα 2009-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

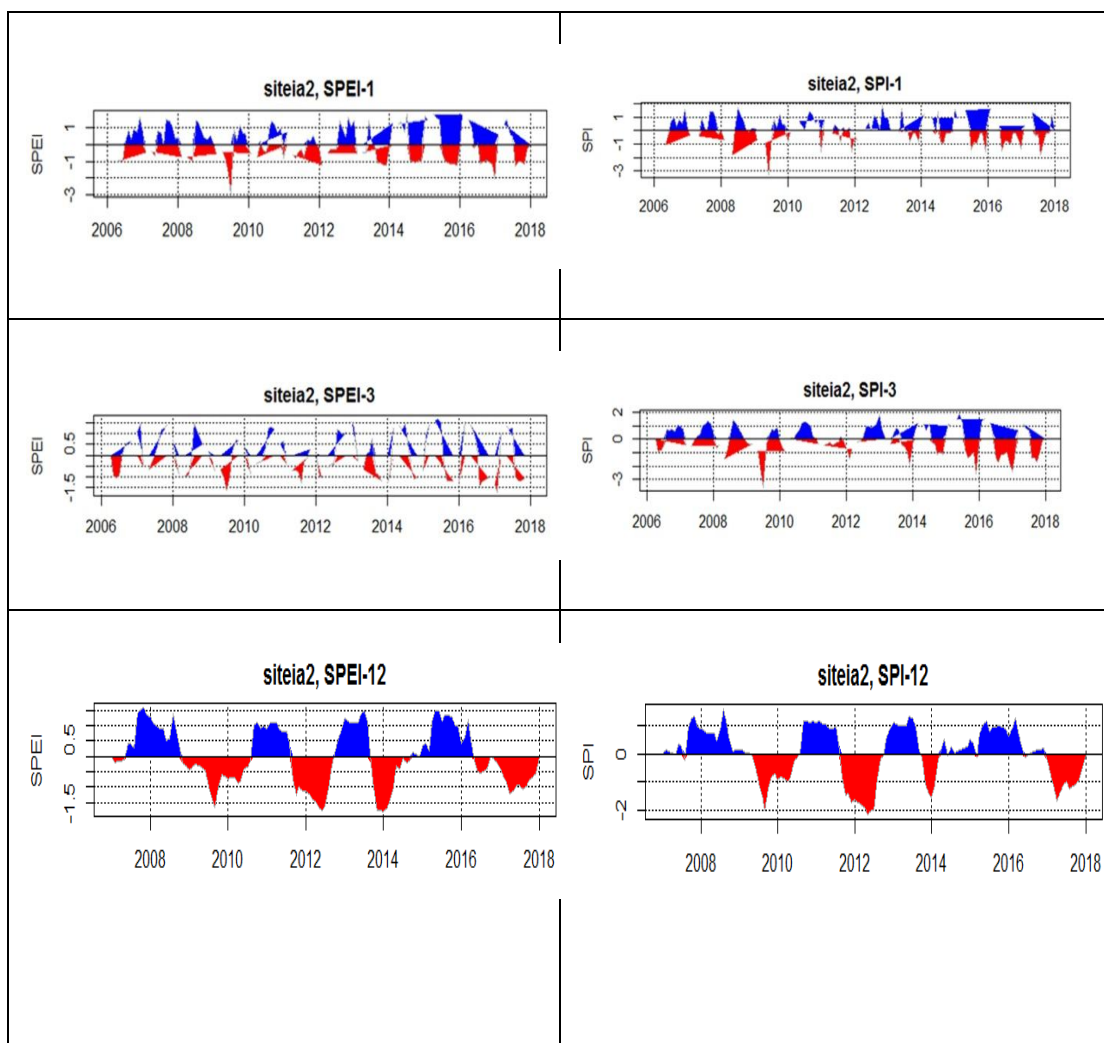
Στην περιοχή της Ιεράπετρας, είναι προφανείς κάποιες μικρές διαφορές μεταξύ των διαγραμμάτων, ανεξάρτητα από τα χρονικά διαστήματα εξέτασης. Στα SPEI-12 και SPI-12, παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία, με εξαίρεση το έτος 2011, όπου ο SPEI αποτυπώνει πιο έντονα το φαινόμενο ξηρασίας, καθώς και το 2014 όπου ο SPI δείχνει με μεγαλύτερη ένταση το συγκεκριμένο γεγονός. Ίσως, αυτό να οφείλεται στις όχι τόσο έντονες σε σχέση με τον SPEI βροχοπτώσεις το προηγούμενο διάστημα, όπως διακρίνεται κυρίως από τα SPI-3 και SPEI-3. Συνολικά, λόγω της παρόμοιας ανταπόκρισης των δύο δεικτών, στην υπό εξέταση περιοχή δεν πραγματοποιήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας για την τελευταία δεκαετία, με αποτέλεσμα και ο SPI και ο SPEI να εξαρτώνται κυρίως από τη μεταβλητότητα των δεδομένων των βροχοπτώσεων για τον υπολογισμό τους.





Γράφημα 18: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή της Ιεράπετρας το χρονικό διάστημα 2008-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

Για τη περιοχή της Σητείας, ο δείκτης SPEI δείχνει να ανταποκρίνεται καλύτερα στα φαινόμενα ξηρασίας, καθώς τα έτη 2009, 2014 και 2017, καταγράφει τα γεγονότα ξηρασίας με μεγαλύτερη διάρκεια και μέγεθος. Αυτό οφείλεται στην άνοδο της θερμοκρασίας εκείνες τις περιόδους, όπως διαπιστώνεται από τα θερμοκρασιακά δεδομένα, η οποία ενίσχυσε τη σοβαρότητά τους, λόγω των υψηλότερων ποσοστών σε απαιτήσεις νερού. Παρόλα αυτά, σε γενική εικόνα, η μείωση των βροχοπτώσεων και κυρίως τον τελευταίο χρόνο καταγράφεται και από τους δύο δείκτες, συνοδευτικά με γεγονότα ξηρασίας.



Γράφημα 18: Σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI για την περιοχή της Σητείας το χρονικό διάστημα 2010-2017, για χρονικά διαστήματα 1, 3 και 12 μηνών.

4. Συζήτηση

Κύριος στόχος της παρούσας μελέτης ήταν η εξέταση της αποτελεσματικότητας των δεικτών SPI και SPEI, στην απεικόνιση των γεγονότων ξηρασίας σε επιλεγμένες περιοχές της Κρήτης. Οι αναλύσεις των χρονοσειρών διάρκειας 1, 3 και 12 μηνών που διεξήχθησαν με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPEI (Beguería and Vicente-Serrano, 2007), έδειξαν ότι και οι δύο δείκτες ανταποκρίθηκαν με σωστό και αναμενόμενο τρόπο στην απεικόνιση της σοβαρότητας των ξηρασιών στις περισσότερες περιοχές μελέτης, καταλήγοντας σε παρόμοια συμπεράσματα όσον αφορά στη διάρκεια και ένταση των φαινομένων ξηρασίας. Από τις συγκρίσεις των διαγραμμάτων

των δεικτών SPEI και SPI, διαπιστώθηκαν ωστόσο κάποιες διαφορές σε ορισμένες χρονικές περιόδους ξηρασίας, στις οποίες ο ρόλος των αυξημένων τιμών της θερμοκρασίας ήταν ιδιαίτερα προφανής. Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή του Αγίου Νικολάου, όπου οι δύο δείκτες διαφοροποιήθηκαν σημαντικά, γεγονός που ενισχύει την ικανότητα του δείκτη SPEI στην απεικόνιση έντονων μορφών ξηρασίας, σε αντίθεση με τον SPI. Γενικά, ο SPEI ανταποκρίνεται πιο αντικειμενικά και στα τρία χρονοδιαγράμματα σε κάθε περιοχή μελέτης. Ο δείκτης SPEI, λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο της ET, μέσω των μεταβολών της θερμοκρασίας, απεικονίζει τα φαινόμενα ξηρασίας με μεγαλύτερη ένταση, δίνοντας τη δυνατότητα κατανόησης των συνεπειών της και καλύτερης διαχείρισης του κινδύνου σε περίπτωση παρόμοιας μελλοντικής ξηρασίας. Ακόμη, η ομοιότητα στα αποτελέσματα των διαγραμμάτων μεταξύ των δύο δεικτών, έγκειται στη μικρότερη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας σε σχέση με τη βροχόπτωση διαχρονικά, με αποτέλεσμα οι δύο δείκτες να επικεντρώνονται στη διακύμανση των βροχοπτώσεων. Τα τελευταία χρόνια και συγκεκριμένα τη χρονική περίοδο 2014-2018, παρατηρήθηκε στα περισσότερα διαγράμματα, της βόρειας κυρίως πλευράς του νησιού (Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Άγιο Νικόλαο) μια έντονης μορφής διακύμανση των φαινομένων ξηρασίας και βροχόπτωσης. Ωστόσο, με δεδομένη την μικρή σχετικά διάρκεια των μελετούμενων χρονοσειρών, η παρατηρούμενη τα τελευταία έτη αύξηση της έντασης και διάρκειας της ξηρασίας δεν μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως και με ασφάλεια ότι πρόκειται για κλιματική μεταβολή. Αντίθετα, στις νότιες περιοχές της Ιεράπετρας και Παλαιόχωρας επικράτησαν σημαντικά πιο ξηρές περίοδοι τα τελευταία 3 χρόνια, ενώ η περιοχή των Μοιρών δεν ακολούθησε το ίδιο πρότυπο, γεγονός

που αποδίδεται στην αύξηση του ύψους των βροχοπτώσεων, οι οποίες επισκίασαν τις ξηρές ενδιάμεσες περιόδους. Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, παρόλο που επιδέχονται κάποιες διαφορές και οφείλονται στο ποικίλο γεωμορφολογικό υπόβαθρο του νησιού καθώς επίσης και στο κλίμα της Ανατολικής Μεσογείου, το οποίο χαρακτηρίζεται για την ηπιότητα και τη μεταβλητότητά του από περιοχή σε περιοχή. Η βόρεια πλευρά, δέχεται συνήθως περισσότερες βροχοπτώσεις και το νοτιοανατολικότερο άκρο σημαντικά μικρότερη ποσότητα (Chartzoulakis et al., 2001). Με αυτόν τον τρόπο, η Ιεράπετρα και η Παλαιόχωρα είναι οι περιοχές που αντιμετωπίζουν το μεγαλύτερο πρόβλημα μεγάλης διάρκειας και έντονων ξηρασιών το τελευταίο διάστημα.

Παρόλα αυτά, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην ποσότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Έχει μελετηθεί ότι το ιδανικό απαιτούμενο μέγεθος μιας περιόδου βροχοπτώσεων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 30 ετών, χωρίς ενδιάμεση διακοπή (Mckee et al., 1993). Στην περίπτωση μας, τα δεδομένα μας καλύπτουν τη 12ετία, γεγονός που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όσον αφορά στην αξιοπιστία των συμπερασμάτων που μπορούν να διεξαχθούν, δεδομένου ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες ενσωματώνουν την επίδραση παλαιότερων τιμών των μεταβλητών και με αυτόν τον τρόπο προσαρμόζονται στη μνήμη του υπό μελέτη συστήματος (Beguería et al., 2017). Έτσι, ο περιορισμένος αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων, θα πρέπει να μας επιφυλάσσει σχετικά με την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης μελέτης.

Τέλος, ανεξάρτητα από τις υπολογιζόμενες τιμές των δεικτών SPI και SPEI, οι τελικές επιπτώσεις στην παραγωγή των καλλιεργειών εξαρτώνται από την υγρασία του εδάφους, που παίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγικότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Η βροχόπτωση ναι μεν μπορεί να επηρεάζει άμεσα τις υδάτινες απορροές και την εξάτμιση, όχι όμως απαραίτητα και την υγρασία του εδάφους, η οποία εξαρτάται σημαντικά από τις ιδιότητες του εδάφους (οργανικό υλικό, υφή) αλλά και από τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων (ένταση, διάρκεια). Σε συνθήκες περιορισμένης υγρασίας του εδάφους, μειώνεται η βλάστηση, καθώς και ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης περιορίζεται με το κλείσιμο των στομάτων, περιορίζοντας και τη διαπνοή. Αυτό έχει σα συνέπεια, σημαντικές μειώσεις στην αγροτική παραγωγή και σε μεγαλύτερη κλίμακα την καταστροφή και τη θνησιμότητα των δασών(Vicente-Serrano et al., 2018).

Παρά τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα, μελέτες που συμπεριλαμβάνουν τη σύγκριση του SPEI με άλλους δείκτες, έδειξαν ότι είναι ο πιο κατάλληλος για την παρακολούθηση ανωμαλιών της υγρασίας του εδάφους όσον αφορά στις αγροτικές δραστηριότητες (Vicente- Serrano et al., 2018) και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός τους θερινούς μήνες, όπου η παραγωγή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην ξηρασία (Vicente-Serrano et al., 2012). Επιπλέον, υποστηρίζεται ότι δείκτες ξηρασίας που λαμβάνουν υπόψη την ET σε περιπτώσεις αγροτικής ξηρασίας, ανταποκρίνονται με καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλους δείκτες (Narasimhan and Srinivasan, 2005), που λαμβάνουν υπόψη μόνο τη βροχόπτωση, αφού η ET καθορίζει ποικίλους παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος, τη φυσιολογία της βλάστησης κάθε περιοχής, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τη

φαινολογία, τη μορφολογία καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των παραγόντων (Vicente-Serrano, 2018). Παρόμοια αποτελέσματα έδειξε μελέτη, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δεικτών SPI και SPEI (Vicente-Serrano et al., 2009). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο SPEI αποτυπώνει αντικειμενικότερα τη σοβαρότητα μιας ξηρασίας, για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (π.χ. 1, 3, 12 μήνες), αναγνωρίζοντας την αρχή και το τέλος της σε περιοχές όπου η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 2°C και 4°C, σε αντίθεση με τον SPI. Και σε αυτήν την περίπτωση, όμως, η ένταξη της ET στον υπολογισμό του SPEI, επηρεάζει το δείκτη μόνο όταν η ET διαφέρει από τις μέσες αναμενόμενες τιμές τις, δηλαδή σε συνθήκες σημαντικής άυξης της θερμοκρασίας. Διαφορετικά, η βροχόπτωση είναι η μεταβλητή που κυριαρχεί και καθορίζει τα γεγονότα ξηρασίας και σε αυτή την περίπτωση, ο SPI ανταποκρίνεται παρόμοια με τον SPEI.

Τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μελέτης σχετίζονται με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, λόγω του μικρού αριθμού των δεδομένων (12 έτη). Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που υπάρχουν στη διάθεσή μας είναι μόνο βροχοπτώσεων και θερμοκρασίας. Με δεδομένο ότι μας ενδιαφέρει η εξέλιξη των ξηρασιών και οι πιθανές συνέπειες αυτών σε αγροτικό επίπεδο, τιμές της ταχύτητας του ανέμου, της σχετικής υγρασίας καθώς και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, θα μας διευκόλυναν στην κατανόηση της σχέσης μιας ξηρασίας με τους γεωμορφολογικούς παράγοντες κάθε εξεταζόμενης περιοχής (Zipper et al., 2016). Ακόμη, πολύ χρήσιμα θα ήταν δορυφορικά δεδομένα υγρασίας του εδάφους, από τα οποία θα μπορούσε να προκύψει μια συνολική εκτίμηση της ισορροπίας της βροχόπτωσης, της εξάτμισοδιαπνοής και της απορροής, λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερήσεις που προκαλούνται από

διαδικασίες όπως η διήθηση και των επιπτώσεων από ανωμαλίες μετεωρολογικού υποβάθρου, όπως η θερμοκρασία και η ακτινοβολία (Sheffield and Wood, 2007). Κατά την ορολογία της ξηρασίας, η μεταβλητή της υγρασίας του εδάφους κατατάσσεται μεταξύ μιας μετεωρολογικής ξηρασίας κατά τη οποία είναι διακριτό το έλλειμμα βροχόπτωσης και υδρολογικής ξηρασίας, όπου γίνεται αισθητή η μείωση των αποθεμάτων υπόγειου και επίγειου νερού καθώς επίσης μπορεί να αντικατοπτρίσει μια αγροτική ξηρασία (περιορισμένη υγρασία εδάφους οδηγεί σε αυξημένη ζήτηση νερού από τα φυτά).

Επίσης, ο συνδυασμός των φαινομένων ξηρασίας και καύσωνα συνεπάγεται ακόμη πιο σοβαρές συνέπειες, από ότι αν δρούσαν τα δύο φαινόμενα ξεχωριστά. Με αυτή τη λογική, θα ήταν πολύ χρήσιμο να λαμβάνονταν χρονολογικά υπόψη οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας (για μεγάλο χρονικό διάστημα) και ιδιαίτερα κατά την διάρκεια ευαίσθητων αναπτυξιακών σταδίων των καλλιεργειών, όπως η άνθιση (Μάιος έως Σεπτέμβρης), με στόχο να αποκαλυφθεί ο βαθμός που επηρεάζει την κατάσταση ένα τέτοιου είδους φαινόμενο συνδυαστικά με το ιστορικό των ξηρασιών.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται από τα χρονοδιαγράμματα 12 μηνών, αυξημένη συχνότητα περιόδων ξηρασίας με εναλλασσόμενες περιόδους βροχοπτώσεων στην Κρήτη, που οφείλεται σε πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένου της αυξημένης θερμοκρασίας και της κακής διαχείρισης των ενδεχόμενων επιπτώσεων μιας ξηρασίας από τους αρμόδιους φορείς. Από πρόσφατη μελέτη, η συχνότητα της ξηρασίας βρέθηκε μεγαλύτερη στις νοτιότερες και δυτικότερες περιοχές της Ευρώπης και

ειδικότερα στις περιοχές της Μεσογείου, με 3 σοβαρές ξηρασίες ανά δεκαετία τη χρονική περίοδο 1980-2010 και με αυξανόμενη τάση σε συχνότητα και διάρκεια τις τελευταίες δεκαετίες του 21^{ου} αιώνα. Παρόλα αυτά, μελετώντας το άμεσο (2041-2070) και μακρύ μέλλον (2070-2100), βρέθηκε ότι οι νοτιοδυτικότερες ευρωπαϊκές χώρες, τα Βαλκάνια, η Δανία και η νότια Σκανδιναβία πρόκειται να αντιμετωπίσουν πιο σοβαρά φαινόμενα ξηρασίας το διάστημα 2041–2070 σε σχέση με αυτό της περιόδου 1981–2010 με πιο μεγάλο κίνδυνο να αντιμετωπίζει η Γαλλία και η Ελλάδα, σύμφωνα με το ένα από τα δύο μοντέλα προσομοίωσης (Spinoni et al., 2017). Επιπλέον στη νότια Ευρώπη, φαίνεται να επικρατεί αυξητική τάση όσον αφορά στη συχνότητα ακραίων γεγονότων βροχόπτωσης σε συνδυασμό με μια γενική μείωση της συνολικής μέσης βροχόπτωσης (Nikulin et al., 2011; Heinrich and Gobiet, 2012) και μία προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνοντας το κίνδυνο σοβαρών κυμάτων καύσωνα (Beniston et al., 2007), με αποτέλεσμα να πιθανολογείται αύξηση της συχνότητας και της σοβαρότητας των γεγονότων ξηρασίας.

4.1 Μέτρα διαχείρισης των συνεπειών των φαινομένων ξηρασίας

Η πολυπλοκότητα του φαινομένου της ξηρασίας, δεν το καθιστά απλά ως ένα φυσικό φαινόμενο, καθώς αποτελεί συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα σε ένα φυσικό φαινόμενο και των απαιτήσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε νερό και άλλους φυσικούς πόρους. Η μη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων λόγω των αυξημένων απαιτήσεων, αποτελεί σύνηθες και πολύ ανησυχητικό φαινόμενο τα τελευταία χρόνια και πολύ ανησυχητικό καθώς είναι δυνατόν να επιδεινώσει σημαντικά τις επιπτώσεις φυσικών καταστροφών συμπεριλαμβανομένης και της ξηρασίας. Οι συνέπειες της ξηρασίας είναι άμεσες και έμμεσες και χαρακτηρίζονται ως οικονομικές, περιβαλλοντικές και

κοινωνικές. Τα αποτελέσματα μιας ξηρασίας, για παράδειγμα, μπορεί να επιμένουν για χρόνια μετά την αποκατάσταση του ελλείμματος της βροχόπτωσης, πλήττοντας σημαντικά την οικονομία. Επομένως, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη πληροφόρησης σε σχέση με τις επιπτώσεις της ξηρασίας σε κάθε περιοχή με στόχο τη διεύρυνση πολιτικών παρακολούθησης, πρόβλεψης, μείωσης και προετοιμασίας για μελλοντικά φαινόμενα. Θα πρέπει να τονιστεί, ότι οι συνέπειες της ξηρασίας εξαρτώνται από τη φυσική μεταβλητότητα της κάθε περιοχής αλλά σε σημαντικό βαθμό και από τον τρόπο διαχείρισης των αναγκαίων φυσικών πόρων από τους ανθρώπους που την περιβάλλουν.

Οι πληροφορίες που αντλούνται από τα χρονοδιαγράμματα για τη διάρκεια και το έτος κατά το οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο ξηρασίας, μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες, τους κυβερνητικούς οργανισμούς και άλλους εμπλεκόμενους ώστε να καταρτίσουν κατάλληλες στρατηγικές αντιμετώπισης ή μείωσης των συνεπειών καθώς και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Με την ταυτοποίηση των περιοχών που αντιμετωπίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε ξηρές συνθήκες, από ιστορικά δεδομένα όπως τουλάχιστον προσπαθήσαμε να κάνουμε για επιλεγμένες περιοχές, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν πλάνα βελτίωσης της παραγωγής σε τοπικό επίπεδο, με σκοπό τη βιώσιμη αγροτική δραστηριότητα και συγχρόνως τη μείωση της ζημίας μιας επερχόμενης ξηρασίας. Όμως είναι απαραίτητο, να υπάρχει σαφής και ολοκληρωμένη πληροφόρηση, ώστε να προβούν στις κατάλληλες ενέργειες οι εμπλεκόμενοι φορείς. Δυστυχώς, τα τελευταία χρόνια, με την αύξηση της ευαισθησίας στις ξηρασίες, η επιστημονική κοινότητα αντιμετωπίζει σοβαρή πρόκληση στη διεξαγωγή ολοκληρωμένων

αξιολογήσεων των επιπτώσεων. Μια αξιολογή προσπάθεια πραγματοποιήθηκε το 2005 από το πανεπιστήμιο της Νεμπράσκα-Λίνκολν, με τη δημιουργία ενός χρήσιμου ηλεκτρονικού εργαλείου (Drought Impact Reporter-DIM), βασισμένου στις συνέπειες των φαινομένων ξηρασίας. Το DIM παρέχει ολοκληρωμένα δεδομένα και υλικό σχετικά με τις συνέπειες από πρόσφατα και παλαιότερα φαινόμενα ξηρασίας και έναν διαδραστικό χάρτη, μέσω του οποίου γίνεται εύκολη η αναζήτηση πληροφοριών για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος. με αυτόν τον τρόπο, υπεύθυνοι κυβερνητικών και μη οργανώσεων καθώς και το κοινό μπορούν να έχουν απευθείας πρόσβαση στις εξελίξεις και να αναλάβουν ευθύνες αντιμετώπισης σε πρακτικό επίπεδο (Wilhite et al., 2007).

Σύμφωνα με την WWF, μερικές από τις πολιτικές εφαρμογής που προτείνει με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων της ξηρασίας περιλαμβάνουν:

- Ελαχιστοποίηση των παράλογων κινήτρων, που επιτείνουν τις αρνητικές επιδράσεις της ξηρασίας, όπως είναι η αλόγιστη άντληση υπόγειου νερού που μπορεί να επιφέρει μακροπρόθεσμα σοβαρά προβλήματα και ταυτόχρονα αυξάνει τις διαμάχες ανάμεσα σε αυτούς που εκμεταλλεύονται τον υπόγειο υδροφόρο και σε εκείνους που δραστηριοποιούνται με τη χρήση των επίγειων αποθεμάτων νερού.
- Μείωση της υπερκατανάλωσης και ρύπανσης του νερού , με στόχο την προστασία της ποιότητας και της ποσότητας των φυσικών υδάτινων οικοσυστημάτων.
- Εκσυγχρονισμός της λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης νερού (φράγματα) με βάση το πλεονεκτήμα της ικανότητας πρόβλεψης ξηρασιών,

για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και την ενίσχυση της παροχής νερού, ενισχύοντας ευκαιρίες ανατροφοδότησης και του υπόγειου νερού.

- Αποκατάσταση και προστασία των φυσικών υδρολογικών συστημάτων στις περιόδους απουσίας ξηρασιών.
- Προώθηση κινήτρων που ενθαρρύνουν τους φορείς στη λήψη μακροπρόθεσμων πολιτικών και μέτρων σε πιθανούς μελλοντικούς κινδύνους ξηρασίας, με τη χορήγηση επιδοτήσεων.

Η αλλαγή του κλίματος και οι καταστροφικές συνέπειες των φαινομένων ξηρασίας επηρεάζει όλους τους τομείς της οικονομίας με κύριο αυτόν της γεωργίας, που μπορεί να χαρακτηριστεί ο πιο ευπαθής και ευάλωτος στις κλιματικές διακυμάνσεις. Ο περιορισμός των επιπτώσεων σε μελλοντικά κλιματικά σενάρια καλείται αναγκαία, όπως επίσης και η προσαρμοστικότητα του στα νέα κλιματικά δεδομένα. Όσον αφορά στα μέτρα προσαρμογής υψηλού κόστους για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου σε περιοχές με ελάχιστες παροχές νερού, αυτά μπορεί να είναι, η κατασκευή φραγμάτων και ταμιευτήρων, η ανύψωση αναχωμάτων, τα δίκτυα παροχής νερού, τα σύγχρονα αρδευτικά δίκτυα, οι υποδομές διόδευσης νερού και τα δίκτυα αφαλάτωσης για την αντιμετώπιση της έλλειψης νερού σε ξηρές περιοχές. Αυτές οι ενέργειες, βέβαια, απαιτούν ολοκληρωμένη μελέτη και βασισμένα αποτελέσματα μελλοντικών κλιματικών συνθηκών. Επιπλέον, υπάρχουν και πολιτικές χαμηλότερου κόστους με σκοπό τη διαθεσιμότητα νερού στη γεωργία. Για παράδειγμα τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ξηρασίας, νέες αλλά και διαχρονικές μέθοδοι καλλιέργειας, όπως αλλαγές στις ημερομηνίες σποράς με βάση τη φαινολογία της καλλιέργειας αλλά και τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και διακυμάνσεις της υγρασίας του εδάφους.

Αυτό θα βοηθήσει στη δημιουργία πρώιμης σποράς, η οποία παρέχει μεγαλύτερης διάρκειας βλαστική περίοδο και προσφέρει χρόνο επανασποράς σε περίπτωση αποτυχίας. Ακόμη, είναι πολύ σημαντικό οι αγροτικές καλλιέργειες να προσαρμόζονται στη σύγχρονη κλιματική ζωνοποίηση με εναλλαγή και αναδιάρθρωσή τους και με καλλιέργειες που έχουν ανθεκτικότητα σε ξηρές συνθήκες, συνυπολογίζοντας και τους οικονομικούς παράγοντες κάθε φορά(κόστος παραγωγής και τιμή διάθεσης προϊόντος). Δεδομένου της ευαισθησίας της παραγωγής στη διαθεσιμότητα νερού και με στόχο την εκλογίκευση των αναγκών νερού, είναι αξιοσημείωτες αλλαγές στις απαιτήσεις αρδεύσεων, με τη βοήθεια συστημάτων παρακολούθησης της ET. Η ύπαρξη κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού αποτελεί ένα ακόμη πλεονέκτημα στη σωστή διαχείριση καλλιεργειών σε περιόδους κλιματικής μεταβλητότητας (ολοκληρωμένα στραγγιστικά συστήματα, συστήματα δορυφορικών και επίγειων παρατηρήσεων, γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών-GIS) αλλά και παραδοσιακών μεθόδων (όργωμα, αγρανάπαυση, αμιψεισπορά καλλιεργειών), καθώς και αλλαγές στη χωρική σχεδίαση χρήσεων γης (Δαλέζιος, 2015). Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας της βιοτεχνολογίας διακρίνεται για την αποτελεσματικότητά του με τον προσδιορισμό των γενετικών βάσεων των φυτών που αντέχουν στην ξηρασία και στοχεύοντας στην ανάπτυξη καλλιεργειών που θα μπορούσαν να ευδοκιμήσουν σε ξηρές συνθήκες, όπως πραγματοποιήθηκε από τον βιολόγο φυτών Dr.XaohanYang. Σε σχέση με τις δράσεις των κυβερνητικών ομάδων και των φορέων εξουσίας, είναι απαραίτητες οι θεσμικές αναμορφώσεις και οι οικονομικές επενδύσεις στην αγροτική έρευνα καθώς και η συνεργασία αυτών με εθελοντικές οργανώσεις μεστόχο την ενημέρωση και εκπαίδευση των

ανθρώπων που ασχολούνται ή επηρεάζονται έμμεσα από την εξέλιξη του γεωργικού τομέα. Η κυβέρνηση, είναι δυνατόν να ενισχύσει τα κίνητρα, προσφέροντας νέες θέσεις εργασίας και να εξασφαλίσει τις τιμές ενάντια σε αλλαγές σε προσφορές με τη βοήθεια προγραμμάτων τροφίμων και να χρηματοδοτήσει στοχευμένα προγράμματα σχετικά με τη βιώσιμη διαχείριση της γεωργίας. Συμπερασματικά, οι ραγδαίες εξελίξεις σε κλιματικό φάσμα, κρούουν τον κώδωνα κινδύνου ιδιαίτερα για τη γεωργία, για την διεύρυνση του τρίπτυχου συνέπειες-αντιμετώπιση-προσαρμογή, ώστε να μειωθούν οι ζημιές και να ενισχυθεί η ανθεκτικότητά της. Οι επιστήμονες θα πρέπει να διαφωτίσουν το κοινό και συγκεκριμένα τους αγρότες, ώστε να προβούν σε προοδευτικές ενέργειες και να εγκαταλείψουν την παθητική στάση στις μεταβολές του κλίματος. Το μέλλον αποτελεί πρόκληση για το σύγχρονο άνθρωπο και απαιτεί προσαρμοστικότητα, ευθύνη και δράση για να μπορέσει να επιβιώσει και να εξελιχθεί παράλληλα με αυτό.

Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

1. Οι δείκτες ξηρασίας αποτελούν πολύτιμα εργαλεία για την μελέτη και την καταγραφή γεγονότων ξηρασίας. Συγκεκριμένα, οι δείκτες SPEI και SPI λόγω της ικανότητας υπολογισμού τους σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα να εντοπίζεται η έλλειψη των αποθεμάτων νερού στον επίγειο (βραχυπρόθεσμα) και υπόγειο(μακρυπρόθεσμα) υδροφορέα. Επιπλέον, είναι

ευέλικτοι καθώς προσαρμόζονται σε διαφορετικές κλιματικά περιοχές και εύκολοι στη χρήση τους, λόγω των ελάχιστων δεδομένων που χρειάζονται για τον υπολογισμό τους.

2. Ανάμεσα στους δείκτες SPI και SPEI, ο SPEI φάνηκε να ανταποκρίνεται καλύτερα στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, αποτυπώνοντας τα φαινόμενα ξηρασίας στις επιλεγμένες περιοχές μελέτης πιο αντιπροσωπευτικά στην πραγματικότητα. Γενικά, οι δύο δείκτες δεν παρουσίασαν πολύ μεγάλες διαφορές, εκτός από κάποιες εξαιρέσεις (Άγιος Νικόλαος), και ειδικά σε περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ήταν χαμηλές. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει αρκετά στην ένταση και διάρκεια μιας ξηρασίας, σε συνδυασμό πάντα και με άλλους παράγοντες (περιβαλλοντικούς, μετεωρολογικούς, φυσικούς, οικονομικοκοινωνικούς κ.α) αλλά και με το ιστορικό υπόβαθρο παρόμοιων γεγονότων κάθε περιοχής. Σε κάθε περίπτωση ο SPEI , αποτελεί εξελίξιμο εργαλείο σε σχέση με τον SPI αφού λαμβάνει υπόψη του και την ET (θερμοκρασιακά δεδομένα).

3. Όσον αφορά στα διαγράμματα, για τη μικρότερη χρονική περίοδο, οι δύο δείκτες ακολουθούν το πρότυπο των βροχοπτώσεων του κάθε μήνα, ενώ αύξηση του χρονικού διαστήματος σε 3 ή 12 μήνες οδηγεί σε πιο αργή απόκριση στις αλλαγές των βροχοπτώσεων, με αποτέλεσμα οι περίοδοι για τις οποίες ο κάθε δείκτης παίρνει αρνητικές ή θετικές τιμές να μειώνονται σε αριθμό, αλλά να αυξάνονται σε διάρκεια.

4. Τα αποτελέσματα της μελέτης μας έδειξαν ότι τα τελευταία χρόνια επικρατούν γεγονότα ξηρασίας με σημαντική ένταση και διάρκεια συνολικά για όλες τις περιοχές της Κρήτης με έντονες εναλλαγές φαινομένων ξηρασίας-

βροχόπτωσης (Διαγράμματα SPI και SPEI). Αυτό αποδεικνύεται όχι μόνο για την περιοχή της Κρήτης αλλά και ευρύτερα των περιοχών της Ανατολικής Μεσογείου. Παρόλα αυτά, αν και δεν ήταν αναμενόμενο λόγω της τοποθεσίας της, η περιοχή των Μοιρών δείχνει να βελτιώνεται σημαντικά, ως προς το πλήθος των βροχοπτώσεων και το σταθερό και σχετικά χαμηλό ρυθμό θερμοκρασιακών διακυμάνσεων.

5. Είναι δεδομένο ότι η ανθρωπογενής συνιστώσα στην κλιματική αλλαγή συνδέεται άμεσα με την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών καταστάσεων. Μελλοντικές έρευνες προβλέπουν ότι το φαινόμενο της ξηρασίας, θα πάρει σημαντικές διαστάσεις και στην Ελλάδα, με επιπτώσεις σε πολλούς τομείς και ιδιαίτερα στον αγροτικό τομέα. Στο πλαίσιο αυτό και υπό την προϋπόθεση των απαραίτητων διαθέσιμων επιστημονικών δεδομένων, θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα, όπως η σωστή ενημέρωση και εκπαίδευση των αγροτών με στόχο μια βιώσιμη αγροτική ανάπτυξη και με μεταρρυθμίσεις στις τεχνικές εκμετάλλευσης της γης, στις αρδευτικές δραστηριότητες για τη μείωση της αλόγιστης κατανάλωσης νερού.

6. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Vicente-Serrano S., B. Santiago, and J.Lopez-Moreno, 2009: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate.*, **23**, 1696-1718.

Van Loon A. F., 2015: Hydrological drought explained. *WIREs Water.*, **2**, 359–392.

Jain V R. P. Pandey, M. K. Jai, & H. R. Byun, 2015: Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes.*, **8**, 1-11.

Jones P. D., and A. Moberg, 2002: Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update to 2001. *Journal of Climate.*, **16**, 206-223.

Sheffield J., and E. F. Wood., 2007: Characteristics of global and regional drought, 1950–2000: Analysis of soil moisture data from off-line simulation of the terrestrial hydrologic cycle. *J. Geophys. Res.*, **112**, D17115.

Beguería, S., [aut, cre] and S. M. Vicente-Serrano., 2017: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. . *Journal of Climate*, **23**:1696.

Beguería, S., [aut, cre] and S. M. Vicente-Serrano., 2007: How to use: Package 'SPEI' for basic calculations

McKee B. T., J. N. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society 179-184.

Spinoni J., J. V. Vogt, G. Naumann, P. Barbosa, and A. Dosio, 2017: Will drought events become more frequent and severe in Europe?. *Int. J. Climatol.*, **38**, 1718–1736.

Zhu W., Lv, A., Jia, S., & Sun, L., 2017: Development and evaluation of the MTVDI for soil moisture monitoring. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 5533–5555.

World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva, **No. 1173**, 1-45.

Zhao S., D. Cong, K. He, H. Yang, and Z. Qin, 2017: Spatial-Temporal Variation of Drought in China from 1982 to 2010 Based on a modified Temperature Vegetation Drought Index (mTVDI). *A nature search journal.*, **7**: 17473.

Russell G. L., J. R. Miller, D. Rind, R. A. Ruedy, G. A. Schmidt, and S. Sheth, 2000: Comparison of model and observed regional temperature changes during the past 40 years. *Journal of geophysical research*, **105(D11)**, 14891-14898.

Kelley P. C., S. Mohtadib, M. A. Canec, R. Seager, and Y. Kushnir, 2015: Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *PNAS*, **early edition**, 1-6.

Rasmijn M. L., G. Van der Schrier, R. Bintanja, J. Barkmeijer, A. Sterl, & W. Hazeleger, 2018: Future equivalent of 2010 Russian heatwave intensified by weakening soil moisture constraints. *Nature Climate Change*, **8**, 381–385 (2018).

Beguería S., S. M. Vicente-Serrano, F. Reig, B. Latorre, 2013: Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International journal of climatology*, **3(10)**, 3001-3023.

Angelidis P., F. Maris, N. Kotsovinos, V. Hrisanthou, 2012 :Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions. *Water resources management*, **26(9)**, 2453-2473

Vicente-Serrano M. S., G. D. Miralles, F. Dominguez-Castro, C. Azorin-Molina, A. El Kenawy, R. T. Mcvihar, M. Tomas-Burguera, S. Begueria, M. Maneta, and M. Pena-Gallardo, 2018: Global Assessment of the Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI) for Drought Analysis and Monitoring. *Journal of climate*, **31(14)**, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-17-0775.1>

Karampatakis T., 2017: Drought Analysis using Meteorological Drought Indices, in Thessaly region, Greece. Greek-French program of postgraduate studies “Management of Hydrometeorological Hazards-Hydrohasards”, 1-70.

Mazdiyasni O., & A. AghaKouchak, 2015: Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States. PNAS., **112(37)**, 11484–11489.

Glotter M., and J. Elliott, 2016: Simulating US agriculture in a modern Dust Bowl drought. Nature plants., **3**, 16193 (2016).

Thompson J., and I. Scoones, 2009: Addressing the dynamics of agri-food systems: an emerging agenda for social science research. Environmental science and policy., **12(4)**, 386-397.

Zipper C. S., J. Qiu, & J. C. Kucharik, 2016: Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. Environ.Res.Lett., **11**, 1748-9326.

Wilhite A., D. M. Svoboda, & M. J. Hayes, 2007: Understanding the Complex Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness. University of Nebraska Agricultural Research Division, Lincoln. Water Resources Management 21, 763–774.

Chartzoulakis K., N. Paranychianakis, and A. Angelakis, 2001: Water resources management in the Island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use. Water Policy., **3(3)**, 193-205.

Heinrich G., and A. Gobiet, 2012: The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. *International Journal of Climatology*., **32**, 1951–1970.

Nikulin G., E. Kjellström, U. Hansson, G. Strandberg, and A. Ullerstig, 2011: Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A*, **63**(1), 41–55

Beniston M., D. B. Stephenson, O. B. Christensen, C. A. T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, and K. Woth, 2007: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic change*., **81**(1), 71–95.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

Definition of Drought, <<https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/dyk/drought-definition>>, τελευταία επίσκεψη: 30/4/18

<http://herslab.tuc.gr/downloads/data>, τελευταία επίσκεψη: 10/5/18

<http://www.kathimerini.gr/940691/article/epikairothta/ellada/h-klimatikh-allagh-mas-xtypaei-apeilhtika-thn-porta>, τελευταία επίσκεψη: 7/6/18

<http://spei.csic.es/home.html>, τελευταία επίσκεψη: 10/6/18

Γεωργακόπουλος, Θ., 2017 ‘Οι Επιπτώσεις Της Κλιματικής Αλλαγής Στην Ελληνική Οικονομία’, <https://www.dianeosis.org/2017/06/climate_change>, τελευταία επίσκεψη: 12/7/18

Di Liberto T., 2018 'Record warmth in February 2018', <<https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/record-warmth-february-2018>>, τελευταία επίσκεψη: 26/6/2018

Di Liberto T., 2017 'Heat roasts the western United States', <<https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/heat-roasts-western-united-states>>, τελευταία επίσκεψη: 26/6/2018

<https://www.aeiforos.gr/contac> , τελευταία επίσκεψη: 26/6/2018

Ζερέφος Χ. και Μ. Σανταμούρης., <<https://www.cnn.gr/focus/story/87053/kaysonas-kai-klimatiki-allagi-kaine-ti-mesogeio>>, τελευταία επίσκεψη: 27/6/2018

Ελαφρός Γ., <<http://www.kathimerini.gr/940691/article/epikairothta/ellada/h-klimatikh-allagh-mas-xtypaei-apeilhtika-thn-porta>>, τελευταία επίσκεψη: 27/6/2018

<https://www.agronews.gr/tech/green-reports/162800/epistimones-epidiokoun-na-anaptuxoun-kalliergeies-anthektikes-sti-xirasia>, τελευταία επίσκεψη: 20/9/18

'Drought risk management' <<http://www.unesco.org>>, τελευταία επίσκεψη: 22/9/18

<http://iopscience.iop.org>, τελευταία επίσκεψη: 23/9/18

Ελληνική βιβλιογραφία

Παρανυχιανάκης, Ν.(2018).Γεωργική μηχανική[Πανεπιστημιακές Σημειώσεις].Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά

Μαρής Φ. (1999). Τεχνική Υδρολογία [Πανεπιστημιακές Σημειώσεις]. Δημοκρίτειο πανεπιστήμιο Θράκης,Τομέας Υδραυλικών Έργων Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων. Κομοτηνή

Κουκούλας Ν., 2018: Κλιματική αλλαγή και χωρικός σχεδιασμός:πολιτικές και κατευθύνσεις με εξιδείκευση στις πόλεις της Θεσσαλίας. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης. Βόλος

Θεοχάρης Μ. (1998), “Η ΑΡΔΕΥΣΗ ΜΕ ΣΤΑΓΟΝΕΣ”, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ηπείρου. Άρτα

Μπαλτάς Ε. (2017). Εργαστήριο υδρολογίας και αξιοποίησης υδατικών πόρων [Πανεπιστημιακές σημειώσεις]. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Δαλέζιος, Ν.(2015) **Κλιματική αλλαγή και γεωργία**. Αθήνα: Κάλλιπος.